

اصلاح سطح الیاف پلی پروپیلن با استفاده از تابش پرتوهای ریزموج و فرابنفش

Microwave and UV-Assisted Surface Modification of Polypropylene Fibers

الهام سادات جمدی، اکبر خدای، زهرا صدرارحامی*

اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی نساجی، صندوق پستی ۸۴۱۵۶-۸۳۱۱۱

تاریخ دریافت: ۹۱/۰۹/۰۶ تاریخ پذیرش: ۹۱/۱۲/۰۶

چکیده

پلی پروپیلن به دلیل داشتن ماهیت غیرقطبی از نظر کاربردهای ویژه‌ای که متأثر از خواص سطح الیاف است، محدودیت دارد. امروزه اصلاح سطح الیاف پلی پروپیلن به دلیل معایبی همچون جذب رطوبت کم و مشکل الکتریسیته ساکن به یکی از موضوعات مورد توجه پژوهشگران تبدیل شده است. در این طرح، به منظور اصلاح سطح الیاف پلی پروپیلن از عملیات اکسایش سطح با استفاده از هیدروژن پراکسید - تابش پرتوهای فرابنفش و ریزموج، به عنوان روش‌هایی با مصرف آب کمتر استفاده شده است. بدین منظور، نمونه‌ها در شرایط مختلف عمل‌آوری شده و آثار آزمون‌ها بر نمونه‌ها با اندازه‌گیری مقدار جذب رطوبت، استحکام، خواص ضدالکتریسته و طیف‌سنجی، ارزیابی شد. نتایج مشخص کرد، در همه نمونه‌های عمل‌آوری شده جذب رطوبت افزایش یافته و با کاهش استحکام جزئی و در حد قابل قبول خواص ضدالکتریسته بهبود یافته است. همچنین، طیف‌های ATR بیانگر تغییرات شیمیایی و ایجاد گروه‌های عاملی مثل کربونیل و وینیل در سطح الیاف است. در مجموع نتایج نشان می‌دهد، با استفاده از این روش‌های نوین امکان اصلاح سطح همراه با صرفه‌جویی در زمان و انرژی و همچنین کاهش آلودگی به دلیل مصرف غلظت‌های کمتری از اکسنده قابل دستیابی بوده که این موارد از اولویت‌های صنعت نساجی است.

مقدمه

که باعث ایجاد سطحی قطبی‌تر می‌شود، خواصی همچون جذب رطوبت، قابلیت رنگرزی و چاپ‌پذیری را بهبود می‌بخشد [۱-۳].

اصلاح شیمیایی سطوح پلی پروپیلن با روش‌های متنوع می‌تواند انجام شود. عمل‌آوری با پلاسما، عمل‌آوری یونی، استفاده از نور و تابش، اکسایش کنترل شده، بمباران الکترونی، استفاده از سازگارکننده‌ها یا مخلوط کردن، عمل‌آوری با شعله، عملیات تخلیه کرونا و عملیات پیوند زدن از آن جمله است [۴،۵].

یکی از فرایندهای تخریب کنترل شده سطح الیاف پلی پروپیلن استفاده از پلاسمای سرد روی این الیاف است. اثر کلی پلاسمای سرد شکستن درشت‌مولکول‌ها و اکسایش در سطح الیاف است. فرایند اکسایش سطح در

شیمی سطح و ساختار پلیمرها نقش مهمی را در تعیین خواص فیزیکی و کاربرد نهایی پلیمر ایفا می‌کند. کاربرد پلیمرها در بعضی موارد با وجود خواص مطلوب پلیمر به دلیل ویژگی‌های سطح آنها، در مصارف مهندسی و زیست‌فناوری محدود شده است. از جمله این پلیمرها پلی‌اولفین‌ها هستند که مقاومت شیمیایی زیاد دارند، ولی به دلیل انرژی سطحی کم، کاربردهای آنها با مشکلاتی روبه‌رو است. به همین دلیل اصلاح سطح پلی‌اولفین‌ها یکی از نیازهای بزرگ علمی و صنعتی به‌شمار می‌رود. پلی پروپیلن آبریز و از نظر شیمیایی خنثی است، انرژی سطح کم دارد و خواص چسبندگی ضعیفی نشان می‌دهد. بنابراین روش‌های اصلاح سطح

کلمات کلیدی

پلی پروپیلن،
اکسایش سطح،
هیدروژن پراکسید،
تابش ریزموج،
تابش فرابنفش،
خواص ضدالکتریسته

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار: z.sadrearhami@tx.iut.ac.ir

جدول ۱- مشخصات پارچه استفاده شده.

