

## Production of Wood/Plastic Composites Based on PP/HDPE Blends: Determination of Optimum Conditions

M. Firouzeh<sup>1</sup>, S. Kazemi Najafi<sup>\*1</sup>, and I. Ghasemi<sup>2</sup>

1. Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, P.O. Box: 46414-356, Tehran, Iran

2. Iran Polymer and Petrochemical Institute, P.O. Box: 14965-115, Tehran, Iran

Received 7 November 2010, accepted 31 May 2011

### ABSTRACT

**M**echanical properties of wood/plastic composites manufactured by polyethylene and polypropylene blends (PP/HDPE) were studied. The SEBS (styrene-ethylene butylene-styrene) and EPDM (ethylene-propylene diene monomer) were used as compatibilizers to improve the compatibility and miscibility of the interface between HDPE and PP phases. The sawdust and polymers were compounded using an internal mixer (Haake). The samples of wood/plastic composite were prepared by injection-molding. Mechanical properties of wood/plastic composites such as, flexural modulus and flexural strength, impact strength and tensile strength were determined. The Taguchi method was employed in order to optimize these properties. Blends of PP and PE (3 levels), MAPP content (3 levels), polymer compatibilizer content (3 levels), polymer compatibilizer (two types) were considered as variable parameters. The results indicated that wood/plastic composites containing: 80% HDPE with 20% PP blend, 4% MAPP coupling agent, 2% polymer and EPDM compatibilizers were the optimum conditions to acquire the best quality composites. The fracture surfaces of samples were observed by scanning electron microscopy.

#### Key Words:

wood/plastic composite,  
polyethylene, polypropylene,  
compatibilizer,  
mechanical properties

(\*)To whom correspondence should be addressed.

E-mail: skazemi@modares.ac.ir

# تعیین شرایط بهینه ساخت کامپوزیت های چوب - پلاستیک حاصل از آمیخته PP/HDPE

منا فیروزه<sup>۱</sup>، سعید کاظمی نجفی<sup>۱\*</sup>، اسماعیل قاسمی<sup>۲</sup>

۱- تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، صندوق پستی ۳۵۶-۴۶۴۱۴

۲- تهران، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، صندوق پستی ۱۱۵-۱۴۹۶۵

دریافت: ۸۹/۸/۱۶، پذیرش: ۹۰/۳/۱۰

## چکیده

در این پژوهش، خواص مکانیکی کامپوزیت چوب-پلاستیک حاصل از مخلوط پلی اتیلن و پلی پروپیلن به همراه آرد چوب بررسی شد. به منظور ایجاد امتزاج پذیری و سازگاری بین دو فاز پلیمر از دو نوع سازگارکننده استیرن-اتیلن بوتیلن - استیرن (SEBS) و اتیلن-پروپیلن دی ان مونومر (EPDM) استفاده شد. اختلاط به وسیله مخلوط کن داخلی Haake انجام شد و نمونه های چوب-پلاستیک به کمک دستگاه قالب گیری تزریقی ساخته شدند. خواص مکانیکی نمونه های چوب-پلاستیک از جمله مدول کشسانی خمشی، استحکام خمشی، مقاومت ضربه ای بدون شکاف و استحکام کششی اندازه گیری شد. وجود چهار عامل درصد ترکیب پلیمرها، مقدار جفت کننده پلی پروپیلن اصلاح شده با مالئیک ایندرید (MAPP)، مقدار سازگارکننده بین پلیمرها و نوع سازگارکننده پلیمری هر کدام در حداکثر ۳ سطح تغییرات مطالعه شد. بدین منظور از طراحی آزمایش به روش تاگوچی برای دست یابی به خواص مکانیکی بهینه استفاده شد. سطوح بهینه عوامل در ساخت کامپوزیت چوب - پلاستیک شامل ۸۰ درصد وزنی پلی اتیلن و ۲۰ درصد وزنی پلی پروپیلن، مقادیر ۴ درصد وزنی سازگارکننده MAPP و ۲ درصد وزنی سازگارکننده بین پلیمرها از نوع EPDM به دست آمد. به منظور مطالعه شکل شناسی ناحیه بینابینی پلیمرها و الیاف سلولوزی تصاویر SEM از سطح مقطع شکست نمونه ها تهیه شد.

### واژه های کلیدی

کامپوزیت چوب - پلاستیک،  
پلی اتیلن، پلی پروپیلن،  
سازگارکننده، خواص مکانیکی

\* مسئول مکاتبات، پیام نگار:

## مقدمه

ویژه می‌شود. با توجه به عملکرد قابل قبول سازگارکننده‌های EPDM و SEBS در سازگارسازی آمیخته پلیمری PP/PE و بهبود مقاومت ضربه‌ای کامپوزیت، در کار حاضر از این دو سازگارکننده استفاده شده است.

## طراحی آزمایش‌ها

در این پژوهش، آزمایش‌ها با استفاده از روش آماری تاگوچی طراحی شده‌اند. آزمون برای هر نمونه، حداقل ۳ بار تکرار شد. با توجه به عوامل مورد بررسی و سطوح تغییرات آنها (جدول ۱) و با مراجعه به آرایه‌های متعامد تاگوچی، آرایه  $L_9(3^3)$  برای طراحی آزمایش این پژوهش انتخاب شد [۱۸].

## تجربی

### مواد

از پلی اتیلن سنگین (HDPE) محصول مجتمع پتروشیمی ایران با نام تجاری EA 6070 و شاخص جریان مذاب  $7/8-7/5 g/10 min$  (دمای  $190^{\circ}C$  و وزنه  $2/16 kg$ ) و پلی پروپیلن (PP) با نام تجاری PI0800 و شاخص جریان مذاب  $7-10 g/10 min$  (دمای  $190^{\circ}C$  و وزنه  $2/16 kg$ ) تهیه شده از مجتمع پتروشیمی اراک استفاده شد. به منظور بهبود ترکیب بین دو فاز پلیمری پلی اتیلن و پلی پروپیلن از سازگارکننده EPDM با نام تجاری Vistalon 7500 محصول شرکت Exxon و سازگارکننده SEBS با نام تجاری Calprene 7240 محصول شرکت Dynasole اسپانیا استفاده شد. به عنوان سازگارکننده یا عامل جفت‌کننده از پلی پروپیلن اصلاح شده با مالئیک انیدرید (MAPP) برای بهبود چسبندگی بین آرد چوب و پلیمر استفاده شد. سازگارکننده استفاده شده با مشخصات PRIEX 20097 از شرکت Solvey بلژیک تهیه شد. از کلسیم استئارات

جدول ۱- عوامل مورد بررسی و سطوح تغییرات آنها.

