

## ارزیابی تجزیه پارچه ریون تحت شرایط کمپوست‌سازی

محمد جواد اسمعیل‌زاده<sup>۱</sup> و عباس رشیدی<sup>\*۲</sup>

۱- کارشناسی ارشد مهندسی شیمی دانشگاه مازندران

۲- دانشیار گروه مهندسی شیمی دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه مازندران

(تاریخ دریافت ۹۷/۰۱/۲۱ - تاریخ پذیرش ۹۷/۰۳/۰۸)

### چکیده:

حجم پسماندهای پارچهای تولید شده در سراسر جهان دائماً در حال افزایش است. بخش قابل توجهی از این پسماندها دارای قابلیت بازیافت‌شدن است. تبدیل شدن به کمپوست می‌باشد اما در کشور ما، برای مدیریت پسماندهای پارچهای، راهی جز سوزاندن و دفن وجود ندارد. در بین انواع پارچه‌ها، برخی دارای قابلیت زیست‌تخریب‌پذیری بیشتری می‌باشند و می‌توانند تحت شرایط مناسب، با سرعت قابل قبول تجزیه شوند. در این پژوهش قابلیت تجزیه پارچه‌های ریون، تحت شرایط کمپوست‌سازی مورد بررسی قرار گرفت. در طول فرآیند کمپوست‌سازی، دما، رطوبت و هواهیته تحت کنترل بوده و در زمان‌های مشخص، از پارچه‌ها نمونه برداری شد و تغییرات برخی پارامترهای عملیاتی نظیر دما، رطوبت و pH مورد بررسی قرار گرفت. تغییرات ساختار و مورفولوژی پارچه‌ها قبل و بعد از تجزیه، به وسیله طیف FTIR و تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) بررسی شد و در پایان فرآیند، با اندازه‌گیری کاهش وزن ناشی از تبدیل مواد آلی توسط میکرو ارگانیزم‌ها، میزان تجزیه این پارچه‌ها ارزیابی شد. در آخر درجه بالغ‌شدن کمپوست حاصل نیز به وسیله آزمون جوانه‌زنی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این بررسی‌ها، تغییرات در پیوندهای هیدروژنی موجود در زنجیره‌های سلولزی پارچه ریون را نشان داد. با توجه به درصد کاهش وزن نمونه‌ها در انتهای آزمون، پارچه ریون دارای قابلیت تجزیه تحت شرایط کمپوست‌سازی می‌باشد و نتایج آزمون جوانه‌زنی نشان داد که کمپوست حاصل، از نظر بالغ شدن در سطح قابل قبولی قرار دارد.

کلید واژگان: زیست تخریب‌پذیری، کمپوست‌سازی، پارچه ریون

در آینده شود.

## ۱. مقدمه

بخش قابل توجهی از پسماندهای پارچه‌ای دارای قابلیت تبدیل شدن به کمپوست می‌باشند اما در کشور ما، برای مدیریت این پسماندها، راهی جز سوزاندن و دفن کردن وجود ندارد. در بین انواع پارچه‌ها، برخی دارای قابلیت زیست تخریب پذیری می‌باشند و می‌توانند تحت شرایط کنترل شده تجزیه شوند. پارچه‌های زیست تخریب پذیر می‌توانند از الیاف طبیعی مثل پنبه و کنف، الیاف مصنوعی مثل استات سلولز و ابریشم مصنوعی و یا الیاف صنعتی مثل پلی لاکتیک‌اسید (PLA) تولید شده باشند (Bhat et al., 2010).

سلولز رایج ترین پلیمر زیست تخریب پذیر و جزء اصلی بسیاری از الیاف طبیعی می‌باشد. این پلیمر خطی شامل زنجیره‌های ماکرومولکولی طولانی با یک واحد تکراری (cellobiose) می‌باشد. تجزیه زیستی سلولز از طریق اکسیداسیون آنزیمی، باکتری‌ها و قارچ‌ها انجام می‌شود (Vroman & Tighzert, 2009). پارچه‌های سلولزی نسبت به رشد میکروبی بسیار حساس هستند و میزان تخریب آنها به ترکیب شیمیایی، میکروارگانیسم های مورد استفاده و شرایط محیطی آنها بستگی دارد (Desai & Pandey, 1971). در بین پارچه‌های سلولزی، پارچه ریون در صنعت پوشاک ایران بسیار مورد توجه قرار گرفته است. کمپوست‌سازی از پسماندهای ناشی از این پارچه‌ها، علاوه بر کاهش حجم آنها، می‌تواند منجر به تولید کودی باکیفیت برای بهبود وضعیت خاک‌ها و کشاورزی کشور نیز شود.

تجزیه زیستی الیاف و پارچه‌های سلولزی در دهه‌های گذشته به‌طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است (Kochan & Kotowa, 2001; Park et al., )

امروزه فعالیت‌های انسان در زمینه‌های کشاورزی، صنعتی و بهداشتی، با استفاده بیش از حد از منابع و انرژی همراه است. در نتیجه با تولید مقادیر بالای پسماندهای آلی، نگرانی‌هایی در مورد سلامت انسان و محیط زیست به وجود می‌آید. حجم پسماندهای جامد تولیدی در سراسر جهان دائماً در حال افزایش است به طوری که در یک کشور در حال توسعه، هر فرد روزانه حدود ۰/۷۷ کیلوگرم زباله تولید می‌کند. از این رو مدیریت پسماندها به یک مسئله مهم در سراسر جهان تبدیل شده است (Vakili et al., 2015).