نمره نخ (tex)	وزن (g/m ²)	WPC	CPC
۲۴	۲۸۸	۱۳	۱۳

Wales per cm و Course per cm .

به عنوان اکسند و آغازگر نورشیمیایی هنگام تابش، سدیم کربنات و شوینده غیر یونی برای شست و شوی پارچه، سدیم سیلیکات به عنوان فعال کننده، پایدارکننده و بافرکننده برای کنترل تجزیه هیدروژن پراکسید و سدیم هیدروکسید برای تنظیم pH است.

دستگاه‌ها

در این پژوهش، دستگاه تابش ریزموج Panasonic (Sanio) با حداکثر توان ۶۰۰ W، دستگاه تابش امواج UV و استفاده از لامپ Primarc M.P.M.A با توان خروجی ۵۷۵ W [۱۱]، دستگاه اندازه‌گیری استحکام Zwick Universal Tester SDL-1446-60 ساخت آلمان، ماشین پد Mathis ساخت سوئیس، ترازوی Sartorius با دقت ۰/۰۱، دستگاه اندازه‌گیری وزن در متر مربع پارچه Square Meter Balance به روش مستقیم، دستگاه استاتیک ولت‌سنج R-4021 ساخت شرکت Rothschild و دستگاه اندازه‌گیری ATR از شرکت Hartmann & Braun، BOMEM به کار گرفته شد.

روش‌ها

ابتدا برای حذف موادی که سبب بروز مشکلاتی در فرایند اصلاح سطح نمونه می‌شود، نمونه‌ها با شوینده غیر یونی و سدیم کربنات به مدت ۳۰ min در دمای ۴۰°C شسته شدند. سپس، در محلول هیدروژن پراکسید با غلظت‌های متغیر در دمای محیط و سدیم سیلیکات قرار گرفتند و پس از تنظیم pH = ۱۱ با سدیم هیدروکسید با پیک آپ ۱۰۰٪ پد شدند. نمونه‌های پد شده بلافاصله در معرض تابش پرتوهای فرابنفش یا ریزموج به مدت ۲ و ۴ min قرار داده شده و سپس شست و شو شدند. عملیات پد کردن مطابق با جدول ۲ انجام شد.

اندازه‌گیری خواص منسوج

برای اندازه‌گیری مقدار جذب رطوبت، نمونه‌ها یک بار در حالت خشک و یک بار در حالتی که در شرایط استاندارد به تعادل رسیده بودند، توزین شدند. برای اندازه‌گیری وزن مرطوب، نمونه‌ها به مدت ۲۴ h در اتاق شرایط قرار گرفتند (رطوبت نسبی ۶۵٪ و دمای ۲۰°C). اندازه‌گیری استحکام نمونه‌ها مطابق روش استاندارد ASTM D 5035-95 انجام شد. بدین ترتیب که از هر پارچه عمل‌آوری شده، به تعداد ۵ نمونه

جدول ۲- عملیات پد کردن با هیدروژن پراکسید.

مقدار برداشت (%)	pH	سدیم سیلیکات (g/L)	هیدروژن پراکسید ۳۰٪
۱۰۰	۱۱	۴	۲٪
۱۰۰	۱۱	۴	۴٪

عمق میکرونی از سطح الیاف انجام می‌شود که تشکیل رادیکال‌های آزاد را به همراه دارد و در نهایت منجر به بهبود خواص جذب آب و رطوبت الیاف می‌شود [۶،۷].

Nie و همکاران در سال ۱۹۹۹، پلی پروپیلن را در معرض اوزون و تابش پرتوهای فرابنفش اصلاح کردند. قراردادن پلی پروپیلن در این شرایط، روشی ساده و کارآمد اصلاح سطح برای بهبود خواص رطوبت‌پذیری و چسبندگی معرفی شد. در اثر این عمل‌آوری انرژی سطحی افزایش می‌یابد. علت افزایش انرژی سطحی این است که پیوندهای مولکولی در سطح پلی پروپیلن، در اثر این عمل‌آوری شکسته می‌شود و گروه‌های قطبی اکسیژن روی سطح ایجاد می‌شوند [۸].