عامل	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
PP/HDPE (%)	۲۰/۸۰	۵۰/۵۰	۸۰/۲۰
MAPP (%)	۰	۲	۴
مقدار سازگارکننده پلیمری (%)	۲	۴	۶
نوع سازگارکننده پلیمری	SEBS	EPDM	-

با توجه به اهمیت و رشد روزافزون کامپوزیت‌های چوب - پلاستیک، پژوهش‌های زیادی در ارتباط با بررسی و بهبود خواص آن انجام شده است. در اغلب این پژوهش‌ها، ساخت کامپوزیت چوب - پلاستیک از یک پلیمر تنها، بررسی شده که بیشتر بر استفاده از پلی اتیلن [۱-۳] و پلی پروپیلن [۴،۵] تمرکز داشته است. از سوی دیگر، پژوهش‌های زیادی در زمینه آمیخته پلی اتیلن و پلی پروپیلن انجام شده است [۶-۸]. در واقع به منظور استفاده هم‌زمان از مزایای انواع پلیمرها و رفع بعضی معایب آنها، درهم‌آمیختن پلیمرها و تهیه آمیخته پلیمری مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است [۹]. آمیخته‌سازی می‌تواند با هدف کلی کاهش هزینه و تولید ماده‌ای با خواص کیفی برتر انجام شود. مثلاً پلی پروپیلن رفتار ضربه‌ای ضعیفی را نشان می‌دهد که آمیخته‌سازی پلی اتیلن و پلی پروپیلن سبب بهبود استحکام ضربه‌ای آن می‌شود [۷]. هر دو نوع پلیمر پلی اتیلن و پلی پروپیلن از نظر خواص شباهت زیادی به هم دارند و هیدروکربنی غیرقطبی‌اند. اما به طور کلی، دو پلیمر ناسازگار و امتزاج‌ناپذیرند. بنابراین در بیشتر حالت‌ها، آنها رفتار ضعیفی را نشان می‌دهند. از معمول‌ترین روش‌های اصلاح این امر، استفاده از سازگارکننده یا تهیه کوپلیمرهای پیوندی است. افزودن سازگارکننده به آمیخته PP/HDPE موجب سازگاری و امتزاج‌پذیری دو نوع پلیمر، چسبندگی بین سطحی و بهبود بعضی مقاومت‌ها می‌شود. نتایج یافته‌های پژوهشگران مختلف نشان می‌دهد، مواد متعددی را می‌توان به عنوان سازگارکننده در آمیخته PP/PE استفاده کرد که برخی از این مواد عبارتند از: استیرن-اتیلن بوتیلن - استیرن (SEBS) [۱۰،۱۱]، کوپلیمر قطعه‌ای (PP-b-PE) [۱۲]، اتیلن - پروپیلن پیوند خورده با مالئیک انیدرید (EP-g-MAH) [۱۳]، لاستیک اتیلن - پروپیلن (EPR) [۱۴] و اتیلن-پروپیلن دی‌ان مونومر (EPDM) [۱۵،۱۶].

استفاده از آمیخته پلی اتیلن و پلی پروپیلن در ساخت کامپوزیت‌های چوب-پلاستیک در پژوهش‌های محدودی مورد توجه قرار گرفته است [۲،۱۷] که در هیچ یک از آنها از ماده سازگارکننده برای سازگاری و امتزاج‌پذیری بین پلیمرها استفاده نشده است. در این پژوهش، ضمن بررسی اثر اختلاط دو نوع پلیمر پلی اتیلن و پلی پروپیلن بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های چوب - پلاستیک حاصل، اثر سازگارکننده پلیمری بر بهبود سازگاری و امتزاج‌پذیری پلیمرهای پلی اتیلن و پلی پروپیلن و در نتیجه بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت‌های حاصل مطالعه شده است. از این رو، وجود دو نوع پلیمر با خواص متفاوت به همراه آرد چوب سبب کاهش هزینه‌های تهیه کامپوزیت می‌شود. از طرفی، افزودن ماده سازگارکننده سبب ایجاد ماده‌ای با کاربرد جدید و

WG-LF آسیاب شد. سپس، آمیزه به مدت ۳h درون گرم‌خانه و در دمای ۸۰°C قرار گرفت. ساخت نمونه‌ها به وسیله دستگاه قالب‌گیری تزریقی مدل MPC-40 در دمای حدود ۱۷۵°C انجام شد. پیش از انجام آزمون‌های مورد نظر، نمونه‌های ساخته شده برای رسیدن به رطوبت تعادل به مدت دو هفته در شرایط آزمایشگاهی قرار گرفتند. شکل‌شناسی نمونه‌ها، به وسیله میکروسکوپ الکترونی (SEM) مدل TESCAN ساخت شرکت VEGA بررسی شد.

#### اندازه‌گیری خواص مکانیکی

آزمون خمش طبق استاندارد ASTM D790-90 [۱۹] با ماشین آزمون Dartec انجام و مدول کشسانی و استحکام خمشی نمونه‌ها محاسبه شد. آزمون ضربه به وسیله دستگاه ضربه از نوع ایزود طبق استاندارد ASTM D256-90 [۲۰] انجام شد. مقاومت ضربه‌ای بدون شکاف نمونه‌ها بر حسب  $J/m^2$  اندازه‌گیری شد. آزمون استحکام کششی طبق استاندارد ASTM D638-89 [۲۱] با سرعت بارگذاری ۵mm/min انجام شد.

#### نتایج و بحث

##### مدول کشسانی خمشی

در شکل ۱، نتایج تحلیل آزمون مدول کشسانی خمشی کامپوزیت

به عنوان روان‌ساز به مقدار معین (حدود ۲g) در همه نمونه‌ها استفاده شد. آرد چوب مصرفی از نوع راش بود و از کارگاه نجاری شرکت صنایع چوب پلی‌فرم تهیه شد.

#### دستگاه‌ها و روش‌ها

##### آماده‌سازی مواد اولیه

آرد چوب استفاده شده از الک کردن خاک اره با مش ۴۰/۶۰+ حاصل شده است. آرد چوب در گرم‌خانه با دمای ۸۰°C به مدت ۲۴h خشک و برای جلوگیری از جذب مجدد رطوبت آن، درون کیسه‌های پلاستیکی نگه‌داری شد.

