

A review on properties, types and applications of auxetic structures

Mohammad Javad Khoshgoftar ^{a*}, Ali Barkhordari ^b

^a Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, 38156-88349, Iran

Review Paper

Use your device to scan
and read the article online



Citation: Khoshgoftar M J, Barkhordari A. A review on properties, types and applications of auxetic structures. *Mechanics of Advanced and Smart Materials*. 2023; 2(4): 413-431

 <https://10.52547/masm.2.4.413>.

KEYWORDS

Metamaterial,
Auxetic material,
Poisson ratio,
Reentrant structure.

ABSTRACT

Metamaterials are materials that exhibit unusual properties. Auxetic materials, as a class of metamaterials, are structures with a negative Poisson ratio. These materials become thicker when applied under tensile stress, unlike conventional materials, in the perpendicular direction to the applied force, and become thinner when applied under compressive stress. Auxetic behavior is an independent property that can be obtained from microscopic or macroscopic levels and even molecular or cellular levels. Many structures and materials are known of this feature. This unique feature has created potential applications in the military, aerospace, medical and intelligent sensors, and many other industries. However, there are still many problems with the widespread use of these structures. This paper provides a comprehensive review of these structures that have unique properties and applications of auxetic materials. In addition, some of the latest developments in these materials are described. Materials with a negative Poisson ratio have great potential in various applications such as lightweight structures or biomaterial applications.

Extended Abstract

1. Introduction

The Poisson's ratio is the ratio of transverse strain to axial strain in the direction of loading. Materials with a positive Poisson's ratio become thinner under tension and thicker under compression, known as common materials. Materials with negative Poisson's ratio, called auxetic materials, become thicker under tension and narrower under compression, unlike common materials. In homogeneous materials, properties such as elasticity modulus and Poisson's ratio are independent of direction, but in heterogeneous materials, these properties differ in different directions. Most materials have a Poisson's ratio between 0 and 0.5. This range is much larger for non-homogeneous materials compared to homogeneous materials. Many materials such as cat skin, cow skin, bone, and cadmium have the inherent auxetic property. The term auxetic derives from the Greek word "auxetikos" meaning growing or increasing, and Professor Evans coined this term to express the negative Poisson's ratio property [11]. In 1944 the negative Poisson's ratio expressed, but scientists believed that materials with this property were not obtainable because it was considered a defect in iron sulfide crystal [12]. In 1987, Lakes discovered the negative Poisson's ratio in polyurethane foams [13]. These materials exhibit very special properties compared to common materials, such as increased resistance to shear or impact [14]. Figure 1 shows the behavior of common and auxetic materials under tension.

* Corresponding author. Tel.: +98-86-32625726

E-mail address: mj.khoshgoftar@gmail.com.

DOI: <https://10.52547/masm.2.4.413>.

Received: November 05, 2022; Received in revised form: December 03, 2022; Accepted: March 17, 2023

© Author



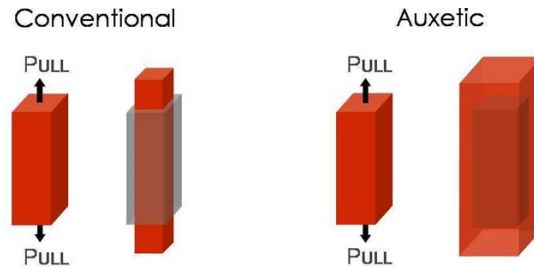


Figure 1. Performance of auxetic and conventional materials under tension [10]

2. Geometric structures and models

Auxetic materials have received significant attention in the past decades due to their unique properties. Various geometric models and structures, such as 2D and 3D honeycomb structures, rotating semi-rigid units, hard molecules, liquid crystal polymer models, auxetic fibers, microporous polymers, surface molecular polymers, and auxetic crystals, have been studied for a better understanding of the auxetic effects and improving their properties. In addition to the aforementioned structures, the use of random structures and multiple materials with tools such as deep learning has been a recent focus for researchers [25]. The inner-reentrant structures, such as honeycomb structures and star structures, have also been studied due to their auxetic properties caused by the bending of inclined facets or their contraction under vertical loading [26]. These structures have been modeled to calculate the Poisson's ratio and Young's modulus along the loading direction. Lattice structures, such as the rhombic dodecahedron, have also been studied for their auxetic effects.

Chiral structures are among the developed structures of auxetic materials that have inward rotational units. The cellular units in this structure are connected to each other directly through central nodes with circular, rectangular, or other geometries. The auxetic effect of this structure is achieved by opening or twisting these links around the nodes under external loading [34]. A new type of structure called meta-chiral has been developed, in which the meta-chiral units are connected symmetrically and tangentially to each other through links that are circular, rectangular, or other geometries [36].

The rotational unit structure is created by connecting rigid and semi-rigid triangles, squares, or rectangles to each other. These heads are connected to each other by special links. The negative Poisson's ratio effect of this structure is due to the rotation of these heads around these links. The arrangement of this structure can produce two-dimensional and three-dimensional auxetic structures. The proposed molecular model is based on solid and free molecules that are produced by the interaction between molecules through thermodynamic stability. The cyclic hexamer model (Figure 2) is a type of this state that is composed of six atoms, and the atoms are located on the vertices of a hexagon. The negative Poisson's ratio effects of hexamer systems are obtained from their intermolecular potential. Microstructure polymers are produced by arranging microscale particles in a specific structure. These structures can have negative Poisson's ratios due to their deformation mechanisms, which include the bending of bonds and the rotation of particles. The microstructure of these polymers can produce two-dimensional and three-dimensional auxetic structures.

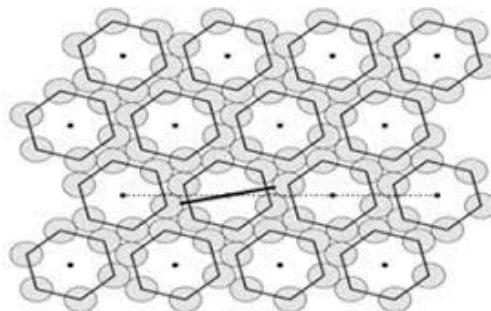


Figure 2. The structure of the rigid molecules of the hexamer cycle [41]

3. Auxetic material properties

Auxetic materials exhibit remarkable properties due to their special deformation mechanism in comparison to conventional materials. In this section, we will discuss some of the properties of these materials, including their shear resistance and resistance to compression failure.

Auxetic materials demonstrate higher shear resistance than conventional materials due to their unique three-dimensional elasticity theory. The behavior of these materials can be expressed by four constants, including Young's modulus (E), bulk modulus (k), Poisson's ratio (ν), and shear modulus (G), which are interdependent and can be calculated by equations (1) [46].

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

$$k = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}$$
(1)

It can be observed that by decreasing Poisson's ratio, the resistance of the materials under shear force increases. Poisson's ratio of isotropic materials is within the range of 0.5 to -1. If the Poisson's ratio is -1, the shear modulus tends to infinity based on equation (1). Furthermore, auxetic materials have a smaller bulk modulus than conventional materials.

When a conventional material is subjected to vertical pressure, as shown in figure 3a, expansion occurs in the direction perpendicular to the applied pressure to compensate. In contrast, when an auxetic material is subjected to vertical pressure, as shown in figure 3b, localized contraction occurs in the direction perpendicular to the applied pressure, which increases the resistance to compression failure [47]. According to the elasticity theory, resistance to compression failure is related to the material's hardness, as expressed in equation (2) [48]. In this equation, E , ν , and H represent Young's modulus, Poisson's ratio, and structure hardness, respectively, and γ is a constant assumed to be between 1 and 2.3. It can be inferred from equation (2) that when the Poisson's ratio is -1, the resistance to compression failure and the hardness of the material tend to infinity.

$$H \approx \left[\frac{E}{(1 - \nu^2)} \right]^\gamma$$
(2)

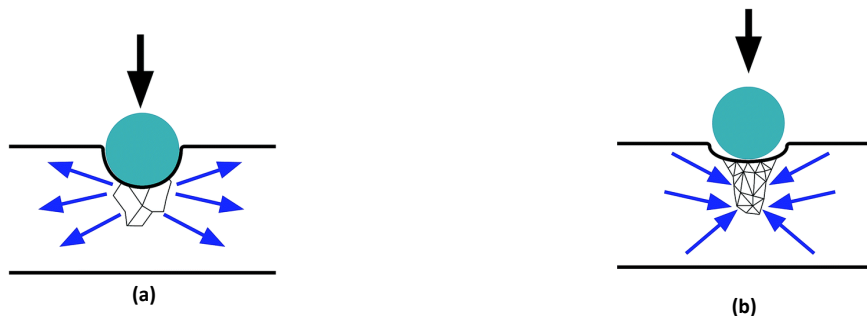


Figure 3. (a) Reaction of common materials against indentation. (b). The reaction of auxetic materials against indentation [49]