پسماندهای پارچه‌ای، یکی از انواع پسماندهای جامد شهری هستند که حجم زیاد آنها، یک چالش جدی برای مدیریت پسماند است. میزان تولید پسماند پارچه‌ای در نقاط مختلف جهان متفاوت است اما در سال‌های گذشته، همواره نزدیک به ۱۰٪ از کل پسماندهای تولیدشده در سراسر جهان، از پسماندهای پارچه‌ای بوده است. در سال ۸۷، مقدار پسماند پارچه‌ای در برخی نقاط ایران، به بیش از ۴٪ رسید که در مقایسه با آمارهای منتشر شده مربوط به سال‌های قبل از آن، نشان‌دهنده رشد تولید این پسماندها می‌باشد (Hassanvand et al., 2008). در سال‌های اخیر آمار دقیقی از میزان پسماندهای پارچه‌ای در سراسر کشور وجود ندارد اما قطعاً با توجه به افزایش جمعیت جوان در کشور و توجه روز افزون به مد و لباس، سهم این پسماندها نیز افزایش یافته است. همچنین در سال‌های اخیر، بحث استفاده از کیسه‌های پارچه‌ای زیست تخریب‌پذیر به جای پلاستیک‌ها مطرح شده است که این مورد نیز می‌تواند منجر به افزایش پسماندهای پارچه‌ای کشور

تغییرات برخی پارامترهای عملیاتی نظیر دما، رطوبت و pH مورد بررسی قرار گرفت؛ تغییرات ساختار و مورفولوژی پارچه ریون قبل و بعد از تجزیه، به وسیله طیف FTIR و تصاویر SEM بررسی شد و با اندازه گیری کاهش وزن نمونه ها در پایان فرآیند، میزان تجزیه این پارچه ارزیابی شد؛ در آخر درجه بالغ شدن کمپوست حاصل، به وسیله آزمون جوانه زنی مورد ارزیابی قرار گرفت.

## ۲. مواد و روش ها

### ۱.۲. مواد

در پژوهش حاضر، زیست تخریب پذیری پارچه ریون مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور، از کمپوست بالغ تولید شده در واحد کمپوست سازی به شهر به عنوان ماده تلقیحی استفاده شد. این کمپوست از پسماندهای جامد شهری حاصل شده و دارای عمر ۴ ماه بوده است (۴ ماه تحت فرآیند های تجزیه بیولوژیکی). همچنین این کمپوست دارای رطوبت ۲۰٪ و مقدار مواد آلی آن ۴۸٪ بوده است و نسبت C/N آن ۱۲/۳۳ و pH آن ۷/۴۴ می باشد. طبق آزمایشات میکروبی، کمپوست به کار رفته، فاقد باکتری های بیماری زا بوده است.

### ۲.۲. سیستم آزمایشی

در این پژوهش ظرف واکنش از جنس پلیمر شفاف آکرلیک (Plexiglas) انتخاب شد. شکل راکتور به صورت مکعب مستطیل و حجم آن در حدود ۶ لیتر (۲۷cm طول، ۱۷cm عرض و ۱۳cm ارتفاع) طراحی شد. برای هوا دهی در طول فرآیند کمپوست سازی، از کپسول های هوا استفاده شد و هوا به طور پیوسته وارد سیستم گردید. در طول فرآیند برای حفظ

2004; Tomšič *et al.*, 2007; Klemenčič *et al.*, 2010) و همکاران (۲۰۱۴)، زیست-تخریب پذیری هوازی چند نوع پارچه سلولزی و غیرسلولزی را در داخل خاک (کمپوست بالغ تهیه شده از پسماندهای مختلف) مورد بررسی قرار دادند و بر اساس مشاهدات بصری و روش های میکروسکوپی، بیان کردند که روند تجزیه بیولوژیک پارچه های سلولزی و غیر سلولزی مشابه هم هستند و تنها تفاوت آنها، مدت زمان تجزیه است. Warnock و همکاران (۲۰۰۹)، مدت زمان تجزیه زیستی هوازی سه نوع پارچه سلولزی را در خاک کاپتینا مورد مطالعه قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که در این پارچه ها، هرچه میزان سلولز های آمورف بیشتر و طول زنجیره های پلیمری کمتر باشد، تجزیه پارچه ها سریع تر اتفاق می افتد. همچنین Li و همکاران (۲۰۱۰)، زیست تخریب پذیری پارچه های نخی و پلی استر را در شرایط کمپوست سازی در مقیاس آزمایشگاهی و مقیاس بزرگ با هم مقایسه کردند و برای این کار، کاهش وزن پارچه ها و تغییرات مورفولوژی آنها پس از تجزیه را مورد ارزیابی قرار دادند. Behera و همکاران (۲۰۱۲) نیز قابلیت کمپوست شدن پارچه های کنفی و کامپوزیت های آن را مورد بررسی قرار دادند و Mohanty و همکاران (۲۰۰۰) تاثیرات اصلاح سطح پارچه های کنفی بر زیست تخریب پذیری آنها را تحت شرایط کمپوست سازی بررسی کردند و بر اساس معیار کاهش وزن، میزان زیست تخریب پذیری آنها را مورد ارزیابی قرار دادند.