##### ساخت نمونه‌ها

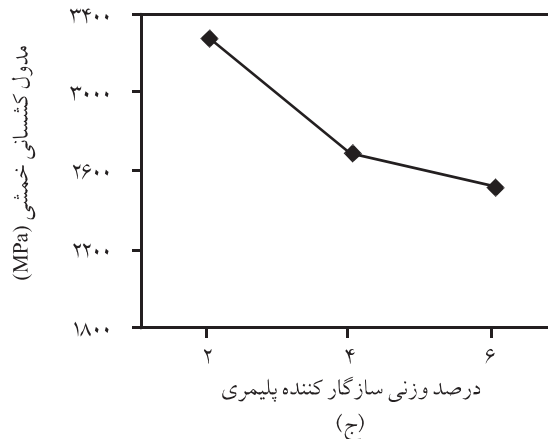
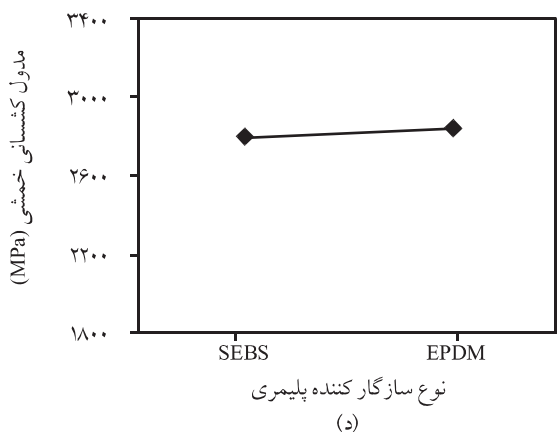
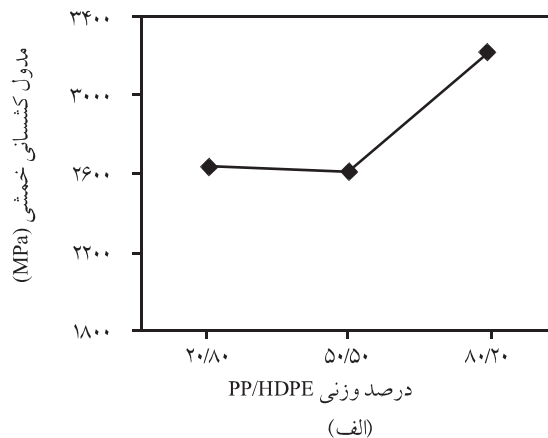
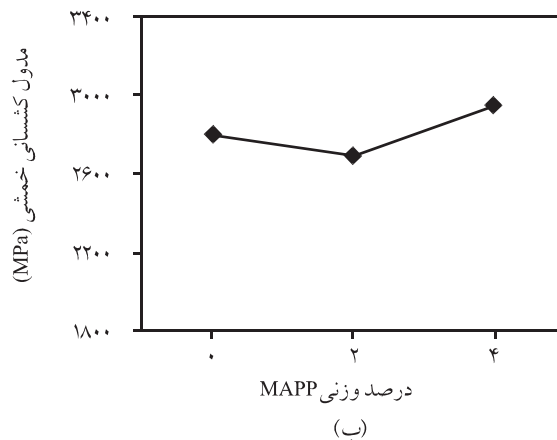
آرد چوب خشک شده، پلیمرها، سازگارکننده و عامل جفت‌کننده با نسبت درصد وزنی مورد نظر مطابق جدول ۲، به وسیله دستگاه مخلوط‌کن داخلی Haake مدل HIB SISTEM 90 مخلوط شدند. ظرفیت دستگاه ۳۰۰mL، سرعت آن ۶۰rpm و دمای محفظه روی ۱۹۰°C تنظیم شد. مقدار مواد به کار رفته در هر نمونه پیش از اختلاط، بر حسب گرم توزین شد. ابتدا، مخلوط پلیمرها (HDPE/PP) به همراه مقدار مورد نظر از سازگارکننده پلیمری (SEBS یا EPDM) به درون محفظه دستگاه مخلوط‌کن ریخته شد. سپس، آرد چوب و سازگارکننده MAPP با درصد مورد نظر در هر نمونه به تدریج اضافه شد. آمیزه تولید شده پس از سرد شدن، به وسیله دستگاه آسیاب نیمه‌صنعتی مدل

جدول ۲- اختلاط ۹ گانه حاصل از مخلوط پلاستیک‌ها و خاک اره طبق آرایه L9 روش تاگوچی.

نمونه	آرد چوب (%)	PP/HDPE (%)	MAPP (%)	مقدار سازگارکننده پلیمری <sup>۲</sup> (%)	نوع سازگارکننده پلیمری
۱	۶۰	۴۰(۲۰/۸۰) <sup>۱</sup>	۰	۲	SEBS
۲	۶۰	۳۸(۲۰/۸۰)	۲	۴	EPDM
۳	۶۰	۳۶(۲۰/۸۰)	۴	۶	EPDM
۴	۶۰	۴۰(۵۰/۵۰)	۰	۴	SEBS
۵	۶۰	۳۸(۵۰/۵۰)	۲	۶	SEBS
۶	۶۰	۳۶(۵۰/۵۰)	۴	۲	EPDM
۷	۶۰	۴۰(۸۰/۲۰)	۰	۶	EPDM
۸	۶۰	۳۸(۸۰/۲۰)	۲	۲	SEBS
۹	۶۰	۳۶(۸۰/۲۰)	۴	۴	SEBS

۱- اعداد داخل پرانتز نسبت دو جزء پلیمری و عدد بیرون پرانتز مجموع پلیمرها در ترکیب کامپوزیت است.

۲- براساس وزن پلیمر.



شکل ۱- آثار اصلی عوامل مختلف بر پاسخ مدول کشسانی خمشی: (الف) اثر درصد وزنی PP/HDPE، (ب) اثر درصد وزنی MAPP، (ج) اثر درصد وزنی سازگار کننده پلیمری و (د) اثر نوع سازگار کننده پلیمری.

کامپوزیت چوب-پلاستیک کاهش یافته است.

نتایج بررسی‌های پژوهشگران نیز نشان دهنده کاهش مدول کشسانی کامپوزیت چوب-پلاستیک با افزایش مقدار سازگار کننده پلیمری است که دلیل این پدیده ماهیت انعطاف پذیر سازگار کننده‌ها و کم بودن مدول خمشی آنهاست [۲۲، ۲۳]. با توجه به شکل ۱-د سازگار کننده EPDM، نسبت به SEBS به عنوان سطح بهینه معرفی می‌شود. سازگار کننده EPDM برهم کنش بین سطحی در فرایند ترکیب مذاب و چسبندگی بین دو فاز پلیمر را در حالت جامد تقویت می‌کند [۲۴] مقدار سطوح بهینه برای داشتن حداکثر مدول کشسانی خمشی کامپوزیت در جدول ۳ آمده است.

### استحکام خمشی

آثار عوامل انتخابی بر استحکام خمشی کامپوزیت چوب-پلاستیک در شکل ۲ مشاهده می‌شود. با توجه به این شکل دیده می‌شود، در ۸۰ درصد

چوب-پلاستیک نشان داده شده است. چهار نمودار رسم شده در این شکل، اثر چهار عامل مختلف را در سطح تغییرات آنها نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، آمیخته حاوی ۲۰٪ پلی اتیلن و ۸۰٪ پلی پروپیلن، بیشترین مقدار مدول کشسانی خمشی را نشان می‌دهد. به نظر می‌رسد، پلی پروپیلن دارای سفتی بیشتری نسبت به پلی اتیلن است [۹]. با افزایش مقدار پلی پروپیلن مدول کشسانی خمشی کامپوزیت‌های حاصل افزایش یافته است.

