



تحلیل تجربی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های بر پایه پلی‌آمید 6 / EPDM / نانولوله‌های کربنی

احسان حمیدی¹، ولی اله پناهی زاده^{2*}

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

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

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

چکیده

اطلاعات مقاله

در این مقاله، خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌هایی بر پایه ماتریسی از دو فاز پلیمری پلی‌آمید 6 و اتیلن پروپیلن دی ان مونومر (EPDM) تقویت شده با نانولوله‌های کربنی بررسی شده است. ترکیبات شامل 0، 1، 2، 3 و 10٪ وزنی نانولوله کربنی و نیز 5 و 10٪ وزنی EPDM-G-MA به‌عنوان سازگار کننده و 10 و 20٪ وزنی EPDM هستند که توسط یک مخلوطکن داخلی تهیه شدند. نمونه‌ها برای انجام آزمون‌های مکانیکی توسط یک دستگاه پرس داغ تهیه شدند. آزمون‌های مکانیکی برای تعیین استحکام‌های ضربه و کشش، مدول الاستیسیته و ازدیاد طول در شکست انجام شدند. مشاهده شد که افزودن 1٪ وزنی نانولوله کربنی، استحکام ضربه را 12٪، استحکام کششی را 25٪ و مدول الاستیک را 43٪ افزایش می‌دهد ولی ازدیاد طول در شکست را 13٪ کاهش می‌دهد. همچنین با حضور 10٪ وزنی EPDM، استحکام ضربه 27٪ و ازدیاد طول در شکست 34٪ افزایش یافته ولی استحکام کششی پلی‌آمید 5 و مدول الاستیک آن 19٪ کاهش می‌یابد. برای بهبود موارد ذکر شده با افزودن 5٪ EPDM-G-MA استحکام ضربه 14٪، استحکام کششی 5٪، مدول الاستیک 20٪ و ازدیاد طول در شکست 13٪ افزایش پیدا کرد. نهایتاً با افزودن نانولوله‌های کربنی و ترکیب EPDM و EPDM-G-MA، همه خواص مکانیکی مذکور در پلی‌آمید 6، بهبود داده شد.

دریافت: 1400/02/18

پذیرش: 1400/05/02

کلیدواژه‌ها:

نانوکامپوزیت
خواص مکانیکی
پلی‌آمید
EPDM
نانولوله‌های کربنی

Experimental Analysis of Mechanical Properties of Nanocomposites Based on Poly amide 6 / EPDM / Carbon Nanotubes

Ehsan Hamidi, 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
EPDM
Carbon Nanotubes

Abstract

In this paper, the mechanical properties of nanocomposites based on a matrix of two phases of polyamide 6 polymer and ethylene propylene diene monomer (EPDM) reinforced with carbon nanotubes are investigated. The compounds include 0%, 1%, 2% and 3% by weight of carbon nanotubes as well as 5 and 10% by weight of EPDM-G-MA as compatible and 10 and 20% by weight of EPDM prepared by an internal mixer. Samples were prepared for mechanical tests by a hot press machine. Mechanical tests were performed to determine the impact and tensile strengths, modulus of elasticity and elongation at failure. It was observed that adding 1% by weight of carbon nanotubes increases the impact strength by 12%, tensile strength by 25% and elastic modulus by 43%, but decreases the failure length by 13%. Also, with the presence of 10% EPDM, impact strength increased by 27% and elongation at fracture by 34%, but the tensile strength of polyamide decreased by 5% and its elastic modulus by 19%. To improve the mentioned cases, by adding 5% EPDM-G-MA, the impact strength increased by 14%, the tensile strength by 5%, the elastic modulus by 20% and the elongation at break by 13%. Finally, by adding carbon nanotubes and combining EPDM and EPDM-G-MA, all the mechanical properties mentioned in polyamide 6 were improved.

1- مقدمه

به‌عنوان یک پلاستیک مهندسی مطلوب، پلی‌آمید 6 (PA6)¹ از سختی و استحکام مناسبی برخوردار بوده و مقاومت به ضربه و لرزش و همچنین عایق الکتریکی و به‌صورت خام دارای کیفیت سطح مناسب و همچنین دارای قابلیت پردازش، مقاومت در برابر سایش بالا و مقاومت در برابر حلال است که بسیار

در مقایسه با فلزات، پلیمرها فراوری بهتر، چگالی کمتر، نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت در برابر خوردگی خوب و اغلب عملکرد بهتری را نسبت به قیمتشان را دارا هستند [1].

¹ Polyamide 6

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

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.

مانند آتیلید مالئیک (MA) است که می‌تواند به صورت درجا با گروه ترمینال آمید نایلون‌ها واکنش نشان دهد تا سازگاری سطحی را به دلیل تشکیل کوپلیمرهای پیوندی بهبود بخشد؛ بنابراین، الاستومرهای اتیلن - پروپیلن پیوند یافته با MA، مانند EPR-g-MA⁵ یا EPDM-g-MA⁶، اغلب برای سخت شدن پلی‌آمیدها استفاده می‌شود [10].

ژانگ و همکارانش [11]، در یک تحقیق، اثر EPDM را با سازگار کننده MA و بدون آن، مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق، با افزودن 20٪ وزنی، EPDM به ماتریس پلی‌آمید، استحکام ضربه را 15 برابر و ازدیاد طول در شکست را تا 3 برابر افزایش دادند. با افزودن 1٪ سازگار کننده MA، به ترکیب سه‌تایی نانوکامپوزیت، استحکام ضربه و ازدیاد طول در شکست، 37٪ افزایش پیدا کرد. در تحقیق دیگری، ژانگ و همکارانش [12]، تأثیر توالی ترکیب مواد تشکیل‌دهنده نانوکامپوزیت را مورد بررسی قرار دادند. در این ترکیبات، 20٪ وزنی EPDM-G-MA افزوده شد که باعث افزایش استحکام ضربه پلی‌آمید به میزان 12 برابر، افزایش پیدا کرد ولی استحکام کششی آن به میزان 26٪، کاهش داشت که این روند در حالات مختلف توالی ترکیب کردن نمونه‌ها پایدار بود. در تحقیق دیگر، وانگ و همکارانش [13]، خواص مکانیکی ترکیب EPDM-G-MA را با پلی‌آمید مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با افزودن 30٪ وزنی EPDM-G-MA، به این نتایج دست یافتند که ازدیاد طول در شکست به میزان 48٪ افزایش، ولی استحکام کششی به میزان 36٪ و مدول الاستیک 49٪، کاهش داشتند.