هدف این پژوهش، ارزیابی زیست تخریب پذیری پارچه ریون تحت شرایط کمپوست سازی در مقیاس آزمایشگاهی است. در طول فرآیند کمپوست سازی،

و توزیع دمای یکنواختی در نقاط مختلف راکتور فراهم آمد. همچنین دمای توده کمپوست و فضای بالا سری آن، دائما توسط دو ترموکوپل اندازه گیری شدند. شکل ۱ نمایی از سیستم آزمایشی را نشان می دهد.

رطوبت توده مواد، ابتدا لوله هوا وارد یک بطری آب مقطر شد و پس از اشباع شدن هوا از آب، وارد سیستم شد. برای اعمال تیمارهای دما، از سیستم گرمادهی خارجی (Oven) استفاده شد. به کمک این دستگاه دمای محیط واکنش برای مدت زمان های معلوم، در محدوده های ترموفیل و مزوفیل تنظیم شد



شکل ۱- نمایی از سیستم آزمایشی

جریان هوای ورودی روی  $1 \text{ L min}^{-1}$  ( $1 \text{ L min}^{-1}$ )  
 $(\text{kg}_{\text{TS}})^{-1}$  تنظیم شد. در مرحله اول، دمای آون روی  $58^{\circ}$  تنظیم شد و با توجه به اینکه بیشترین تخریب زیستی در فاز ترموفیل اتفاق می افتد، این مرحله (دمای آون  $58^{\circ}$ ) به مدت ۴۵ روز ادامه پیدا کرد. با توجه به اینکه در دمای  $40^{\circ}$ - $35^{\circ}$ ، فعالیت میکروبی روی مواد لیگنوسلولزی بیشتر است، برای مرحله دوم آزمون، به مدت ۱۵ روز دمای آون روی  $35^{\circ}$  درجه تنظیم شد. بنابراین شرایط برای فعال سازی میکرو ارگانیسم های مزوفیل نیز فراهم شد. قبل از شروع آزمون، برخی پارامتر های عملیاتی نظیر رطوبت، pH و نسبت C/N در مواد آزمون اندازه گیری شد. در طول آزمون، روند تخریب نمونه ها به وسیله آنالیزهای FTIR و SEM بررسی شد و درانتها، کاهش وزن ناشی از تبدیل مواد آلی نمونه ها

### ۳.۲. روش ها

به منظور ارزیابی تجزیه پسماندهای پارچه ای تحت شرایط کمپوست سازی، روش کلی آزمون بر اساس استاندارد ۱۷۸۲۸ سازمان ملی استاندارد ایران (۱۳۹۳) و EN 14806:2005 بوده است. با استفاده از این روش، میزان تجزیه مواد آزمون در شرایط کمپوست سازی کاملا هوایی<sup>۱</sup> در مقیاس آزمایشگاهی بررسی شد. فاز جامد استفاده شده در این آزمون، شامل کمپوست صنعتی به عنوان ماده تلقیحی و پارچه ریون به عنوان نمونه بود. قبل از شروع آزمون، ۱/۵ kg از کمپوست بالغ و تعدادی پارچه ریون با قطعات  $2/5 \text{ cm} \times 2/5 \text{ cm}$  تهیه شدند و مخلوط آزمون به رطوبت ۵۵٪ رسانده شد. همچنین نرخ

1-Intensive aerobic

اندازه‌گیری شد. برای تعیین pH مواد در طول آزمون، ابتدا یک سوسپانسیون آبی از ماده و آب مقطر با نسبت وزنی ۱ به ۱۰، تهیه شد. پس از هم زدن سوسپانسیون، مقدار pH با استفاده از pH متر اندازه‌گیری شد (Sun *et al.*, 2016; Gigliotti *et al.*, 2012).

به منظور بررسی تغییرات مولکولی نمونه‌ها در طول فرآیند، از دستگاه طیف سنج مادون قرمز (Tensor27, BRUKER, Germany) استفاده شد. برای بررسی تغییرات مورفولوژی الیاف ریون از میکروسکوپ الکترونی روبشی (AIS2100, SERONTECHNOLOGIES, South Korea) استفاده شد.

به منظور ارزیابی میزان تجزیه (فروپاشی) نمونه‌ها، کمپوست تهیه شده را به وسیله الک دو میلیمتری الک کرده و ذرات پارچه باقیمانده بر روی الک (که اندازه آنها بزرگتر از دو میلیمتر بوده است)، جمع‌آوری شد. طبق استاندارد ۱۷۸۲۸ سازمان ملی استاندارد ایران (۱۳۹۳)، ذراتی که بر روی الک باقی ماندند ولی از نظر رنگ، ساختار، ابعاد، رطوبت، ظاهر و براقیت، تفاوتی با کمپوست الک شده نداشتند، نیز به عنوان کمپوست در نظر گرفته شدند.

ذرات باقیمانده بزرگتر از دو میلیمتر، با غوطه‌وری در آب شسته شد و سپس در داخل آون با دمای ۱۰۵°C خشک و وزن نهایی آن ثبت گردید. کل ذرات پارچه‌ای بزرگتر از دو میلیمتر، به عنوان جزء فروپاشی نشده و موادی که از الک عبور کرده‌اند به عنوان مواد فروپاشی شده در نظر گرفته شدند. مقدار فروپاشی از طریق رابطه (۱) اندازه‌گیری شد:

$$(1) \quad D = \frac{M_i - M_r}{M_i} \times 100$$

1-disintegration

که در آن:

D: مقدار فروپاشی بر حسب درصد؛

M<sub>i</sub>: وزن خشک اولیه نمونه‌های آزمون؛

M<sub>r</sub>: وزن خشک باقیمانده بزرگ تر از ۲ میلی متر است.

