مجله علوم و فناوری نساجی
سال پنجم، شماره ۳، شماره پیاپی ۱۶
صفحه ۲۷-۱۹، ۱۳۹۴
ISSN: ۲۱۵۱-۷۱۶۲

منسوجات با ضریب پواسون منفی

Textiles with Negative Poisson's Ratio

عسل‌السادات لولاکی، محسن شنبه*

اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی نساجی، کدپستی ۸۳۱۱۱-۸۴۱۵۶

چکیده

مواد با ضریب پواسون منفی یا مواد آگزتیک نوع غیرمتداول از مواد هستند که برخلاف مواد متداول، دستخوش ازدیاد طول عرضی در اثر کشش محوری یا جمع‌شدگی عرضی در اثر نیروی فشاری می‌شوند. تا به امروز تعداد زیادی از مواد با این خاصیت کشف، ساخته یا پیشنهاد شده‌اند. این مواد ویژگی‌های منحصر به‌فردی دارند که به جذابیت آن‌ها برای کاربردهای ویژه منجر شده است. در سال‌های اخیر کالاهای نساجی آگزتیک از جمله نخ، پارچه و منسوجات سه‌بعدی آگزتیک بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. تاکنون دو ساختار کلی برای نخ آگزتیک پیشنهاد شده است که می‌توانند به تنهایی یا در بافت پارچه‌های تاری-پودی به‌کار روند. با وجود این، پژوهش‌های بسیار محدودی در زمینه پارچه‌های آگزتیک تاری-پودی انجام شده است. ساختارهای حلقوی متنوعی با خاصیت آگزتیک ارائه شده است که با استفاده از نخ‌های غیرآگزتیک بافته شده است. این پارچه‌ها در بازه محدودی از ازدیاد طول کششی خاصیت آگزتیک دارند. تعدادی از منسوجات سه‌بعدی آگزتیک نیز پیشنهاد شده است که می‌توانند کاربردهای بسیار مؤثری داشته باشند. با تلاش پژوهشگران، این باور وجود دارد که در آینده منسوجات با ضریب پواسون منفی بیشتری با کاربردهای متنوع، ارائه شوند.

کلمات کلیدی
مواد آگزتیک،
ضریب پواسون منفی،
منسوجات آگزتیک

مقدمه

منهای نسبت کرنش جانبی به کرنش محوری را ضریب پواسون می‌نامند و آن را با حرف یونانی ν نشان می‌دهند. اغلب مواد ضریب پواسون مثبت دارند که به معنای جمع‌شدگی عرضی هنگام کشش محوری و ازدیاد طول عرضی هنگام فشار است. ضریب پواسون مواد کشسان خطی، همسانگرد و پایدار، نمی‌تواند کمتر از ۱- و بیشتر از ۰/۵ باشد. البته به شرط آنکه مدول یانگ (E)، مدول برشی (G) و مدول حجمی (K)، مقادیر مثبت داشته باشند. بیشتر مواد ضریب پواسونی بین صفر تا ۰/۵- دارند. موادی که به‌خوبی فشرده شوند، در محدوده تغییرشکل‌های کوچک، می‌توانند ضریب پواسونی دقیقاً برابر با ۰/۵ داشته باشند. لاستیک ضریب پواسونی نزدیک به ۰/۵ دارد. چوب پنبه ضریب پواسونی نزدیک به صفر دارد که نشان‌دهنده انبساط عرضی بسیار اندک آن هنگام فشرده‌شدن است[۱]. در مقابل، مواد آگزتیک (auxetic) موادی هستند که ضریب پواسون منفی دارند. زمانی که این مواد کشیده شوند، در راستای عمود بر راستای اعمال نیرو، ضخیم‌تر می‌شوند و هنگام فشرده‌شدن در راستای طولی، دچار جمع‌شدگی عرضی می‌شوند. در دهه ۱۸۰۰ میلادی، Voigt و همکاران [۲] خاصیت آگزتیک یا ضریب پواسون منفی را در برخی از مواد کشف کردند. در آن زمان مواد آگزتیک فقط به مواد طبیعی محدود می‌شد و چندان مورد توجه نبود. در سال ۱۹۸۷، Lakes [۳] برای اولین

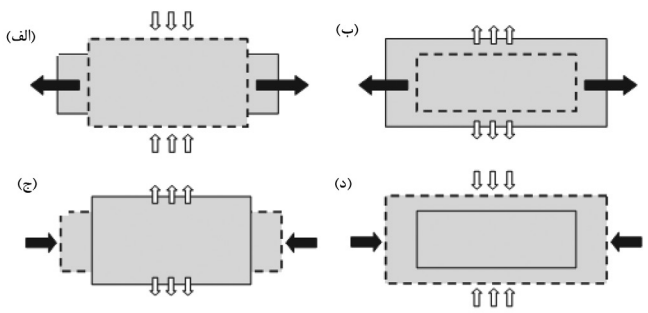
* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار: mshanbeh@cc.iut.ac.ir

بار ساختار اسفنجی با خاصیت آگزتیک را معرفی کرد که به‌راحتی با استفاده از فرایند فشرده‌سازی سه‌گانه و گرمادهی قابل ساخت بود. مطالعه وی نشان داد، مواد آگزتیک به شکل بشرساخته قابل دستیابی هستند. پس از آن دانشمندان بیشتری شروع به مطالعه درباره مواد آگزتیک کردند. با پیشرفت و توسعه مواد آگزتیک، این مواد از محدوده مواد همسانگرد و مقیاس ماکرو پا فراترگذاشته و به هر دو دسته مواد همسانگرد و ناهمسانگرد و از مقیاس‌های ماکرو تا نانو گسترش پیدا کرده است. رشد و توسعه مواد آگزتیک در سال‌های اخیر بسیار سریع بوده است. تعداد بسیار زیادی از مواد آگزتیک کشف، ساخته یا پیشنهاد شده است. ویژگی‌های منحصر به فرد مواد آگزتیک، این مواد را برای کاربرد در زمینه‌های متنوع از جمله محافظت شخصی، کاربردهای نظامی، زمینه پزشکی و استفاده در صنایع نساجی و هوا فضا مناسب کرده است. با وجود اینکه کاربردهای بسیاری برای این مواد پیشنهاد شده است، کاربردهای واقعی مواد آگزتیک هنوز در مراحل اولیه ارائه است، بر این اساس باید تلاش شود تا مواد آگزتیک کاربردی، بهبود یابد و توسعه پیدا کند. هدف این مقاله، مروری بر مواد و کالاهای نساجی آگزتیک، کاربردهای متنوع منسوجات آگزتیک و نیز ارائه آخرین دستاوردهای پژوهشگران در این زمینه است.

