



The Effect of Recycled Polyamide 6.6 Content in Combination with Virgin on the Mechanical Properties in Injection Process

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Gorji A.¹ *MSc*,
Saraeian P.^{2*} *PhD*,
Maghsoud Pour A.¹ *PhD*,
Shakouri E.³ *PhD*

How to cite this article

Gorji A, Saraeian P, Maghsoud Pour A, Shakouri E. The Effect of Recycled Polyamide 6.6 Content in Combination with Virgin on the Mechanical Properties in Injection Process. Modares Mechanical Engineering. 2021;21(3):173-182.

¹Department of Mechanical Engineering, College of mechanic, electronic, computer, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

²Department of Mechanical Engineering, College of mechanic Najafabad Branch, Islamic Azad University, Esfahan, Iran.

³Department of Mechanical Engineering, College of mechanic North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

*Correspondence

Address: Department of Mechanical Engineering, College of mechanic Najafabad Branch, Islamic Azad University, Esfahan, Iran.

Phone: -

Fax: -

P_Saraeian@iau-tnd.ac.ir

Article History

Received: June 06, 2020

Accepted: November 14, 2020

ePublished: March 06, 2021

ABSTRACT

Nowadays, the increasing use of polymeric materials is increasing waste and damage to the environment. There are various recycling methods that reduce the mechanical properties of the product; hence it restricts the use of recycled materials. Therefore, combining recycled polymeric materials with virgin polymeric materials is one of the easiest ways to overcome the reduction of mechanical properties, and therefore it is very important to determine the optimal combination of virgin and recycled polymeric materials. In this study, recycled polyamide 6,6 with different weight percentages were combined with virgin polyamide, and after preparing the samples, by the injection molding process, the effect of weight percentage of recycled polyamide on the mechanical properties of the samples was studied. The results of this study showed that adding more than 50% of recycled polyamide to virgin materials increases the melt flow index, glass transition temperature, and crystallization temperature. On the other hand, with increasing the weight percentage of recycled polyamide, the mechanical properties of the samples decrease. However, due to the use of 50% recycled polyamide, the tensile strength, flexural strength, and impact resistance of the samples are reduced 6%, 9%, and 34% respectively.

Keywords Plastic Injection Molding Process, Mechanical Recycling, Mechanical Properties, Polyamide 6.6.

CITATION LINKS

[1] Polyesters and polyamides [2] In New Trends in Eco-efficient and Recycled ... [3] Current approaches to waste polymer utilization ... [4] The effects of recycling process on thermal, chemical, rheological, and mechanical properties of PC/ABS binary and PA6/PC/ABS ternary blends [5] Influence of recycled ABS added to virgin polymers on the physical, mechanical properties and molding characteristics [6] Thermal and mechanical properties of injection molded recycled high density polyethylene blends with virgin isotactic polypropylene [7] The Mechanical Properties of Recycled Polyethylene-Polyethylene Terephthalate ... [8] Preparation and characterization of properties of acrylonitrile butadiene styrene waste plastic blended with virgin styrene butadiene rubber [9] Tensile and flexural investigation on polypropylene recycling [10] Recycling of Waste Mixed Plastics Blends (PE/PP) [11] Use of recycled polypropylene/poly blends to manufacture water pipes: An industrial scale study [12] Design and Characterization of a New Food Packaging Material by Recycling Blends Virgin and Recovered polyethylene terephthalate [13] Development of recycled blends based on cables and wires with plastic cabinets: An effective solution for value addition of hazardous waste plastics [14] Characterization of monopolymer blend of virgin and recycled polyamide 6 [15] The effect of virgin nylon addition into recycled nylon on the fatigue strength of thermoplastic nylon ... [16] Datasheet Tecomid® NA40 NL IL [17] Investigation and effect of number of recycling steps on molten flow rate and crystalline percent... [18] Effect of simulated mechanical recycling processes on the structure and properties ... [19] DSC as problem solving tool: measurement of percent crystallinity of thermoplastics [20] Influence of reprocessing on the mechanical properties and structure of polyamide 6 [21] Physical-mechanical properties and morphological study on nylon-6 recycling by injection molding [22] Valorization of poly (lactic acid) wastes via mechanical recycling: Improvement of the properties ...

تأثیر میزان پلی‌آمید ۶,۶ بازیافتی در ترکیب با مواد نو بر روی خواص مکانیکی در فرآیند تزریق

احمدگرگی MSc

کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مکانیک، برق، کامپیوتر، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

پیام سرائیان PhD*

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مکانیک واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

عادل مقصود پور PhD

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مکانیک، برق، کامپیوتر، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

احسان شکوری PhD

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مکانیک واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

چکیده

با توجه به گسترش روزافزون استفاده از محصولات ساخته شده از مواد پلاستیکی، سالیانه درصد بالایی از ضایعات پلاستیکی وارد پسماندها و زباله‌ها می‌شوند که بازیافت این ضایعات پلاستیکی، معمولاً با افت خواص مکانیکی آنها همراه می‌باشد. یکی از ساده‌ترین و به‌صرفه‌ترین راه‌های غلبه بر افت خواص مکانیکی محصولات بازیافتی و کاهش میزان استفاده از مواد پلیمری نو، دستیابی به یک ترکیب بهینه جهت ترکیب مواد پلیمری بازیافتی با مواد پلیمری نو، به منظور تولید محصولات با کیفیت بالا و خواص مکانیکی مطلوب خواهد بود که از نظر زیست‌محیطی و اقتصادی بسیار حائز اهمیت می‌باشد. در این پژوهش، به منظور بررسی تأثیر درصد وزنی ترکیب پلی‌آمید بازیافتی با پلی‌آمید نو بر خواص مکانیکی نمونه‌ها، نمونه‌های پلی‌آمید ۶,۶ بازیافتی و پلی‌آمید ۶,۶ نو با درصدهای وزنی مختلف توسط فرآیند قالب‌گیری تزریق پلاستیک تهیه شده است. نتایج حاصل از انجام تست‌های مکانیکی بر روی نمونه‌های تزریق شده نشان داد، افزودن بیش از ۵۰٪ وزنی پلی‌آمید بازیافتی به مواد نو، افزایش شاخص جریان مذاب، دمای انتقال شیشه‌ای و دمای کریستالی را به همراه داشته است. در حالی که، خواص مکانیکی نمونه‌ها با افزایش درصد وزنی پلی‌آمید بازیافتی در ترکیب کاهش یافته است. این تغییرات برای برخی خواص مانند استحکام کششی و خمشی ناچیز و برای مقاومت در برابر ضربه بیشتر بوده است. به طوری که، استحکام کششی و خمشی نمونه‌ها و مقاومت در برابر ضربه، به ازای استفاده از ۵۰٪ درصد وزنی پلی‌آمید بازیافتی در ترکیب، به ترتیب در حدود ۶٪، ۹٪ و ۳۴٪ نسبت به نمونه پلی‌آمید نو کاهش یافته است.

کلیدواژه‌ها: فرآیند قالب‌گیری تزریق پلاستیک، بازیافت مکانیکی، خواص مکانیکی، پلی‌آمید ۶,۶.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۳/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۲۴

*نویسنده مسئول: P_Saraeian@iau-tnd.ac.ir

۱- مقدمه

مواد پلیمری به دلیل دارا بودن طیف وسیعی از خواص، نظیر مقاومت در برابر خوردگی و خستگی، عایق الکتریکی، نسبت استحکام به وزن بالا و انعطاف پذیری، در جامعه مدرن امروزی

نقش مهمی ایفا می‌کنند. با توجه به استفاده روز افزون بشر از محصولات ساخته شده از مواد پلیمری و تبعات زیست محیطی ناشی از آن، بازیافت و استفاده مجدد از این مواد مورد توجه قرار گرفته است. تاریخچه تولید و استفاده از پلیمر پلی‌آمید به سال ۱۹۲۸ باز می‌گردد، در این سال شرکت آمریکایی دوپونت (Dopunt)، محصول خود را با نام تجاری نایلون ۶,۶ به بازار عرضه کرد. بعدها در سال ۱۹۳۸ تولید و تجاری سازی الیاف ساخته شده از این پلیمر آغاز شد و در سال ۱۹۴۱ پودر نایلون ۶,۶ جهت ساخت محصولات به روش تزریق وارد بازار شدند. پلی‌آمیدها، پلیمرهای نیمه کریستالی (semi crystalline) از خانواده ترموپلاستیک‌ها (Thermo plastics) هستند که به دلیل پیوندهای هیدروژنی گروه‌های آمیدی، از استحکام فوق‌العاده‌ای برخوردار هستند [1,2].

