



ساخت و آزمون نمونه‌ها و حسگر آگزتیک شش ضلعی به روش عددی و تجربی

بهمن طاهرخانی، علی پورکمالی انارکی*، جواد کدخداپور

مهندسی مکانیک، تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۰۲
بازنگری: ۱۳۹۹/۱۰/۲۳
پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۰۳
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۲/۱۵

کلمات کلیدی:

ساختار آگزتیک شش ضلعی
حسگر آگزتیک پیرومقاوم
فاکتور اندازه
رفتار تغییر شکل
حساسیت

خلاصه: ساختارهای آگزتیک (ضریب پواسون منفی) ساختارهایی هستند که وقتی در جهت طولی تحت کشش (فشار) قرار می‌گیرند در جهت عرضی دچار انقباض (انقباض) می‌گردند. در این کار، اثر هندسه ساختار شش ضلعی آگزتیک روی ضریب پواسون آن تحت بارگذاری کششی بزرگ به روش تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفته و نشان داده شده که مکان و سفتی اتصال‌های چرخشی دو پارامتر جدید مهمی هستند که روی مقدار ضریب پواسون تاثیرگذار هستند. ضریب پواسون با سفت‌تر شدن اتصال‌های چرخشی و دور شدن آن‌ها از وسط ساختار افزایش پیدا می‌کند. بنابراین، با تغییر دادن مکان و سفتی اتصال‌های چرخشی به راحتی می‌توان ساختارهای شش ضلعی آگزتیک با ضرایب پواسون متفاوت را به دست آورد که امکان ساخت حسگرهای پیرومقاوم با حساسیت‌های متفاوت را فراهم می‌کند. حسگر آگزتیک پیرومقاوم کششی با حساسیت بالا برای کرنش‌های پایین از ترکیب لاستیک سیلیکون و الیاف کربن خردشده ارائه شده‌است. کرنش جابجایی مقداری از کرنش می‌باشد که در آن ضریب پواسون ساختار از منفی به مثبت تغییر علامت می‌دهد. حسگرهای آگزتیک ارائه‌شده، عملکرد فوق‌العاده خوبی تا کرنش تغییر دارند و بعد از آن رفتار معمولی از خود نشان می‌دهند. این بهبود در خواص حسی حدود ۱۵۰٪ (بر حسب فاکتور اندازه) در قیاس با حسگرهای معمولی می‌باشد.

۱- مقدمه

ضریب پواسون به صورت حاصل تقسیم کرنش جانبی به کرنش طولی در بارگذاری کششی طولی تعریف می‌شود [۱]. این پارامتر نشان می‌دهد وقتی یک ماده کشیده می‌شود تا چه اندازه باریک می‌گردد. در این مقاله به طراحی یک نوع از فرامواد با ضریب پواسون منفی (ساختار آگزتیک) پرداخته می‌شود. ساختارهای سلولی با ضریب پواسون منفی اولین بار در سال ۱۹۸۲ به شکل لاستیک سیلیکون دوبعدی یا شش ضلعی‌های آلومینیوم که با انحنا ضلع‌ها تغییر شکل پیدا می‌کنند پدیدار شدند [۲]. در سال ۱۹۸۷ لاکس^۱ برای اولین بار فوم پلی‌اورتان با ضریب پواسون ۷۰٪- را ایجاد کرد [۳]. این تفاوت در علامت ضریب پواسون سبب بهبود خواص مکانیکی مهمی نظیر مقاومت در برابر نفوذ، مدول برشی، چقرمگی شکست، جذب صدا و ارتعاش و رفتار تغییر شکل شده و سبب جذاب بودن این ساختارها برای انجام کارهای تحقیقاتی در بخش‌های مختلف صنعت شامل صنایع