مواد آگزتیک

مواد آگزتیک می‌توانند به شکل تک‌مولکول یا ساختاری ویژه از جسمی قابل رؤیت باشند. واژه آگزتیک از کلمه یونانی آگزتیکاز به معنای چیزی که تمایل به افزایش و رشد دارد، مشتق شده است و ریشه آن کلمه آگزسیز به معنای افزایش است. این لغات را پروفسور Evans از دانشگاه اکستر ابداع کرده است. Evans و همکاران، در سال ۱۹۹۱ برای بیان خاصیت ضریب پواسون منفی واژه آگزتیک را مطرح کردند که امروزه به‌طور متداول استفاده می‌شود. اولین نمونه از مواد آگزتیک در سال ۱۹۸۷ در مجله Science با عنوان ساختارهای اسفنجی با ضریب پواسون منفی، را Lakes از دانشگاه لوا منتشر کرد. در شکل ۱ عملکرد مواد متداول و مواد آگزتیک زیر کشش و فشار نشان داده شده است.

مواد آگزتیک، خواص ویژه‌ای در مقایسه با مواد متداول از جمله کاهش مدول یانگ، افزایش مدول برشی، افزایش مقاومت در برابر برخورد، قابلیت انحنای دوگانه، افزایش چقرمگی شکست و مقاومت در برابر ترک، افزایش قابلیت جذب انرژی و قابلیت نفوذپذیری متغیر دارند. [۴].



شکل ۱- عملکرد مواد متداول و آگزتیک زیر کشش و فشار: (الف) و (ج) مواد متداول و (ب) و (د) مواد اگزتیک[۵].

مواد آگزتیک طبیعی دسته‌ای از مواد آگزتیک هستند که به‌طور طبیعی ایجاد شده‌اند، این مواد بیش از صد سال است که کشف شده‌اند. امروزه مواد آگزتیک طبیعی بسیاری بررسی شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به پوست‌ها[۵،۶]، سرامیک‌ها[۷]، گرافیت[۸]، فلزات[۹] و زئولیت‌ها[۱۰] اشاره کرد.

مواد آگزتیک پلیمری دسته دیگری از مواد آگزتیک با طراحی ویژه هستند که ساختاری درشت‌مولکولی یا ماکروسکوپی با رفتار آگزتیک دارند. تا به امروز، مواد پلیمری آگزتیک به شکل‌های مختلف اسفنج، لیف و کامپوزیت تولید شده است. اولین اسفنج آگزتیک بشرساخته اسفنج پلی‌یورتان با ضریب پواسون نزدیک به ۰/۷- بود که Lakes [۳] در سال ۱۹۸۷ با استفاده از فرایند فشرده‌سازی سه‌گانه و گرمادهی تولید کرد. پس از آن، Chan و Evans[۱۱] کیفیت اسفنج‌های آگزتیک را با تبدیل کردن فشرده‌سازی سه‌گانه به سه مرحله، بهبود دادند. بدین ترتیب که در هر مرحله فقط در یک جهت فشار اعمال می‌شود. این روش برای تولید اسفنج‌های آگزتیک با ضریب پواسون منفی بزرگ‌تر استفاده شد. در پژوهش‌های انجام شده، بیشترین ضریب پواسون ۰/۸۲- بود.

در تولید مواد آگزتیک به شکل سیلندر محدودیت‌هایی وجود دارد. تا سال ۲۰۰۰ پژوهشگران موفق به تولید الیاف آگزتیک نشدند تا اینکه Alderson و Simkins توانستند با استفاده از روشی که برپایه مذاب‌ریسی استوار بود، الیاف پلی‌پروپیلن با خاصیت آگزتیک تولید کنند [۱۲]. پس از آن روش گرمایی جدید برپایه مذاب‌ریسی ارائه شد که طی آن الیاف پلی‌پروپیلن آگزتیک با ضریب پواسون نزدیک به ۰/۶- تولید شد [۱۳]. در ادامه الیاف نایلون آگزتیک [۱۴] و الیاف پلی‌استر آگزتیک با ضریب پواسونی بین ۰/۶۵- تا ۰/۷۵- تولید شد [۱۵].

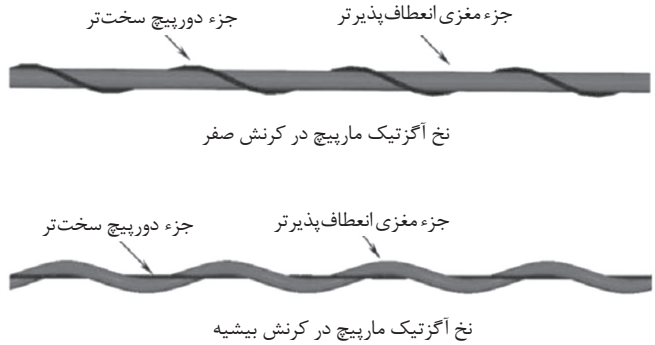
از مشکلات بزرگ مواد آگزتیکی با ساختار سلولی، مدول یانگ کم این مواد است که به محدودیت کاربرد آن‌ها منجر می‌شود[۱۸-۱۶]. راهی مؤثر برای افزایش مدول یانگ این مواد، ساخت کامپوزیت‌های آگزتیک از مواد آگزتیک است. در سال ۱۹۸۵،کامپوزیت‌های طراحی شده با سلول متناوب شش‌ضلعی وارون با ضریب پواسون منفی معرفی شد[۱۹]. کامپوزیت‌های آگزتیک به دو روش به‌دست می‌آیند. در روش اول کامپوزیت آگزتیک با طراحی ویژه ساختار داخلی کامپوزیت خاصیت آگزتیک پیدا می‌کند و در روش دوم کامپوزیت مدنظر به واسطه تقویت با مواد آگزتیک ضریب پواسون منفی به‌دست می‌دهد.

کالاهای نساجی آگزتیک

در سال‌های اخیر کالاهای نساجی آگزتیک بسیار مورد توجه قرار گرفته است.

نخ‌های آگزتیک

نخ‌های آگزتیک را می‌توان از الیاف غیرآگزتیک و تنها با استفاده از ساختار ویژه نخ به‌دست آورد. تا امروز دو ساختار کلی برای تولید نخ آگزتیک پیشنهاد شده است. ساختار اول یک نخ دوجزئی است و از پیچیدن دو رشته (filament) غیرآگزتیک با سختی متفاوت به دور یکدیگر به‌دست می‌آید. بدین ترتیب که رشته با سختی کمتر به‌طور مستقیم در مرکز نخ



شکل۲- نخ آگزتیک پیش و پس از کشش[۲۲].

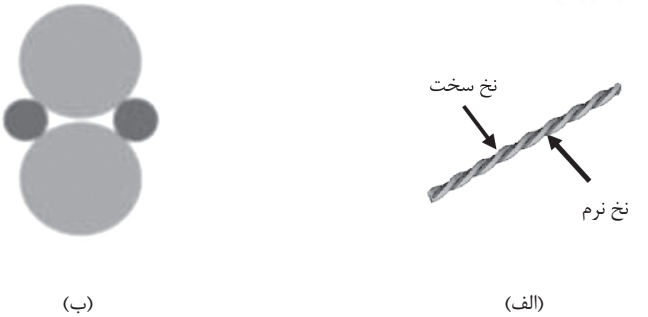
قرار می‌گیرد و رشته با سختی بیش‌تر در مسیر مارپیچ به دور آن می‌پیچد. این نخ رشته‌ای دورپیچ در مقایسه با رشته مغزی، مدول کشسانی بیشتر، قطر کمتر و تغییرشکل کمتری دارد. زمانی‌که این نخ زیر کشش قرار گیرد، رشته دورپیچ مستقیم شده و رشته مغزی طی یک مسیر مارپیچ تغییرشکل می‌دهد به عبارت دیگر، به‌تدریج موقعیت رشته مغزی و رشته دورپیچ با هم تعویض می‌شود و در نهایت در کرنشی مشخص، ضریب پواسون این نخ منفی می‌شود (شکل۲). در این نخ افزایش نسبت قطر رشته مغزی به رشته دورپیچ، کاهش زاویه مارپیچ رشته دورپیچ و افزایش مدول کششی رشته دورپیچ به افزایش خاصیت آگزتیک نخ منجر می‌شود. در پژوهش‌های انجام شده روی این نخ‌ها کمترین مقدار ضریب پواسون منفی برابر با ۲/۰۱- به‌دست آمد[۲۰،۲۱].