طبق این استاندارد، اگر درصد کاهش وزن، بین مخلوط جامد اولیه و کمپوست حاصل، در انتهای آزمون بزرگتر یا مساوی ۳۰ درصد باشد، آزمون انجام شده معتبر است و پارچه مورد نظر، قابلیت تجزیه در شرایط کمپوست‌سازی را دارا می‌باشد. این کاهش وزن ناشی از تبدیل مواد آلی توسط میکرو ارگانیسم‌ها می‌باشد. کاهش وزن ناشی از تبدیل مواد آلی، از رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$(2) \quad R = \frac{(M_s \times D M_s \times V S_s) - (M_c \times D M_c \times V S_c)}{(M_s \times D M_s \times V S_s)} \times 100$$

که در آن:

R: کاهش وزن بین مواد جامد اولیه و کمپوست به دست آمده در انتهای آزمون بر حسب درصد؛

M<sub>s</sub>: وزن اولیه مواد جامد مرطوب ورودی به راکتور؛

D M<sub>s</sub>: درصد اولیه وزن خشک در جامد مرطوب؛

V S<sub>s</sub>: درصد اولیه جامدات فرار در مواد جامد؛

M<sub>c</sub>: وزن نهایی کمپوست مرطوب به دست آمده؛

D M<sub>c</sub>: درصد نهایی وزن خشک در کمپوست به دست آمده؛

آمده؛

V S<sub>c</sub>: درصد نهایی جامدات فرار در کمپوست به دست آمده.

برای اندازه‌گیری وزن خشک، مواد آزمون به مدت ۲۴ ساعت در داخل آون با دمای ۱۰۵ درجه خشک شدند. مقدار جامدات فرار مواد آزمون، با سوزاندن مواد به مدت ۴ ساعت در یک کوره با دمای ۵۵۰ درجه و اندازه‌گیری کاهش وزن ناشی از سوزاندن، اندازه‌گیری شد. مقدار جامدات فرار، نشان دهنده مقدار مواد آلی

$$(۵) \quad GI (\%) = \frac{(\text{رشد نسبی ریشه}) \times (\text{جوانه زنی نسبی بذر})}{100}$$

### ۳. نتایج

شکل ۲ نمودار تغییرات دمای داخل راکتور در طول تجزیه پارچه ریون را نشان می‌دهد. شکل ۳ و شکل ۴ نیز به ترتیب تغییرات رطوبت و pH را در طول تخریب پارچه ریون نشان می‌دهند.

طیف مادون قرمز تبدیل فوریه (FTIR) مربوط به نمونه ریون در سه مقطع زمانی (قبل از آزمون، پس از ۳۰ روز، پس از ۶۰ روز) در شکل ۵ آمده است. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نمونه ریون در طول فرآیند نیز در شکل ۶ نشان داده شده است.

پس از پایان آزمون، کل مخلوط کمپوست را به وسیله الک دو میلی‌متری الک کرده و ذرات پارچه‌ای باقیمانده، جمع‌آوری شد. وزن نهایی اجزای باقیمانده (بزرگتر از دو میلی‌متر) پس از شستشو و خشک شدن در داخل آون، اندازه‌گیری شد و کل قطعات پارچه‌ای بزرگتر از دو میلی‌متر، به‌عنوان جزء فروپاشی نشده و موادی که از الک عبور کردند به‌عنوان مواد فروپاشی شده در نظر گرفته شدند. طبق معادله (۱) میزان فروپاشی نمونه ریون پس از ۶۰ روز، ۳۲٪ بود. همچنین میزان کاهش وزن ناشی از تبدیل مواد آلی توسط میکرو ارگانیسم‌ها، در انتهای آزمون طبق رابطه (۲)، حدود ۳۶٪ محاسبه شد. پس از گذشت ۴۸ ساعت از زمان آزمون جوانه‌زنی، ظرف‌های استریل از انکوباتور خارج شد و شمارش تعداد بذرهای جوانه زده انجام شد. با بررسی تمامی ظروف حاوی عصاره کمپوست، به‌طور متوسط در هر ظرف از بین ۱۲ بذراولیه، تعداد ۱۱ بذر جوانه زده و ظهور لپه در آن‌ها مشاهده شد.