برای اینکه یک واکنش نورشیمیایی انجام شود، مولکول‌های ماده مدنظر باید بتوانند نور جذب کنند. پلی پروپیلن فاقد این گروه‌هاست. به همین دلیل نیاز به یک آغازگر نورشیمیایی یا یک عامل حساس به UV است. چنین آغازگری باید بی‌بو، غیرسمی و ارزان قیمت باشد، همچنین به راحتی با شست و شو از بین برود. این مشخصه‌ها، بسیاری از آغازگرهای متداول را از رده خارج می‌کند. هیدروژن پراکسید با قابلیت جذب UV در طول موج‌های کمتر از ۳۰۰ nm، رادیکال‌های بسیار فعال هیدروکسیل تولید می‌کند. مزیت کاربرد UV/H₂O₂ این است که اکسایش به‌طور کامل و مؤثر انجام می‌شود [۹-۱۱].

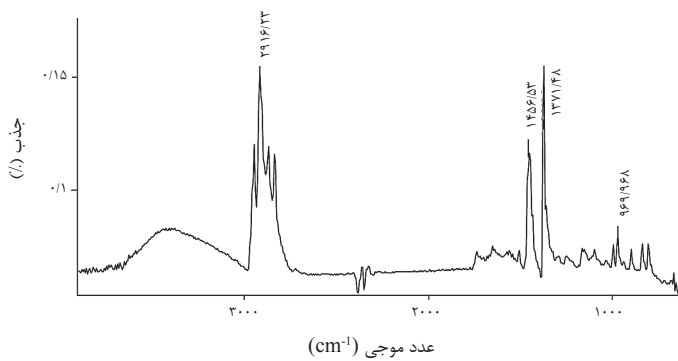
استفاده از امواج ریزموج هم روشی ساده، مناسب و نسبتاً کم هزینه است که به دلیل سرعت عمل بسیار زیاد این روش، صرفه‌جویی در زمان را نیز به دنبال دارد. همچنین، این روش به دلیل مصرف غلظت‌های کمی از مواد شیمیایی آلودگی کمتری نسبت به روش‌های قدیمی دارد. به دلیل معایب پلی پروپیلن مانند جذب رطوبت کم و مشکل وجود الکتریسیته ساکن، اصلاح و بهبود خواص پلی پروپیلن همواره از مباحث مطرح و مهم در سال‌های اخیر به شمار می‌رود [۱۶-۱۲].

در سال‌های گذشته اثر تابش ریزموج در مجاورت اکسند پتاسیم پرمنگنات روی خواص الیاف پلی پروپیلن بررسی شده است [۱۲]. ولی، تاکنون از مواد دیگری غیر از ماده ذکر شده استفاده نشده است. افزون بر این، سوبستراهای استفاده شده معمولاً الیاف، غشاها و سایر مواد غیرنساجی بوده‌اند. با توجه به مزیت‌های گفته شده برای سامانه‌های UV/H₂O₂ و microwave/H₂O₂ و همچنین کاهش مصرف آب که سبب کاهش هزینه‌ها و معرفی روشی دوست‌دار محیط زیست می‌شود، در این طرح به منظور اصلاح سطح الیاف پلی پروپیلن عملیات اکسایش سطح به کمک هیدروژن پراکسید و تابش پرتوهای فرابنفش و ریزموج، به کار گرفته شده و اثر عوامل مختلف بررسی شده است.

تجربی

مواد

منسوج به کار رفته در این پژوهش پارچه ۱۰۰٪ پلی پروپیلنی بوده که مشخصات آن در جدول ۱ آمده است. تمام مواد به کار رفته از درجه تجزیه‌ای و ساخت شرکت Merck شامل هیدروژن پراکسید (۳۵٪)



شکل ۱- طیف ATR نمونه شاهد.