دفاع، خودروسازی، مهندسی پزشکی و ورزش شده‌است [۴-۶]. ساختارهای چیرال^۲ [۷، ۸]، اجزای چرخشی [۹]، فوم با ضلع زاویه مقعر^۳ [۱۰-۱۲] و ساختارهای ارگامی^۴ [۱۳، ۱۴] نمونه‌هایی از این ساختارها می‌باشند. از زمان تولید این ساختارها، کار تحقیقاتی روی مدل‌سازی، طراحی و ساخت این ساختارها پیشرفت قابل ملاحظه‌ای داشته‌است. برای طراحی آن‌ها دو روش کلی وجود دارد: روش اول که با عنوان روش بهینه‌سازی پارامتری^۵ شناخته می‌شود و در آن با تغییر دادن ابعاد ساختار، ضریب پواسون مطلوب به دست می‌آید [۱۲]. این روش برای استفاده در طراحی فرامواد، به شدت وابسته به درک طراح و مقایسه با راه‌حل‌های طراحی موجود می‌باشد که با فضای طراحی کم محدود می‌شود. روش دوم که به عنوان روش بهینه‌سازی توپولوژی^۶ شناخته می‌شود و در آن با استفاده از قواعد و روابط ریاضی به تولید این ساختارها پرداخته می‌شود [۱۵]. بهینه‌سازی توپولوژی

- 2 -chiral
- 3 -foams with re-entrant ribs
- 4 -origami structures
- 5 -conventional design
- 6 -topology optimization

1 -Lakes

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ali_pourkamali@sru.ac.ir



رفتار تغییر شکل این ساختارها تحت بارگذاری کششی بزرگ بررسی شده و نشان داده شده است که ساختارهای شش ضلعی آگزتیک تا یک کرنش خاص به نام کرنش تغییر، آگزتیک هستند و بعد از آن ضریب پواسون مثبت دارند. سپس با استفاده از ایده های به دست آمده، به نحوه ساخت حسگر پیزومقاوم با کاربرد کرنش های کوچک پرداخته شده است. سه مرحله توصیف شده، راهکار مناسب برای طراحی حسگر آگزتیک با میزان و محدوده حساسیت دلخواه را ارائه می دهد.

۲- کار تجربی:

۲-۱- آماده سازی نمونه های آزمایش کشش:

مواد مورد استفاده در این مقاله شامل ترموپلاستیک پلی اورتان (برای مطالعه مکانیزم تغییر شکل ساختار شش ضلعی آگزتیک) و مخلوط لاستیک سیلیکون/الیاف کربن خرد شده (برای ساخت حسگر پیزومقاوم) می باشد. به منظور شناسایی خواص مکانیکی این مواد، نمونه های آزمایش هر کدام به تعداد ۵ نمونه بر طبق استاندارد^۱ ساخته شده اند. برای ماده ترموپلاستیک پلی اورتان، نمونه های آزمایش با استفاده از پرینت سه بعدی ساخته شده اند و برای ماده کامپوزیتی ابتدا قالب آن با پرینت سه بعدی آماده شده و سپس خمیر کامپوزیت در داخل قالب قرار گرفته و پس از خشک شدن از داخل قالب جدا شده اند. شکل (الف) تکنولوژی پرینت سه بعدی (ب) ابعاد نمونه آزمایش (ج) نمونه آزمایش ترموپلاستیک پلی اورتان و (د) قالب نمونه آزمایش مخلوط لاستیک سیلیکون/الیاف کربن خرد شده را نشان می دهد. همچنین چهار نمونه ساختار شش ضلعی آگزتیک توسط دستگاه پرینت سه بعدی مطابق شکل ۲ پرینت شده است. نوار طراحی شده روی نمونه ها به منظور بستن آنها در درون فیکسچر طراحی شده می باشد. برای تولید نمونه ها ابتدا آنها با نرم افزار سالیدورکس ۲۰۱۴ مدل شده و سپس با نرم افزار منکاتی سه بعدی^۲، تنظیمات پرینت طبق جدول ۱ صورت گرفته و سپس با استفاده از دستگاه پرینت سه بعدی سیزان اقدام به پرینت نمونه ها شده است [۳۴، ۳۵].

