

## بررسی تجربی خواص مکانیکی و میکروساختار کامپوزیت تولید شده با الیاف طبیعی باگاس/پلی پروپیلن

شهرزاد یوسفزاده<sup>۱</sup>، محمد کشفی<sup>۲\*</sup>، پرویز کحال<sup>۲</sup> و غلامعباس انصاری اصل<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده فنی و مهندسی، واحد الیگودرز، دانشگاه آزاد اسلامی، الیگودرز، ایران  
<sup>۲</sup> دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آیت ا... بروجردی، بروجرد، ایران  
<sup>۳</sup> دانشکده فنی و مهندسی، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۱۱-۱۴  
بازنگری: ۱۳۹۸-۰۱-۰۴  
پذیرش: ۱۳۹۸-۰۲-۱۵  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۲-۲۵

### کلمات کلیدی:

الیاف طبیعی  
باگاس نیشکر  
پلی پروپیلن  
خواص مکانیکی  
قالب گیری تزریقی

**خلاصه:** باگاس نیشکر یکی از فراوان ترین انواع الیاف طبیعی است که می توان در ساخت کامپوزیت ها از آن استفاده نمود. از آن جا که باگاس یکی از پسماندهای کارخانه های نیشکر است، استفاده از آن در منطقه خوزستان به دلیل فراوانی می تواند نه تنها صرفه اقتصادی به دنبال داشته باشد بلکه می توان به عنوان ماده ای سازگار با محیط زیست از آن بهره برد. در این پژوهش خواص مکانیکی و میکروساختار کامپوزیت تولید شده از الیاف باگاس نیشکر و پلیمر پلی پروپیلن به روش قالب گیری تزریقی به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. الیاف باگاس مورد استفاده در نمونه ها به صورت پودر خشک و در چهار سطح ۱۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد وزنی به عنوان فاز تقویت کننده به پلی پروپیلن اضافه شدند. جهت بررسی خواص مکانیکی، آزمایش کشش و مقاومت در برابر ضربه بر روی نمونه ها با رعایت تکرار پذیری صورت گرفت. نتایج نشان داد که ۴۰ درصد وزنی باگاس بهترین استحکام را در ترکیب با پلی پروپیلن به همراه دارد. همچنین، افزودن باگاس بیش از ۳۰ درصد وزنی منجر به کاهش محسوس مقاومت به ضربه و کرنش شکست نمونه ها می گردد. با مقایسه و بررسی آزمایش میکرو ساختاری از سطح شکست نمونه های دارای ۴۰ و ۵۰ درصد وزنی باگاس مشاهده شد که سازوکار خرابی کامپوزیت از شکست به بیرون کشیدگی الیاف تغییر کرده است. این موضوع منجر به افزایش استحکام نمونه دارای ۴۰ درصد وزنی نسبت به ۵۰ درصد وزنی باگاس شده است.

### ۱- مقدمه

کامپوزیت چوب-پلاستیک<sup>۱</sup> متشکل از مخلوط چوبی به صورت پودر یا ذره های لیفی و رزین گرماسخت یا گرمانرم می باشد [۴]. از جمله مزایای کامپوزیت های چوب-پلاستیک می توان به قیمت پایین، سفتی و مقاومت بالا و تجدید پذیری الیاف اشاره نمود. در کاربردهای کامپوزیت چوب-پلاستیک خواص مکانیکی از جمله سختی، کشش، مقاومت به ضربه، چگالی و رنگ مهم ترین فاکتورهای مورد توجه می باشد [۵]. برای تهیه پودر چوب از منابع مختلفی می توان استفاده نمود که یکی از آن ها باگاس نیشکر<sup>۲</sup> است. باگاس، تفاله نیشکر است که پس از عصاره گیری به صورت پسماند الیافی ذخیره می شود. سپس، این تفاله خشک فشرده شده و به قطعات ریز تبدیل می شود. استفاده از باگاس نیشکر در منطقه خوزستان به دلیل فراوانی دورنمای اقتصادی مناسبی را دارد. اگرچه اضافه کردن ذرات چوب به زمینه های پلیمری

امروزه استفاده بی رویه از پلاستیک ها و به وجود آمدن بحران های زیست محیطی مجامع جهانی را به این فکر انداخته است تا به کمک پژوهش های نوین جهت مهار کردن خسارات وارده به محیط زیست، برداشت بی رویه از منابع طبیعی و کاستن از حجم آلودگی ها اقدام نمایند. به همین دلیل تلاش های گسترده ای در جهت بازیافت پلاستیک های مصرفی و کاربرد مجدد آن به منظور جلوگیری از صدمات بیشتر به محیط زیست انجام شده است [۳-۱]. از سوی دیگر چوب به عنوان ماده اصلی در تهیه مبلمان، دکوراسیون داخلی، بناهای صنعتی و ساختمان ها مورد استفاده قرار می گیرد و افزایش تقاضا در دنیا زمینه کمبود آن را فراهم آورده است. بنابراین نیاز فوری برای جایگزینی آن با ماده ای مشابه و رقابت پذیر وجود دارد.

- 1 Wood-Plastic Composites (WPC)
- 2 Bagasse sugarcane

\* نویسنده عهده دار مکاتبات: m.kashfi@abru.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.



و همکاران [۱۴] به بررسی تغییر شکل‌های ماندگار در کامپوزیت‌های ساخته شده از باگاس پرداختند. نامبردگان گزارش نمودند که افزودن باگاس علی‌رغم افزایش سفتی کامپوزیت، تغییر شکل‌های ماندگار آن را به شدت کاهش می‌دهد. لیلای<sup>۵</sup> و همکاران [۱۵] به بررسی اثر بازیافت مکانیکی بر خواص کامپوزیت ساخته شده از باگاس پرداختند و دریافتند که تا پنج محله بازیافت، تغییر محسوسی در خواص مکانیکی کامپوزیت مورد مطالعه حاصل نشده است.

در این پژوهش استحکام کششی و مقاومت به ضربه قطعات ساخته شده از الیاف باگاس نیشکر و پلیمر پلی‌پروپیلن به روش قالب‌گیری تزریقی به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. الیاف باگاس مورد استفاده در قطعات ترکیبی به صورت پودر خشک و در چهار سطح ۱۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد وزنی به عنوان عوامل متغیر در نظر گرفته شده است. سپس، نمونه‌ها با استفاده از روش قالب‌گیری تزریقی تهیه شده و استحکام کششی، کرنش شکست و مقاومت به ضربه آن‌ها مطالعه خواهد شد.

