

## بررسی خصوصیات مکانیکی و تجزیه پذیری بیوپلاستیک تهیه شده از سلولز کاه و الیاف خرما

حسام عمرانی فرد<sup>۱</sup> - احمد غضنفری مقدم<sup>۲\*</sup> - محسن یوسفی انصاری<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۹۱/۰۱/۱۵

تاریخ پذیرش: ۹۱/۱۲/۲۲

### چکیده

در دو دهه اخیر استفاده از بیوپلاستیک‌ها در صنایع مختلف به‌عنوان جایگزین پلاستیک‌های معمولی مورد توجه قرار گرفته است. از نظر کاربری، خصوصیات مکانیکی و تجزیه پذیری بیوپلاستیک‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند. در این پژوهش، سلولز کاه گندم به نسبت‌های با گلیسرول مختلف مخلوط و پس قرار دادن در یک قالب با الیاف خرما تحکیم داده شدند. با قرار دادن هر قالب در دستگاه پرس هیدرولیکی و حرارت دهی همزمان، صفحات بیوپلاستیک مورد نظر تهیه شدند. آزمایش‌ها بر اساس طرح فاکتوریل ۳×۳ انجام و تأثیر درصد وزنی سلولز در سه سطح ۵۰٪، ۶۰٪ و ۷۰٪ و تحکیم دهی با الیاف در سه وضعیت الیاف شبکه‌ای، رشته‌ای و بدون الیاف بر استحکام کششی و خمشی، مدول الاستیک کششی و خمشی و کرنش کششی بیوپلاستیک‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که وضعیت تحکیم درصد وزنی سلولز، و اثر متقابل این دو عامل بر تمام خصوصیات مکانیکی ذکر شده معنی دار بود ( $\alpha = 0.05$ ). بیشترین استحکام کششی و خمشی مربوط به اضافه کردن ۵۰٪ وزنی سلولز و در حالت تحکیم دهی شبکه‌ای و به ترتیب ۱۹۹۲/۰۲ MPa و ۲۸۷۱ MPa به دست آمد. همچنین بیشترین مدول کششی و خمشی در حالت اضافه کردن ۷۰٪ وزنی سلولز و تحکیم یافته رشته‌ای (در حالت کششی ۴۰/۴ MPa و در حالت خمشی ۲/۳ MPa مشاهده شد. بررسی روند تجزیه پذیری بیوپلاستیک‌ها با قرار دادن نمونه‌هایی از آن‌ها در شکمبه‌ی یک گوسفند فیسوله‌گذاری نشان داد که با افزایش درصد وزنی سلولز، میزان تجزیه پذیری نمونه‌ها کاهش می‌یابد. پس از گذشت ۴۸ ساعت بیشترین میزان تجزیه‌پذیری مربوط به نمونه‌های ۵۰٪ وزنی سلولز بود که به طور میانگین به مقدار ۷۴٪ تجزیه شدند. روند تجزیه پذیری با استفاده از رابطه ریاضی مدل سازی شد که این مدل به‌خوبی در داده‌های آزمایشگاهی برازش شد ( $R^2=0.97$ ).

**واژه‌های کلیدی:** الیاف خرما، بیوپلاستیک، تحکیم‌دهی، خصوصیات مکانیکی، کاه گندم

### مقدمه

یک تیمار شیمیایی قرار گیرند. هیدرولیز کردن مواد لیگنوسلولزی با استفاده از محلول‌های اسیدی یا قلیایی دو روش متداول شیمیایی جدا سازی این مواد هستند (Sun and Cheng, 2002). برای تولید بیوپلاستیک، پلیمرهای گیاهی را با یک یا چند روان کننده مانند روغن‌های مختلف، صمغ‌های گیاهی یا آب، مخلوط و سپس شکل‌دهی می‌کنند (Tummala et al., 2006). یکی از مهمترین مشکلات بیوپلاستیک‌ها، استحکام کششی پایین آن‌ها است. روش‌های مختلفی به‌منظور بهبود خصوصیات کششی بیوپلاستیک‌ها مورد مطالعه قرار گرفته که مهمترین آن‌ها، استفاده از الیاف تحکیم دهنده‌ی طبیعی یا مصنوعی و مواد پرکننده است (Liu et al., 2005). الیاف مصنوعی از موادی با خصوصیات مشخص تولید شده و دارای ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی ثابتی هستند در حالی که شرایط اقلیمی و آب و هوایی، بر ویژگی‌های الیاف گیاهی تأثیر می‌گذارد (Ghazanfari et al., 2008). میزان بهبود خصوصیات بیوپلاستیک‌های تحکیم یافته با الیاف، به نوع الیاف به‌کار رفته،

در سال‌های اخیر، پژوهش‌های گسترده‌ای به‌منظور تولید انواع پلاستیک‌ها با استفاده از پلیمرهای گیاهی صورت گرفته است. این گونه پلاستیک‌ها زیست تخریب پذیر و تجدیدپذیر بوده و وابستگی به مواد نفتی را کاهش می‌دهند (Siracusa et al., 2008). یکی از پلیمرهای گیاهی، سلولز است که نوعی پلی‌ساکارید بوده و در دیواره‌ی سلولی گیاهان یافت می‌شود. به‌دلیل چسبندگی شدید سلولز با لیگنین و همی سلولز در دیواره‌ی سلولی، جدا سازی آن‌ها مشکل بوده و برای تهیه‌ی سلولز خالص، لازم است که مواد گیاهی تحت

۱- کارشناس ارشد، بخش مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه شهید باهنر کرمان  
۲- استاد پژوهشده باغبانی دانشگاه شهید باهنر کرمان  
۳- کارشناس ارشد، بخش علوم دامی دانشگاه شهید باهنر کرمان  
\* - نویسنده مسئول: (Email: agazanfari@yahoo.com)

افزایش ولی درصد افزایش طول کاهش می‌یابد ( Omrani and Ghazanfari, 2011).