پلی پروپیلن، مقدار جذب رطوبت نمونه‌ها پیش و پس از انجام آزمون اندازه‌گیری شده و نتایج در جدول ۳ بیان شده است. نمونه اولیه پلی پروپیلن بدون هیچ اصلاحی، دارای ۰/۰۲٪ رطوبت بازیافته است. مقدار جذب رطوبت نمونه‌های عمل‌آوری شده با تابش ریزموج بین ۰/۱۳٪ تا ۰/۵۶٪ به دست آمد که در مقایسه با نمونه شاهد (۰/۰۲٪)، می‌توان گفت مقدار جذب رطوبت به طور میانگین در نمونه‌های عمل‌آوری شده در حدود ۱۸ برابر نسبت به نمونه شاهد افزایش داشته است و در نمونه‌های پرتودهی شده با فرابنفش نسبت به نمونه شاهد جذب رطوبت تا ۰/۶۶٪ افزایش داشته‌اند که نسبت به نمونه شاهد افزایش جذب رطوبت قابل بوده است. این اثر با نتایج کارهای انجام شده پیشین هماهنگی دارد [۶،۷]. در مقایسه داده‌های دو روش، می‌توان گفت مقدار رطوبت بازیافته در نمونه‌های پرتودهی شده با فرابنفش در مقایسه با ریزموج بیشتر است. اما کاهش رطوبت بازیافتی نمونه‌های در معرض تابش ریزموج با دو برابر شدن غلظت هیدروژن پراکسید نشانگر تغییرات دیگری در سطح نمونه‌هاست که نیاز به پژوهش بیشتر دارد. اما، این پدیده می‌تواند ناشی از کندوپاش سطح و جدا شدن زنجیرهای پلیمری اصلاح شده باشد. بنابراین، استفاده از روش‌های شناسایی سطح مانند XPS و TOF-SSIMS که امکان پروفایل عمق را فراهم می‌سازد، ضروری به نظر می‌رسد.

نتایج خواص ضدالکتریسته نمونه‌ها

الیاف پلی پروپیلن به دلیل جذب رطوبت نسبی بسیار کم، الکتریسیته ساکن ایجاد کرده و آن را در خود حفظ می‌کنند. با اصلاح سطح الیاف پلی پروپیلن، می‌توان جذب رطوبت را افزایش داده و موجب عبور راحت‌تر جریان الکتریسیته از آن شد. نتایج آزمون نمونه‌ها از میانگین سه نمونه برای هر حالت در جدول ۴ ارائه شده است. مقاومت نمونه شاهد در برابر عبور جریان الکتریسیته ۱۳/۱±۰/۱ است.

نتایج آزمون ضدالکتریسته نمونه‌ها که میانگین مقاومت پارچه را در برابر عبور جریان الکتریسیته نشان می‌دهد، کاهش مقاومت پارچه را از ۱۳/۱ تا حدوداً ۱۲/۵ نشان داد. به طور کلی اگر اعداد بین ۱۲ تا ۱۳ باشد، برای پارچه پلی پروپیلن مطلوب است و این موضوع نشان می‌دهد، الکتریسیته ساکن کمتری در پارچه ایجاد می‌شود. به عبارت دیگر، در اثر اصلاح سطح الیاف، کالا از محافظت ضعیف به

جدول ۳- نتایج درصد رطوبت بازیافته نمونه‌ها.

تابش فرابنفش (%)	تابش ریزموج (%)	زمان پرتودهی H ₂ O ₂
۰/۳۶ ± ۰/۰۲	۰/۲۹ ± ۰/۰۲	۲ min - ۲٪
۰/۶۶ ± ۰/۰۱	۰/۵۹ ± ۰/۰۳	۴ min - ۲٪
۰/۴۷ ± ۰/۰۲	۰/۱۳ ± ۰/۰۳	۲ min - ۴٪
۰/۶۹ ± ۰/۰۱	۰/۳۶ ± ۰/۰۲	۴ min - ۴٪

به ابعاد ۲۰×۲/۵ cm² تهیه شد و به کمک دستگاه استحکام‌سنج Zwick آزمون انجام شد. فاصله بین دو فک ۱۵ cm و سرعت حرکت فک‌ها ۲۰۰ mm/min بود. خواص ضدالکتریسته نمونه‌ها طبق روش استاندارد AATCC 76-1995 اندازه‌گیری شد. بدین ترتیب که ابتدا از هر پارچه عمل‌آوری شده، به تعداد ۳ نمونه به ابعاد ۱×۱ cm² تهیه شد. سپس، همه نمونه‌های تهیه شده به مدت ۲۴ h در اتاق شرایط با رطوبت نسبی ۶۵٪ و دمای ۲۰°C قرار گرفتند و در همان شرایط با استفاده از دستگاه استاتیک ولت‌سنج مدت زمان مقاومت پارچه در برابر عبور جریان اندازه‌گیری شد. سپس، مقاومت سطح (برحسب اهم، R_s) نمونه‌ها مطابق معادله (۱) محاسبه شد:

