

## استفاده از لجن کارخانه بازیافت کاغذ بر خواص مکانیکی چندسازه بر پایه پلیمرهای بازیافتی

الهام مرزبان مریدانی<sup>۱\*</sup>، محمد طلایی پور<sup>۲</sup>، هومن حمصی<sup>۳</sup>، اسماعیل قاسمی<sup>۴</sup> و مهدی کلاگر<sup>۵</sup>

\*- نویسنده مسئول، کارشناس ارشد، صنایع چوب و کاغذ دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

پست الکترونیک: [elham.marzban93@yahoo.com](mailto:elham.marzban93@yahoo.com)

۲- استادیار، صنایع چوب و کاغذ، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

۳- دانشیار، صنایع چوب و کاغذ، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

۴- دانشیار، گروه فرایند، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، پژوهشگاه فرایند، تهران

۵- دانشجوی دکترا، صنایع چوب و کاغذ دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

تاریخ پذیرش: خرداد ۱۳۹۲

تاریخ دریافت: دی ۱۳۹۱

### چکیده

در این پژوهش ویژگی‌های مکانیکی چندسازه پلیمرهای بازیافتی (پلی اتیلن و پلی پروپیلن) و لجن کارخانه بازیافت کاغذ از دو منبع مختلف شامل لجن پساب (S) و لجن روی DAF (D) به عنوان تقویت کننده مورد بررسی قرار گرفت. برای ساخت چندسازه از سه سطح لجن کاغذ (۳۰، ۱۵ و ۴۵٪) استفاده شد. برای اختلاط مواد از دستگاه هک و برای ساخت نمونه‌های استاندارد از قالب‌گیری تزریقی استفاده گردید. نتایج بدست آمده نشان داد که چندسازه حاوی پلی پروپیلن و لجن پساب دارای ویژگی‌های مکانیکی بالاتری نسبت به چندسازه حاوی پلی اتیلن و لجن روی DAF می‌باشد. با افزایش میزان هر دو نوع لجن کارخانه بازیافت کاغذ به عنوان پرکننده ویژگی‌های کششی و خمشی نسبت به پلیمر خالص افزایش یافته است. البته فقط با افزایش میزان لجن روی DAF کاهش در مقاومت کششی چندسازه مشاهده شد. با افزایش میزان هر دو نوع لجن مقاومت به ضربه در همه چندسازه‌های مقاومت به ضربه کاهش یافت. همچنین چندسازه‌های حاوی لجن روی DAF مقاومت به ضربه پایین تری نسبت به لجن پساب کارخانه نشان دادند.

**واژه‌های کلیدی:** لجن کارخانه بازیافت کاغذ، چندسازه، ویژگی‌های مکانیکی

### مقدمه

۲۰۲۵، ۱۹ میلیارد تن ضایعات تولید شود. بنابراین آلودگی‌های زیست محیطی از ضایعات صنعتی و کشاورزی در سرتاسر جهان مورد توجه می‌باشد و مدیریت ایمنی ضایعات پرخطر یکی از مشکلات بزرگ رودرروی انسان می‌باشد به این دلیل امروزه پژوهشگران به یافتن راه حل‌های اجتماعی، تکنولوژی اقتصادی و مواد

با رشد جمعیت، افزایش شهرسازی، بالا رفتن استانداردهای زندگی به علت رشد تکنولوژی هم از نظر کمیت و هم از نظر تنوع جامدات ضایعاتی به صورت صنعتی، خانگی و فعالیت‌های کشاورزی افزایش یافته است. به صورت کلی تخمین زده شده است در سال

یکسان پرکننده کامپوزیت/ پلی پروپیلن/ اتیلن پلی پروپیلن و کائولین ویژگی‌های مکانیکی بالاتر (از قبیل مقاومت کششی، پارگی در طول بجز مدول یانگ) و جذب آب کمتر و ثبات گرمایی کمتری در مقایسه با چندسازه لجن- کاغذ/ پلی پروپیلن/ اتیلن پلی پروپیلن را نشان داد. هر چند چندسازه لجن کاغذ/ پلی پروپیلن/ اتیلن پلی پروپیلن مدول یانگ و درصد کریستالینه بهتر از کامپوزیت کائولین/ پلی پروپیلن و اتیلن پروپیلن را نشان داد.

Girones *et al.*, (2010) به بررسی استفاده از لجن

کارخانه کاغذ به عنوان پرکننده و تقویت کننده در چندسازه پلی پروپیلن پرداختند. نتایج نشان داد که افزایش میزان لجن در چندسازه منجر به افزایش مدول الاستیسیته شده، هر چند کاهش در مقاومت کششی و تغییر شکل در شکست مشاهده شد.

Hamzeh *et al.*, (2010) به بررسی تأثیر ضایعات

لجن کاغذ بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی چندسازه پلی اتیلن با دانسیته سنگین و پودر چوب پرداختند. هدف از این تحقیق تعیین برخی از ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی چندسازه پلی اتیلن با دانسیته سنگین تقویت شده با اختلاط‌های متفاوتی از لجن کاغذ و پودر چوب و همچنین ارزیابی کارایی اتصال دهنده بود. مواد لجن بازیافتی از دو منبع مختلف ضایعات لجن پساب و لجن جوهرزدایی شده بدست آمدند. ویژگی‌های خمشی چندسازه تأثیر مثبت افزودن لجن کاغذ را نشان داد. به خصوص اینکه مدول الاستیسیته با افزایش میزان لجن بهبود یافت. البته با افزایش انیدریدمالئیک پیوند خورده با پلی اتیلن ویژگی‌های خمشی بهبود قابل توجهی به نسبت نمونه‌های کنترل (نمونه بدون اتصال دهنده) نشان دادند.