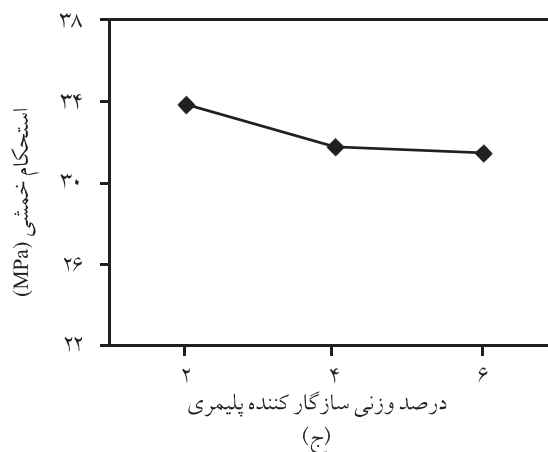
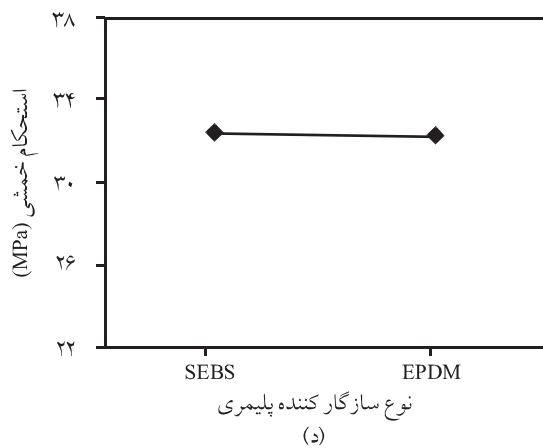
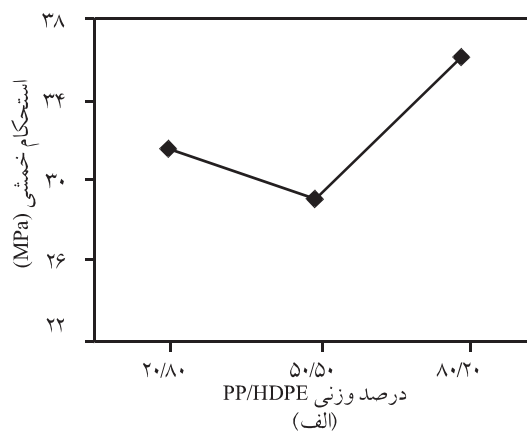
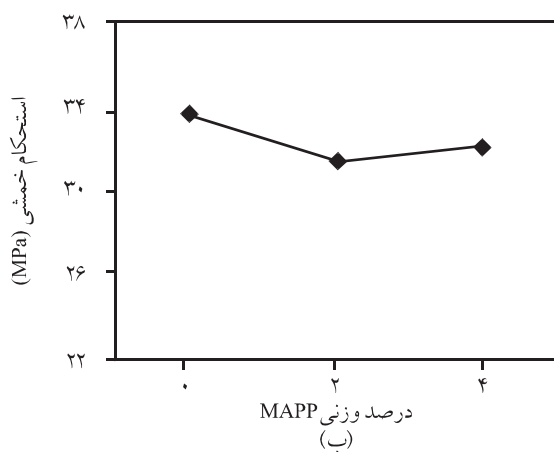
نتایج متعدد نیز نشان می‌دهد، با افزایش درصد وزنی پلی پروپیلن در آمیخته PP/PE، مدول کشسانی خمشی افزایش می‌یابد [۱۶، ۶]. هم‌چنین، طبق نتایج وجود ۴٪ عامل جفت کننده MAPP در کامپوزیت‌های چوب-پلاستیک، سبب ایجاد ناحیه بین سطحی مؤثر بین پرکننده قطبی و پلیمر غیرقطبی شده و تنش را از ماتریس پلیمر به مواد لیگنوسلولوزی، زیر بار خمشی به طور مؤثرتری انتقال داده است. با افزایش مقدار سازگار کننده پلیمری، مدول کشسانی خمشی

جدول ۳- سطوح بهینه عوامل در آزمایش‌های مختلف.

عامل	مدول کشسانی خمشی	استحکام خمشی	مقاومت ضربه ای بدون شکاف	استحکام کششی
PP/HDPE (%)	۳	۳	۱	۳
MAPP (%)	۳	۱	۳	۳
مقدار سازگارکننده پلیمری (%)	۱	۱	۳	۱
نوع سازگارکننده پلیمری	۲	۱	۲	۲

چوب بهتر از چسبندگی HDPE با آرد چوب است (به دلیل عدم سازگاری اسکلت PP در MAPP با HDPE موجود در ماتریس کامپوزیت) [۲۵]. بنابراین، با افزایش مقدار PP، افزایش استحکام خمشی کامپوزیت چوب-پلاستیک منطقی به نظر می‌رسد. اثر تغییرات مقدار MAPP بر پاسخ استحکام خمشی کامپوزیت

وزنی PP و ۲۰ درصد وزنی HDPE بیشترین مقدار استحکام خمشی حاصل شده است. استحکام خمشی کامپوزیت به قدرت چسبندگی ترکیبات وابسته است. نظر به این که در ترکیب کامپوزیت از MAPP به عنوان جفت کننده استفاده شده، بدیهی است که در مجاورت MAPP، چسبندگی PP با آرد



شکل ۲- آثار اصلی عوامل مختلف بر پاسخ استحکام خمشی: (الف) اثر درصد وزنی PP/HDPE، (ب) اثر درصد وزنی MAPP، (ج) اثر درصد وزنی سازگارکننده پلیمری و (د) اثر نوع سازگارکننده پلیمری.

کرده‌اند [۲۸].