ساختار نخ مارپیچ آگزتیک مزبور دو مشکل عمده دارد. اولین مشکل آن نامنظم‌بودن تاب نخ دورپیچ به دلیل لغزش آن روی سطح نخ مغزی و دومین مشکل آن استحکام ساختاری کم نخ به سبب شل‌شدن نخ دورپیچ پس از کشش است. بنابراین Ge و همکاران برای رفع عیوب مزبور از ساختار نخ آگزتیک، یک ساختار جدید نخ چندلا شده آگزتیک ارائه و بررسی کردند. شکل۳، ساختار این نخ را به‌طور کلی نشان می‌دهد که از دو نخ نرم و دو نخ سخت با قطرهای متفاوت تشکیل شده است. این دو نوع نخ به‌طور متناوب و در راستای محوری نخ قرار گرفته و به هم تابانده می‌شوند. در این ساختار جدید، تاب نخ به‌سادگی قابل کنترل بوده و در نتیجه نظم تاب در سرتاسر ساختار نخ بهبود می‌یابد. زمانی که این نخ زیر کشش محوری قرار گیرد، دو نخ سخت که تغییرشکل محوری نسبتاً کمتری دارند، به قسمت درونی ساختار نخ آگزتیک مهاجرت می‌کنند. این مهاجرت نخ‌های نرم را به سمت بیرونی ساختار نخ آگزتیک حرکت داده و به افزایش اندازه سطح مقطع عرضی نخ آگزتیک و در نتیجه منفی‌شدن ضریب پواسون منجر می‌شود[۲۳].

پارچه‌های حلقوی آگزتیک

پارچه‌های حلقوی آگزتیک را می‌توان با نخ غیرآگزتیک و با استفاده از ساختار ویژه پارچه تولید کرد.

Ugbolue و همکاران در سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۲، ساختارهای آگزتیک حلقوی تاری با نخ این‌لی پیشنهاد کردند که در آن حلقه‌های زنجیری

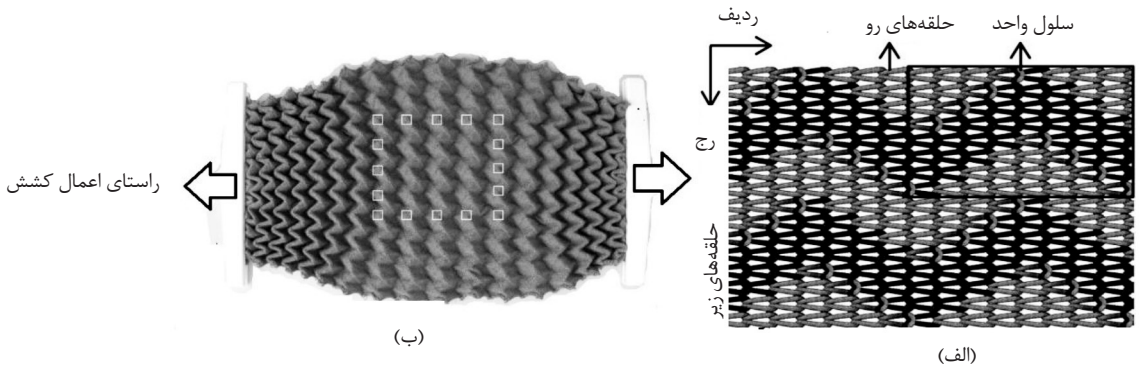


شکل۳- ساختار جدید نخ آگزتیک چندلا شده: (الف) نمای جانبی نخ و (ب) سطح مقطع نخ.

ساختار پایه را تشکیل می‌داد (شکل ۴). در این ساختارها، نخ این‌لی یک شیب کوچک نسبت به راستای افقی (راستای رج‌ها) دارد. اثر آگزتیک این پارچه‌ها زمانی ظاهر می‌شود که شیب مزبور نسبت به افق صفر شود. نتایج حاصل از این پژوهش‌ها نشان داد، پارامترهای اثرگذار بر ضریب پواسون منفی نمونه عبارت‌اند از نوع نخ، مقدار کرنش و جابه‌جایی سلول واحد که به تعداد رج‌های زنجیری بستگی دارد. افزون بر این، موقعیت ساختاری نخ این‌لی نیز به مقدار اندکی بر خاصیت آگزتیک اثرگذار است. بیشترین خاصیت آگزتیک مربوط به نمونه بافته شده با ۳ رج زنجیری بود که کمترین مقادیر ضریب پواسون آن در راستای رج و ردیف به ترتیب برابر با ۰/۸۶- و ۰/۲۴- بود[۲۶-۲۴].

Liu و همکاران در سال ۲۰۱۰ ساختار حلقوی پودی آگزتیک سه‌بعدی را براساس ساختار پرل با آرایش زیگزاگ حلقه‌های رو و زیر ارائه کردند. شکل ۵-الف طرح بافت ساختار و شکل ۵-ب نمونه بافته شده را زیر کشش نشان می‌دهد. کمترین مقدار ضریب پواسون منفی ۰/۵- به‌دست آمد[۲۷].

شکل ۴- ساختار حلقوی تاری با نخ این‌لی قابل بافت با دو میله راهنما [۲۴].



شکل ۵- (الف) طرح بافت ساختار آگزتیک و (ب) نمونه کشیده شده در راستای رج.