فیلامنت اسید پلی لاکتیک^۳ با ضخامت ۲ میلی متر برای تولید قالب حسگر مورد استفاده قرار گرفته است. لاستیک سیلیکون ولکانیزه شده در دمای اتاق به عنوان پلیمر پایه ترکیب شده با سخت کننده با نسبت ۲۰:۱ به عنوان پلیمر پایه حسگر استفاده شده است. الیاف کربن با ضخامت ۳ میلی متر و با نخ تار

یک ابزار محاسباتی قوی است که مساله طراحی را به عنوان یک مساله توزیع ماده بهینه از نو طرح می کند؛ به طوری که سیستم، یک ساختار ماده بهینه را به منظور برآورده کردن ضرورت های تابعی تعیین شده توسط توابع قید و هدف در شمای بهینه سازی پیدا می کند [۱۵، ۱۶]. در طول سه دهه گذشته، بهینه سازی توپولوژی ساختارهای تحمل کننده بار سبک وزن با رفتار الاستیک خطی به خوبی بنا شده و طراحی سیستماتیک فرامواد با رفتار غیر خطی بالا توسعه پیدا کرده است [۱۷]. مثال های بهینه سازی توپولوژی شامل همگن سازی، بهینه سازی ساختاری تکاملی دو جهته، سطح تراز و مواد ایزوتروپیک جامد جریمه ای می باشند. بهینه سازی توپولوژی ساختارهای بارگذاری شده استاتیکی با خواص خطی در طول سال های اخیر بهبود زیادی داشته است [۲۰-۱۸].