دوستدار طبیعت جهت حفظ محیط زیست سبز و سالم اهمیت دارد. چندین کشور تلاش‌هایی را در حل این مشکل جهت بازیافت مواد ضایعاتی انجام دادند (Lertsutthiwong *et al.*, 2008). لجن کاغذ به صورت معمول ۴۵ تا ۵۵٪ رطوبت با ۲۰٪ یا بیشتر مواد جامد را داراست که دفن آن برای صنعت خمیر و کاغذ یک مسئله زیست محیطی پیچیده و سخت است که مشکلاتی برای جابه‌جایی این مواد هم وجود دارد. ترکیبات اصلی این لجن کاغذ شامل:

۱. الیاف نرم سلولزی (الیاف خیلی کوتاه باقی مانده

بر غربال الیاف و ماشین کاغذ)

۲. مواد معدنی (از قبیل کائولین و رس کربنات

کلسیم)

Jungil *et al.*, (2001) تحقیقی در مورد نسبت اختلاط

لجن کاغذ سازی، انواع و میزان استفاده از اتصال دهنده بر روی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی کامپوزیت پلیمر ترموپلاستیک- لجن کاغذ سازی انجام دادند. ویژگی‌های کششی کامپوزیت به صورت معنی داری با افزایش میزان اختلاط لجن کاغذ سازی افزایش یافت، به خصوص مدول کششی افزایش چشمگیری را نشان داد. مدول و مقاومت خمشی نتایج مشابهی با ویژگی‌های کششی را نشان داد. مقاومت به ضربه فاق دار و بدون فاق دار با افزایش میزان لجن کاغذ سازی کاهش یافت. البته با افزایش میزان اتصال دهنده ویژگی‌های کششی و خمشی به طور قابل ملاحظه‌ای نسبت به نمونه‌های کنترل بهبود یافت.

Salmah *et al.*, (2006) بررسی مقایسه‌ای بر روی اثر

لجن کاغذ و کائولین بر ویژگی‌های کامپوزیت پلی پروپیلن- اتیلن پروپیلن انجام دادند. در بارگذاری

## جدول ۱- ویژگی‌های لجن روی DAF

## و لجن انتهایی کارخانه

لجن پساب	لجن روی DAF	نوع لجن
۸/۳۹۴	۸/۱۸۰	pH
۳/۸۶ Ms/cm	۳/۸۸ Ms/cm	هدایت الکتریکی
%۴۸	%۲۱	مواد معدنی
%۵۲	%۷۹	مواد آلی

فرضیه تحقیق این است که با استفاده از لجن کارخانه کاغذسازی برای تهیه چندسازه می‌توان خواص مکانیکی چندسازه را بهبود داد. نوآوری در این پژوهش مربوط به تهیه لجن کارخانه کاغذسازی از کارخانه لطیف از دو بخش مختلف است که این دو نوع لجن تهیه شده از نظر میزان مواد آلی و معدنی تفاوت داشته و می‌توان با این بررسی نشان داد که آیا تفاوت در این میزان می‌تواند بر روی خواص مکانیکی چندسازه تأثیر داشته باشد؟

## مواد و روشها

در این پژوهش از پلی‌پروپیلن و پلی‌اتیلن ساخت شرکت پتروشیمی اراک به ترتیب با شاخص جریان مذاب (MFI) ۱۶ و ۱۸ gr/10min به‌عنوان فاز زمینه استفاده شد. برای تهیه پلیمر بازیافتی دو مرحله تخریب ترمومکانیکی روی پلی‌پروپیلن (دمای ۱۹۰-۱۷۰) و پلی‌اتیلن (۱۵۰-۱۳۰) خام به‌عنوان شاخصی از دفعات بازیافت در دستگاه اکسترودر انجام گردید. پلی‌پروپیلن و پلی‌اتیلن خام در دستگاه اکسترودر پس از یک بار اکسترودر به وسیله دستگاه آسیاب به گرانول تبدیل گردید (پلیمر یک بار بازیافتی). گرانول‌های تولید شده از مرحله اول مجدداً در دستگاه اکسترودر ریخته شد و پس از خروج از دستگاه مجدداً به گرانول تبدیل شد (پلیمر دو بار بازیافتی). دو نوع لجن مورد نیاز برای تحقیق از دو قسمت کارخانه کاغذسازی لطیف بدست آمد، یک نوع لجن از روی DAF کارخانه (D) و نوعی دیگر از بخش تصفیه پساب کارخانه (S) بدست آمد. ویژگی‌های این دو نوع لجن در جدول ۱ آورده شده است.

عملیات اختلاط پلیمر و لجن بازیافت کاغذ در دستگاه 90 HBI system Haake internal mixer ظرفیت ۳۰۰ cc و ضریب پرشدگی ۰/۸ برای پلی‌پروپیلن در دمای ۱۸۰ °C و برای پلی‌اتیلن در دمای ۱۵۰ با سرعت ۸۰rpm به مدت ۱۱ دقیقه انجام شد سطوح اختلاط مواد در جدول شماره ۲ بیان شده است. نمونه‌های آزمون مکانیکی و فیزیکی، به روش قالب‌گیری تزریقی تهیه شد. دمای سیلندر تزریق در هر سه ناحیه ۱۷۵ °C، دمای قالب ۲۳ °C، فشار تزریق ۱۱۰ bar و زمان دوره تزریق کمتر از ۲۰ ثانیه در نظر گرفته شد. در هر بار تزریق نمونه‌های استاندارد آزمون‌های مکانیکی (کشش، خمش و ضربه) بدست آمد.

آزمون خمش و کشش به ترتیب مطابق آیین‌نامه DV۹۰ و D۶۳۸ استاندارد ASTM و با سرعت بارگذاری ۵mm/min بر روی نمونه‌ها انجام شد. بدین منظور از دستگاه (Santam) مدل DBBP-2T استفاده شد. مقاومت به ضربه مطابق آیین‌نامه D۲۵۶ استاندارد ASTM به صورت بدون فاق بر روی نمونه‌ها انجام شد. به این منظور از دستگاه مدل ۵۱۰۲ استفاده شد.