$$R_s = \text{Log}(t \times 10^{11}) \quad (1)$$

در این معادله t زمان اندازه‌گیری شده بر حسب ثانیه است. طیف‌گیری ATR نیز در محدوده ۴۰۰۰-۶۰۰ cm⁻¹ برای ۸ نمونه انجام شد. پیش از گرفتن طیف هر نمونه باید یک زمینه (Back ground) گرفته شود تا جذب مولکول‌های هوا و هر چیز دیگر که ممکن است، خطا ایجاد کند، از نمونه اصلی حذف شود.

نتایج و بحث

نتایج جذب رطوبت نمونه‌ها

الیاف پلی پروپیلن جذب رطوبت ناچیزی دارند، با اصلاح سطح این الیاف می‌توان تا حدودی جذب رطوبت را در این نوع الیاف افزایش داد. برای بررسی اثر آزمون‌های انجام شده روی سطح الیاف

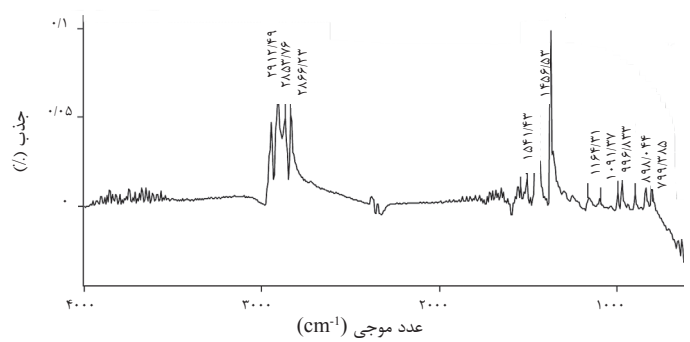
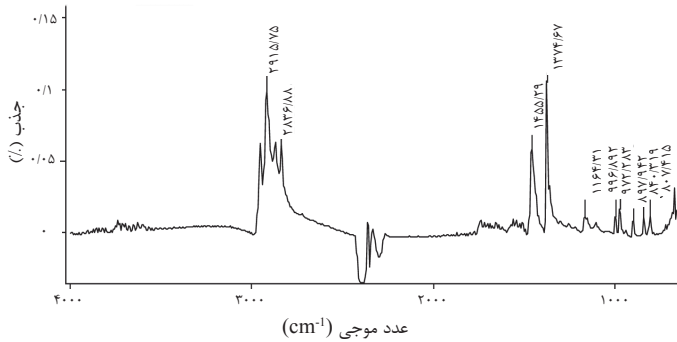
جدول ۴- نتایج آزمون خواص ضدالکتریسته.

تابش فرابنفش	تابش ریزموج	زمان پرتودهی H ₂ O ₂
۱۲/۵ ± ۰/۴	۱۲/۶ ± ۰/۲	۲ min - ۲٪
۱۲/۵ ± ۰/۵	۱۲/۶ ± ۰/۱	۴ min - ۲٪
۱۲/۵ ± ۰/۴	۱۲/۵ ± ۰/۳	۲ min - ۴٪
۱۲/۵ ± ۰/۱	۱۲/۵ ± ۰/۱	۴ min - ۴٪