مطمناً، ترکیب لاستیک یا الاستومر در ماتریس پلیمری می‌تواند به مقاومت سختی دست یابد اما منجر به کاهش مدول و استحکام کششی مخلوط می‌شود؛ بنابراین، برای بهبود فعل‌وانفعال سطحی بین پلیمر میزبان و فاز پراکنده، با معرفی جز سوم انتظار می‌رود که مدول و استحکام مخلوط‌ها را افزایش دهد یا از دست دادن استحکام را به حداقل میزان کاهش دهد. برای به دست آوردن خصوصیات مکانیکی متعادل، ترکیبات سه‌گانه در زمینه‌های تحقیقاتی دانشگاهی و صنعتی بسیار مورد توجه بوده‌اند [10].

ماتریس‌های پلیمری تقویت شده با نانو پرکننده‌ها در دهه‌های اخیر به دلیل خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و حرارتی بیشتر، توجه بسیاری از دانشمندان و صنعتگران را به خود معطوف کرده است [14]. از جمله نانوذرات پرکننده می‌توان به نانوذرات سیلیکا، تیتانیا، نانو رس، کربنات کلسیم و نانولوله‌های کربنی اشاره کرد [15].

گارسیا و همکارانش [16]، با افزودن نانو سیلیکا (SiO₂) به ماتریس پلی‌پروپیلن، به 30٪ افزایش مدول الاستیک و 68٪ افزایش استحکام ضربه دست یافتند. لیو و همکارانش [17]، با ترکیب ذرات تیتانیا (TiO₂) به میزان 3٪ وزنی به ترکیب‌هایی از LLDPE/LDPE¹، استحکام کششی را افزایش دادند. آشنای قاسمی و همکارانش [18]، با اضافه کردن نانو کربنات کلسیم به PP، افزایش استحکام ضربه و مدول الاستیک آن را گزارش کرده‌اند.

نانولوله‌های کربنی (CNT)² یکی از مهم‌ترین نانو پرکننده‌ها هستند که دارای خواص مکانیکی، حرارتی و الکتریکی بسیار عالی هستند، بنابراین به طور گسترده‌ای به عنوان تقویت‌کننده در ماتریس‌های پلیمری مورد استفاده قرار می‌گیرند [14]. ژانگ و همکارانش [12]، با افزودن 4٪ وزنی نانوذرات رس استحکام کششی پلی‌آمید را 42٪ افزایش دادند. لیو و همکارانش [19]، طی

در صنعت حائز اهمیت است [2]. PA6 به دلیل خواص مکانیکی مناسب و مطلوب در صنعت هواپیما، کاربردهای الکتریکی / الکترونیکی، اتومبیل (پرکاربردترین پلاستیک مهندسی در صنعت خودروسازی)، بسته‌بندی، منسوجات (لباس‌های کشتی) و لوازم مصرفی و صنعتی، طناب، ساخت تور، ساخت رشته ابزارآلات موسیقی (تار، سه تار و ویولن)، لایه‌های انعطاف‌پذیر برای بسته‌بندی مواد غذایی فاسدشدنی و موارد دیگر، مورد استفاده قرار می‌گیرند [3].

برخلاف مزایایی که برای پلی‌آمید 6 مطرح شد، محدودیت‌هایی در خواص مکانیکی این ماده، مانند شکنندگی و حساسیت به ترک در دمای پایین، جذب رطوبت و تورم، دمای تابیدگی حرارتی پایین، و بی‌ثباتی ابعادی، از طیف گسترده‌ای از کاربردهای آن در صنعت، جلوگیری کرده است. برای غلبه بر این نقاط ضعف، بسیاری از محققان خواص مکانیکی PA6 را با استفاده از روش‌های تقویت، به طور قابل توجهی بهبود بخشیدند. تقویت معمولاً برای بهبود خواص فلزات پایه مانند مقاومت، سختی، رسانایی و غیره انجام می‌شود [4].

در راستای تقویت خواص مکانیکی پلی‌آمید 6، تحقیقات زیادی انجام شده که در آن‌ها از یک فاز ترکیب شونده برای جبران نقاط ضعف خواص مکانیکی آن، استفاده شده است. بیشتر کارهای انجام شده بر افزودن یک فاز الاستومری به پلی‌آمید، متمرکز بوده است. پیران و همکارانش [5]، با افزودن NBR² به پلی‌آمید به میزان 10٪ وزنی، شاهد افزایش استحکام ضربه و ازدیاد طول در شکست به ترتیب به میزان 25٪ و 58٪ و در عین حال کاهش استحکام کششی و مدول الاستیک به ترتیب به میزان 22٪ و 18٪ بودند. چایو و همکارانش [6]، با افزودن 5٪ وزنی POE³ به پلی‌آمید، به 36٪ افزایش استحکام ضربه، 26٪ ازدیاد طول در شکست، 15٪ کاهش مدول الاستیک، دست پیدا کردند. لیو و همکارانش [7]، به پلی‌آمید، 5٪ ماده SEBS⁴ اضافه کردند و شاهد افزایش دوبرابری استحکام ضربه و بهبود 4٪ ازدیاد طول در شکست بود. در تحقیق دیگری رن و همکارانش [8]، مقدار 20٪ وزنی ABS به پلی‌آمید افزودند و با افزایش دوبرابری استحکام ضربه و کاهش 65٪ ازدیاد طول در شکست، مواجه شدند.

برخی از محققان، از لاستیک اتیلن پروپیلن داین مونومر (EPDM) جهت ترکیب با پلی‌آمید استفاده کرده‌اند که نتایج حاصل نسبت به موارد ترکیبی مشابه، بسیار بهبود قابل توجهی مخصوصاً در استحکام ضربه داشته است. EPDM الاستومری است که از طریق کو پلیمریزاسیون پلی‌اتیلن و پلی‌پروپیلن و مونومر دی ان به دست می‌آید که با این کار به برهم زدن نظم ساختمانی پلی‌اتیلن و پلی‌پروپیلن پرداخته، ویژگی بلورینگی آن‌ها را سلب کرده و پلیمری با ویژگی لاستیکی پدید می‌آید. مزایای EPDM مقاومت در برابر روغن‌های قطبی و مقاومت حرارتی بالا می‌باشد که به عنوان عایق‌های مختلف از آن‌ها استفاده می‌شود. این ماده، همچنین دارای انعطاف‌پذیری در دمای پایین می‌باشد و خاصیت کاملاً لاستیکی دارد. به همین دلیل از این الاستومر برای افزایش استحکام ضربه کامپوزیت‌ها استفاده می‌شود [9].

