Polymerization
Quarterly, 2018
Volume 8, Number 2
Pages 63-73
ISSN: 2252-0449

Effect of Polymer Structure and Processing Parameters on the Artificial Turf Pile Fiber Properties

Rouhollah Semnani Rahbar* and Reza Ghasemi
Department of Textile and Leather, Faculty of Chemical and Petrochemical Engineering, Standard Research Institute, P.O. Box: 31745-139, Karaj, Iran

Received: 28 October 2017, Accepted: 3 March 2018

Abstract

In recent years, there has been a marked introduction of artificial turf as a replacement of natural turf by considering its lower cost, easier maintenance and higher durability. Artificial turf has been used, not only in different sports (such as soccer, rugby, tennis, golf, and cricket) but also in landscaping (gardens, parks, and playgrounds). Polymeric filaments have been used successfully in the artificial turf yarn. These filaments are made from thermoplastic materials, namely polyethylene, polypropylene and polyamide. Among them, polyethylene is the most important polymer used in the production of artificial turf yarn especially in sports-related articles. This review presents the influence of polymer structure and processing parameters on the behavior of the artificial turf pile filaments and more specifically on their resiliency and durability. The structure–materials–processing interaction triangle is being considered and discussed how polymer structure may affect the final properties of filaments. There are some challenges to produce high performance turf yarn. It is evident that some physical and mechanical properties of turf pile fiber are related to polymer characteristics and significant alteration in these properties is not possible during polymer processing.

Key Words

**artificial turf,
pile fiber,
polymer structure,
resiliency,
durability**

(*) To whom correspondence should be addressed.
E–mail: semnani@standard.ac.ir

مقالات علمی

اثر ساختار پلیمر و پارامترهای فراورش بر خواص الیاف خاب چمن مصنوعی

روح‌اله سمنانی رهبر*، رضا قاسمی

کرج، پژوهشگاه استاندارد، پژوهشکده شیمی و پتروشیمی، گروه پژوهشی نساجی و چرم،
صندوق پستی: ۱۳۹-۳۱۷۴۵

دریافت: ۱۳۹۶/۸/۶، پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۱۲

بسپارش
فصلنامه علمی- ترویجی
سال هشتم، شماره ۲،
صفحه ۷۳-۶۳، ۱۳۹۷
ISSN: 2252-0449

چکیده

در سال‌های اخیر، استفاده از چمن مصنوعی به‌عنوان جایگزین چمن طبیعی گسترش درخور توجهی یافته که علت آن قیمت کمتر، مراقبت و نگه‌داری آسان‌تر و دوام بیشتر چمن مصنوعی است. این چمن، نه‌تنها در ورزش‌هایی مانند فوتبال، تنیس، هاکی و راگبی استفاده می‌شود، بلکه در مصارف تزئینی و تفریحی مانند فضاسازی و محوطه‌کاری باغ‌ها و پارک‌ها نیز کاربرد دارد. از بخش‌های اصلی چمن مصنوعی، الیاف خاب فرش چمن است که از پلیمرهای گرمانرم مانند پلی‌اتیلن، پلی‌پروپیلن و پلی‌آمید تولید می‌شوند. پلی‌اتیلن را می‌توان متداول‌ترین پلیمر برای تولید نخ خاب چمن مصنوعی، به‌ویژه در مصارف ورزشی دانست. در این مقاله، اثر ساختار پلیمر و پارامترهای فراورش بر خواص نهایی الیاف خاب مانند جهندگی و دوام مرور می‌شود. همچنین، برهم‌کنش ساختار، مواد و ویژگی اثر ساختار پلیمر بر ویژگی‌های الیاف خاب در چمن مصنوعی طی کاربرد بررسی می‌شود. چالش‌های مختلفی در تولید نخ با عملکرد مطلوب از پلیمر پلی‌اتیلن وجود دارد. بدیهی است، برخی خواص فیزیکی و مکانیکی نخ خاب به مشخصات پلیمر مصرفی مربوط است و نمی‌توان چندان طی فراورش پلیمر و تولید نخ، این خواص را تغییر داد و نخی با ویژگی‌های متفاوت تولید کرد.

روح‌اله سمنانی رهبر

رضا قاسمی

واژگان کلیدی

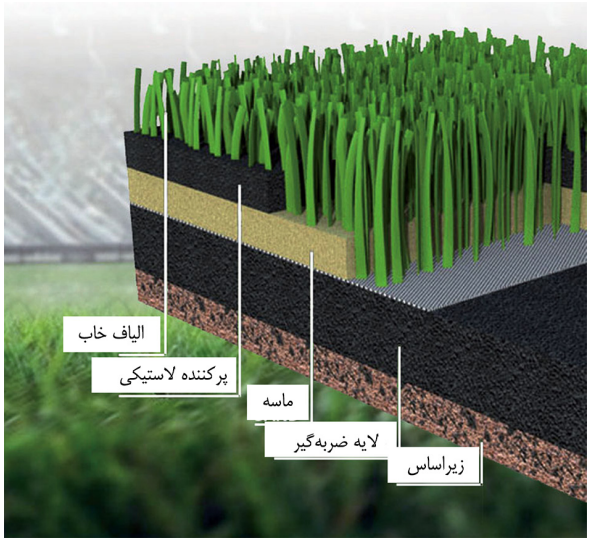
چمن مصنوعی،
الیاف خاب،
ساختار پلیمر،
جهندگی،
دوام

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:
semnani@standard.ac.ir

مقدمه

از اواسط قرن گذشته، چمن مصنوعی از سطح بازی درون‌شهری جوانان به سطح بازی در برخی از معروف‌ترین مکان‌های ورزشی در جهان گسترش یافت. به احتمال زیاد تولیدکنندگان سامانه ابتدایی چمن مصنوعی، هرگز تصور نمی‌کردند که ابداع آن‌ها در زمین‌های بازی ورزشگاه‌های حرفه‌ای استفاده شود. معمولا از چمن مصنوعی در مناطقی استفاده می‌شود که امکانات و شرایط لازم برای رشد چمن طبیعی فراهم نباشد یا نگه‌داری چمن طبیعی به نحو مطلوب، غیرممکن یا مشکل باشد. استفاده از چمن مصنوعی در زمین‌های ورزشی، تنها بخشی از کاربرد آن است. از این چمن در ورزش‌های مختلف مانند فوتبال، تنیس، هاکی و راگبی استفاده می‌شود. بادوام بودن چمن، هزینه کم نگه‌داری، عدم نیاز به آبیاری و ظاهر طبیعی آن سبب شده است که این تولیدات در کاربردهای متعددی استفاده شوند. از جمله این کاربردها می‌توان به استفاده در محوطه‌های چمن‌کاری عمومی مانند میدان‌های شهرها، حاشیه آزادراه‌ها و بزرگ‌راه‌ها، زمین‌های بازی کودکان، کنار استخرها و محوطه داخلی ساختمان‌ها اشاره کرد. در هنگام بارش باران، چمن مصنوعی مشکل گل‌آلود شدن ندارد. از این رو، استفاده از آن در مکان‌های تفریحی بسیار مناسب است. همچنین با چمن‌کاری مصنوعی حاشیه آزادراه‌ها و بزرگ‌راه‌ها، مشکلات مربوط به آبیاری فضاهای سبز برطرف می‌شود. افزون بر این، در مناطقی که با کمبود آب مواجه هستند یا امکان آبیاری مطلوب چمن طبیعی وجود ندارد، استفاده از چمن‌های مصنوعی از بهترین گزینه‌هاست [۱،۲].