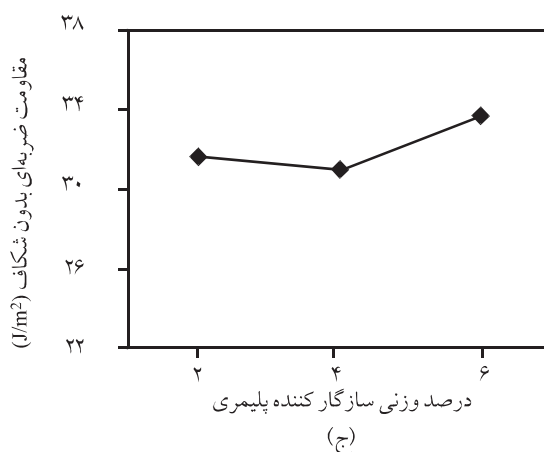
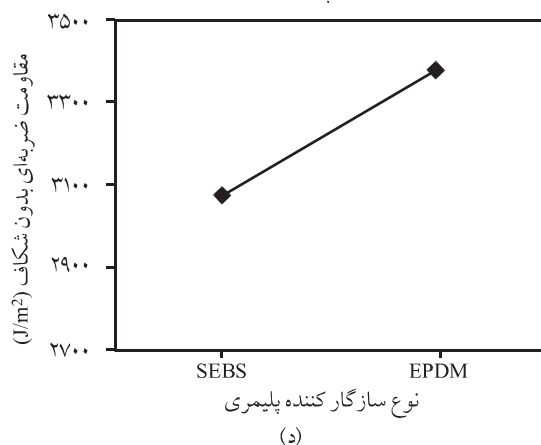
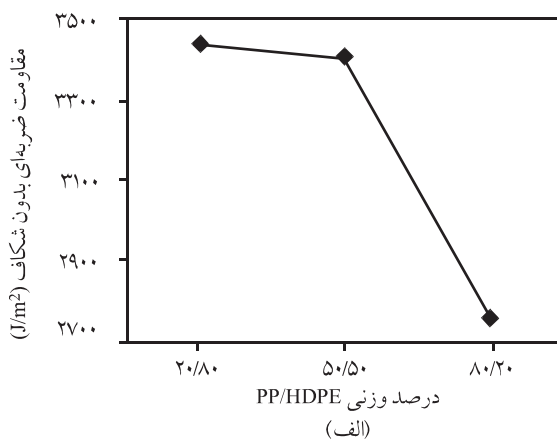
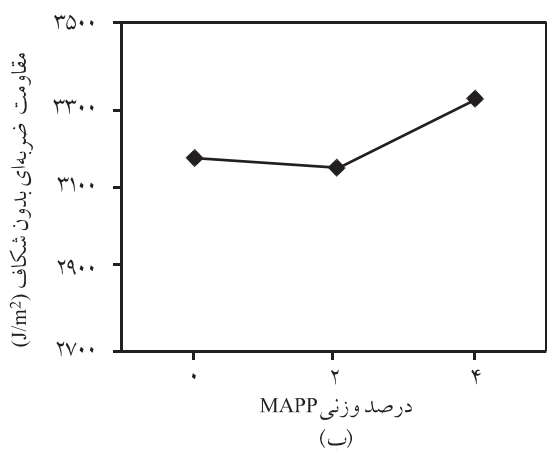
بر اساس **شکل ۲-د** مشاهده می‌شود، سازگارکننده SEBS با اختلاف ناچیزی بیش از EPDM بر استحکام خمشی اثر می‌گذارد. ماده سازگارکننده SEBS با کاهش انرژی بین سطحی دو پلیمر، سبب افزایش چسبندگی در سطح مشترک بین دو فاز می‌شود [۲۹]. مقدار سطوح بهینه برای دست‌یابی به حداکثر استحکام خمشی کامپوزیت در **جدول ۳** آمده است.

### مقاومت ضربه‌ای بدون شکاف

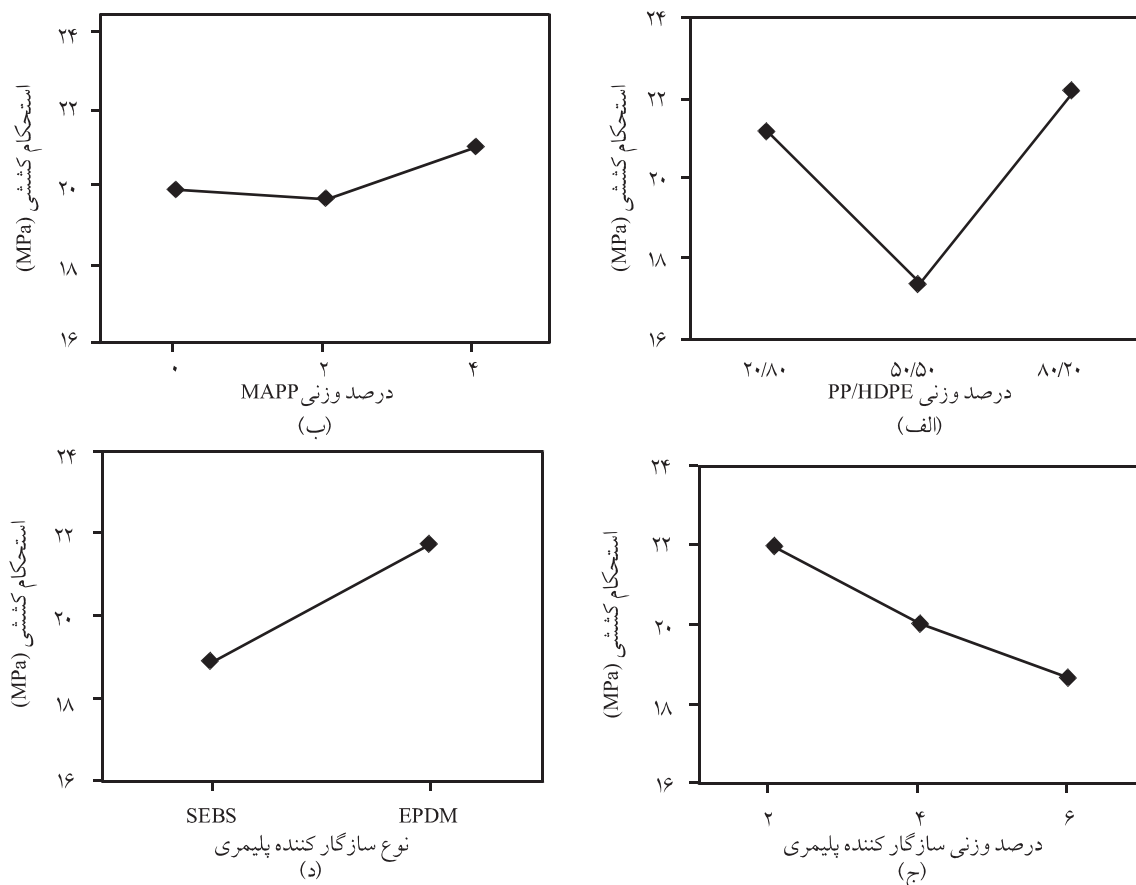
نتایج حاصل از تحلیل تاگوجی مربوط به آزمون مقاومت ضربه‌ای در **شکل ۳ مشاهده** می‌شود. براین اساس، بیشترین مقاومت ضربه‌ای بدون شکاف مربوط به نمونه‌های دارای ۲۰٪ پلی‌پروپیلن و ۸۰٪ پلی‌اتیلن است. با افزایش درصد وزنی پلی‌پروپیلن در آمیخته، مقاومت ضربه‌ای بدون شکاف کامپوزیت کاهش یافته است که نتیجه مشابهی نیز در این

چوب - پلاستیک نیز در **شکل ۲** نشان داده شده است. با وجود ۲ درصد وزنی MAPP در کامپوزیت، کاهش استحکام خمشی مشاهده می‌شود. با افزایش مقدار MAPP به ۴ درصد وزنی، استحکام خمشی افزایش می‌یابد، اما کمتر از حالت بدون سازگارکننده است.