## ۲- مواد و ساخت نمونه‌ها

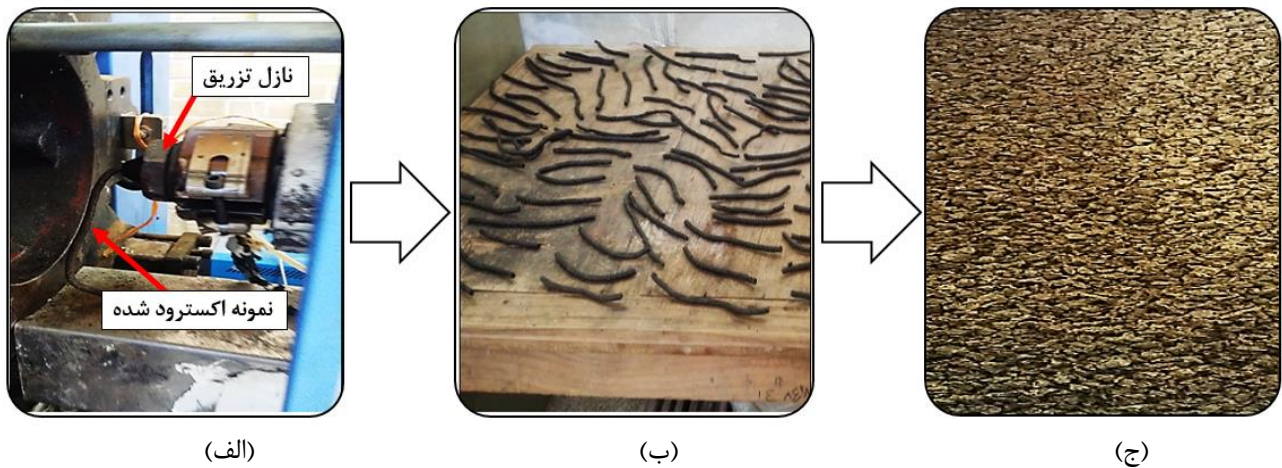
جهت تولید نمونه‌ها از پلی‌پروپیلن گرید تزریقی به صورت گرانول و تولید شده توسط پتروشیمی مارون با نام تجاری X۳۰S استفاده شد. شایان ذکر است دلیل استفاده از پلی‌پروپیلن مقاوم بودن آن در برابر رطوبت، روغن‌ها و حلال‌های معمولی است. همچنین، پلی‌پروپیلن، پلیمری نسبتاً سخت، دارای نقطه ذوب بالا، چگالی کم و مقاومت به ضربه مناسب است [۱۶]. باگاس خام مورد استفاده در این پژوهش از کارخانه کشت و صنعت نیشکر کارون تهیه شده است. باگاس تازه ابتدا جهت رطوبت‌گیری در دمای ۴۰ درجه سلسیوس و در مجاورت هوای آزاد به مدت ۵ روز قرار گرفت. سپس، جهت اتمام فرایند به آن با دمای ۷۰ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت منتقل شد. در نهایت باگاس خشک شده آسیاب، با الک مش ۵۰ میکرون غربال و در ظروف در بسته اختلاط با پلیمر مورد نظر نگاه‌داری شد. آب‌دوست بودن چوب و آب‌گریز بودن سطح پلیمر باعث چسبندگی ضعیف بین سطح چوب و پلیمر می‌گردد. این امر موجب توزیع نامناسب و غیریکنواخت فاز تقویت‌کننده در زمینه می‌شود. لذا برای برطرف کردن این نقیصه از انیدرید مالئیک<sup>۶</sup> به عنوان سازگار کننده استفاده شد [۱۷].

مزایای زیادی دارد، باین‌وجود نوع و درصد ترکیب ذرات چوب بر خواص مکانیکی و شرایط فرایند تأثیر قابل توجهی خواهد داشت [۶]. این‌گونه کامپوزیت‌ها به دو دسته متفاوت تقسیم می‌شوند. دسته اول مونومر به درون چوب تزریق شده و قطعه تولید شده دارای ظاهری مشابه چوب خواهد داشت. این مواد در مقایسه با چوب ثبات ابعادی بیشتر و خواص مکانیکی بهتری را از خود نشان می‌دهند. دسته دوم از مخلوط کردن مذاب پلیمرهای گرم‌انرم و چوب تهیه می‌شود که ماده حاصل بیشتر شبیه پلاستیک بوده و در گروه پلاستیک‌های تقویت شده طبقه‌بندی می‌شود [۷].

خادمی و همکاران [۸] به بررسی اثر اصلاح شیمیایی باگاس بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها حاصل از باگاس اصلاح شده و پلی‌اتیلن پرداختند. نتایج نشان داد که با افزایش مقدار باگاس مقاومت کششی نمونه‌ها به طور معنی‌داری افزایش می‌یابد. کوریاکس<sup>۱</sup> و همکاران [۹] به بررسی مقاومت به ضربه نمونه‌های چاک‌دار پرداختند. نامبردگان دریافتند که اصلاح قلیایی الیاف موجب افزایش ۵۱ درصدی مقاومت به ضربه نسبت به کامپوزیت پر شده با الیاف اصلاح نشده شده است. سرکویرا<sup>۲</sup> و همکاران [۱۰] به بررسی رفتار مکانیکی پلی‌پروپیلن<sup>۳</sup> تقویت شده با الیاف اصلاح شده باگاس پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که تیمارهای شیمیایی اثر بسزایی در کاهش جذب رطوبت الیاف باگاس داشته و در نهایت منجر به بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت شده است. نوربخش [۱۱] به بررسی استفاده از دو نوع پلیمر ضایعاتی و الیاف باگاس در ساخت چندسازه چوب پلاستیک پرداخت. وی گزارش داد که اثرات مستقل درصد باگاس بر مقاومت به ضربه در سطح ۵ درصد معنی‌دار شده است. کاظمی‌نجفی و همکاران [۱۲] به بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها ساخته شده از خاکاره و پلاستیک پرداختند. نتایج نشان داد که مقاومت در برابر کشش و ضربه قطعات ساخته شده از پلاستیک‌های بازیافتی در مقایسه با قطعاتی که از پلاستیک‌های تازه ساخته شده‌اند، ناچیز است. ثمریها و همکاران [۱۳] به بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت تولید شده از پودر باگاس پرداختند. نامبردگان گزارش نمودند که با افزایش درصد باگاس مقاومت کششی افزایش و جذب انرژی کاهش می‌یابد. انگونوا<sup>۴</sup>

- 1 Kuriakose
- 2 Cerqueira
- 3 Polypropylene (PP)
- 4 Anggono

- 5 Lila
- 6 Maleic Anhydride Modified Polypropylene



شکل ۱: (الف) خروج مواد از روزنه دستگاه تزریق، (ب) خشک کردن آن‌ها در هوای آزاد و (ج) گرانول تولید شده  
**Fig. 1. (a) Extruded material, (b) Dried material at room temperature and (c) granule material**

جدول ۲: کدگذاری نمونه‌های تولید شده جهت انجام آزمایش‌ها

**Table 2. Specimen codes used in experiments**

توضیحات	کد تعریف شده
۱۰٪ وزنی باگاس	PP۰ / B۰
۳۰٪ وزنی باگاس	PP۱ / B۱
۴۰٪ وزنی باگاس	PP۲ / B۲
۵۰٪ وزنی باگاس	PP۳ / B۳

جهت تولید نمونه‌های مورد نیاز برای آزمایش‌های استحکام کششی و مقاومت به ضربه به ترتیب بر اساس استانداردهای ASTM ۶۳۸D و ASTM D ۶۱۱۰ از دستگاه قالب‌گیری تزریق پلاستیک مدل HXF ۸ با ظرفیت تزریق ۱۴۰ گرم و نیروی گیره ۸۸ تن استفاده شد. این دستگاه به صورت نیمه خودکار بوده و اکثر پارامترهای تزریق مانند دمای تزریق، فشار تزریق، فشار نگهداری، سرعت تزریق، زمان تزریق و زمان نگهداری قابل کنترل می‌باشند. همچنین، جهت یکسان کردن کلیه شرایط نمونه‌های کشش و ضربه، از قالب تزریق دو حفره استفاده شد. جدول ۱ مشخصه‌های قالب‌گیری تزریقی جهت تولید نمونه‌های آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. به منظور سهولت در بررسی نمونه‌ها بر اساس درصد وزنی اختلاط به هر نمونه یک کد اختصاص داده شد که در جدول ۲ نشان داده شده است. همچنین، شکل ۲، ۴۸ نمونه تولید شده را به تفکیک کد نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود نمونه کشش و ضربه برای هر درصد وزنی هم‌زمان تولید شده است.