به‌طور کلی، PA6 و لاستیک اصلاح نشده از نظر ترمودینامیکی قابل اختلاط نیستند بنابراین، دانه‌های بزرگ ذرات لاستیک در طی فرآوری مذاب تشکیل می‌شوند. لاستیک فراوری شده همیشه گزینه خوبی برای بهبود سازگاری بین فاز لاستیک و ماتریس پلیمر است. لاستیک عملکردی شامل یک گروه واکنشی

⁶ Ethylene Propylene Dine Monomer-Grafted with- Maleic anhydride

¹ Linear Low-density polyethylene/ Low-density polyethylene

² carbon nanotubes

² acrylonitrile butadiene rubber

³ polyolefin elastomer

⁴ styrene-ethylene-butylene-styrene

⁵ Ethylene Propylene rubber-Grafted with- Maleic anhydride

ضربه آیزود ZWICK مدل LIH02 ساخت کشور آلمان مطابق با استاندارد ASTM D256 انجام شد. تصاویر SEM⁴ از سطح شکست نمونه‌ها بعد از آزمون ضربه توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل AIS-2100 ساخت شرکت SERON کشور کره جنوبی انجام شد. سطح نمونه‌ها برای جلوگیری از بار الکتریکی در طی آزمایش، توسط طلا و به اندازه 10 nm روکش دهی شدند. سپس با ولتاژ کاری برابر 25 KV آزمایش‌ها انجام شد.

جدول 1 فرمولاسیون نانو کامپوزیت‌های تهیه شده

Table 1 Sample formulations of materials

شماره ترکیب	درصد وزنی نانولوله کربنی	درصد وزنی EPDM-G-MA	درصد وزنی EPDM	درصد وزنی پلی‌آمید 6
1	0	0	0	100
2	1	0	0	99
3	2	0	0	98
4	3	0	0	97
5	0	5	0	95
6	0	10	0	90
7	0	0	10	90
8	0	5	10	85
9	1	5	10	84
10	2	5	10	83
11	3	5	10	82
12	0	10	10	80
13	1	10	10	79
14	2	10	10	78
15	3	10	10	77
16	0	0	20	80
17	0	5	20	75
18	1	5	20	74
19	2	5	20	73
20	3	5	20	72
21	0	10	20	70
22	1	10	20	69
23	2	10	20	68
24	3	10	20	67

3- نتایج و بحث

3-1- مطالعات ریخت‌شناسی

بررسی دقیق و کامل سطح شکست نمونه‌های نانو کامپوزیتی به علت وجود مواد نانو و پیوندهای میکروسکوپی میان فاز زمینه و تقویت‌کننده و همچنین نحوه پخش مواد نانو در فاز زمینه نیازمند مطالعه با دستگاه‌های میکروسکوپی الکترونی پیشرفته می‌باشد. بدین منظور بررسی سطح شکست نمونه‌ها، توزیع و پراکندگی و مکانیزم اثرگذاری نانولوله‌های کربنی در فاز زمینه، با استفاده از میکروسکوپ SEM مورد مطالعه قرار گرفت. تصاویر SEM گرفته شده از سطح شکست نمونه‌های ضربه در شکل‌های 1 و 2 نشان داده شده است. شکل 1- الف و 1- ب، تصویر گرفته شده از سطح شکست نمونه با 10٪ وزنی EPDM، 5٪ EPDM-G-MA و 1٪ نانولوله کربنی را با بزرگنمایی 10 kx و 33 kx نشان می‌دهند. شکل‌های 1- ج و 1- د تصاویر مربوط به سطح شکست نمونه با 10٪ وزنی EPDM، 5٪ EPDM-G-MA و 2٪ نانولوله کربنی با بزرگنمایی 33 kx و 10 kx هستند که در تصاویر مذکور، پراکندگی مناسب نانولوله در فاز ماتریس پلیمری با 1٪ و 2٪ وزنی مشاهده می‌شود. اما در

تحقیقی به این نتیجه رسیدند که با داشتن تنها 2٪ وزنی CNT، مدول الاستیک و استحکام تسلیم، به ترتیب در حدود 214٪ و 162٪ بهبود یافته‌اند. در تحقیق دیگری چن و همکارانش [20]، دریافته‌اند که مدول الاستیک پلی‌آمید 6 خالص، با افزودن 1٪ وزنی نانولوله کربنی، 162٪ استحکام کششی 149٪ و سختی آن 106٪ افزایش پیدا کرد. در تحقیق دیگری، پالاردی و همکارانش [21]، مطرح کردند که ترکیب نانولوله‌های کربنی در الیاف گرماترم می‌تواند به طور بالقوه خواص مکانیکی، حرارتی و الکتریکی را بهبود بخشد. در تحقیق حاضر اثر افزودن مواد تقویت‌کننده EPDM و نانولوله‌های کربنی جهت ایجاد تعادل در بهبود خواص مکانیکی ماتریس پلی‌آمید 6 مورد بررسی قرار گرفت. نانو کامپوزیت‌های بر پایه پلی‌آمید 6 / EPDM / با افزودن نانولوله‌های کربنی توسط یک مخلوط‌کن داخلی³ تهیه شدند. درصدهای وزنی مختلفی از نانولوله‌های کربنی (0٪، 1٪، 2٪ و 3٪ وزنی)، EPDM (10٪ و 20٪ وزنی) و EPDM-G-MA (5٪ و 10٪ وزنی)، در ماتریس پایه پلی‌آمید 6 استفاده شد. آنگاه خواص مکانیکی نانو کامپوزیت حاصل و تأثیر هر یک از اجزا بر خواص مکانیکی (استحکام ضربه، مدول الاستیسیته و استحکام کششی و ازدیاد طول در شکست) بررسی شد.