تفاوت میان گریدهای مختلف پلی‌آمید را می‌توان تفاوت در درجه کریستالی آنها، زوج یا فرد بودن تعداد کربن و بالاخره تفاوت در فاصله بین زنجیره‌ای مولکولی و به عبارتی تفاوت در شدت و ضعف نیروهای بین مولکولی آنها دانست. ویژگی‌های مکانیکی، محدوده ذوب شوندگی کریستال‌ها و جذب رطوبت پلی‌آمیدها، تابعی از درجه کریستالی آنها می‌باشد. پلی‌آمیدها در صنایع مختلف از جمله خودروسازی، تولید الیاف پلیمری، وسایل ورزشی، ساخت لوله و شلنگ، تولید پارچه و فرش، برد مدارهای الکتریکی و کابل‌های فیبر نوری کاربرد دارند و بازیافت آنها غالباً با محدودیت‌ها و موانعی مواجه است که افت خواص مکانیکی، از مهمترین آنها می‌باشد [3,4].

طی تحقیقی، تأثیر ترکیب درصدهای مختلفی از پلیمر بازیافتی اکریلونیتریل بوتادین استایرن (ABS) با رزین‌های نو GPPC-D350 و Toray-100MPM، بر خواص مکانیکی آن مورد بررسی قرار گرفت. نتیجه تحقیقات نشان داد که افزایش درصد وزنی (ABS) بازیافتی در ترکیب، کاهش استحکام خمشی نمونه‌ها را در پی داشته است، همچنین با افزایش درصد وزنی مواد بازیافتی در ترکیب، دمای انتقال شیشه‌ای و شاخص جریان مذاب نیز افزایش نشان داد [5]. در پژوهشی، خواص مکانیکی ترکیب پلی‌اتیلن سنگین بازیافتی (rHDPE) با پلی‌پروپیلن نو (vPP) در فرآیند تزریق مورد بررسی قرار گرفت. وجود دو قله ذوب در آزمون کالریمتری روبشی تفاضلی (DSC) نشان داد که پلی‌پروپیلن نو به خوبی در زمینه پلی‌اتیلن بازیافتی پراکنده (disperse) نمی‌شود و خواص مکانیکی نظیر استحکام کششی ترکیب نیز، متأثر از خواص حرارتی ترکیب rHDPE/vPP می‌باشد [6].

نتایج حاصل از تحقیق انجام شده پیرامون تأثیر ترکیب مقادیر مختلف از پلی‌اتیلن ترفتالات (PET) بازیافت شده به عنوان یک پرکننده با پلی‌اتیلن (PE) بازیافتی نشان داد که اضافه کردن (PET) بازیافت شده، کاهش شاخص جریان مذاب و استحکام

نشان داد، ترکیبات مورد بررسی بیشترین شکنندگی را در مقایسه با نمونه خالص داشته‌اند^[14].

طی تحقیقی به بررسی تأثیر ترکیب نایلون بازیافتی و نو بر استحکام خستگی پایه دندان مصنوعی گرمانرم پرداخته شد. نتایج نشان داد استفاده از ترکیب ۴۰٪ وزنی نایلون بازیافتی با ۶۰٪ نایلون نو، سبب پر شدن نواحی آمورف و تراکم فضای بین مولکولی نایلون بازیافتی شده و افزایش درجه کریستالی ترکیب را در پی دارد که علاوه بر بهبود استحکام خستگی محصول نسبت به محصول ساخته شده از نایلون بازیافتی، از خواص زیست سازگاری مطلوبی نیز برخوردار است^[15].

از آنجایی که امروزه یکی از مهمترین چالش‌های زندگی بشر حفاظت از منابع تولید و حفظ محیط زیست است، بازیافت مواد پلاستیکی و تولید محصولات با کیفیت از آنها بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. بازیافت پلیمرها با محدودیت‌هایی نظیر افت خواص مکانیکی روبرو می‌باشد، از این رو، تحقیقات وسیعی پیرامون بررسی تأثیر تعداد مراحل بازیافت، ترکیب مواد بازیافتی و نو و تأثیر استفاده از افزودنی‌ها و سازگارکننده‌ها بر خواص مکانیکی و کیفیت محصول نهایی انجام شده است. یکی از ساده‌ترین روش‌ها برای بازیابی مواد پلاستیکی و غلبه بر محدودیت‌های نام برده شده مخلوط کردن آن با مواد پلیمری نو می‌باشد. طی مطالعه تحقیقات پیشین، در ارتباط با تأثیر درصد وزنی پلی‌آمید ۶،۶ بازیافتی در ترکیب با مواد نو، بر خواص مکانیکی قطعات تولید شده طی فرآیند تزریق، موردی یافت نشد. بنابراین، در این پژوهش ابتدا پلی‌آمید بازیافتی با مواد نو طی درصد وزنی‌های مشخص مخلوط شد. سپس طی فرآیند تزریق نمونه‌ها مطابق با استاندارد های ذکر شده در آزمون‌های مکانیکی تهیه گردید. در نهایت نیز طی آزمون‌های مکانیکی مختلف، تأثیر افزودن پلی‌آمید بازیافتی به مواد نو بر خواص مکانیکی نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. به این ترتیب، در این مطالعه تلاش شده که با بهره‌گیری از تحقیقات انجام شده در این زمینه و بررسی خواص مکانیکی نمونه‌های ساخته شده از ترکیب مواد بازیافتی و نو، گامی هر چند کوچک در پیشبرد و گسترش استفاده از مواد بازیافتی و حفظ محیط زیست برداشته شود.

۲- روش تجربی

ماده اولیه جهت تولید نمونه‌ها در این تحقیق، شامل ماده پلیمری پلی‌آمید ۶،۶ با گرید IL40 NA از محصولات شرکت تمین پلاستیک می‌باشد که مشخصات مکانیکی آن در (جدول ۱) ارائه شده است.

در این پژوهش، پس از تهیه گرانول پلی‌آمید ۶،۶ و خرد کردن پلی‌آمید حاصل از یک‌بار سیکل تزریق، با استفاده از دستگاه خردکن پلاستیک HR، به منظور حذف رطوبت موجود در پلیمر،

کششی و ضربه‌ای ترکیب را در بر داشته است. درحالی‌که، سختی و مدول کششی ترکیب بهبود یافته است^[7].

طی بررسی تأثیر درصد ترکیب استایرن‌بوتادین‌رابر (SBR) نو با اکریلونیتریل‌بوتادین‌استایرن (ABS) بازیافتی، بر خواص فیزیکی و مکانیکی ترکیب، نتایج حاصل از آزمون‌های مکانیکی نشان دهنده کاهش مدول و تنش خمشی با افزایش درصد (SBR) بود. علاوه بر آن استحکام ضربه نیز با افزایش درصد (SBR) در ترکیب افزایش نشان داد^[8].

مطالعه تأثیر درصد ترکیب پلی‌پروپیلن بازیافتی (PP) با مواد نو بر خواص مکانیکی ترکیب نشان داد که با افزایش ۲۵٪ پلی‌پروپیلن بازیافتی به ترکیب، درصد ازدیاد طول نسبت به نمونه ساخته شده از مواد نو، بهبود یافته است. درحالی‌که، افزایش درصد وزنی پلی‌پروپیلن بازیافتی در ترکیب کاهش استحکام خمشی نمونه‌ها را در پی داشته است^[9].

طی پژوهشی، به بررسی تأثیر درصد وزنی پلی‌اتیلن (PE) و پلی‌پروپیلن (PP) بازیافتی و همچنین تأثیر استفاده از سازگارکننده اتیلن‌پروپیلن‌دی‌ان‌مونومر (EPDM) بر خواص مکانیکی ترکیب پرداخته شد. نتایج نشان داد که مدول خمشی با افزایش درصد وزنی پلی‌اتیلن بازیافتی در ترکیب کاهش می‌یابد و افزایش مقدار سازگارکننده در ترکیب، افزایش استحکام کششی نمونه‌ها را به دنبال داشته است^[10].