جدول ۱: مشخصه‌های قالب‌گیری تزریقی

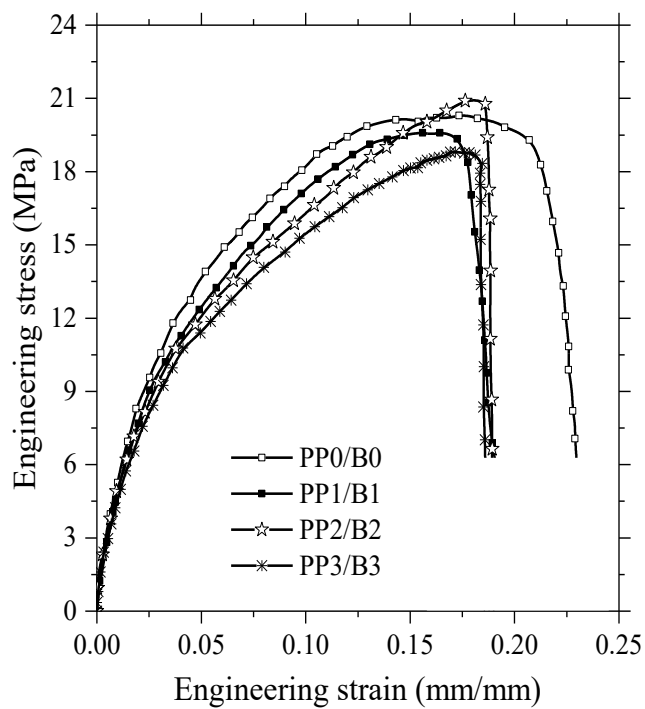
**Table 1. Injection molding properties**

مقدار	واحد	متغیر
مشکی	-	رنگ‌دانه
۱۲۰	ثانیه	زمان تزریق
۶۰	ثانیه	زمان خنک کاری
۲۳	میلی‌متر بر ثانیه	سرعت تزریق
۹۵	مگاپاسکال	فشار تزریق
۱۸۰	درجه سلسیوس	میانگین دمای تزریق گرم‌کن اول
۱۹۰	درجه سلسیوس	میانگین دمای تزریق گرم‌کن دوم
۱۹۵	درجه سلسیوس	میانگین دمای تزریق گرم‌کن سوم
۲۰۵	درجه سلسیوس	میانگین دمای تزریق گرم‌کن چهارم

به منظور بررسی اثر نسبت‌های وزنی مختلف بر استحکام کششی و مقاومت به ضربه کامپوزیت تولید شده، نمونه‌های باگاس/پلی‌پروپیلن با نسبت‌های ۹۰/۱۰، ۷۰/۳۰، ۶۰/۴۰ و ۵۰/۵۰ همراه با ۳ درصد وزنی سازگار کننده و ۳ گرم رنگ‌دانه در مخلوط‌کن دور بالا تهیه گردید. سپس، نمونه‌های آماده شده در مرحله قبل با استفاده از دستگاه اکستروژن به گرانول تبدیل شدند. برای این منظور همان‌گونه که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، ابتدا مخلوط مورد نظر از نازل تزریق اکستروژن خارج و به رشته‌های کوتاه تبدیل شد. سپس، رشته‌ها به وسیله دستگاه آسیاب خرد و به گرانول تبدیل شدند. بعد از گرانول شدن و قبل از تزریق جهت رطوبت‌گیری نهایی مواد، نمونه‌ها به مدت ۸ ساعت در دمای ۹۰ درجه سلسیوس در آون قرار داده شدند.



شکل ۲: نمونه‌های تولید شده برای انجام آزمایش‌ها. از راست به چپ:  $PP_0/B_0$ ،  $PP_1/B_1$ ،  $PP_2/B_2$  و  $PP_3/B_3$   
 Fig. 2. Fabricated specimens. From right to left  $PP_0/B_0$ ,  $PP_1/B_1$ ,  $PP_2/B_2$  and  $PP_3/B_3$



شکل ۴ نمودار تنش-کرنش مهندسی نمونه‌های  $PP_0/B_0$ ،  $PP_1/B_1$ ،  $PP_2/B_2$  و  $PP_3/B_3$

Fig. 4. Engineering stress-strain curve for  $PP_0/B_0$ ,  $PP_1/B_1$ ,  $PP_2/B_2$  and  $PP_3/B_3$

تنش-کرنش مهندسی برای مقدار میانگین نمونه‌های هر درصد وزنی در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود بیشترین اختلافها مربوط به استحکام و کرنش شکست نمونه‌ها

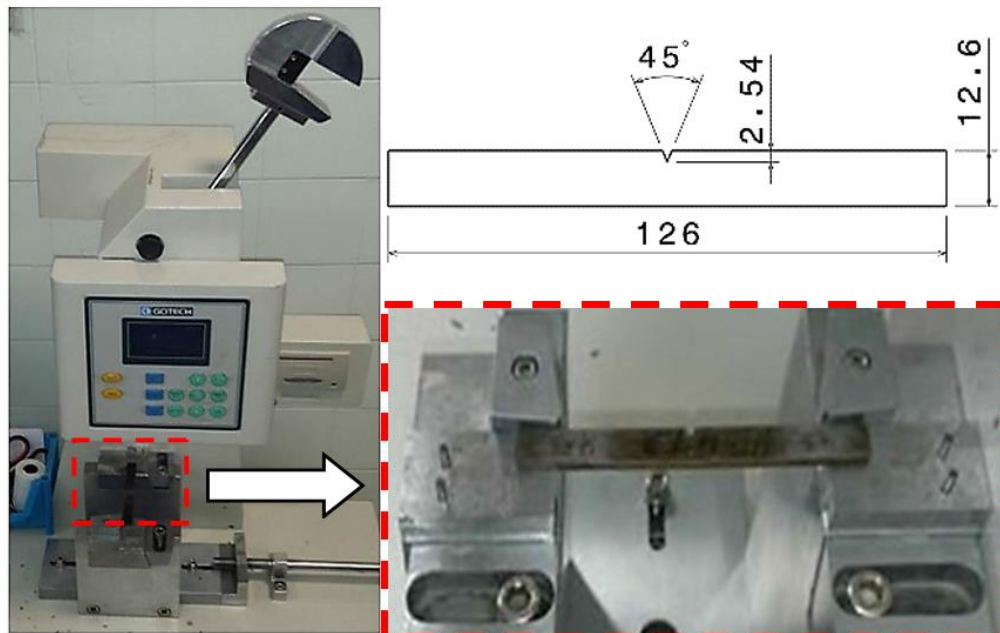


شکل ۳: نمونه کشش در بین فک‌های دستگاه  
 Fig. 3. Gripped specimen during tensile test