We also examine their variable permeability and energy absorption properties. Auxetic materials are commonly associated with macro-scale porous structures that open and close as the material is stretched or compressed. This property makes them suitable for use in a wide range of filtration applications. Alderson et al. have demonstrated how auxetic materials can be used to improve filter performance at the nanoscale by opening up their pores [60]. The energy absorption properties of auxetic materials have also been studied extensively. Yang et al. conducted extensive numerical simulations of sandwich panels made of auxetic materials and found that they exhibit better energy absorption properties than panels with honeycomb cores [62]. Jiang et al. also investigated the effect of auxetic cell angles on the energy absorption of dynamic loads [63]. Their findings show that the energy absorption properties of auxetic materials can be improved by increasing the cell angle. The development of auxetic sandwich composites has also been explored. Overall, auxetic materials have shown great promise in a wide range of applications, including filtration, energy absorption, and sandwich composites.

4. Applications

Auxetic materials are known for their unique mechanical properties such as negative Poisson's ratio, which is characterized by their ability to expand when stretched and contract when compressed. Auxetic materials have found various applications due to their unusual deformation properties [20-51-64-65-66]. Auxetic materials have extensive applications in the medical industry. One of the most important applications of these materials is the fabrication of stents for esophageal cancer [67]. Esophageal cancer is one of the most common and vital cancers in the world. Patients with this cancer may develop a tumor in their esophagus that blocks the food passage. If the stent is placed in their esophagus as shown in Figure 4, it allows the food to pass through. The presence of macro porous structures in scaffolds not only increases the absorption rate but also provides a structure for the growth of bone cells and the creation of new bone with a complete and uniform structure [68]. The use of auxetic cellular structures can have advantages such as eliminating bone friction at the junctions [69-70].

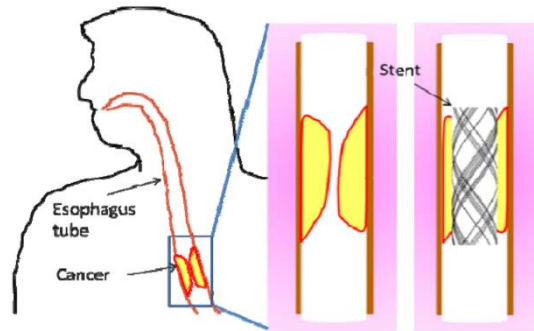


Figure 4. Stent in the esophagus [71]

Auxetic materials have a high potential for use in protective devices such as pads, helmets, and gloves. The use of protective clothing and equipment for dangerous sports such as cycling, motorcycling, speed racing, and skating is essential. In these sports, parts of the body such as elbows and knees are more exposed to injury. Therefore, protective pads are usually used in these areas. The protective pads available today are made of sponges that have low permeability. Three-dimensional auxetic fabrics are a suitable replacement for these materials due to their greater comfort compared to common sponges.

Auxetic textiles have been of great interest due to their properties such as high energy absorption and deformation, wear resistance, flexibility, and dome-shaped moldability. An example of this application can be seen in shoes, the soles of which are made of auxetic materials. The use of these materials in the soles of shoes provides a better shock absorption and a more comfortable feeling for the user. In addition, auxetic fabrics can be used in medical compression garments, sportswear, and military clothing to provide better comfort, support, and protection.

Auxetic materials are suitable for producing bulletproof vests, armored vehicles, blast-resistant walls, and other applications due to their high resistance against impact. When hit by a bullet or explosion wave, these materials compress from the sides as shown in Figure 5 and prevent the bullet or explosion wave from advancing.

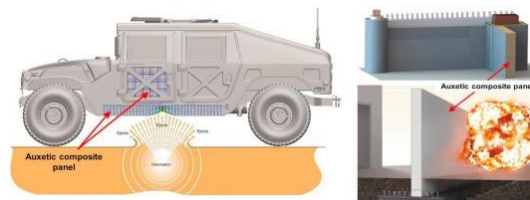


Figure 5. Military use of auxetic materials

Another application of auxetic materials is in safety belts. In a car accident, passengers are usually thrown forward. In such situations, if the deceleration is very high, the force exerted will also be very high. The safety belt, trying to counteract this movement, tightens like a strap and becomes narrower. This is exactly the opposite of what is needed in such a critical situation. With the belt becoming narrower, the force exerted is concentrated on a smaller area, which can cause serious injuries in middle-aged people, pregnant women, and children. This is while auxetic belts widen in such situations, distributing the force over a larger area and ultimately reducing the injuries.

Auxetic materials also have applications in packaging straps. The amount of looseness and stiffness of these materials is a critical factor that must be considered. If the strap is too loose, it may release or drop the load, and if it is too tight, it may damage the load. Therefore, auxetic straps with color-changing ability have been developed to avoid these problems. These straps indicate the looseness and stiffness of the packaging strap by changing color when stretched.

5. Conclusion

This paper provides a comprehensive review of auxetic materials and structures. These materials are typically developed due to their unique structure and have a negative Poisson's ratio property. Due to their unique deformation behavior, materials with a negative Poisson's ratio possess distinctive properties compared to conventional materials, and thus have found various applications. This review attempts to cover all aspects of auxetic materials, including types, properties, and applications. Significant progress has been made in understanding the various structures and properties of these materials, but there are still many issues that require

further investigation. Furthermore, with the development of cost-effective manufacturing technologies and the introduction of some fabrication techniques, auxetic materials and structures have the potential to become lightweight structural materials and play a critical role in the future.



مروری بر خواص، انواع و کاربردهای ساختارهای آگزتیک

محمد جواد خوش گفتار^{الف*}، علی برخوردار^ب

^{الف} استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه اراک، اراک، ایران، m-khoshgoftar@araku.ac.ir

^ب دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه اراک، اراک، ایران، ali.barkhordari95@gmail.com

چکیده	واژگان کلیدی
<p>فراماده‌ها موادی هستند که خواص غیرمعمول از خود نشان می‌دهند. مواد آگزتیک به‌عنوان یک دسته از مواد فراماده، ساختارهایی دارای نسبت پوآسون منفی‌اند. این مواد در هنگام اعمال تنش کششی برخلاف مواد معمول در راستای عمود بر نیروی وارده ضخیم‌تر و هنگام اعمال تنش فشاری نازک‌تر می‌شوند. رفتار آگزتیک یک خاصیت مستقل است که می‌تواند از سطح‌های میکروسکوپی و ماکروسکوپی و حتی سطح‌های مولکولی و سلولی به دست آید. ساختارها و مواد بسیاری با این ویژگی شناخته شده‌اند. این ویژگی منحصر به فرد کاربردهای بالقوه‌ای در زمینه‌های نظامی، هوافضا، پزشکی و سنسورهای هوشمند و بسیاری از صنایع دیگر ایجاد کرده است. با این حال هنوز مشکلات بسیاری برای استفاده گسترده از این مواد وجود دارد. در این مقاله به بررسی جامعی از ساختارها، خصوصیات منحصر به فرد و کاربرد مواد آگزتیک پرداخته شده است. علاوه بر این، برخی از آخرین پیشرفت‌هایی که در مورد این مواد انجام شده است بیان می‌شود. مواد با نسبت پوآسون منفی پتانسیل بسیار زیادی برای استفاده در سازه‌های مختلف مانند سازه‌های سبک و یا کاربردهای بیومتریال دارند.</p>	<p>فراماده، مواد آگزتیک، نسبت پوآسون، ساختار درون‌رو.</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۱۴ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۹/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۲۶</p>

