



بررسی خواص مکانیکی و فیزیکی ماده مرکب چوب-پلاستیک بر پایه پلی اتیلن/پلی پروپیلن/پلی اتیلن ترفتالات بازیافتی

حمزه شاهرجبیان^{1*}، علیرضا مالکی خوراسگانی²

1- استادیار، مهندسی مکانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد

2- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد

* نجف آباد، صندوق پستی 8514143131، h.shahrajabian@pmc.iaun.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

دریافت: 96/4/25

پذیرش: 96/6/19

کلیدواژگان:

پلی اتیلن ترفتالات بازیافتی

پلی اتیلن چگالی بالا

پلی پروپیلن

چوب پلاستیک

خواص مکانیکی و فیزیکی

مزایایی از قبیل هزینه پایین، فراوانی منابع طبیعی تجدید پذیر و سفتی بالا باعث شده مواد مرکب چوب-پلاستیک مورد توجه قرار گیرند. در این تحقیق، از مخلوط پلی اتیلن چگالی بالا (HDPE)، پلی پروپیلن (PP)، و پلی اتیلن ترفتالات بازیافتی (rPET)، همراه با سازگارکننده‌های مالئیک پلی اتیلن (MAPE) و مالئیک پلی پروپیلن (MAPP) به عنوان زمینه برای تهیه ماده مرکب چوب پلاستیک استفاده شد. فرآیند تهیه چوب پلاستیک در دو مرحله توسط اکسترودر دوماریچجه همسوگرد انجام شد. در مرحله اول مخلوط زمینه (PP/HDPE/rPET) تهیه شده و در مرحله دوم به منظور تهیه گرانول چوب پلاست، پودر چوب به زمینه اضافه شد. گرانول‌های چوب پلاستیک که در مرحله دوم اکسترودر تهیه شدند توسط دستگاه تزریق به نمونه‌های آزمایش تبدیل شدند. اثر میزان rPET (15, 25, 35 phr) پودر چوب (30, 40 %wt.) و سازگارکننده (4, 8 phr) روی خواص مکانیکی، چگالی و میزان جذب آب ماده مرکب چوب پلاستیک بررسی شد. نتایج نشان داد که با افزایش میزان rPET و پودر چوب، مدول الاستیک کششی، چگالی و میزان جذب آب افزایش یافته، و استحکام ضربه، کرنش در نقطه شکست کاهش یافته است. با افزایش rPET، استحکام کششی و خمشی افزایش یافته و با افزایش میزان پودر چوب تغییر قابل توجهی مشاهده نشد. با افزایش میزان سازگارکننده‌ها، خواص مکانیکی (انعطاف پذیری، انرژی ضربه، مدول الاستیک و استحکام کششی و خمشی) و مقاومت در برابر جذب آب بهبود یافت. تصاویر میکروسکوپ الکترونی نشان داد که پلی اتیلن ترفتالات بازیافتی پس از اکستروژن دوم بصورت میکرو بیاف در ماده مرکب چوب پلاستیک درآمده است.

Investigation of the physical and mechanical properties of Wood plastic composites based on high density polyethylene/ polypropylene/recycled poly (ethylene terephthalate)

Hamzeh Shahrajabian^{*}, Ali-reza Maleki Khorasgani

Department of Mechanical Engineering, Najafabad branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.

* P.O.B. 8514143131, Najafabad, Iran, h.shahrajabian@pmc.iaun.ac.ir

Keywords

Recycled poly (ethylene terephthalate)
High density polyethylene,
Polypropylene
Wood-plastic
Mechanical and physical properties

Abstract

Several advantages such as low cost, availability of renewable natural resources and high stiffness are main reasons to pay attention to wood plastic composites. In this work, the blends of high density polyethylene (HDPE), polypropylene (PP) and recycled poly (ethylene terephthalate) (rPET) with maleated polyethylene (MAPE) and maleated polypropylene (MAPP) as the compatibilizer were used as the matrix of the wood-plastic composites (WPCs). WPCs has been prepared through an extrusion technology in two-step. In the first step, the blend of matrix (PP/HDPE/rPET) has been prepared, and in second step, the wood flour was added to polymer matrix to produce wood plastic granules. Wood plastic granules were converted to test samples through injection molding technology. The effects of rPET, wood flour and compatibilizer content on the mechanical properties (tensile strength, flexural strength, tensile modulus, elongation at break point and impact energy), density and water absorption resistance of WPCs were investigated. The results showed that the tensile modulus, density and water absorption of WPCs increased with rPET and wood flour, and impact strength and elongation at break point decreased. Tensile and flexural strength increased with rPET, while the strength significantly did not change with wood flour. Mechanical properties (elongation, impact energy, tensile modulus and flexural and tensile strength) and water absorption resistant improved with compatibilizer content. SEM images showed that rPET converted to micro fiber in matrix after second step of the extrusion

1- مقدمه

مشکل جدی است. روشهای سنتی مانند سوزاندن یا دفن کردن، اثرات منفی به محیط زیست تحمیل می‌کند که شامل آسیب به ترکیب خاک، آزاد شدن گازهای سمی به هوا و آلودگی آب‌ها و منابع زیر زمینی می‌شود.

هر ساله مقدار زیادی پسماند پلیمری از صنعت، کشاورزی، زندگی شهر نشینی و صنعت ساختمان تولید می‌شود. حل مشکل این پسماندها هنوز یک

Please cite this article using:

Shahrajabian, H. and Maleki Khorasgani, A., "Investigation of the physical and mechanical properties of Wood plastic composites based on high density polyethylene/ polypropylene/recycled poly (ethylene terephthalate)", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 1, pp. 127-134, 2018. www.SID.ir

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

دما پایین را بهبود بخشد، همچنین گزارش شده که وقتی PE و PP با یکدیگر مخلوط می‌شوند شرایط تهیه فوم میکروسولولی بهبود می‌یابد [15]. اضافه کردن پلی اتیلن چگالی بالا به پلی پروپیلن باعث بهبود مقاومت به جذب آب و گاز آن نیز می‌شود. یکی از دلایلی که باعث شده در تحقیقات از مخلوط PE/PP به عنوان زمینه WPCs استفاده شود این است که جدا سازی این دو ماده پلیمری در بازیافت کار مشکلی بوده و معمولاً این دو ماده پلیمری را از یکدیگر نمی‌توان تفکیک کرد [15]. گزارش شده که بهترین مورفولوژی و بیشترین بهبود در خواص هنگامی که دست می‌آید که نسبت دو ماده پلیمری PE و PP یکسان باشد (50/50) [14].

در مخلوط کردن دو ماده PE و PP با یکدیگر مشکلاتی وجود دارد زیرا این دو ماده در یکدیگر مخلوط شدنی نیستند، و بنابراین فازهای مجزایی در مخلوط ایجاد می‌شود. این منجر به کاهش کارایی محصول، برای مثال: انعطاف پذیری، استحکام و مقاومت ضربه می‌شود [17]. برای غلبه بر این مشکل پژوهشگران از سازگارکننده‌هایی از قبیل پلی اتیلن و پلی پروپیلن مالئیکه [18]، تینانات پیروفوسفات نفولکسی¹⁴ [19] و اتیلن پروپیلن داین¹⁵ [14] استفاده کرده‌اند.