2- مواد و روش‌ها

2-1- مواد

پلی‌آمید 6 با نام تجاری (Akulon F223-D) تهیه شده از شرکت DSM ساخت کشور هلند دارای چگالی 1130 kg/m³ به‌عنوان زمینه (ماتریس) انتخاب شد. نانولوله‌های کربنی با درصد خلوص بالای 98٪، و با قطر متوسط 15nm و طول تقریبی 30µm ساخت کشور چین مورد استفاده قرار گرفت. همچنین در این تحقیق از EPDM نوع KEP 270 که شامل 57٪ وزنی اتیلن، 4.5٪ وزنی دی‌ان مونومر و دارای چگالی 0.9 g/cm³ محصول شرکت Kumho کره جنوبی استفاده شده است.

2-2- نمونه‌سازی

به طور کلی مواد در 24 حالت برای تهیه نمونه‌های آزمون‌های مکانیکی با هم ترکیب شدند که در جدول 1 ارائه شده است. تمامی نمونه‌ها به روش اختلاط مذاب و با استفاده از مخلوط‌کن داخلی مدل BRABENDER TYP 815700 ساخت کشور آلمان با سرعت 65 rpm در دمای 220°C تهیه شدند. بعد از مذاب کردن پلی‌آمید در مخلوط‌کن داخلی، نانولوله کربنی در درصدهای وزنی 0٪، 1٪، 2٪ و 3٪، EPDM-G-MA در درصدهای وزنی 5٪ و 10٪ و EPDM با درصدهای وزنی 10٪ و 20٪ با هم مخلوط شدند که زمان اختلاط برای تمامی نمونه‌ها 10 min در نظر گرفته شد. همچنین برای هر ترکیب تعداد 6 نمونه جهت آزمون‌های کشش و ضربه، با استفاده از قالب‌گیری فشاری توسط دستگاه پرس گرم محصول شرکت حقیقت ساخت کشور ایران در دمای 250°C و فشار 2.5 MPa تهیه شد.

2-3- آزمون‌ها

آزمون کشش با استفاده از دستگاه ZWICK ROELL مدل Z100 مطابق با استاندارد ASTM D638 با سرعت فک‌های 5mm/min انجام شد. کشش نمونه‌ها تا زمان گسیختگی کامل آن‌ها ادامه پیدا می‌کرد. آزمون ضربه در دمای اتاق و با ابعاد 63.5 × 12.70 × 10 mm و با استفاده از دستگاه آزمون

⁴ Scanning Electron Microscope

³ Internal Mixer

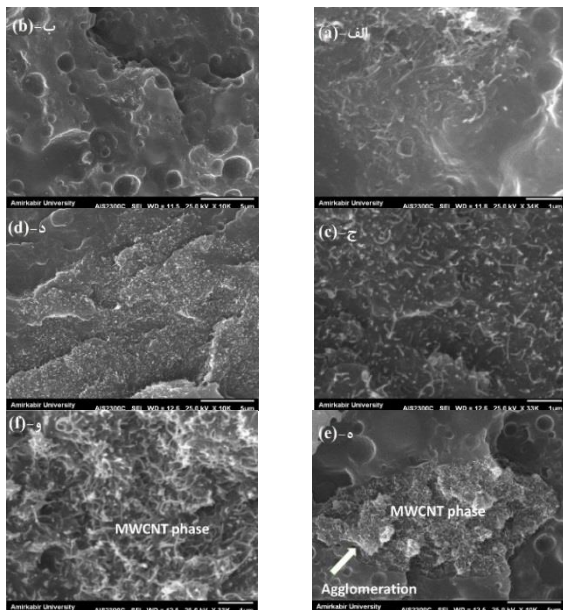


Fig. 2 The image of sample including 20 wt% EPDM, 5 wt% EPDM-G-MA and, (a & b) 1 wt%, (c & d) 2 wt%, (e & f) 3 wt% carbon nanotube.

شکل 2 تصویر نمونه شامل 20 وزنی EPDM، 5 وزنی EPDM-G-MA و (الف و ب) با 1 وزنی، (ج و د) با 2 وزنی و (ه و و) با 3 وزنی نانولوله کربنی

3 - 2- استحکام ضربه

شکل 3 تأثیر حضور نانولوله‌های کربنی بر استحکام ضربه نانوکامپوزیت با 10٪ و 20٪ وزنی EPDM را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، افزودن نانولوله کربنی تا 1٪ به ترکیب، استحکام ضربه در ترکیب با 5٪ وزنی سازگار کننده را از 39(J/m) به 39.42(J/m) و استحکام ضربه در ترکیب با 10٪ وزنی سازگار کننده را، از 49(J/m) به 50.2 (J/m)، افزایش داده است و هرچه درصد نانولوله کربنی بیشتر شده، استحکام ضربه ضعیف‌تر شده است به طوری که با افزودن 2٪ وزنی نانولوله کربنی، استحکام ضربه، 18٪ کاهش پیدا کرده است. مقدار درصد وزنی نانولوله کربنی در فاز زمینه نانوکامپوزیت در میزان تغییرات استحکام ضربه نمونه‌ها نقش بسزا و قابل‌ملاحظه‌ای دارد که این تغییرات می‌تواند ناشی از نحوه پخش نانولوله‌ها در فاز زمینه و همچنین ایجاد استحکام متفاوت مابین فاز زمینه و EPDM با توجه تغییر درصد وزنی مواد نانو باشد. افزودن نانولوله کربنی تا 1٪ وزنی سبب افزایش استحکام ضربه می‌شود که این به دلیل تقویت ماتریس توسط نانولوله با فرایند پل‌زنی افزایش می‌باشد. استفاده بیش از 1٪ وزنی نانولوله کربنی به دلیل کلوخه شدن احتمالی ذرات موجب افت خواص استحکام ضربه می‌شود که این مساله در مرجع [23] نیز تأکید شده است.

ولی به طور کلی استحکام ضربه این دو ترکیب، نسبت به پلی‌آمید خالص، افزایش دارد که تأثیر EPDM و EPDM-G-MA را نشان می‌دهد. افزایش EPDM از 10٪ وزنی به 20٪ وزنی، باعث افزایش در استحکام ضربه شده است. شوارتر و همکارانش [24] دلیل این امر را انعطاف‌پذیری بالای EPDM در دمای پایین می‌باشد، معرفی کرده‌اند.