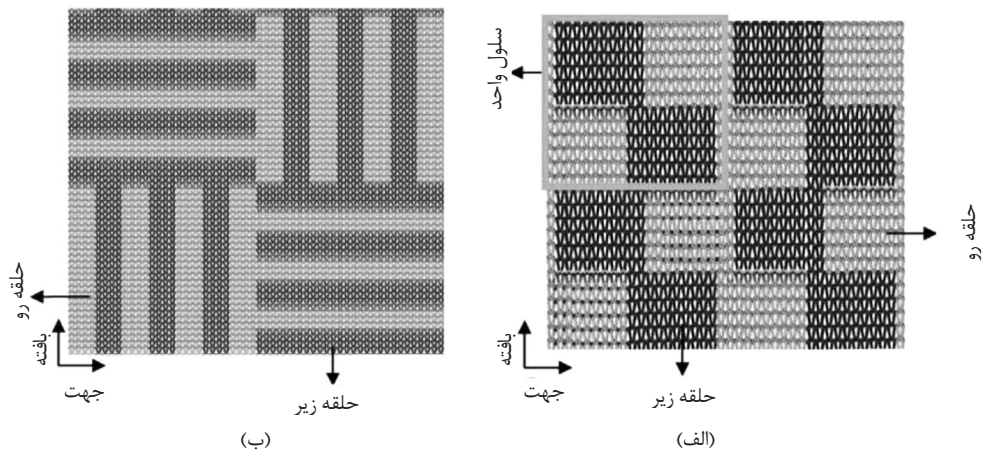
Hu و همکاران در سال ۲۰۱۱ چند نمونه آگزتیک حلقوی را با استفاده از ماشین بافندگی تخت‌باف تولید کردند. اولین نمونه‌ها براساس ساختارهای تاشو بود که در آن‌ها خاصیت آگزتیک با بازشدن لای پارچه در اثر کشش به‌دست می‌آمد. شکل ۵ دو ساختار تاشو را نشان می‌دهد که از شکل‌گیری متناوب حلقه‌های رو و زیر به شکل مستطیلی (۵-الف) و در شکل باریکه‌های افقی و عمودی (۵-ب) تشکیل می‌شود. این ساختارها حین فرایند بافت به شکل صفحه‌ای هستند، اما پس از بافت به دلیل عدم تعادل میان حلقه‌های رو و زیر، ساختار پارچه تا می‌خورد. کمترین مقدار ضریب پواسون منفی در نمونه (الف) برابر با ۰/۱۴- و در نمونه (ب) در راستای رج و ردیف به ترتیب برابر با ۰/۴۲- و ۰/۱۸- بود.

نمونه بعدی براساس ساختارهای دوران‌کننده مستطیل‌شکل تولید شد (شکل۶). در این ساختارها هنگام کشش، چرخش آزادانه واحدهای مستطیلی پیرامون رئوس خود به اثر آگزتیک منجر می‌شود. کمترین مقدار ضریب پواسون منفی در این نمونه برابر با ۰/۵- بود.

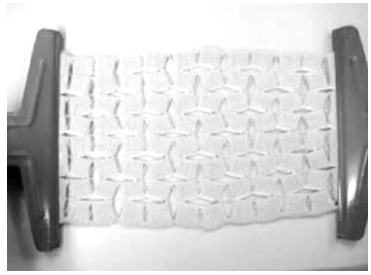
نمونه بعدی براساس ساختارهای مقعر تولید شد. شکل ۷ این ساختار را زیر کشش نشان می‌دهد. کمترین مقدار ضریب پواسون منفی در این ساختار برابر با ۰/۷- بود[۲۸].

پارچه‌های تاری-پودی اگزتیک

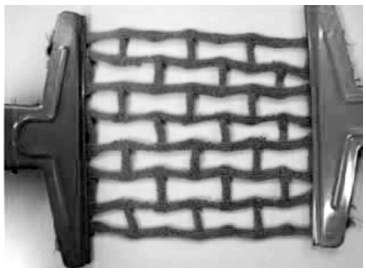
در پارچه‌های تاری-پودی به دلیل محدودیت‌هایی که در بافت و ساختار پارچه وجود دارد، برای دستیابی به خاصیت آگزتیک از نخ آگزتیک در ساختار پارچه استفاده می‌کنند. Miller و همکاران در سال ۲۰۰۹ ساختار کامپوزیتی آگزتیک را با استفاده از نخ و پارچه آگزتیک تولید کردند. نخ آگزتیک به‌کار رفته در این ساختار، نخ مارپیچ آگزتیک با ضریب پواسون ۲/۱- بود که به‌عنوان پود در بافت پارچه آگزتیک تاری-پودی با طرح تافته استفاده شد. هنگامی که این پارچه زیر کشش قرار گیرد، نخ‌ها روی هم افتاده و اثر آگزتیک خارج از صفحه رخ می‌دهد. به عبارت دیگر، با کشش پارچه در راستای طولی آن، ضخامت پارچه افزایش می‌یابد. در چنین شرایطی ضریب پواسون صفحه‌ای پارچه مثبت و برابر با ۰/۰۶ بود. برای جلوگیری از اثر آگزتیک خارج از صفحه، نمونه‌ها میان دو صفحه شیشه‌ای با فاصله مشخص قرار داده شد. در این شرایط ضریب پواسون صفحه‌ای پارچه در اثر کشش برابر با ۰/۱- به‌دست آمد. بنابراین، چنین ساختارهایی در شرایطی می‌توانند آگزتیک باشند. در ادامه این پارچه به شکل تک و دولایه در ساختار کامپوزیتی استفاده شد. کامپوزیت تک‌لایه زیر کشش، مشابه پارچه تاری-پودی ضریب پواسون مثبت با مقدار ۰/۲۷داشت. این



شکل ۶- (الف) پارچه آگزتیک تولید شده از شکل‌گیری متناوب حلقه‌های رو و زیر به شکل مستطیل و (ب) پارچه آگزتیک تولید شده از شکل‌گیری متناوب حلقه‌های رو و زیر به شکل باریکه‌های افقی و عمودی.



شکل ۷- ساختار آگزتیک با واحدهای مستطیلی دوران‌کننده زیر کشش.



شکل ۸- ساختار شش‌ضلعی مقعر.

موضوع نشان‌دهنده آن است که احتمالاً قید تحمیل شده توسط ماتریس برای جلوگیری از اثر روی هم افتادن خارج از صفحه الیاف کافی نبوده است. اما کامپوزیت چندلایه زیر کشش، برخلاف کامپوزیت تک‌لایه، خاصیت آگزتیک دارد و مقدار ضریب پواسون آن برابر با ۰/۱- است[۲۹].

Wright و همکاران در سال ۲۰۱۲، دو پارچه تافته تاری-پودی یک‌لا و دولا را با استفاده از نخ آگزتیک مارپیچ تولید کردند. نتایج نشان داد، پارچه یک‌لا زیر کشش محوری ضریب پواسون مثبت و خاصیت آگزتیک خارج از صفحه دارد. علت این موضوع روی هم‌افتادن نخ‌های تار و درنتیجه ضخیم‌ترشدن پارچه است. این در حالی است که پارچه دولا در محدوده کرنش ٪۱۵ تا ٪۴۰، اثر آگزتیک داخل صفحه داشته و در کرنش ٪۳۲ به بیشینه مقدار منفی یعنی ۰/۱- می‌رسد[۳۰].