نتایج حاصل از مطالعه تأثیر استفاده از مواد بازیافتی بر خواص مکانیکی لوله‌های ساخته شده از ترکیب مواد بازیافتی و نو نشان داد که استفاده از ۳۰٪ وزنی پلی‌اتیلن‌ترفتالات (PET) بازیافتی به پلی‌پروپیلن (PP) نو به همراه ۵٪ سازگارکننده، بهبود مقاومت محصول در برابر ضربه را سبب شده است^[11].

نتایج حاصل از تحقیق پیرامون استفاده از ترکیب پلی‌اتیلن‌ترفتالات (PET) بازیافتی با مواد نو جهت استفاده در بسته‌بندی مواد غذایی نشان داد که استفاده از ترکیب ۳۰:۷۰ به ترتیب برای (PET) بازیافتی و نو، بهبود درجه بلورینگی و خواص مکانیکی ترکیب را در بر داشته است^[12]. طی بررسی خواص حرارتی و مکانیکی ترکیب پلیمرهای بازیافتی نتایج نشان داد که ترکیب بازیافتی پلی‌وینیل‌کلراید (PVC) و اکریلونیتریل‌بوتادین‌استایرن (ABS) خواص مکانیکی مطلوب‌تری را نسبت به ترکیب بازیافتی پلی‌وینیل‌کلراید (PVC) و پلی‌استایرن مقاوم (HIPS) داشته است. به طوری‌که ترکیب (ABS)/(PVC) به عنوان یک ترکیب بهینه معرفی شد^[13].

طی پژوهشی خواص مکانیکی و رئولوژی ترکیب درصد‌های وزنی مختلف از سه نوع پلی‌آمید ۶ بازیافتی با پلی‌آمید نو مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که تغییرات خواص مکانیکی و رفتار پیچیده آنها وابسته به تفاوت‌های مورفولوژی و کریستالی ترکیبات در حالت جامد و برخی آثار هسته‌زایی در وزن‌های مولکولی پایین‌تر در زنجیره مولکولی تخریب شده است. نتایج

جدول ۱) مشخصات مکانیکی پلی‌آمید ۶/۶ [16]

پلیمر پلی‌آمید		
خواص	مقدار	استاندارد
چگالی	1/09 g/cm ³	ISO 1183
استحکام تسلیم	60 Mpa	ISO 527
مدول کششی	2300 Mpa	ISO 527
قابلیت جذب آب	2/2 %	ISO 62
دمای ذوب	262 °C	ISO 11357

مواد به مدت ۴ ساعت داخل کوره حرارتی MEMMERT با دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد.

جهت بررسی تجربی تأثیر درصد وزنی پلی‌آمید بازیافتی در ترکیب با مواد نو، بر خواص مکانیکی ترکیب در فرآیند تزریق، مطابق (جدول ۲) به معرفی پارامتر متغیر و سطوح آن پرداخته شد. انتخاب سطوح، با مراجعه به پیشینه تحقیقات انجام شده است. به این منظور، ۵ ترکیب مختلف با درصد وزنی متفاوتی از پلی‌آمید نو و بازیافتی مورد مطالعه قرار گرفته است [7,9].

در ادامه، جهت تهیه نمونه با درصدهای وزنی مختلف از پلیمر نو و بازیافتی، مواد با دقت ۰/۰۰۱ گرم توسط ترازوی دیجیتال، مورد توزین قرار گرفتند. در نهایت پس از ترکیب مواد مطابق با سطوح تعیین شده، عملیات تزریق با استفاده از دستگاه تزریق پلاستیک ۲۰۰ تن ایمن ماشین مدل MA 10000، با ظرفیت تزریق ۳۰۰ گرم، انجام شد. مطابق (شکل ۱)، به منظور تهیه نمونه‌های قابل استفاده در آزمون‌های مکانیکی مختلف، نمونه‌ها مطابق با استاندارد مورد استفاده برای هر نمونه، به شکل‌های دمبلی، مکعب مستطیل ساده و شیاردار (notched)، قالب‌گیری شده است.

طی این پژوهش، پارامترهای تزریق برای ساخت نمونه‌ها ثابت در نظر گرفته شده و فرآیند تزریق، با فشار تزریق ثابت ۳۲ بار و زمان خنک‌کاری ۲۰ ثانیه انجام شد. همچنین سرعت ماردون ۳۵

جدول ۲) پارامتر متغیر و سطوح آن

پارامتر	سطوح
درصد وزنی پلی‌آمید	(A) 100 PA / 0 R-PA
	(B) 70 PA / 30 R-PA
	(C) 50 PA / 50 R-PA
	(D) 30 PA / 70 R-PA
	(E) 0 PA / 100 R-PA



شکل ۱) قالب تزریق پلاستیک

سانتی‌متر بر دقیقه تنظیم شد و دمای قالب نیز طی فرآیند تزریق ثابت بود، به طوری که، به منظور اطمینان از ثابت بودن دمای قالب طی فرآیند، علاوه بر ترموکوپل دستگاه از دماسنج لیزری MASTECH استفاده گردید. اندازه‌گیری انجام شده از فواصل یکسان انجام شد و دمای اندازه‌گیری شده طی فرآیند تزریق عدد ثابت ۷۷/۵ درجه سانتی‌گراد را نشان داد.

پس از اتمام فرآیند تزریق، آزمون‌های مختلف مکانیکی نظیر آزمون کشش، خمش سه نقطه، ضربه و سختی روی نمونه‌ها انجام گرفت. به این منظور، آزمون میکروکشش و خمش سه نقطه روی نمونه‌ها، با استفاده از دستگاه تست کشش سنتام مدل STM-20 و به ترتیب طی استانداردهای ASTM D1708-96 و ASTM D790- انجام شد. در ادامه با استفاده از دستگاه تست ضربه سنتام مدل SIT-20E، آزمون ضربه به روش آیزود و مطابق با استاندارد ASTM-D256 و با استفاده از پاندول ۲۰ ژول روی نمونه‌ها انجام شد. همچنین، آزمون سختی نیز با استفاده از دستگاه Wolpert به روش برینل روی نمونه‌ها انجام گرفت و میزان نفوذ ساچمه، با اندازه‌گیری قطر ناحیه فرورفته در نمونه، توسط میکروسکوپ Olympus مدل BX51M با بزرگ‌نمایی ۵۰ برابر اندازه‌گیری شد.

در ادامه به منظور بررسی تأثیر ترکیب مواد نو با بازیافتی بر خواص حرارتی و تغییرات ساختار مولکولی نمونه‌ها، آزمون‌های شاخص جریان مذاب (MFI) و آزمون کالریمتری روبشی تفاضلی (DSC)، نیز انجام شد. اندازه‌گیری شاخص جریان مذاب با استفاده از دستگاه Gotech مدل GT-7100-MI و طی استاندارد ASTM D 1238 انجام شده است. به منظور اندازه‌گیری شاخص جریان مذاب نمونه‌ها، پس از خردکردن، گرانول سازی و خشک‌سازی مواد به مدت ۵ ساعت در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد، مواد توسط قیف مخصوص به داخل قالب تعبیه شده در سیلندر دستگاه ریخته شده و سپس نمونه‌ها تحت دمای ۲۳۰ درجه سانتی‌گراد و با استفاده از وزنه‌ای به جرم ۲/۱۶ کیلوگرم تحت آزمون قرار گرفتند. به منظور افزایش فراوانی نمونه‌ها و به دنبال آن افزایش دقت آزمون، مواد خروجی از قالب هر ۱۰ ثانیه یکبار توسط کاتر اتوماتیک دستگاه برش خورده و توزین شدند. در نهایت نیز با استفاده از تناسب، نرخ جریان مذاب نمونه‌ها در ۱۰ دقیقه محاسبه شده است.