### ۳- آزمایش‌ها

#### ۳-۱- آزمایش کشش

آزمایش کشش با استفاده از دستگاه کشش سنتام با ظرفیت حداکثر ۱۵ تن مطابق با استاندارد ASTM-D ۶۳۸ انجام شد. شکل ۳ نمایی از نمونه قرار گرفته شده در گیره‌های دستگاه کشش را نشان می‌دهد. به‌منظور اطمینان از عدم لغزش نمونه‌ها از گیره‌های گوه‌ای شکل با نیرو محرکه پنوماتیکی بهره برده شد. همچنین، نمودار



شکل ۵: ابعاد نمونه شیپار زده شده و محل قرارگیری آن در دستگاه آزمایش ضربه

Fig. 5. The dimension of notched specimen and their position during impact test

می‌گردد [۱۸ و ۱۹]. دستگاه مورد استفاده، شرایط تکیه‌گاهی و نقشه نمونه آزمایش در شکل ۵ نشان داده شده است.

#### ۴- بحث و نتایج

در این بخش نتایج مربوط به آزمایش‌های خواص مکانیکی شامل استحکام کششی و مقاومت به ضربه بررسی می‌شود به ازای درصد‌های مختلف باگاس در بستر پلی‌پروپیلن مورد بحث قرار می‌گیرد. همچنین، جهت بیان علل و بررسی ساختاری، میکرو ساختار نمونه‌ها نیز بررسی شده است. برای هر کدام از چهار کد تولیدی، بر طبق استاندارد ASTM D۶۳۸-۱۴ پنج نمونه آزمایش جهت بررسی تکرارپذیری نتایج انجام شده است. سپس، برای هر نمونه مقدار میانگین و همچنین انحراف استاندارد نتایج به صورت نوار خطا در نمودارهای بیان شده است.

##### ۴-۱- بررسی استحکام کشش نمونه‌ها

نتایج مستخرج از آزمایش کشش شبه استاتیکی در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل قابل ملاحظه است، بیشترین استحکام مربوط به کد PP۲/B۲ یعنی ترکیب پلی‌پروپیلن با ۴۰ درصد وزنی باگاس است. مقدار استحکام این نمونه به ترتیب ۳/۹،

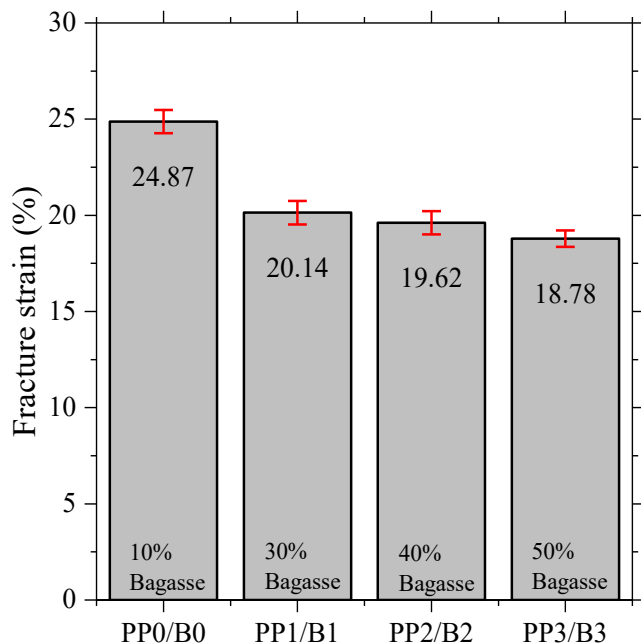
است. در صورتی که مدول الاستیسیته را با تقریب خوبی می‌توان ثابت در نظر گرفت.

##### ۳-۲- آزمایش مقاومت در برابر ضربه

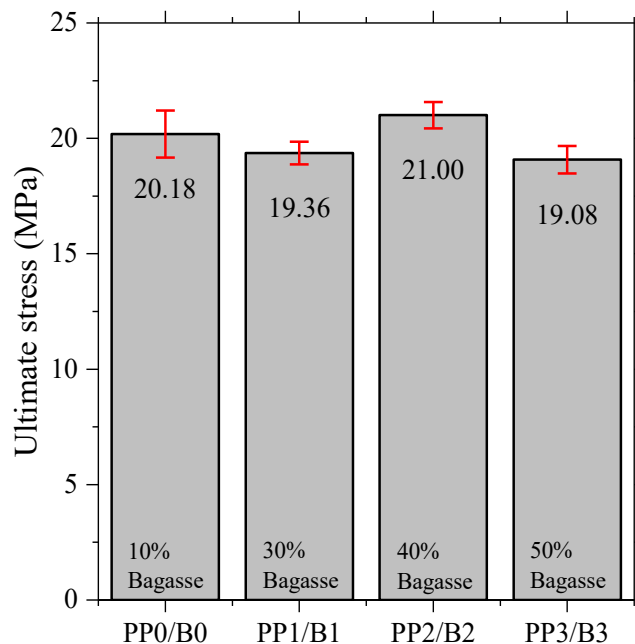
برای انجام آزمون ضربه از دستگاه مدل GTMPX-۷۰۴۵ و استاندارد ASTM-۶۱۱۰D استفاده شد. طبق استاندارد نمونه‌های مورد نیاز برای این آزمایش به صورت مستطیلی و در ابعاد ۱۲۶ میلی‌متر در ۱۲/۶ میلی‌متر تهیه شدند. از آنجاکه قطعات تولید شده فاقد شیپار بوده، لذا پس از تولید طبق استاندارد ASTM-D ۶۱۱۰ شیپاری با زاویه رأس ۴۵ درجه و عمق ۲/۵۴ میلی‌متر در مرکز نمونه‌ها ایجاد شد. با استفاده از این آزمایش می‌توان انرژی جذب شده توسط نمونه تا شکست را به دست آورد. این انرژی در ارتباط با سطح زیر نمودار تنش-کرنش تا شکست (چقرمگی) نیز می‌باشد که در رابطه (۱) بیان شده است.

$$\frac{\text{energy}}{\text{volume}} = \int_0^{\epsilon_f} \sigma d\epsilon \quad (1)$$

که در آن،  $\epsilon$  کرنش،  $\epsilon_f$  کرنش در زمان شکست و  $\sigma$  تنش هستند. پس از جایگذاری واحدهای هر کدام از متغیرهای رابطه اخیر، دیمانسیون انتگرال فوق انرژی بر واحد حجم ( $J.m^{-3}$ ) حاصل