به‌طور کلی، سامانه چمن مصنوعی شامل فرش چمن، الیاف خاب (pile fiber)، لایه‌های پشت‌پوش اولیه و ثانویه (primary and secondary backing layers)، پرکننده، لایه کشسان یا ضربه‌گیر (elastic layer) و یک پی (foundation) شامل خاک بستر، منسوج زمینی (geotextile)، زیراساس (sub-base)، اساس و رویه آسفالت، بتن یا شن است. بر این مبنا، فرایند تولید چمن مصنوعی از تولید نخ یا الیاف خاب، بافت فرش چمن و سپس پشت‌پوشی تشکیل شده است. پس از تولید فرش چمن، فرایند نصب آن روی زمین زیرسازی شده، انجام می‌گیرد و در انتها پرکننده در آن ریخته می‌شود. تصاویری از اجزای اصلی چمن مصنوعی در شکل ۱ نشان داده شده است [۳،۴].



شکل ۱- اجزای اصلی سامانه چمن مصنوعی [۴].

پلیمرهای استفاده‌شده در تولید الیاف خاب چمن مصنوعی

مهم‌ترین خواص مورد انتظار از نخ‌های خاب چمن مصنوعی عبارت از نرمی (رفتار دوستانه با بازیکن)، جهندگی (بازگشت کشسان پس از چند بار اعمال تنش و خمش) و دوام (مقاومت در برابر لیفچه‌ای‌شدن و شکافته‌شدن، رفتگی و تخریب) است. با توجه به این خواص لازم است، ابتدا پلیمر مدنظر انتخاب و سپس فناوری تولید نخ بررسی شود. پلیمرهایی که برای تولید نخ خاب استفاده می‌شوند از خانواده پلی‌اولفین‌ها (معمولاً برای چمن‌های فوتبال و فوتبال آمریکایی) یا پلی‌آمیدها (معمولاً برای کف‌پوش‌های هاکی، چمن تزئینی و فوتبال آمریکایی) هستند. پلی‌اولفین‌های به‌کار رفته شامل پلی‌اتیلن، هوموپلیمر پلی‌پروپیلن یا کوپلیمر دسته‌ای پلی‌پروپیلن و اتیلن است. در دسته پلی‌آمیدها نیز معمولا از نایلون ۶ استفاده می‌شود. پلی‌اتیلن را می‌توان متداول‌ترین پلیمر مصنوعی برای تولید نخ خاب چمن مصنوعی دانست. از میان انواع مختلف پلی‌اتیلن، معمولا از پلی‌اتیلن کم‌چگالی خطی (LLDPE) برای تولید نخ چمن مصنوعی استفاده می‌شود، چرا که خواص مکانیکی بسیار مطلوبی دارد [۸-۵].

تولید الیاف-نخ چمن مصنوعی

اولین مرحله در تولید الیاف یا نخ چمن، ذوب گرانول‌های پلی‌اولفین یا چیپس پلی‌آمید است. طی این فرایند، رنگ‌دانه‌ها و افزودنی‌های مختلف مانند ضداکسنده، پایدارکننده در برابر تابش فرابنفش، تأخیرانداز شعله، روان‌کننده و غیره به آن اضافه می‌شود. در این راستا برای دست‌یابی به محصول همگن و یکنواخت لازم است، اجزای ترکیب به‌خوبی با یکدیگر مخلوط شوند. از این‌رو در اغلب موارد، از افزودنی به‌شکل پیمانه اصلی (masterbatch) استفاده می‌شود. معمولا با استفاده از مقدار نسبتاً کمی پایدارکننده، از تخریب پلیمر در برابر هوا، نور و گرما جلوگیری می‌شود.

شکل ۲- الیاف به‌کار رفته در خاب چمن مصنوعی: (الف) الیاف لیفچه‌ای‌شده و (ب) الیاف تک‌رشته‌ای [۵].

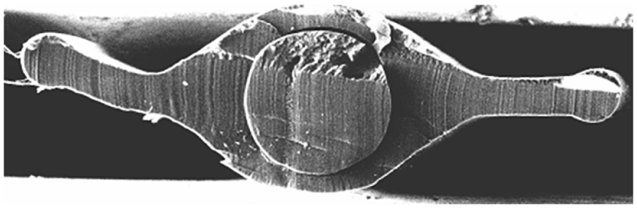
پایدارسازی الیاف خاب چمن در برابر نور فرابنفش و گرما از لحاظ رفتار پیرسازی آن‌ها حائز اهمیت است و پایدارکننده‌های نوری، دوام چمن مصنوعی را تضمین می‌کنند.

الیاف یا نخ استفاده‌شده در خاب چمن مصنوعی معمولا به‌شکل تک‌رشته یا نوار لیفچه‌ای‌شده است (شکل ۲). ولی انواع دیگری از نخ‌ها نیز برای خاب چمن مصنوعی به‌کار می‌روند که شامل تک‌نوار، بافت و شکافت، تکسچره‌شده و پوشانده‌شده هستند. حجم استفاده از این نخ‌ها در مقایسه با نخ تک‌رشته و نوار لیفچه‌ای‌شده به‌مراتب کمتر است. بر این اساس، دو فناوری اصلی استفاده‌شده در تولید نخ خاب چمن شامل اکستروژن الیاف یا نخ تک‌رشته و اکستروژن نوار لیفچه‌ای‌شده است [۱۱-۹].

اثر نوع پلیمر بر ویژگی‌های الیاف خاب چمن مصنوعی

مزایای الیاف پلی‌آمید مصرفی در خاب چمن شامل جذب آب، خاصیت فنری و جهندگی مطلوب است. ولی این الیاف سخت هستند و ضریب اصطکاک زیادی در برابر پوست نشان می‌دهند، به‌نحوی که در هنگام تکل‌زدن و سرخوردن بازیکن روی زمین، می‌توانند آسیب‌های سایشی (سوختگی ناشی از اصطکاک) ایجاد کنند.

رفتار پلی‌اتیلن، به‌ویژه LLDPE، با پوست بسیار خوب است و سایش کمتری ایجاد می‌کند، اما خاصیت جهندگی مطلوبی ندارد. از دلایل بهتربودن رفتار پلی‌اتیلن برای پوست بدن، رسیدن این پلیمر به دمای نرم‌شدن در هنگام سرخوردن شدید بازیکن روی چمن است. پلیمر نرم می‌تواند لایه بین‌سطحی در سطح لغزنده تشکیل دهد که همانند روان‌کننده عمل می‌کند. دمای نرم‌شدن پلی‌آمید به مقدار درخور توجهی بیش از پلی‌اتیلن است. از این رو،



شکل ۳- سطح مقطع عرضی لیف دوجزئی پلی‌آمید (مغزی) و پلی‌اتیلن (غلاف) برای استفاده در خاب چمن مصنوعی [۱۲].