در سال‌های اخیر کشور ایران از لحاظ تولید گندم به خودکفایی رسیده و درصد بالایی از این گیاه در زمان برداشت به‌صورت کاه و کلش بر روی مزارع باقی می‌ماند که استفاده‌ی چندانی نداشته و در مواردی سوزانده می‌شود. کاه گندم با درصد نسبتاً بالای سلولز، می‌تواند در تهیه‌ی بیوپلاستیک مورد استفاده قرار گیرد. از طرف دیگر نخل خرما یک گیاه کشاورزی- صنعتی می‌باشد که در کشورمان ایران به وفور پرورش داده می‌شود. هر ساله با قطع برگ‌های خشک و جمع‌آوری الیاف آن، مقدار زیادی الیاف لیگنوسلولزی به‌دست می‌آید که قسمت عمده‌ی آن جزء ضایعات کشاورزی محسوب شده و سوزانده می‌شود. این الیاف نیز با مقاومت کششی بالایی که دارند (Zare et al., 2010)، می‌توانند در تقویت بیوپلاستیک‌ها نقش داشته باشند. هدف از انجام این پژوهش تهیه نمونه‌های بیوپلاستیک با استفاده از مخلوط سلولز کاه گندم و گلیسرول و تقویت آن‌ها با الیاف خالص سازی شده‌ی خرما بود. همچنین خصوصیات مکانیکی و تجزیه پذیری نمونه‌های تهیه شده اندازه‌گیری و مورد مقایسه قرار گرفتند.

## مواد و روش‌ها

### تهیه سلولز از کاه

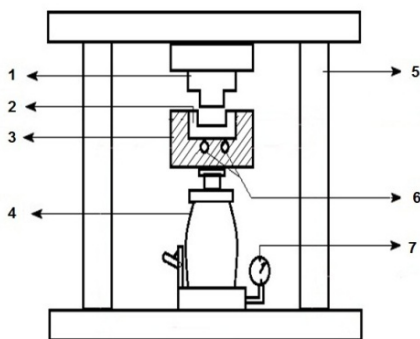
کاه گندم مورد نیاز این پژوهش، از یک مزرعه در شهرستان کرمان تهیه و پس از انتقال به آزمایشگاه شسته شد تا گرد و خاک آن جدا شود. سپس به مدت یک هفته بر روی یک پارچه پهن گردید تا خشک شود. برای تهیه سلولز، کاه خشک شده با استفاده از یک آسیاب چکنشی خرد و روی الک آزمایشگاهی ریخته شد. از ذراتی که از الک با مش ۳۰ عبور کرده و روی الک با مش ۴۰ قرار گرفتند مقدار ۳۰ گرم جمع‌آوری و با ۴۵۰ میلی‌لیتر اسید سولفوریک ( $w w^{-1}$ ) ۵٪ مخلوط و به مدت ۴ ساعت در دمای  $90 \pm 3^{\circ}C$  نگه داشته شد. بعد از ته نشین شدن، اسید آن جدا شد و مواد باقیمانده با آب مقطر شسته شد. سپس با هم‌زدن مداوم این مواد و اضافه کردن تدریجی مقداری محلول هیدروکسید سدیم ( $w w^{-1}$ ) ۵٪ pH آن به ۷ رسانده شد. خمیر به‌دست آمده بار دیگر با آب مقطر شسته شد و به مدت ۴۸ ساعت در آن تحت دمای  $50 \pm 3^{\circ}C$  قرار داده شد تا سلولز نسبتاً خالصی به‌دست آید (Detroy et al., 1981).

### خالص سازی الیاف

الیاف خرما مورد نیاز، از نخلستان‌های شهداد واقع در شهرستان کرمان تهیه شد. این الیاف به‌صورت درهم تنیده و دارای طولی بین

میزان چسبندگی الیاف و مواد پلیمری، اندازه و جهت الیاف و همچنین درصد الیاف استفاده شده بستگی دارد. موهانتی و همکاران (۲۰۰۵) نشان دادند با اضافه کردن الیاف شاهدانه به بیوپلاستیک‌های تهیه شده از پروتئین سویا، استحکام کششی و خمشی، مدول کششی و خمشی و همچنین مقاومت به ضربه بیوپلاستیک‌ها، به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. وانجون و همکاران (۲۰۰۷) نشان دادند با افزایش محتوای الیاف، طول الیاف و همچنین جهت گیری الیاف در بیوپلاستیک‌های تحکیم یافته با الیاف کنف، استحکام کششی و خمشی، مدول کششی و خمشی و مقاومت به ضربه افزایش می‌یابد. چسبندگی و ارتباط مناسب بین الیاف و مواد پلیمری، یکی دیگر از فاکتورهای عمده در تعیین کیفیت بیوپلاستیک‌های تقویت شده می‌باشد. به‌منظور بهبود این ارتباط، قبل از به‌کارگیری الیاف، آن‌ها را تحت تیمارهای فیزیکی و شیمیایی مختلف قرار می‌دهند تا لیگنین و همی‌سلولز موجود در آن‌ها کاهش یابد (Brigada et al., 2010). زولوگا و همکاران (۲۰۰۸) اثر چهار فرآیند شیمیایی را روی الیاف موز مورد بررسی قرار دادند و بیان کردند که تیمارهای شیمیایی باعث بهبود ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی الیاف موز می‌شود؛ هرچند استفاده از مواد قلیایی با غلظت‌های بالا امکان صدمه زدن به ساختمان الیاف را افزایش می‌دهد. غفار زاده و غضنفری (۲۰۱۰) نشان دادند الیاف خالص سازی شده‌ی خرما، درصد لیگنین، خاکستر و قطر کمتر و استحکام کششی، مقاومت گرمایی و جذب رطوبت بیشتری نسبت به الیاف خام دارند. بر طبق پژوهش‌های صورت گرفته، تحکیم‌دهی بیوپلاستیک‌ها با استفاده از الیاف خالص سازی شده، باعث بهبود عملکرد تحکیم می‌شود. وانجون و همکاران (۲۰۰۴) اثر تحکیم‌دهی بیوپلاستیک‌های تهیه شده از پروتئین سویا را با استفاده از الیاف خالص سازی شده علف هندی، مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند تیمارهای قلیایی، لیگنین و همی سلولز را حذف کرده و باعث بهبود پخش شدن الیاف در داخل پلاستیک می‌شود. همچنین تمرکز گروه‌های هیدروکسیل را روی سطح الیاف افزایش داده و باعث بهبود چسبندگی الیاف با پلاستیک می‌شود. الیاف طبیعی به‌عنوان ماده‌ی پرکننده نیز در ساخت بیوپلاستیک‌ها استفاده می‌شوند تا در مصرف مواد پلیمری صرفه‌جویی گردد (ShakeriandOmidvar, 2005). سینگ و همکاران (۲۰۰۸) اثر اضافه کردن الیاف گیاه خیزران را روی آمیخته‌ی PHBV مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند اضافه کردن الیاف، باعث کاهش استفاده از ماده‌ی پلیمری شده و مدول الاستیسیته را تا ۱۷۵٪ افزایش می‌دهد. اثر افزودن ضایعات چوب نیز بر خصوصیات مکانیکی بیوپلاستیک‌های تهیه شده از آرد گندم مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد که با افزایش درصد وزنی ضایعات چوب از ۱۰٪ به ۳۰٪، استحکام و مدول کششی