همچنین همان‌طور که در شکل 3 مشاهده می‌شود، افزایش میزان EPDM-G-MA از 5٪ به 10٪، باعث افزایش بیشتر استحکام ضربه شده است. دلیل این افزایش استحکام ضربه، بالارفتن میزان چسبندگی میان پلی‌آمید 6 و EPDM توسط سازگار کننده می‌باشد.

شکل 1- ه و 1- و با افزایش میزان نانولوله تا 3٪ وزنی، شاهد مقداری کلوخه شدن نانوذرات هستیم. کلوخه شدن باعث ضعف خواص مکانیکی پلی‌آمید خواهد شد. هنگامی که پرکننده به محتوای بحرانی می‌رسد، فاصله بین نانولوله‌های کربنی چند جداره بسیار کم می‌شود به طوری که نیروهای واندروالس قابل توجه شده، نانولوله‌ها ممکن است کلوخه شوند که سطح تماس مؤثر بین نانولوله و زمینه پلیمر را کاهش می‌دهد. در نتیجه، تقویت زمینه توسط نانولوله کاهش می‌یابد و منجر به بازده تقویتی پایین‌تر می‌شود. این مطلب در مرجع [22] نیز تأیید شده است.

شکل 2- الف و 2- ب، تصاویر مربوط به سطح شکست نمونه با 20٪ وزنی EPDM، 10٪ EPDM-G-MA و 1٪ نانولوله کربنی را با بزرگ‌نمایی 10 kx و 34 kx نشان می‌دهند. شکل‌های 2- ج و 2- د نشان‌دهنده سطح شکست نمونه با 20٪ وزنی EPDM، 10٪ EPDM-G-MA و 2٪ نانولوله کربنی با بزرگ‌نمایی 33 kx و 10 kx هستند. در این درصدهای وزنی از نانولوله، توزیع و پراکندگی نسبتاً مناسبی به چشم می‌خورد. چسبندگی بین زمینه و بارگذاری‌های مختلف پیوسته و ضربه، از زمینه به تقویت‌کننده می‌شود و اثرات مستقیمی بر خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌ها دارد. اما در شکل‌های 2- ه و 2- و با افزایش نانولوله کربنی تا 3٪ وزنی، کلوخه‌هایی از نانولوله کربنی تشکیل شده است. این کلوخه‌ها، می‌تواند بر روی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت، اثر منفی ایجاد کنند.

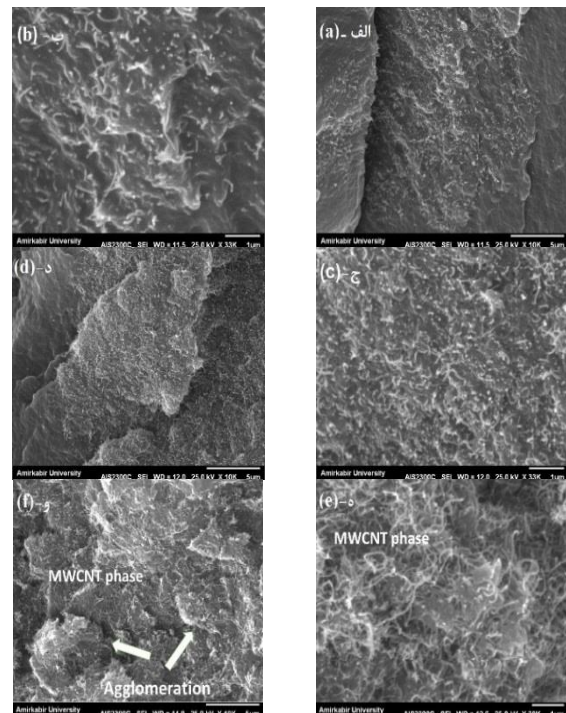


Fig. 1 The image of sample including 10 wt% EPDM, 5 wt% EPDM-G-MA and, (a & b) 1 wt%, (c & d) 2 wt%, (e & f) 3 wt% carbon nanotube.

شکل 1 تصویر نمونه شامل 10٪ وزنی EPDM، 5٪ وزنی EPDM-G-MA و (الف و ب) با 1 وزنی، (ج و د) با 2 وزنی و (ه و و) با 3٪ وزنی نانولوله کربنی

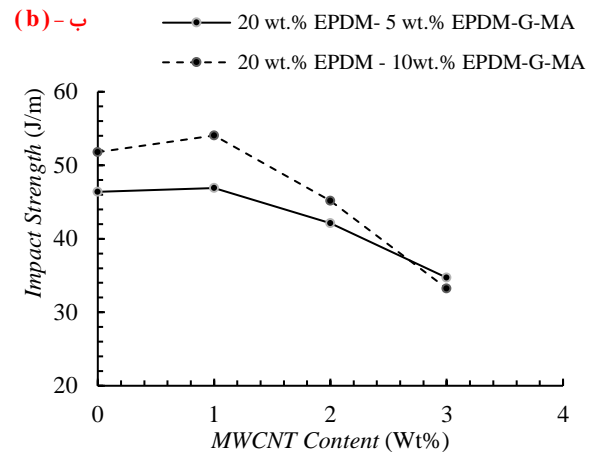
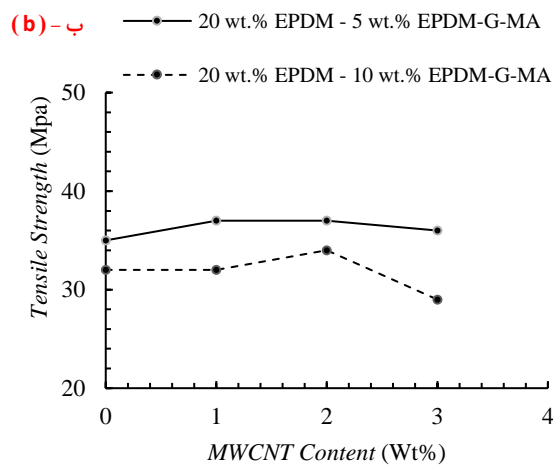
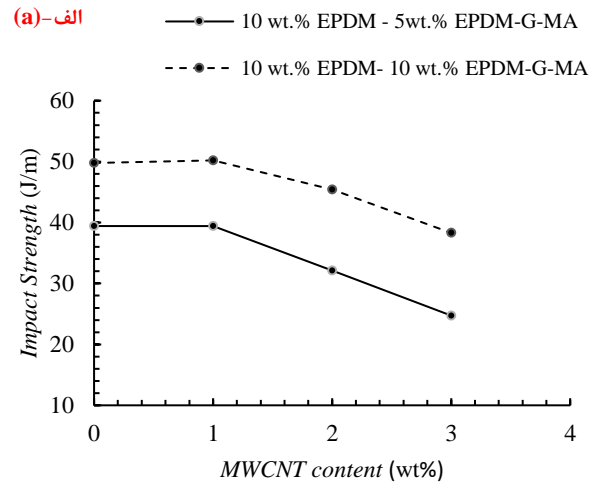
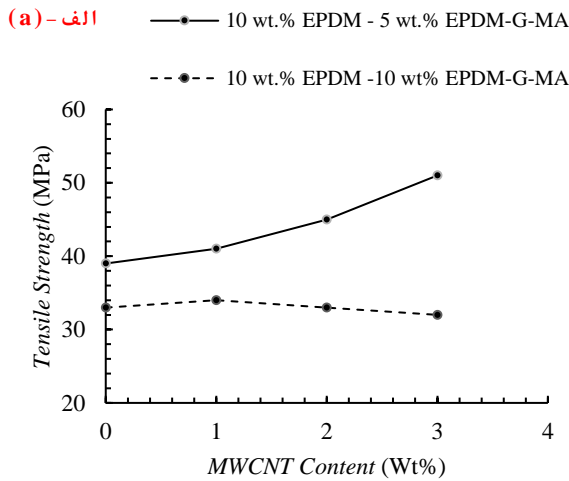