پلی اتیلن ترفتالات¹⁶، به دلیل خواص منحصر به فردی که دارد، پلیمر محبوبی برای تولید بطری‌های نوشیدنی مانند بطری‌های آب و نوشیدنی‌های گازدار است. سالانه مقدار زیادی از این بطری‌ها در محیط انباشته می‌شود. PET به دلیل مقاومت بالای آن به تجزیه بیولوژیکی، طول عمر بالایی دارد [20، 21] و این منجر به تجمع مقدار زیادی PET ضایعاتی می‌شود [2]. روشهایی برای بازیافت PET در صنعت وجود دارد که عبارتند از تولید الیاف مورد استفاده در صنعت نساجی و دیگری ترکیب آن با دیگر پلیمرها به خصوص پلی الفینها مانند PE و PP است [1]. یکی از راههای دیگری که می‌توان از PET بازیافتی استفاده کرد، استفاده آن در تولید ماده مرکب چوب پلاستیک است [5، 23]. از آنجایی که دمای ذوب PET نسبتاً بالا است (حدود 250 درجه سانتیگراد) نمی‌توان به تنهایی آن را با چوب مخلوط کرد و چوب پلاستیک تهیه کرد، زیرا باعث سوختن چوب می‌شود. از اینرو باید ابتدا PET با مواد پلیمری دیگر با نقطه ذوب پایین‌تر مانند PE و PP، سازگارکننده و پایدارکننده حرارتی ترکیب شود و سپس در مرحله دوم پودر چوب به زمینه در دمای کمتر اضافه شده و نمونه چوب پلاستیک تهیه شود. آقای لی¹⁷ و همکاران [24] چوب پلاستیکی با زمینه HDPE و PET نو را با 40 درصد وزنی چوب تهیه کردند و تاثیر سازگارکننده و پودر چوب را بر خواص مکانیکی و حرارتی چوب پلاستیک بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد اضافه کردن PET تاثیر بر تبلور HDPE نداشته ولی پودر چوب درصد تبلور را افزایش می‌دهد. از طرفی سازگارکننده باعث بهبود خواص مکانیکی چوب پلاستیک می‌شود. رحمان و همکاران [5] تاثیر درصد چوب را بر خواص فیزیکی و مکانیکی rPET بررسی کردند. آنها چوب را از 40 تا 70 درصد به rPET اضافه کردند. نتایج آنها نشان داد با توجه به بالا بودن درصد بالای چوب، با افزایش درصد چوب مدول کششی و استحکام خمشی کاهش یافته و میزان درصد جذب آب افزایش یافته است. دایری¹⁸ و همکاران [23] خواص مکانیکی و مورفولوژی چوب پلاستیک با زمینه PP/rPET را بررسی کردند. آنها اثر سازگارکننده MAPP را روی خواص مکانیکی و فیزیکی چوب

فرآیند بازیابی، بهترین روش برای مدیریت پسماندهای پلیمری است. اما در این روش نیز بعد از چندین بار فرآیند بازیابی، ساختار مولکولی پلیمر دست خوش تغییرات جدی شده و خواص مکانیکی و فیزیکی آن نسبت به پلیمر نو دچار تغییر می‌شود. از اینرو به نظر می‌رسد راحت‌ترین راه برای بازیابی مواد پلاستیکی و غلبه بر محدودیت‌های نام برده شده، مخلوط کردن آن با مواد پلیمری نو و دیگر مواد و یا توسعه مواد مرکب است [3-1]. از جمله مهمترین این روشها، استفاده از مواد بازیافتی در صنعت چوب-پلاستیک است [4، 5].

مواد مرکب چوب پلاستیک¹ شامل چوب (از قبیل پودر چوب یا الیاف چوب) به عنوان پرکننده و پلیمر گرماترم² (از قبیل پلی اتیلن، پلی پروپیلن، پلی وینیل کلراید) به عنوان زمینه است. مواد مرکب چوب پلاستیک خانواده نسبتاً جدیدی از مواد مرکب هستند. پرکننده‌های طبیعی مانند چوب نسبت به پرکننده‌های مصنوعی دارای قیمت و چگالی کمتری هستند. اخیراً کاربردهای WPCs به دلیل مزایایی از قبیل قابلیت تجدید پذیری، استحکام و سفتی مناسب، چگالی و هزینه پایین، افزایش قابل توجهی پیدا کرده است [6]. از اینرو WPCs به طور گسترده برای کاربردهای متنوعی مانند مصارف ساختمانی، بسته‌بندی و داشبورد داخلی خودرو استفاده می‌شوند که دلیل آن سازگاری مناسب با آب و هوای محیط، هزینه کم، و عدم ترک خوردن و متلاشی شدن است [7، 8].

1-1- اشاره به مراجع

کامدم³ و همکاران [9] اثر پوشش آرسنات مس کرومات⁴ روی پودر چوب را روی خواص مکانیکی چوب پلاستیک با زمینه پلی اتیلن چگالی بالا⁵ بازیافتی بررسی کردند و مشاهده کردند پوشش مزبور باعث بهبود خواص مکانیکی چوب پلاستیک می‌شود. موهانتی⁶ و همکاران [10] از اصلاح کننده پلی پروپیلن مالئیکه⁷ برای بهبود چسبندگی بین پودر چوب و زمینه پلی پروپیلن⁸ استفاده کردند. گاسان⁹ و همکاران [11] نیز از اصلاح کننده سطحی MAPP در چوب پلاستیک با زمینه PP استفاده کردند و مشاهده کردند استحکام خمشی و دینامیکی ماده مرکب افزایش قابل توجهی یافته است. او¹⁰ و همکاران [12] اثر الیاف کولار را بر خواص مکانیکی چوب پلاستیک HDPE و پودر چوب بررسی کردند و نتیجه گرفتند که اضافه کردن الیاف کولار باعث بهبود استحکام و چقرمگی چوب پلاستیک می‌شود. گائو¹¹ و همکاران [13] از مخلوط PE و PP به عنوان زمینه چوب پلاستیک برای بازیافت استفاده کردند. برای این منظور از اصلاح کننده پلی اتیلن و پلی پروپیلن مالئیکه¹² استفاده کردند و مشاهده کردند خواص ماده مرکب بهبود یافته است. سلمونز¹³ و همکاران [14] از یک اصلاح کننده الاستومر به منظور بهبود خواص مکانیکی چوب پلاستیک با زمینه PE/PP استفاده کردند. در مخلوط PE/PP، PE به PP اضافه شده تا کارایی مخلوط را در برخی موقعیت‌های خاص بهبود داده و برخی خواص مانند مقاومت در برابر ضربه در

¹ Wood plastic composites (WPCs)

² Thermoplastic polymer

³ Kamdem

⁴ Chromated copper arsenate

⁵ High density Polyethylene (HDPE)

⁶ Mohanty

⁷ Maleic anhydride graft- polypropylene (MAPP)

⁸ Polypropylene (PP)

⁹ Gassan

¹⁰ Ou

¹¹ Gao

¹² Maleated polypropylene/polyethylene

¹³ Clemons

¹⁴ Neoalkoxy pyrophosphate titanate

¹⁵ Ethylene-propylene-diene (EPDM)

¹⁶ Poly (ethylene terephthalate) (PET)

¹⁷ Lei

¹⁸ Dairi

درجه سانتیگراد تنظیم شد. جدول 2 ترکیب نمونه‌های چوب-پلاستیک تهیه شده را نشان می‌دهد.

گرانول‌های تهیه شده در مرحله قبل درون اجاق در دمای 100 °C به مدت 24 ساعت خشک شدند. سپس نمونه‌های چوب-پلاستیک توسط دستگاه تزریق با سرعت 100 rpm و دمای محفظه 150, 160, 165, 175 درجه سانتیگراد تهیه شدند.