هر قالب به طور جداگانه در دستگاه پرس تحت فشار ۱۰ MPa و دمای ۱۲۰°C، به مدت ۷ دقیقه قرار داده شد و نمونه های صفحه ای بیوپلاستیک با ابعاد ۱۸۰×۳۰×۵ mm تهیه گردید. دمای قالب به وسیله ی یک گرمکن الکتریکی به طور اتوماتیک کنترل گردید. شکل ۲، طرحواره دستگاه پرس و قالب مورد استفاده جهت تولید نمونه های بیوپلاستیک را نشان می دهد. پس از خارج کردن نمونه ها از داخل قالب، آن ها را به مدت ۷۲ ساعت در دمای محیط نگهداری کرده و سپس آزمون مکانیکی کشش، خمش و تجزیه پذیری بر روی آن ها انجام شد.



**شکل ۲-** دستگاه پرس طراحی شده جهت تهیه نمونه های بیوپلاستیک: (۱) نری قالب، (۲) مادگی قالب، (۳) سنگ زیرین، (۴) جک هیدرولیکی، (۵) چارچوب، (۶) المنت های حرارتی، (۷) فشارسنج

**Fig.2.** The press mechanism designed for fabrication of bioplastics: 1) Male mold, 2) Female mold, 3) Beneath stone, 4) Hydraulic jack, 5) Frame, 6) Thermal elements, 7) Pressure gauge

### بررسی خصوصیات مکانیکی بیوپلاستیک

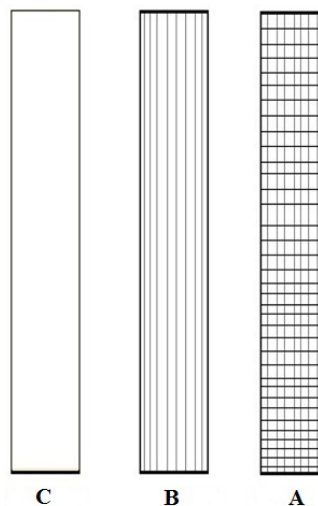
برای آزمون کشش از دستگاه آزمون کشش (Tensile tester, Mechatronic Jav Aria Inc., Mashhad, Iran) با دقت یک نیوتن استفاده شد. این تست به منظور اندازه گیری استحکام کششی، مدول الاستیک و درصد افزایش طول و بر طبق استاندارد ASTM D-638، با سرعت  $5 \text{ mm min}^{-1}$  انجام شد. بیشینه تنش ثبت شده در نمودار تنش-کرنش، به عنوان استحکام کششی و درصد تغییر طول در نقطه ی شکست به عنوان درصد افزایش طول در نظر گرفته شد. مدول الاستیک نیز با شیب خط برازش شده از مجموعه نقاط ثبت شده در ناحیه ی خطی نمودار تنش-کرنش (ناحیه ی الاستیک) به دست آمد.

برای انجام آزمون خمش از دو تکیه گاه، به صورت نشان داده شده در شکل ۳ استفاده شد و استحکام و مدول خمشی با استفاده از این آزمون تعیین گردید. فاصله L نشان داده شده در شکل ۱۰۰ mm بود.

۲۰ تا ۹۰ سانتی متر بودند. ابتدا الیاف در آب خیس داده شد و به صورت رشته رشته در آورده شدند. سپس آن ها را با آب گرم شستشو داده تا ناخالصی های سطحی آن جدا شود. پس از شستشو، الیاف به مدت ۲ روز در سطح آزمایشگاه پهن گردید تا خشک شوند. برای کاهش لیگنین الیاف و ایجاد چسبندگی بهتر بین الیاف و بیوپلاستیک، آن ها را در محلول هیدروکسید سدیم ( $6\% \text{ w w}^{-1}$ ) و پراکسید سدیم ( $4\% \text{ w w}^{-1}$ ) در دمای ۳۸°C به مدت ۱۶ ساعت خیس داده (Amini and Ghazanfari, 2011) و سپس الیاف با آب مقطر شستشو داده شدند و به مدت ۴۸ ساعت در آونگی با دمای  $50 \pm 3^\circ\text{C}$  قرار داده شدند.

### ساخت نمونه های بیوپلاستیک

برای ساخت نمونه های بیوپلاستیک به دو صورت تحکیم یافته و بدون تحکیم، سلولز گاه گندم با درصدهای وزنی ۷۰٪، ۶۰٪ و ۵۰٪ با گلیسرول کاملاً مخلوط شد تا خمیر یکنواختی به دست آید. برای نمونه های تحکیم داده شده، هر قالب را تا نصف از مخلوط خمیری پر نموده و سپس الیاف شکل مورد نظر (رشته ای و شبکه ای) درون قالب از پیش داغ شده قرار داده شده و سپس بقیه قالب با خمیر پر گردید. مقدار الیاف استفاده شده کمتر از ۱٪ وزنی هر نمونه را تشکیل می دادند. برای نمونه های بدون تحکیم تنها قالب با مخلوط خمیری و در نسبت های مورد نظر پر شد. شکل ۱ طرحواره ای از وضعیت استحکام دهی الیاف را نشان می دهد.