دمای اصطکاک آن بیشتر است و بدین ترتیب خطر زخمی‌شدن و بروز آسیب‌های پوستی (سوختگی پوست) برای الیاف پلی‌آمید بیشتر است.

راه حل جایگزین برای رفع مشکلات یادشده در این دو پلیمر، استفاده از تک‌رشته‌های دوجزئی غلاف-مغزی با مغزی پلی‌آمید و غلاف پلی‌اتیلن است. جهندگی این رشته‌ها نسبت به تک‌رشته پلی‌اتیلن و نرمی آن نسبت به تک‌رشته پلی‌آمید بهتر است و به عبارت دیگر، خواص و مزایای ترکیبی این دو پلیمر را دارد. اگر چه رفتار گرانروکشسان غلاف پلی‌اتیلن می‌تواند تا حدودی از بازگشت مغزی پلی‌آمید جلوگیری کند، ولی نرمی چمن مصنوعی نهایی به‌مقدار شایان توجهی افزایش می‌یابد که راحتی بازیکن را بهبود می‌بخشد. در شکل ۳ سطح مقطع عرضی این تک‌رشته دوجزئی نشان داده شده است. یادآور می‌شود، پژوهش درباره الیاف دوجزئی ادامه دارد و این الیاف هنوز به‌طور تجاری عرضه نشده‌اند. از دلایل این مسئله شاید گرانی قیمت تمام‌شده این نوع الیاف باشد. رفتار اصطکاکی پلی‌پروپیلن با پوست بدن تا حدودی ضعیف‌تر از LLDPE بوده، ولی بهتر از پلی‌آمید است. خاصیت چسبندگی آن نیز از پلی‌اتیلن بهتر و از پلی‌آمید ضعیف‌تر است [۵،۶،۱۲].

خواص پلیمرهای مصرفی در تولید الیاف خاب چمن مصنوعی

در حین بازی روی چمن مصنوعی، نخ‌های خاب در معرض تنش‌های مکانیکی چندوجهی قرار می‌گیرند. این تنش‌ها شامل ازدیاد طول، برش، پارگی، پیچش و اصطکاک سطحی هستند که به‌طور چرخه‌ای به نخ وارد می‌شوند. مقدار تنش واردشده، مدت زمان اعمال و چرخه تکرار آن بسیار متغیر است. شرایط آب و هوایی مختلف نیز پیچیدگی این موارد را تشدید می‌کند. در شرایط یادشده، حفظ ساختار نخ در مدت زمان طولانی از اهمیت زیادی برخوردار است که از آن به‌عنوان دوام یاد می‌شود. افزایش مقاومت نخ در برابر فرسایش و ازهم شکافتن و بهینه‌سازی بازگشت کشسان آن همواره در صنعت چمن مصنوعی مدنظر است. هدف

نهایی، فراهم‌کردن سطح بازی مناسب با شرایط بهینه در مدت زمان طولانی است. در اینجا لازم است، برای تولید نخ دو پارامتر کلی مدنظر قرار گیرد:

– مشخصات و خواص پلیمر استفاده‌شده و

– شرایط و فناوری به‌کار گرفته شده.

بدیهی است، برخی خواص فیزیکی و مکانیکی نخ خاب به مشخصات پلیمر مصرفی مربوط است. این خواص را نمی‌توان چندان طی فراورش پلیمر و تولید نخ تغییر داد و نخی با خواص متفاوت تولید کرد. ولی برخی از مشخصات نخ نهایی تحت تأثیر متغیرهای فرایند تولید نخ قرار دارند که لازم است کنترل شوند. از این رو، در ابتدا این نکته مدنظر است که چمن مصنوعی باید چه خواص و مشخصاتی داشته باشد و در ادامه برای دست‌یابی به این خواص، مشخصات نخ و پلیمر مصرفی تعیین می‌شوند [۱۵–۱۳].

مطالعات نشان می‌دهد، نخ خاب روی برخی از ویژگی‌های چمن مصنوعی اثر می‌گذارد که عبارت از میزان غلتش توپ، مقاومت چرخشی، اصطکاک بین استوک‌های کفش و سطح چمن، اصطکاک پوست–سطح و سایش پوست هستند. افزون بر این، نوع نخ بر پارامترهای نرمی، دوام شامل آزمون فرسایش (آزمون در دستگاه Lisport) و هوازدگی مصنوعی (مقاومت در برابر تابش فرابنفش)، مقاومت در برابر تغییر شکل و خوابیدن الیاف بر سطح چمن مصنوعی نیز اثرگذار است.

با توجه به مطالب یادشده می‌توان دریافت، نوع نخ خاب چمن مصنوعی اثر درخور توجهی بر کیفیت چمن مصنوعی می‌گذارد. الزامات عملکردی برای انتخاب الیاف و نخ مناسب برای خاب چمن مصنوعی به‌دست آمده از اطلاعات پیش‌گفته به شرح زیر است:

– مقاومت در برابر تنش‌های چندبعدی،

– مقاومت در برابر چرخه‌های تنش–کرنش،

– موازنه میان سفتی و کشسانی برای بازگشت (جهندگی)،

– مقاومت در برابر پارگی و شکنندگی،

– مقاومت در برابر خراش، سایش و رفتگی (wear) (تنش‌های سطحی)،

– پایداری در برابر تابش فرابنفش و

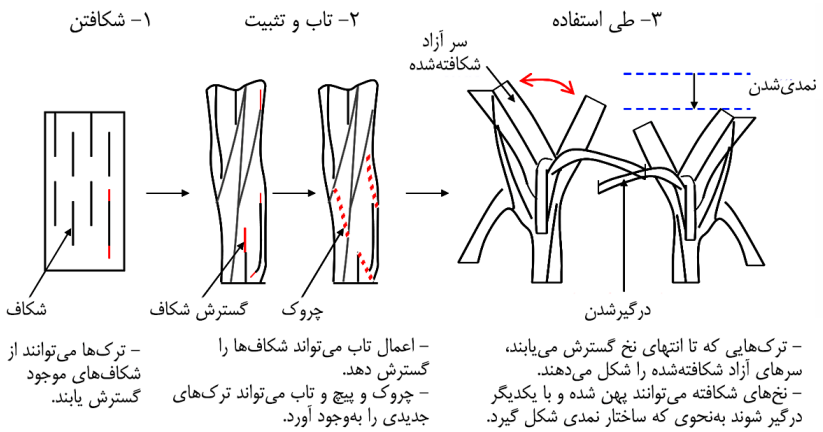
– کم‌بودن اصطکاک با پوست و نرمی است [۱۵–۱۳].