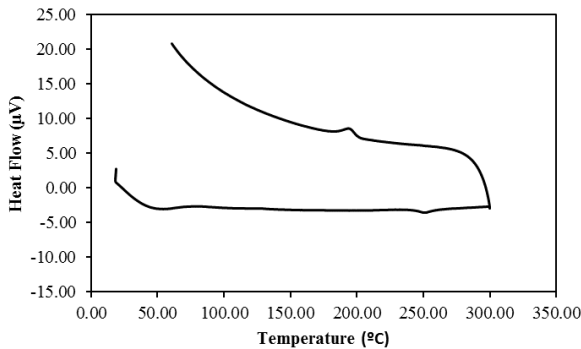


Fig. 1 DSC test of rPET [3]

شکل 1 آزمون DSC برای rPET [3]

جدول 1 آنالیز حرارتی rPET [3]

Table 1 Thermal analysis of rPET [3]

دمای ذوب (°C)	دمای تبلور (°C)	انتالپی (J/g)	تبلور (%)
252.62	193.6	29.2	20.85

جدول 2 ترکیب نمونه‌های چوب-پلاستیک با زمینه PP/HDPE/rPET

Table 2 The composition of PP/HDPE/rPET/wood composites

شماره	HDPE/PP (phr)	rPET (phr)	MAPE/MAPP (phr)	پودر چوب (%wt.)
1	100	0	4	30
2	85	15	4	30
3	75	25	4	30
4	65	35	4	30
5	100	0	4	40
6	85	15	4	40
7	75	25	4	40
8	65	35	4	40
9	100	0	8	30
10	85	15	8	30
11	75	25	8	30
12	65	35	8	30
13	100	0	8	40
14	85	15	8	40
15	75	25	8	40
16	65	35	8	40
17	100	0	12	30
18	85	15	12	30
19	75	25	12	30
20	65	35	12	30
21	100	0	12	40
22	85	15	12	40
23	75	25	12	40
24	65	35	12	40

2-3- آزمونهای مکانیکی، چگالی، جذب آب و تصویر برداری میکروسکوپ

الکترونی روبشی

آزمونهای کشش و خمش توسط دستگاه کشش انیورسال (مدل H25KS ساخت شرکت هانسفیلد¹⁰) به ترتیب بر اساس استاندارد ASTM D638 و ASTM D790 در دمای محیط انجام شد. آزمون ضربه شارپی بر اساس

¹⁰ HOUNSFIELD

پلاستیک بررسی کردند و مشاهده کردند سازگار کننده باعث بهبود قابل توجه استحکام کششی، استحکام خمشی، مدول کششی، مدول خمشی و مقاومت در جذب آب ماده مرکب می‌شود.

هدف از انجام این تحقیق مطالعه اثر میزان PET باز یافتی¹، پودر چوب و سازگار کننده روی خواص مکانیکی از قبیل استحکام کششی و خمشی، مدول الاستیک، استحکام ضربه و خواص فیزیکی مانند چگالی و میزان جذب آب چوب-پلاستیک با زمینه PP/HDPE/rPET است.

2- مواد و روشها

2-1- مواد

پلی اتیلن چگالی بالا با پایه تجاری HD-52518 با شاخص جریان مذاب 18 gr/10min، چگالی 0.952 gr/cm³، دمای ذوب 127 °C محصول شرکت پتروشیمی جم و پلی پروپیلن با پایه تجاری H1500 با شاخص جریان مذاب 12 gr/10min، چگالی 0.9 gr/cm³ و دمای ذوب 160 °C از شرکت لوته کمیکال² خریداری شد. از پلی اتیلن مالئیکه³ و پلی پروپیلن مالئیکه⁴ با پایه تجاری پریکس⁵ 12031 و پریکس 25093 ساخت شرکت ادکام⁶ به عنوان سازگار کننده استفاده شد. از آنتی اکسیدان ایرگوناکس⁷ 1010 نیز به عنوان پایدار کننده حرارتی استفاده شد. PET ضایعاتی از بطریهای پسماندهای شهری اصفهان تهیه شد. ابتدا بطری‌ها آسیاب شده سپس در چندین مرحله شسته شده و سرانجام در اجاق⁸ به مدت 24 ساعت در دمای 80 °C خشک شدند. به منظور تعیین خواص حرارتی rPET آزمون DSC انجام شد که در "شکل 1" نشان داده شده است. خواص حرارتی و تبلور حاصل از آزمون DSC برای rPET در جدول 1 نشان داده شده است. پودر چوب با اندازه مش 46 (385 μm) از چوب درخت چنار تهیه شد.

2-2- تهیه ماده مرکب چوب-پلاستیک

قبل از آماده سازی نمونه‌های چوب-پلاستیک، HDPE، PP و rPET در اجاق در دمای 80 °C به مدت 4 ساعت خشک شدند. نمونه‌های چوب-پلاستیک در دو مرحله تهیه شدند. در اولین مرحله rPET به میزان 15, 25, 35 phr، PP و HDPE به میزان مساوی (50/50)، MAPE و MAPP به میزان 4, 8, 12 phr و ایرگوناکس 1010 به میزان 0.5 phr توسط اکسترودر دومارپیچه (مدل ZSK25 ساخت شرکت ورنر و فلیدر⁹) با قطر مارپیچ 40 mm و نسبت طول به قطر 25 با یکدیگر مخلوط شدند. سرعت دورانی مارپیچ 100 rpm و پروفیل دمایی اکسترودر از کیف به سمت دای بصورت 160-200-240-270-250 درجه سانتیگراد تنظیم شد.

در مرحله دوم، در ابتدا گرانول‌های PP/HDPE/rPET و پودر چوب درون اجاق در دمای 80 درجه سانتیگراد به مدت 24 ساعت خشک شدند. سپس پودر چوب به میزان 30, 40 %wt همراه با گرانول‌های PP/HDPE/rPET درون اکسترودر دومارپیچه تغذیه شدند و گرانول چوب-پلاستیک تهیه شد. عمل اختلاط در سرعت 100 rpm انجام شده و پروفیل دمایی اکسترودر از کیف به سمت دای بصورت 160-170-175-180-175

¹ Recycled poly (ethylene terephthalate) (rPET)

² LOTTE CHEMICAL

³ Maleic anhydride graft-polyethylene (MAPE)

⁴ Maleic anhydride graft- polypropylene (MAPP)

⁵ PRIEX

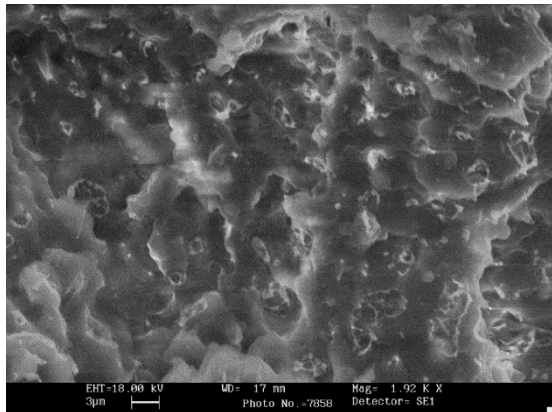
⁶ Addcomp

⁷ Irganox

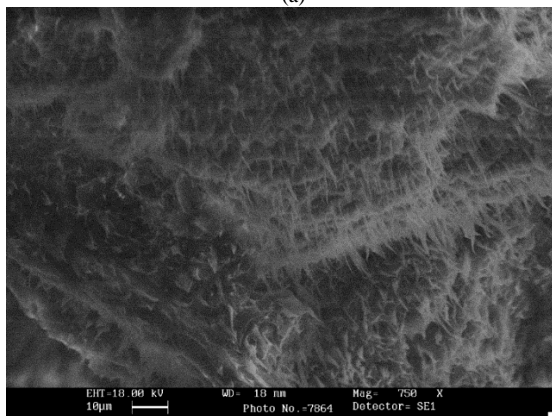
⁸ Oven

⁹ Werner & pfleiderer

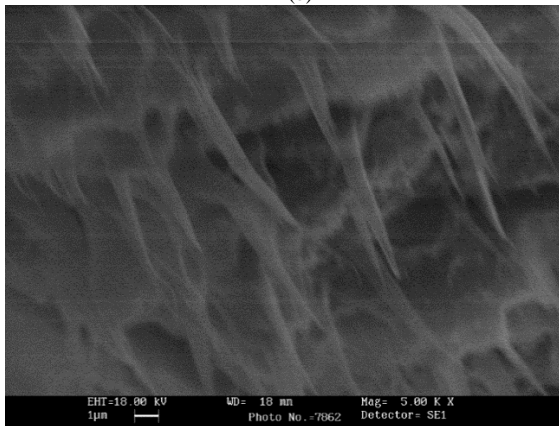
بصورت الیاف در زمینه پلیمری درآمده است. این الیاف‌های rPET می‌توانند دارای خاصیت تقویت‌کنندگی برای زمینه پلیمری باشند.