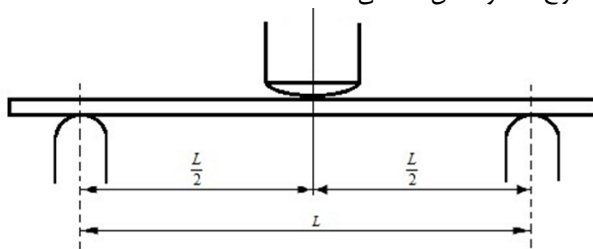


**شکل ۱-** وضعیت تحکیم دهی: (A) شبکه ای، (B) رشته ای و (C) بدون الیاف

**Fig.1.** Reinforcement conditions: A) Network, B) String and C) Without fiber

محاسبه شد (Jensen and Chenoweth, 1975).

اعمال نیرو با دستگاه تست تنش-کرنش با سرعت  $5 \text{ mm min}^{-1}$  و بر طبق استاندارد ASTM D-790-02 انجام شد. سپس داده‌های نیرو و خیز در مرکز نمونه‌ها در هر لحظه، استخراج شد و تنش خمشی



شکل ۳- تکیه‌گاه و نحوه‌ی قرار گیری نمونه‌های بیوپلاستیک در هنگام انجام آزمون خمش (ASTM, 2002)

Fig.3. Support and placement condition of specimens during bending tests

استفاده از کاهش وزن نمونه‌ها لازم است تصحیح گردد (Salamatdoust *et al.*, 2009). به این منظور نمونه‌های بیوپلاستیک در کیسه‌های آزمایش ریخته شد و به مدت یک ساعت در داخل آب با دمای  $37^\circ\text{C}$  تا  $40^\circ\text{C}$  خیسانده شد. کیسه‌های فوق همانند کیسه‌های قرار داده شده در شکمبه، شسته و سپس در آن خشک گردیدند و میزان ناپدید شدن مواد در طی شستشو ( $m_0$ ) محاسبه گردید. پس از توزین باقیمانده نمونه‌های خارج شده از شکمبه ( $m_1$ )، درصد تجزیه پذیری نمونه‌ها در ساعات مختلف با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد.

$$R_t = \frac{M - m_t + m_0}{M} \times 100 \quad (1)$$

داده‌های به‌دست آمده برای تجزیه پذیری نمونه‌ها ( $P_t$ ) در زمان‌های مختلف رسم شد. اورسکوف و مک‌دونالد (۱۹۷۹) نشان داده‌اند که میزان تجزیه پذیری مواد در داخل شکمبه به‌صورت تابعی از زمان  $t$  و با رابطه (۲) قابل بیان است:

$$R_t = a + b(1 - e^{-ct}) \quad (2)$$

در این رابطه  $a$ ،  $b$  و  $c$  سه پارامتر هستند که به‌ترتیب درصد ماده قابل حل در زمان صفر (شستن با آب بدون قرار دادن در شکمبه)، درصد تجزیه پذیری مؤثر در طول مدت زمان قرارگیری در شکمبه و ضریب سرعت تجزیه پذیری را نشان می‌دهند. پس از رسم نمودار داده‌ها با استفاده از رابطه (۱)، به‌منظور بررسی روند تجزیه پذیری بیوپلاستیک‌ها، رابطه (۲) در داده‌ها برازش شد و پارامترهای  $a$ ،  $b$  و  $c$  با استفاده از نرم‌افزار MATLAB محاسبه گردید.

## نتایج و بحث

### آزمون‌های مکانیکی

در شکل ۴ نمودار تنش-کرنش نمونه‌های بیوپلاستیک با درصد‌های وزنی مختلف سلولوز و در سه حالت تحکیم نیافته، تحکیم

به‌منظور بررسی اثر تحکیم‌دهی و درصد سلولوز بر خصوصیات مکانیکی بیوپلاستیک‌ها شامل استحکام کششی، کرنش کششی، مدول الاستیک، استحکام خمشی و مدول خمشی از آزمایش فاکتوریل  $3 \times 3$  در قالب طرح کامل تصادفی با سه تکرار استفاده شد. بر اساس مطالعات اولیه انجام شده (Omran, 2012)، عامل اول وضعیت تحکیم‌دهی در سه حالت شبکه‌ای، رشته‌ای و بدون الیاف و عامل دوم، درصد وزنی سلولوز با سه درصد وزنی  $70\%$ ،  $60\%$  و  $50\%$  در نظر گرفته شد. در صورت معنی دار بودن هر یک از عوامل یا اثر متقابل آن‌ها، از آزمون LSD برای مقایسه میانگین‌ها استفاده شد. محاسبات تجزیه واریانس و آزمون LSD با استفاده از نرم افزار MSTATC انجام شد.