جدول ۲- درصد وزنی ترکیبات تشکیل دهنده مختلف چندسازه‌های ساخته شده

شماره	کد	PP	PE	D	S	اتصال دهنده
۱	PP	۱۰۰	-	-	-	-
۲	PE	-	-	-	-	-
۳	PPD15	۸۲	-	۱۵	-	۳
۴	PPD30	۶۷	-	۳۰	-	۳
۵	PPD45	۵۲	-	۴۵	-	۳
۶	PPS15	۸۲	-	-	۱۵	۳
۷	PPS30	۶۷	-	-	۳۰	۳
۸	PPS45	۵۲	-	-	۴۵	۳
۹	PED15	-	۸۲	۱۵	-	۳
۱۰	PED30	-	۶۷	۳۰	-	۳
۱۱	PED45	-	۵۲	۴۵	-	۳
۱۲	PES15	-	۸۲	-	۱۵	۳
۱۳	PES30	-	۶۷	-	۳۰	۳
۱۴	PES45	-	۵۲	-	۴۵	۳

D: لجن روی DAF, S: لجن پساب

مقادیر میانگین و سایر شاخص‌های آماری مربوط به خواص مکانیکی چندسازه (مدول خمشی، مقاومت خمشی، مدول کششی، مقاومت کششی و مقاومت به ضربه) در کلیه تیمارها محاسبه گردید. با توجه به عوامل متغیر و سطح آنها در کل ۱۴ تیمار موجود بود که برای هر تیمار ۳ تکرار در نظر گرفته شد. تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از آزمون فاکتوریل در قالب بلوک‌های کاملاً تصادفی با استفاده از تجزیه واریانس و برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون چند دامنه‌ای دانکن توسط نرم‌افزار SPSS در سطح معنی‌داری ۰.۰۵٪ استفاده شد.

### نتایج

#### ویژگی‌های خمشی (مقاومت و مدول خمشی)

بر اساس جدول تجزیه واریانس (جدولهای ۳ و ۴) مشخص شد که در بین متغیرهای مورد بررسی نوع پلیمر، میزان اختلاط و نوع پرکننده دارای تأثیر معنی‌داری بر مقاومت و مدول خمشی می‌باشد.

جدول ۳- تجزیه واریانس مقادیر مقاومت خمشی چندسازه

منبع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	معنی داری
نوع پلیمر	۸۲۲/۸۱۷	۱	۸۲۲/۸۱۷	۱۳۳/۶۸۹	.۰۰۰
میزان اختلاط	۷۵/۳۸۵	۲	۳۷/۶۹۳	۵/۷۰۸	۰/۰۰۸
نوع پرکننده	۳۷۴/۲۲۹	۱	۳۷۴/۲۲۹	۵۶/۶۷۱	.۰۰۰
پلاستیک × میزان اختلاط	۰/۷۰۳	۲	۰/۳۵۱	۰/۰۵۳	۰/۹۴۸
پلاستیک × نوع پرکننده	۴/۳۷۵	۱	۴/۳۷۵	۰/۶۶۳	۰/۴۲۳
میزان اختلاط × نوع پرکننده	۲/۰۰۳	۲	۱/۰۰۱	۰/۱۵۲	۰/۸۶۰
پلاستیک × میزان اختلاط × نوع پرکننده	۵/۳۷۱	۲	۲/۶۸۵	۰/۴۰۷	۰/۶۷۰
خطا	۱۸۴/۸۹۸	۲۸	۶/۶۰۴		
کل	۸۵۶۹۵/۵۲۴	۴۲			

جدول ۴- تجزیه واریانس مقادیر مدول خمشی چندسازه

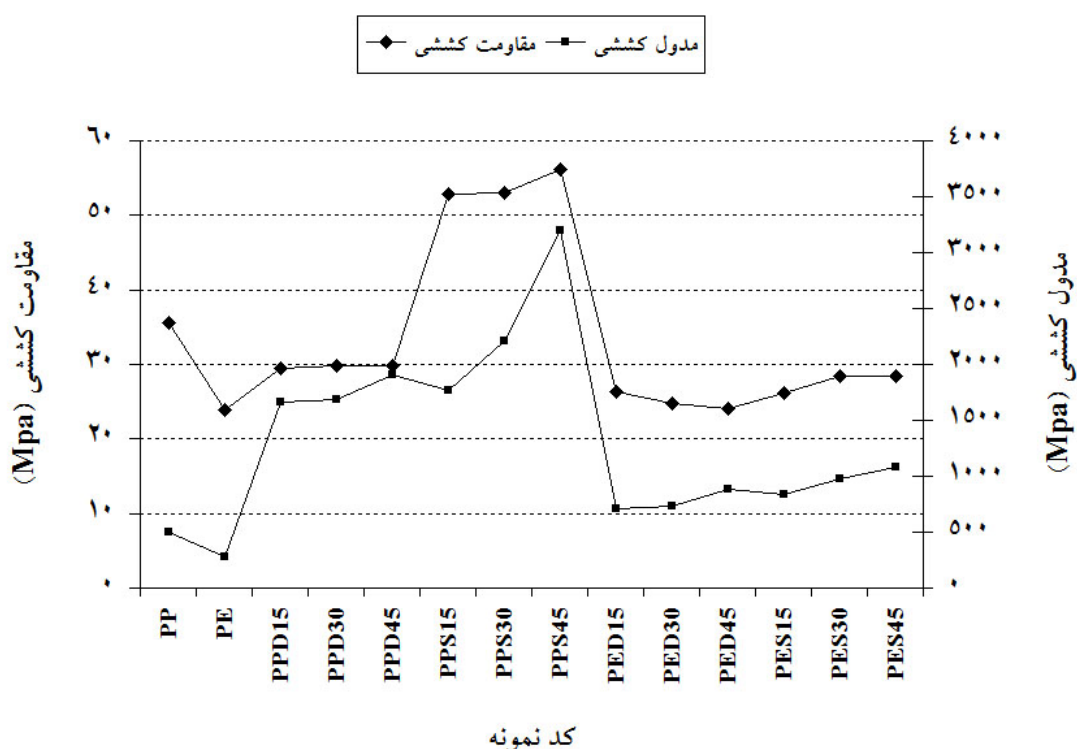
منبع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	معنی داری
نوع پلیمر	۳۸۳۵۴۸۱/۶۶۷	۱	۳۸۳۵۴۸۱/۶۶۷	۱۹۴/۱۶۵	.۰۰۰
میزان اختلاط	۵۲۶۲۱۴	۲	۲۶۳۱۰۷	۱۳/۳۱۹	.۰۰۰
نوع پرکننده	۱۹۰۰۹۶	۱	۱۹۰۰۹۶	۹/۶۲۳	۰/۰۰۴
پلاستیک × میزان اختلاط	۲۸۰۹۹/۵۵۶	۲	۱۴۰۴۹/۷۷۸	۰/۷۱۱	۰/۵۰۰
پلاستیک × نوع پرکننده	۱۷۳۶/۱۱۱	۲	۱۷۳۶/۱۱۱	۰/۰۸۸	۰/۷۶۹
میزان اختلاط × نوع پرکننده	۲۶۶۶	۲	۱۳۳۳	۰/۰۶۷	۰/۹۳۵
پلاستیک × میزان اختلاط × نوع پرکننده	۳۵۴۷/۵۵۶	۲	۱۷۷۳/۷۷۸	۰/۰۹۰	۰/۹۱۴
خطا	۵۵۳۱۰۳/۳۳۳	۲۸	۱۹۷۵۳/۶۹۰		
کل	۵/۱۸۴۷	۴۲			