شکل ۷ اثر درصد وزنی بر کرنش شکست نمونه‌های تولید شده  
**Fig. 7. The influence of bagasse weight percentage on the specimen fracture strain**



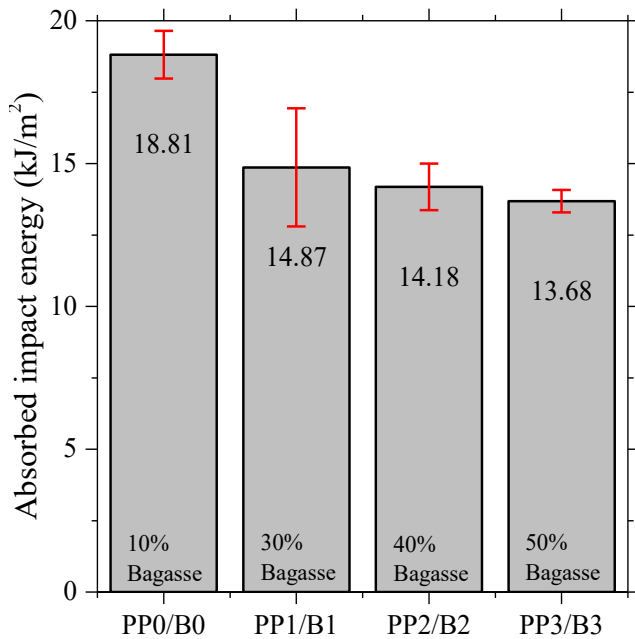
شکل ۶ اثر درصد وزنی بر استحکام کششی نمونه‌های تولید شده  
**Fig. 6. The influence of bagasse weight percentage on the specimen ultimate stress**

انجام شده در این زمینه است [۱۴ و ۲۲].

همان‌گونه که در شکل ۷ مشاهده می‌شود با افزایش درصد باگاس کرنش شکست کاهش می‌یابد. با افزایش بیش از ۱۰ درصد وزنی باگاس مقدار کرنش شکست به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد. این در حالی است که بعد از ۱۰ تا ۵۰ درصد وزنی باگاس روند کاهش اندک می‌باشد و با تقریب خوبی می‌توان مقدار آن را ثابت در نظر گرفت. دلیل این پدیده آن است که با افزایش درصد فاز تقویت‌کننده که طبیعتاً ترد است، رفتار کلی ماده رو به تردی خواهد گذاشت [۲۳]، در نتیجه کرنش شکست کاهش می‌یابد. از سوی دیگر احتمال بروز حفره و دیگر عیوب ساختاری با افزایش درصد تقویت‌کننده رو به افزایش می‌گذارد که همین امر بستر را برای کاهش بیشتر کرنش شکست فراهم می‌کند. نکته مهم دیگر آن است که با افزایش درصد فاز تقویت‌کننده در محدوده ۳۰ تا ۵۰ درصد وزنی تغییرات محسوسی در کرنش شکست مشاهده نمی‌شود. به‌عبارت‌دیگر می‌توان به‌راحتی از نمونه کد  $PP2/B2$  که دارای بیشترین استحکام است، استفاده نمود. عدم حساسیت کرنش شکست کامپوزیت تولید شده در درصدهای بالای باگاس یکی از نقاط قوت محسوب می‌شود که منجر به شکل‌پذیری بهتر آن خواهد شد.

۸/۴۷ و ۹/۱۴ درصد در مقایسه با کدهای  $PP0/B0$ ،  $PP1/B1$ ،  $PP2/B2$  و  $PP3/B3$  بهبود را نشان می‌دهد.

با مقایسه مقادیر موجود در شکل ۶ ملاحظه می‌شود که استفاده از باگاس تا ۳۰ درصد سبب کاهش استحکام کششی به میزان ۷/۸ درصد نسبت به نمونه حاوی ۱۰ درصد وزنی باگاس شده است. همچنین، با افزایش باگاس به ۴۰ درصد وزنی، افزایش استحکام کششی مشاهده می‌شود. این در حالی است که با افزایش بیشتر باگاس تا سقف ۵۰ درصد وزنی روند نزولی در مقدار استحکام کششی حاصل شده است. با افزایش باگاس دو عامل در روند خواص مکانیکی کامپوزیت به وجود خواهد آمد. مورد اول با افزایش درصد فاز تقویت‌کننده خواص کششی بیشتر می‌شود [۲۰]، به‌عبارت‌دیگر هرچه درصد باگاس بیشتر باشد استحکام نیز افزایش یابد. درحالی‌که افزایش باگاس منجر به کاهش پیوند بین فاز زمینه و تقویت‌کننده نیز خواهد شد [۲۱]. از سوی دیگر با افزایش درصد باگاس احتمال بروز انواع خرابی در نمونه‌ها افزایش و در نتیجه روند کاهش در استحکام مشاهده می‌شود. از آن جا که دو روند افزایشی و کاهش‌ی اشاره شده غیرخطی هستند، بنابراین درصد بهینه باگاس بر طبق آزمایش کشش صورت گرفته ۴۰ درصد به دست می‌آید. روند به‌دست‌آمده در تطابق بسیاری خوبی با دیگر پژوهش‌های



شکل ۸ اثر درصد وزنی بر انرژی جذب شده طی شکست ضربه‌ای  
**Fig. 8. The influence of bagasse weight percentage on the specimen absorbed impact energy**

#### ۴-۳- بررسی میکرو ساختاری

بعد از آزمایش ضربه سطح شکست نمونه‌ها با طلا پوشش داده شد و به وسیله میکروسکوپ روبشی<sup>۲</sup> مورد بررسی قرار گرفت. تصاویر مقاطع شکست نمونه‌ها با درصدهای وزنی باگاس ۱۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ در شکل ۹ نشان داده شده است. همان‌گونه که شکل نشان می‌دهد نمونه دارای ۱۰ درصد وزنی باگاس، حفره‌های کمتر و سطح هموارتری نسبت به دیگر ترکیب‌ها دارد. همین امر منجر شده است که در آزمایش‌های انجام شده انرژی بیشتری طی شکست ضربه در مقایسه با دیگر نمونه‌ها جذب کند و مقاومت به ضربه بیشتری را از خود نشان دهد (رابطه (۱)).

نمونه با ترکیب ۵۰ درصد وزنی باگاس در مقایسه با دیگر نمونه‌ها دارای حفره‌های زیادتری می‌باشد. این موضوع نشان از چسبندگی کم بین الیاف باگاس و پلی‌پروپیلن است که می‌تواند ناشی از اختلاط ناقص مواد و کلوخه‌ای شدن آن‌ها باشد. از سوی دیگر به دلیل درصد بالای باگاس مکانیسم خرابی الیاف باگاس جدا شدن (بیرون کشیدگی)<sup>۳</sup> الیاف از فاز زمینه است که به شدت منجر به کاهش استحکام و مقاومت ضربه می‌شود که همین موضوع در مورد اضافه

#### ۴-۲- بررسی انرژی جذب شده نمونه تا شکست

استحکام ضربه، مقاومت در برابر شکست و شروع ترک در نقاط ضعیف کامپوزیت است که این نقاط اغلب محل اتصال مواد لیگنوسلولزی<sup>۱</sup> و زمینه پلیمری است که مقدار آن با انرژی تلف شده توسط پاندول دستگاه آزمایش ضربه مشخص می‌شود [۲۴]. جهت بررسی انرژی جذب شده نمونه تا شکست (چقرمگی) و همچنین مطالعه اثر درصد باگاس بر روی آن، نتایج انرژی جذب شده در نمودار شکل ۸ ارائه شده است. همان‌گونه که از مشاهده می‌شود، نمونه PP۰/B۰ که تنها دارای ۱۰ وزنی باگاس است در مقایسه با دیگر نمونه‌ها دارای بالاترین انرژی جذب شده (استحکام ضربه‌ای) است.