آزمون کالریمتری روبشی تفاضلی نیز توسط دستگاه Perkin Elmer مدل Diamond 3418-99 و طی استاندارد ISO 11357 روی نمونه‌ها انجام گرفت. به منظور انجام آزمون گرماسنجی روبشی تفاضلی نمونه‌ها، ابتدا در حدود ۴ میلی‌گرم از نمونه پودری آماده‌سازی شده، از دمای محیط تا دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد با نرخ حرارتی ۲۰ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه گرم شد و به مدت ۳ دقیقه در این دما نگهداری شد. سپس، نمونه‌ها با نرخ حرارتی ۱۰ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه از دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد تا دمای

همان‌طور که در برخی از مقالات به آن اشاره شده، طی فرآیند بازیافت، زنجیره‌های مولکولی شکسته شده و به دلیل ایجاد شاخه‌های جانبی در پلیمر نیمه کریستالی، وزن مولکولی و گرانشی پلیمر افزایش می‌یابد. به همین دلیل در ابتدا، با افزودن پلیمر بازیافتی به مواد نو، نرخ جریان مذاب کاهش یافته است. با ادامه روند افزایش درصد وزنی پلی‌آمید بازیافتی در ترکیب و به دنبال آن با از بین رفتن نیروهای بین مولکولی میان زنجیره‌های شکسته شده، جنبش مولکولی در سطح افزایش یافته و به این ترتیب با نرم شدن تدریجی پلیمر، نرخ جریان مذاب افزایش می‌یابد [17]. بنابراین با توجه به تغییرات شاخص جریان مذاب، می‌بایست ملاحظات لازم جهت ساخت محصولاتی که کیفیت آنها به تغییرات وزن مولکولی و گرانشی حساس است و یا فرایندهای تولید حساس به شاخص جریان مذاب در نظر گرفته شود.

۳-۲- بررسی تأثیر درصد وزنی پلی‌آمید بازیافتی در ترکیب با مواد نو بر دمای کریستالی، دمای انتقال شیشه‌ای و درصد کریستالی نمونه‌ها
پس از انجام آزمون کالریمتری روبشی تفاضلی مطابق با روش و استاندارد بیان شده، نتایج در (شکل ۳) ارائه شده است. در این شکل نمودارهای مربوط به تغییرات حرارتی نمونه‌ها برای درصد‌های وزنی مختلف از ترکیب پلی‌آمید بازیافتی و نو نشان داده شده است.

همچنین به منظور سهولت مقایسه، نتایج در (جدول ۳) نیز ارائه گردیده است. همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، افزایش درصد وزنی پلی‌آمید بازیافتی در ترکیب به ۳۰٪ (نمونه B)، کاهش دمای کریستالی در حدود ۶٪ را در پی داشته است. همچنین، ادامه روند افزایش درصد وزنی پلی‌آمید بازیافتی در ترکیب از ۳۰٪ به ۵۰٪ وزنی (نمونه C)، سبب کاهش دمای کریستالی در حدود ۱۴٪ شده است. این در حالی است که با افزایش درصد وزنی پلی‌آمید بازیافتی در ترکیب از ۵۰٪ به ۷۰٪ (نمونه D)، دمای کریستالی به مقدار جزئی و در حدود ۳٪ افزایش یافت و با ادامه روند افزایش درصد وزنی پلی‌آمید بازیافتی در ترکیب از ۷۰٪ به ۱۰۰٪ (نمونه E)، دمای کریستالی در حدود ۳۲٪ افزایش یافته است. زیرا همان‌طور که در برخی از منابع به آن اشاره شده، انجام فرآیند بازیافت، سبب شکسته شدن زنجیره‌های پلیمری می‌شود. شکسته شدن زنجیره‌های پلیمری، سبب افزایش آزادی و تحرک مولکول‌ها شده که موجب می‌شود تبلور مجدد ساختار پلیمری در دماهای پائین‌تری رخ دهد [18].

همچنین مطابق (شکل ۴)، دمای انتقال شیشه‌ای برای نمونه خالص ۱۲۲/۱۶ درجه سانتی‌گراد گزارش شد و افزایش درصد وزنی پلی‌آمید بازیافتی در ترکیب به ۳۰٪ و ۵۰٪، سبب کاهش دمای انتقال شیشه‌ای، به ترتیب در حدود ۱۶٪ و ۲۹٪ نسبت به

محیط تحت گاز نیتروژن با نرخ جریان ۲۰ میلی‌لیتر بر دقیقه سرد شدند. به این ترتیب اطلاعاتی در مورد دمای بلورینگی، دمای ذوب، دمای شیشه‌ای و آنتالپی نمونه‌ها توسط نرم‌افزار دستگاه و در قالب نمودار حاصل شد. همچنین جهت اطمینان از نتایج حاصل از آزمون‌ها، هر آزمون سه بار تکرار شد و سرانجام نیز با استفاده از نتایج حاصل از آزمون‌های انجام شده، مناسب‌ترین نسبت برای ترکیب پلیمر پلی‌آمید نو و بازیافتی تعیین گردید.

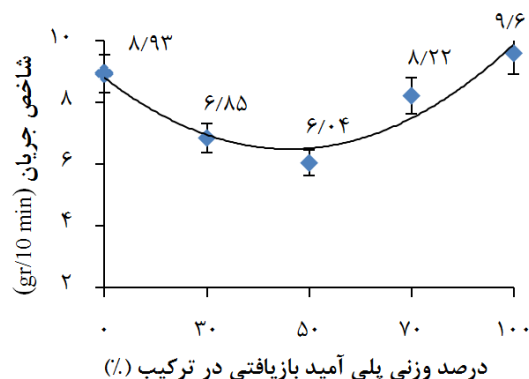
۳-نتایج و بحث

در این قسمت نتایج حاصل از آزمون‌های حرارتی نظیر شاخص جریان مذاب، کالریمتری روبشی تفاضلی و آزمون‌های مکانیکی مختلف نظیر تست کشش، خمش، سختی و ضربه روی نمونه‌های تولید شده با درصد‌های وزنی متفاوتی از ترکیب پلی‌آمید نو و بازیافتی مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است.

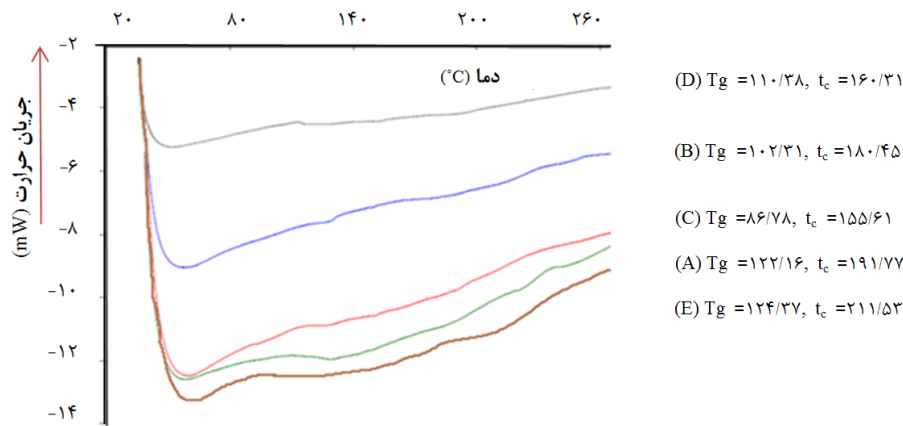
۳-۱- بررسی تأثیر درصد وزنی پلی‌آمید بازیافتی در ترکیب با مواد نو بر شاخص جریان مذاب نمونه‌ها

پس از انجام آزمون شاخص جریان مذاب مطابق با روش و استاندارد بیان شده، جهت بررسی و تحلیل ساده‌تر نتایج به صورت نمودار ارائه شده است. همان‌طور که در (شکل ۲) مشاهده می‌شود، مقدار شاخص جریان مذاب برای نمونه خالص که در آن از ۱۰۰٪ پلی‌آمید نو استفاده شده، ۸/۹۳ گرم بر ۱۰ دقیقه به دست آمده است. با افزودن ۳۰٪ و ۵۰٪ وزنی پلی‌آمید بازیافتی به ترکیب، مقدار شاخص جریان مذاب به ترتیب در حدود ۲۳٪ و ۳۳٪ نسبت به نمونه خالص، کاهش نشان داد. در ادامه، با افزایش درصد پلی‌آمید بازیافتی در ترکیب از ۵۰٪ به ۷۰٪ وزنی و تغییر در روند نمودار، مقدار شاخص جریان مذاب در حدود ۳۶٪ افزایش نشان داد و همچنین افزایش درصد وزنی پلی‌آمید بازیافتی در ترکیب از ۷۰٪ به ۱۰۰٪ وزنی، شاخص جریان مذاب را در حدود ۱۷٪ افزایش داد.