در ادامه درباره ارتباط میان برخی از الزامات و خواص پلیمرهای استفاده شده و نیز متغیرهای فراورش آن‌ها برای تولید نخ خاب چمن مصنوعی بحث می‌شود.

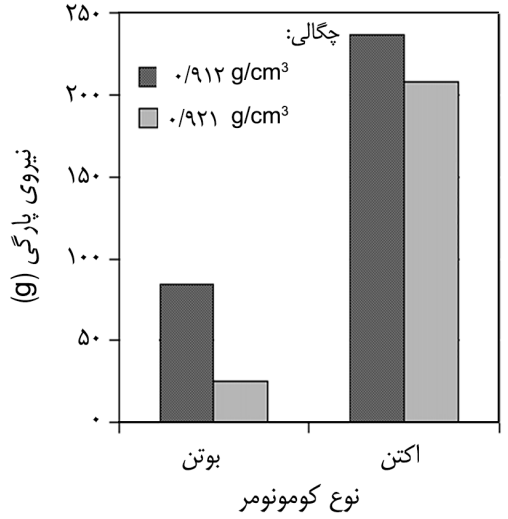
مقاومت در برابر پارگی

مقاومت در برابر پارگی، طول عمر نخ خاب چمن را افزایش می‌دهد. شکافتن و تکه‌تکه شدن نخ به مقاومت آن در برابر پارگی مربوط است. مدلی برای تحلیل رفتار پارگی نوار لیفچه‌ای‌شده مصرفی در نخ خاب و در حقیقت رفتار رفتگی آن پیشنهاد شده که در شکل ۴ نشان داده شده است.

حال پرسش این است که مقاومت در برابر پارگی نخ خاب چگونه بهبود می‌یابد؟ نکته‌ای که در ابتدا باید به آن توجه کرد این است که پس از نصب فرش چمن تهیه‌شده از نوار لیفچه‌ای، کم‌بودن مقاومت در برابر پارگی نوار که در فرایند لیفچه‌ای‌شدن آن یک مزیت بود، اینک بر رفتگی نخ و مقاومت آن در برابر شکافتن و تکه‌تکه شدن اثر منفی می‌گذارد و نخ به لیفچه‌هایی کوچک و کوچک‌تر تبدیل می‌شود. بنابراین، هدف ایجاد تعادل میان الزامات موجود است. از یک سو، مقاومت در برابر پارگی نوار باید کم باشد تا بتوان آن را طی تولید لیفچه‌ای کرد و از سوی دیگر باید این ویژگی به اندازه کافی زیاد باشد تا از لیفچه‌ای‌شدن بعدی (تکه‌تکه شدن) نخ روی فرش چمن طی بازی و استفاده نهایی



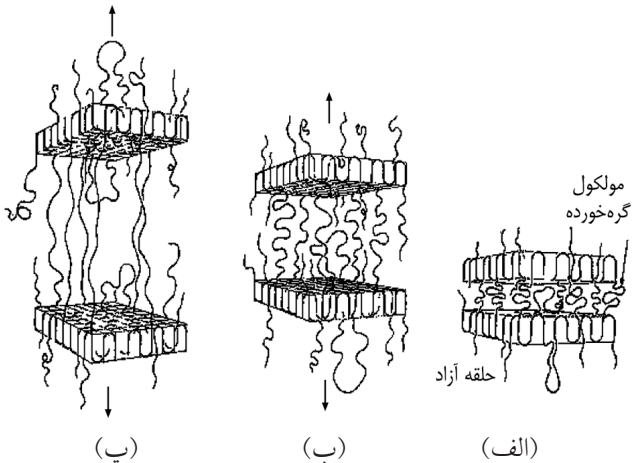
شکل ۴– مدل اولیه رفتگی نخ خاب چمن مصنوعی در تحلیل رفتار پارگی نوار لیفچه‌ای شده [۱۳].



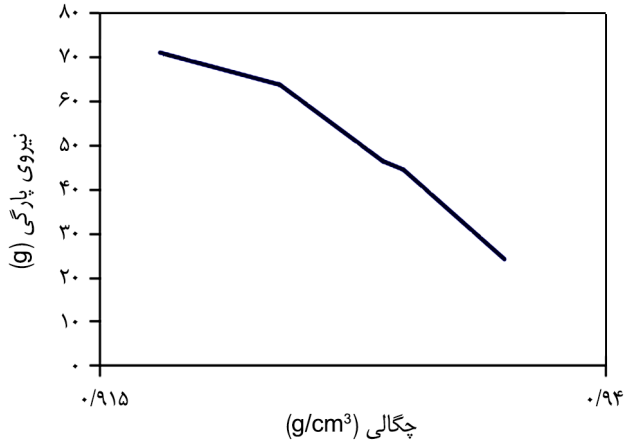
شکل ۵- تغییر نیروی پارگی الیاف با تغییر نوع کومونومر مصرفی در پلیمر LLDPE [۶].

جلوگیری کند [۱۶-۱۴].

مقاومت در برابر پارگی LLDPE به شکل فیلم‌های دمشی و ریخته‌گری‌شده تخت در مطالعات گسترده‌ای بررسی شده است. مقاومت در برابر پارگی نوار لیفچه‌ای‌شده به تنظیمات خط اکستروژن و مشخصات رزین و پلیمر مصرفی وابسته است. LLDPE کوپلیمر اتیلن با کومونومر است که طول آن تعیین‌کننده خواص مکانیکی نهایی لیف است. انتخاب کومونومر، پارامتر کلیدی برای دست‌یابی به مقاومت در برابر پارگی نخ نهایی است. نتایج مطالعات نشان می‌دهد، استفاده از کومونومر با طول زنجیر بلندتر (به‌عنوان مثال اکتن در برابر بوتن) موجب می‌شود که ترک و پارگی در نخ طی تنش‌های چرخه‌ای در دورهای بسیار زیادتری رخ دهد. اکتن در



شکل ۶- مدل زنجیر گره‌خورده بین دو بلور در پلیمر برای تشریح مقاومت در برابر پارگی نخ نهایی: (الف) لیف اولیه، (ب) لیف تحت نیروی پارگی و (پ) لیف پاره‌شده [۱۳].



شکل ۷- چگونگی تغییر نیروی پارگی نوارهای کشیده شده LLDPE با تغییر چگالی پلیمر مصرفی [۱۳].