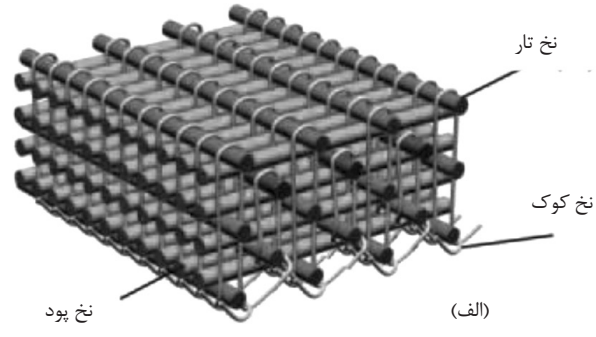
منسوجات سه بعدی آگزتیک

Ge و همکاران در سال ۲۰۱۳ ساختاری سه‌بعدی طراحی کردند که زیر نیروی فشاری خاصیت آگزتیک پیدا کند. این ساختار که در شکل ۸ نشان داده شده است، سه دسته نخ را دربر می‌گیرد، دسته نخ‌های تار و پود که به شکل لایه‌لایه روی هم قرار گرفته‌اند و بدنه اصلی ساختار را تشکیل می‌دهند و دسته نخ‌های حلقه‌ای که به منظور اتصال لایه‌ها و پایداری ساختار استفاده شده است. شکل ۹ نمونه سه‌بعدی آگزتیک تولید شده را نشان می‌دهد. هنگام فشردن ساختار در راستای ضخامت، فضای خالی موجود میان نخ‌های تار به تجعد نخ‌های پود و جمع‌شدن ساختار در راستای این نخ‌ها منجر می‌شود. اما، نخ‌های پود زیر فشار به‌طور مستقیم باقی‌مانده و خم نمی‌شوند. بدین ترتیب ضریب پواسون ساختار در راستای پود منفی و در راستای تار صفر می‌شود. نتایج نشان داد، ساختار سه‌بعدی پیشنهاد شده خاصیت آگزتیک دارد و کمترین مقدار ضریب پواسون حدود ۰/۲- به‌دست آمد. همچنین، خاصیت آگزتیک با افزایش نسبت قطر نخ تار به نخ پود و کرنش فشاری اعمال شده، افزایش می‌یابد.

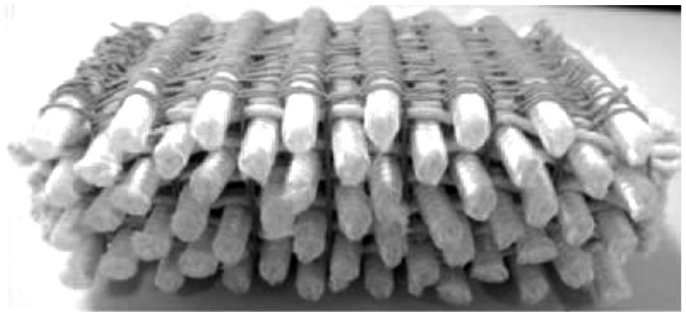
در ادامه Ge و همکاران اثر پارامترهای مختلف از جمله شعاع نخ تار و پود، فاصله بین دو نخ تار مجاور و دو نخ پود مجاور در ساختار و نسبت بین مدول کششی نخ تار و پود بر ضریب پواسون ساختار را بررسی کردند. نتایج حاصل نشان داد، افزایش نسبت شعاع و نسبت مدول دو نخ و کاهش فاصله بین دو نخ تار مجاور به افزایش اثر آگزتیک منجر می‌شود. ضمن آنکه فاصله میان دو نخ پود مجاور اثر قابل ملاحظه‌ای بر رفتار آگزتیک ساختار ندارد[۳۴-۳۱].

Wang و همکاران در سال ۲۰۱۴ پارچه آگزتیک سه‌بعدی متشکل از دو لایه خارجی را با ساختار پارچه حلقوی تاری ارائه کردند که به وسیله نخ پلی‌استر تک‌رشته‌ای به‌هم متصل شده بود (شکل ۱۰). کمترین مقادیر ضریب پواسون منفی این ساختار در راستای رج و ردیف به ترتیب برابر با ۰/۲۴- و ۰/۷- به‌دست آمد[۳۵].

در ادامه Wang و همکاران، رفتار تغییرشکل کششی پارچه اسپیسر حلقوی تاری آگزتیک مزبور را با استفاده از تحلیل اجزای محدود بررسی کردند. پارچه اسپیسر حلقوی تاری آگزتیک، نوع خاصی از پارچه اسپیسر است که فقط ساختار آخرین لایه آن ضریب پواسون منفی دارد. تصویرلایه خارجی با استفاده از نرم‌افزار MATLAB پردازش و نقاط خارجی یک سلول واحد از آن استخراج شد و با استفاده از تکرار سلول واحد، مدل هندسی ساختار مورد نیاز برای تحلیل اجزای محدود در راستای رج و ردیف ساخته شد. سپس، نمونه پارچه اسپیسر آگزتیک با ضخامت ۷/۹ mm روی ماشین بافندگی حلقوی تاری تولید



شکل ۹- ساختار منسوج سه‌بعدی آگزتیک: (الف) ساختار درموقعیت اولیه و (ب) ساختار زیر تنش فشاری.

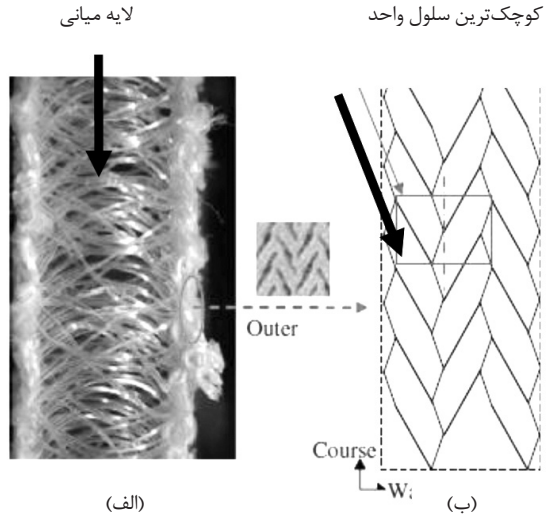


شکل ۱۰- نمونه سه‌بعدی آگزتیک تولید شده.

شد. در انتها مشخص شد، نتایج به‌دست آمده از تحلیل اجزای محدود، روندی مشابه با نتایج به‌دست آمده از آزمون تجربی دارد. ضمن آنکه با کشش نمونه در راستای رج، مقادیر ضریب پواسون تجربی در محدوده کرنش ٪۵ تا ٪۳۰ از ۲- تا ۰/۹- با کشش نمونه در راستای ردیف، مقادیر ضریب پواسون تجربی در محدوده کرنش ٪۵ تا ٪۷۰، از ۰/۱۵- تا ۰/۵+ افزایش می‌یابد[۳۶].

کاربردهای کالاهای نساجی آگزتیک

این کالاها به سبب ویژگی‌های نامتداول، کاربردهای متنوعی پیدا کرده‌اند. از کالاهای نساجی آگزتیک به شکل لیف یا نخ به روش‌های مختلفی می‌توان استفاده کرد، به‌عنوان مثال، کامپوزیتی را درنظر بگیرید که با الیاف آگزتیک تقویت شده است[۳۷]. زمانی‌که این الیاف زیر نیروی کششی قرار می‌گیرند، به سبب خاصیت آگزتیکی که دارند، به شکل عرضی انبساط یافته و در نتیجه در ساختار کامپوزیت قفل می‌شوند. این موضوع به‌طور مؤثر از خروج الیاف از ساختار کامپوزیت جلوگیری می‌کند. بنابراین، خروج الیاف از ساختار کامپوزیت، که مشکل متداول درکامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف محسوب می‌شود، به‌طور مؤثرکنترل می‌شود.



