



مقایسه‌ی میزان جذب انرژی کامپوزیت‌های تقویت‌شده با پارچه‌های حلقوی پودی آگرتیک و غیر آگرتیک

شیوا آقازاده، هوشنگ نصرتی*، سید ابوالفضل میردهقان

دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: hnosraty@aut.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>مواد آگرتیک، موادی با ضریب پواسون منفی هستند. یعنی هنگامی که در یک جهت کشیده می‌شوند، در جهت عمود بر راستای کشش، منبسط می‌شوند و در اثر اعمال نیروی فشاری، در جهت دیگر منقبض می‌شوند. مواد آگرتیک به دلیل ویژگی‌های خاص خود، مانند مقاومت بالا در برابر فرورفتگی، انحنای سین کلاستیک، جذب انرژی در برابر ضربه، مقاومت برشی و ترک خوردگی، و نفوذپذیری متغیر برای کاربردهای مختلف مانند استفاده در کامپوزیت‌ها مورد توجه قرار گرفته‌اند. همچنین این ویژگی‌ها باعث شده تا برای کاربردهای مختلف مثل کاربرد پزشکی، محافظتی و ورزشی مناسب باشند. هدف از انجام این تحقیق، استفاده از پارچه‌های آگرتیک حلقوی پودی، به‌عنوان فاز تقویت‌کننده در کامپوزیت است. بدین منظور با استفاده از نخ پلی‌استر با نمره یکسان، دو دسته پارچه با ساختار آگرتیک و غیر آگرتیک تولید شد. سپس کامپوزیت تقویت‌شده با استفاده از این پارچه‌ها و رزین پلی‌اورتان تهیه شد. به‌منظور بررسی میزان جذب انرژی کامپوزیت‌های تولید شده در اثر اعمال نیروی ضربه، از آزمایش ضربه‌ی سرعت پایین سقوط وزنه استفاده شد. نتایج نشان دادند که نمونه‌های کامپوزیت تقویت‌شده با پارچه‌ی آگرتیک نسبت به نمونه‌ی کامپوزیت تقویت‌شده با پارچه‌ی غیر آگرتیک، ۸ تا ۹ برابر جذب انرژی بیشتری دارند.</p>	<p>مقاله پژوهشی دریافت: ۲۷ اسفند ۱۴۰۳ پذیرش: ۲۰ فروردین ۱۴۰۴</p> <p>کلیدواژگان: کامپوزیت آگرتیک ضریب پواسون منفی منسوجات آگرتیک جذب انرژی ضربه</p>

Comparison of energy absorption of composites reinforced with auxetic and non-auxetic weft-knitted fabrics

Shiva Aghazadeh, Hooshang Nosraty*, Seyed Abolfazl Mirdehghan

Department of Textile Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran

* Corresponding Author's Email: hnosraty@aut.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 17 March 2025

Accepted: 9 April 2025

Keywords:

Composite

Auxetic

Negative Poisson's Ratio

Auxetic Textiles

Impact Energy Absorption

Abstract

Auxetic materials are materials with a negative Poisson's ratio, meaning that when stretched in one direction, they expand in the perpendicular direction, and when subjected to compressive force, they contract in the other direction. Due to their unique properties, such as high indentation resistance, synclastic curvature, energy absorption under impact, shear and crack resistance, and variable permeability, auxetic materials have attracted attention for various applications, including composites. These characteristics also make them suitable for medical, protective, and sports applications. This study aims to use auxetic weft-knitted fabrics as the reinforcing phase in composites. For this purpose, two types of fabrics—auxetic and non-auxetic—were produced using polyester yarns of the same count. The composites were then fabricated by reinforcing them with these fabrics and polyurethane resin. To evaluate the energy absorption of the produced composites under impact force, a low-velocity impact test using a drop-weight system was conducted. The results showed that composites reinforced with auxetic fabric had 8 to 9 times more energy absorption compared to those reinforced with non-auxetic fabric.