با توجه به یافته‌های پژوهشگران در این زمینه، وجود استئارات فلزی به عنوان روان‌ساز در کامپوزیت چوب - پلاستیک، اثر سازگارکننده MAPP را در افزایش برهم‌کنش بین آرد چوب و پلیمر خنثی می‌کند یا اثر منفی بر آن دارد [۲۶، ۲۷]. در ترکیب کامپوزیت ساخته شده نیز وجود روان‌ساز کلسیم استئارات، سبب کاهش استحکام خمشی کامپوزیت حاصل شده است. هم‌چنین، نتایج حاکی از آن است که با افزایش مقدار سازگارکننده بین دو فاز پلیمری استحکام خمشی کامپوزیت چوب - پلاستیک کاهش می‌یابد. نتایج بررسی پژوهشگران نیز کاهش استحکام خمشی کامپوزیت چوب - پلاستیک اصلاح شده با انواع اصلاح‌کننده ضربه را ناشی از کم بودن استحکام خمشی اصلاح‌کننده‌های ضربه بیان



شکل ۳- آثار اصلی عوامل مختلف بر پاسخ مقاومت ضربه‌ای بدون شکاف: (الف) اثر درصد وزنی PP/HDPE، (ب) اثر درصد وزنی MAPP، (ج) اثر درصد وزنی سازگارکننده پلیمری و (د) اثر نوع سازگارکننده پلیمری.



شکل ۴- آثار اصلی عوامل مختلف بر پاسخ استحکام کششی: (الف) اثر درصد وزنی PP/HDPE، (ب) اثر درصد وزنی MAPP، (ج) اثر درصد وزنی سازگار کننده پلیمری و (د) اثر نوع سازگار کننده پلیمری.

هم است  $(\delta_{EPDM} = \sqrt{36}(\text{cal/cm}^2)^{1/2})$  و  $\delta_{PE} = \sqrt{83}$ ،  $\delta_{PP} = \sqrt{82}$  در حین اختلاط، ذرات PE و EPDM به هم می‌چسبند [۱۴]. از طرفی، چون EPDM کوپلیمری از PP و PE است، سازگاری زیادی نشان می‌دهد و چسبندگی دو فاز را بهبود می‌بخشد. در نتیجه، سبب بهبود مقاومت ضربه‌ای کامپوزیت حاصل می‌شود [۷]. در جدول ۳ سطوح بهینه برای رسیدن به بیشترین مقاومت ضربه‌ای بدون شکاف مشاهده می‌شود. با توجه به شرایط بهینه به دست آمده نمونه ۳ بیشترین مقاومت ضربه‌ای بدون شکاف را دارد.

#### استحکام کششی

نتایج آزمون استحکام کششی کامپوزیت چوب-پلاستیک در شکل ۴ نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می‌شود، در شکل ۴-الف حداکثر مقدار استحکام کششی در آمیزه حاوی ۲۰٪ پلی اتیلن و ۸۰٪ پلی پروپیلن است. این امر را احتمالاً می‌توان به استحکام کششی بیشتر پلی پروپیلن نسبت به پلی اتیلن [۸] نسبت داد. نتایج پژوهش انجام شده

زمینه وجود دارد [۱۶]. احتمالاً این امر را می‌توان به مقاومت ضربه‌ای کمتر پلی پروپیلن نسبت به پلی اتیلن نسبت داد. با افزایش مقدار ۴ درصد وزنی MAPP به نمونه‌ها، مقاومت ضربه‌ای کامپوزیت افزایش یافته است. در واقع در کامپوزیت‌های چوب-پلاستیک جفت کننده MAPP سبب ایجاد اتصالات کووالانسی با پرکننده می‌شوند که این واکنش‌ها چسبندگی را بین پلیمرها و پرکننده افزایش می‌دهد و سبب بهبود مقاومت‌ها می‌شود [۳۰]. هم چنین، وجود ۶٪ سازگار کننده موجب افزایش مقاومت ضربه‌ای پلیمرها می‌شود. در واقع، ذرات الاستومر به علت داشتن ساختار کشسان می‌توانند تغییر شکل دهند و اثر قابل توجهی بر جذب و پراکنده شدن انرژی ضربه داشته باشند. بنابراین، مقاومت ضربه‌ای با افزایش الاستومر بیشتر می‌شود [۳۱]. نتایج به دست آمده مربوط به مقاومت ضربه‌ای در شکل ۴-د، نشان دهنده این است که عملکرد EPDM به عنوان سازگار کننده بین دو فاز پلیمری بهتر از SEBS بوده است. از آن جا که پارامتر انحلال پذیری PE و EPDM بسیار نزدیک به



جدول ۴- سطوح بهینه عوامل در ساخت کامپوزیت چوب - پلاستیک.

عامل	مقدار	سطح
۳	۸۰/۲۰	(%) PP/HDPE
۳	۴	(%) MAPP
۱	۲	مقدار سازگارکننده پلیمری (%)
۲	EPDM	نوع سازگارکننده پلیمری

روی استحکام کششی آمیزه PP/HDPE نشان می‌دهد، در درصد‌های زیاد HDPE، کاهش در استحکام کششی مشاهده می‌شود و بیشترین مقدار استحکام کششی در آمیزه PP با ۲۰ درصد وزنی پلی اتیلن مشاهده می‌شود [۷].

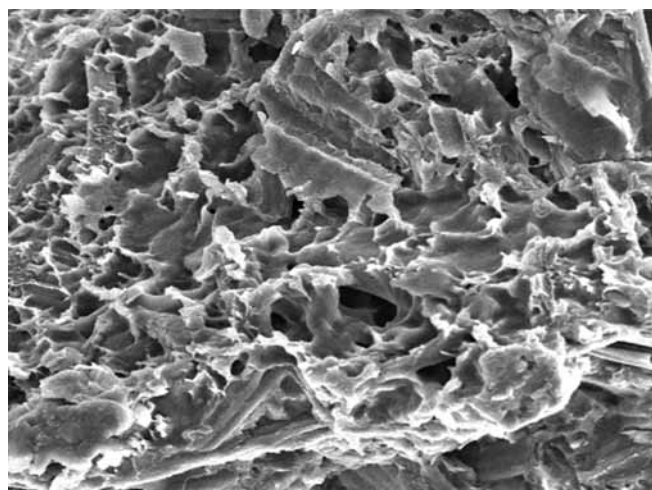
تغییرات مقدار استحکام کششی با تغییر درصد MAPP در شکل ۴- ب نشان داده شده است. با افزایش مقدار جفت‌کننده به ۴٪، استحکام کششی در نمونه‌ها افزایش یافته که حاکی از انسجام و تراکم مناسب کامپوزیت حین کشش است. در نتیجه، اتصالات محکم در فصل مشترک پرکننده و پلیمر حاصل می‌شود. نتایج مشابهی در زمینه وجود جفت‌کننده و افزایش برهم‌کنش‌ها و بهبود اتصالات گزارش شده است [۳۲].