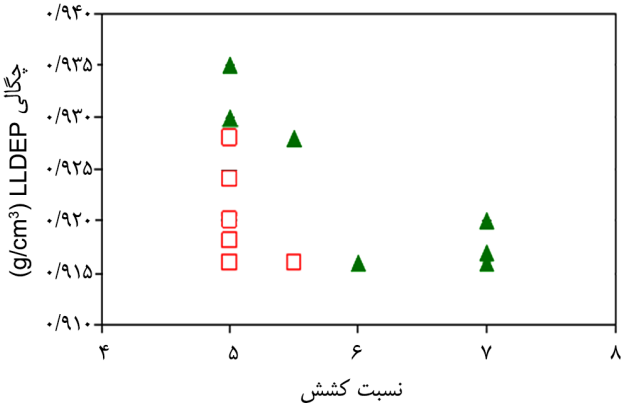
مقایسه با بوتن، زنجیر جانبی بلندتری را به‌وجود می‌آورد. به‌طوری که شبکه نیمه‌بلوری متفاوتی شکل می‌گیرد و در نهایت مقاومت در برابر پارگی نوار تولیدی بیشتر شده و خواص مکانیکی بهتر می‌شود [۱۶-۱۴]. در شکل ۵، چگونگی اثرگذاری استفاده از دو کومونومر مختلف بر نیروی پارگی نخ خاب چمن نشان داده شده است. الیاف تولیدشده از رزین‌های LLDPE با چگالی g/cm³ ۰/۹۲-۰/۹۱ از بیشترین مقاومت در برابر پارگی برخوردارند که باعث جلوگیری از شکافته‌شدن زودهنگام آن‌ها در جهت طول می‌شود. به‌نظر می‌رسد، در این محدوده چگالی، پیکی در مقدار (غلظت) زنجیرهای گره‌خورده وجود دارد. این زنجیرهای گره‌خورده، نواحی بلوری پلیمر را از راه فاز بی‌شکل به یکدیگر متصل می‌کنند. بدین ترتیب، مقاومت در برابر گسترش پارگی حاصل می‌شود (شکل ۶).

شکل ۷ چگونگی تغییر نیروی پارگی نوارهای کشیده‌شده را با تغییر چگالی پلیمر نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، با کاهش چگالی رزین، مقاومت در برابر پارگی نوار لیفچه‌ای‌شده افزایش می‌یابد.

درباره پارامترهای فرایند تولید نوار لیفچه‌ای‌شده نیز باید عنوان کرد، آرایش‌یافتگی مولکولی حاصل در فیلم اکسترودشده طی اکستروژن مذاب یا فرایند کشش روی فیلم جامد در گرم‌خانه در جهت ماشین، موجب کاهش مقاومت در برابر پارگی می‌شود [۱۵-۱۳]. در شکل ۸ چگونگی اثرگذاری چگالی رزین و نسبت کشش بر امکان لیفچه‌ای‌شدن نوار نشان داده شده است.

مقاومت در برابر خستگی

موضوع دیگری که برای دوام نخ خاب چمن مصنوعی بحث

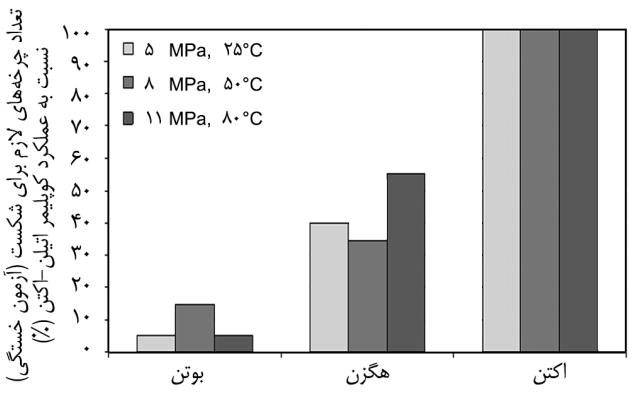


شکل ۸- اثر چگالی رزین استفاده‌شده و نسبت کشش اعمالی طی فراورش بر امکان لیفچه‌ای‌شدن نوار به‌دست آمده [۱۳].

می‌شود، مقاومت در برابر خستگی است که در آن مقاومت مواد در برابر چرخه‌های تنش تا نقطه پارگی آزمون می‌شود. مقدار کومونومر (مقدار شاخه‌ها) بر چقرمگی مواد اثرگذار است و با چگالی LLDPE نیز ارتباط عکس دارد. نوع کومونومر نقش قابل ملاحظه‌ای را در دوام LLDPE در برابر چرخه‌های تنش ایفا می‌کند. به‌طوری که هر چه مقدار کومونومر بیشتر و زنجیر مولکولی آن بلندتر باشد، بروز ترک در اثر تنش دیرتر رخ می‌دهد. کسر زنجیرهای گره‌خورده بین دو بلور و اتصال بین بلورها که تابعی از چگالی و نوع کومونومر مصرفی است، می‌تواند چقرمگی مواد را بهبود دهد (شکل ۹) [۱۶-۱۴].

استحکام کششی نخ خاب

مطابق انتظار، با افزایش نسبت کشش در طی فراورش نخ، استحکام کششی نخ افزایش می‌یابد. ولی همانطور که گفته شد، به‌دلیل افزایش آرایش‌یافتگی در راستای محور نخ، تمایل به لیفچه‌ای‌شدن نیز افزایش می‌یابد. از این رو، بهینه‌سازی نسبت کشش برای دست‌یابی به استحکام کششی کافی و نیز جلوگیری از لیفچه‌ای‌شدن



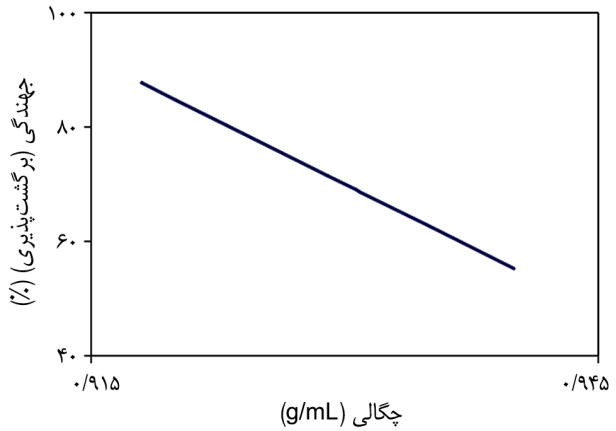
شکل ۹- اثر نوع کومونومر مصرفی در سنتز پلیمر LLDPE بر مقاومت الیاف در برابر خستگی [۱۳].

زودهنگام الیاف پس از نصب چمن و در طی استفاده، ضروری است. مطالعات نشان می‌دهد، با کاهش شاخص جریان مذاب رزین مصرفی، استحکام کششی نخ افزایش می‌یابد.