Please cite this article using:

Aghazadeh Sh, Nosraty H, Mirdehghan SA. Comparison of energy absorption of composites reinforced with auxetic and non-auxetic weft-knitted fabrics. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2025 May 22;12(3):24-29. doi: 10.22034/ijme.2025.512820.2067 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

۱- مقدمه

مواد آگرتیک به دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فرد خود، به‌ویژه ضریب پواسون منفی (NPR)، در سال‌های اخیر مورد توجه گسترده‌ای قرار گرفته‌اند. این مواد برخلاف مواد معمولی با ضریب پواسون مثبت، تحت کشش در یک جهت، در جهت عمود بر آن نیز افزایش طول می‌یابند [۱، ۲]. ضریب پواسون منفی که معمولاً در بازه‌ی ۰ تا ۱- قرار می‌گیرد، موجب می‌شود مواد آگرتیک خواصی همچون مقاومت بالا در برابر فرورفتگی، انحنای سین کلاستیک، جذب انرژی بالا در برابر ضربه، مقاومت در برابر ترک‌خوردگی، و مدول برشی بهبودیافته از خود نشان دهند. این ویژگی‌ها، مواد آگرتیک را برای کاربردهای گوناگون در حوزه‌های مهندسی پزشکی، خودروسازی، پوشاک محافظتی، و طراحی معماری مناسب کرده است [۳-۵]. روش‌های مختلفی مانند فناوری پرینت سه‌بعدی برای تولید ساختارهای آگرتیک وجود دارد [۶]. در این میان، منسوجات آگرتیک به دلیل انعطاف‌پذیری و قابلیت طراحی متنوع، جایگاه ویژه‌ای پیدا کرده‌اند. از منسوجات آگرتیک مورد توجه، پارچه‌های آگرتیک هستند. به دلیل مزایای آن‌ها، در بسیاری از کاربردهای صنعتی استفاده می‌شوند. از میان روش‌های مختلف، فناوری پارچه‌های حلقوی به دلیل انعطاف‌پذیری بالا، بیشترین کاربرد را دارد. فناوری حلقوی پودی به دلیل توانایی در تولید ساختارهای پیچیده، بیشترین کاربرد را در طراحی پارچه‌های آگرتیک دارد. این پارچه‌ها در بسیاری از کاربردهای پیشرفته، به‌ویژه در کامپوزیت‌ها، مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۷-۱۰]. استفاده از پارچه‌های حلقوی پودی آگرتیک به‌عنوان تقویت‌کننده در کامپوزیت‌ها، مزایای متعددی از جمله انتقال ویژگی ضریب پواسون منفی به ساختار کلی کامپوزیت را فراهم می‌کند. این نوع کامپوزیت‌ها، علاوه بر خواص معمول کامپوزیت‌ها، ویژگی‌هایی نظیر جذب انرژی بیشتر و مقاومت بهتر در برابر ضربه را ارائه می‌دهند که آن‌ها را برای کاربردهای محافظتی، پزشکی، و ورزشی بسیار مناسب می‌سازد [۱۱-۱۷].

با وجود تحقیقات پیشین در زمینه‌ی مواد آگرتیک و کاربرد آن‌ها در کامپوزیت‌ها، بررسی سیستماتیک تأثیر ساختارهای حلقوی پودی آگرتیک بر میزان جذب انرژی در کامپوزیت‌ها کمتر مورد توجه قرار گرفته است. بنابراین در این پژوهش، تأثیر پارچه‌های آگرتیک و غیرآگرتیک حلقوی پودی به‌عنوان فاز تقویت‌کننده در کامپوزیت بررسی شده است. نوآوری این تحقیق بررسی دقیق نقش ساختارهای حلقوی پودی آگرتیک و مقایسه‌ی عملکرد آن‌ها با نمونه‌های غیرآگرتیک در زمینه‌ی جذب انرژی کامپوزیت‌ها است. بنابراین این تحقیق می‌تواند دیدگاه جدیدی در بهینه‌سازی طراحی کامپوزیت‌های تقویت‌شده با منسوجات آگرتیک ارائه دهد و برای کاربردهای فنی پیشرفته، نظیر تجهیزات محافظتی، پزشکی و ورزشی، مناسب باشد.