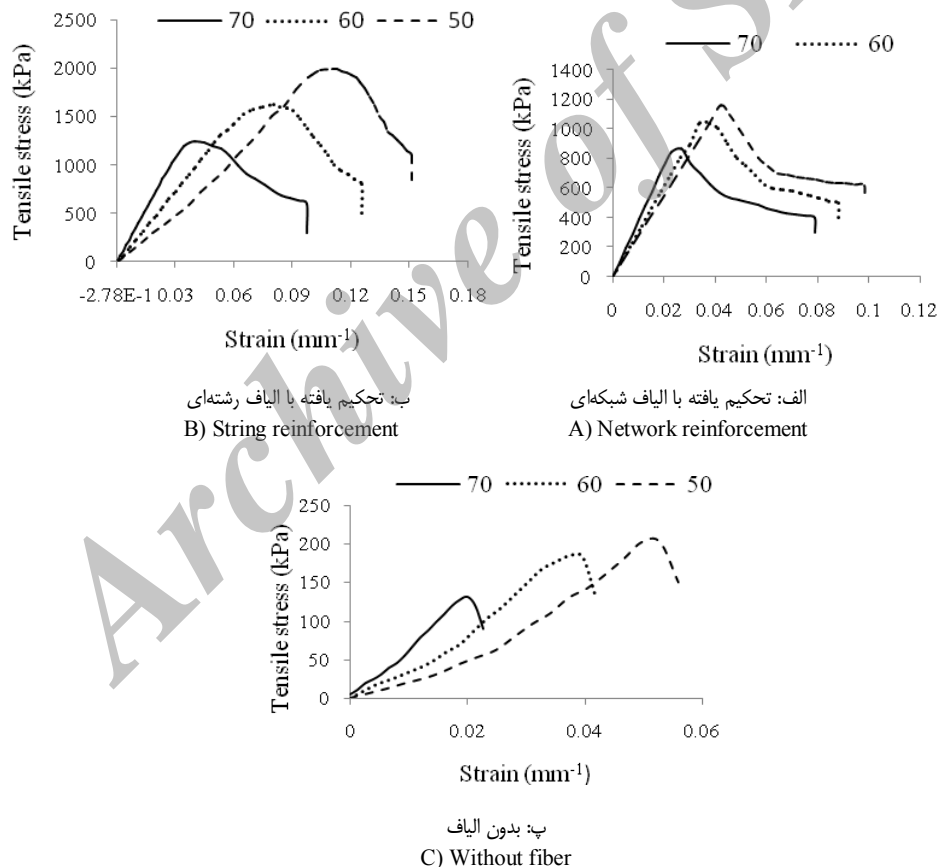
### بررسی تجزیه پذیری بیوپلاستیک‌ها

یکی از ویژگی‌های بیوپلاستیک‌ها پس از استفاده‌های معمول، قابلیت استفاده از ضایعات آن‌ها به‌عنوان خوراک دام است که بدین ترتیب بیوپلاستیک‌ها تجزیه شده و دوباره به چرخه تولید باز می‌گردند. به‌منظور بررسی روند تجزیه پذیری، ابتدا ماده خشک نمونه‌ها ( $M$ ) با استفاده از آون، در درجه حرارت  $55^\circ\text{C}$  تا  $60^\circ\text{C}$  به مدت  $48$  ساعت تعیین گردید. سپس  $2$  گرم از هر نوع بیوپلاستیک در کیسه‌های نایلونی مشبک با اندازه منافذ  $40$  تا  $60$  میکرومتر گذاشته و به مدت  $2$ ،  $4$ ،  $8$ ،  $16$ ،  $24$  و  $48$  ساعت از طریق فیسوله در داخل شکمبه یک گوسفند قرار داده شد. کیسه‌ها قبل از تغذیه نوبت صبح درون شکمبه قرار داده شد و پس از گذشت زمان‌های ذکر شده برداشته شد و بلافاصله با آب شسته شدند و سپس به مدت  $48$  ساعت در آون با دمای  $55^\circ\text{C}$  تا  $60^\circ\text{C}$  قرار داده شد تا خشک شدند و پس از آن بیوپلاستیک باقی مانده وزن گردید (Blummel and Orskov, 1993). هر یک از این آزمایش‌ها در سه تکرار انجام شد. به‌دلیل حل شدن کمی از نمونه‌ها در زمان شستشو، میزان تجزیه پذیری با

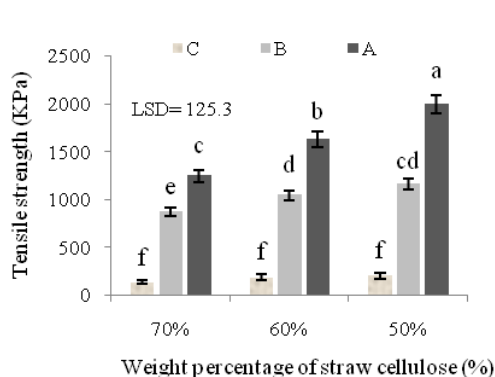
سطح احتمال ۵٪ تأثیر معنی داری بر این خصوصیات داشتند. میانگین‌های به دست آمده و وضعیت اختلاف آماری آن‌ها در شکل های ۵ تا ۹ نشان داده شده‌اند. شکل های ۵ و ۶ به ترتیب استحکام کششی و کرنش (درصد افزایش طول) بیوپلاستیک‌ها را نشان می دهند که استحکام کششی و کرنش با به کارگیری الیاف به طور قابل توجهی افزایش می یابد. بیشترین استحکام کششی مربوط به اضافه کردن ۵۰٪ وزنی سلولز و در حالت تحکیم دهی شبکه‌ای و به میزان  $1992/0.2$  MPa مشاهده شد. کمترین استحکام کششی نیز در حالت ۷۰٪ وزنی سلولز و بدون تحکیم دهی و به میزان MPa  $132/34$  مشاهده شد (شکل ۵). مقدار کرنش نیز با افزودن الیاف به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می یابد که این افزایش در حالت الیاف رشته‌ای به طور میانگین  $2/3$  برابر و در حالت الیاف شبکه‌ای،  $3/2$  برابر نسبت به حالت بدون الیاف، افزایش می یابد. بیشترین میزان کرنش در حالت ۵۰٪ وزنی سلولز و تحکیم یافته شبکه‌ای و به میزان  $15/1$ ٪ مشاهده شد (شکل ۶).

یافته رشته‌ای و تحکیم یافته شبکه‌ای، نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می شود، در هر سه نمونه بیوپلاستیک تهیه شده، با افزایش درصد وزنی سلولز، استحکام کششی و کرنش کاهش ولی مدول کششی افزایش می یابد. با مقایسه‌ی نمودار تنش-کرنش نمونه‌ها در حالت تحکیم یافته و تحکیم نیافته، در حالت تحکیم نیافته، گسیختگی با افت آنی تنش همراه است در صورتی که در حالت تحکیم یافته با الیاف، گسیختگی به صورت تدریجی رخ می دهد. زیرا در بیوپلاستیک‌های تحکیم یافته، قسمتی از تنش به الیاف منتقل می شود و الیاف خود دارای استحکام کششی بالایی هستند که علاوه بر میزان استحکام کششی، در کیفیت شکست نیز تأثیر می گذارد. با توجه به شکل ۴، با اضافه کردن الیاف خرما، در تمام درصدهای سلولز، مقدار کرنش افزایش می یابد.