علت تغییرات بیان شده را می‌توان به شکسته شدن زنجیره‌های مولکولی پلیمر و نیروهای بین مولکولی نسبت داد. زیرا



شکل ۲) تغییرات شاخص جریان مذاب در درصد وزنی پلی‌آمید بازیافتی در ترکیب



شکل ۳) نتایج کالریمتری روبشی تفاضلی

جدول ۳) مقادیر مربوط به دمای کریستالی، دمای انتقال شیشه‌ای و درصد کریستالی

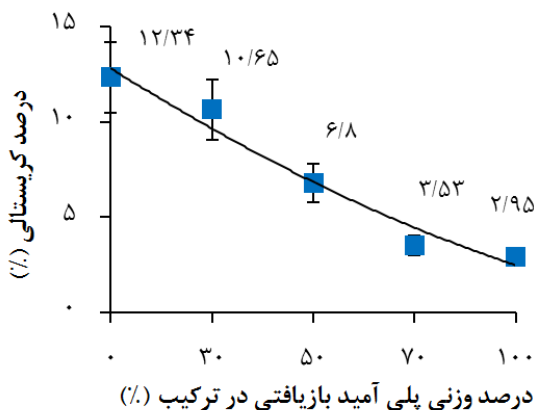
کریستالی شدن نمونه‌ها نیز، با استفاده از مقادیر آنتالپی به دست آمده طی آزمون کالریمتری روبشی تفاضلی و با استفاده از معادله (۱) محاسبه شد.

$$X\% = \frac{\Delta H}{\Delta H_m} \times 100 \quad (1)$$

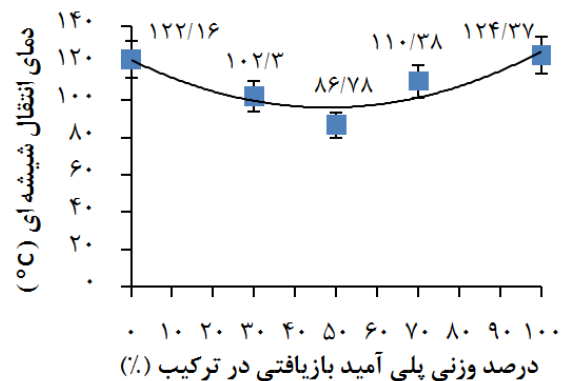
در این معادله، X درصد کریستالی شدن نمونه، ΔH حاصل تفاضل آنتالپی ذوب و آنتالپی کریستالی نمونه پلیمری و ΔH_m آنتالپی نمونه پلیمری با ۱۰۰٪ تبلور می‌باشد [19]. همان‌طور که در (شکل ۵) مشاهده می‌شود، با افزایش درصد وزنی پلی‌آمید بازیافتی در نمونه‌ها، درصد کریستالی کاهش یافته است. به طوری‌که، این مقدار با افزایش درصد پلی‌آمید بازیافتی در ترکیب به ۳۰٪، ۵۰٪ و ۷۰٪ وزنی نمونه، به ترتیب در حدود ۱۴٪، ۴۵٪ و ۷۱٪ کاهش یافته است. مطابق مقالات مطالعه شده در این زمینه، انجام عملیات بازیافت روی پلیمرهای نیمه‌کریستالی، سبب شکسته شدن زنجیره‌ها و ایجاد بی‌نظمی در ساختار مولکولی پلیمر می‌شود. بنابراین، کاهش درصد کریستالی در نمونه‌های بازیافتی نشان می‌دهد که حالت نیمه کریستالی پلی‌آمید، پس از انجام عملیات بازیافت به سمت حالت آمورف پیش رفته است [17].

نمونه	دمای کریستالی (°C)	دمای انتقال شیشه‌ای (°C)	درصد کریستالی (%)
A	۱۹۱/۷۷	۱۲۲/۱۶	۱۲/۳۴
B	۱۸۰/۴۵	۱۰۲/۳۱	۱۰/۶۵
C	۱۵۵/۶۱	۸۶/۷۸	۶/۸۰
D	۱۶۰/۳۱	۱۱۰/۳۸	۳/۵۳
E	۲۱۱/۵۳	۱۲۴/۳۷	۲/۹۵

نمونه خالص شد. در حالی که، ادامه روند افزایش درصد وزنی پلی‌آمید بازیافتی در ترکیب از ۵۰٪ به ۷۰٪ وزنی، سبب افزایش دمای انتقال شیشه‌ای در حدود ۲۷٪ شد با ادامه روند افزایش پلی‌آمید بازیافتی در ترکیب، دمای انتقال شیشه‌ای برای نمونه تهیه شده از ۱۰۰٪ پلی‌آمید بازیافتی در حدود ۱۳٪ افزایش نشان داد. علت کاهش دمای انتقال شیشه‌ای نمونه‌ها با افزایش درصد وزنی پلی‌آمید بازیافتی در ترکیب را می‌توان به شکسته شدن زنجیره‌های پلیمری و افزایش تحرک زنجیره‌ها و در ادامه علت افزایش دمای انتقال شیشه‌ای را می‌توان به ایجاد زنجیره‌های جانبی و محدودیت در تحرک و چرخش آنها نسبت داد [9]. همچنین، در (شکل ۵)، تغییرات درصد کریستالی بر حسب درصد وزنی پلی‌آمید نو در ترکیب، نشان داده شده است. درصد



شکل ۵) تغییرات درصد کریستالی نمونه‌ها بر حسب درصد پلی‌آمید بازیافتی در ترکیب

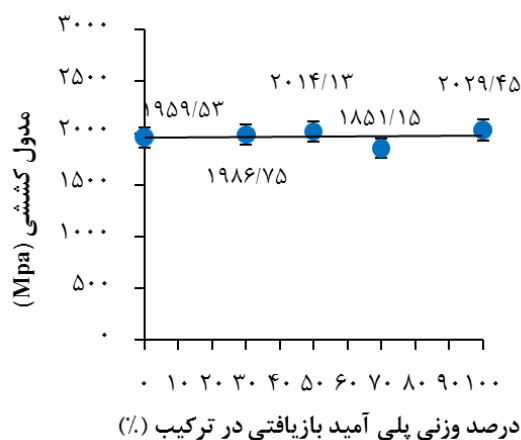


شکل ۴) تغییرات دمای انتقال شیشه‌ای بر حسب درصد وزنی پلی‌آمید بازیافتی در ترکیب

در (شکل ۷)، نمودار مدول کششی بر حسب درصد وزنی پلی‌آمید بازیافتی در ترکیب، نشان داده شده است. نتایج، نشان دهنده تغییرات جزئی مدول کششی نمونه‌ها با تغییرات درصد وزنی پلی‌آمید بازیافتی در ترکیب است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار محاسبه شده برای مدول کششی نمونه خالص، در حدود ۱۹۶۰ مگاپاسکال می‌باشد که این مقدار برای نمونه ساخته شده با ۵۰٪ پلی‌آمید نو به ۲۰۱۴ مگاپاسکال افزایش یافته است. همچنین، بیشترین مقدار محاسبه شده برای مدول کششی، ۲۰۲۹/۴۵ مگاپاسکال است که مربوط به نمونه ساخته شده از ۱۰۰٪ پلی‌آمید بازیافتی می‌باشد.

همان‌طور که در (شکل ۸) نشان داده شده است، مقدار ازدیاد طول در نقطه شکست برای نمونه خالص، ۳/۹۲٪ گزارش شده و با افزایش درصد وزنی پلی‌آمید بازیافتی در ترکیب به ۵۰٪ و ۷۰٪، این مقدار به ترتیب در حدود ۷٪، ۹٪ و ۱۷٪ کاهش یافته است. درصد ازدیاد طول، برای نمونه تهیه شده از ۱۰۰٪ پلی‌آمید بازیافتی ۳/۱۹٪ اندازه‌گیری شده که نسبت به نمونه خالص در حدود ۱۹٪ کاهش یافته است. بنابراین، مطابق با منابع مطالعه شده در این زمینه، تأثیر کاهش درصد وزنی پلی‌آمید نو در ترکیب بر درصد ازدیاد طول نمونه‌ها، جزئی بوده و تغییرات آن بستگی زیادی به تغییرات وزن مولکولی، ایجاد زنجیره‌های جانبی طی بازیافت و تغییرات درجه کریستالی پلیمر دارد [9,20].