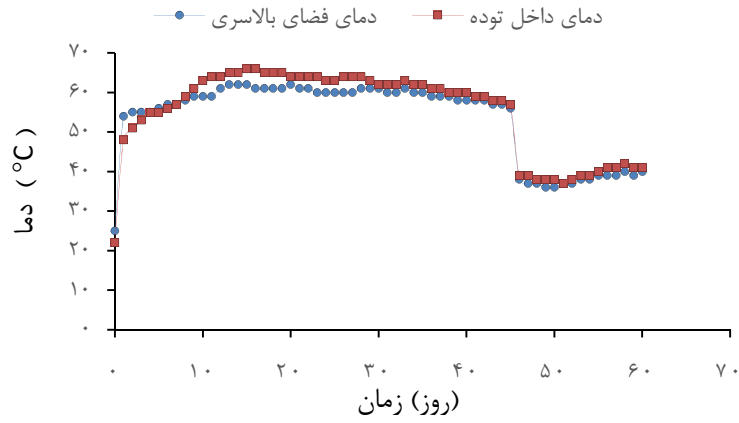
می‌باشد (Kopčić *et al.*, 2014; Kumar *et al.*, 2010; Hu *et al.*, 2009; Sundberg *et al.*, 2013). به منظور ارزیابی بالغ شدن کمپوست حاصل، آزمون سمیت گیاهی، روی بذر شاهی انجام گرفت. به این ترتیب که پس از تهیه سوسپانسیون آبی از کمپوست و آب مقطر با نسبت وزنی ۱ به ۱۰، این سوسپانسیون به مدت ۲۴ ساعت در تاریکی نگه داری شد و سپس به مدت ۲۰ دقیقه با سرعت ۲۰۰۰ rpm سانتریفیوژ شد و از کاغذ صافی ۰/۴۵  $\mu m$  (Whatman, England) عبور کرد. محلول استخراج شده از این روش (عصاره کمپوست)، برای انجام آزمون جوانه‌زنی مورد استفاده قرار گرفت. سه غلظت مختلف از عصاره کمپوست تهیه شد و سپس مقدار ۴ ml از هر عصاره، داخل ظرف‌های استریل<sup>۱</sup> و روی کاغذ صافی ریخته شد. در مرحله بعد ۱۲ بذر شاهی در هر یک از ظرف‌ها قرار گرفته و به مدت ۴۸ ساعت در داخل انکوباتور (در دمای ۲۵ درجه و تاریکی) نگه داری شد. آزمون جوانه‌زنی، برای آب مقطر نیز به‌عنوان نمونه شاهد انجام شد. این آزمون برای هر یک از نمونه‌ها، ۳ مرتبه تکرار شد (Sun *et al.*, 2016; Kumar *et al.*, 2010).

با شمارش تعداد بذرهای جوانه زده و اندازه‌گیری طول ریشه‌ها، می‌توان شاخص جوانه‌زنی<sup>۲</sup> (GI) را از طریق رابطه (۵) محاسبه کرد:

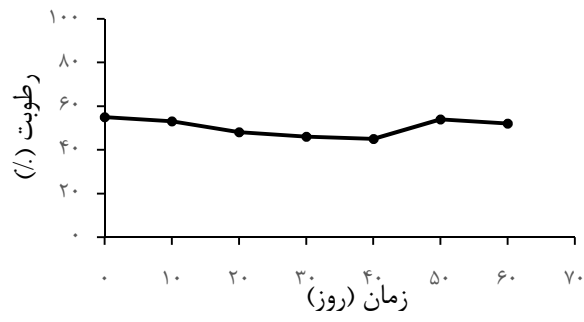
$$(۳) \quad (\%) \text{ جوانه زنی نسبی بذر} = \frac{\text{تعداد بذر های جوانه زده در عصاره ی کمپوست}}{\text{تعداد بذر های جوانه زده در نمونه ی شاهد}} \times 100$$

$$(۴) \quad (\%) \text{ رشد نسبی ریشه} = \frac{\text{متوسط طول ریشه در عصاره ی کمپوست}}{\sqrt{\text{متوسط طول ریشه در نمونه ی شاهد}}} \times 100$$

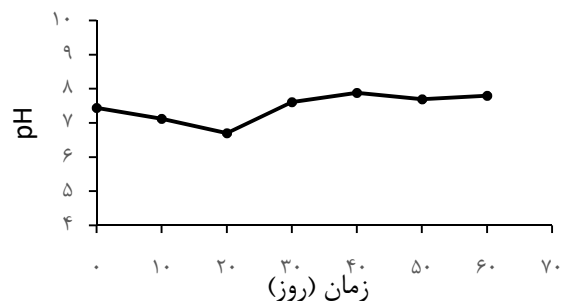
- 1-Sterile petri dish
- 2-Germination index



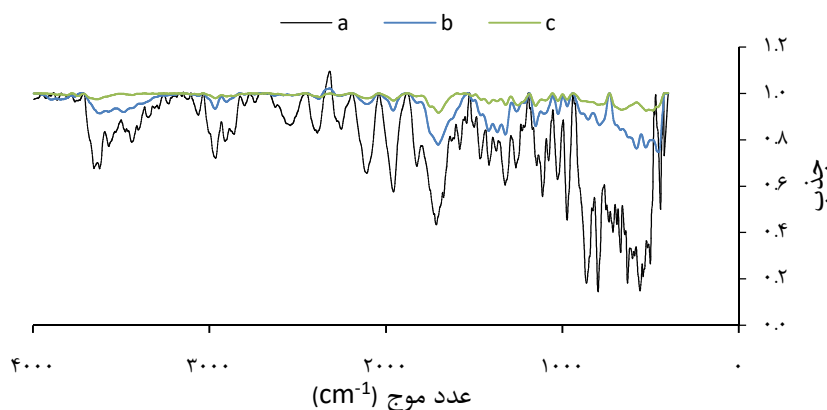
شکل ۲- نمودار تغییرات دمایی در طول تخریب پارچه ریون