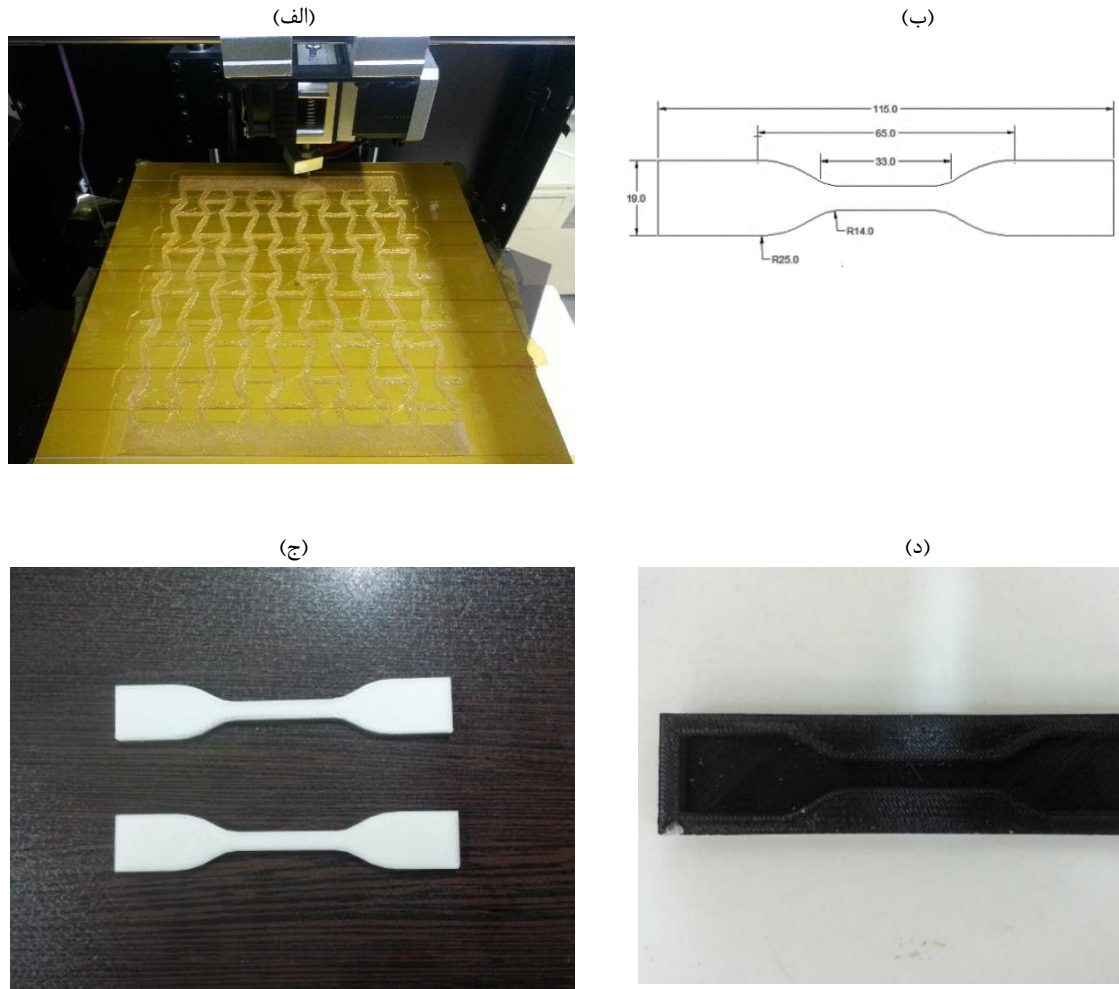
حسگرهای فشاری پیزومقاوم که نیروی ورودی را از طریق تغییر در مقاومت، تبدیل به سیگنال الکتریکی می کنند توجه قابل ملاحظه ای را به دلیل خاصیت سادگی، طراحی و به کارگیری ارزان به خود جلب کرده اند. اکثر حسگرهای پیزومقاوم انعطاف پذیر از طریق پوشش رسانای نانومواد (شامل نانوتیوب های کربن، گرافن، نانوسیم ها و نانوذرات) روی ماده ای انعطاف پذیر (شامل الیاف ها، فیلم ها و فوم های سلول باز) با کمک روش های فرایندی مانند مخلوط کردن، پوشش دادن و پرینت گرفتن ساخته می شوند [۳۲-۲۱]. از بین نانومواد رسانای متفاوت، نانوتیوب های کربن به دلیل حساسیت پیزومقاوم بسیار زیاد توجه قابل ملاحظه ای را به خود جلب کرده اند. علاوه بر نانوموادها که المان های حسی فعال می باشند، خواص ماده پایه نیز نقش کلیدی در تعیین عملکرد حسی نهایی بازی می کند. اکثر مطالعات روی اثرات ماده ای پایه، روی مدول الاستیک متمرکز شده است و این پیشنهاد شده است که ماده پایه متخلخل با مدول الاستیک کاهش یافته سبب افزایش خاصیت حسی می گردد. علاوه بر آن، ضریب پواسون نیز می تواند روی عملکرد حسی حسگرهای پیزومقاوم اثرگذار باشد اگرچه مطالعات زیادی روی آن انجام نشده است [۳۳].

در این مقاله، ارتباط بین رفتار تغییر شکل ساختارهای آگزتیک با خواص حسی آنها بیان شده است. برای طراحی حسگر آگزتیک باید سه مرحله طراحی ساختار آگزتیک، بررسی نحوه تغییر شکل آن و تبدیل آن به حسگر پیزومقاوم انجام شود که در این کار به توضیح این سه مرحله پرداخته شده است. برای این منظور، ساختارهای شش ضلعی آگزتیک با استفاده از روش بهینه سازی توپولوژی سطح تراز طراحی شده و با استفاده از تکنولوژی پرینت سه بعدی ساخته شده اند. با استفاده از کار تجربی و روش شبیه سازی