(a)



(b)



(c)

Fig. 2 Morphology of the dispersed rPET phase in a) PP/HDPE/rPET (25 phr of rPET) blend, b) and c) PP/HDPE/rPET/wood composites (25 phr of rPET and 30 % wt. wood)

شکل 2 مورفولوژی فاز rPET پراکنده شده در الف) مخلوط PP/HDPE/rPET (با 25 phr از rPET)، ب) نمونه چوب-پلاستیک (با 25 phr از rPET و 30 % wt. چوب)

3-2- اثر متغیرها روی میزان جذب آب

شکل 3 اثر میزان rPET، پایدارکننده و پودر چوب را بر میزان جذب آب (A_t) نمونه‌های چوب-پلاستیک نشان می‌دهد. همانطور که در شکل نشان داده شده، با افزایش میزان rPET مقدار A_t افزایش یافته است. پلیمرهای PP و HDPE پلیمرهای غیرقطبی هستند، در حالیکه PET یک پلیمر قطبی است از اینرو PET نسبت به PP و HDPE تمایل بیشتری در جذب آب دارد.

استاندارد ASTM D6110 روی نمونه‌های شکاف¹ دار انجام شد. آزمون جذب آب نیز بر اساس استاندارد ASTM D570 انجام شد. در این آزمون، ابتدا نمونه‌ها درون اجاق در دمای 50 °C به مدت 24 ساعت خشک شدند. پس از سرد شدن نمونه‌ها تا دمای محیط، وزن آنها توسط ترازوی دیجیتال (با دقت 0.0001gr) اندازه‌گیری شده و سپس به مدت 24 ساعت درون آب مقطر غوطه‌ور شدند. میزان جذب آب (A_t) برای هر نمونه بر اساس رابطه (1) محاسبه می‌شود.

$$A_t = \frac{W_t - W_0}{W_0} \times 100 \quad (1)$$

که در آن W_0 و W_t به ترتیب وزن نمونه قبل و بعد از غوطه‌وری است. برای تعیین چگالی نمونه‌ها از قانون ارشمیدس استفاده شد. روش کار به این صورت است که نمونه‌ها در آب با چگالی 1 gr/cm^3 غوطه‌ور می‌شوند بطوریکه آب بطور کامل سطح نمونه را بپوشاند. چگالی نمونه (ρ_b) بر اساس رابطه (2) محاسبه می‌شود:

$$\rho_b = \frac{M_b}{V_b} = \frac{M_b}{\Delta m} \times \rho_w \quad (2)$$

که در آن M_b و V_b به ترتیب جرم و حجم نمونه غوطه‌ور شده، و Δm تغییرات جرم نمونه غوطه‌ور شده قبل و بعد از غوطه‌وری است.

به منظور بررسی اختلاط مواد با یکدیگر از تصاویر میکروسکوپ روبشی² استفاده شد. تصویر برداری توسط دستگاه SEM مدل XL30 ساخت شرکت فیلیپس هلند انجام شد. بدین منظور نمونه‌ها در نیتروژن مایع بصورت ترد شکسته شدند و سطح نمونه با روکش طلا پوشش داده شده و تصویر برداری از سطح نمونه‌ها انجام گرفت.

3- نتایج و بحث

3-1- ریخت شناسی³

شکل 2 تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی سطح شکست نمونه‌های PP/HDPE/rPET و نمونه چوب-پلاستیک تهیه شده را نشان می‌دهد. "شکل 2 الف)" تصویر SEM نمونه حاوی PP/HDPE/rPET را بعد از اولین اکسترودر نشان می‌دهد. ماده سفید رنگ در تصویر نشان‌دهنده rPET است که در زمینه PP/HDPE پخش شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، ترکیب سه‌تایی پلیمری بطور کامل ممتزج نشده‌اند که این با توجه به ساختار کاملاً متفاوت PET با PP و HDPE قابل انتظار بود. با این حال همانطور که در تصویر مشخص است، rPET به خوبی در زمینه پخش شده است که به دلیل وجود سازگار کننده است.

شکل 2 (ب) و (ج) تصویر SEM نمونه چوب-پلاستیک حاوی 30 phr پودر چوب، 25 phr از rPET و 8 سازگارکننده را بعد از دومین فرآیند اکسترودر، در دو بزرگنمایی متفاوت نشان می‌دهد. میکرو الیاف‌های سوزنی شکل که در تصویر به رنگ سفید مشاهده می‌شوند، rPET است. همانطور که اشاره شد، دمای فرآوری چوب-پلاستیک نسبت به دمای ذوب rPET خیلی کمتر انتخاب شد که علت آن جلوگیری از سوختن چوب بود. در دمای فرآوری چوب-پلاستیک (180 درجه سانتیگراد)، rPET ذوب نشده بلکه

¹ Notch

² Scanning Electron Microscopy (SEM)

³ Morphology

پلیمری است. در واقع زنجیره‌های پلیمری به درون خلل و فرج پودر چوب نفوذ کرده و باعث شکل‌گیری چوب فشرده می‌شود. چگالی چوب فشرده بین 1100 تا 1500 kg/m^3 [26] است. با مقایسه "شکل 4 (الف)، (ب) و (ج)" مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار سازگار کننده چگالی نمونه‌ها تغییر چندانی پیدا نکرده است. کمترین مقدار چگالی ($\rho = 1050 \text{ kg/m}^3$) در نمونه بدون rPET و 4 phr سازگار کننده و 30 phr پودر چوب بدست آمده است، در حالیکه بیشترین مقدار آن ($\rho = 1190 \text{ kg/m}^3$) در نمونه با 35 phr از rPET و، 12 phr سازگار کننده و 40 phr پودر چوب بدست آمده است. بین بیشترین و کمترین چگالی حدود 13% اختلاف وجود دارد.