۲- مواد و روش‌ها**۲-۱- بافت پارچه و ساخت نمونه‌های کامپوزیت**

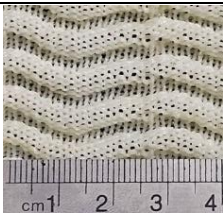
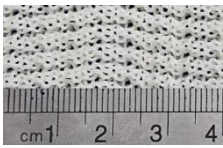

برای انجام تحقیق حاضر، پارچه‌های حلقوی پودی آگرتیک و پارچه‌ی حلقوی پودی یکرو سیلندر ساده (غیر آگرتیک) با استفاده از نخ پلی‌استر با نمره نخ ۶۰۰ دیر بر روی ماشین تخت باف الکترونیکی اشتول طراحی و بافته شدند. پارچه‌های آگرتیک بافته‌شده از نوع پارچه‌های حلقوی پودی با ساختار تاشونده (مدل زیگزاگ افقی) هستند که شامل دو زاویه زیگزاگ مختلف ۲۵ درجه (F25) و ۴۵ درجه (F45) می‌باشند (جدول ۱).

نمونه‌ها پس از تولید، تحت شرایط استاندارد (دمای ۲۳ °C و رطوبت نسبی ۵۶٪) مورد استراحت واقع شدند و پارامترهای ابعادی آن‌ها اندازه‌گیری شد.

برای ساخت نمونه‌های کامپوزیت، پارچه‌های تولیدشده به رزین تک جزئی پلی‌اورتان (ML-700P) آغشته شدند. این فرآیند با استفاده از روش پدینگ انجام شد که ابتدا نمونه‌ها به‌صورت صاف داخل ظرف محتوی رزین قرار داده شدند و از میان غلتک‌های ماشین پدینگ عبور کردند تا رزین اضافی به طور یکنواخت توسط غلتک‌ها گرفته شود. درنهایت پخت رزین و فعال‌سازی فرآیند سخت شدن نمونه‌های آغشته شده به رزین با اضافه نمودن آب با دمای ۲۵°C انجام می‌شود. سپس نمونه‌ها برای تکمیل پخت، در دما و رطوبت محیط به مدت ۲۴ تا ۴۸ ساعت باقی ماندند.

درنهایت مشخصات نمونه‌های کامپوزیت و خصوصیات فیزیکی آن‌ها مانند وزن واحد سطح (DIN EN 12127) و ضخامت (DIN EN ISO 5084) اندازه‌گیری شدند (جدول ۱). تمام آزمایش‌ها برای هر نمونه، سه بار تکرار شد تا از دقت و تکرارپذیری نتایج اطمینان حاصل شود.

جدول ۱ مشخصات نمونه‌های کامپوزیت به همراه شکل‌های نمونه‌ها

شکل نمونه کامپوزیت	وزن واحد سطح (g/m ²)	ضخامت (mm)	نوع نمونه
	1100	5.8	F45
	1000	4.4	F25
	540	1.44	FJ