۱- مقدمه

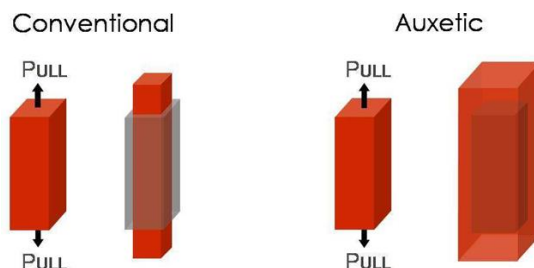
ضریب پوآسون ماده، نسبت کرنش عرضی به کرنش طولی در جهت بارگذاری است [۱]. موادی که دارای ضریب پوآسون مثبت هستند تحت کشش باریک‌تر و تحت فشار عریض‌تر می‌شوند که به آن مواد دارای خاصیت معمول می‌گویند. موادی که دارای ضریب پوآسون منفی‌اند برخلاف مواد معمول تحت کشش عریض‌تر و تحت فشار باریک‌تر می‌شوند که به آن مواد آگزتیک^۱ گویند [۲]. در مواد همسانگرد خواص مانند مدول الاستیسیته و ضریب پوآسون مستقل از جهت است و در مواد ناهمسانگرد این خواص در جهت‌های مختلف متفاوت هستند. اگر مدول یانگ، مدول برشی و مدول حجمی ماده همسانگرد^۲ مثبت باشد، ضریب پوآسون بین ۱- تا ۰٫۵ قرار دارد [۳]، در حالی که ضریب پوآسون مواد همسانگرد عرضی در صفحه بین ۱- تا ۱ هستند. بیشتر مواد، ضریب پوآسونی بین صفر تا ۰٫۵ دارند [۴]. البته برای مواد غیرهمسانگرد این محدوده نسبت به مواد همسانگرد بسیار بیشتر و بزرگ‌تر است [۵]. در بسیاری از مواد مانند پوست گربه، پوست گاو، استخوان و کادمیوم به‌طور طبیعی خاصیت آگزتیک نهفته است [۶-۷-۸-۹].

واژه آگزتیک از کلمه یونانی آگزتیکاز به معنای چیزی که تمایل به افزایش و رشد دارد مشتق شده است و ریشه آن از کلمه آگزتیز به معنای افزایش است. این لغت را پروفسور اوانس از دانشگاه اکستر ابداع کرده است. اوانس و همکاران [۱۱] برای بیان

^۱ auxetic
^۲ isotropic

خاصیت ضریب پواسون منفی واژه آگزتیک را مطرح کردند که امروزه به‌طور متداول استفاده می‌شود. در شکل (۱) عملکرد مواد معمول و آگزتیک تحت کشش نشان داده شده است.

ضریب پواسون منفی در سال ۱۹۴۴ توسط لاو [۱۲] بیان شد اما در آن زمان دانشمندان بر این عقیده بودند که مواد با ضریب پواسون منفی دست یافتنی نیستند زیرا این پدیده به‌عنوان یک نقص در کریستال سولفید آهن است.



شکل ۱ عملکرد مواد آگزتیک و معمول تحت کشش [۱۰]

در سال ۱۹۸۷ لیکس [۱۳] ضریب پواسون منفی را در فوم‌های پلی‌اورتان کشف کرد. این مواد ویژگی‌های بسیار خاصی را نسبت به مواد معمول نشان می‌دهند. افزایش مقاومت در برابر برش یا مقاومت در برابر تورفتگی [۱۴] همراه با بهبود صدا و جذب لرزش [۱۵]، انحنای گنبدی شکل و مقاومت در برابر شکست از جمله خواص مختلف این مواد است. همچنین این مواد به‌عنوان اتصال‌دهنده‌ها [۱۶]، کامپوزیت‌هایی با مقاومت بالاتر [۱۷]، مهندسی پزشکی [۱۸]، مهندسی بافت [۱۹] و موارد دیگر مورد استفاده قرار گرفته است.

در طی چند دهه گذشته با توجه به تحولات در طراحی، فناوری و مهندسی صنایعی از قبیل صنایع هوافضا، نظامی و ورزشی، تقاضا برای مواد با مشخصات مهندسی ویژه افزایش پیدا کرده است. از این‌رو مواد با نسبت پواسون منفی در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است [۲۰-۲۱]. رشد و توسعه مواد آگزتیک در سال‌های اخیر بسیار سریع بوده اما کاربردهای واقعی ساختار آگزتیک هنوز در مراحل اولیه ارائه است. بر این اساس باید تلاش شود تا شناخت، طراحی و کاربرد آن بهبود و توسعه یابد. با پیشرفت و توسعه مواد آگزتیک، این مواد از مقیاس ماکرو فراتر رفته و به مقیاس‌های میکرو تا نانو گسترش پیدا کرده است.

روش‌های متنوع ساخت برای ساختارهای آگزتیک از مواد مختلف مانند پلیمرها و فلزات توسط محققان استفاده شده است. از جمله روش‌های مختلف ساخت می‌توان برش لیزر، ساخت افزایشی، ساخت به روش فوم‌های پلیمری، کیریگامی^۳ و مچالگی^۴ را نام برد. در این مقاله بررسی جامعی از ساختارها و مواد آگزتیک انجام شده است. ابتدا انواع ساختارهای مختلف و سپس بسیاری از خواص و کاربردهای این مواد به همراه برخی از آخرین تحقیقات انجام شده بر روی این مواد بیان گردیده است.

۲- ساختارها و مدل‌های هندسی

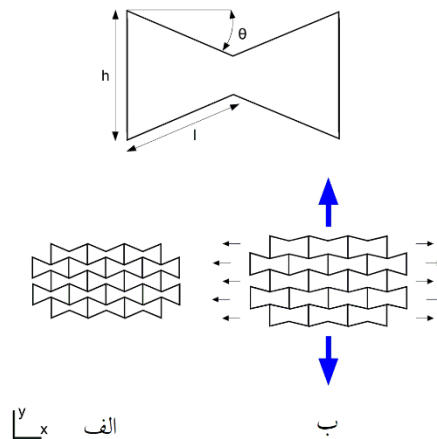
در دهه‌های گذشته ساختارها و مدل‌های هندسی متفاوتی که دارای اثر آگزتیک هستند مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. از این نوع ساختارها می‌توان به ساختارهای دوبعدی و سه‌بعدی ساختارهای درون‌رو، ساختارهای کاریال، واحدهای نیمه سفت و سفت شونده چرخشی، ملکول‌های سخت، مدل‌های پلیمری کریستالی مایع، نخ‌های آگزتیک، پلیمرهای میکروپروس، پلیمرهای سطح ملکولی و کریستال‌های آگزتیک اشاره نمود. مطالعه این ساختارهای هندسی برای درک بهتر چگونگی اثرات آگزتیک و همچنین تولید و بهبود بخشیدن خواص آن‌ها بسیار اهمیت دارند. علاوه بر ساختارهای معرفی شده، استفاده از ساختارهای رندم [۲۲-۲۳] و یا چند ماده [۲۴] به همراه ابزارهایی مانند یادگیری عمیق [۲۵]، مورد توجه پژوهشگران در سال‌های اخیر بوده است.

³ Kirigami

⁴ crumpling

۲-۱- ساختارهای درون‌رو

ساختارهای لانه‌زنبوری درون‌رو (شکل (۲))، ساختارهای سلول آگزتیک ماکروسکوپی در فرم دوبعدی هستند که اولین بار توسط گیسیون [۲۶] در سال ۱۹۸۲ پیشنهاد گردید. این ساختار هنگامی که تحت نیروی عمودی قرار می‌گیرد در پاسخ به اثر آگزتیک، انقباض دندان‌های مورب اتفاق افتاده و از لحاظ تئوری این دندان‌ها در هنگام کشش باعث حرکت در جهت عمودی می‌شوند.



شکل ۲ الف) ساختار آگزتیک قبل از بارگذاری. ب) ساختار آگزتیک پس از بارگذاری [۲۷]

گیسیون و همکاران [۲۸] برای نشان دادن رفتار سلول‌های درون‌رو، مدلی ارائه دادند که نسبت پواسون و مدول یانگ در امتداد جهت اعمال نیرو محاسبه می‌شود که توسط روابط (۱) به دست می‌آیند.

$$E_{11} = E \left(\frac{t}{L}\right)^3 \frac{\cos^2 \theta}{\left(\frac{h}{L} + \sin \theta\right) \sin^2 \theta} \quad (1)$$

$$v_{12} = \frac{\left(\frac{h}{L} + \sin \theta\right) \sin \theta}{\cos^2 \theta}$$

در رابطه ۱، (h) طول ستون عمودی، (L) طول ستون شیب‌دار، (t) ضخامت ستون و (θ) زاویه ستون شیب‌دار است. از دیگر ساختارهای درون‌رو، ساختار دو سر پیکان (شکل الف-۳) که اولین بار توسط لارسن [۲۹] و ساختار ستاره‌های درون‌رو (شکل ب-۳) که توسط تئوریکاس [۳۰] ارائه گردیدند می‌توان نام برد. اثرات آگزتیک این ساختارها ناشی از انعطاف دندان‌های مورب یا منقبض شدنشان تحت بارگذاری عمودی است.