Fig. 4 The effect of MWCNT on tensile strength, (a) with EPDM content 10%, (b) with EPDM content 20%

Fig. 3 The effect of MWCNT on impact strength, (a) with EPDM content 10%, (b) with EPDM content 20%

شکل 4. تأثیر حضور نانولوله‌های کربنی بر استحکام کششی، (الف) با حضور 10% وزنی EPDM، (ب) با حضور 20% وزنی EPDM

شکل 3. تأثیر حضور نانولوله‌های کربنی بر استحکام ضربه (الف) با حضور 10% وزنی EPDM و (ب) با حضور 20% وزنی EPDM

3-3-4 -مدول الاستیک

شکل 5 نمودار تأثیر حضور نانولوله‌های کربنی بر مدول الاستیک را نشان می‌دهند. ملاحظه می‌شود، به‌طور کلی افزودن نانولوله کربنی به ترکیبات، افزایش مدول الاستیک را به دنبال دارد و دلیل آن پراکندگی مناسب نانولوله‌ها و ایجاد چسبندگی سطحی قوی بین نانولوله‌ها و ماتریس بوده است. این افزایش مدول با نتایج تحقیق پالاردی و همکارانش [21] مطابقت دارد. همچنین افزایش EPDM باعث کاهش مدول الاستیک در ترکیب شده است و علت این است که الاستومر EPDM نسبت به پلی‌آمید، نرم‌تر بوده و دارای مدول الاستیک کمتری می‌باشد. افزایش EPDM-G-MA به ترکیب باعث کاهش مدول الاستیک شد که دلیل آن ایجاد چسبندگی بیشتر میان EPDM و پلی‌آمید است که منجر به این می‌شود که مدول الاستیک، بیشتر به سمت مدول الاستومر موجود در ترکیب سوق پیدا کند تا اینکه به سمت پلی‌آمید برود.

3-3-3 استحکام کششی

شکل 4 تأثیر حضور نانولوله‌های کربنی بر استحکام کششی را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، افزودن نانولوله کربنی به ترتیب، تا 1٪، 2٪ و 3٪ وزنی باعث افزایش 5٪، 15٪ و 30٪ استحکام کششی شده است. علت این افزایش استحکام کششی، ایجاد چسبندگی سطحی شدید بین نانولوله‌ها و ماتریس است. در تحقیق دیگری توسط اسماعیلی و همکاران [25] دلیل دیگر این افزایش استحکام کششی، خواص مکانیکی فوق‌العاده نانولوله‌های کربنی بیان شده است.

همچنین افزایش 10٪ وزنی EPDM، استحکام کششی را کاهش داد که علت آن را می‌توان نرم‌تر بودن EPDM نسبت به پلی‌آمید دانست. همان‌طور که در نمودارهای شکل 4 مشخص است، افزودن EPDM-G-MA، کاهش استحکام کششی ناشی از حضور EPDM را بهبود بخشیده که این مورد در اثر افزایش چسبندگی میان پلی‌آمید و EPDM توسط سازگار کننده است.

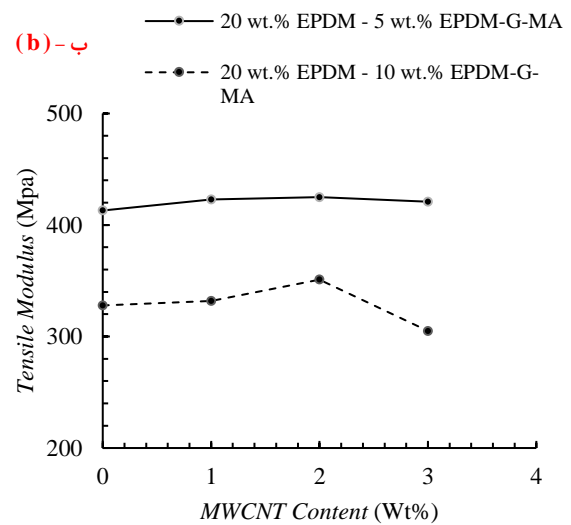
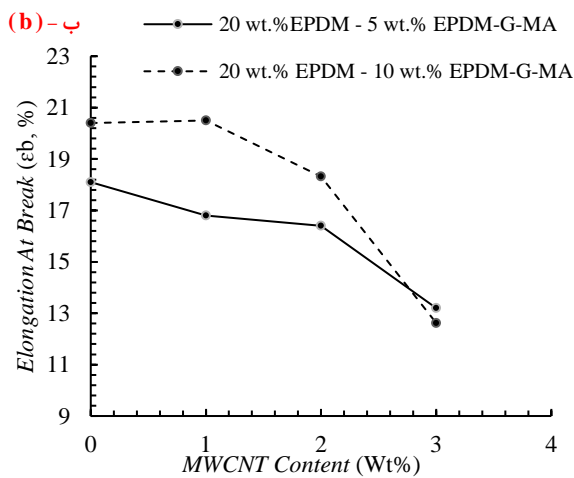
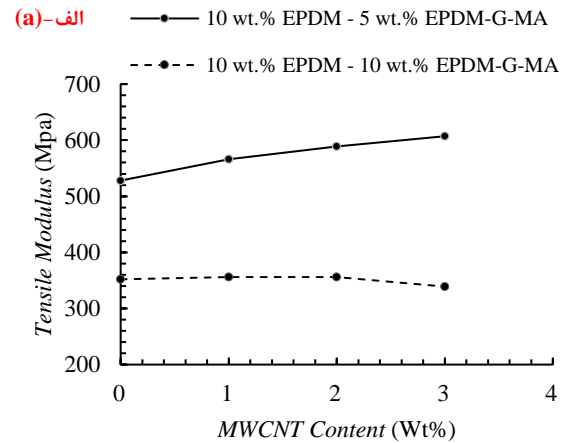
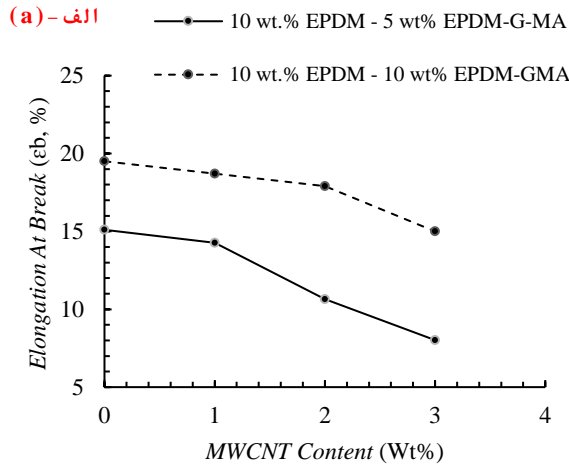