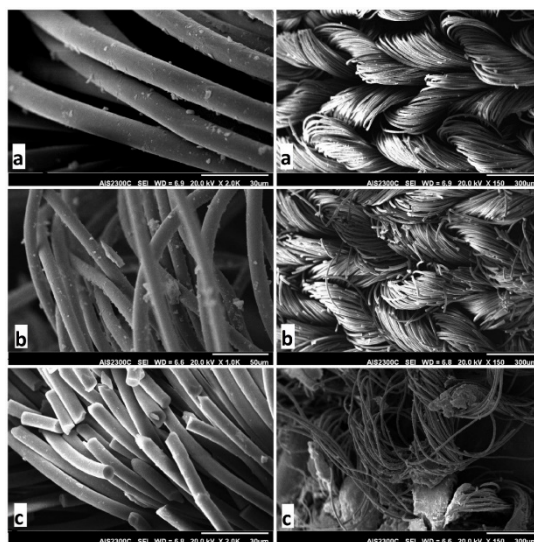
شکل ۳- نمودار تغییرات رطوبت توده در طول تخریب پارچه ریون



شکل ۴- نمودار تغییرات pH توده در طول تخریب پارچه ریون



شکل ۵- طیف FTIR نمونه ریون (a) قبل از آزمون، (b) پس از ۳۰ روز و (c) پس از ۶۰ روز



شکل ۶- تصویر SEM نمونه ریون (a) قبل از آزمون، (b) پس از ۳۰ روز و (c) پس از ۶۰ روز

Sun و همکاران (۲۰۱۶) نیز مشاهده شده است. با افزایش فعالیت میکروبی در فاز ترموفیل، در روز پانزدهم دمای داخل توده به ماکزیمم مقدار خود (۶۶ درجه) رسید و مواد به مدت دو روز در این دما باقی ماندند (در حالیکه دمای آون روی ۵۸ درجه تنظیم شده بود). در این زمان دمای فضای بالاسری نیز به واسطه انتقال حرارت، به ماکزیمم مقدار خود (۶۲ درجه) رسید. در روز هفدهم، دمای توده مواد به آرامی کاهش یافت و در نهایت در روز چهل و پنجم، به ۵۷ درجه رسید. در مرحله دوم فرآیند (دمای محیط اطراف راکتور روی ۳۵ درجه تنظیم شده بود)،

همچنین متوسط طول ریشه‌ها حدود ۱۵ میلی‌متر بوده است (در ظرف حاوی آب مقطر، همه ۱۲ بذر جوانه زده و متوسط طول ریشه‌ها حدود ۲۶ میلی‌متر بود). با توجه به معادلات (۳) تا (۵)، مقدار شاخص جوانه‌زنی (GI) کمپوست حاصل از نمونه ریون، ۸۵/۲۶٪ به دست آمد.

#### ۴. بحث و نتیجه گیری

افزایش دمای توده در روزهای ابتدایی، نشانگر افزایش فعالیت‌های میکروبی در داخل توده و تجزیه جامدات فرار نمونه می‌باشد. روندی مشابه در پژوهش



کل فرآیند رسید. این افزایش pH در فاز ترموفیل، می‌تواند ناشی از کاهش نیتروژن موجود در توده و تولید آمونیاک باشد (Kopčić *et al.*, 2014). همچنین در این مقطع زمانی، میزان رطوبت به کمترین مقدار خود (۴۵٪) در طول کل فرآیند رسید. در شروع مرحله دوم فرآیند (دمای  $35^{\circ}\text{C}$ ) با کاهش فعالیت میکروبی، مقدار رطوبت مقدراری افزایش یافت اما با فعال شدن میکرو ارگانیسم‌های مزوفیل، مجدداً رطوبت کم شد (رطوبت نمونه نهایی: ۵۲٪).

با توجه به طیف FTIR پارچه ریون قبل از شروع آزمون، پیک موجود در عدد موج  $3446\text{ cm}^{-1}$ ، نشانگر ارتعاشات کششی O-H می‌باشد. علاوه بر این، پیک‌های موجود در عدد موج‌های  $1028\text{ cm}^{-1}$  و  $866\text{ cm}^{-1}$  به ترتیب مربوط به ارتعاشات کششی C-O-C و C-C می‌باشند. همچنین ارتعاشات کششی C-O در استرها، در  $1128\text{ cm}^{-1}$  مشاهده می‌گردد. در عدد موج  $3330\text{ cm}^{-1}$  فرکانس‌های ارتعاشی گروه هیدروکسیل مشاهده می‌شود که پژوهش Pumure و همکاران (۲۰۱۵) نیز این موضوع را تایید می‌کند. علاوه بر این پیک موجود در عدد موج  $2958\text{ cm}^{-1}$  مربوط به کشش متقارن گروه‌های CH<sub>2</sub> است. این مشاهدات در پژوهش Khasbaatar و همکاران (۲۰۱۴) نیز وجود دارد.

طبق شکل ۵، پس از گذشت مدتی از فرآیند تجزیه زیستی (طیف FTIR پس از ۳۰ روز)، محدوده پیک مربوط به پیوند هیدروژنی OH کاهش یافته است. افزایش جذب نور در عدد موج‌های  $3446\text{ cm}^{-1}$  و  $866\text{ cm}^{-1}$  نشان‌دهنده تغییر در ارتعاشات کششی O-H و C-C می‌باشد. در پایان فرآیند (طیف پس از ۶۰ روز) در عدد موج  $1128\text{ cm}^{-1}$  تغییر گروه‌های C-

تا شروع فعالیت میکرو ارگانیسم‌ها، دمای توده مقدراری کاهش یافت اما پس از ۷ روز، افزایش دمای توده آغاز شد (تا ۴۲ درجه). کاهش دما در شروع این مرحله به علت غیرفعال شدن ترموفیل‌ها و افزایش دمای توده پس از مدتی، نشان‌دهنده فعال شدن مزوفیل‌ها می‌باشد.