با افزایش باگاس از ۱۰ تا ۵۰ درصد وزنی، مقاومت به ضربه ۱۱/۳۲ درصد کاهش می‌یابد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود روند کاهش به شدت از ۱۰ به ۲۰ درصد وزنی رخ داده است، در حالی که از ۲۰ تا ۵۰ درصد وزنی روند کاهش به صورت ملایم ملاحظه می‌شود. این موضوع می‌تواند دلایل گوناگونی داشته باشد از جمله آنکه الیاف سلولوزی به علت عدم چسبندگی با فاز زمینه، نقاطی با تمرکز تنش زیاد تولید می‌کنند [۲۵]. به دلیل ضعف این نقاط، ترک‌ها از نوک الیاف شروع به گسترش می‌کنند. با افزایش درصد الیاف احتمال بروز و گسترش این ترک‌ها افزایش می‌یابد. بنابراین، مقاومت در برابر ضربه همان‌گونه که در شکل ۸ نیز مشاهده می‌شود در تقابل با درصد الیاف، روند کاهش را نشان می‌دهد.

از آنجاکه مقاومت ضربه‌ای متأثر از سطح زیر منحنی تنش-کرنش است، بنابراین کرنش شکست می‌تواند نقش پررنگی در مقدار آن داشته باشد. بنابراین علی‌رغم آنکه نمونه PP۲/B۲ بیشترین استحکام را دارا است، به دلیل کمتر بودن کرنش شکست مقاومت پایین‌تری در برابر ضربه دارد. باید این نکته را مدنظر داشت که در طی فرایند ضربه به دلیل افزایش نرخ کرنش بارگذاری پلی‌پروپیلن به کاررفته در کامپوزیت رفتار تردتری را از خود نشان می‌دهد [۲۶]. به منظور مقایسه هر چه بهتر نتایج و مشاهده اثر افزایش درصد وزنی باگاس بر خواص مکانیکی کامپوزیت تولید شده جدول ۳ ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در این جدول، اثر افزایش درصد وزنی باگاس بر استحکام کششی، کرنش شکست و انرژی جذب شده تا شکست مقایسه شده است.

2 Scanning Electron Microscope (SEM)

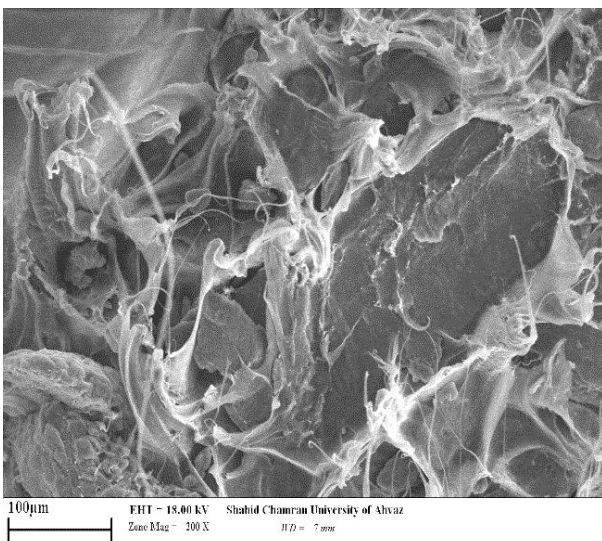
3 Fiber pull out

1 Lignocellulosic

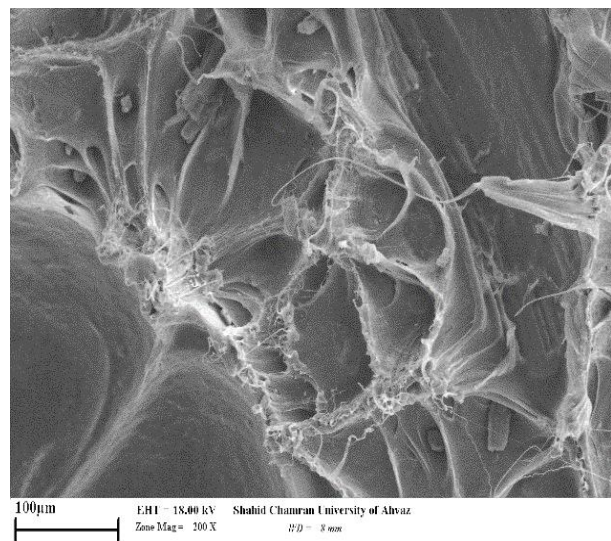
جدول ۳ مقایسه استحکام کششی، کرنش شکست و انرژی جذب شده تا شکست بر حسب افزایش درصد وزنی باگاس

Table 3. The comparison between ultimate stress, fracture strain and absorbed energy at different Bagasse weight percent

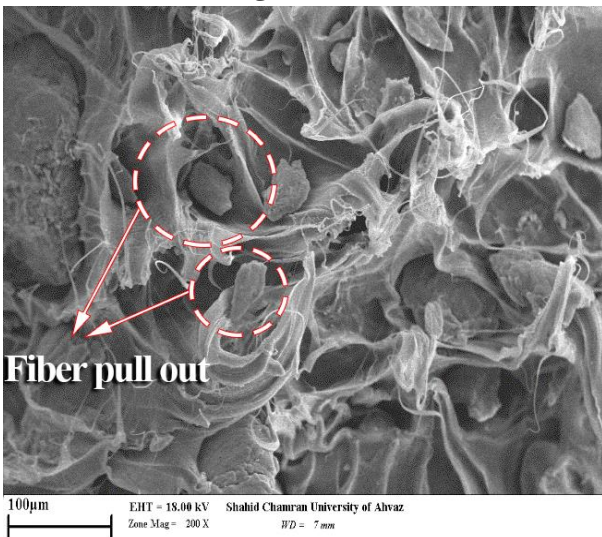
انرژی جذب شده تا شکست ( $\text{kJ.m}^{-2}$ )		کرنش شکست (%)		استحکام کششی (MPa)		کد
درصد تغییرات نسبت به PP۰/B۰	مقدار	درصد تغییرات نسبت به PP۰/B۰	مقدار	درصد تغییرات نسبت به PP۰/B۰	مقدار	
۰	۱۸,۸۱	۰	۲۴,۸۷	۰	۲۰/۱۸	PP۰/B۰
-۲۰,۹۴۶۳	۱۴,۸۷	-۱۹,۰۱۸۹	۲۰,۱۴	-۴,۰۶۳۴	۱۹/۳۶	PP۱/B۱
-۲۴,۰۶۱۴۶	۱۴,۰۱۸	-۲۱,۰۱۰۹۸	۱۹,۶۲	۴,۰۶۳۴	۲۱/۰۰	PP۲/B۲
-۲۷,۲۷۲۷	۱۳,۶۸	-۲۴,۴۸۷۳	۱۸,۷۸	-۵,۴۵۰۹	۱۹/۰۸	PP۳/B۳