شکل ۱۱- ساختار اگزتیک سه‌بعدی: (الف) سطح مقطع ساختار و (ب) ساختار هندسی لایه خارجی.

به‌طورکلی، در سازه‌های کامپوزیتی و ساختمانی به منظور کاهش وزن یا افزایش ضریب امنیت، از الیاف به‌عنوان تقویت‌کننده استفاده می‌شود. با توجه به موارد مزبور، استفاده از الیاف آگزتیک برای چنین کاربردهایی مزایای بسیاری دارد. در نهایت اینکه ساختار حاصل در یک استحکام ثابت، سبک‌تر یا در وزن ثابت، مستحکم‌تر خواهد بود[۳۸].

مثال دیگر پرده‌های ضدانفجار آگزتیک است که روی ماشین بافندگی تاری-پودی و با استفاده از نخ آگزتیک تولید می‌شود[۳۹]. با رسیدن موج انفجار (موج فشار) به پرده، ساختار منسوج باز می‌شود، بنابراین تکه شیشه‌هایی‌که پس از موج انفجار به پرده می‌رسند، می‌توانند به وسیله این پرده گرفته شوند. موضوع مهمی‌که در سال‌های اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده است، همین تکه شیشه‌هایی است که در اثر انفجار در فضا پرتاب می‌شود، زیرا بیش از ٪۸۰ از تلفات و خسارات ناشی از انفجار، به وسیله این تکه شیشه‌ها ایجاد می‌شود. پرده‌های ضدانفجار به‌طور مؤثری تلفات و خسارات ناشی از این تکه شیشه‌ها را کاهش می‌دهند. انفجار، انرژی بسیار زیادی را با خود حمل می‌کند. مشکلی که با پرده‌های ضدانفجار متداول وجود دارد آن است که هنگام رسیدن موج انفجار به آن، کشیده شده و سوراخ‌ها باریک‌تر می‌شود که این موضوع از ردشدن موج انفجار از پرده جلوگیری می‌کند و در نتیجه پرده پاره می‌شود. بنابراین، دیگر عملکرد مناسبی در مقابل جمع‌آوری تکه شیشه‌ها نخواهد داشت. ایده استفاده از منسوج آگزتیک برای چنین کاربردی بر این پایه استوار است که هنگام رسیدن موج انفجار به پرده، فشار رو به جلوی ناشی از موج انفجار با بازترشدن ساختار پرده به سبب خاصیت آگزتیک آن، از پرده رد می‌شود. اما، تکه شیشه‌های پرتاب شده به وسیله پرده گرفته می‌شوند[۳۸].

در زمینه پزشکی می‌توان به باندهای هوشمند اشاره کرد[۳۷]. این باندها حامل دارو هستند. هنگامی‌که این باندها روی زخم بسته شوند، ساختار باند باز شده و بدین ترتیب داروی موجود در آن رها می‌شود. به مرور زمان و با بهبود زخم، تورم آن کاهش یافته و در پی آن ساختار باند بسته می‌شود و در نتیجه رهاسازی دارو متوقف می‌شود.

مواد آگزتیک به سبب قابلیت جذب انرژی زیاد و شکل‌پذیری مناسب، می‌توانند به‌عنوان لباس‌ها و تجهیزات محافظتی به‌کار روند. استفاده از لباس‌ها و تجهیزات محافظ برای ورزش‌های خطرناکی مثل دوچرخه‌سواری، موتورسواری، مسابقات سرعت و اسکیت لازم و ضروری است. در این ورزش‌ها بخش‌هایی از بدن مثل آرنج و زانو، بیشتر در معرض آسیب هستند. بنابراین، معمولاً از پدهای محافظ در این نواحی استفاده می‌شود. پدهای محافظی که امروزه در دسترس هستند، از اسفنج‌هایی ساخته شده‌اند که نفوذپذیری کمی دارند. پارچه‌های آگزتیک سه‌بعدی (پارچه‌های فاصله اندازآگزتیک)، به علت خواص راحتی مناسب‌تری که نسبت به اسفنج‌های متداول دارند، می‌توانند جایگزین مناسبی برای این مواد باشند. همچنین، شکل‌گیری گنبدی‌شکل این پارچه‌ها زیر خمش، این امکان را مهیا می‌کند که به‌راحتی شکلی متناسب با شکل آرنج یا زانو به خود بگیرند و درنتیجه ضمن بهبود عملکرد محافظتی خود، آزادی حرکت را برای این نواحی فراهم کنند[۴].

دستکش‌های ضدلرزش ساخته شده از اسفنج‌های پلی‌یورتان، با وجود

کارایی خوب، راحتی‌پوشش ندارند و در اثر پوشیدن طولانی مدت، ایجاد حساسیت می‌کنند. مشابه لباس‌های محافظ، جایگزین‌کردن این اسفنج‌ها با پارچه‌های آگزتیک سه‌بعدی، راه حل مناسبی برای حل این مشکل است[۴۰].

مواد آگزتیک گزینه مناسبی برای کاربرد در جلیقه‌های ضدگلوله هستند. نیروی گلوله با پخش‌شدن در راستای عرضی جلیقه آگزتیک، کاهش می‌یابد[۴۱].

استفاده از پارچه آگزتیک برای تولید لباس بچه، می‌تواند کاربرد دیگر این مواد باشد. رشد کودکان بسیار سریع است و لباس‌هایی‌که فقط چند ماه از خریدن آن می‌گذرد، برای آن‌ها تنگ و نامناسب می‌شود. استفاده از پارچه آگزتیک برای تولید لباس بچه، می‌تواند به‌طور مؤثر حلال این مشکل باشد. پارچه‌های آگزتیک با ساختار تاشو، قابلیت انبساط در هر دو راستای طولی و عرضی را دارند که این موضوع لباس را برای مدت زمان طولانی‌تری مناسب کودک می‌کند، بنابراین والدین دیگر مجبور به خرید مکرر لباس برای کودکانشان نخواهند بود و ضمن صرفه‌جویی در هزینه‌ها، کودکان مجبور به پوشیدن لباس‌های نامناسب نخواهند بود[۴].

کاربرد دیگر این پارچه‌ها در تولید لباس‌های بارداری است. پارچه‌هایی که به‌طور متداول برای تولید لباس بارداری استفاده می‌شود، پارچه‌های کشسان هستند که با بزرگ‌شدن شکم مادر فشار وارده از طرف این پارچه‌ها بر شکم بیشتر و بیشتر شده و این موضوع می‌تواند برای مادر ایجاد ناراحتی کند. از آنجا که پارچه آگزتیک به‌طور طبیعی شکل گنبدی به خود می‌گیرد و با بزرگ‌شدن شکم مادر در هر دو راستا منبسط می‌شود، استفاده از پارچه آگزتیک برای تولید این لباس‌ها می‌تواند بسیار مناسب باشد، زیرا ضمن انبساط در هر دو راستا، شکلی متناسب با شکل شکم به خود می‌گیرد و بدین ترتیب فشاری بر شکم مادر وارد نمی‌کند[۴].