1 - ASTM D412-6a

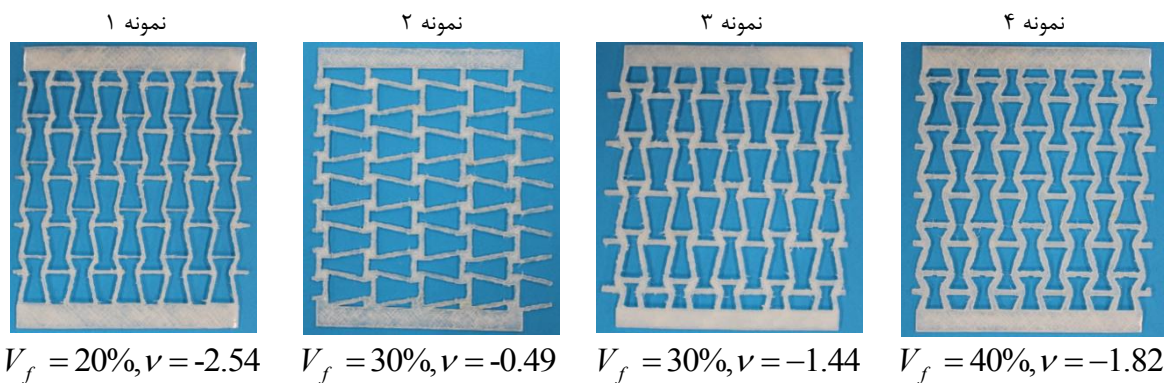
2 - MankatiUM3 D V6.2

3 - Polylactic acid (PLA) filament



شکل ۱. (الف) تکنیک پرینت سه‌بعدی (ب) ابعاد نمونه آزمایش (ج) نمونه ترموپلاستیک پلی‌اورتان (د) قالب نمونه آزمایش ماده کامپوزیتی

Fig. 1. (a) 3D printing technique (b) dog bone dimensions (c) thermoplastic polyuretan sample (d) dog bone of composite material



شکل ۲. ساختارهای شش‌ضلعی آگزیٹیک پرینت‌شده با تکنیک پرینت سه‌بعدی

Fig. 2. Re-entrant auxetic structures printed by 3D printing technique

جدول ۱. تنظیمات پرینت سه‌بعدی

Table 1. 3D printing setup

مقادیر در نظر گرفته شده	پارامترهای دستگاه پرینت سه‌بعدی
۰/۵ میلیمتر	قطر نازل
۰/۲ میلیمتر	ارتفاع لایه اولیه
۱۰۰	درصد پرشدگی داخلی
%۹۹	همپوشانی طرح کلی
۲۴۰ درجه سانتیگراد	دمای نازل
۶۰ درجه سانتیگراد	دمای بستر
۲۴۰ میلیمتر بر دقیقه	سرعت پرینت پیش فرض

بالایی دارد و همانطور که در شکل ۳ مشخص است ماده تا کرنش ۱۲۰٪ در مقابل گسیختگی مقاومت کرده‌است.

۲-۳- آماده‌سازی حسگر آگزتیکی پیرومقاوم:

درصد حجمی و ضریب پواسون ساختار شش ضلعی آگزتیک استفاده شده به ترتیب برابر ۴۰٪ و ۲/۱- می‌باشد. حسگر آگزتیک ارائه شده شامل ۳۶ سلول واحد می‌باشد و ابعاد آن به صورت ۶۰ × ۴۸ میلیمتر مربع است. به منظور پیدا کردن آستانه حساسیت حسگر آگزتیک، کامپوزیت‌هایی با درصدهای حجمی متفاوت از لاستیک سیلیکون و الیاف خرد شده با فاصله درصد حجمی ۵/۰٪ ساخته شدند (۵ نمونه برای هر مورد). آستانه حساسیت در درصد حجمی ۵۳/۵٪ از الیاف کربن خرد شده یافت شد. مخلوط لاستیک سیلیکون و الیاف کربن خرد شده بر روی قالب ساختار آگزتیک قالب‌گیری شد و پس از زمان یک ساعت ساختار آگزتیک خشک شده از روی قالب جدا گردید. مولتی‌متر دیجیتالی ویکتور سی ۸۶^۳ که قابلیت اتصال به کامپیوتر را دارد، برای ثبت تغییرات مقاومت حسگر استفاده شده‌است. به طور همزمان اطلاعات با استفاده از نرم‌افزار اطلاعات دی‌ام‌ام دستی^۴ ذخیره‌سازی شده‌است. فک‌های گیره دستگاه زوئیک رول با استفاده از چسب پلاستیکی عایق سازی شده‌است. شکل ۴ نحوه آماده‌سازی حسگر آگزتیک را نشان می‌دهد.