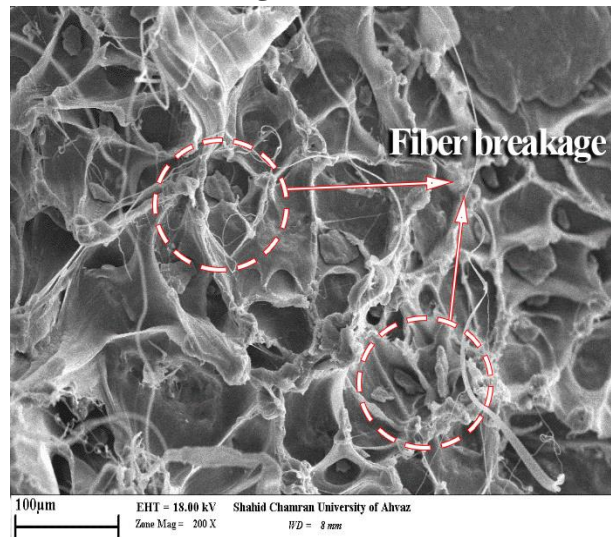
(ب) ۳۰ درصد وزنی باگاس



(الف) ۱۰ درصد وزنی باگاس



(د) ۵۰ درصد وزنی باگاس



(ج) ۴۰ درصد وزنی باگاس

شکل ۹ تصاویر بررسی میکروساختاری سطح شکست نمونه‌ها (الف) PP۰/B۰، (ب) PP۱/B۱، (ج) PP۲/B۲ و (د) PP۳/B۳  
Fig. 9. SEM image of specimen fracture surface (a) PP0/B0, (b) PP1/B1, (c) PP2/B2 and (d) PP3/B3



باگاس بیشتر باشد. به عبارت دیگر ۴۰ درصد باگاس مرز بین تغییر سازوکار واماندگی الیاف در کامپوزیت است که به دست آوردن آن دستاورد مهمی محسوب می‌شود.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر درصد وزنی الیاف باگاس نیشکر در بستر پلی‌پروپیلن بر خواص کششی و مقاومت به ضربه قطعات تولید شده به روش قالب‌گیری تزریقی مورد مطالعه قرار گرفته است. چهار گروه نمونه با درصدهای وزنی ۱۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ باگاس تهیه شد و هر آزمایش جهت بررسی تکرارپذیری سه بار انجام پذیرفت. در نهایت جهت بررسی بیشتر و استخراج دلایل ریزساختاری، آزمایش بررسی میکروساختار نیز بر روی سطح شکست نمونه‌ها انجام شد. یافته‌های کار حاضر را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

۱- نتایج نشان داد که افزایش باگاس تا ۳۰ درصد وزنی سبب کاهش مقاومت کششی نمونه‌های می‌شود. در حالی که با افزایش مقدار آن تا ۴۰ درصد وزنی استحکام کشش بهبود می‌یابد. علی‌رغم این افزایش استحکام، افزودن بیشتر باگاس تا ۵۰ درصد وزنی منجر به افت استحکام کششی می‌شود. به عبارت دیگر درصد وزنی بهینه باگاس مورد مطالعه در بستر پلی‌پروپیلن ۴۰ درصد گزارش می‌شود.

۲- افزودن باگاس بیش از ۳۰ درصد وزنی منجر به کاهش محسوس مقاومت به ضربه می‌شود. همچنین، نتایج نشان داد که با افزایش بیشتر باگاس تا ۵۰ درصد وزنی روند کاهشی مقاومت در برابر ضربه با شیب کمتری ادامه می‌یابد. علی‌رغم بهینه بودن استحکام کششی ۴۰ درصد وزنی باگاس، بهبودی در زمینه انرژی جذب شده ضربه‌ای مشاهده نشد. این امر به دلیل کاهش شدید کرنش شکست نمونه‌های تولیدی با افزایش درصد وزنی باگاس توجیه می‌شود.

۳- بررسی میکروساختاری از سطح شکست نمونه‌ها نشان داد که با افزایش درصد باگاس چگالی سطحی زمینه در مقطع شکست کاهش می‌یابد که منجر به ترد شدن نمونه می‌گردد. با مقایسه نمونه‌های دارای ۴۰ و ۵۰ درصد وزنی باگاس مشاهده شد که سازوکار خرابی کامپوزیت از شکست به بیرون کشیدگی الیاف تغییر کرده است. این تغییر مکانیسم منجر به آن شده که استحکام نمونه دارای ۴۰ درصد وزنی باگاس بیش از ۱۰ درصد نمونه دارای ۵۰ درصد وزنی

نمودن پودر چوب نیز مشاهده شده است [۱۴]. همچنین، می‌توان استدلال نمود که حجم بالای حفره‌ها می‌تواند محل باگاس‌هایی باشد که در زمینه مواد پلیمری قرار داشته ولی در اثر وارد شدن ضربه از جای خود کنده شده‌اند. بنابراین همان‌طور که نتایج آزمایشگاهی نیز تصدیق می‌کند، نمونه ۵۰ درصد وزنی باگاس ۲۷ درصد مقاومت به ضربه کمتری نسبت به نمونه دارای ۱۰ درصد وزنی باگاس دارد. همچنین، مشاهده می‌شود که با افزایش درصد باگاس، در اطراف الیاف گسیختگی پلی‌پروپیلن به صورت ترد رخ داده است. همین امر منجر به کاهش کرنش شکست نمونه‌ها شده است. مشاهده‌ها این بخش کاملاً مطابق با پژوهش لوز [۲۷] می‌باشد.

هر چه درصد باگاس افزایش یابد عیوب زیر ساختاری شامل به دام افتادگی هوا و حباب‌های حاصل از بخارات کمتر می‌شود. این امر به دلیل خروج گازهای حاصل از طریق سطح مشترک بین پلیمر و باگاس می‌باشد. به عبارت دیگر با افزایش درصد باگاس سطح مشترک بین باگاس و پلی‌پروپیلن زیادتر می‌شود و مسیرهای خروج گاز از کامپوزیت افزایش می‌یابد. بنابراین عیوب حاصل از به دام افتادن هوا کمتر می‌شوند.