بیشترین مقدار استحکام کششی در نمونه‌های دارای ۲ درصد سازگارکننده مشاهده می‌شود و با افزایش این مقدار استحکام کششی کاهش می‌یابد. نتایج بررسی پژوهشگران روی کامپوزیت الیاف سلولوزی- پلی پروپیلن نشان می‌دهد، با افزایش ذرات الاستومر استحکام کششی کامپوزیت کاهش می‌یابد که ویژگی‌های ساختاری ذرات الاستومر و حالت کشسانی آن باعث چنین واکنشی در کامپوزیت می‌شود [۳۱، ۳۳].

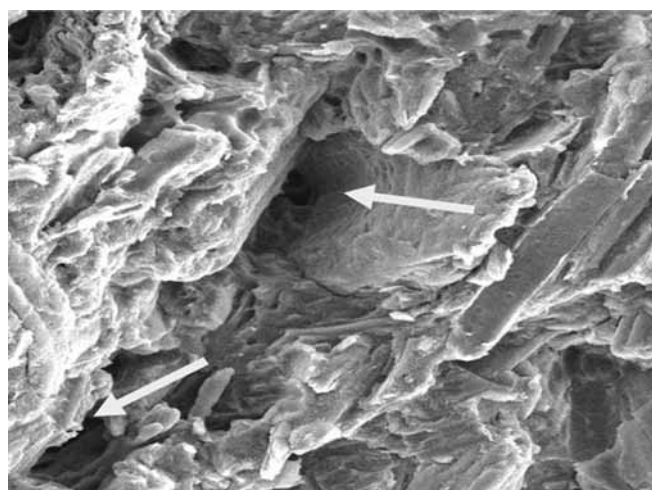
نتایج حاصل از اثر نوع ماده سازگارکننده بر استحکام کششی نیز نشان می‌دهد، در مجاورت سازگارکننده EPDM استحکام کششی بیشتری حاصل می‌شود. این یافته با نتایج سایر پژوهشگران نیز مطابقت دارد [۳۴]. با توجه به اثر عوامل متغیر بر استحکام کششی کامپوزیت چوب - پلاستیک براساس روش آماری تاگوچی، سطوح بهینه عوامل در **جدول ۳** نشان داده شده است.

### مطالعات میکروسکوپ الکترونی

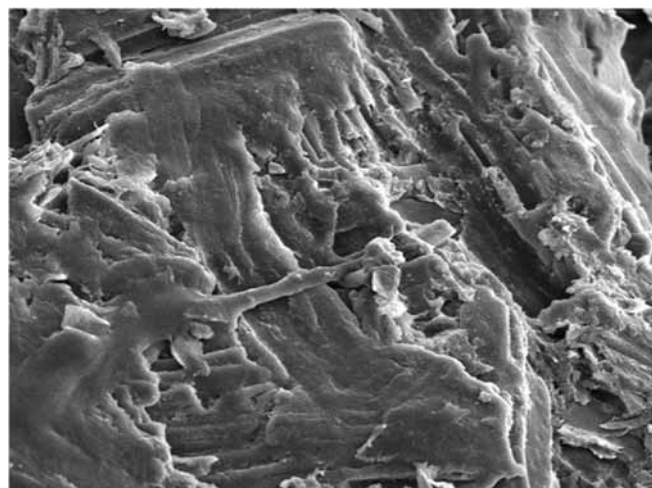
تصویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) مقاطع شکست نمونه‌های آزمون ضربه کامپوزیت چوب - پلاستیک ساخته شده از مخلوط پلی اتیلن و پلی پروپیلن در **شکل ۵** نشان داده شده است. همان‌طور که در تصاویر مشاهده می‌شود، به نظر می‌رسد در تصویر SEM کامپوزیت ساخته شده بدون سازگارکننده (۵-الف)، پیوستگی کمی بین پلیمر و آرد



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۵ - تصاویر میکروسکوپ الکترونی سطح شکست کامپوزیت ساخته شده از آرد چوب - PP/HDPE (بزرگ‌نمایی ۵۰۰×): (الف) بدون استفاده از MAPP، (ب) ۲ درصد MAPP و (ج) ۴ درصد MAPP.

## نتیجه گیری

در این پژوهش، خواص مکانیکی کامپوزیت‌های چوب-پلاستیک حاصل از آمیخته PP/HDPE به همراه آرد چوب بررسی شد. براساس نتایج به دست آمده با روش آماری تاگوچی، نمونه‌های حاوی ۸۰ درصد پلی‌پروپیلن و ۲۰ درصد پلی‌اتیلن حداکثر مدول و استحکام خمشی و استحکام کششی و نمونه‌های دارای ۲۰٪ پلی‌پروپیلن و ۸۰٪ پلی‌اتیلن حداکثر مقاومت ضربه‌ای بدون شکاف را در کامپوزیت ایجاد کرده‌اند. افزودن سازگارکننده MAPP به مقدار ۴ درصد، مقدار مقاومت ضربه‌ای بدون شکاف و مدول کشسانی خمشی و استحکام کششی را افزایش داد. هم‌چنین، سازگارکننده‌های SEBS و EPDM به دلیل داشتن ماهیت انعطاف پذیر به عنوان اصلاح کننده ضربه کاربرد دارند. بنابراین، با افزایش مقدار سازگارکننده پلیمری مدول و استحکام خمشی و نیز استحکام کششی کاهش یافته، اما مقاومت ضربه‌ای بدون شکاف کامپوزیت افزایش یافته است. وجود سازگارکننده EPDM نسبت به SEBS مؤثرتر بود، چون کوپلیمری از اتیلن و پروپیلن است. هم‌چنین، ضریب انحلال پذیری EPDM به PE و PP نزدیک است. براساس طراحی آزمایش با روش تاگوچی، شرایط بهینه برای ساخت کامپوزیت چوب-پلاستیک شامل ۸۰ درصد PP، ۲۰ درصد HDPE و مقادیر ۴ درصد سازگارکننده MAPP و ۲ درصد سازگارکننده پلیمری از نوع EPDM است.