Fig. 6 The effect of MWCNT on elongation at break, (a) with EPDM content 10%, (b) with EPDM content 20%

شکل 6. تأثیر حضور نانولوله‌های کربنی بر ازدیاد طول در شکست، (الف) با حضور 10% وزنی EPDM، (ب) با حضور 20% وزنی EPDM

Fig. 5 The effect of MWCNT on elastic modulus, (a) with EPDM content 10%, (b) with EPDM content 20%

شکل 5. تأثیر حضور نانولوله‌های کربنی بر مدول الاستیک، (الف) با حضور 10% وزنی EPDM، (ب) با حضور 20% وزنی EPDM

به طور یکه افزودن 5٪ سازگار کننده، ازدیاد طول در شکست را 29٪ افزایش داده است. باتوجه به شکل 6 - ب، به نظر می‌رسد که تأثیر افزایش هم‌زمان نانولوله کربنی و سازگار کننده، باعث کاهش ازدیاد طول در شکست شده که دلیل این موضوع می‌تواند افزایش برهم‌کنش بین نانولوله‌های کربنی و EPDM توسط سازگار کننده باشد و اثر کاهشی نانولوله‌ها بر ازدیاد طول را بیشتر کند.

4 - نتیجه‌گیری

در این مقاله، خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های شامل زمینه‌ای از دو فاز پلیمری PA6/EPDM تقویت شده با نانولوله‌های کربنی بررسی شده است. نتایج نشان داد:

- 1- افزودن نانولوله‌های کربنی به پلی‌آمید 6، تا 1٪ وزنی، استحکام کششی آن را 25٪، استحکام ضربه را 12٪ و مدول الاستیک را 43٪ افزایش داده است.
- 2- افزودن EPDM به پلی‌آمید 6، تا 10٪ وزنی استحکام ضربه آن را 17٪ و ازدیاد طول در شکست را 34٪ افزایش می‌دهد ولی استحکام کششی آن 5٪ و مدول الاستیک آن 19٪، کاهش می‌یابد.

3-5 - ازدیاد طول در شکست

همان‌طور که در شکل 6 آمده است، افزودن نانولوله کربنی به ترکیب، ازدیاد طول در شکست را کاهش می‌دهد. به طوری که با افزایش 1٪ نانولوله کربنی به ترکیب، کاهش 5٪ ازدیاد طول در شکست را ایجاد کرده است. البته در شکل 6 - ب، افزودن 1٪ نانولوله کربنی به ترکیب نانوکامپوزیت با 20٪ وزنی EPDM و 10٪ EPDM-G-MA باعث افزایش 0.5٪ ازدیاد طول در شکست شده که این مورد می‌تواند در نتیجه خواص مکانیکی عالی نانولوله‌های کربنی باشد. افزودن EPDM به ترکیب باعث افزایش ازدیاد طول در شکست می‌شود. به طوری که در آزمایش‌های انجام شده با افزودن 10٪ وزنی EPDM به پلی‌آمید 6، 34٪ ازدیاد طول در شکست مشاهده شد. این مورد با مقایسه بین شکل 6 - الف و 6 - ب مشخص است. شکل 6 - الف، دارای 10٪ وزنی و شکل 6 - ب دارای 20٪ وزنی EPDM می‌باشد که روند افزایشی ازدیاد طول در شکست را نشان می‌دهد که دلیل آن نرم‌تر بودن EPDM نسبت به پلی‌آمید می‌باشد. همچنین افزودن سازگار کننده EPDM-G-MA، باعث افزایش ازدیاد طول در شکست شده است.