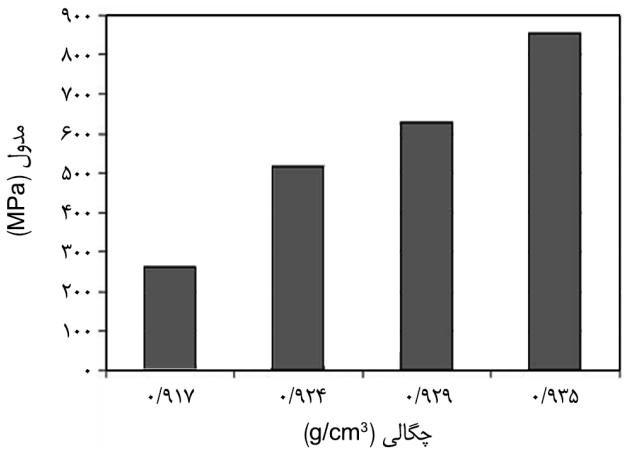
جهندگی (بازگشت کشسان)، نرمی، مدول کششی نخ

جهندگی، مقدار بازگشت نخ را پس از اعمال نیروی خمشی در شرایط معین نشان می‌دهد. خاصیت بازگشت نخ عامل کلیدی برای دست‌یابی به ظاهر مطلوب با کیفیت پایدار در چمن و نیز جلوگیری از خوابیدن الیاف بر سطح آن است. بازگشت نخ به حالت عمودی و ایستاده، برای ثابت نگه‌داشتن مقدار غلتش توپ و سایر ویژگی‌های کارایی چمن مصنوعی در خلال عمر مفید آن لازم است. نتایج مطالعات نشان می‌دهد، هر چه چگالی پلیمر کمتر باشد، جهندگی نخ بهتر است (شکل ۱۰) [۱۴-۱۲]. اما باید توجه داشت، چالش‌هایی در تولید نخ با عملکرد مطلوب از رزین LLDPE با چگالی کمتر وجود دارد. همچنین با کاهش چگالی پلیمر، نرمی نخ نیز افزایش می‌یابد و نوع کومونومر مصرفی در تولید LLDPE بر نرمی نخ اثر ندارد.

مدول کششی نخ با سفتی خمشی در ارتباط است که این موضوع در حفظ ویژگی غلتش توپ روی چمن مصنوعی در محدوده مشخص و معین، اهمیت دارد (شکل ۱۱). این نکته نیز شایان توجه است که کاهش به‌هم‌پیوستگی و یکپارچگی الیاف، سفتی خمشی آن را کاهش می‌دهد. سفتی کمتر که در حقیقت به معنای نرمی بیشتر است بر میزان غلتش توپ اثر دارد. در چگالی و نمره نخ یکسان، کمتر بودن سفتی نخ موجب کاهش پایداری لیف در برابر غلتش توپ می‌شود. در نتیجه، میزان غلتش توپ بیشتر شده و در نهایت این پارامتر از محدوده ویژگی کیفی در نظر گرفته شده در استاندارد فیفا خارج می‌شود. شایان توجه است که شکل سطح



شکل ۱۰- ارتباط میان چگالی پلیمر و جهندگی نخ نهایی [۶].

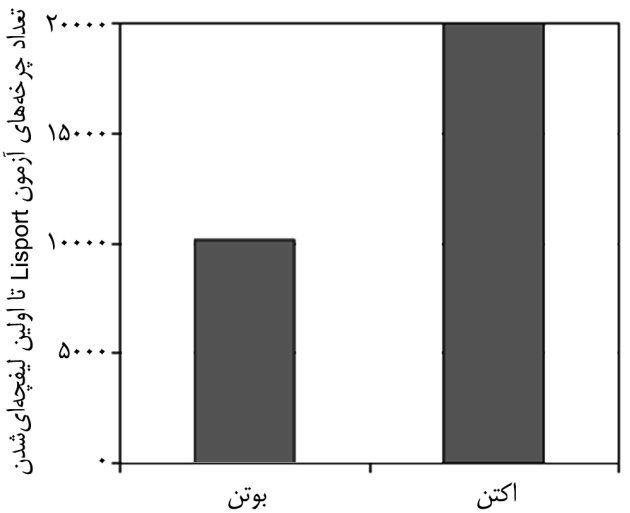


شکل ۱۱- ارتباط میان مدول و چگالی LLDPE (اتیلن- اکتن). مدول با نرمی ارتباط عکس و با سفتی خمشی ارتباط مستقیم دارد [۱۳].

مقطع نخ و تراکم بافت نیز بر رفتار غلتشی توپ اثرگذار هستند [۱۶-۱۳].

آزمون Lisport

مناسب‌ترین آزمون صنعتی برای بررسی جهندگی و دوام نخ‌های چمن مصنوعی، آزمون Lisport است. در این آزمون، چمن مصنوعی حاوی پرکننده (مانند آنچه که روی زمین نصب می‌شود) به‌وسیله دو غلتک تحت فرسایش قرار می‌گیرد که در حقیقت انجام بازی توسط بازیکن را روی چمن شبیه‌سازی می‌کند. پس از انجام آزمون در چرخه‌های متعدد، کیفیت نخ ارزیابی می‌شود: آیا نخ شکافته یا تکه‌تکه شده است؟ آیا نخ خاب روی چمن خوابیده



شکل ۱۲- نتایج آزمون Lisport برای نخ‌های مختلف تولیدشده از LLDPE بر پایه کومونومر اکتن یا بوتن [۱۳].

است؟ آیا رفتگی قابل ملاحظه‌ای مشاهده می‌شود؟

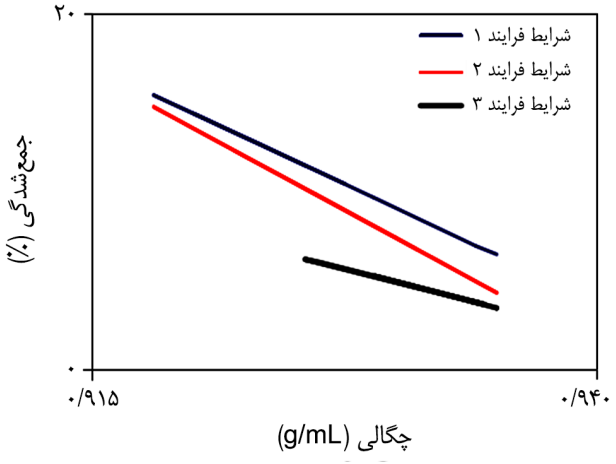
تعداد چرخه‌هایی که طی آن‌ها نخ به‌طور معناداری آسیب می‌بیند، بین ۲۵۰۰ تا ۱۰۰۰۰۰ چرخه متغیر است. افزایش مقاومت در برابر تکه‌تکه شدن و شکافتن نخ خاب و بهینه‌سازی خواص برگشت‌پذیری آن از اهداف تولیدکنندگان چمن مصنوعی است. مطالعات نشان می‌دهد، بهترین دوام برای رزین LLDPE برپایه کومونومر اکتن در مقایسه با کومونومر بوتن با چگالی یکسان به‌دست می‌آید که در شکل ۱۲ نشان داده شده است [۱۶-۱۳]. این موضوع تفاوت قابل ملاحظه میان رزین‌های LLDPE را نشان می‌دهد.