در روزهای ابتدایی مرحله اول آزمایش (دمای آون ۵۸ درجه) با توجه به فعالیت میکروبی کمتر، درصد رطوبت تغییر چشم‌گیری نداشت اما در ادامه با افزایش فعالیت میکرو ارگانیسم‌های ترموفیل و افزایش دمای توده، درصد رطوبت توده کاهش پیدا کرد. این روند کاهش رطوبت در تحقیق Gigliotti و همکاران (۲۰۱۲) نیز مشاهده شد. در ابتدای فرآیند با توجه به اینکه برخی اجزای آلی راحت‌تر و سریع‌تر تخریب می‌شوند، مقدار pH نسبت به مقدار اولیه (۷/۴۴) اندکی کاهش یافت. این کاهش pH می‌تواند ناشی از تشکیل اسیدهای آلی باشد. پژوهش‌های Kopčić و همکاران (۲۰۱۴)، Kumar و همکاران (۲۰۱۰) نیز این واقعیت را تایید می‌کند. روند کاهش pH ادامه پیدا کرد به طوری که در نمونه برداری روز بیستم، مقدار pH به ۶/۷ رسید. طبق استاندارد ۱۷۱۸۹ سازمان ملی استاندارد (۱۳۹۲)، مقادیر pH کمتر از  $7 \pm 0.2$  به سبب اسیدی شدن کمپوست و تجزیه سریع نمونه‌های تخریب‌پذیر، از تخریب زیستی جلوگیری می‌کند. در این زمان برای ممانعت از اسیدی شدن، مقدراری کمپوست بالغ به توده مواد افزوده شد تا مقدار pH تعدیل شود. افزودن کمپوست برای تنظیم pH در پژوهش Sundberg و همکاران (۲۰۱۶) نیز انجام شد. در نمونه برداری‌های بعدی مقدار pH افزایش یافت به طوری که در نمونه روز چهارم، مقدار pH به ماکزیمم خود (۷/۸۸) در طول

طبق پژوهش‌های Zucconi و همکاران (۱۹۸۱)، مقدار GI بالاتر از ۵۰٪ نشان‌دهنده بالغ بودن کمپوست است. بنابراین درجه بالغ‌شدن کمپوست حاصل، طبق این معیار در سطح قابل‌قبولی می‌باشد. خلاصه نتایج به دست آمده از پژوهش حاضر به شرح زیر می‌باشد:

در طول فرآیند تجزیه پارچه ریون، ماکزیمم دمای توده با توجه به فعالیت میکرو ارگانیسم‌های ترموفیل به ۶۶ درجه رسید. با توجه به طیف FTIR نمونه ریون، تغییر در پیوند هیدروژنی OH در زنجیره‌های سلولزی، تغییر گروه‌های C-O استری و تغییر شکل گروه‌های C-H، C-OC، C-C-O و C-C-H در پایان فرآیند مشاهده شد. تصویر SEM نمونه پس از پایان فرآیند، نشان داد در پایان آزمون بخشی از ساختار میله‌ای الیاف ریون تخریب و از هم جدا شدند. بررسی کاهش وزنی ناشی از تبدیل مواد آلی در انتهای آزمون نشان داد که پارچه ریون با توجه به ۳۶٪ کاهش وزن، دارای حداقل قابلیت فروپاشی تحت شرایط کمپوست‌سازی می‌باشد. همچنین شاخص جوانه‌زنی (GI) کمپوست حاصل از نمونه ریون (۸۵/۲۶٪) نشان داد که بر اساس این معیار، کمپوست حاصل از نظر بالغ‌شدن در سطح قابل‌قبولی است اما تهیه کمپوست از پسماندهای این نوع پارچه، نیاز به بررسی‌های بیشتری دارد.

O استری و در عدد موج  $1375\text{ cm}^{-1}$  تغییر شکل گروه C-H مشاهده می‌شود. همچنین تغییر شکل گروه‌های C-OC، C-C-O و C-C-H در عدد موج  $900\text{ cm}^{-1}$  مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده تخریب نمونه ریون می‌باشند.

با توجه به تصویر SEM پارچه ریون پیش از انجام فرآیند، الیاف ریون دارای ساختار میله‌ای مانند و سطح تا حدودی دندان‌دار می‌باشند. تصویر SEM نمونه پس از گذشت ۳۰ روز از فرآیند مشخص می‌کند که سطح الیاف ریون دندان‌دار تر شده و برخی نقاط آن تا حدودی تخریب شده‌اند اما این تخریب جزئی با چشم غیر مسلح قابل تشخیص نیست. این امر می‌تواند ناشی از جرم در واحد سطح بالا و قطر بالای الیاف ریون باشد که تا حدودی مانع از حمله میکرو ارگانیسم‌ها به این الیاف می‌شوند. تصویر SEM نمونه پس از پایان فرآیند، نشان می‌دهد بخش بیشتری از الیاف ریون تخریب شده و ساختار میله‌ای آن از هم جدا شده‌اند. در این زمان تخریب ساختار پارچه ریون با چشم غیر مسلح نیز قابل مشاهده بود. با توجه به اینکه درصد کاهش وزن بیشتر از ۳۰٪ می‌باشد، طبق استاندارد ۱۷۸۲۸ سازمان ملی استاندارد ایران (۱۳۹۳)، پارچه ریون قابلیت تجزیه در شرایط کمپوست‌سازی را دارا می‌باشد.

soy based greencomposites. Carbohydrate polymers, 88(1), 329-335.