مقاومت و مدول خمشی بالاتری نسبت به پلی اتیلن (PE) داشته و نمونه‌های چندسازه حاوی PP پر شده با هر دو نوع لجن کارخانه بازیافت کاغذ نیز دارای ویژگی‌های خمشی بالاتری نسبت به پلیمر خالص بوده است. با

شکل ۱ تأثیر متقابل نوع پلیمر، پرکننده و میزان پرکننده بر مقاومت و مدول خمشی چندسازه را نشان می‌دهد، چون در این شکلها تمامی متغیرها مورد بررسی قرار گرفتند؛ بنابراین می‌توان گفت که پلی پروپیلن (PP)

چندسازه حاوی لجن DAF بوده است. نمونه‌های حاوی لجن انتهایی کارخانه (S) با پلیمر PP دارای ویژگی‌های خمشی بالاتری نسبت به سایر چندسازه‌هاست. افزایش در مدول خمشی و همچنین مدول کششی (سفتی) چندسازه با افزودن لجن کارخانه را می‌توان به بالاتر بودن سفتی لجن کاغذ نسبت به پلیمر نسبت داد که باعث افزایش سفتی در چندسازه نهایی شده است.

افزایش میزان هر دو نوع پرکننده از ۱۵ به ۳۰ و ۴۵٪ مقاومت و مدول خمشی چندسازه افزایش یافته است. بالا بودن ویژگی‌های مکانیکی چندسازه حاوی PP نسبت به PE را می‌توان به چسبندگی سطح مشترک قوی‌تر زنجیره PP با لجن کارخانه نسبت به چندسازه حاوی PE نسبت داد. نمونه‌های دارای لجن انتهایی کارخانه در میزان‌های یکسان دارای ویژگی‌های خمشی بالاتری نسبت به



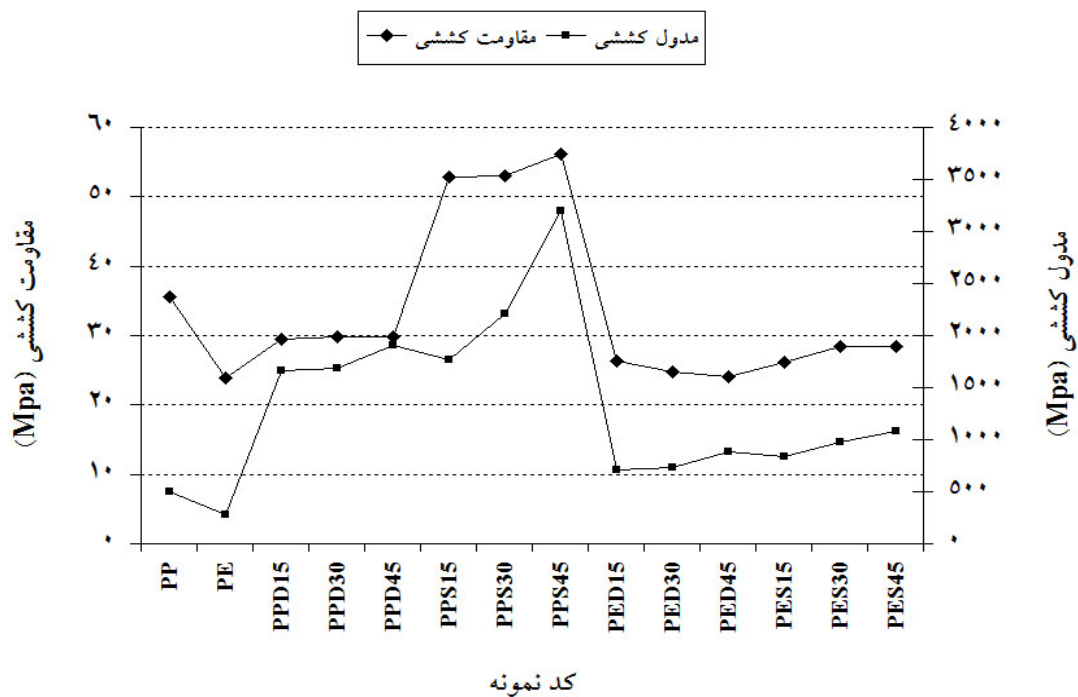
شکل ۱- تأثیر نوع پلیمر، پرکننده و میزان پرکننده بر مقاومت و مدول خمشی چندسازه و ویژگی‌های کششی (مقاومت و مدول)

با توجه به شکل ۲ تأثیر نوع پلیمر، پرکننده و میزان پرکننده را بر مقاومت کششی چندسازه می‌توان بررسی نمود. براساس بررسی داده‌ها چندسازه حاوی پلیمر پلی‌پروپیلن دارای مقاومت کششی بالاتری نسبت به

بر اساس جدول تجزیه واریانس ۵ مشخص شد که در بین متغیرهای مورد بررسی نوع پلیمر، میزان اختلاط و نوع پرکننده دارای تأثیر معنی‌داری بر مقاومت کششی می‌باشد.