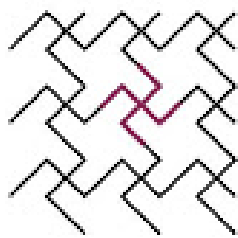
شبکه‌های لوزی شکل نیز از دیگر ساختارها با نسبت پواسون منفی است که در شکل ج-۳ نشان داده شده است. این ساختار در سال ۲۰۰۰ توسط اسمیت ارائه گردید [۳۱]. واحدهای سلولی این ساختار به صورت پررنگ درون شکل نشان داده شده است. اثرات آگزتیک این ساختار تحت کشش، از گسترش و چرخش واحدهای سلولی ناشی می‌شود.



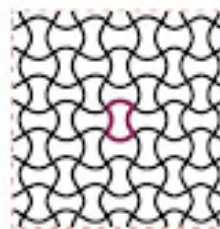
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۳ (الف) ساختار دو سر پیکان. (ب) ساختار ستاره‌ای. (ج) ساختار شبکه‌های لوزی شکل. (د) ساختار پیوندهای سینوسی

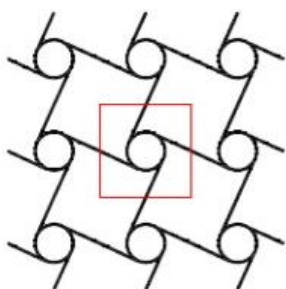
[۳۲]

ساختار پیوندهای سینوسی (شکل ۳-د) نیز جزو خانواده‌های ساختار درون‌رو است. اثرات آگزیٹیک این ساختار ناشی از باز و بسته شدن واحدهای سلولی به دست می‌آید. از این نوع ساختار بیشتر برای انتشار دارو استفاده می‌شود [۳۳].

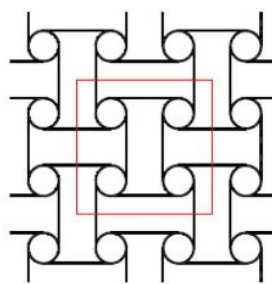
۲-۲- ساختارهای کاریال

از دیگر ساختارهای آگزیٹیک ساختار کاریال است که توسعه یافته ساختارهای درون‌رو است. در این نوع ساختار همان‌طور که در شکل ۴-الف نشان داده شده است، واحدهای سلولی کاریال با پیوندهای مستقیم توسط گره‌های مرکزی به یکدیگر متصل شده‌اند. این گره‌ها ممکن است دایره‌ای، مستطیلی یا هندسه‌های دیگر باشند. اثرات آگزیٹیک این ساختار تحت بار اعمالی از طریق باز شدن یا پیچیده شدن این پیوندها در اطراف گره‌ها به دست می‌آید [۳۴]. با توجه به تحقیقات انجام شده توسط پرال و همکاران [۳۵] نسبت پوآسون ساختار کاریال در هنگام تغییر شکل (۱-) است.

بر پایه این ساختار نوع جدیدی از ساختار کاریال با عنوان متاکاریال مطابق شکل ۴-ب به وجود آمده است. در این نوع ساختار، واحدهای متاکاریال توسط پیوندها که به شکل بلوک‌های دایروی، مستطیلی یا دیگر هندسه‌ها هستند به صورت متقارن و مماس به یکدیگر اتصال داده می‌شوند [۳۶].



(الف)

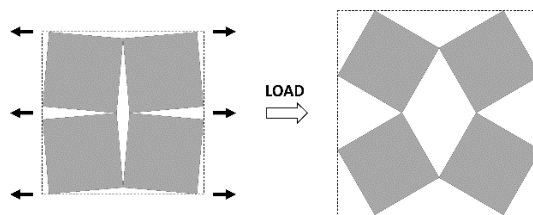


(ب)

شکل ۴ (الف) ساختار کریال. (ب) ساختار متاکریال [۳۷]

۲-۳- ساختار واحدهای چرخشی

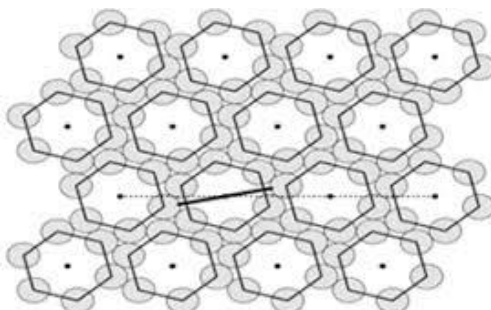
این نوع ساختار از رفتار فوم‌ها و پلیمرهای نانو ساختار شبکه‌ای عرضی حاصل شده که با اتصال سخت و نیمه سخت مثلث، مربع و یا مستطیل به یکدیگر تولید شده است. این رئوس توسط پیوندهای خاصی به یکدیگر متصل می‌شوند [۳۸]. شکل ۵ نمونه‌ای از این ساختار را نشان می‌دهد. اثر نسبت پوآسون منفی این ساختار ناشی از دوران این رئوس حول این پیوندها است. همچنین چیدمان این ساختار می‌تواند علاوه بر ساختارهای دوبعدی، ساختارهای آگزیٹیک سه‌بعدی نیز تولید نماید.



شکل ۵ ساختار واحدهای چرخشی [۳۹]

۲-۴- مولکول‌های سخت

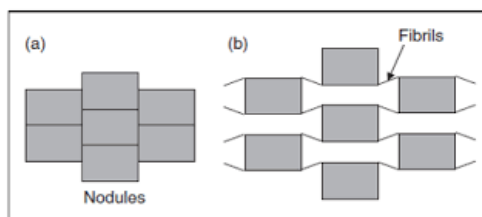
در این ساختار، مدل مولکولی پیشنهاد شده مبتنی بر ملکول‌های صلب و آزاد است که توسط تعامل بین مولکولی از راه پایداری ترمودینامیکی به دست می‌آید. مدل ملکولی سایکل هگزمر (شکل ۶) نوعی از این حالت است که از شش اتم تشکیل شده و اتم‌های آن روی رؤوس یک شش ضلعی قرار دارد. اثرات نسبت پواسون منفی سیستم‌های هگزمر از پتانسیل بین ملکول‌ها به دست می‌آیند [۴۰].



شکل ۶ ساختار ملکول‌های سخت سایکل هگزمر [۴۱]

۲-۵- پلیمرهای میکروپروس

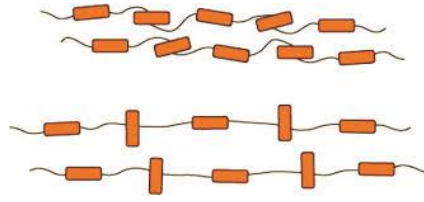
پلیمرهای میکروپروس مطابق شکل ۷ دارای ساختار میکرو بوده و می‌توان آن‌ها را به عنوان یک مدل دوبعدی تقسیم‌بندی کرد. این ساختار شامل فیبرها و گره‌های متصل به هم هستند. این گره‌ها تحت بار کشش باز شده و باعث عریض‌تر شدن ساختار می‌شوند [۴۲].



شکل ۷ ساختار میکروپروس قبل و بعد از بارگذاری [۳۹]

۲-۶- پلیمرهای میکروپروس

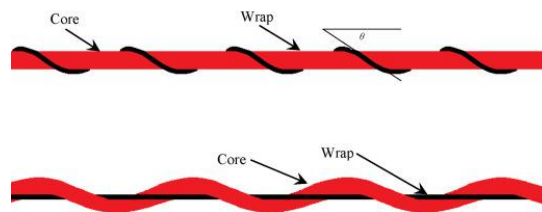
پلیمرهای کریستالی مایع شامل مولکول‌های زنجیره‌ای صلبی هستند که به وسیله‌ی گروه‌های انعطاف‌پذیر در امتداد طول رشته به یکدیگر متصل می‌شوند. این گروه‌های انعطاف‌پذیر مطابق شکل ۸ به انتهای تعدادی از میله‌های صلب و باریک متصل شده است که در حالت معمول همه میله‌ها در امتداد جهت اصلی قرار دارند. رفتار آگزتیک این ساختار تحت کشش به وسیله چرخش میله‌ها به وجود می‌آید [۴۳].