تجزیه‌ی واریانس داده‌های مربوط به مدول کششی، مدول خمشی، کرنش، استحکام کششی و استحکام خمشی نشان داد که هر دو عامل (تحکیم دهی و درصد وزنی سلولز) و اثر متقابل آن‌ها در

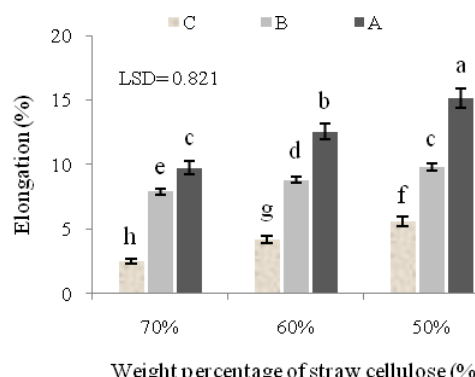


شکل ۴- نمودار تنش-کرنش نمونه‌های بیوپلاستیک، برای حالت‌های مختلف تحکیم دهی و درصدهای مختلف سلولز  
Fig.4. Stress – strain diagram of bioplastic specimens for different in for cement conditions and different percentages of cellulose



شکل ۶- مقایسه میانگین استحکام کششی

Fig.6. Comparison of means of tensile strength

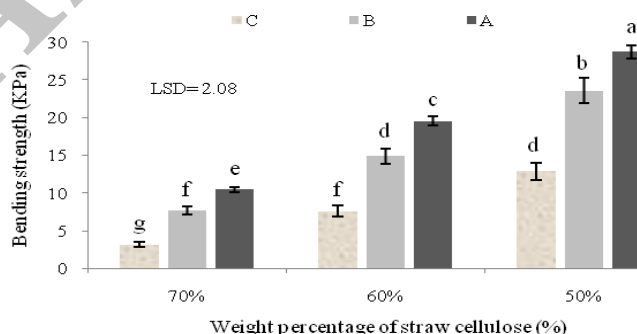


شکل ۵- مقایسه میانگین درصد افزایش طول

Fig.5. Comparison of means of elongation

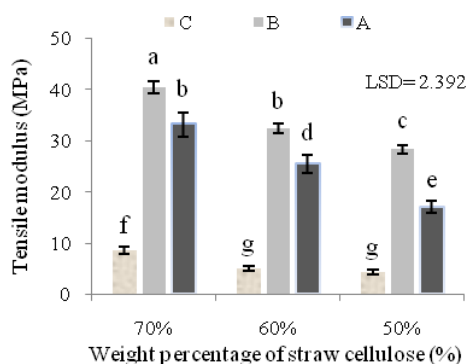
تغییرات مدول کششی و خمشی، در درصدهای مختلف اضافه کردن سلولز و در دو حالت تحکیم یافته رشته‌ای و شبکه‌ای نسبت به حالت تحکیم نیافته به ترتیب در شکل‌های ۸ و ۹ نشان می‌دهند که در تمام درصدهای سلولز با اضافه کردن الیاف خرما، مدول کششی و خمشی افزایش می‌یابد. در حالت اضافه کردن الیاف موازی، مدول کششی و خمشی افزایش بیشتری نسبت به حالت اضافه کردن الیاف شبکه‌ای دارد. از آنجا که درصد اضافه کردن الیاف در هر دو نوع تحکیم‌دهی میزان ثابت ۱٪ وزنی است، در حالت تحکیم‌دهی با الیاف موازی تمام الیاف اضافه شده، بار کششی را تحمل می‌کنند. اما در حالت تحکیم‌دهی شبکه‌ای، قسمتی از الیاف دارای جهت‌گیری عمود بر جریان کشش می‌باشند و نقش کمتری در تحمل بار کششی دارند. بیشترین مدول کششی و خمشی در حالت اضافه کردن ۷۰٪ وزنی سلولز و تحکیم یافته رشته‌ای (در حالت کششی ۴/۴ MPa و در حالت خمشی ۲/۳ MPa) مشاهده شد. نتایج همچنین نشان داد مدول کششی بیوپلاستیک‌های سلولزی به مراتب بزرگ‌تر از مدول خمشی آن‌ها است.

استحکام خمشی بیوپلاستیک‌های تهیه شده از سلولز کاه با تغییر درصد وزنی سلولز و در سه حالت تحکیم در شکل ۷ نشان داده شده است. این نتایج نشان می‌دهد با کاهش درصد وزنی سلولز و همچنین اضافه کردن ۱٪ وزنی الیاف خرما، استحکام خمشی افزایش می‌یابد. بیشترین استحکام خمشی مربوط به اضافه کردن ۵۰٪ وزنی سلولز و در حالت تحکیم‌دهی شبکه‌ای و به میزان ۲۸/۷۱ MPa و کمترین مقدار آن در حالت ۷۰٪ وزنی سلولز و بدون تحکیم‌دهی، به میزان ۳/۱۵ MPa مشاهده شد. بنابراین با توجه به شکل ۴ و ۵ می‌توان نتیجه گرفت با کاهش درصد سلولز و همچنین تحکیم‌دهی شبکه‌ای، استحکام کششی ۱۵ برابر و استحکام خمشی ۹ برابر افزایش می‌یابد. این نمودارها همچنین نشان می‌دهند که حالت تحکیم‌دهی شبکه‌ای، برای تمام تیمارهای درصد وزنی سلولز، استحکام کششی و خمشی را مؤثرتر از الیاف رشته‌ای افزایش می‌دهد. همچنین استحکام کششی بیوپلاستیک‌های سلولزی به مراتب بیشتر از استحکام خمشی آن‌ها است و این پلاستیک‌ها در حالت خمش، رفتار ضعیف‌تری از خود نشان می‌دهند.