۱ cm

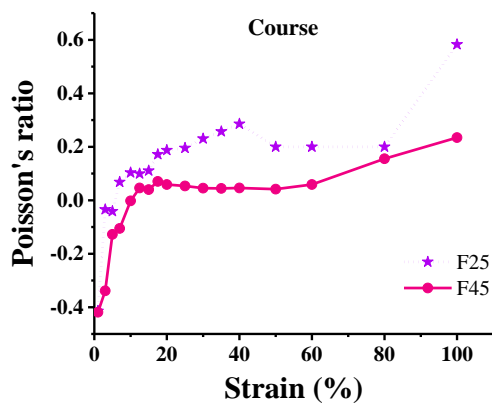
۲-۲- آزمایش ضریب پواسون

برای بررسی رفتار آگزیٹیک، نمونه‌ها با استفاده از دستگاه اینسترون مدل ۵۵۶۶ تحت آزمایش کشش تک‌محوری قرار گرفتند. سه نمونه از هر پارچه با ابعاد ۱۰ × ۲۰ سانتی‌متر مربع در دو جهت ردیف (تار/ طولی) و رج (پود/ عرضی) تهیه شدند. طول مؤثر نمونه‌ها برای آزمون ۱۰ سانتی‌متر و سرعت کشش ۲۰ mm/min تنظیم شد. سپس، نقاطی به‌عنوان نقاط مرجع در مرکز نمونه‌ها با فاصله‌ی معلوم (۵ cm) علامت‌گذاری شدند. تغییرات فاصله‌ی این نقاط در طول فرآیند کشش به کمک دوربین ثبت شدند. در نهایت اندازه‌ی این فواصل در مراحل مختلف کشش با استفاده از نرم‌افزار [Image] اندازه‌گیری شدند. در این فرآیند X_0 و Y_0 فواصل اولیه بین نقاط و همچنین X و Y فواصل بین نقاط در حین آزمایش هستند. کرنش محوری (ϵ_a) و کرنش جانبی (ϵ_t) مطابق با رابطه‌های ۱ و ۲ محاسبه شدند. سپس ضریب پواسون (ν) مطابق با رابطه‌ی ۳ حاصل شد [۱۸]. بدین ترتیب ضریب پواسون در هر دو جهت ردیف و رج اندازه‌گیری شد و نتایج آن در شکل ۱ نشان داده شده است.

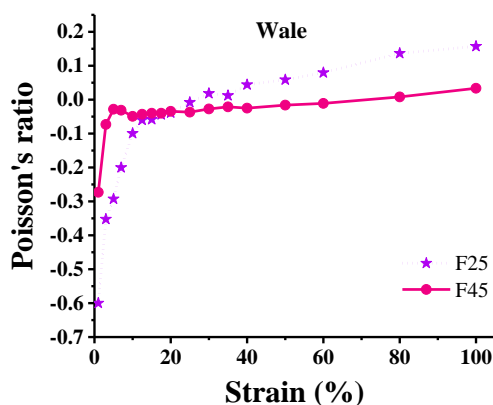
$$\epsilon_a = \frac{Y - Y_0}{Y_0} \quad (۱)$$

$$\epsilon_t = \frac{X - X_0}{X_0} \quad (۲)$$

$$\nu = -\frac{\epsilon_t}{\epsilon_a} \quad (۳)$$



(ب)



(الف)

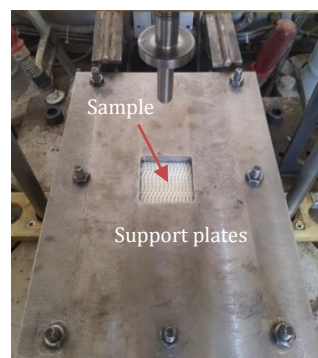
شکل ۱ نمودار ضریب پواسون - کرنش محوری: الف) جهت ردیف و ب) جهت رج

۲-۳- آزمایش ضربه

آزمون ضربه‌ی سرعت پایین با استفاده از دستگاه سقوط آزاد وزنه مطابق با استاندارد ASTM D7136 انجام شد. نمونه‌های مربعی شکل به ابعاد $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ از کامپوزیت‌ها تهیه شدند. این نمونه‌ها بین دو صفحه‌ی پشتیبان مستطیلی از جنس فولاد با ابعاد $300 \text{ mm} \times 350 \text{ mm}$ و ضخامت 1 cm ، که دارای روزنه‌ی مرکزی مربعی به ابعاد $60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ بودند، محکم بسته شدند طوری که در چهار لبه‌ی خود شرایط مرزی کاملاً گیردار داشته باشد (شکل ۲).



(ب)



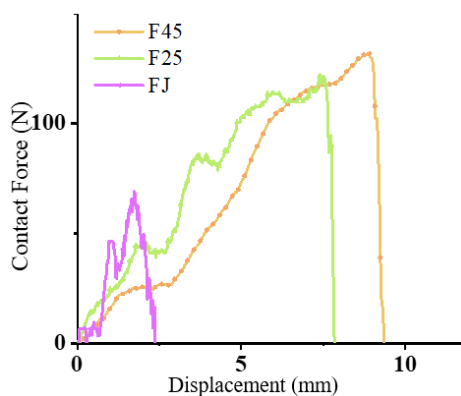
(الف)