K ۱۲ خریداری شده از شرکت شنزن ژیانگو تکنولوژی بالا^۱ به عنوان عنصر رسانا در کامپوزیت‌های پیرومقاوم به کار رفته‌است. به منظور رسیدن به حداکثر میزان رسانایی، الیاف کربن در معرض شعله مستقیم آتش قرار گرفته تا ماده نارسانا موجود بر روی آن‌ها سوزانده شود. الیاف کربن به تکه‌هایی به طول ۱ میلیمتر خرد شده‌است.

۲-۲- آزمایش کشش:

سه مورد آزمایش کششی متفاوت شامل به دست آوردن خواص مکانیکی ماده پایه ساختار آگزتیک شش ضلعی و ماده پایه حسگر پیرومقاوم، آزمایش کششی بزرگ ساختارهای آگزتیک شش ضلعی و آزمایش کششی حسگر پیرومقاوم با استفاده از دستگاه تست جهانی زوئیک رول^۲ انجام شده‌است که این دستگاه دارای ۵ کیلونیوتن سلول بار، نرخ جابجایی ۵ میلیمتر بر دقیقه و ظرفیت ۱۰۰ کیلونیوتن می‌باشد. شکل ۳ الف) دستگاه جهانی زوئیک رول ب) نحوه انجام آزمایش کشش برای نمونه‌ها ج) نمودار تنش کرنش ماده ترموپلاستیک پلی‌اورتان د) نمودار تنش کرنش ماده سازنده حسگر ه) فیکسچر ساخته شده با دستگاه فرز کنترل عددی کامپیوتری و و) تنظیمات تجربی برای آزمایش کشش بزرگ ساختار شش ضلعی آگزتیک را نشان می‌دهد. یک دوربین دیجیتالی با کیفیت تصویر بالا برای عکس برداری از تغییر شکل ساختار شش ضلعی آگزتیک استفاده شده‌است. نکته قابل ملاحظه در مورد ماده ترموپلاستیک پلی‌اورتان آن است که خاصیت الاستیک بسیار

3 - The Victor 86C digital multimeter

4 - Hand DMM Data software

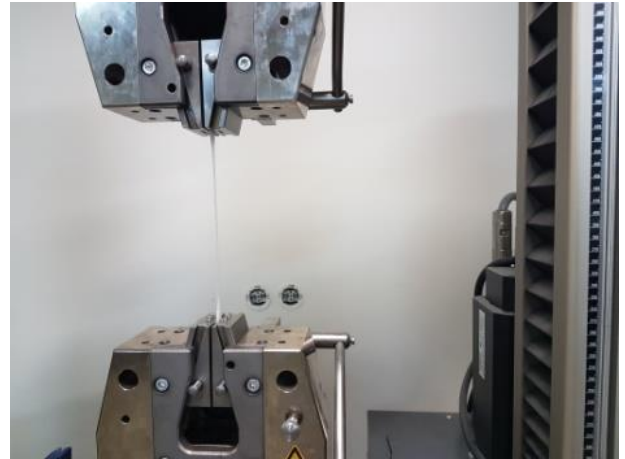
1 -Shenzen Xiangu High-Tech Co. (China)