نتایج آزمون ATR نمونه‌ها

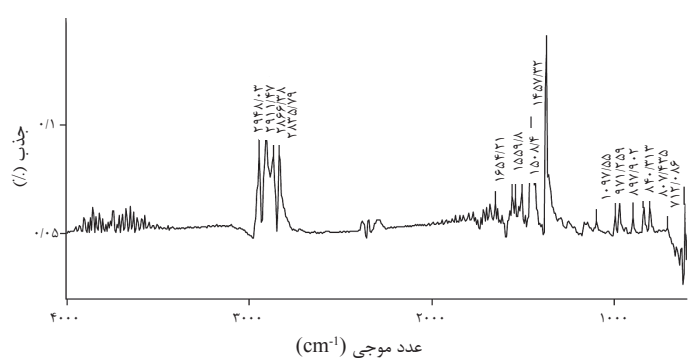
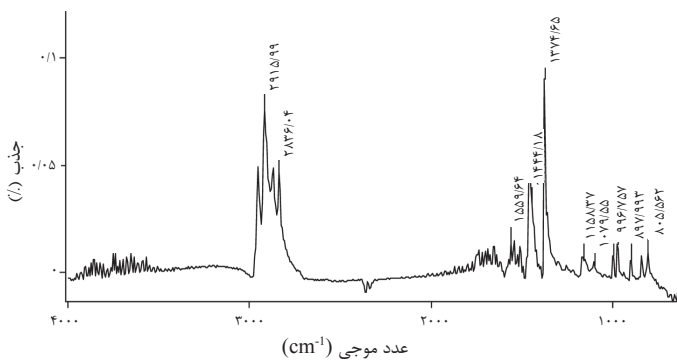
از آنجا که تغییرات به وجود آمده در مقدار جذب رطوبت و بهبود خواص ضدالکتریسته می‌تواند متأثر از ایجاد گروه‌های عاملی در سطح

محافظت متوسط رسیده و تغییرات انجام شده سبب بهبود خواص ضدالکتریسته به شکل معنی‌دار از لحاظ آماری شده است. در دو روش پرتودهی نتایج مشابهی به دست آمد.



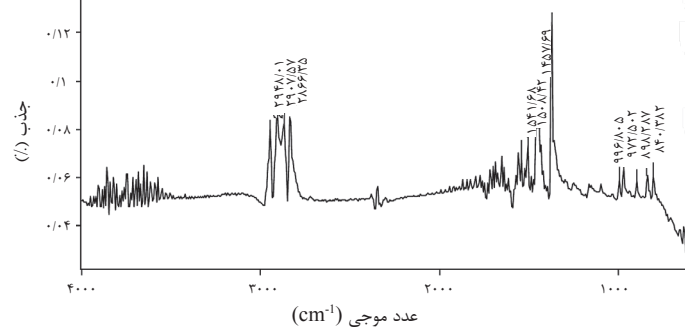
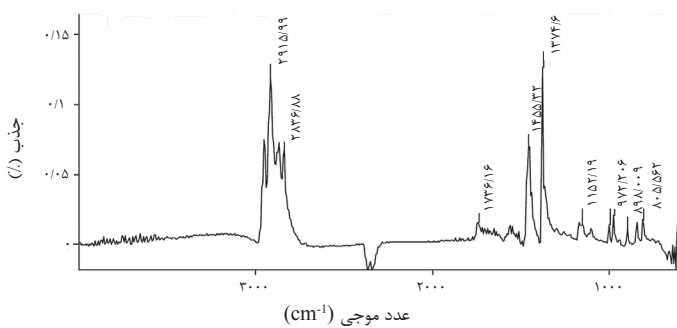
شکل ۶- طیف ATR نمونه عمل‌آوری شده با ۲٪ هیدروژن پراکسید و ۲ min تابش ریزموج.

شکل ۲- طیف ATR نمونه اصلاح شده (۲٪ هیدروژن پراکسید و ۲ min تابش UV).



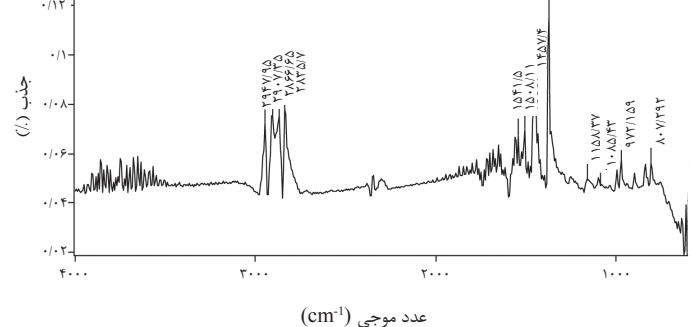
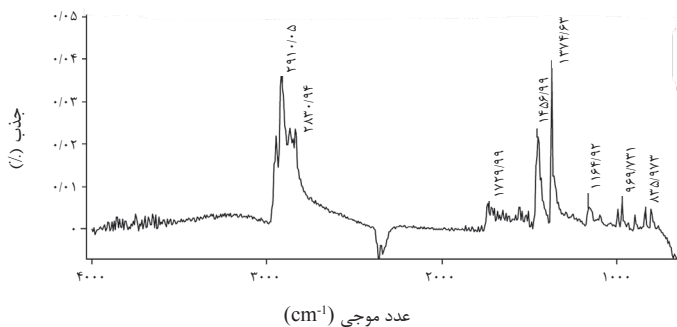
شکل ۷- طیف ATR نمونه عمل‌آوری شده با ۲٪ هیدروژن پراکسید و ۴ min تابش ریزموج.