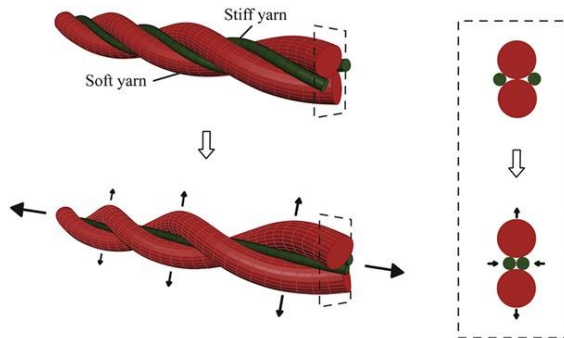
شکل ۸ ساختار مدل‌های پلیمری مایع قبل و بعد از بارگذاری [۴۴]

۲-۷- نخ‌های آگرتیک

نخ‌های آگرتیک را می‌توان از الیاف غیر آگرتیک و تنها با استفاده از ساختار ویژه نخ به دست آورد. تا به امروز دو ساختار کلی برای تولید نخ آگرتیک پیشنهاد شده است. ساختار اول مطابق شکل ۹- الف یک نخ دو جزئی که از پیچیده شدن دو فیلامنت رشته غیر آگرتیک با سختی متفاوت به دور یکدیگر به دست می‌آید. رشته با سختی کمتر به‌طور مستقیم در مرکز نخ قرار می‌گیرد و رشته با سختی بیشتر در مسیر مارپیچ به دور آن پیچیده می‌شود. نخ رشته‌ای دور پیچ در مقایسه با رشته مغزی، مدول کشسانی بیشتر، قطر و تغییر شکل کمتری دارد. در حالت دوم، این ساختار از دو نخ نرم و دو نخ سخت با قطرهای متفاوت مطابق شکل ۹- ب تشکیل شده است. این دو نخ به‌طور متناوب و محوری نخ قرار گرفته و به یکدیگر تابانده می‌شوند. اثر آگرتیک این ساختارها تحت کشش با جابه‌جایی رشته‌های نرم و سخت ایجاد می‌شود [۴۵].



(الف)



(ب)

شکل ۹ (الف) شماتیک نخ دو رشته‌ای. (ب) شماتیک نخ چهار رشته‌ای [۴۵].

۳- خواص مواد آگرتیک

مواد آگرتیک به دلیل مکانیزم کرنشی خاص، در مقایسه با مواد معمول، دارای خواص شگفت‌انگیزی هستند. در این قسمت برخی از خواص این مواد بیان می‌شود.

۳-۱- مقاومت برشی

مواد آگزتیک تحت نیروی برشی مقاومت بیشتری نسبت به مواد معمول از خود نشان می‌دهند. با توجه به تئوری الاستیسیته سه‌بعدی برای مواد جامد، رفتار مواد را می‌توان توسط چهار ثابت بیان کرد. این ثوابت شامل مدول یانگ^۵ (E)، مدول بالک^۶ (k)، ضریب پواسون (ν) و مدول برشی (G) هستند که به یکدیگر وابسته‌اند و توسط روابط ۲ به دست می‌آیند [۴۶].

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (2)$$

$$k = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}$$

با توجه به رابطه (۲) به وضوح مشاهده می‌شود که با کاهش نسبت پواسون، مقاومت مواد تحت نیروی برشی افزایش می‌یابد. نسبت پواسون مواد همسانگرد سه‌بعدی در بازه ۰٫۵ تا ۱- است. اگر مقدار نسبت پواسون ۱- باشد، با توجه به رابطه ۲ مدول برشی به سمت بی‌نهایت میل می‌کند. همچنین مواد آگزتیک مدول بالک کوچک‌تری نسبت به مواد معمول دارا هستند.

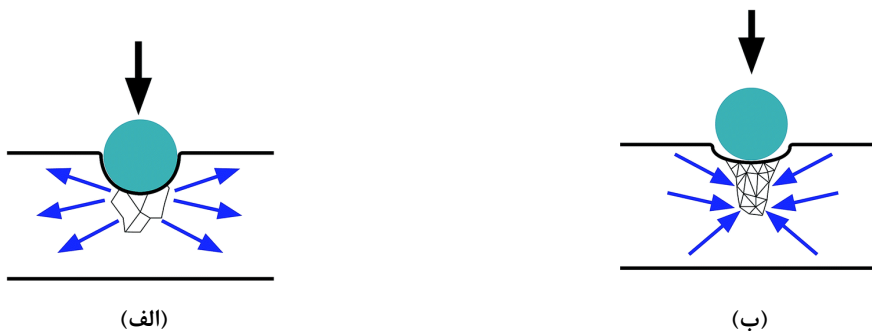
۳-۲- مقاومت در برابر فرورفتگی

هنگامی که یک ماده معمول تحت فشار عمودی قرار گیرد، مطابق شکل ۱۰-الف برای جبران این فشار در جهت عمود بر فشار اعمال شده گسترش می‌یابد. به‌طور متفاوت، هنگامی که یک ماده آگزتیک تحت فشار عمودی قرار گیرد مطابق شکل ۱۰-ب انقباض موضعی مشاهده می‌شود. به‌بیان‌دیگر، در این حالت منطقه‌ای از ماده که عاری از فشار است به سمت مناطق تحت فشار می‌آید و باعث مقاومت بیشتر در برابر فرورفتگی ساختار می‌شود [۴۷].

مقاومت در برابر فرورفتگی مواد توسط تئوری الاستیسیته مطابق رابطه ۳ بیان می‌شود. این رابطه بیان می‌نماید که مقاومت در برابر فرورفتگی به شدت با سختی ماده مرتبط است [۴۸].

$$H \approx \left[\frac{E}{(1 - \nu^2)} \right]^\gamma \quad (3)$$

در رابطه بالا E، ν و H، به ترتیب بیانگر مدول یانگ، ضریب پواسون و سختی ساختار هستند و γ ثابتی است که در حالت یکنواخت بین ۱ تا ۳٫۳ فرض می‌شود. با توجه به رابطه ۳ هنگامی که نسبت پواسون ۱- شود مقاومت در برابر فرورفتگی و سختی ماده به سمت بی‌نهایت میل می‌نماید.



شکل ۱۰ عکس‌العمل مواد معمول در برابر فرورفتگی. (ب) عکس‌العمل مواد آگزتیک در برابر فرورفتگی [۴۹]

۳-۳- مقاومت در برابر شکست

طبق تحقیقاتی که در سال‌های اخیر انجام شده است، مقاومت در برابر شکست مواد آگزتیک نسبت به مواد معمول بیشتر است [۵۰]. همچنین از طریق بررسی‌های تجربی که انجام شد، رشد ترک در این مواد بسیار کمتر از مواد معمول گزارش شده

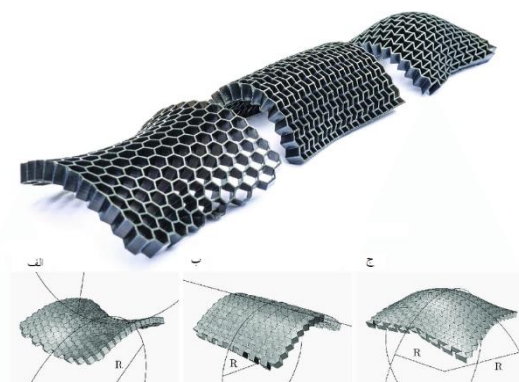
⁵ Young's modulus

⁶ Bulk modulus

است [۵۳-۵۱]. دونوقو و همکاران نشان دادند که ساختارهای چندلایه آگرتیک انرژی بسیار بیشتری نسبت سایر مواد مورد استفاده در این ساختارها ذخیره و جذب می‌کنند [۵۴]. طبق تحقیقات بولار و همکاران [۵۵] مواد آگرتیک در مقایسه با مواد غیر آگرتیک، مقاومتشان در برابر رشد ترک تقریباً دو برابر بیشتر است. شبیه به این نتیجه‌گیری را اخیراً یانگ و همکاران [۵۶] بیان نمودند. با توجه به تحقیقات آنها مقاومت کامپوزیت‌های آگرتیک تقریباً دو برابر بیشتر از کامپوزیت‌های معمول است.