مواد معدنی باعث پراکنش بهتر پرکننده در ماتریس می‌شود. پس با توجه به اینکه مواد معدنی دارای پراکنش بهتری در ماتریس پلیمر می‌باشند می‌توان گفت که علت کاهش مقاومت کششی در چندسازه حاوی PP و PE با لجن روی DAF را می‌توان به چسبندگی ضعیف پلیمر با پرکننده و همچنین بالا بودن مواد آلی (فیبری) نسبت داد که باعث پراکنش کمتر پرکننده در ماتریس شده‌اند. پس بالاتر بودن مواد معدنی در لجن انتهایی کارخانه باعث بهبود پراکنش و همچنین اتصال بهتر با پلیمر شده که در نهایت مقاومت کششی بالاتری را نشان داد.

چندسازه حاوی پلی اتیلن بوده است. البته با افزایش میزان پرکننده بجز در نمونه‌های PP و PE پر شده با لجن روی DAF که کاهش در مقاومت کششی مشاهده شده است، در سایر چندسازه‌ها افزایش در مقاومت کششی نمونه‌ها نسبت به پلیمر خالص دیده می‌شود. نمونه‌های حاوی PP با لجن انتهایی کارخانه دارای بیشترین میزان مقاومت کششی بوده‌اند. در چندسازه ساخته شده چسبندگی بین پرکننده و ماتریس و پراکنش خوب پرکننده در پلیمر می‌تواند باعث بهبود مقاومت کششی و دیگر ویژگی‌های مکانیکی چندسازه شود. همچنین وجود



شکل ۲ - تأثیر نوع پلیمر، پرکننده و میزان پرکننده بر مقاومت کششی چندسازه

می‌باشد. استفاده از لجن کارخانه کاغذسازی بیشترین تأثیر را بر روی مدول کششی چندسازه نشان داده است.

با توجه به جدول تجزیه واریانس (جدول ۶) می‌توان گفت که در تجزیه و تحلیل داده‌ها مدول کششی چندسازه‌های مختلف در همه متغیرهای موجود معنی‌دار

(PE) است. با افزایش میزان پرکننده مدول کششی افزایش یافته است اما در این افزایش چندسازه حاوی PP با لجن انتهایی کارخانه دارای بیشترین میزان مدول کششی می-باشد. نتایج حاصل از مدول کششی نشان داد که لجن کارخانه بازیافت کاغذ به علت دارا بودن سفتی بالا باعث افزایش سفتی چندسازه شده است.

شکل ۲ تأثیر نوع پلیمر، پرکننده و میزان پرکننده بر مدول کششی چندسازه نشان می دهد. با توجه به نتایج می توان گفت که استفاده از هر دو نوع لجن بیشترین تأثیر را بر روی مدول کششی چندسازه گذاشته است. همان طور که مشاهده می کنیم پلیمر پلی پروپیلن (PP) دارای مدول کششی بالاتری نسبت به پلیمر پلی اتیلن

جدول ۵ - تجزیه واریانس مقادیر مقاومت کششی چندسازه

منبع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	معنی داری
نوع پلیمر	۲۰۳۴/۶۷۳	۱	۲۰۳۴/۶۷۳	۱۲۵۱/۳۷۳	۰۰۰
میزان اختلاط	۵/۴۴۹	۲	۲/۲۲۴	۱/۶۷۶	۰/۲۰۵
نوع پرکننده	۱۶۲۶/۷۷۸	۱	۱۶۲۶/۷۷۸	۱۰۰۰/۵۰۸	۰۰۰
پلاستیک*میزان اختلاط	۷/۰۹۶	۲	۳/۵۴۸	۲/۱۸۲	۰/۱۳۲
پلاستیک*نوع پرکننده	۱۰۴۷/۶۰۱	۱	۱۰۴۷/۶۰۱	۶۴۴/۳۰۰	۰۰۰
میزان اختلاط*نوع پرکننده	۲۱/۲۸۲	۲	۱۰/۶۴۱	۶/۵۴۵	۰/۰۰۵
پلاستیک*میزان اختلاط*نوع پرکننده	۵/۸۹۶	۲	۲/۹۴۸	۱/۸۱۳	۰/۱۸۲
خطا	۴۵/۵۲۷	۲۸	۱/۶۲۶		
کل	۵۲۱۸۲/۶۵	۴۲			

جدول ۶- تجزیه واریانس مقادیر مدول کششی چندسازه

منبع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	معنی داری
نوع پلیمر	۸۸۴۱۲۱۷/۰۶۷	۱	۸۸۴۱۲۱۷/۰۶۷	۱۷۲/۱۰۹	۰۰۰
میزان اختلاط	۱۷۰۳۶۰۵/۰۵۶	۲	۸۵۱۸۰۲/۵۲۸	۱۶/۵۸۲	۰۰۰
نوع پرکننده	۱۵۱۱۲۶۰/۴۴۴	۱	۱۵۱۱۲۶۰/۴۴۴	۲۹/۴۱۹	۰۰۰
پلاستیک*میزان اختلاط	۶۷۸۳۵۵/۱۶۷	۲	۳۳۹۱۷۷/۵۸۳	۶/۶۰۳	۰/۰۰۴
پلاستیک*نوع پرکننده	۴۷۵۶۴۰/۱۱۱	۱	۴۷۵۶۴۰/۱۱۱	۹/۲۲۵۹	۰/۰۰۵
میزان اختلاط*نوع پرکننده	۵۶۶۱۳۷/۷۲۲	۲	۲۸۳۰۶۸/۸۶۱	۵/۵۱۰	۰/۰۱۰
پلاستیک*میزان اختلاط*نوع پرکننده	۵۲۰۸۹۵/۳۸۹	۲	۲۶۰۴۴۷/۶۹۴	۵/۰۷۰	۰/۰۱۳
خطا	۱۴۳۸۳۵۸	۲۸	۵۱۳۶۹/۹۲۹		
کل	۹/۸۸۷۷	۴۲			