## مراجع

1. Yuan Q., Wu D., Gotama J., and Bateman S., Wood Fiber Reinforced Polyethylene and Polypropylene Composites with High Modulus and Impact Strength. *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, **21**, 195-208, 2008.
2. Kazemi Najafi S., Hamidinia E., and Tajvidi M., Mechanical Properties of Composites from Sawdust and Recycled Plastics, *J. Appl. Polym. Sci.*, **100**, 3641-3645, 2006.
3. Lu J.Z., Wu Q., and Negulescu I.I., Wood-Fiber/High-Density-Polyethylene Composites: Coupling Agent Performance, *J. Appl. Polym. Sci.*, **96**, 93-102, 2005.
4. Mutje P.A., Lopez M.E., Vallejos J.P., and Vilaseca F., Full Inhabitation of Cannabis Sativa as Resin for Cement/Filler and Thermoplastic Composites, *J. Compos.*, **2**, 369-377, 2007.
5. Yang H.S., Kim H.J., Son J., Park H.J., Lee B.J., and Hwang T.S., Rice-Husk Flour Filled Polypropylene Composites, Mechanical and Morphological Study, *J. Compos. Struct.*, **63**, 305-312, 2004.
6. Robertson R.E. and Paul D.R., Stress-Strain Behavior of Polyolefin Blends, *J. Appl. Polym. Sci.*, **17**, 2579-2595, 1973.
7. Mehrabzadeh M. and Ghasemi I., Study of Mechanical Properties, Thermal Behavior and Morphology of PP/HDPE and PP/LDPE Blends, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (In Persian)*, **2**, 75-81, 1997.
8. Tai C.M., Li K.Y., and Ng C.N., Impact Behaviour of Polypropylene/Polyethylene Blends, *Polym. Test.*, **19**, 143-154, 2000.
9. Dick J.S., Blending in Polymer Industry, Sanati Esfehan, 1994. (Translated by Amirkhizi M.H., Persian, 411p).
10. Krach R., Benachour D., and Potschke P., Binary and Polyamide 6,6: The Effect of Compatibilizer on the Morphology and Rheology, *J. Appl. Polym. Sci.*, **94**, 1976-1985, 2004.
11. Flaris V., Zipper M.D., Simon G.P., and Hill A.J., Compatibilizer Liner Low-Density Polyethylene/Isotactic Polypropylene Blends Studied by Positron Annihilation Lifetime Spectroscopy, *Polym. Eng. Sci.*, **1**, 28-33, 1995.

12. Ubonnut L., Thongyai S., and Praserttham P., Interfacial Adhesion Enhancement of Polyethylene-Polypropylene Mixtures by Adding Synthesized Diisocyanate Compatibilizer, *J. Appl. Polym. Sci.*, **104**, 3766-3773, 2007.
13. Kallel T., Massardier-Nageotte V., Jaziri M., and Gerard J.F., Compatibilization of PE/PS and PE/PP Blends. I. Effect of Processing Conditions and Formulation, *J. Appl. Polym. Sci.*, **90**, 2475-2484, 2003.
14. Teh J.W. and Rudin A., A Review of Polyethylene-Polypropylene Blends and their Compatibilization, *Adv. Polym. Technol.*, **13**, 1-23, 1994.
15. Ha C.S., Park H.D., Kim Y., Kwon S.K., and Cho W.J., Compatibilizer in Polymer Blends for the Recycling of Plastics Waste I: Preliminary Studies on 50/50 wt% Virgin Polyblends, *Polym. Adv. Technol.*, **7**, 483-492, 1996.
16. Lee J.O., Kim B.K., Ha C.S., Song K.W., Lee J.K., and Cho W.J., Rheological and Mechanical Properties of PP/PE Binary and PP/PE/EPDM Ternary Blends, *Polymer (Korea)*, **18**, 68-77, 1994.
17. Hua G., Young-ming S., Qing-wen W., Zhen H., and Ming-li Z., Rheological and Mechanical Properties of Wood Fiber-PP/PE Blend Composites, *J. Forest. Res.*, **19**, 315-318, 2008.
18. Roy K.R., *Design of Experiments Using Taguchi Approach: 16 Steps to Product and Process Improvement*, John Wiley and Sons, New York, 2001.
19. Standard Test Methods Flexural Properties of Unreinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, ASTM D 790-90, West Conshohocken, Pa. USA, 1990.
20. Standard Test Methods for Impact Resistance of Plastics and Electrical Insulating Materials., ASTM D256-90b, West Conshohocken, Pa. USA, 1990.
21. Standard Test Methods for Tensile Properties of Plastics (metric) American Society for Testing and Material, ASTM D638-89, West Conshohocken, Pa. USA, 1989.
22. Shakeri A., Hoseini S.K., and Ebrahimi Gh., Improvement in Mechanical Properties of Cellulose Fibers- Thermoplastic Polymer Composites, *Iran. Polym. J.*, **3**, 143-150, 2005.
23. Oksman K. and Clemons C., Mechanical Properties and Morphology of Impact Modified Polypropylene-Wood Flour Composites, *Appl. Polym. Sci.*, **67**, 1503-1513, 1998.
24. Vranjes N. and Rek V., Effect of EPDM on Morphology, Mechanical Properties, Crystallization Behavior and Viscoelastic Properties of iPP+ HDPE Blends, *J. Macromol. Symp.*, **258**, 90-100, 2007.
25. Li Q. and Matuana L.M., Surface of Cellulosic Materials Modified with Functionalized Polyethylene Coupling Agents, *J. Appl. Polym. Sci.*, **88**, 278-286, 2003.
26. Gallagher L.W., *The Effect of Utilizing Micrometer Sized Wood Fibers in Wood Plastic Composit*, MSc Thesis, College of Graduate Studies, December 2006.
27. Harper D. and Wolcott M., Interaction between Coupling Agent and Lubricants in Wood - Polypropylene Composites, *J. Compos. A.*, **35**, 385-394, 2004.
28. Sombatsompop N., Yotinwattanakumtorn C., and Thongsang S., Influence of Type and Concentration of Maleic Anhydride Grafted Polypropylene and Impact Modifiers on Mechanical Properties of PP/Wood Sawdust Composite, *J. Appl. Polym. Sci.*, **97**, 475-484, 2005.
29. Plawky U., Schlabs M., and Wenic W., The Role of Styrene-Ethylene/Butylene-Styrene Triblock Copolymer as Impact Modifier in Polypropylene-Polyethylene Blends, *J. Appl. Polym. Sci.*, **59**, 1891-1896, 1996.
30. Lei W., Ding X.Y., and Xu C., Effect of Compatibilizing Agent on Mechanical and Thermal Properties of Wood-Plastic Composites. *J. Adv. Mater. Res.*, **150**, 406-409, 2010.
31. Park B.D. and Balatinecz J., Mechanical Properties of Wood-Fiber Foughened Isotactic Polypropylene Composites, *Polym. Compos.*, **18**, 79-89, 1997.
32. Rohani A.M., Hanafi I., and Razaina M.T., Effects of Polyethylene-g-Maleic Anhydride on Properties of Low Density Polyethylene/Thermoplastic Sago Starch Reinforced Kenaf Fiber Composites, *Iran. Polym. J.*, **7**, 501-510, 2010.
33. Hoseini S.K., Ebrahimi Gh., and Shakeri A., Mechanical Properties, and Morphology of Impact Modified Polypropylene Cellulose Fiber Composites, *Iran. J. Natural Resourc*, **1**, 121-132, 2003.
34. Souza, A.M.C. and Demarquette N.R., Influence of Coalescence and Interfacial Tension on the Morphology of PP/HDPE Compatibilized Blends, *Polymer*, **43**, 3959-3967, 2002.