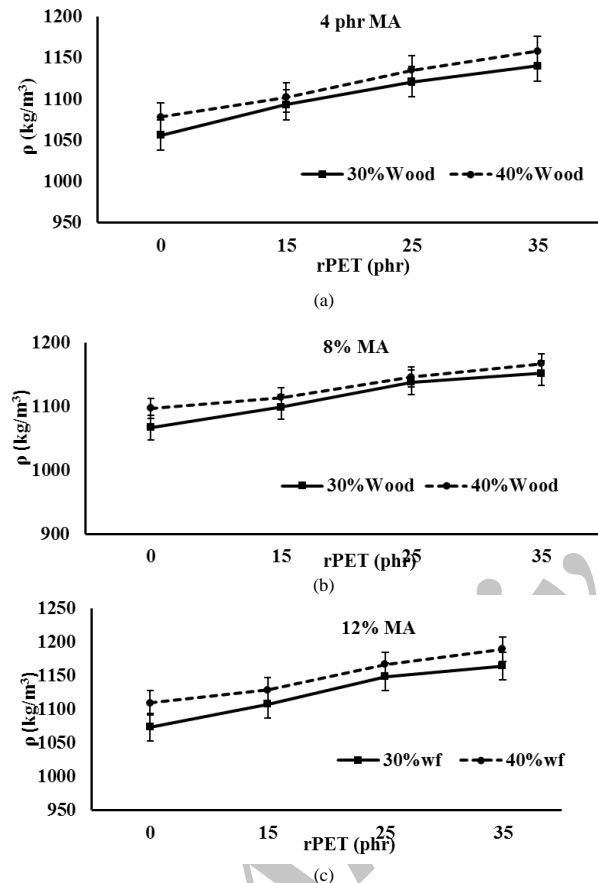


Fig. 4 The effect of rPET and wood content on density of WPCs for various compatibilizers a) 4 phr, b) 8 phr, c) 12 phr

شکل 4 تاثیر میزان rPET و سازگار کننده روی چگالی نمونه های چوب پلاستیک با درصد سازگار کننده (الف) 4 phr، (ب) 8 phr و (ج) 12 phr

3-4- اثر متغیرها روی خواص آزمون کشش و خمش

شکل 5 اثر میزان rPET سازگار کننده و پودر چوب را روی استحکام کششی نمونه‌ها نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود با افزایش میزان rPET تا 25 phr استحکام کششی افزایش یافته و سپس با افزایش بیشتر تا 35 phr کاهش می‌یابد. همانطور که در تصاویر SEM مشاهده شد به دلیل پایین بودن دمای ذوب فرآوری چوب پلاستیک نسبت به نقطه ذوب rPET، پلیمر rPET درون نمونه‌های چوب پلاستیک بصورت میکرو الیاف درآمده است. با توجه به بالاتر بودن استحکام کششی PET نسبت به PP و HDPE [25]، این میکرو الیاف‌های پلیمری خاصیت تقویت‌کنندگی داشته و می‌توانند باعث افزایش استحکام نمونه چوب پلاستیک شوند. با افزایش بیشتر میزان rPET تا 35

همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، با افزایش درصد سازگار کننده مقدار A_t کاهش یافته است. دلیل این امر این است که با افزایش درصد سازگار کننده اختلاط HDPE، PP و rPET با یکدیگر بهتر انجام می‌شود و از طرف دیگر چسبندگی پودر چوب به زمینه نیز بهتر می‌شود. پلیمرهای PP و HDPE غیرقطبی بوده و در نتیجه با چوب که یک ماده آب دوست است، امتزاج پذیر نیستند به همین دلیل از سازگار کننده استفاده می‌شود. سازگار کننده می‌تواند باعث کاهش فاصله بین دو فاز یا منافذ بین آنها شده و در نتیجه باعث جذب آب کمتر نمونه چوب پلاستیک می‌شود. با مقایسه شکل 3 (الف) و شکل 3 (ب) مشاهده می‌شود که با افزایش میزان پودر چوب از 30 wt. به 40 wt. میزان A_t افزایش یافته است. این افزایش به دلیل طبیعت آب دوستی پودر چوب است. از شکل 3 می‌توان فهمید که در حضور درصدهای وزنی بالاتر عامل سازگار کننده، اثر منفی افزایش درصد وزنی rPET بر افزایش میزان جذب آب کمتر است.

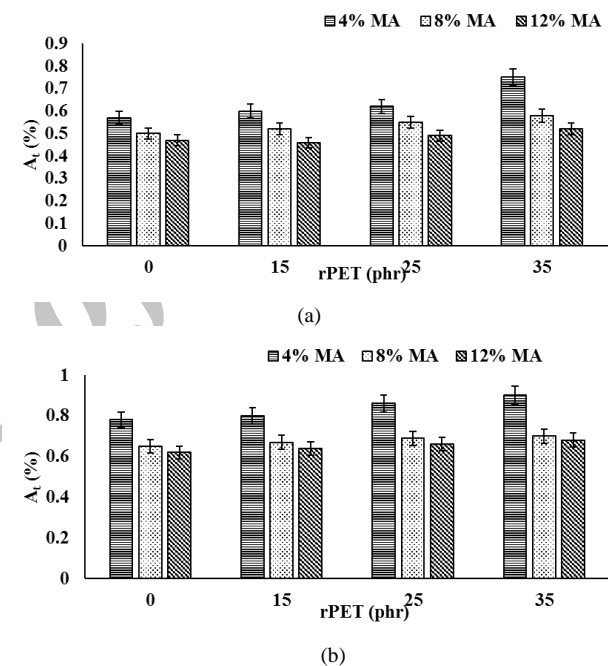


Fig. 3 The effect of rPET and compatibilizer on water absorption of WPCs with a) 30% wt. wood b) 40% wt. wood

شکل 3 تاثیر میزان rPET و سازگار کننده روی میزان جذب آب نمونه های چوب پلاستیک با (الف) 30 wt. پودر چوب و (ب) 40 wt. پودر چوب

3-3- اثر متغیرها روی میزان چگالی

شکل 4 اثر میزان rPET، پایدار کننده و پودر چوب را بر چگالی نمونه‌های چوب پلاستیک نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود با افزایش rPET چگالی نمونه‌ها افزایش یافته است. این افزایش به دلیل بالاتر بودن چگالی rPET ($\rho = 1380 \text{ kg/m}^3$) [25] نسبت به PP ($\rho = 900 \text{ kg/m}^3$) و HDPE ($\rho = 952 \text{ kg/m}^3$) [25] است. با مشاهده "شکل 4" می‌توان دریافت که با افزایش درصد چوب از 30 تا 40 wt. چگالی نمونه‌های چوب پلاستیک افزایش یافته است. هرچند چگالی چوب ($\rho = 600 - 900 \text{ kg/m}^3$) [26] نسبت به مواد تشکیل دهنده زمینه پلیمری کمتر است، اما این افزایش چگالی مورد انتظار است. دلیل آن فشردگی بیشتر سلولوز در نتیجه آغشته شدن پودر چوب با زنجیره‌های

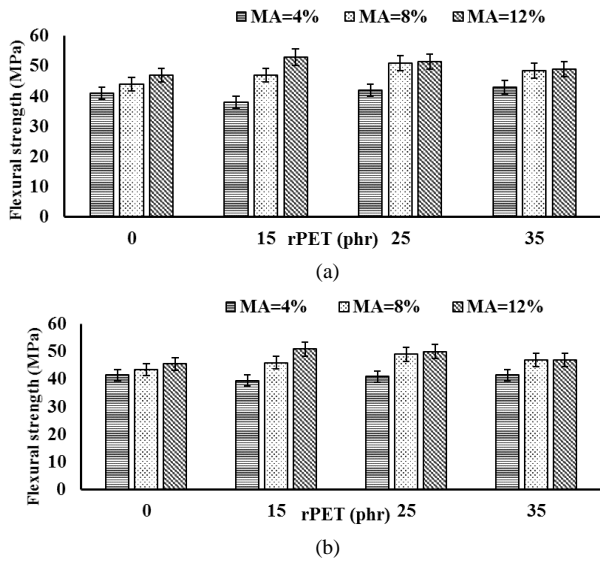


Fig. 6 The effect of rPET and compatibilizer content on flexural strength of WPCs for wood content of a) 30 wt. b) 40 wt.