جمع‌شدگی نخ

جمع‌شدگی گرمایی نخ از پارامترهای مهم کیفیت نخ به‌شمار می‌رود. جمع‌شدگی نخ موجب پیچ و تاب‌دارشدن یا بروز عملکرد ناهمگن نخ طی فرایندهای تولید فرش چمن، پوشش‌دهی پشت چمن یا نصب آن می‌شود. در حین تولید فرش چمن، نخ ممکن است در یک یا چند مرحله از فراورش در برابر دمای بیش از ۱۰۰°C قرار گیرد. جمع‌شدگی زیاد، طول لیف را به‌مقدار درخور ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد که این مسئله بازده به‌کارگیری ماده اولیه را کم می‌کند. چمن پس از نصب روی زمین نیز در معرض دوره‌های دمایی متفاوت قرار می‌گیرد. به‌نحوی که دمای سطح آن می‌تواند در روزهای آفتابی گرم به بیش از ۷۰°C برسد. قرارگیری در برابر این دماهای زیاد می‌تواند به آزادسازی تنش‌های موجود در نخ منجر شود که طی فرایند کشش در آن به‌وجود آمده‌اند. افزون بر تنش‌های خارجی واردشده بر نخ در خلال بازی، تنش باقی‌مانده در آن نیز می‌تواند موجب لیفچه‌ای‌شدن زودهنگام، رفتگی، تغییر شکل و در نهایت پارگی نخ شود. از این رو، کاهش جمع‌شدگی نخ طی فرایند تولید موضوعی حیاتی است [۱۶-۱۴].

مطالعات نشان می‌دهد، کاهش چگالی رزین LLDPE از پارامترهای کلیدی در افزایش مقدار جمع‌شدگی است (شکل ۱۳). بنابراین، در صورت استفاده از پلیمر با چگالی کم برای دست‌یابی به دوام و نرمی بیشتر، بهینه‌سازی فراورش برای کاهش یا کنترل جمع‌شدگی ضروری است [۱۶-۱۲].

مطالب یادشده درباره اثر چگالی بر خواص نخ این نکته را می‌رساند که لازم است توازن صحیحی در بهینه‌سازی خواص انجام شود، چرا که دست‌یابی به حداکثر عملکرد در تمام خواص به‌طور همزمان امکان‌پذیر نیست. با انتخاب دقیق خواص کلیدی بر پایه مهم‌ترین الزامات عملکردی، بهینه‌سازی موجب تولید نخی



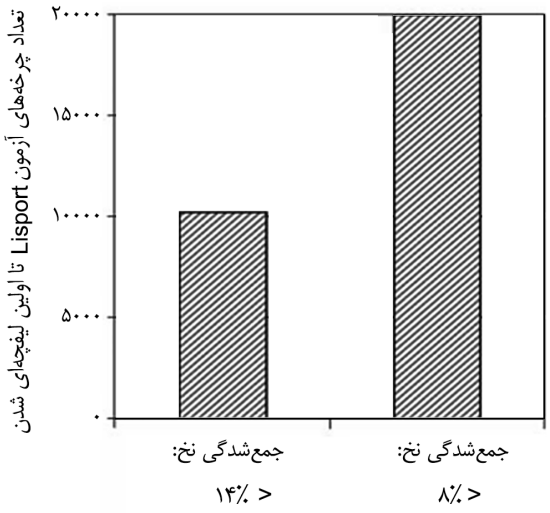
شکل ۱۳- ارتباط میان چگالی پلیمر و مقدار جمع‌شدگی نخ خاب چمن مصنوعی [۱۳].

با بهترین خواص ممکن می‌شود. افزون بر انتخاب صحیح مواد، تجهیزات فراورش نیز در این باره نقش کلیدی دارند.

شکل ۱۴ نمایانگر ارتباط میان جمع‌شدگی نخ LLDPE و لیفچه‌ای‌شدن آن در حین آزمون Lisport است. نتایج نشان می‌دهد، در نخ با جمع‌شدگی کمتر از ٪۸ تا ۲۰۰۰۰ چرخه نیز لیفچه‌ای‌شدن رخ نداده است.

برخی از روش‌های کاهش جمع‌شدگی نخ طی تولید بدین ترتیب است:

- افزایش دما هم در مرحله کشش و هم در حین استراحت در گرم‌خانه می‌تواند موجب کاهش جمع‌شدگی شود، چرا که زیادبودن دما استراحت مولکولی را افزایش می‌دهد.
- افزایش مقدار تغذیه اضافی در خلال استراحت موجب کاهش



شکل ۱۴- ارتباط میان جمع‌شدگی نخ و لیفچه‌ای‌شدن آن در آزمون Lisport [۱۱].

مقادیر جمع‌شدگی در نخ می‌شود که این مسئله از راه کاهش تنش‌های باقی‌مانده در آن رخ می‌دهد [۱۶-۱۴].

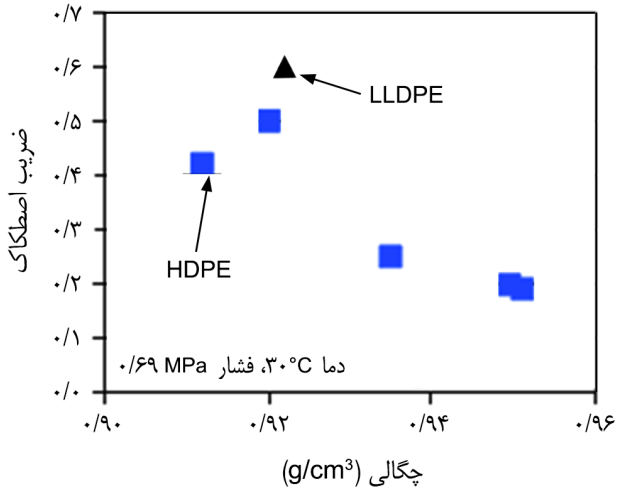
این نکته شایان توجه است که با به‌کارگیری روش‌های یادشده برای کاهش جمع‌شدگی، باید آثار تنظیم‌های اعمالی بر سایر خواص نخ نیز به‌دقت مورد توجه قرار گیرد.

ضریب اصطکاک

ضریب اصطکاک از پارامترهای مهم در الیاف چمن مصنوعی است. برخی از پلیمرها، به‌ویژه HDPE و PP، ضریب اصطکاک کمی دارند. اصطکاک به ماهیت پلیمر، قطبی یا غیرقطبی بودن آن و نیز خواص مکانیکی مانند مدول کششی مربوط می‌شود.

نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد، جنس پلیمر مصرفی در تولید نخ خاب بر رفتار اصطکاکی چمن مصنوعی نهایی اثر درخور توجهی دارد. اصطکاک سطح با پوست و استوک کفش به مقدار چسبندگی سطح پلیمر بستگی دارد. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که به‌طور کلی:

- در پلیمر با چگالی کمتر ($<$۰/۹۲ g/cm^3)، اصطکاک میان پلیمر-فلز و پلیمر-پلیمر بیشتر است و در پلیمر با چگالی بیشتر ($\leq$۰/۹۴ g/cm^3)، مقدار اصطکاک کمتر است (شکل ۱۵).
- در پلی‌اتیلن با وزن مولکولی زیاد، ضریب اصطکاک کم و رفتگی کم است.
- زبری سطح بر اصطکاک اثر می‌گذارد.
- روان‌سازی سطح، اصطکاک را کاهش می‌دهد.
- افزودنی‌های لغزش (slip additives) می‌توانند ضریب اصطکاک را به‌طور موقت تغییر دهند. همچنین افزودنی‌های مزبور می‌توانند بر فرسایش پلیمر در آزمون Lisport نیز اثر بگذارند [۱۶،۱۴-۶].