## مقاومت به ضربه فاق دار

بر اساس تجزیه واریانس (جدول ۷) برای داده‌های حاصل از مقاومت به ضربه نمونه‌ها مشخص شد که متغیرهای نوع پلیمر، میزان اختلاط و نوع پرکننده تأثیر معنی‌داری بر مقاومت به ضربه چندسازه داشته است. شکل ۳ تأثیر نوع پلیمر، پرکننده و میزان پرکننده بر مقاومت به ضربه چندسازه را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود پلیمر PP دارای مقاومت به ضربه پایین‌تری نسبت به پلیمر PE بود و این موضوع به چندسازه‌های ساخته شده از این دو نوع پلیمر نیز بستگی دارد. با افزایش میزان پرکننده مقاومت به ضربه در همه چندسازه‌های حاوی هر دو لجن کاهش یافته اما چندسازه‌های حاوی لجن روی DAF دارای مقاومت به ضربه پایین‌تری نسبت به چندسازه‌های حاوی لجن انتهایی کارخانه بوده است. در بسیاری از مطالعات حضور الیاف سلولزی کاهش در مقاومت به ضربه را نشان داده است، پس حضور الیاف سلولزی در لجن کارخانه بازیافت کاغذ باعث به وجود آمدن شکاف و افزایش

انتشار شکست در چندسازه می‌شود. همچنین لجن روی DAF به علت دارا بودن الیاف سلولزی بالاتر مقاومت به ضربه پایین‌تری را نسبت به چندسازه حاوی لجن انتهایی کارخانه نشان داده است.

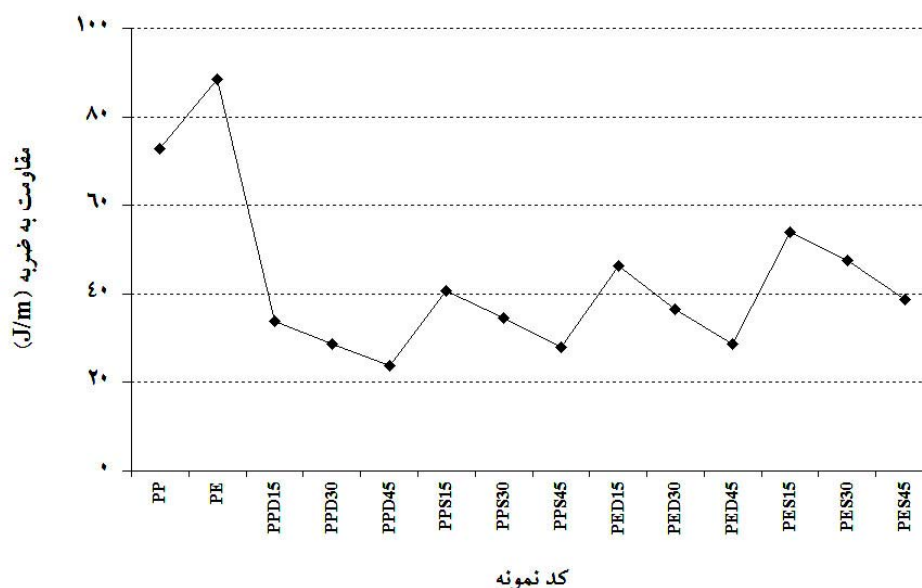
## بحث

## ویژگی‌های خمشی

خواص مکانیکی پلیمر بازیافتی پلی‌پروپیلن (PP) نسبت به پلیمر بازیافتی پلی‌اتیلن (PE) بالاتر بوده و - همچنین چندسازه ساخته شده با لجن کاغذ که حاوی پلیمر PP بوده نسبت به پلیمر PE دارای مقاومت مکانیکی بالاتری بوده است، که علت این موضوع را می‌توان اتصال سطح مشترک بهتر چندسازه حاوی پلی‌پروپیلن تقویت شده با هر دو نوع لجن (لجن روی DAF و لجن پساب) نسبت به پلی‌اتیلن دانست که *Son et al.*, (2001) نیز در بررسی مقایسه‌ای بین پلی‌پروپیلن و پلی‌اتیلن با لجن کارخانه کاغذ این موضوع را عنوان کردند.

جدول ۷- تجزیه واریانس مقادیر مقاومت به ضربه چندسازه

منبع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	معنی‌داری
نوع پلیمر	۱۲۹۹/۴۹۷	۱	۱۲۹۹/۴۹۷	۱۰۸/۳۸۸	۰۰۰
میزان اختلاط	۱۱۶۰/۹۸۰	۲	۵۸۰/۴۹۰	۴۸/۴۱۷	۰۰۰
نوع پرکننده	۵۱۴/۹۴۱	۱	۵۱۴/۹۴۱	۴۲/۹۵۰	۰۰۰
پلاستیک*میزان اختلاط	۳۷/۵۰۸	۲	۱۸/۷۵۴	۱/۵۶۴	۰/۲۲۷
پلاستیک*نوع پرکننده	۳۳/۲۸۴	۱	۳۳/۲۸۴	۲/۷۷۶	۰/۱۰۷
میزان اختلاط*نوع پرکننده	۳/۶۴۹	۲	۱/۸۲۴	۰/۱۵۲	۰/۸۶۰
پلاستیک*میزان اختلاط*نوع پرکننده	۱۲/۷۲۲	۲	۶/۷۲۲	۰/۵۳۱	۰/۵۹۴
خطا	۳۳۵/۷۰۰	۲۸	۱۱/۹۸۹		
کل	۹۱۱۲۰/۷۱۰	۴۲			



شکل ۳- تأثیر نوع پلیمر، پرکننده و میزان پرکننده بر مقاومت به ضربه چندسازه

خواص مکانیکی چندسازه داشته است. یحیی همزه و همکاران (۲۰۱۱) در تحقیقی صرف نظر از نوع لجن کاغذ گزارش کردند که ویژگی‌های خمشی با افزایش میزان لجن کاغذ بهبود یافته حتی در غیاب اتصال‌دهنده. پس با توجه به نتایج بدست‌آمده می‌توان گفت که هر دو نوع لجن کارخانه کاغذسازی به علت بالا بردن ویژگی‌های خمشی هم نقش پرکننده و هم تقویت‌کننده را دارا هستند. مقاومت خمشی چندسازه‌های ساخته شده بالاتر از مقاومت کششی بوده است. که (Woodhams *et al.*, 1990) این موضوع را به علت جهت‌گیری الیاف سلولزی لجن کارخانه در پوسته خارجی نمونه‌ها در طی قالب‌گیری تزریقی عنوان کرده‌اند. افزایش در مدول خمشی و همچنین مدول کششی (سفتی) چندسازه با افزودن لجن کارخانه در کارهای دیگر هم اشاره شده است که علت آن را سفتی بالای لجن کارخانه کاغذ دانسته که باعث افزایش معنی‌داری در سفتی چندسازه می‌شود.