شکل 6 تاثیر میزان rPET و سازگارکننده روی استحکام خمشی نمونه‌های چوب پلاستیک با درصد چوب الف) 30 wt. ب) 40 wt.

در واقع بر اساس قانون مخلوطها اضافه کردن ماده ثانویه با مدول الاستیک بالاتر به زمینه ماده مرکب، باعث افزایش مدول الاستیک ماده زمینه می‌شود. با مشاهده شکل 7 می‌توان دریافت که با افزایش درصد سازگار کننده مدول الاستیک افزایش یافته است. همانطور که قبلاً گفته شد، سازگارکننده باعث بهبود چسبندگی بین فازها می‌شود. این بهبود چسبندگی باعث انتقال بهتر بار از زمینه به پودر چوب شده، در نتیجه پودر چوب می‌تواند بخش بیشتری از بار اعمالی به ماده مرکب را تحمل کند. این باعث می‌شود استحکام و صلبیت (سفتی یا مدول الاستیک) ماده مرکب افزایش یابد. بیشترین مدول الاستیک به مقدار 4100 MPa متعلق به ترکیب 35 phr از rPET، سازگارکننده 12 phr و 40 wt. پودر چوب و کمترین آن به مقدار 2500 MPa متعلق به ترکیب بدون rPET 4 phr سازگارکننده و 30 wt. پودر چوب است که اختلاف 64% را نشان می‌دهد.

شکل 8 اثر میزان rPET سازگارکننده و پودر چوب را روی تغییر طول نمونه تا نقطه شکست در آزمون کشش نمونه‌های چوب پلاستیک را نشان می‌دهد. با اضافه کردن rPET و پودر چوب به نمونه‌های چوب پلاستیک، تغییر طول آنها کاهش یافته است، اما با افزایش مقدار سازگارکننده تا 8 phr به دلیل بهبود چسبندگی بین فازها، تغییر طول تا نقطه شکست بهبود یافته است. در واقع چوب به دلیل صلبیت بالاتری که نسبت به زمینه پلیمری دارد، نمی‌تواند به اندازه زمینه پلیمری تغییر طول دهد از اینرو در حین کشش یا ضربه، تماس و چسبندگی بین پودر چوب و زمینه کاهش یافته و در سطح تماس یکدیگر، کم کم از یکدیگر جدا می‌شوند، در نتیجه درون زمینه خلل و فرج بوجود آمده و باعث کاهش انعطاف پذیری نمونه می‌شود. در مورد rPET نیز همین قضیه صادق است، زیرا همانطور که در تصاویر SEM نشان داده شد در دمای فرآوری نمونه‌های چوب پلاستیک، rPET شبیه به پرکننده یا تقویت کننده بود. مشاهده می‌شود با افزایش بیشتر سازگارکننده تا 12 phr کرنش در نقطه شکست کاهش یافته است. علت آن می‌تواند به این دلیل باشد که به دلیل بالا بودن مقدار سازگارکننده، آن نتوانسته بطور یکنواخت در زمینه توزیع شود و اختلاط مناسبی انجام نشده است.

phr استحکام کاهش یافته است. این کاهش می‌تواند به دلیل عدم اختلاط و چسبندگی مناسب بین rPET و PP و HDPE در درصدهای بالای rPET باشد که البته نیاز به بررسی بیشتری در این زمینه وجود دارد. از شکل 5 می‌توان دریافت که با افزایش درصد سازگارکننده تا 8 phr استحکام کششی افزایش یافته است که دلیل آن بهبود چسبندگی بین اجزاء تشکیل دهنده چوب پلاستیک است. از 8 phr تا 12 phr تقریباً استحکام کششی ثابت مانده است. با مقایسه شکل 5 الف) و شکل 5 ب) مشاهده می‌شود با افزایش درصد پودر چوب از 30 wt. تا 40 wt. استحکام کششی تغییر چندانی نکرده است.

شکل 6 اثر میزان rPET سازگارکننده و پودر چوب را روی استحکام خمشی نمونه‌ها نشان می‌دهد. با مشاهده شکل می‌توان دریافت که تقریباً روند، شبیه استحکام کششی است. با افزایش درصد rPET و سازگار کننده استحکام خمشی افزایش یافته و با افزایش درصد پودر چوب تغییر چندانی در استحکام خمشی مشاهده نشده است.

شکل 7 اثر میزان rPET سازگارکننده و پودر چوب را روی مدول کششی نمونه‌ها نشان می‌دهد. با اضافه کردن rPET به نمونه‌های چوب پلاستیک، مدول الاستیک آنها افزایش یافته است در حالیکه برای استحکام در مقادیر بیشتر از 25 phr استحکام اندکی کاهش یافت. افزایش مدول به دلیل بیشتر بودن مدول الاستیک (rPET 2900 MPa) [3] نسبت به HDPE (1470 MPa) و PP (1470 MPa) (براساس اطلاعات تولیدکننده) است. با مشاهده این اختلاف رفتار در استحکام و مدول می‌توان نتیجه گرفت که در تغییر شکل‌های کوچک، انتقال تنش به خوبی صورت می‌گیرد ولی در تغییر شکل‌های بزرگ بدلیل ضعف در برهم کنش فازی (که می‌تواند بین rPET و PP/PE یا rPET/PP/PE و چوب باشد) استحکام کششی پایین‌تر است. با مقایسه شکل 7 الف) و شکل 7 ب) مشاهده می‌شود با افزایش درصد پودر چوب از 30 wt. به 40 wt. مدول الاستیک چوب پلاستیک افزایش یافته است. با توجه به بالا بودن مدول الاستیک چوب (60000-70000 MPa) [26] نسبت به مخلوط پلیمری زمینه، این افزایش مورد انتظار است.

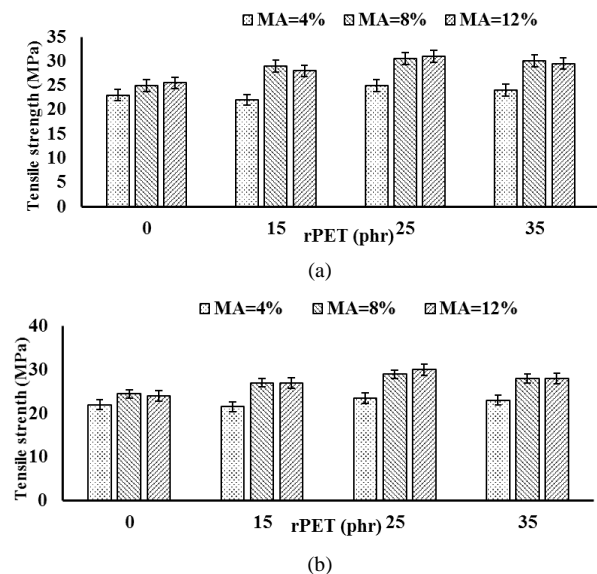


Fig. 5 The effect of rPET and compatibilizer content on tensile strength of WPCs for wood content of a) 30 wt., b) 40 wt.

شکل 5 تاثیر میزان rPET و سازگارکننده روی استحکام کششی نمونه‌های چوب پلاستیک با درصد چوب الف) 30 wt. ب) 40 wt.

شدن پودر چوب و rPET است. افزایش سازگارکننده در درصدهای پایین rPET به دلیل بهبود چسبندگی بین فازها باعث افزایش انرژی ضربه شده است. در درصدهای بالای rPET (35 phr) افزایش سازگارکننده یا باعث تغییر چندانی نشده یا اثر کاهشی داشته است که شاید دلیل آن عدم توزیع یکنواخت سازگارکننده و rPET در درصدهای بالا باشد.