کاربرد دیگر این مواد می‌تواند در کمربندهای ایمنی باشد. هنگام تصادف، سرنشین معمولاً به سمت جلو رانده می‌شود. در چنین شرایطی اگر کاهش سرعت بسیار زیاد باشد، نیروی وارده نیز بسیار زیاد خواهد بود. کمربند ایمنی در تلاش برای مقابله با این حرکت، مشابه نوار کشسان کشیده شده و باریک‌تر می‌شود. این موضوع دقیقاً با چیزی که در چنین موقعیت بحرانی مورد نیاز است، در تضاد است. زیرا، با باریک‌ترشدن نوار، نیروی وارد شده در سطح کوچک‌تری متمرکز می‌شود. این موضوع در افراد بزرگسال سالم می‌تواند آسیب‌های سطحی اما قابل ملاحظه‌ای را ایجاد کند. اما، در افراد میان‌سال، زنان باردار و کودکان، جراحت‌های وارد شده جدی‌تر خواهد بود. این درحالی است که کمربندهای آگزتیک در چنین موقعیتی پهن‌تر شده و در نتیجه نیروی وارد شده در سطح بزرگ‌تری پخش می‌شود که در نهایت این موضوع جراحت‌های وارد شده را کاهش می‌دهد[۳۸].

در سازه‌های کامپوزیتی و ساختمانی، برای کنترل و ارزیابی مداوم استحکام سازه، از حسگرهای هوشمند استفاده می‌شود. به‌طور متداول حسگرهای الیاف نوری بدین منظور استفاده می‌شوند. مشکلی که در این حسگرها وجود دارد آن است که حساسیت آن‌ها برای اندازه‌گیری جابه‌جایی‌ها در مواد شکننده‌ای مثل بتن، چندان مناسب نیست، ضمن اینکه محدودیت‌های دیگری نیز دارند. حسگرهای جدیدی که ارائه شده است، حسگرهای آگزتیک هستند که ضمن دقت سیگنال زیاد، مزایای دیگری نیز به همراه دارند که از آن جمله می‌توان به هزینه کم، وزن سبک‌تر، افزایش قابلیت اطمینان و اختلال سیگنال کم اشاره کرد[۳۸].

کاربرد دیگر حسگرهای آگزتیک در لباس‌های هوشمند است که اغلب از آن برای بررسی حرکات بدن استفاده می‌شود. این حسگرها می‌توانند به شکل‌های متداول لباس‌های پوشیدنی یا به شکل زانو بند و مچ بند استفاده شوند[۳۸].

کاربرد دیگر این مواد در نوارهای بسته‌بندی است. مقدار شلی و سفتی این نوارها از موارد بسیار مهم است که باید به آن توجه شود. اگر نوار خیلی شل باشد، ممکن است باز شود، یا بار را رها کند که این موضوع مشکلات خود را به دنبال خواهد داشت و اگر خیلی سفت باشد، ممکن است، به بار آسیب برساند یا اینکه خود پاره شود. بنابراین برای اجتناب از مشکلاتی که در پی کشش نامناسب ایجاد می‌شود، تسمه‌های آگزتیک با قابلیت تغییر رنگ توسعه پیدا کرد. این تسمه‌ها هنگام سفت‌شدن تغییر رنگ پیدا می‌کنند و در کششی بهینه، رنگ مشخصی پیدا می‌کنند. بنابراین اگر کشش از حد بهینه تجاوز کند، تغییر رنگ ایجاد شده مصرف‌کننده را از این اتفاق آگاه می‌کند[۳۸].

کاربردهای دیگری نیز برای این مواد مطرح می‌شود که از جمله آن می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

نخ دندان، نخ بخیه، چسب زخم، بند چترنجات، فیلتر، مقاوم ساختن بدنه هواپیما در برابر انفجار، زره و چادرهای ضدترکش و ضدگلوله[۳۸].

چالش‌ها و چشم‌انداز

تا به امروز فقط تعداد کمی از پارچه‌های آگزتیک تولید شده است که این پارچه‌ها برای استفاده پوشاکی چندان مناسب نیستند. طراحی و ساخت پارچه‌های آگزتیک با نخ غیرآگزتیک، هنوز چالشی بزرگ برای متخصصان نساجی است. بنابراین، لازم است تا مطالعات اصولی بیشتری براساس فناوری نساجی، در این پارچه‌ها به منظور بهره‌گیری کامل از این نوع جدید مواد، انجام شود.

پژوهش‌های انجام شده روی پارچه‌های حلقوی و به‌ویژه پارچه‌های تاری-پودی بسیار محدود بوده و هنوز پژوهشگران موفق به تولید نمونه تاری-پودی با خاصیت آگزتیک صفحه‌ای نشده‌اند. همچنین، اثر پارامترهای ساختاری بافت روی خاصیت آگزتیک پارچه هنوز بررسی نشده است. چالش دیگری که وجود دارد، محدودبودن خاصیت آگزتیک است. به عبارت دیگر نمونه‌های آگزتیک فقط در محدوده کوچکی از کرنش ضریب پواسون منفی دارند که افزایش این محدوده می‌تواند رویکرد آینده باشد. مهم‌ترین پارامتری که باید بهبود یابد، تولید پارچه‌های آگزتیکی است که خواص آن طی استفاده مکرر حفظ شود که تا به امروز به آن توجه نشده است. همچنین، ارائه پارچه‌های آگزتیک سه‌بعدی به‌عنوان جایگزین پدهای اسفنجی در لباس‌های محافظ نیز باید مورد توجه بیشتر قرارگیرد. با تلاش پژوهشگران، این باور وجود دارد که در آینده کالاهای نساجی آگزتیک بیشتری با کاربردهای متنوع ارائه شوند.