بررسی روند تغییرات در نمودارهای مربوط به استحکام و مدول کششی و همچنین تغییرات درصد ازدیاد طول در نقطه شکست، نشان داد که استفاده از مواد بازیافتی در ترکیب با مواد نو، تأثیر چندانی بر این موارد نداشته است. بنابراین، با توجه به تغییرات جزئی در روند این نمودارها، می‌توان نتیجه گرفت که محدودیت اندکی جهت استفاده از پلی‌آمید بازیافتی در ترکیب با مواد نو، جهت ساخت محصولاتی که در آنها استحکام کششی مد نظر است، وجود دارد.



شکل ۷) تغییرات مدول کششی بر حسب درصد وزنی پلی‌آمید بازیافتی در ترکیب

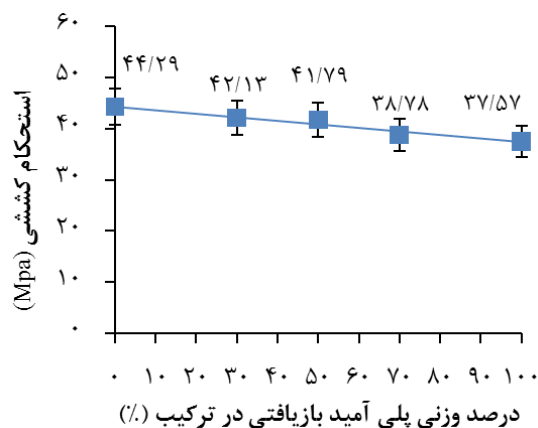
۳-۳- بررسی تأثیر درصد وزنی پلی‌آمید بازیافتی در ترکیب با مواد نو بر استحکام کششی نمونه‌ها

پس از انجام آزمون کشش روی نمونه‌های تزریق شده با درصد وزنی مختلف از ترکیب پلی‌آمید بازیافتی با مواد نو، مقادیر مربوط به استحکام کششی، مدول کششی و درصد ازدیاد طول نمونه‌ها مورد محاسبه و بررسی قرار گرفت. جهت بررسی آسان‌تر، نتایج حاصل از آزمون کشش طی (جدول ۴) گزارش شده است. به منظور بررسی روند تغییرات استحکام کششی نمونه‌ها با تغییر درصد وزنی مواد نو در ترکیب، پس از محاسبه استحکام کششی هر نمونه، نتایج به صورت نمودار ترسیم شده است.

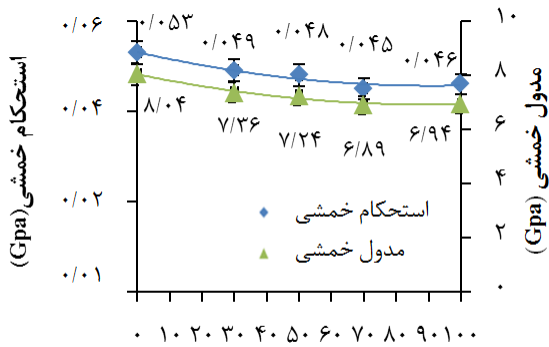
همان‌طور که در (شکل ۶) مشاهده می‌شود، استحکام کششی نمونه‌ها با افزایش درصد پلی‌آمید بازیافتی در ترکیب کاهش یافته است. به طوری که مقدار گزارش شده برای استحکام کششی نمونه ساخته شده از ۱۰۰٪ پلی‌آمید نو، در حدود ۴۴/۲۹ مگاپاسکال ثبت شد و این مقدار با افزایش درصد وزنی پلی‌آمید بازیافتی در ترکیب به مقدار ۳۰٪، ۵۰٪، ۷۰٪ و ۱۰۰٪ درصد وزنی، به ترتیب به مقدار ۵٪، ۶٪، ۱۲٪ و ۱۶٪، نسبت به نمونه خالص، کاهش یافته است. بر پایه آزمون‌های حرارتی انجام شده و مقالات مطالعه شده در این زمینه، علت کاهش استحکام کششی در نمونه‌ها را می‌توان به شکسته شدن زنجیره‌های پلیمری در ساختار مولکولی پلی‌آمید بازیافت شده نسبت داد [4]. همچنین همان‌طور که در برخی از منابع به آن اشاره شده است، بی‌نظمی مولکولی ناشی از افزایش درصد وزنی پلی‌آمید بازیافتی در ترکیب، با تأثیر بر رفتار رئولوژی و مکانیکی ماده، سبب کاهش استحکام کششی نمونه و افزایش شکنندگی آن می‌شود [9].

جدول ۴) نتایج آزمون میکروکشش

نمونه	ازدیاد طول (%)	استحکام کششی (Mpa)	مدول کششی (Mpa)
A	۳/۹۲	۴۴/۲۹	۱۹۵۹/۵۳
B	۳/۶۵	۴۲/۱۳	۱۹۸۶/۷۵
C	۳/۵۷	۴۱/۷۹	۲۰۱۴/۱۳
D	۳/۴۴	۳۸/۷۸	۱۸۵۱/۱۵
E	۳/۱۹	۳۷/۵۷	۲۰۲۹/۴۵

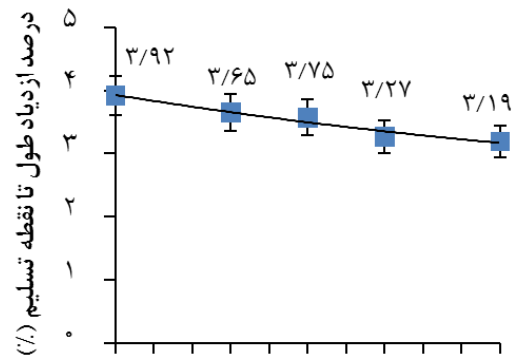


شکل ۶) تغییرات استحکام کششی نمونه‌ها بر حسب درصد وزنی پلی‌آمید بازیافتی در ترکیب



شکل ۹) تغییرات استحکام خمشی و مدول خمشی نمونه‌ها بر حسب درصد وزنی پلی‌آمید بازیافتی در ترکیب (٪)

شکل ۹) تغییرات استحکام خمشی و مدول خمشی نمونه‌ها بر حسب درصد وزنی پلی‌آمید بازیافتی در ترکیب



شکل ۸) تغییرات درصد ازدیاد طول بر حسب درصد وزنی پلی‌آمید بازیافتی در ترکیب (٪)

شکل ۸) تغییرات درصد ازدیاد طول بر حسب درصد وزنی پلی‌آمید بازیافتی در ترکیب

۴-۳- بررسی تأثیر درصد وزنی پلی‌آمید بازیافتی در ترکیب با مواد نو بر استحکام خمشی نمونه‌ها

همان‌طور که در (شکل ۹) مشاهده می‌شود، استحکام خمشی برای نمونه ساخته شده از ۱۰۰٪ پلی‌آمید نو، ۰/۰۵۳ گیگاپاسکال گزارش شده است. این مقدار با افزایش درصد وزنی پلی‌آمید بازیافتی در ترکیب، کاهش جزئی نشان داد، به طوری که برای حالتی که از ۳۰٪ وزنی پلی‌آمید بازیافتی در ترکیب استفاده شده این مقدار در حدود ۷٪ کاهش یافت. همچنین، روند کاهش استحکام خمشی نمونه‌ها با افزایش درصد وزنی پلی‌آمید بازیافتی در ترکیب ادامه یافت به طوری که با افزایش درصد وزنی پلی‌آمید بازیافتی در ترکیب به ۵۰٪ و ۷۰٪، استحکام خمشی به ترتیب در حدود ۹٪ و ۱۵٪ نسبت به نمونه خالص، کاهش نشان داد. همچنین مقادیر به دست آمده برای مدول خمشی نمونه‌ها نیز، در (شکل ۹) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مدول خمشی برای حالتی که از ۱۰۰٪ پلی‌آمید نو در ترکیب استفاده شده است به مقدار ۸/۰۴ گیگاپاسکال گزارش شده است. افزایش درصد وزنی پلی‌آمید بازیافتی در ترکیب، کاهش مدول خمشی را در پی داشته است، به طوری که با افزایش پلی‌آمید بازیافتی در ترکیب به مقدار ۳۰٪، ۵۰٪ و ۷۰٪ درصد وزنی، مقادیر به دست آمده برای مدول خمشی در حدود ۸٪، ۱۰٪ و ۱۴٪، نسبت به نمونه خالص کاهش یافته است. نتایج حاصل از منابع مطالعه شده در این زمینه نیز حاکی از تغییرات جزئی استحکام و مدول خمشی می‌باشد. این تغییرات را می‌توان به ساختار نیمه‌کریستالی پلی‌آمید نسبت داد که شامل نواحی کریستالی و آمورف می‌باشد. نواحی آمورف سبب انعطاف پذیری و نواحی کریستالی، سبب افزایش استحکام آن می‌شوند [5].