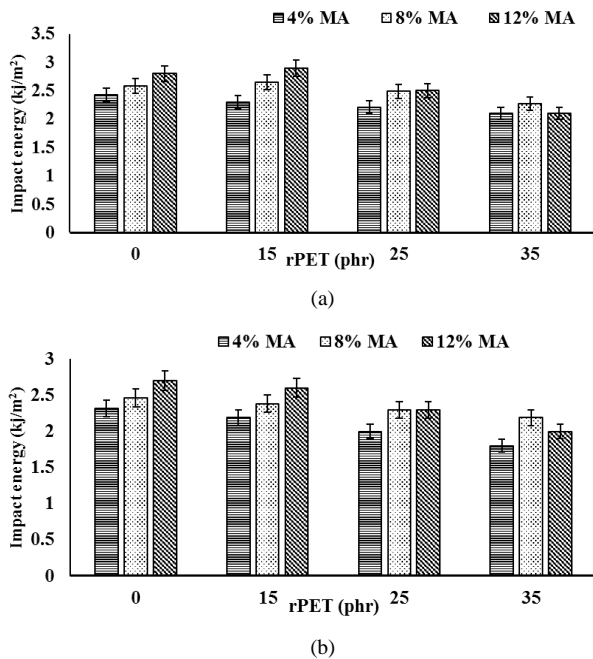


Fig. 9 The effect of rPET and compatibilizer content on impact energy of WPCs for wood content of a) 30 % wt., b) 40 % wt.

شکل 9 تاثیر میزان rPET و سازگارکننده روی انرژی ضربه نمونه‌های چوب (پلاستیک با درصد چوب الف) 30 % wt. ب) 40 % wt.

4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، نمونه‌های چوب-پلاستیک با زمینه PP/HDPE/rPET تهیه شده و تاثیر پودر چوب، سازگارکننده و rPET روی خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها بررسی شد. تهیه گرانول چوب-پلاستیک در دومرحله انجام شد. در مرحله اول مخلوط زمینه (PP/HDPE/rPET) تهیه شد و در مرحله دوم پودر چوب به زمینه اضافه شده و گرانول چوب-پلاستیک تولید شد. توسط فرآیند تریق-پلاستیک، گرانول چوب-پلاستیک تبدیل به نمونه‌های آزمایش شد. در ادامه تاثیر پارامترهای فرآیند از قبیل مقادیر rPET سازگارکننده و پودر چوب بر خواص مکانیکی (استحکام کششی و خمشی، مدول کششی، کرنش در نقطه شکست و انرژی ضربه) و فیزیکی (میزان جذب آب و چگالی) بررسی شد. نتایج زیر بدست آمده است:

- 1- افزایش پلی اتیلن ترفتالات، پودر چوب و سازگارکننده باعث افزایش چگالی نمونه‌ها شده است. بیشترین مقدار چگالی (1200 kg/m^3) در ترکیب 35 phr rPET از 12 phr سازگارکننده و 40 % wt. پودر چوب بدست آمده است.
- 2- با افزایش rPET و پودر چوب میزان جذب آب افزایش یافته و افزایش سازگارکننده باعث کاهش جذب آب چوب-پلاستیک شد. کمترین مقدار درصد جذب آب (0.46%) در ترکیب 0 phr rPET از 12 phr سازگارکننده و 30 % wt. پودر چوب بدست آمده است.

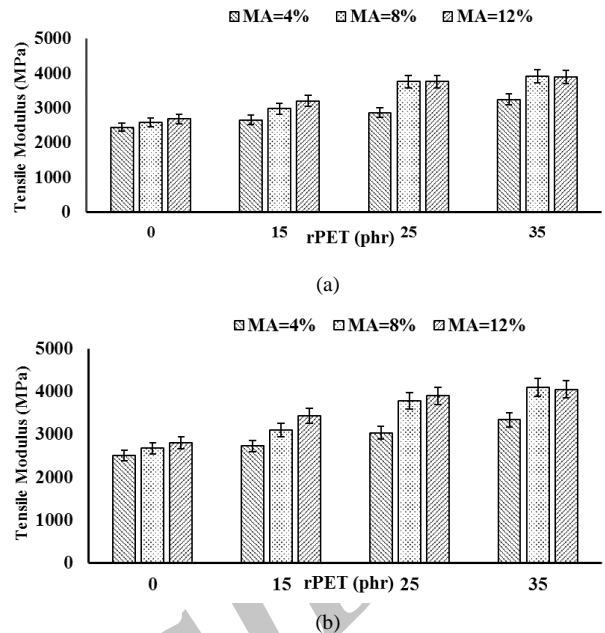


Fig. 7 The effect of rPET and compatibilizer content on tensile Modulus of WPCs for wood content of a) 30 % wt., b) 40 % wt.

شکل 7 تاثیر میزان rPET و سازگارکننده روی مدول کششی نمونه‌های چوب (پلاستیک با درصد چوب الف) 30 % wt. ب) 40 % wt.

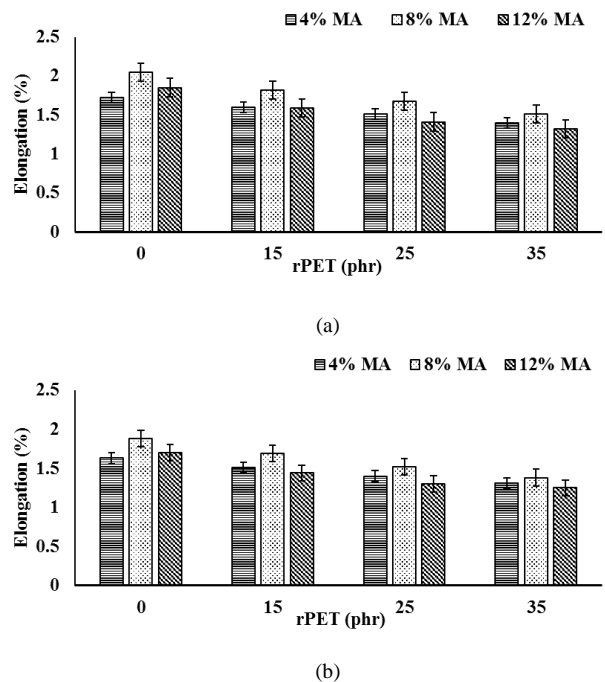


Fig. 8 The effect of rPET and compatibilizer content on elongation of WPCs for wood content of a) 30 % wt., b) 40 % wt.

شکل 8 تاثیر میزان rPET و سازگارکننده روی تغییر طول نمونه‌های چوب-پلاستیک (پلاستیک با درصد چوب الف) 30 % wt. ب) 40 % wt.

3-5 اثر متغیرها روی انرژی ضربه

شکل 9 اثر میزان rPET سازگارکننده و پودر چوب را روی انرژی ضربه نمونه‌ها نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است با افزایش rPET و پودر چوب انرژی ضربه کاهش یافته است. دلیل آن نیز همانطور که برای کرنش در نقطه شکست (انعطاف پذیری) بیان شد، ناشی از ترد شدن نمونه‌ها با اضافه

[8] Clemons, C., "Wood-Plastic Composites in the United States: The Interfacing of Two Industries" *Forest Products Journal*, Vol. 52, No. 6, pp. 10, 2002.

[9] Kamdem, D. P., Jiang, H., Cui, W., Freed, J. and Matuana, L. M., "Properties of Wood Plastic Composites Made of Recycled Hdpe and Wood Flour from Cca-Treated Wood Removed from Service" *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 35, No. 3, pp. 347-355, 2004.