به‌صورت معمول ترموپلاستیک‌های پر شده با تقویت‌کننده در داخل دو کلاس قرار می‌گیرند. پرکننده‌هایی که در داخل ماتریس پلیمر به بهبود ویژگی‌ها مکانیکی منجر شده (پرکننده تقویت‌کننده) یا باعث کاهش هزینه چندسازه می‌شوند (پرکننده غیر تقویت‌کننده). پرکننده تقویت‌کننده با افزایش میزان پرکننده ویژگی‌های مکانیکی را افزایش داده، درحالی‌که پرکننده‌ها مقاومت را کاهش می‌دهند (Simonsen *et al.*, 1995). افزایش در میزان هر دو نوع لجن کارخانه کاغذسازی از ۱۵ به ۳۰ و بعد ۴۵٪ باعث بالا رفتن ویژگی‌های خمشی نسبت به پلیمرهای شده است. اما این افزایش در چندسازه‌های حاوی پلی‌پروپیلن و لجن انتهایی کارخانه چشمگیرتر می‌باشد. با توجه به آنالیز هر دو نوع لجن میزان مواد معدنی (از قبیل کائولین، رس کربنات کلسیم) در لجن پساب کارخانه بیشتر از مواد آلی (الیاف نرم سلولزی) بوده است که می‌توان عنوان کرد میزان مواد معدنی بیشتر در لجن پساب نسبت به مواد آلی تأثیر بیشتری بر روی

## ویژگی‌های کششی

با افزایش میزان پرکننده در نمونه‌های PP و PE پر شده با لجن روی DAF کاهش در مقاومت کششی نمونه‌ها نسبت به پلیمر خالص دیده می‌شود. در بررسی مشابهی که توسط Girones *et al.*, (2010) در یک بررسی برای مقایسه مقاومت کششی PP خالص و پلیمر پر شده با لجن کارخانه کاغذ انجام شد کاهش در مقاومت کششی چندسازه حاوی لجن کاغذ مشاهده شد. معمولاً تلفیق پرکننده به ماتریس ترموپلاستیک پاسخ مشابهی را نشان می‌دهد. البته در مواردی الیاف طبیعی تلفیقشان معمولاً خیلی آهسته افزایش در مقاومت را نشان می‌دهد. پس می‌توان گفت که لجن روی DAF به علت دارا بودن میزان بالای الیاف سلولزی نتوانسته است باعث بهبود در مقاومت کششی شود. اما بر خلاف لجن روی DAF استفاده از لجن پساب کارخانه به‌عنوان پرکننده افزایش در مقاومت کششی چندسازه را نشان می‌دهد که این موضوع را می‌توان به بهبود اتصال بین ماتریس و پرکننده در چندسازه نسبت داد که با افزایش میزان لجن پساب کارخانه افزایش در مقاومت کششی مشاهده شد. Myers *et al.*, (1990) اعلام کردند که ویژگی‌های کششی و خمشی چندسازه ساخته شده با لجن کاغذ تقریباً بالاتر یا بالاتر از چندسازه پر شده با الیاف چوبی است که می‌توان گفت این مواد جایگزینی خوبی برای چوب در ساخت چندسازه هستند که باعث کاهش بر منابع جنگلی می‌شود. پس با توجه به نتایج بدست آمده لجن کاغذ تقویت کننده خوبی برای پلیمرهاست. چسبندگی بین پرکننده و ماتریس و پراکنش خوب پرکننده در پلیمر را می‌توان علت بهبود مقاومت کششی چندسازه عنوان کرد (Sims & Broughton, 2000). پس با توجه به اینکه مواد معدنی دارای

چسبندگی و پراکنش بهتری نسبت به الیاف سلولزی در ماتریس پلیمر می‌باشند می‌توان گفت که علت کاهش مقاومت کششی در چندسازه حاوی PP و PE با لجن روی DAF را می‌توان چسبندگی ضعیف پلیمر با پرکننده و همچنین بالا بودن مواد آلی (فیبری) نسبت داد که باعث پراکنش کمتر پرکننده در ماتریس شده‌اند. پس بالاتر بودن مواد معدنی در لجن انتهایی کارخانه باعث بهبود پراکنش و همچنین اتصال بهتر با پلیمر شده که در نهایت مقاومت کششی بالاتری را نشان داد.

در تجزیه و تحلیل داده‌ها مدول کششی چندسازه‌های مختلف در همه متغیرهای موجود معنی دار می‌باشد. با توجه به نتایج می‌توان گفت که استفاده از هر دو نوع لجن بیشترین تأثیر را بر روی مدول کششی چندسازه گذاشته است. همان‌طور که مشاهده می‌کنیم پلیمر پلی پروپیلن (PP) دارای مدول کششی بالاتری نسبت به پلیمر پلی اتیلن (PE) است. با افزایش میزان پرکننده مدول کششی افزایش یافته است اما در این افزایش چندسازه حاوی PP با لجن انتهایی کارخانه دارای بیشترین میزان مدول کششی می‌باشد. (Salmah *et al.*, 2006) در تحقیقی به وضوح نشان دادند که مدول کششی با افزایش میزان لجن کاغذ افزایش یافت. بنابراین آشکار است که پرکننده دارای سفتی بالاتری نسبت به ماتریس بوده و می‌تواند مدول کششی کامپوزیت را افزایش دهد، پس لجن انتهایی کارخانه دارای سفتی بیشتری نسبت به لجن روی DAF است، از این رو چندسازه‌های ساخته شده دارای مدول کششی بالاتری می‌باشند.