با مشاهده روند تغییرات سطح شکست نمونه می‌توان مشاهده نمود که با افزایش درصد باگاس چگالی سطحی زمینه در مقطع شکست کاهش می‌یابد که منجر به ترد شدن نمونه می‌گردد. در حالی که در نمونه دارای ۱۰ درصد وزنی باگاس سطح مقطع شکست چگالی سطحی بیشتر از پلی‌پروپیلن دارد که به دلیل ماهیت نرم آن منجر به افزایش کرنش شکست شده است. منظور از چگالی سطحی، درصد سطح اشغال شده فاز زمینه از کل سطح کامپوزیت است. از سوی دیگر تغییر شکل‌های پلاستیک شدیدی در اطراف الیاف نیز به وجود آمده است که نقش مهمی در جذب انرژی نمونه‌ها باز خواهد کرد [۱۴]. همان‌گونه که در رابطه (۱) مشاهده می‌شود، افزایش کرنش شکست رابطه مستقیم با انرژی جذب شده حاصل از شکست ضربه‌ای دارد. با مقایسه کدهای PP۳/B۳ و PP۲/B۲ مشاهده می‌شود که سازوکار خرابی کامپوزیت از شکست الیاف به بیرون کشیدگی تغییر کرده است. این تغییر مکانیسم منجر به آن شده که استحکام نمونه دارای ۴۰ درصد وزنی باگاس بیش از ۱۰ درصد نمونه دارای ۵۰ درصد وزنی

- [9] S. Kuriakose, D. Varma, V. Vaisakh, Mechanical behaviour of coir reinforced polyester composites—an experimental investigation, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2(12) (2012) 751-757
- [10] E. Cerqueira, C. Baptista, D. Mulinari, Mechanical behaviour of polypropylene reinforced sugarcane bagasse fibers composites, *Procedia Engineering*, 10 (2011) 2046-2051
- [11] A. Nourbakhsh, The Utilization of Two Recycled Polymers and Bagasse Fiber in Wood Plastic Nano/Clay Composites Production, *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, 28(3) (2013) 435-450
- [12] S. Kazemi Najafi, E. Hamidinia, M. Tajvidi, Mechanical properties of composites from sawdust and recycled plastics, *Journal of Applied Polymer Science*, 100(5) (2006) 3641-3645
- [13] A. Samariha, A. Bastani, M. Nemati, M. Kiaei, H. Nosrati, M. Farsi, Investigation of the mechanical properties of bagasse flour/polypropylene composites, *Mechanics of Composite Materials*, 49(4) (2013) 447-454
- [14] J. Anggono, Á.E. Farkas, A. Bartos, J. Móczó, Antoni, H. Purwaningsih, B. Pukánszky, Deformation and failure of sugarcane bagasse reinforced PP, *European Polymer Journal*, 112 (2019) 153-160
- [15] M.K. Lila, A. Singhal, S.S. Banwait, I. Singh, A recyclability study of bagasse fiber reinforced polypropylene composites, *Polymer Degradation and Stability*, 152 (2018) 272-279
- [16] J. Karger-Kocsis, *Polypropylene structure, blends and composites: Volume 3 composites*, Springer Science & Business Media, 2012
- [17] E. Ghasemi, B. Kord, Long-term water absorption behaviour of polypropylene/wood flour/organoclay hybrid nanocomposite, *Iranian Polymer Journal*, 18(9) (2009) 683-691
- [18] N. Hoboken, *Polymer composites*, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 2004
- [19] Toughness, [www.wikipedia.com](http://www.wikipedia.com), 2019
- [1] K.B. Adhikary, S. Pang, M.P. Staiger, Dimensional stability and mechanical behaviour of wood-plastic composites based on recycled and virgin high-density polyethylene (HDPE), *Composites Part B: Engineering*, 39(5) (2008) 807-815
- [2] E. Moradi, A. Zeinedini, E. Heidari-shahmaleki, Mechanical properties of laminated composites reinforced by natural fibers of cotton, wool and kenaf under tensile, flexural and shear loadings, *Journal of Science and Technology of Composites*, (2019) (in Persian)
- [3] H. Shahrajabian, A.R. Maleki Khorasgani, Investigation of the physical and mechanical properties of Wood plastic composites based on high density polyethylene/ polypropylene/recycled poly (ethylene terephthalate), *Journal of Science and Technology of Composites*, 5(1) (2018) 127-134 (in Persian)
- [4] A. Ashori, Wood-plastic composites as promising green-composites for automotive industries, *Bioresource Technology*, 99(11) (2008) 4661-4667
- [5] A. Arbelaiz, B. Fernandez, G. Cantero, R. Llano-Ponte, A. Valea, I. Mondragon, Mechanical properties of flax fibre/polypropylene composites. Influence of fibre/matrix modification and glass fibre hybridization, *Composites Part A: applied science and manufacturing*, 36(12) (2005) 1637-1644
- [6] A. Wechsler, S. Hiziroglu, Some of the properties of wood-plastic composites, *Building and Environment*, 42(7) (2007) 2637-2644
- [7] A. Nourbakhsh, H.K. Doust, A. Kargarfard, F. Golbabaei, R. Hajihasani, Investigation of OCC Fiber/Polymers Composites in Air-Forming Production, (2008)
- [8] H.A. Khademi Eslam, R. Baghbani, E. Ghasemi, B. Baziar, Effect of Bagasse Chemical Treatment on The Mechanical Properties of Composites Based on Treated Bagasse/Recycled Polyethylene, *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, 28(1) (2013) 169-181

- 131-132 (2017) 75-80
- [24] A. Osannejad, F.A. Ghasemi, I. Ghasemi, Preparation and Characterization of PP/ wood Flour/ graphene Hybrid Nanocomposites, *Journal of Mechanical Engineering, Tabriz University*, 47(4) (2018) 191-199 (in Persian)
- [25] A.R. Shakeri, S.K. Hosseini, G. Ebrahimi, Improvement in Mechanical Properties of Cellulose Fibers-Thermoplastic Polymer Composites, *Iranian Journal of Polymer Science and Technology*, 18(77) (2005) 143-150 (in Persian)
- [26] B. Jiang, L. Cao, F. Zhu, Dynamic tensile behavior of polypropylene with temperature effect, *Composites Part B: Engineering*, 152 (2018) 300-304
- [27] S.M. Luz, A.R. Gonçalves, A.P. Del'Arco, Mechanical behavior and microstructural analysis of sugarcane bagasse fibers reinforced polypropylene composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38(6) (2007) 1455-1461
- [20] G.H. Majzoobi, M. Kashfi, N. Bonora, G. Iannitti, A. Ruggiero, E. Khademi, A new constitutive bulk material model to predict the uniaxial tensile nonlinear behavior of fiber metal laminates, *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 53(1) (2018) 26-35
- [21] M.Á. Hidalgo-Salazar, F. Luna-Vera, J.P. Correa-Aguirre, Biocomposites from Colombian Sugar Cane Bagasse with Polypropylene: Mechanical, Thermal and Viscoelastic Properties, in: *Characterizations of Some Composite Materials*, IntechOpen, 2018
- [22] E.F. Cerqueira, C.A.R.P. Baptista, D.R. Mulinari, Mechanical behaviour of polypropylene reinforced sugarcane bagasse fibers composites, *Procedia Engineering*, 10 (2011) 2046-2051
- [23] M. Kashfi, G.H. Majzoobi, N. Bonora, G. Iannitti, A. Ruggiero, E. Khademi, A study on fiber metal laminates by using a new damage model for composite layer, *International Journal of Mechanical Sciences*,