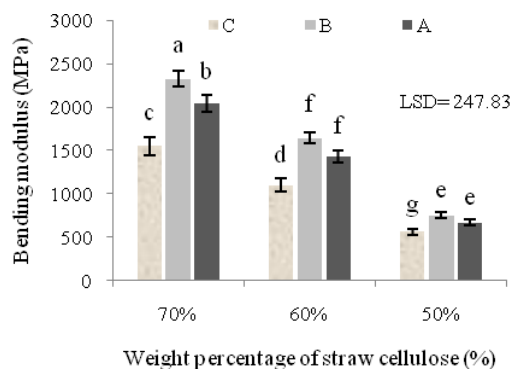
شکل ۷- مقایسه میانگین استحکام خمشی

Fig.7. Comparison of means of bending strength



شکل ۹- مقایسه میانگین مدول کششی

Fig.9. Comparison of means of tensile modulus



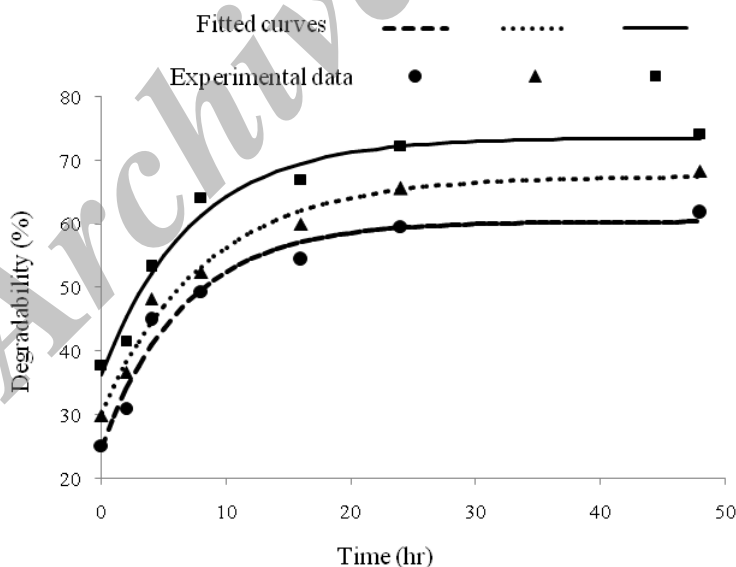
شکل ۸- مقایسه میانگین مدول خمشی

Fig.8. Comparison of means of bending modulus

بررسی روند تجزیه پذیری بیوپلاستیک‌های تهیه شده از سلولز کاه پس از گذشت ۴۸ ساعت، مربوط به ۵۰٪ وزنی سلولز و به میزان ۷۴٪ مشاهده شد؛ در حالی که در پلاستیک‌های تهیه شده از ۷۰٪ وزنی سلولز، میانگین درصد تجزیه‌پذیری پس از گذشت ۴۸ ساعت، ۶۲٪ مشاهده شد. در جدول ۱، پارامترهای a (درصد ماده قابل حل در زمان صفر)، b (درصد تجزیه‌پذیری مؤثر) و c (ضریب سرعت تجزیه مواد در داخل شکمبه) موجود در رابطه (۲)، برای تیمارهای مختلف نشان داده شده است.

### بررسی روند تجزیه پذیری

روند تجزیه پذیری بیوپلاستیک‌های تهیه شده از سلولز کاه در درصدهای مختلف از سلولز در شکل ۱۰ نشان داده شده است. منحنی‌های عبور داده شده از این نقاط بر اساس رابطه (۲) و به روش کمترین مربعات با استفاده از نرم‌افزار MATLAB برازش شده‌اند. ضریب تبیین محاسبه شده برای هر یک از برازش‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۸، با افزایش محتوای سلولز، درصد تجزیه‌پذیری کاهش می‌یابد. حداکثر میزان تجزیه‌پذیری



شکل ۱۰- داده‌های آزمایش و نمودار برازش شده میزان تجزیه پذیری برای نمونه‌های بیوپلاستیک با درصدهای مختلف سلولز (۵۰٪ وزنی سلولز، ▲ ۶۰٪ وزنی سلولز، ● ۷۰٪ وزنی سلولز)

Fig.10. Experimental data and fitted curve for the degradation of Bioplastic specimens with different percentages of cellulose (■50% wt cellulose, ▲ 60% wt cellulose and ●70% wt cellulose)

جدول ۱- برآورد پارامترهای تجزیه‌ای بیوپلاستیک‌های تهیه شده از درصد‌های مختلف سلولز

Table 1- Estimation of degradation parameters for bioplastics made with different percentages of cellulose

درصد وزنی سلولز Weight percentage of cellulose	a (%)	b (%)	c (hr <sup>-1</sup> )	ضریب تبیین (R <sup>2</sup> )
70	24.86	35.52	0.153	0.97
60	30.36	37.15	0.141	0.98
50	36.34	37.20	0.139	0.97

مدول کششی و خمشی را افزایش می‌دهد. بیشترین استحکام کششی و خمشی مربوط به اضافه کردن ۵۰٪ سلولز و در حالت تحکیم‌دهی با الیاف شبکه‌ای به ترتیب ۱۹۹۲/۰۲ MPa و ۲۸/۷۱ MPa مشاهده شد. همچنین با اضافه کردن الیاف خرما، در تمام درصد‌های سلولز، درصد افزایش طول افزایش می‌یابد. این افزایش در حالت استفاده از الیاف رشته‌ای به‌طور میانگین ۲/۳ برابر و در حالت الیاف شبکه‌ای، ۳/۲ برابر نسبت به حالت بدون الیاف، افزایش می‌یابد. بیشترین میزان درصد افزایش طول در حالت ۵۰٪ وزنی سلولز و تحکیم یافته با الیاف شبکه‌ای و به میزان ۱۵/۱٪ مشاهده شد. نتایج تجزیه پذیری بیوپلاستیک‌ها در داخل شکمبه گوسفند فیسوله گذاری شده نشان داد با افزایش درصد وزنی سلولز، میزان ماده‌ی قابل حل در زمان صفر و تجزیه پذیری مؤثر کاهش می‌یابد اما سرعت ناپدید شدن مواد در داخل شکمبه افزایش می‌یابد. همچنین مدل در نظر گرفته شده (رابطه ۲) به خوبی در داده‌های آزمایش، برازش شد ( $R^2=0.97$ ).

با توجه به این نتایج می‌توان گفت با افزایش درصد وزنی سلولز، میزان ماده‌ی قابل حل در زمان صفر و تجزیه پذیری مؤثر کاهش می‌یابد اما سرعت تجزیه شدن مواد در داخل شکمبه افزایش می‌یابد. با توجه به ضرایب تبیین بالای به‌دست آمده، می‌توان نتیجه گرفت که روند تجزیه‌پذیری پلاستیک تهیه شده از سلولز کاه، با دقت خوبی از رابطه (۲) پیروی می‌کند.