شکل ۲ آزمایش ضربه: (الف) اجزای دستگاه ضربه زن و (ب) وضعیت ضربه زن بعد از آزمایش

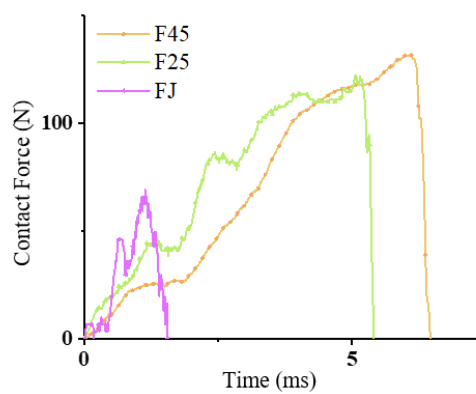
پیش از انجام آزمایش، تراز بودن سطح هدف بررسی شد تا از برخورد عمودی ضربه زن به مرکز نمونه‌ها اطمینان حاصل شود. سرعت ضربه و بار اعمال‌شده به‌عنوان تابعی از زمان ضربه ثبت شدند و انرژی جذب‌شده توسط هر نمونه نیز محاسبه شد. وزن کل سیستم (شامل ضربه زن، شتاب سنج، پیچ‌ها و سایر متعلقات) $1/858 \text{ kg}$ است. در تمام آزمایش‌ها، ضربه زنی با سر نیم‌کره به قطر 12 mm در ارتفاع 140 mm از سطح نمونه‌ها تنظیم شد. از هر نمونه، سه آزمون تکرار شد و میانگین آن‌ها محاسبه شد.

۳- نتایج و بحث

در این بخش به تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از آزمایش ضربه پرداخته شد. نمودار منحنی‌های نیروی تماسی - زمان و نیروی تماسی - جابه‌جایی در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، حداکثر نیروی تماسی کامپوزیت‌های تقویت‌شده با پارچه‌ی حلقوی پودی ساده ($3/69 \text{ N}$) نسبت به نمونه‌های تقویت‌شده با پارچه‌های آگرتیک ($F45=131/7 \text{ N}$ و $F25=121/7 \text{ N}$) کمتر است. بنابراین کامپوزیت حاصل از پارچه‌ی غیر آگرتیک رفتار شکننده‌تری در برابر ضربه از خود نشان می‌دهد؛ در حالی که کامپوزیت‌های آگرتیک مساحت زیر نمودار بیشتری داشته و ماکزیمم نیروی تماسی بیشتری دارند. این رفتار بیانگر توانایی بیشتر آن‌ها در جذب انرژی هنگام ضربه است.



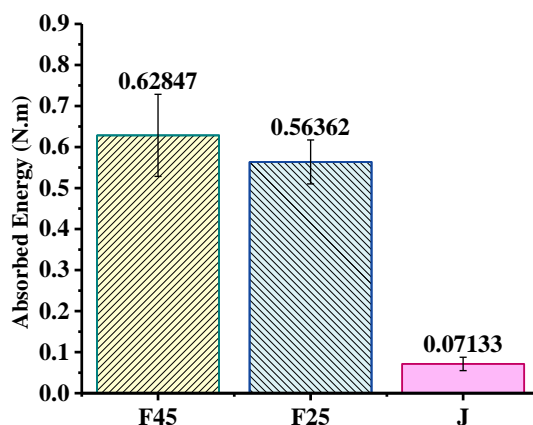
(ب)



(الف)

شکل ۳ نمودار نیرو نسبت به زمان و (ب) نمودار نیرو نسبت به جابه‌جایی حاصل از آزمایش ضربه

شکل ۴ میانگین مقادیر انرژی جذب شده در کامپوزیت‌های ساخته شده را نشان می‌دهد. سطح زیر منحنی نمودار نیرو- جابه‌جایی نشان‌دهنده‌ی میزان انرژی جذب شده‌ی حاصل از آزمایش ضربه است. نمونه‌های تقویت شده با پارچه‌های آگرتیک F45 و F25 به ترتیب انرژی کل ۰/۶۲۸ ژول و ۰/۵۶۳ ژول را جذب کردند که بسیار بیشتر از مقادیر به دست آمده برای نمونه‌ی غیر آگرتیک (۰/۰۷ ژول) است.