مراجع

1. Poisson's ratio., https://en.m.wikipedia.org/wiki/Poisson%27s_ratio, (Last visited 15 January 2015).
2. Voigt W., Bestimmung der elasticitatsconstanten fur das chlorsaure natron, *Annalen der Physik und Chemie,*49, 719-723, 1893.
3. Lakes R.S., Foam structure with a negative poisson's ratio, *Science*, 235, 1038-1040, 1987.
4. Wang Z. and Hu H., Auxetic material and their potential application in textiles, *Text. Res. J.*, 84, 1600-1611, 2014.
5. Lees C., Vincent J.F.V., and Hillerton J.E., Poisson's ratio in skin, *Biomed. Mater. Eng.*, 1, 19-23, 1991.
6. Veronda D.R. and Westmann R.A., Mechanical characterization of skin-finite deformations, *J. Biomech.*, 3, 111-124, 1970.
7. Ledbetter H. and Lei M., Monocrystal elastic constants of orthotropic $Y1Ba_2Cu_3O_7$: An estimate, *J. Mater. Res.*, 6, 2253-2255, 1991.
8. Garber A.M., Pyrolytic materials for thermal protection systems, *Aerospace Eng.*, 22, 126-137, 1963.
9. Love A.E.H., *A treatise on the Mathematical Theory of Elasticity*, 4th ed., New York, Dover, 1994.
10. Grima J.N., Gatt R., Zammit V., Natrolite: A zeolite with negative poisson's ratio, *J. Appl. Phys.*, 101, 086102, 2007.
11. Chan N. and Evans K.E., Fabrication methods for auxetic foams, *J. Mater. Sci.*, 32, 5945-5953, 1997.
12. Alderson K.L. and Simkins V.R., Auxetic materials, *US Pat. 6878320*, 2000.
13. Alderson K.L., Alderson A., Smart G., Simkins V.R., and Davies P.J., Auxetic polypropylene fibers. Part 1- Manufacture and characterization, *Plast. Rubber Compos.*, 31, 344-349, 2002.
14. Ravirala N., Alderson A., Alderson K.L.Davies P.J., Expanding the range of auxetic polymeric products using a novel melt-spinning route, *Phys. Stat Sol. B*, 242, 653-664, 2005.
15. Ravirala N., Alderson K.L., Davies P.J., Simkins V.R., and Alderson A., Negative poisson's ratio polyester fibers, *Text. Res. J.*, 76, 540-546,2006.
16. Gibson L.J., Ashby M.F., Schajer G.S., and Robertson C.L.,The mechanics of two dimentional cellular materials, *Proc Lond. Royal Soc.*, 382, 25-42, 1982.
17. Wei G.Y. and Edwards S.F., Polymer network with nagative poisson's ratio, Comput. *Theoret. Polym. Sci.*, 2, 44-54, 1992.
18. Boal D.H., Seifert U., and Shillcock J.C., Negative poisson's ratio in two-dimentional networks under tension, *Phys. Rev. E.*, 48, 4274-4283,1993.
19. Auxetics, htpps://en.m.wikipedia.org/wiki/Auxetics, (Last visited 15 January 2015).
20. Du Z., Zhou M., Liu H., and He L.,Study on negative poisson's ratio of auxetic yarn under tension: Part 1- Theoretical analysis, *Text. Res. J., 85, 467-498, 2014.*
21. Du Z., Zhou M., He L., and Liu H.,Study on negative poisson's ratio of auxetic yarn under tension: Part 2-Experimental verification, *Text. Res. J.*, 85, 768-774, 2014.
22. Wright J.R., Sloan M.R., and Evans K.E.,Tensile properties of helical auxetic structures: Anumerical study, *J. Appl. Phys.*, 108, 044905, 2010.
23. Ge A., Hu H., and Liu S., A novel plied yarn structure with negative poisson's ratio, *J. Text. Inst.*, 107, 2015.
24. Ugbolue S.C., Kim Y.K., Warner S.B., Fan Q., Yang C., Kyzymchuk O., Feng Y., and Lord J.,The formation and performance of auxetic textile. Part I: Theoretical and technical considerations, *J. Text. I.*, 101, 578-588, 2010.
25. Ugbolue S.C., Kim Y.K., Warner S.B., Fan Q., Yang C., Kyzymchuk O., Feng Y., and Lord J., The formation and performanc of auxetic textiles. Part II: Geometry and structural properties, *J. Text. Inst.*, 102, 424-433, 2011.
26. Ugbolue S.C., Kim Y.K., Warner S.B., Fan Q., Yang C., Kyzymchuk O., Feng Y., and Lord J., Engineered warp knit auxetic fabrics, *J. Text. Sci. Eng.*, 2, 2012. DOI:10.4172/2165-8064.1000e103.
27. Liu Y., Hu H., Lam J.K.C., and Liu S., Negative poisson's ratio weft-knitted fabrics, *Text. Res. J.*, 80, 856-863, 2010.
28. Hu H., Wang Z., and Liu S., Development of auxetic fabrics using flat knitting technology, *Text. Res. J.*, 81, 1493-1502, 2011.
29. Miller W., Hook P.B., Smith C.W., Wang X., and Evans K.E.,The manufacture and characterisation of a novel, low modulus, negative poisson's ratio composite, *Compos. Sci. Tech.*, 69, 651-655, 2009.
30. Wright J.R., Burns M.K., James E., Sloan M.R., and Evans K.E., On the design and characterisation of low-stiffness auxetic yarns and fabrics, *Text. Res. J.*, 82, 645-654, 2012.
31. Ge Z. and Hu H., Innovational three-dimensional fabric structure with negative Poisson's ratio for composite rein-

forcement, *Text. Res, J.*, 83, 543-550, 2013.
32. Ge Z., Hu H., and Liu Y.P., A finite element analysys of a 3D auxetic textile structure for composite reinforcement, *Smart Mater. Struct.*, 22, 084005, 2013.
33. Ge Z., Hu H., and Liu Y., Numerical analysis of deformation behavior of a 3D textile structure with negative Poisson's ratio under comp, *Text. Res. J.,* DoI: 10011777/0040517514548813, 2014.
34. Ge Z.Y. and Hu H., A theoretical analysis of deformation behavior of an innovative 3D auxetic textile structure, *J. Text. Inst.*, 106, 101-109, 2015.
35. Wang Z., Hu H., and Xiao X., Deformation behavior of three-dimentional spacer fabrics, *Text. Res. J.*, 84, 1361-1372, 2014.
36. Wang Z. and Hu H., A finite element analysis of an auxetic warp-knitted spacer fabric structure, *Text. Res. J.*, DOI: 10.1177/0040517514547213, 2014.
37. Alderson A. and Alderson K., Expanding materials and applications: Expanding auxetic textiles, *Tech. Text. Int.*, 14, 29-34, 2005.
38. www.auxetic.com, (Last visited 15 January 2015).
39. Expanding blast-proof curtain will reduce impact of bomb explosions, Engineering and Physical Sciences Research Council., http://www.epsrc.ac.uk/newsevents/news/2010/Pages/blast-proofcurtain.aspx., February 2010.
40. Scarpa F., Giacomin J., Zhang Y., Mechanical performance of auxetic polyurethane foam for antivibration glove applications, *Cell. Polym.*, 24, 253-268, 2005.
41. Nagai K., Narrow passage moving body structure, *JP06137799*, 1994.

Journal of
Textile Science
and Technology
Vol. 5, No.3, 19-27
Autumn 2015
ISSN: 2151-7162

Textiles with Negative Poisson's Ratio

Asal Lolaki and Mohsen Shanbeh*

Textile Engineering Department, Isfahan University of Technology, Postal Code: 84156-83111, Isfahan, Iran

Abstract

Negative Poisson's ratio materials or auxetic materials are fascinating materials, which expand laterally when stretched axially or shrink laterally when compressed. To date, a large number of materials with this characteristic have been discovered, made or investigated. These materials have unique properties which make them attractive for special applications. Till now, two general structures have been proposed which could be used either alone or in woven fabric structure. However, there are limited studies in the field of auxitic woven fabrics. Several knitted structures with auxetic effect have been made from non-auxetic yarns. These fabrics have auxetic effect in limited range of tensile elongation. A number of auxetic 3D textiles have also been proposed for various applications.

Keywords

auxetic materials,
negative poission's ratio,
auxetic textiles

(*) Address Correspondence to M. Shanbeh, Email: mshanbeh@cc.iut.ac.ir