۳-۴- رفتار گنبدی شکل

هنگامی که ورق معمول تحت خمش قرار گیرد باعث تشکیل انحنای زین اسبی مطابق شکل الف-۱۱ می‌شود و هنگامی که ورق آگرتیک تحت خمش قرار گیرد، مطابق شکل ج-۱۱ باعث تشکیل انحنای گنبدی شکل می‌گردد. علاوه بر این ورق با نسبت پواسون صفر نیز تحت خمش، مطابق شکل ب-۱۱، لبه‌های آزاد در جای خود باقی می‌ماند و اصطلاحاً تک انحنا می‌شود. این ویژگی مواد آگرتیک، تولید شکل گنبدی را بدون نیاز به ماشین‌کاری بیش‌ازحدی که ممکن است باعث تخریب ساختار شود ارائه می‌دهد. همچنین این خاصیت در صنایع پزشکی نیز کاربرد بسیاری دارد [۵۷-۵۸].

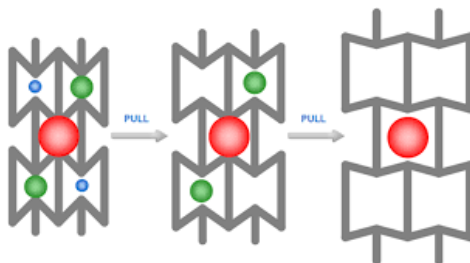


شکل ۱۱ (الف) ساختار معمول تحت خمش. (ب) ساختار با نسبت پواسون صفر تحت خمش. (ج) ساختار آگرتیک تحت خمش

[۵۹]

۳-۵- نفوذپذیری متغیر

مواد آگرتیک بیشتر توسط ساختارهای متخلخل در مقیاس ماکرو شناخته شده‌اند. این مواد در هنگام کشش یا فشار باعث باز یا بسته شدن منافذشان می‌شوند. این خاصیت مواد آگرتیک پتانسیل بالقوه‌ای را در کاربردهای مختلف فیلتراسیون به وجود آورده است. نمونه‌ای از این کاربرد در شکل ۱۲ نشان داده شده است. آلدرسون و همکاران [۶۰] نشان دادند که چگونه مواد آگرتیک به دلیل عملکردشان از مقیاس ماکرو به نانو به دلیل باز شدن منافذشان فیلتر بهبود یافته‌ای را ارائه می‌دهند.



شکل ۱۲ فیلتر هوشمند برای نفوذپذیری متغیر [۶۱]

۳-۶- جذب انرژی

مواد آگرتیک از لحاظ جذب انرژی نسبت به مواد معمول عملکرد بهتری را از خود نشان می‌دهند. یانگ و همکاران [۶۲]

شبیه‌سازی عددی گسترده‌ای بر روی مقاومت و جذب انرژی پل‌های ساندویچی آگرتیک درون‌رو و فوم‌های آلومینیومی انجام دادند. آن‌ها دریافتند که پل ساندویچی با هسته آگرتیک نسبت به هسته لانه زنبوری عملکرد بهتری در جذب انرژی دارد. این مقاومت از افزایش غلظت ساختار در ناحیه‌ای که تحت تأثیر نیرو است، ناشی می‌شود. ژانگ و همکاران [۶۳] ساختارهای سلولی درون‌رو را در حالت بارگذاری دینامیکی شبیه‌سازی کردند. آن‌ها دریافتند تنش و جذب انرژی با افزایش زاویه سلول آگرتیک قابل بهبود است. در ادامه بررسی‌شان، کامپوزیت ساندویچی آگرتیک توسعه یافته‌ای را در برابر انفجار قرار دادند و دریافتند این پانل کامپوزیتی پیشنهادشده یک ساختار محافظتی بسیار مناسبی در برابر بارهای انفجاری است و انرژی بیشتری در این حالت توسط تغییر شکل پلاستیک جذب می‌شود.

۴- کاربرد مواد آگرتیک

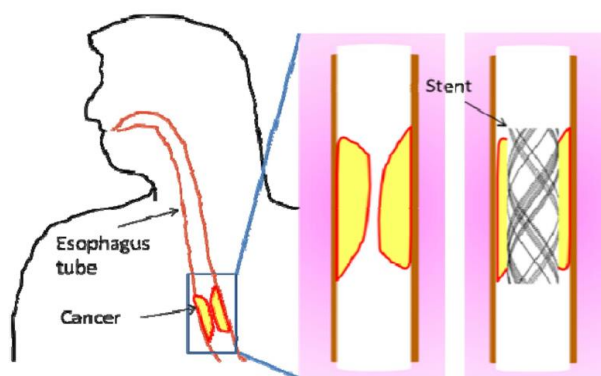
این مواد به سبب ویژگی‌های غیرمعمول تغییر شکل کاربردهای متنوعی پیدا کرده‌اند. برخی از این کاربردها در جدول ۱ نشان داده شده است [۶۴، ۵۱، ۲۰-۶۶].

جدول ۱ کاربرد مواد آگرتیک

کاربرد	عرصه
پره‌های مخصوص هواپیما، محافظ حرارتی، جاذب ارتعاش	هوافضا
سپر، اتصال دهنده‌ها، جاذب صدا و ارتعاش	خودرو
بانداز، پد فشار زخم، نخ دندان، رگ‌های مصنوعی خون، واحدهای رهاسازی داروی مصنوعی پوست، ایمپلنت‌های جراحی	پزشکی
تقویت الیاف	کامپوزیت
کلاه ایمنی، جلیقه ضد گلوله، زانو بند، دستکش	نظامی
هیدروفون، دستگاه‌های پیزوالکتریک، سنسورهای متنوع	سنسورها
الیاف، نخ‌ها، تسمه‌های تغییر رنگ، انواع پارچه‌ها	نساجی

۴-۱- کاربرد پزشکی

مواد آگرتیک در صنایع پزشکی کاربرد بسیار زیادی دارد. از مهم‌ترین کاربردهای این مواد ساخت استنت برای سرطان مری است [۶۷]. سرطان مری از شایع‌ترین و حیاتی‌ترین سرطان‌ها در جهان است. بیماران که این سرطان را دارند ممکن است توموری در مری آن‌ها ایجاد شود و مسیر غذا را مسدود کند. اگر این استنت مطابق شکل ۱۳ در مری آن‌ها قرار گیرد قادر به باز ماندن مری در هنگام خوردن غذا می‌شود. حضور ساختارهای متخلخل ماکرو در داربست‌ها، علاوه بر افزایش سرعت جذب، باعث فراهم آمدن ساختاری برای رشد سلول‌های استخوانی و ایجاد استخوان جدید با ساختار کامل و یکنواخت می‌شود [۶۸]. استفاده از ساختارهای سلولی با خاصیت آگرتیک می‌تواند مزیت‌هایی مانند حذف سایش استخوان در محل اتصالات را داشته باشد [۶۹، ۷۰].



شکل ۱۳ استنت موجود در مری [۷۱]

۲-۴- دستگاہ‌های محافظتی

مواد آگزتیک درازای پتانسیل بسیار بالایی برای استفاده در دستگاہ‌های محافظتی مانند پدها، کلاه کاسکت و دستکش هستند. استفاده از لباس‌ها و تجهیزات محافظ برای ورزش‌های خطرناک مانند دوچرخه‌سواری، موتورسواری، مسابقات سرعت و اسکیت ضروری و لازم است. در این ورزش‌ها بخش‌هایی از بدن مانند آرنج و زانو بیشتر در معرض آسیب هستند. بنابراین معمولاً از پدهای محافظتی در این نواحی استفاده می‌شود. پدهای محافظتی که امروزه در دسترس هستند از اسفنج‌هایی ساخته شده‌اند که نفوذپذیری کمی دارند. پارچه‌های آگزتیک سه‌بعدی به علت راحتی مناسب‌تری که نسبت به اسفنج‌های متداول دارند جایگزین مناسبی برای این مواد هستند.