شکل ۴ نمودار انرژی جذب شده‌ی حاصل از آزمایش ضربه

برای تمامی نمونه‌های تقویت شده با پارچه‌های آگرتیک، انرژی کل جذب شده در مقایسه با نمونه‌های تقویت شده با پارچه‌ی حلقوی پودی ساده افزایش یافته است. بنابراین مطابق با نتایج حاصل شده، کامپوزیت‌های پارچه‌های آگرتیک عملکرد بهتری در برابر ضربه نسبت به کامپوزیت‌های پارچه‌های غیر آگرتیک از خود نشان می‌دهند. در واقع نمونه کامپوزیت‌های آگرتیک به‌طور مؤثری نیروی ضربه را جذب می‌کنند و آن را به انرژی تغییر شکل تبدیل می‌کنند؛ چرا که مواد آگرتیک در اثر اعمال نیروی فشاری و ضربه، مقاومت در برابر فرورفتگی بیشتری را دارند و در آن ناحیه منقبض می‌شوند [۱۵]. بنابراین کامپوزیت‌های آگرتیک در اثر اعمال نیروی ضربه، در یک دامنه‌ی خیز یا جابه‌جایی بیشتر، نیروی بیشتری را جذب می‌کند.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، پارچه‌های حلقوی پودی آگرتیک و غیر آگرتیک با استفاده از نخ پلی‌استر بافته شدند و سپس برای ساخت کامپوزیت‌های تقویت شده از آن‌ها، از رزین پلی‌یورتان استفاده شد. آزمایش ضربه‌ی سرعت پایین سقوط وزنه برای بررسی میزان جذب انرژی کامپوزیت‌های ساخته شده انجام گرفت. نتایج آزمایش نشان دادند که کامپوزیت‌های تقویت شده با پارچه‌های آگرتیک عملکرد بهتری در جذب انرژی ضربه‌ای دارند. نمونه‌های تقویت شده با پارچه‌ی آگرتیک F45 حدود ۹ برابر و نمونه‌های تقویت شده با پارچه‌ی آگرتیک F25 حدود ۸ برابر انرژی بیشتری نسبت به نمونه‌ی غیر آگرتیک جذب کردند. این افزایش جذب انرژی ناشی از انتقال ضربه‌ی پواسون منفی از پارچه‌های آگرتیک به کامپوزیت است، که منجر به تغییر رفتار مکانیکی کامپوزیت و بهبود توانایی آن در جذب و توزیع نیروهای ضربه‌ای می‌شود. مقایسه‌ی نتایج نشان داد که ساختار آگرتیک با طرح بافت زیگزاگ منجر به افزایش مقاومت در برابر ضربه شده و باعث می‌شود کامپوزیت در اثر نیروی ضربه دچار شکست زودهنگام نشود. علاوه بر این، تغییر شکل کنترل شده‌ی این کامپوزیت‌ها، آن‌ها را برای کاربردهای محافظتی، پزشکی، و ورزشی ایده‌آل می‌سازد. به‌طور کلی، این پژوهش نشان داد که به‌کارگیری پارچه‌های آگرتیک حلقوی پودی در کامپوزیت‌ها رویکرد مؤثری برای بهبود خواص جذب انرژی است و می‌تواند در طراحی مواد پیشرفته برای صنایع مختلف مورد استفاده قرار گیرد.

References

- [1] Lim TC. Auxetic materials and structures. Singapore: Springer Singapore; 2015.
- [2] Boakye A, Chang Y, Raji RK, Ma P. A review on auxetic textile structures, their mechanism and properties. Journal of Textile Science & Fashion Technology. 2019;2(1):1-0. doi: 10.33552/JTSFT.2019.02.000526