شکل ۱۵- چگونگی تغییر ضریب اصطکاک با چگالی پلیمر [۱۳].

استفاده از پلیمر با چگالی کمتر موجب افزایش ضرایب اصطکاک می‌شود. ولی لازم است، پژوهش‌های بیشتری انجام شود تا درک بهتری درباره اصطکاک بین‌سطحی پوست-پلیمر به‌دست آید.

نتیجه‌گیری

پلیمرهایی که برای تولید نخ خاب استفاده می‌شوند از خانواده پلی‌اولفین‌ها یا پلی‌آمیدها هستند. پلی‌اتیلن را می‌توان متداول‌ترین پلیمر مصنوعی برای تولید نخ خاب چمن مصنوعی دانست. انواع مختلفی از پلی‌اتیلن عرضه شده‌اند، ولی برای تولید نخ چمن مصنوعی معمولا از پلی‌اتیلن کم‌چگالی خطی استفاده می‌شود. انتخاب کومونومر، پارامتر کلیدی برای دست‌یابی به مقاومت در برابر پارگی نخ نهایی است. نتایج مطالعات نشان می‌دهد، استفاده از کومونومر با طول زنجیر بلندتر (به‌عنوان مثال اکتن در برابر بوتن) موجب می‌شود تا ترک و پارگی در نخ طی تنش‌های چرخه‌ای در چرخه‌های بسیار بیشتری رخ دهد. الیاف تولیدشده از رزین‌های LLDPE با چگالی ۰/۹۱-۰/۹۲ g/cm^3 از بیشترین مقاومت در برابر پارگی برخوردارند که از شکافته‌شدن زودهنگام آن‌ها در جهت طول جلوگیری می‌کند. با کاهش چگالی رزین، مقاومت در برابر پارگی نوار لیفچه‌ای‌شده افزایش می‌یابد. همچنین، آرایش‌یافتگی مولکولی حاصل در فیلم اکسترودشده طی اکستروژن مذاب یا فرایند کشش فیلم جامد در گرم‌خانه در جهت ماشین، موجب کاهش مقاومت در برابر پارگی می‌شود. نتایج مطالعات نشان می‌دهد، هر چه چگالی پلیمر کمتر باشد، جهندگی نخ بهتر است. اما باید توجه داشت، چالش‌هایی در تولید نخ با عملکرد مطلوب از رزین LLDPE با چگالی کمتر وجود دارد. براساس پژوهش‌های انجام گرفته، کاهش جمع‌شدگی نخ طی فرایند تولید امری حیاتی است. نتایج نشان می‌دهد، کاهش چگالی رزین LLDPE از پارامترهای کلیدی در افزایش مقدار جمع‌شدگی است. ازاین رو، در صورت استفاده از پلیمر با چگالی کم برای دست‌یابی به دوام و نرمی بیشتر، بهینه‌سازی فراورش برای کاهش یا کنترل جمع‌شدگی ضروری است. مطالب پیش‌گفته درباره اثر چگالی بر خواص نخ نشان می‌دهند، لازم است توازن صحیحی در بهینه‌سازی خواص انجام شود، چرا که دست‌یابی به حداکثر عملکرد در تمام خواص به‌طور همزمان امکان‌پذیر نیست. استفاده از پلیمر با چگالی کمتر موجب افزایش ضرایب اصطکاک می‌شود. ولی لازم است، پژوهش‌های بیشتری انجام شود تا درک بهتری درباره اصطکاک بین‌سطحی پوست-پلیمر حاصل شود.

مراجع

1. *Turfgrass: Biology, Use, and Management*, Stier J.C., Horgan B.P., and Bonos S.A. (Eds), American Society of Agronomy, USA, 179-217, 2013.
2. Cheng H., Hu Y., and Reinhard M., Environmental and Health Impacts of Artificial Turf: A Review, *Environ. Sci. Technol.*, **48**, 2114-2129, 2014.
3. Artificial Grass Technology and Innovation, Available in: https://www.arturf.com/aboutus/ technology-innovation/
4. https://www.world-grass.com/fa/news/8-news-5.html
5. Kolgjini B., *Structure and Long Term Properties of Polyethylene Monofilaments for Artificial Turf Applications*, PhD dissertation, Ghent University, Ghent, Belgium, November 2012.
6. Sandkuehler P. and Torres E., Polyolefins in Artificial Turf, *International Conference on Latest Advances in High-Tech Textiles and Textile-Based Materials*, Ghent University, Ghent, Belgium, 96-102, 23-25 October, 2009.
7. Schlegel M., Advances in Polyethylene Yarn Technology, Updated Criteria for Turf Fibers, available in: http://www.isss-sportsurfacescience.org/page.asp?node=83&sec=San_Francisco _ 2014_-_Technical
8. Hongling Y., Baicun Zh., Heng L., Weiguang G., Ting W., and Weishan W., Nanosilica and Polyethylene Based Artificial Turf-Abrasion Resistance and Mechanical Properties, *Procedia Eng.*, **72**, 901-906, 2014.
9. Extrusion Technology for the Production of Artificial Turf, available in: www.plastics.gl/construction/extrusion-technology-for-the-production-of-artificial-turf/
10. Sandkuehler P., Torres E., and Allgeuer T., Performance Artificial Turf Components – Fibrillated Tape, *Procedia Eng.*, **2**, 3367-3372, 2010.
11. Sandkuehler P., Torres E., and Allgeuer T., Polyolefin Materials and Technology in Artificial Turf I: Yarn Developments, *Sports Technol.*, **3**, 52-58, 2010.
12. Hufenus R., Affolter Ch., Camenzind M., and Reinfler F., De-

sign and Characterization of a Bicomponent Melt-Spun Fiber Optimized for Artificial Turf Applications, *Macromol. Mater. Eng.*, **298**, 653–663, 2013.

13. Sandkuehler P., Martin J., Yvon E., and Chang A., Materials Science of Resiliency in Artificial Turf Yarns, available in: https://www.dow.com/webapps/lit/litorder.asp?filepath= artificialturfsolutions/pdfs/noreg/768-14101.pdf&pdf=true
14. Kolgjini B., Schoukens G., and Kiekens P., Influence of Stretching on the Resilience of LLDPE Monofilaments for Application in Artificial Turf, *J. Appl. Polym. Sci.*, **124**, 4081–4089, 2012.
15. Kolgjini B., Schoukens G., Shehi E., and Kiekens P., Bending Behaviour of LLDPE Monofilaments Depending on Cold Drawing and Composition of the LLDPEs, *Fibres Text. East. Eur.*, **21**, 23-30, 2013.
16. Ragaert K., Delva L., Van Damme N., Kuzmanovic M., Hubo S., and Cardon S, Microstructural Foundations of the Strength and Resilience of LLDPE Artificial Turf Yarn, *J. Appl. Polym. Sci.*, 2016. DOI: 10.1002/app.4408