Bhat, G., Parikh, D., 2010. Biodegradable materials for nonwovens. Applications of nonwovens in technical textiles, 46-61.

Desai, A. J., Pandey, S. N., 1971. Microbial degradation of cellulosic textiles. J Sci Indus Res, 30, 598-606.

## References:

Arshad, K., Skrifvars, M., Vivod, V., Valh, J., Voncina, B., 2014. Biodegradation of natural textile materials in soil. Tekstilec, 57(2), 118-132.

Behera, A. K., Avancha, S., Basak, R. K., Sen, R., Adhikari, B., 2012. Fabrication and characterizations of biodegradable jute reinforced

- EN 14806., 2005. Packaging- Preliminary evaluation of the disintegration of packaging materials under simulated composting conditions in a laboratory scale test. BSI.
- Gigliotti, G., Proietti, P., Said-Pullicino, D., Nasini, L., Pezzolla, D., Rosati, L., Porceddu, P. R., 2012. Co-composting of olive husks with high moisture contents: organic matter dynamics and compost quality. *International biodeterioration & biodegradation*, 67, 8-14.
- Hassanvand, M. S., Nabizadeh, R., & Heidari, M., 2008. Municipal solid waste analysis in Iran. *Iranian Journal of Health and Environment*, 1(1), 9-18.
- Hu, Z., Lane, R., Wen, Z., 2009. Composting clam processing wastes in a laboratory-and pilot-scale in-vessel system. *Waste Management*, 29(1), 180-185.
- INSO 17189., 2014. Packaging- Evaluation of the ultimate aerobic biodegradability and disintegration of packaging materials under controlled composting conditions- Method by analysis of released carbon dioxide. (in Persian)
- INSO 17189., 2014. Packaging- Preliminary evaluation of the disintegration of packaging materials under simulated composting conditions in a laboratory scale test. (in Persian)
- Khasbaatar, D., Choi, U. S., 2014. Fourier Transform Infrared Spectroscopy Study on Cation adsorption on Viscose Rayon Succinate. *Mongolian Journal of Chemistry*, 12, 136-141.
- Klemenčič, D., Simončič, B., Tomšič, B., Orel, B., 2010. Biodegradation of silver functionalised cellulose fibres. *Carbohydrate polymers*, 80(2), 426-435.
- Kopčić, N., Domanovac, M. V., Kučić, D., Briški, F., 2014. Evaluation of laboratory-scale in-vessel co-composting of tobacco and apple waste. *Waste management*, 34(2), 323-328.
- Kumar, M., Ou, Y. L., Lin, J. G., 2010. Co-composting of green waste and food waste at low C/N ratio. *Waste Management*, 30(4), 602-609.
- Li, L., Frey, M., Browning, K. J., 2010. Biodegradability Study on Cotton and Polyester Fabrics. *Journal of Engineered Fabrics & Fibers (JEFF)*, 5(4).
- Mohanty, A. K., Khan, M. A., Hinrichsen, G., 2000. Surface modification of jute and its influence on performance of biodegradable jute-fabric/Biopol composites. *Composites Science and Technology*, 60(7), 1115-1124.
- Park, C. H., Kang, Y. K., Im, S. S., 2004. Biodegradability of cellulose fabrics. *Journal of Applied Polymer Science*, 94(1), 248-253.
- Pumure, I., Ford, S., Shannon, J., Kohen, C., Mulcahy, A., Frank, K., Chaukura, N., 2015. Analysis of ATR-FTIR Absorption-Reflection Data from 13 Polymeric Fabric Materials Using Chemometrics. *American Journal of Analytical Chemistry*, 6(04), 305.
- Salerno-Kochan, R., Szostak-Kotowa, J., 2001. Biodegradation of cellulose textiles. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 9(3), 69-72.
- Sun, Z. Y., Zhang, J., Zhong, X. Z., Tan, L., Tang, Y. Q., Kida, K., 2016. Production of nitrate-rich compost from the solid fraction of dairy manure by a lab-scale composting system. *Waste Management*, 51, 55-64.
- Sundberg, C., Yu, D., Franke-Whittle, I., Kauppi, S., Smårs, S., Insam, H., Jönsson, H., 2013. Effects of pH and microbial composition on odour in food waste composting. *Waste Management*, 33(1), 204-211.
- Tomšič, B., Simončič, B., Orel, B., Vilčnik, A., Spreizer, H., 2007. Biodegradability of cellulose fabric modified by imidazolidinone. *Carbohydrate polymers*, 69(3), 478-488.
- Vakili, M., Rafatullah, M., Ibrahim, M. H., Salamatinia, B., Gholami, Z., Zwain, H. M., 2015. A review on composting of oil

palmbiomass. Environment, development and sustainability, 17(4), 691-709.

Vroman, I., Tighzert, L., 2009. Biodegradable polymers. Materials, 2(2), 307-344.

Warnock, M., Davis, K., Wolf, D., Gbur, E., 2009. Biodegradation of three cellulosic

fabrics in soil. Summ Ark Cotton Res, 208-211.

Zucconi, F., Pera, A., Forte, M., De Bertoldi, M. A. R. C., 1981. Evaluating toxicity of immature compost. BioCycle (USA), 22, 54-57.