شکل ۳- طیف ATR نمونه اصلاح شده (۲٪ هیدروژن پراکسید و ۴ min تابش UV).



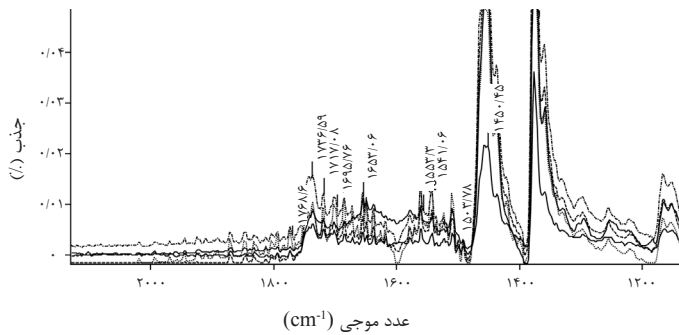
شکل ۸- طیف ATR نمونه عمل‌آوری شده با ۴٪ هیدروژن پراکسید و ۲ min تابش ریزموج.

شکل ۴- طیف ATR نمونه اصلاح شده (۴٪ هیدروژن پراکسید و ۲ min تابش UV).

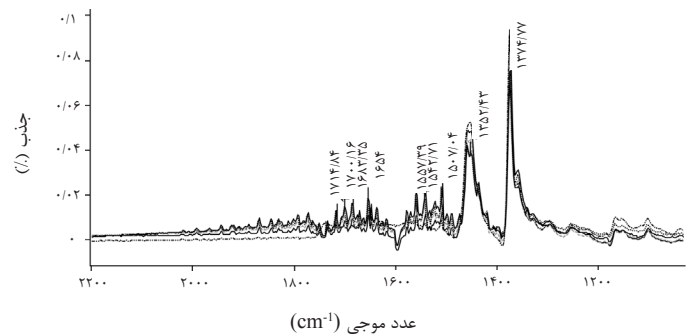


شکل ۹- طیف ATR نمونه عمل‌آوری شده با ۴٪ هیدروژن پراکسید و ۴ min تابش ریزموج.

شکل ۵- طیف ATR نمونه اصلاح شده (۴٪ هیدروژن پراکسید و ۴ min تابش UV).



شکل ۱۱- مقایسه طیف ATR نمونه شاهد و سایر نمونه‌های عمل‌آوری شده با هیدروژن پراکسید و تابش ریزموج: (-) شاهد، (- -) ۲٪ هیدروژن پراکسید و ۲ min تابش، (---) ۲٪ هیدروژن پراکسید و ۴ min تابش، (---) ۴٪ هیدروژن پراکسید و ۲ min تابش و (---) ۴٪ هیدروژن پراکسید و ۴ min تابش.



شکل ۱۰- طیف ATR نمونه‌های اصلاح شده با UV/H₂O₂: (---) نمونه شاهد، (-) ۲٪ هیدروژن پراکسید و ۲ min تابش، (- -) ۲٪ هیدروژن پراکسید و ۴ min تابش، (---) ۴٪ هیدروژن پراکسید و ۲ min تابش، (---) ۴٪ هیدروژن پراکسید و ۴ min تابش.

حدود ۶٪ است و این مقدار در نمونه‌های پرتوده‌ای شده با فرایندش نسبت به نمونه شاهد حدود ۱/۹٪ است. نتایج اندازه‌گیری استحکام نمونه‌ها نشان داد، عملاً تغییرات به وجود آمده در الیاف، محدود به سطح نمونه‌ها بوده و توده الیاف بدون تغییر باقی مانده‌اند. در نتیجه، تغییرات استحکام نمونه‌ها عملاً ناچیز است.