- Propylene Diene Monomer Nanocomposites Reinforced by Multi-Wall Carbon Nanotubes,” *Journal of Polymer Composites*, Vol. 39, No S2, pp. E745–E753, 2018.
- [15] Ashenai-Ghasemi, F., Saberian, M. H., Ghasemi, I., Daneshpayeh, S., “Experimental Investigation on Mechanical Properties of Hybrid Nano-Composite Based on Epoxy/Graphene Nano-Platelets/Carboxylated Acrylonitrile Butadiene Rubber,” In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 5, No. 3, pp. 395-402, 2018.
- [16] Garcia, M., Vilet, G.V., Jain, S., “Polypropylene/SiO₂ Nanocomposites with Improved Mechanical Properties,” *Journal of Reviews On Advanced Materials*, Vol. 6, No 2, pp. 169-175, 2004.
- [17] Gang, L., Feng, L.Y., Yuan, Y.F., Xing, Z.Z., Ji, X.Q., “Effect of Nanoscale SiO₂ and TiO₂ as the Fillers on the Mechanical Properties and Aging Behavior of Linear Low Density Polyethylene/Low Density Polyethylene Blends,” *Journal of Polymers and the Environment*, Vol.13, No.4, pp. 339-348, 2005.
- [18] Ashenai-Ghasemi, F., Payganeh, Gh., Rahmani, M., “The Effect of Stearic Acid Surface-Modified Calcium Carbonate Nanoparticles and PP-g-MA on the Mechanical Properties of PP/CaCO₃/PP-g-MA Nanocomposites,” In Persian, *Journal of Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 4, pp. 139-152, 2013.
- [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] 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.
- [21] 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.
- [22] Liao, W. H., Tien, H. W., Hsiao, S. T., Li, S. M., Wang, Y.S., Huang, Y. L., Wu, Y., “Effects of Multiwalled Carbon Nanotubes Functionalization on the Morphology and Mechanical and Thermal Properties of Carbon Fiber/vinyl Ester Composites,” *Journal of ACS Applied Materials & Interfaces*, Vol. 5, No 9, pp. 3975-3982, 2013.
- [23] Bashiri Goodarzi, H., Yarmohammad Tooski, M., “An Experimental Study of the Effects of Carbon Nanotube and Graphene Addition on the Impact Strength of Epoxy/Basalt Fiber Composite,” In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 6, No.3, pp. 411-418, 2019.
- [24] Shoartz, S. S. and Godman, S. H., “Thermoplastic,” Translation by Abasian, A. and Manocheri, S. and Nazokdast, H., First edition., Behrozan Publicatin Company, Tehran, pp.1-276, 1377.
- [25] Esmaili, P., Azdast, T., Doniavi, A., Hasanzadeh, R., Mamaghani, S., 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.
- 3- افزودن EPDM-G-MA به کامپوزیت ساخته شده، به میزان 5٪ وزنی، می‌تواند تا 2٪، کاهش استحکام کششی، 13٪ کاهش مدول الاستیک، 14٪ کاهش استحکام ضربه و 13٪ کاهش مقدار ازدیاد طول در شکست ناشی از افزودن EPDM را جبران نماید.
- 4- ترکیب بهینه پیشنهادی برای بهبود همه خواص مکانیکی مذکور، جهت استفاده در صنعت، نانوکامپوزیت دارای 84٪ پلی‌آمید 6، 10٪ EPDM، 5٪ سازگار کننده EPDM-G-MA و 1٪ نانولوله کربنی می‌باشد که در این درصد‌های وزنی ماتریس پایه و تقویت‌کننده‌ها، هر چهار خاصیت مکانیکی مورد بررسی، در نانوکامپوزیت حاصل شده، افزایش پیدا کرده است.

5- مراجع

- [1] Lapcik, L., Jindrova, P., Lapcikova, B., Tambllyn, R. G., “Effect of the Talc Filler Content on the Mechanical Properties of Polypropylene Composites,” *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 110, No. 5, pp. 2742-2747, 2008.
- [2] Zaferani, S. H., “Introduction of Polymer-Based Nanocomposites,” *Petroleum University of Technology (PUT), Abadan, Iran*, pp 1–25, 2018.
- [3] Latko, P., Boczkowska, A., “Flexible and Stretchable Electronic Composites,” *Springer International Publishing: Berlin, Germany*, 2016.
- [4] Sathees Kumar, S., Kanagaraj, G., “Effect of Graphite and Silicon Carbide Fillers on Mechanical Properties of PA6 Polymer Composites,” *Journal of Polymer Engineering*, Vol.37, No 6, pp.1-11, 2017.
- [5] Parani, S.M.R., Naderi, Gh., Ghoreishy, M.H.R., “Effect of Halloysite Nanotube on Microstructure, Rheological and Mechanical Properties of Dynamically Vulcanized PA6/NBR Thermoplastic Vulcanizates,” *Journal of Soft Materials*, Vol. 14, No 3, pp.127-139, 2016.
- [6] Chiu, F.C., 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.
- [7] Liu, P.B., Qiu, J., Fan, P., Zhou, H. W., Xu, W., “Mechanical properties of PA6 blended with SEBS functionalised through ozone treatment,” *State Key Laboratory of Polymer Materials Engineering, Sichuan University, Plastics, Rubber and Composites*, VOL 36, NO 7/8, pp.304-307, 2007.
- [8] Ren, J., Wang, H., Jian, L., Zhang, J., Yang, Sh., “Morphological, Thermal and Mechanical Properties of Compatibilized Nylon 6/ABS Blends,” *Journal of Macromolecular Science, Part B: Physics*, Vol. 47, No 4, pp.712-722, 2008.
- [9] Nouri-Niyaraki, M., Ashenai-Ghasemi, F., Ghasemi, I., Daneshpayeh, S., “Experimental Analysis of Graphene Nanoparticles and Glass Fibers Effect on Mechanical and Thermal Properties of Polypropylene/EPDM Based Nanocomposites,” In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 05, No. 02, pp. 169 176, 2018.
- [10] 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, 5064–5070, 2012.
- [11] Zhang, L., Wan, Ch., Zhang, Y., “Polyamide 6/Maleated Ethylene–Propylene–Diene Rubber/Organoclay Composites with or Without Glycidyl Methacrylate as a Compatibilizer,” *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 110, No 3, pp. 1870–1879, 2008.
- [12] Zhang, L., Wan, Ch. Zhang, Y., “Investigation on Morphology and Mechanical Properties of Polyamide 6/Maleated Ethylene Propylene–Diene Rubber/Organoclay Composites,” *Society of Plastics Engineers*, Vol. 49, No 3, pp. 209–216, 2009.
- [13] Wang, Y.J., Chen, S., Shi, Y.Q., Dong, Y.X., Fu, L.D., Xu, X.B., Wang, X., “Mechanical Properties and Tensile Deformation Behavior of Polyamide 6/Maleated and Unmaleated Ethylene Propylene Diene Terpolymer/Nano-CaCO₃ Ternary Composites,” *Journal of Macromolecular Science, Part B: Physics*, Vol. 52, No 6, pp. 797-811, 2013.
- [14] Jahed, M., Naderi, Gh., Ghoreishy, M.H.R., “Microstructure, Mechanical, and Rheological Properties of Natural Rubber/Ethylene