- [3] Wang Z, Hu H. Auxetic materials and their potential applications in textiles. *Textile Research Journal*. 2014 Sep;84(15):1600-11. doi: [10.1177/0040517512449051](https://doi.org/10.1177/0040517512449051)
- [4] Ren X, Das R, Tran P, Ngo TD, Xie YM. Auxetic metamaterials and structures: a review. *Smart materials and structures*. 2018 Jan 24;27(2):023001. doi: [10.1088/1361-665X/aaa61c](https://doi.org/10.1088/1361-665X/aaa61c)
- [5] Shukla S, Sharma J, Singh O, Behera BK. Auxetic textiles, composites and applications. *Textile Progress*. 2024 Jul 2;56(3):323-414. doi: [10.1080/00405167.2024.2328504](https://doi.org/10.1080/00405167.2024.2328504)
- [6] Hasanzadeh R. Designing and manufacturing a novel polymeric hybrid auxetic structure using 3D printing method by combining arrow-head and missing rib structures. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2025 Jan 20;11(11):67-76. doi: [10.22034/ijme.2024.487862.2025](https://doi.org/10.22034/ijme.2024.487862.2025) [In Persian]
- [7] Hu H, Zulifqar A. Auxetic textile materials-a review. *Journal of Textile Engineering & Fashion Technology*. 2016;1(00002). doi: [10.15406/jteft.2016.01.00002](https://doi.org/10.15406/jteft.2016.01.00002)
- [8] Hu H, Wang Z, Liu S. Development of auxetic fabrics using flat knitting technology. *Textile Research Journal*. 2011 Sep;81(14):1493-502. doi: [10.1177/0040517511404594](https://doi.org/10.1177/0040517511404594)
- [9] Xu W, Sun Y, Raji KR, Ma P. Design and fabrication of novel auxetic weft-knitted fabrics with Kevlar yarns. *Journal of the Textile Institute*. 2019 Sep 2;110(9):1257-62. doi: [10.1080/00405000.2018.1557359](https://doi.org/10.1080/00405000.2018.1557359)
- [10] Sun Y, Xu W, Wei W, Ma P, Xia F. Stab-resistance of auxetic weft-knitted fabric with Kevlar fibers at quasi-static loading. *Journal of Industrial Textiles*. 2021 Apr;50(9):1384-96. doi: [10.1177/1528083719865044](https://doi.org/10.1177/1528083719865044)
- [11] Karaduman NS, Karaduman Y, Ozdemir H, Ozdemir G. Textile reinforced structural composites for advanced applications. In *Textiles for advanced applications 2017* Sep 20. IntechOpen. doi: [10.5772/intechopen.68245](https://doi.org/10.5772/intechopen.68245)
- [12] Kaw AK. *Mechanics of composite materials*. CRC press; 2005 Nov 2.
- [13] Wang Z, Zulifqar A, Hu H. Auxetic composites in aerospace engineering. In *Advanced composite materials for aerospace engineering 2016* Jan 1 (pp. 213-240). Woodhead Publishing.
- [14] Steffens F, Rana S, Figueiro R. Development of novel auxetic textile structures using high performance fibres. *Materials & Design*. 2016 Sep 15;106:81-9. doi: [10.1016/j.matdes.2016.05.063](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.05.063)
- [15] Steffens F, Oliveira FR, Figueiro R. Energy absorption from composite reinforced with high performance auxetic textile structure. *Journal of Composite Materials*. 2021 Mar;55(7):1003-13. doi: [10.1177/0021998320964552](https://doi.org/10.1177/0021998320964552)
- [16] Boakye A, Raji RK, Ma P, Cong H. Compressive property of an auxetic-knitted composite tube under quasi-static loading. *Autex Research Journal*. 2020 Jun 1;20(2):101-9. doi: [10.2478/aut-2019-0020](https://doi.org/10.2478/aut-2019-0020)
- [17] Chang Y, Ma P, Jiang G. Energy absorption property of warp-knitted spacer fabrics with negative Poisson's ratio under low velocity impact. *Composite Structures*. 2017 Dec 15;182:471-7. doi: [10.1016/j.compstruct.2017.09.065](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.09.065)
- [18] Aghazadeh S, Nosraty H, Asayesh A, Rabiee M. Effect of Structural Parameters on the Auxetic Behavior of Weft-Knitted Fabrics Based on Foldable Structures. *Fibers and Polymers*. 2025 Jan;26(1):391-401. doi: [10.1007/s12221-024-00773-4](https://doi.org/10.1007/s12221-024-00773-4)