احتمالاً چسبندگی سطح مشترک خوب بین زنجیره پلیمر ترموپلاستیک و زنجیره الیاف سلولزی در لجن کاغذ باعث بهبود مقاومت و مدول کششی شده است (Son *et*

### منابع مورد استفاده

- Girones, J., Pardini, G., Vilaseca, F., Pelach, A. and Mutje, P., 2010. Recycling of Paper Mill Sludge as Filler/Reinforcement in Polypropylene Composites. *J Polym Environ*, 18(4): 407–412
- Hamzeh, Y., Ashorl, A. and Mirzaei, A., 2011. Effects of Waste Paper Sludge on the Physico-Mechanical Properties of High Density Polyethylene/Wood Flour Composites. *J Polym Environ*, 19(3): 120–124
- Jungil, S., Hyun-Joong, K. and Phil-Woo, L., 2001. Role of paper sludge particle size and extrusion temperature on performance of paper sludge-thermoplastic polymer composites. *Journal Applied Polymer Science*, 82(2): 2709-2718
- Jungil, S., Han-Seung, Y. and Hyun-Joong, K., 2003. Physico-mechanical Properties of Paper Sludge-Thermoplastic Polymer Composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 54(4): 1-14
- Lertsutthiwong, P., Khunthon, S., Siralermukul, K., Noomun, K. and Chandkrachang, S., 2008. New insulating particleboards prepared from mixture of solid wastes from tissue paper manufacturing and corn peel. *Bioresources Technol*, 99 (3): 4841-4845
- Myers, G., Chahyadi, I., Coberly, C., and Ermer, D., 1991. Wood Flour/ Polypropylene Composites: Influence of Maleated Polypropylene and Process and Composition Variables on Mechanical Properties, *Intern. J. Polymeric Mater*, 15 (3): 21–44.
- Salmah, H. and Abu Bakar, A., 2006. Effects of Chemical Modification of Paper Sludge Filled Polypropylene (PP)/Ethylene Propylene Diene Terpolymer (EPDM) Composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 23(6): 43-58
- Sims, G. and Broughton, W., 2000. *Comprehensive composite materials*. Elsevier Press: London, Vol. 2.
- Simonsen, J., 1995. The Mechanical Properties of Wood fiber-plastic Composites: Theoretical vs. Experimental, In: *Proceedings of Wood Fiber-Plastic Composites –Virgin and Recycled Wood Fiber and Polymers for Composites*. Forest Products Society, Madison: 47–55
- Son, J., Kim, H. and Lee, P., 2001. Role of paper sludge particle size and extrusion temperature on performance of paper sludge-thermoplastic polymer composites. *Journal Applied Polymer Science*, 82(11): 2709-2718
- Woodhams, R., Law, S. and Balatinecz, J., 1990. Properties and Possible Applications of Wood Fiber-polypropylene Composites, In: *Proceedings of Wood Adhesives Symposium*, 177–182

2001). پس می‌توان گفت که لجن پساب کارخانه نسبت به لجن روی DAF اتصالات بهتری را با پلیمر برقرار کرده است.

### مقاومت به ضربه

با افزایش میزان پرکننده مقاومت به ضربه در همه چندسازه‌های حاوی هر دو لجن کاهش یافته اما چندسازه‌های حاوی لجن روی DAF دارای مقاومت به ضربه پایین‌تری نسبت به چندسازه‌های حاوی لجن انتهایی کارخانه بوده است. افزایش در میزان لجن چندسازه کاهش در مقاومت به ضربه را نشان می‌دهد که این رفتار در چندسازه پر شده با انواع پرکننده عادی است. البته کاهش در مقاومت به ضربه چندسازه پر شده با لجن کارخانه کاغذ نسبت به پلیمر خالص را می‌توان در دو دلیل مهم مورد تجزیه و تحلیل قرار داد، نخست به توانایی کم مواد پرکننده (لجن کارخانه کاغذ) نسبت به پلیمر خالص به جذب انرژی ضربه و درثانی به شکاف و ترک در چندسازه که حاصل از وجود الیاف نرم سلولزی در لجن کارخانه کاغذ است. پس با افزایش میزان هر دو نوع پرکننده به پلیمر، میزان انرژی کمتری برای شکست نمونه‌ها لازم بوده که باعث کاهش در مقاومت به ضربه چندسازه نسبت به پلیمر خالص می‌شود. همچنین بیشتر بودن میزان مواد آلی (الیاف نرم سلولزی) نسبت به مواد معدنی در لجن روی DAF باعث تشدید در کاهش مقاومت به ضربه شده است، چون وجود الیاف در لجن کاغذ باعث شکاف و ترک در اتصالات شده و باعث انتشار بیشتر شکاف در چندسازه می‌شود (Jungil et al., 2003).

## Effects of paper mill recycling sludge application on the mechanical properties of composites based on recycled polymers

Marzban Moridani, E.<sup>1\*</sup>, Talaeipou, M.<sup>2</sup>, Hemmasi, A.H.<sup>3</sup>, Ghasmi, E.<sup>4</sup> and Kalagar, M.<sup>5</sup>

1\*- M.Sc., Department of Wood and Paper Science, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran,  
Email: elham.marzban93@yahoo.com

2- Assistant professor, Department of Wood and Paper Science, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

3- Associate professor, Department of Wood and Paper Science, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

4- Associate Professor, Processing Department, Iran Polymer and Petrochemical Institute, Tehran, Iran

5- Ph.D. Student, Department of Wood and Paper Science, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Received: Jan., 2012

Accepted: June, 2013

### Abstract

Mechanical properties of composite produced from recycled polymers (polyethylene and polypropylene) and paper mill sludge from two different sources (waste water sludge (s) and sludge on the DAF) were examined. Three levels of paper sludge (15, 30 and 45 wt %) were used to produce composites. Haake machine was used to blend materials and to produce standard samples, injection molding system was utilized. The mechanical properties including bending (strength and modulus) and impact strength were measured. Results showed that composites containing PP polymer and waste water sludge have higher mechanical properties than PE polymer and sludge on the DAF. The addition of both types of sludge as filler, results in enhancement of tensile properties compare to pure polymer. In the case, the higher content of sludge on the DAF was used, tensile strength of the composite decreased. Adding both types of sludge as filler, impact strength was lower than pure polymer. It was shown that composites containing sludge on the DAF have lower impact property than waste water sludge.

**Key words:** Recycled paper mill sludge, composites, mechanical properties.