2 -Zwick/Roell z100 universal testing machine

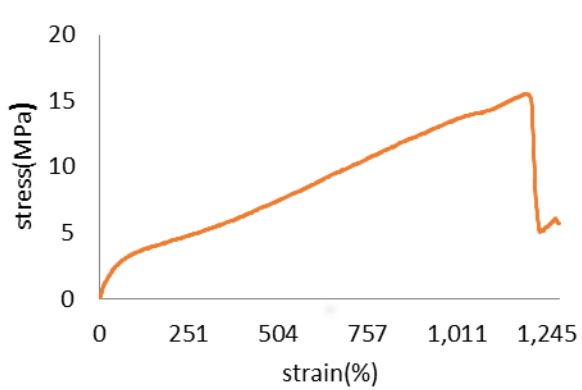
(الف)



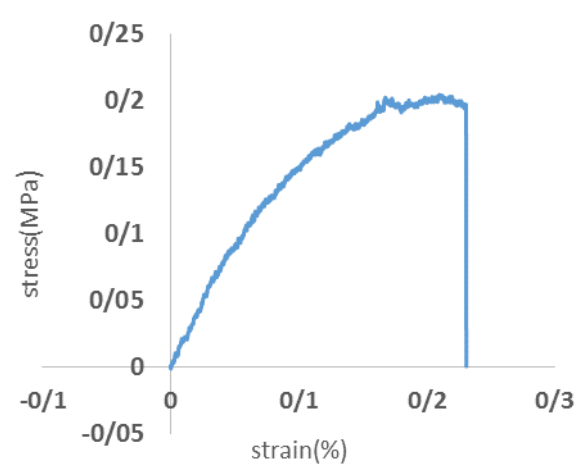
(ب)



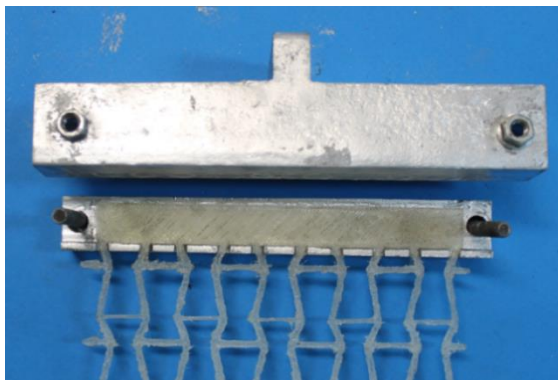
(ج)



(د)



(ه)