نتیجه‌گیری

با بررسی اثر اصلاح سطح الیاف به وسیله ATR مشخص شد، گروه‌های عاملی مانند گروه کربونیل و وینیل روی سطح الیاف بر اثر اکسایش به وجود آمده است. ظهور گروه‌های عاملی جذب رطوبت را افزایش داده و خواص ضدالکتریسته را به گونه‌ای اصلاح می‌کند که الیاف از سطح محافظت ضعیف به محدوده محافظت ضدالکتریسته متوسط می‌رسند. نتایج آزمون استحکام نشان‌دهنده این موضوع است که کاهش استحکام نمونه‌های عمل‌آوری شده در محدوده قابل قبول و کمتر از ۱۰٪ است. نتایج آزمون جذب رطوبت نشان‌دهنده افزایش جذب رطوبت در همه نمونه‌های عمل‌آوری شده است. در نتیجه مشخص می‌شود، به کمک روش تابش پیشنهادی می‌توان خواص الیاف پلی پروپیلن را به شکل دائم بهبود بخشید.

مراجع

- Öztürk G.P., Selected Methods of Surface Engineering Applied to Materials Science, Sabancı University, 2004.
- Paul S.H., Verenich S., and Pourdeyhimi B., Blending polypropylene with glycidyl methacrylate-containing polymer to improve adhesion to elastomers, *Polym. Int.*, 57, 975-981, 2008.
- Lai J., Sunderland B., Xue J., Yan S., Zhao W., Folkard M., Michael B.D., and Wang Y., Study on hydrophilicity of polymer surfaces improved by plasma treatment, *Appl. Surface Sci.*, 252, 3375-3379, 2006.
- Pandiyaraj K.N., Selvarajan V., Deshmukh R.R., and Gao Ch., Adhesive properties of polypropylene (PP) and

- polyethylene terephthalate (PET) film surfaces treated by DC glow discharge plasma, *Vacuum*, 83, 332-339, 2008.
5. Yang Y.F., Wan L.Sh., and Xu Z.K., Surface hydrophilization for polypropylene microporous membranes: A facile interfacial crosslinking approach, *J. Member. Sci.*, 326, 372-381, 2009.
 6. Wang Ch. and He X., Polypropylene surface modification model in atmospheric pressure dielectric barrier discharge, *Surface Coat. Technol.*, 201, 3377-3384, 2006.
 7. Mukhopadhaya S.K. and Partifge J.F., Automative Textiles, *Text. Prog.*, 29, 34-37, 1998.
 8. Nie Y.H., Walzak M.J., Berno B., and McIntyre N.S., Atomic force microscopy study of polypropylene surfaces treated by UV and ozone exposure: Modification of morphology and adhesion force, *Appl. Surface Sci.*, 144-145, 627-632, 1999.
 9. Calvert J.G. and Pitts J.N., *Photochemistry*, Wiley, New York, 200-201, 1996.
 ۱۰. کاشفی ف.، *UV و کاربرد آن در صنعت نساجی*، دانشکده نساجی، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۸۰.
 11. Fattahi F., Izadan H., and Khoddami A., Investigation into the effect of UV/ozone irradiation on dyeing behavior of poly(lactic acid) and poly(ethylene terephthalate) substrate, *Prog. Color Colorant. Coat.*, 5, 15-22, 2012.
 12. Mirabedini M.S., Rahimi H., Hamedifar Sh., and Mohseini M., Microwave irradiation of polypropylene surface: A study on wettability and adhesion, *Int. J. Adhes. Adhes.*, 24, 163-170, 2003.
 13. Paul S., Verenich S., and Pourdeyhimi B., Blending polypropylene with glycidyl methacrylate-containing polymer to improve adhesion to elastomers, *Polym. Int. J.*, 57, 975-981, 2008.
 14. Mallakpour S.E., Hajipour R., Zadhoush A., and Mahdavian R., Efficient and novel method for surface oxidation of polypropylene in the solid phase using microwave irradiation, *Appl. Polym. Sci. J.*, 79, 1317-1323, 2001.
 15. Mallakpour S.E., Hajipour R., Zadhoush A., Mahdavian R., and Ali-Hosseini F., Microwave assisted oxidation of polyethylene under solid-state conditions with potassium permanganate, *Eur. Polym. J.*, 37, 1199-1206, 2001.
 16. Kim H. and Bae J.S., Modification of polypropylene fibers by electron beam irradiation. I. Evaluation of dyeing properties using cationic dyes, *Fibers Polym.*, 10, 320-324, 2009.