۵-۳- بررسی تأثیر درصد وزنی پلی‌آمید بازیافتی در ترکیب با مواد نو بر استحکام ضربه نمونه‌ها

جهت بررسی مقاومت نمونه‌ها در برابر ضربه، آزمون ضربه روی نمونه‌ها انجام شد و به منظور اطمینان از صحت نتایج، هر آزمون سه بار تکرار شد و میانگین مقادیر محاسبه گردید. در (شکل ۱۰) تغییرات انرژی شکست نمونه‌ها، بر حسب درصد وزنی پلی‌آمید بازیافتی در ترکیب نشان داده شده است. همان‌طور که در (شکل ۱۰) مشاهده می‌شود، افزایش درصد وزنی پلی‌آمید بازیافتی در نمونه‌ها، کاهش انرژی شکست آنها را به دنبال داشته است. به طوری که مقدار اندازه‌گیری شده برای انرژی شکست نمونه در حالتی که از ۱۰۰٪ وزنی پلی‌آمید نو در ترکیب استفاده شده در حدود ۴۱/۹ کیلو ژول بر متر مربع گزارش شد. افزایش درصد وزنی پلی‌آمید بازیافتی در ترکیب به ۳۰٪ وزنی، کاهش انرژی شکست در حدود ۱۴٪ را به دنبال داشته است. همچنین به طور مشابه، ادامه روند افزایش درصد پلی‌آمید بازیافتی در ترکیب، به ۵۰٪ و ۷۰٪ وزنی نیز، به ترتیب سبب کاهش انرژی شکست به میزان ۳۴٪ و ۲۵٪ نسبت به نمونه خالص شد. همچنین در صورت استفاده از ۱۰۰٪ پلی‌آمید بازیافتی، انرژی شکست نمونه‌ها در حدود ۵۷٪ کاهش می‌یابد. نتایج نشان دهنده افت شدید انرژی شکست در نمونه‌ها به دنبال کاهش درصد وزنی پلی‌آمید نو در ترکیب است. شیب خط روند رسم شده نیز، نشان می‌دهد که با افزایش درصد وزنی پلی‌آمید بازیافتی در ترکیب، مقاومت به ضربه در نمونه‌ها کاهش یافته است. همان‌طور که در برخی منابع اشاره شده، کاهش استحکام به ضربه در پلیمرها را می‌توان به شکسته شده زنجیره‌ها نسبت داد. کوتاه‌تر و عریض‌تر شدن زنجیره‌ها در خلال بازیافت، موجب ایجاد درگیری کمتر مابین زنجیره‌ها شده و افزایش شکنندگی یا کاهش چقرمگی پلیمر را به دنبال دارد [20,21]. به این ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از پلی‌آمید بازیافتی در نمونه‌ها، کاهش مقاومت به ضربه در نمونه‌ها را به همراه داشته و افزودن بیش از ۳۰٪ پلی‌آمید بازیافتی به نمونه‌ها، جهت تولید محصولاتی که به ضربه حساس هستند، می‌تواند کارائی محصول را کاهش دهد.

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق، پس از تهیه نمونه‌ها با درصدهای وزنی مختلف از پلی‌آمید نو و بازیافتی به منظور بررسی تأثیر میزان پلی‌آمید بازیافتی در ترکیب با مواد نو بر روی خواص مکانیکی ترکیب طی فرآیند تزریق، آزمون‌های مختلف حرارتی و مکانیکی روی نمونه‌های ساخته شده انجام گرفت. سپس با استفاده از نتایج حاصل از آزمون‌های انجام شده، مناسب‌ترین مقادیر برای ترکیب پلیمر پلی‌آمید نو و بازیافتی جهت تولید محصولات با کاربری‌های مختلف تعیین شد. نتایج بدست آمده به شرح ذیل می‌باشد.

۱- نتایج حاصل از آزمون شاخص جریان مذاب نتایج نشان داد، با افزودن ۳۰٪ و ۵۰٪ وزنی پلی‌آمید بازیافتی به نمونه، مقدار شاخص جریان مذاب به ترتیب، در حدود ۲۳٪ و ۳۲٪ نسبت به نمونه خالص، کاهش می‌یابد. در صورتی که، با افزایش درصد پلی‌آمید بازیافتی در ترکیب از ۵۰٪ به ۷۰٪ و ۱۰۰٪ وزنی، مقدار شاخص جریان مذاب به ترتیب، در حدود ۳۶٪ و ۵۹٪ افزایش نشان داد.

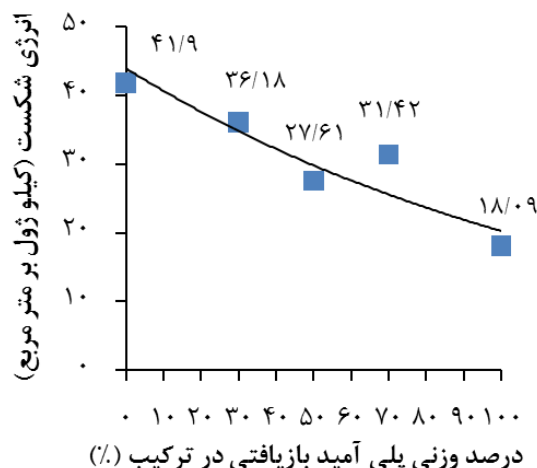
۲- طی انجام آزمون کالریمتری روبشی تفاضلی، نتایج نشان داد، افزایش درصد وزنی پلی‌آمید بازیافتی در ترکیب به ۳۰٪ و ۵۰٪ وزنی، به ترتیب کاهش دمای کریستالی در حدود ۶٪ و ۱۴٪ را در پی داشته است. این در حالی است که با افزایش درصد وزنی پلی‌آمید بازیافتی در ترکیب از ۵۰٪ به ۷۰٪ و ۱۰۰٪ وزنی، دمای کریستالی به ترتیب، در حدود ۳٪ و ۳۶٪ افزایش یافت. این روند برای دمای انتقال شیشه‌ای نیز بر همین منوال بود، در حالی که، درصد کریستالی با افزایش درصد وزنی پلی‌آمید بازیافتی در نمونه‌ها، کاهش یافته است.

۳- نتایج حاصل از آزمون‌های کشش و خمش، نشان دهنده تغییرات جزئی استحکام کششی و مدول کششی و خمشی نمونه‌ها، با افزایش درصد پلی‌آمید بازیافتی در ترکیب، می‌باشد.

۴- نتایج حاصل از آزمون ضربه نشان داد که استفاده از پلی‌آمید بازیافتی در نمونه‌ها، کاهش مقاومت به ضربه در نمونه‌ها را به همراه داشته و افزودن بیش از ۵۰٪ پلی‌آمید بازیافتی به نمونه‌ها جهت تولید محصولاتی که به ضربه حساس هستند، می‌تواند کارآئی محصول را کاهش دهد.

۵- نتایج حاصل از آزمون سختی نیز، نشان دهنده تغییرات جزئی سختی نمونه‌ها با افزایش درصد وزنی پلی‌آمید بازیافتی در ترکیب می‌باشد.