۳-۴- منسوجات

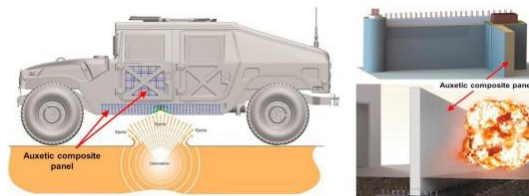
منسوجات آگزتیک به دلیل ویژگی‌های از قبیل جذب انرژی و تغییر شکل بالا، مقاومت در برابر سایش، قابلیت انعطاف‌پذیری و شکل‌پذیری گنبدی‌شکل مورد توجه بسیاری قرار گرفته‌اند. نمونه‌ای از این کاربرد را می‌توان به کفش‌های که کف آن‌ها مبتنی بر ساختار آگزتیک است اشاره نمود. این کفش‌ها به ورزشکاران کمک می‌نماید تا هنگام راه رفتن یا دویدن فشار را به‌طور یکسان به تمامی کف پا پخش نماید و باعث راحتی پا هنگام ورزش کردن شود. شکل (۱۴) نمونه‌ای از این کفش‌ها را با ساختار آگزتیک نشان می‌دهد.



شکل ۱۴ کفش‌های ورزشی دارای ساختار آگزتیک [۳۰]

۴-۴- نظامی

مواد آگزتیک به دلیل مقاومت بالایی که در برابر ضربه دارند برای ساخت جلیقه‌های ضدگلوله، خودروهای زرهی، دیوارهای محافظ در برابر انفجار و دیگر کاربردها مناسب هستند. این مواد در هنگام اصابت گلوله یا موج انفجار مطابق شکل ۱۵ از اطراف فشرده‌تر شده و از پیشروی گلوله و موج انفجار جلوگیری می‌نمایند.



شکل ۱۵ کاربرد نظامی مواد آگزتیک [۲۷]

۵-۴- کمربندهای ایمنی

کاربرد دیگر این مواد در کمربندهای ایمنی است. هنگام تصادف سرنشینان 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 باریک‌تر شدن نوار نیروی وارد شده در سطح کوچک‌تری متمرکز می‌شود. این موضوع در افراد میان‌سال، زنان باردار و کودکان، جراحات‌های جدی را ممکن است به وجود آورد. این موضوع درحالیست که کمربند آگزیٹیک در چنین موقعیتی پهن‌تر شده و در نتیجه نیروی وارد شده در سطح بزرگ‌تری پخش می‌شود و در نهایت جراحات‌های وارد شده را کاهش می‌دهد.

۴-۶- نوارهای بسته‌بندی

کاربرد دیگر این مواد در نوارهای بسته‌بندی است. مقدار شلی و سفتی این موادها از موارد بسیار مهمی است که باید به آن‌ها توجه شود. اگر نوار خیلی شل باشد ممکن است بار را باز یا رها کند و اگر خیلی سفت باشد ممکن است به بار آسیب رساند. بنابراین برای اجتناب از این مشکلات تسمه‌های آگزیٹیک با قابلیت تغییر رنگ به وجود آمده است. این تسمه‌ها با تغییر رنگ در هنگام کشش مقدار شلی و سفتی نوار بسته‌بندی را مشخص می‌کند.

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله بررسی جامع از مواد و ساختارهای آگزیٹیک ارائه شد. این مواد عموماً با توجه به ساختار خاص خود به وجود آمده و دارای خاصیت ضریب پواسون منفی هستند. مواد با نسبت پواسون منفی به دلیل ویژگی خاص تغییر شکل، دارای خواص منحصر به فردی نسبت به مواد معمول هستند که به همین منظور کاربردهای بسیار متنوعی پیدا کرده‌اند. در این بررسی تمام تلاش برای پوشش کامل مواد آگزیٹیک در زمینه انواع، خواص و کاربردها انجام شده است. پیشرفت‌های بسیار چشمگیری در مورد انواع ساختارها و خواص این مواد انجام شده است اما مسائل بسیاری در این زمینه موجود است که نیازمند بررسی بیشتر است. همچنین با توسعه فناوری‌های تولید و معرفی برخی از تکنیک‌های ساخت مقرون به صرفه، مواد و ساختارهای آگزیٹیک، پتانسیل بسیار بالایی را برای تبدیل شدن به مواد سازه‌ای سبک داشته و نقش بسیار مهمی را در آینده دارا هستند.

۶- مراجع

- [1] Hui W, Ohtaki H, Kotosaka S, Hu G. A study of negative Poisson's ratio in auxetic honeycombs based on a large deflection mode. *European Journal of Mechanics-A: Solids*. 2004;23:95-106.
- [2] Evans K. The design of doubly curved sandwich panels with honeycomb cores. *Composite structures*. 1991;17:95-111.
- [3] Sadd MH. *Elasticity: theory, applications, and numerics*: Academic Press, 2009.
- [4] Lempriere B. Poisson's ratio in orthotropic materials. *Aiaa Journal*. 1968;6:2226-7.
- [5] Baughman RH, Shacklette JM, Zakhidov AA, Stafström S. Negative Poisson's ratios as a common feature of cubic metals. *Nature*. 1998;392:362-5.
- [6] Veronda D, Westmann R. Mechanical characterization of skin—finite deformations. *Journal of biomechanics*. 1970;3:111-24.
- [7] Lees C, Vincent JF, Hillerton JE. Poisson's ratio in skin. *Bio-medical materials and engineering*. 1991;1:19-23.
- [8] Williams J, Lewis J. Properties and an anisotropic model of cancellous bone from the proximal tibial epiphysis. 1982.
- [9] Li Y. The anisotropic behavior of Poisson's ratio, Young's modulus, and shear modulus in hexagonal materials. *Physica Status Solidi (A)*. 1976;38:171-5.
- [10] Mir M, Ali MN, Sami J, Ansari U. Review of mechanics and applications of auxetic structures. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2014;2014.
- [11] Evans KE. Auxetic polymers: a new range of materials. *Endeavour*. 1991;15:170-4.
- [12] Qiu Z. A Simple Theory of Asymmetric Linear Elasticity. *World Journal of Mechanics*. 2020;10:166-85.
- [13] Lakes R. Foam structures with a negative Poisson's ratio. *Science*. 1987;235:1038-40.

- [14] Greaves GN, Greer AL, Lakes RS, Rouxel T. Poisson's ratio and modern materials. *Nature materials*. 2011;10:823-37.
- [15] Jiang J-W, Park HS. Negative poisson's ratio in single-layer black phosphorus. *Nature communications*. 2014;5:1-7.
- [16] Ren X, Shen J, Tran P, Ngo TD, Xie YM. Auxetic nail: Design and experimental study. *Composite structures*. 2018;184:288-98.
- [17] Sun Y, Pugno N. Hierarchical fibers with a negative Poisson's ratio for tougher composites. *Materials*. 2013;6:699-712.
- [18] Scarpa F. Auxetic materials for bioprotheses [In the Spotlight]. *IEEE Signal Processing Magazine*. 2008;25:128-6.
- [19] Park YJ, Kim JK. The effect of negative Poisson's ratio polyurethane scaffolds for articular cartilage tissue engineering applications. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2013;2013.
- [20] Alderson A, Alderson K. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G. J Aerospace Eng*. 2007;221:565-75.
- [21] Bhullar SK. Three decades of auxetic polymers: a review. *e-Polymers*. 2015;15:205-15.
- [22] Mirzaali M, Pahlavani H, Zadpoor A. Auxeticity and stiffness of random networks: Lessons for the rational design of 3D printed mechanical metamaterials. *Applied Physics Letters*. 2019;115:021901.
- [23] Mirzaali M, Hedayati R, Vena P, Vergani L, Strano M, Zadpoor A. Rational design of soft mechanical metamaterials: Independent tailoring of elastic properties with randomness. *Applied Physics Letters*. 2017;111:051903.
- [24] Mirzaali M, Caracciolo A, Pahlavani H, Janbaz S, Vergani L, Zadpoor A. Multi-material 3D printed mechanical metamaterials: Rational design of elastic properties through spatial distribution of hard and soft phases. *Applied Physics Letters*. 2018;113:241903.
- [25] Pahlavani H, Amani M, Saldívar MC, Zhou J, Mirzaali MJ, Zadpoor AA. Deep learning for the rare-event rational design of 3D printed multi-material mechanical metamaterials. *arXiv preprint arXiv:220401769*. 2022.
- [26] Gibson I, Ashby MF. The mechanics of three-dimensional cellular materials. *Proceedings of the royal society of London A Mathematical and physical sciences*. 1982;382:43-59.
- [27] Kolken HM, Zadpoor A. Auxetic mechanical metamaterials. *RSC advances*. 2017;7:5111-29.
- [28] Ashby MF, Gibson LJ. *Cellular solids: structure and properties*. Press Syndicate of the University of Cambridge, Cambridge, UK. 1997:175-231.
- [29] Larsen UD, Signund O, Bouwsta S. Design and fabrication of compliant micromechanisms and structures with negative Poisson's ratio. *Journal of microelectromechanical systems*. 1997;6:99-106.
- [30] Theocaris P, Stavroulakis G, Panagiotopoulos P. Negative Poisson's ratios in composites with star-shaped inclusions: a numerical homogenization approach. *Archive of Applied Mechanics*. 1997;67:274-86.
- [31] Smith CW, Grima J, Evans K. A novel mechanism for generating auxetic behaviour in reticulated foams: missing rib foam model. *Acta materialia*. 2000;48:4349-56.
- [32] Yanping L, Hong H. A review on auxetic structures and polymeric materials. *Scientific Research and Essays*. 2010;5:1052-63.
- [33] Dolla WJS, Fricke BA, Becker BR. Structural and drug diffusion models of conventional and auxetic drug-eluting stents. 2007.
- [34] Lakes R. Deformation mechanisms in negative Poisson's ratio materials: structural aspects. *Journal of materials science*. 1991;26:2287-92.
- [35] Prall D, Lakes R. Properties of a chiral honeycomb with a Poisson's ratio of -1 . *International Journal of Mechanical Sciences*. 1997;39:305-14.
- [36] Grima JN, Gatt R, Farrugia PS. On the properties of auxetic meta-tetrachiral structures. *physica status solidi (b)*. 2008;245:511-20.