[10] Mohanty, A., Drzal, L. and Misra, M., "Novel Hybrid Coupling Agent as an Adhesion Promoter in Natural Fiber Reinforced Powder Polypropylene Composites" *Journal of Materials Science Letters*, Vol. 21, No. 23, pp. 1885-1888, 2002.

[11] Gassan, J. and Bledzki, A. K., "The Influence of Fiber-Surface Treatment on the Mechanical Properties of Jute-Polypropylene Composites" *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 28, No. 12, pp. 1001-1005, 1997.

[12] Ou, R., Zhao, H., Sui, S., Song, Y. and Wang, Q., "Reinforcing Effects of Kevlar Fiber on the Mechanical Properties of Wood-Flour/High-Density-Polyethylene Composites" *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 41, No. 9, pp. 1272-1278, 2010.

[13] Gao, H., Xie, Y., Ou, R. and Wang, Q., "Grafting Effects of Polypropylene/Polyethylene Blends with Maleic Anhydride on the Properties of the Resulting Wood-Plastic Composites" *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 43, No. 1, pp. 150-157, 2012.

[14] Clemons, C., "Elastomer Modified Polypropylene-Polyethylene Blends as Matrices for Wood Flour-Plastic Composites" *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 41, No. 11, pp. 1559-1569, 2010.

[15] Utracki, L. A., "Commercial Polymer Blends", Springer Science & Business Media, 2013.

[16] Doroudiani, S., Park, C. B. and Kortschot, M. T., "Processing and Characterization of Microcellular Foamed High-Density Polyethylene/Isotactic Polypropylene Blends" *Polymer Engineering & Science*, Vol. 38, No. 7, pp. 1205-1215, 1998.

[17] Radusch, H. J., Ding, J. and Akovali, G., "Compatibilization of Heterogeneous Polymer Mixtures from the Plastics Waste Streams" in: *Frontiers in the Science and Technology of Polymer Recycling*, Eds., pp. 153-189: Springer, 1998.

[18] Colbeaux, A., Fenouillot, F., Gérard, J. F., Taha, M. and Wautier, H., "Compatibilization of a Polyolefin Blend through Covalent and Ionic Coupling of Grafted Polypropylene and Polyethylene. I. Rheological, Thermal, and Mechanical Properties" *Journal of applied polymer science*, Vol. 95, No. 2, pp. 312-320, 2005.

[19] Monte, S. J. and Petrochemicals, K., "Regeneration in the Melt of Recycle and Re grind Thermoplastics Using Neoalkoxy Titanates and Zirconates" in *Proceeding of*.

[20] Tawfik, M. E. and Eskander, S. B., "Chemical Recycling of Poly (Ethylene Terephthalate) Waste Using Ethanolamine. Sorting of the End Products" *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 95, No. 2, pp. 187-194, 2010.

[21] Frigione, M., "Recycling of Pet Bottles as Fine Aggregate in Concrete" *Waste management*, Vol. 30, No. 6, pp. 1101-1106, 2010.

[22] Ge, Z., Huang, D., Sun, R. and Gao, Z., "Properties of Plastic Mortar Made with Recycled Polyethylene Terephthalate" *Construction and Building Materials*, Vol. 73, pp. 682-687, 2014.

[23] Dairi, B., Djidjelli, H., Boukerrou, A., Migneault, S. and Koubaa, A., "Morphological, Mechanical, and Physical Properties of Composites Made with Wood Flour-Reinforced Polypropylene/Recycled Poly (Ethylene Terephthalate) Blends" *Polymer Composites*, 2015.

[24] Lei, Y. and Wu, Q., "High Density Polyethylene and Poly (Ethylene Terephthalate) in Situ Sub-Micro-Fibril Blends as a Matrix for Wood Plastic Composites" *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 43, No. 1, pp. 73-78, 2012.

[25] Rubin, I. I., "Handbook of Plastic Materials and Technology", Wiley New York, 1990.

[26] Ross, R. J., "Wood Handbook: Wood as an Engineering Material", 2010.

3- افزایش rPET، پودر چوب و سازگارکننده باعث افزایش استحکام کششی، خمشی و مدول الاستیک نمونه‌های چوب-پلاستیک شد. البته افزایش پودر چوب تاثیر چندانی بر استحکام کششی و خمشی نداشت. نتایج افزایش 44% برای استحکام کششی (نمونه با ترکیب 35 phr از rPET، 8phr سازگارکننده و 30 %wt. پودر چوب)، 53% برای مدول الاستیک (نمونه با ترکیب 35 phr از rPET، 8phr سازگارکننده و 40 %wt. پودر چوب) و 39% برای استحکام خمشی (نمونه با ترکیب 15 phr از rPET، 12phr سازگارکننده و 30 %wt. پودر چوب) را نشان داد. افزایش rPET و پودر چوب باعث ترد شدن ماده شدند و در نتیجه باعث کاهش کرنش در نقطه شکست (انعطاف پذیری) و انرژی ضربه شارپی نمونه‌های چوب-پلاستیک شدند.

5- فهرست علائم

A_t	درصد میزان جذب آب
HDPE	پلی اتیلن چگالی بالا
M_b	جرم نمونه غوطه‌ور شده در آب
PP	پلی پروپیلن
rPET	پلی اتیلن ترفتالات بازیافتی
SEM	میکروسکوپ الکترونی روبشی
V_b	حجم نمونه غوطه‌ور شده در آب
W_0	وزن نمونه قبل از غوطه‌وری
W_t	وزن نمونه بعد از غوطه‌وری در مدت زمان t
علائم یونانی	
ρ	چگالی (kgm^{-3})

6- مراجع

[1] López, M. d. M. C., Pernas, A. I. A., López, M. J. A., Latorre, A. L., Vilarino, J. L. and Rodríguez, M. V. G., "Assessing Changes on Poly (Ethylene Terephthalate) Properties after Recycling: Mechanical Recycling in Laboratory Versus Postconsumer Recycled Material" *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 147, No. 3, pp. 884-894, 2014.

[2] Navarro, R., Ferrandiz, S., Lopez, J. and Segui, V., "The Influence of Polyethylene in the Mechanical Recycling of Polyethylene Terephthalate" *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 195, No. 1, pp. 110-116, 2008.

[3] Taghavi, S. K., Shahrajabian, H. and Hosseini, H. M., "Detailed Comparison of Compatibilizers Mape and Sebs-G-Ma on the Mechanical/Thermal Properties, and Morphology in Ternary Blend of Recycled Pet/Hdpe/Mape and Recycled Pet/Hdpe/Sebs-G-Ma" *Journal of Elastomers & Plastics*, Vol. 0, No. 0, pp. 0095244317698738.

[4] Nourbakhsh, A. and Ashori, A., "Wood Plastic Composites from Agro-Waste Materials: Analysis of Mechanical Properties" *Bioresource technology*, Vol. 101, No. 7, pp. 2525-2528, 2010.

[5] Rahman, K. S., Islam, M. N., Rahman, M. M., Hannan, M. O., Dungani, R. and Khalil, H. A., "Flat-Pressed Wood Plastic Composites from Sawdust and Recycled Polyethylene Terephthalate (Pet): Physical and Mechanical Properties" *SpringerPlus*, Vol. 2, No. 1, pp. 629, 2013.

[6] Ashori, A. and Bahreini, Z., "Evaluation of Calotropis Gigantea as a Promising Raw Material for Fiber-Reinforced Composite" *Journal of Composite Materials*, Vol. 43, No. 11, pp. 1297-1304, 2009.

[7] Bender, D., Wolcott, M. and Dolan, J., "Structural Design and Applications with Wood-Plastic Composites" *Wood Design Focus*, Vol. 16, No. 3, pp. 13-15, 2006.