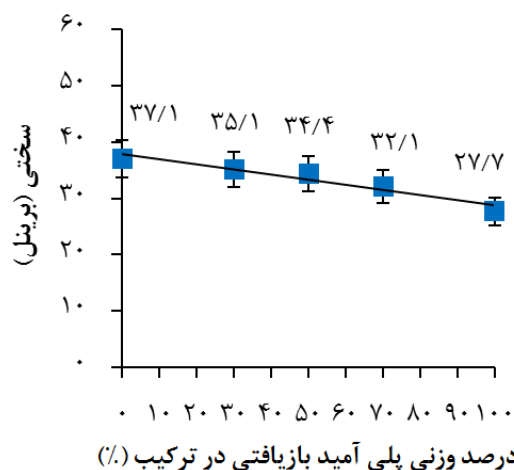
۶- مقایسه روند تغییرات در نتایج آزمون‌های انجام شده نشان داد که تغییرات و افت خواص، به ترتیب طی آزمون‌های حرارتی و آزمون ضربه محسوس‌تر بوده است. بنابراین با توجه به روند تغییرات ذکر شده در خواص مکانیکی نمونه‌ها، می‌بایست با توجه به نوع کاربری محصول مورد نظر، ملاحظات لازم جهت



شکل ۱۰) تغییرات انرژی شکست نمونه‌ها بر حسب درصد وزنی پلی‌آمید بازیافتی در ترکیب

۳-۶ بررسی تأثیر درصد وزنی پلی‌آمید بازیافتی در ترکیب با مواد نو بر سختی نمونه‌ها

آزمون سختی برینل روی نمونه‌های ساخته شده با درصدهای وزنی متفاوت از پلی‌آمید نو و بازیافتی انجام گردید. همان‌طور که در (شکل ۱۱) مشاهده می‌شود، عدد سختی برای نمونه متشکل از ۱۰۰٪ وزنی پلی‌آمید نو در ترکیب به مقدار ۳۷/۱ برینل ثبت شده است. این مقدار با افزایش درصد وزنی پلی‌آمید بازیافتی در ترکیب به ۳۰٪، ۵۰٪، ۷۰٪، به ترتیب در حدود ۵٪، ۷٪ و ۱۳٪ کاهش یافت. همچنین سختی نمونه متشکل از ۱۰۰٪ پلی‌آمید بازیافتی، در حدود ۲۵٪ کمتر از سختی نمونه خالص گزارش شده است. مطابق منابع مطالعه شده در این زمینه، شکسته شدن زنجیره‌ها و کاهش وزن مولکولی پلیمر طی فرآیند بازیافت، منجر به کاهش سختی پلیمر می‌شود [22]. به این ترتیب افزایش درصد وزنی پلی‌آمید بازیافتی در ترکیب، کاهش جزئی سختی نمونه‌ها را در بر داشته و محدودیت اندکی جهت استفاده از پلی‌آمید بازیافتی در ترکیب با مواد نو، جهت ساخت محصولاتی که در آنها سختی محصول مد نظر است، وجود دارد.



شکل ۱۱) تأثیر درصد وزنی پلی‌آمید بازیافتی در ترکیب بر سختی نمونه‌ها

10- Hanna EG. Recycling of Waste Mixed Plastics Blends (PE/PP). *Journal of Engineering Science & Technology Review*. 2019;12(2).

11- Matias AA, Lima MS, Pereira J, Pereira P, Barros R, Coelho JF, Serra AC. Use of recycled polypropylene/poly (ethylene terephthalate) blends to manufacture water pipes: An industrial scale study. *Waste Management*. 2020;101:250-8.

12- Masmoudi F, Alix S, Buet S, Mehri A, Bessadok A, Jaziri M, Ammar E. Design and Characterization of a New Food Packaging Material by Recycling Blends Virgin and Recovered polyethylene terephthalate. *Polymer Engineering & Science*. 2020;60(2):250-6.

13- Jaidev K, Suresh SS, Gohatre OK, Biswal M, Mohanty S, Nayak SK. Development of recycled blends based on cables and wires with plastic cabinets: An effective solution for value addition of hazardous waste plastics. *Waste Management & Research*. 2020;38(3):312-21.

14- Scaffaro R, La Mantia FP. Characterization of monopolymer blend of virgin and recycled polyamide 6. *Polymer Engineering & Science*. 2002;42(12):2412-7.

15- Wahyuni S, Ravichanthiran J. The effect of virgin nylon addition into recycled nylon on the fatigue strength of thermoplastic nylon denture base. *Padjadjaran Journal of Dentistry*. 2020;32(1):68-72.

16- Datasheet Tecomid® NA40 NL IL - Material Data Center (2020).

17- Salahshor NZ, SARAEIAN P, Shakori E, Etemadi S, Najafi M. Investigation and effect of number of recycling steps on molten flow rate and crystalline percent in injection process in wood-plastic composite. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2019; 6 ; 1-7.

18- Beltrán FR, Lorenzo V, Acosta J, de la Orden MU, Urreaga JM. Effect of simulated mechanical recycling processes on the structure and properties of poly (lactic acid). *Journal of environmental management*. 2018;216:25-31.

19- Sichina WJ. DSC as problem solving tool: measurement of percent crystallinity of thermoplastics. *Perkin Elmer Instruments, and PETech*. 2000;40.

20- Su KH, Lin JH, Lin CC. Influence of reprocessing on the mechanical properties and structure of polyamide 6. *Journal of Materials Processing Technology*. 2007;192:532-8.

21- Lozano-González MJ, Rodriguez-Hernandez MT, Gonzalez-De Los Santos EA, Villalpando-Olmos J. Physical-mechanical properties and morphological study on nylon-6 recycling by injection molding. *Journal of applied polymer science*. 2000;76(6):851-8.

22- Beltrán FR, Barrio I, Lorenzo V, Del Río B, Martínez Urreaga J, de la Orden MU. Valorization of poly (lactic acid) wastes via mechanical recycling: Improvement of the properties of the recycled polymer. *Waste Management & Research*. 2019;37(2):135-41.

تعیین درصد وزنی مواد بازیافتی در ترکیب با مواد نو در نظر گرفته شود.

تشکر و قدردانی: سپاس از خداوند یکتا و تشکر از دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات که بنده را در این مسیر یاری نمودند.

تأییدیه اخلاقی: نویسندگان این مقاله با اعلام موافقت خود مبنی بر ارسال این مقاله به نشریه دانشگاه تربیت مدرس، متعهد می‌شوند که این مقاله در زمان ارسال برای این مجله در هیچ نشریه ایرانی یا غیر ایرانی در حال بررسی نبوده و تا تعیین تکلیف قطعی در این نشریه برای هیچ نشریه ایرانی یا غیر ایرانی دیگری ارسال نخواهد شد.

تعارض منافع: نویسندگان با اختیار و آگاهی کامل، کلیه حقوق مادی مربوط به انتشار این مقاله را به نشریه دانشگاه تربیت مدرس، واگذار می‌نمایند و نشریه در انتشار این مقاله به هر صورت اختیار تام دارد و منافع مادی احتمالی متعلق به نشریه است.

سهم نویسندگان: نویسندگان به‌طور مساوی در این مقاله مشارکت کرده‌اند.

منابع مالی: هزینه این مقاله از طرف نویسندگان پرداخت شده است.

منابع

- 1- Deopura BL, Alagirusamy R, Joshi M, Gupta B, editors. *Polyesters and polyamides*. Elsevier; 2008 .
- 2- Gholampour A, Ozbakkaloglu T. Recycled plastic. *In New Trends in Eco-efficient and Recycled Concrete 2019* (pp. 59-85). Woodhead Publishing.
- 3- Okan M, Aydin HM, Barsbay M. Current approaches to waste polymer utilization and minimization: A review. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*. 2019;94(1):8-21.
- 4- Kuram E, Ozcelik B, Yilmaz F. The effects of recycling process on thermal, chemical, rheological, and mechanical properties of PC/ABS binary and PA6/PC/ABS ternary blends. *Journal of Elastomers & Plastics*. 2016;48(2):164-81.
- 5- Chen SC, Liao WH, Hsieh MW, Chien RD, Lin SH. Influence of recycled ABS added to virgin polymers on the physical, mechanical properties and molding characteristics. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*. 2011;50(3):306-11.
- 6- Madi NK. Thermal and mechanical properties of injection molded recycled high density polyethylene blends with virgin isotactic polypropylene. *Materials & Design*. 2013;46:435-41.
- 7- Avazverdi E, Vandaland M, Shakeri A. The Mechanical Properties of Recycled Polyethylene-Polyethylene Terephthalate Composites. *Science and Technology*. 2015;27(6):381-9.
- 8- Thuong NT, Mao ND, Quynh BT, Bach LG. Preparation and characterization of properties of acrylonitrile butadiene styrene waste plastic blended with virgin styrene butadiene rubber. *In Key Engineering Materials 2017* (Vol. 718, pp. 3-9). Trans Tech Publications Ltd.
- 9- Hyie KM, Budin S, Martinus N, Salleh Z, Masdek NR. Tensile and flexural investigation on polypropylene recycling. *JPhCS*. 2019;1174(1):012005.