- [37] Lorato A, Innocenti P, Scarpa F, Alderson A, Alderson K, Zied K, et al. The transverse elastic properties of chiral honeycombs. *Composites Science and Technology*. 2010;70:1057-63.
- [38] Grima JN, Evans KE. Auxetic behavior from rotating squares. *Journal of Materials Science Letters*. 2000;19:1563-5.
- [39] Attard D, Casha AR, Grima JN. Filtration properties of auxetics with rotating rigid units. *Materials*. 2018;11:725.
- [40] Wojciechowski K. Constant thermodynamic tension Monte Carlo studies of elastic properties of a two-dimensional system of hard cyclic hexamers. *Molecular Physics*. 1987;61:1247-58.
- [41] Khoshgoftar MJ, Barkhordari A, Seifoori S, Mirzaali MJ. Elasticity Approach to Predict Shape Transformation of Functionally Graded Mechanical Metamaterial under Tension. *Materials*. 2021;14:3452.
- [42] Caddock B, Evans K. Microporous materials with negative Poisson's ratios. I. Microstructure and mechanical properties. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 1989;22:1877.
- [43] He C, Liu P, Griffin AC. Toward negative Poisson ratio polymers through molecular design. *Macromolecules*. 1998;31:3145-7.
- [44] Evans KE, Alderson K. Auxetic materials: the positive side of being negative. *Engineering Science & Education Journal*. 2000;9:148-54.
- [45] Ng WS, Hu H. Tensile and deformation behavior of auxetic plied yarns. *physica status solidi (b)*. 2017;254:1600790.
- [46] Carneiro VH, Meireles J, Puga H. Auxetic materials—A review. *Materials Science-Poland*. 2013;31:561-71.
- [47] Evans KE, Alderson A. Auxetic materials: functional materials and structures from lateral thinking! *Advanced materials*. 2000;12:617-28.
- [48] Critchley R, Corni I, Wharton JA, Walsh FC, Wood RJ, Stokes KR. A review of the manufacture, mechanical properties and potential applications of auxetic foams. *physica status solidi (b)*. 2013;250:1963-82.
- [49] Khoshgoftar M, Barkhordari A. Sensitivity analysis and study of parameters affecting auxetic cells with reentrant cell structure. *Materials Today Communications*. 2022:103786.
- [50] Choi J, Lakes R. Non-linear properties of metallic cellular materials with a negative Poisson's ratio. *Journal of materials science*. 1992;27:5375-81.
- [51] Khoshgoftar M, Barkhordari A. Sensitivity analysis and study of parameters affecting auxetic cells with reentrant cell structure. *Materials Today Communications*. 2022:103786.
- [52] Kolken H, Garcia AF, Du Plessis A, Meynen A, Rans C, Scheys L, et al. Mechanisms of fatigue crack initiation and propagation in auxetic meta-biomaterials. *Acta Biomaterialia*. 2022;138:398-409.
- [53] Kolken H, Garcia AF, Du Plessis A, Rans C, Mirzaali M, Zadpoor A. Fatigue performance of auxetic meta-biomaterials. *Acta Biomaterialia*. 2021;126:511-23.
- [54] Donoghue J, Alderson K, Evans K. The fracture toughness of composite laminates with a negative Poisson's ratio. *physica status solidi (b)*. 2009;246:2011-7.
- [55] Bhullar SK, Rana D, Lekesiz H, Bedeloglu AC, Ko J, Cho Y, et al. Design and fabrication of auxetic PCL nanofiber membranes for biomedical applications. *Materials Science and Engineering: C*. 2017;81:334-40.
- [56] Yang S, Chalivendra VB, Kim YK. Fracture and impact characterization of novel auxetic Kevlar®/Epoxy laminated composites. *Composite structures*. 2017;168:120-9.
- [57] Mirzaali M, Janbaz S, Strano M, Vergani L, Zadpoor AA. Shape-matching soft mechanical metamaterials. *Scientific reports*. 2018;8:1-7.
- [58] Mirzaali MJ, Ghorbani A, Nakatani K, Nouri-Goushki M, Tümer N, Callens SJ, et al. Curvature Induced by Deflection in Thick Meta-Plates. *Advanced materials*. 2021;33:2008082.
- [59] Magna RL, Knippers J. Tailoring the bending behaviour of material patterns for the induction of double curvature. *Humanizing digital reality: Springer*; 2018. p. 441-52.
- [60] Alderson A, Rasburn J, Evans K, Grima J. Auxetic polymeric filters display enhanced de-fouling and pressure compensation properties. *Membrane Technology*. 2001;2001:6-8.
- [61] Bezazi A, Boukharouba W, Scarpa F. Mechanical properties of auxetic carbon/epoxy composites: Static and cyclic fatigue behaviour. *physica status solidi (b)*. 2009;246:2102-10.

- [62] Yang S, Qi C, Wang D, Gao R, Hu H, Shu J. A comparative study of ballistic resistance of sandwich panels with aluminum foam and auxetic honeycomb cores. *Advances in Mechanical Engineering*. 2013;5:589216.
- [63] Zhang X-c, Ding H-m, An L-q, Wang X-l. Numerical investigation on dynamic crushing behavior of auxetic honeycombs with various cell-wall angles. *Advances in Mechanical Engineering*. 2015;7:679678.
- [64] Baughman RH, Shacklette JM, Zakhidov AA, Stafström S. Negative Poisson's ratios as a common feature of cubic metals. *Nature*. 1998;392:362-5.
- [65] Friis E, Lakes R, Park J. Negative Poisson's ratio polymeric and metallic foams. *Journal of materials science*. 1988;23:4406-14.
- [66] Avellaneda M, Swart PJ. Calculating the performance of 1–3 piezoelectric composites for hydrophone applications: an effective medium approach. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1998;103:1449-67.
- [67] Ali MN, Busfield JJ, Rehman IU. Auxetic oesophageal stents: structure and mechanical properties. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*. 2014;25:527-53.
- [68] Borhan S, Esmailzadeh J. Fabrication of Nanostructured Apatite Scaffolds by Freeze-Casting Method for Bone Tissue Engineering. *Journal of Advanced Materials and Technologies*. 2021;10:21-31.
- [69] Mirzaali MJ, Moosabeiki V, Rajaai SM, Zhou J, Zadpoor AA. Additive Manufacturing of Biomaterials—Design Principles and Their Implementation. *Materials*. 2022;15:5457.
- [70] Kolken H, Callens S, Leeflang M, Mirzaali M, Zadpoor A. Merging strut-based and minimal surface meta-biomaterials: Decoupling surface area from mechanical properties. *Additive Manufacturing*. 2022;52:102684.
- [71] Bhullar S, Ko J, Ahmed F, Jun M. Design and fabrication of stent with negative Poisson's ratio. *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*. 2014;8:448-54.