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش، سلولز تهیه شده از کاه گندم در درصد‌های وزنی ۷۰٪، ۶۰٪ و ۵۰٪ با گلیسرول مخلوط شد و با استفاده از یک دستگاه پرس هیدرولیکی و یک قالب، صفحات بیوپلاستیک تهیه شد. به منظور تقویت بیوپلاستیک‌ها، از الیاف خالص سازی شده خرما به دو شکل شبکه‌ای و رشته‌ای استفاده شد و تأثیر آن بر خصوصیات کششی و خمشی بیوپلاستیک‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد اضافه کردن الیاف خرما، استحکام کششی و خمشی و همچنین

### منابع

1. Amini, S. R., and A. Ghazanfari. 2011. Optimization of eliminating date palm fibers lignin with the level of response and the desired function. *Separate Science and Engineering* 3: 105-114. (In Farsi).
2. ASTM International. 2002. Standard test for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials. *Annual book of ASTM standards*, 146-151.
3. Blummel, M., and E. R. Orskov. 1993. Comparison of in vitro gas production and nylon bag degradability of roughages in predicting feed intake in cattle. *Animal Feed Science and Technology* 40: 109-119.
4. Brigada, A. I. S., V. M. A. Calado, L. R. B. Goncalves, and M. A. Z. Coelho. 2010. Effect of chemical treatment on properties of green coconut fiber. *Carbohydrate Polymer* 79: 1119-1125.
5. Detroy R. W., L. A. Lindenfelser, S. Sommer, and W. L. Orton. 1981. Bioconversion of wheat straw to ethanol: chemical modification, enzymatic hydrolysis and fermentation. *Biotechnology and Bioengineering* 23: 1527-1535.
6. Ghafarzadeh, H., and A. Ghazanfari. 2010. Comparing four methods for purifying date fibers for reinforcement purposes in biocomposites. *Separate Science and Engineering* 2: 105-114. (In Farsi).
7. Ghazanfari A., S. Emami, S. Panigrahi, and L. G. Tabil. 2008. Thermal and mechanical properties of blends and composites from HDPE and date pits particles. *Composite Material* 42: 77-90.
8. Jensen, A., and H. H. Chenoweth. 1975. *Applied Strength of Materials*, McGraw-Hill, Blacklick, Ohio, U.S.A.
9. Liu W., A. K. Mohanty, P. Askeland, M. Misra, and L. T. Drzal. 2005. Green composites from soy based plastic and pineapple leaf fiber: Fabrication and properties evaluation. *Polymer* 46:2710-21.
10. Mohanty A. K., P. Tummala, W. Liu, M. Misra, and L. T. Drzal. 2005. Injection molded



- biocomposites from soy protein based bioplastic and short industrial hemp fiber. *Polymer Environment* 13:279-85.
11. Omrani, H. 2012. Assessing mechanical and degradation properties of bioplastics made from wheat flour and wheat straw cellulose reinforced with date palm fibers. M.S. Thesis, Shahid Bahonar University of Kerman, Faculty of Agricultural Engineering, Department of Mechanics of Agricultural Machinery, Kerman, Iran. (In Farsi).
  12. Omrani, H., and A. Ghazanfari. 2011. Assessing the mechanical properties of biocomposites made from saw dusts. 1<sup>th</sup> National Conference of Agricultural wastes and Natural Resources: Challenges and Solutions, Gilan, Rasht, Iran. (In Farsi).
  13. Orskov, E. R., and I. McDonald. 1979. The estimation of protein degradability in the rumen from incubation measurements according to the rate of passage. *Agricultural Science, Cambridge* 92:449-503.
  14. Salamatdoust, R., M. Chamani, A. A. Sadeghi, and A. M. Aghazadeh. 2009. Determination of degradability of treated soybean meal and its proteins fractions. *African Journal of Biotechnology* 8: 098-102.
  15. Shakeri, A. R., and A. Omidvar. 2005. Investigation on the effect of type, quantity and size of straw particles on the mechanical properties of crops straw-high density polyethylene composites. *Iranian Polymer Science and Technology* 119: 301-308. (In Farsi).
  16. Singh, S., A. K. Mohanty, T. Sugie, Y. Takai, and H. Hamada. 2008. Renewable resource based biocomposites from natural fiber and polyhydroxybutyrate-co-valerate (PHBV) bioplastic, Part A. *Composite* 39: 875-886.
  17. Siracusa, V., P. Rocculi, S. Romani, and M. Dalla Rosa. 2008. Biodegradable polymers for food packaging: a review. *Trend in Food Science and Technology* 19: 634-643.
  18. Sun, Y., and J. Cheng. 2002. Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review. *Bioresource Technology* 83:1-11.
  19. Tummala P., W. Liu, L. T. Drzal, A. K. Mohanty, and M. Misra. 2006. Influence of plasticizers on thermal and mechanical properties and morphology of soy-based bioplastics. *Industrial Engineering Chemistry Resource* 45: 7491-7496.
  20. Wanjun, L., A. K. Mohanty, P. Askelanda, L. T. Drzal, and M. Misra. 2007. Influence of processing methods and fiber length on physical properties of kenaf fiber reinforced soy based biocomposites. *Composite* 38: 352-359.
  21. Wanjun, L., A. K. Mohanty, P. Askelanda, L. T. Drzal, and M. Misra. 2004. Influence of fiber surface treatment on properties of Indian grass fiber reinforced soy protein based biocomposites. *Polymer* 45: 7589-7596.
  22. Zare, A., A. Ghazanfari, H. Hashemi pour. 2010. The effect of eliminating lignin on physical, mechanical and chemical characteristics. *Separate Science and Engineering* 2: 69-76. (In Farsi).
  23. Zuluaga, R., J. L. Pataux, J. Cruz, J. Valez, I. Mondragon, and P. Ganán. 2008. Cellulose microfibrils from banana rachis: Effect of alkaline treatments on structural and morphological features. *Carbohydrate Polymer*, 79: 1108-1114.