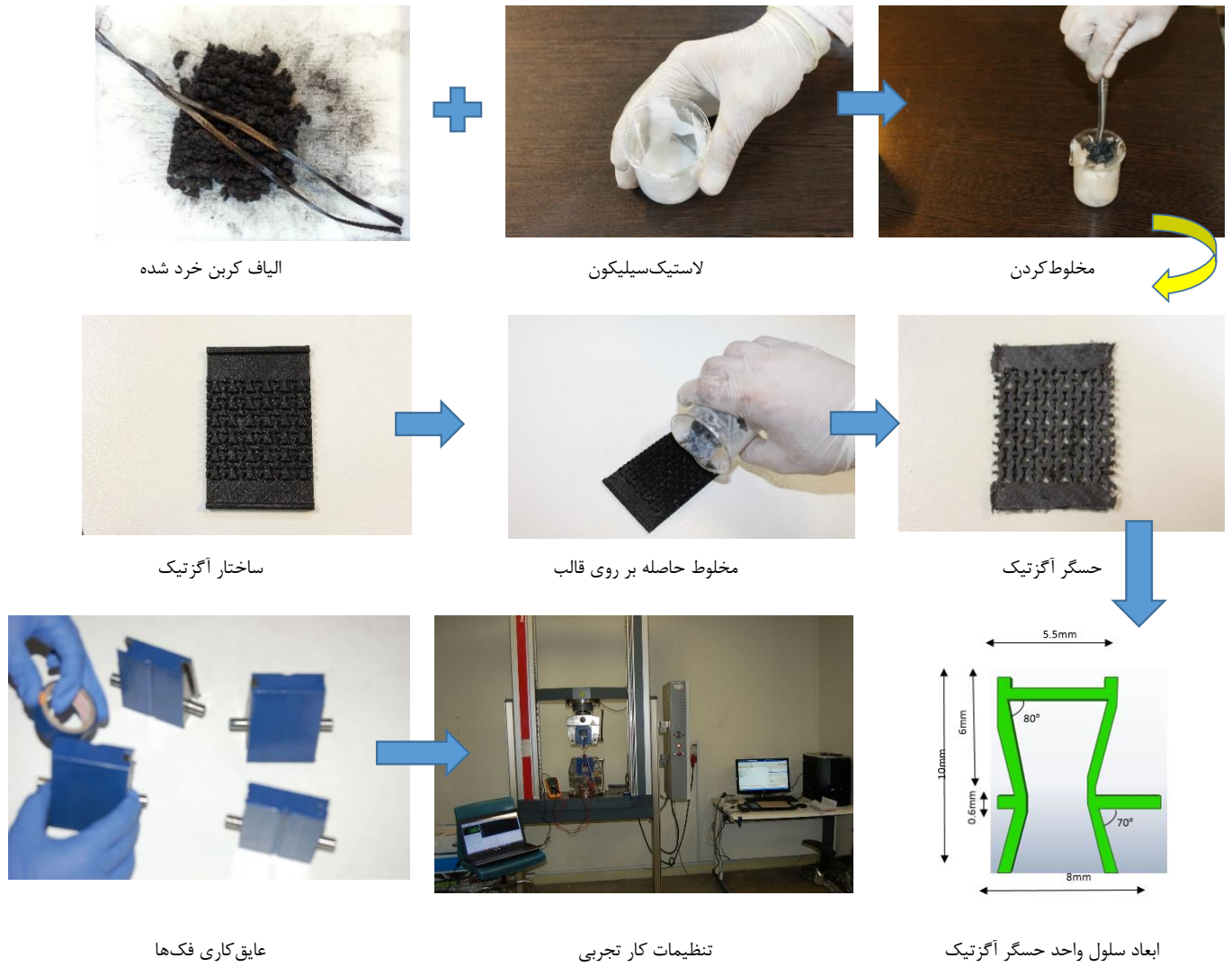


(و)



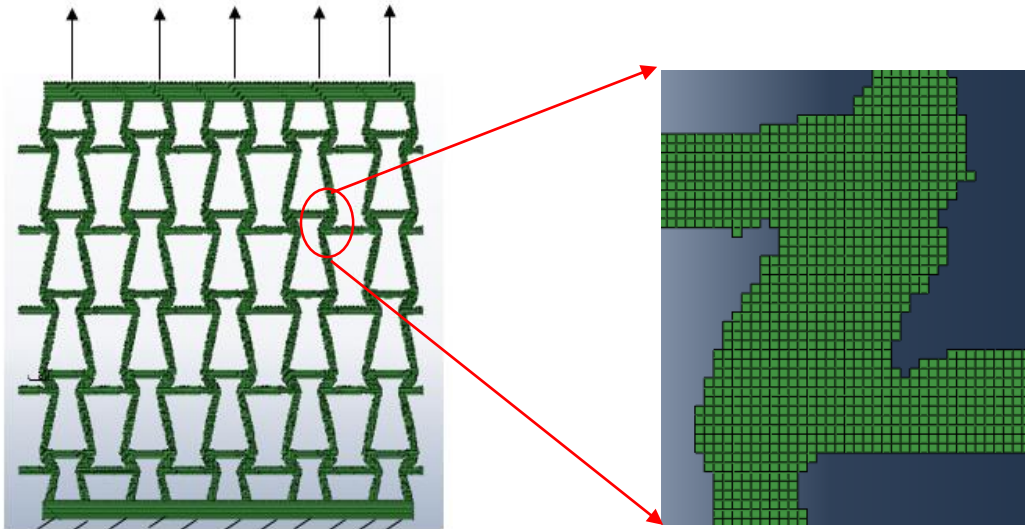
شکل ۳. الف) شمای کلی دستگاه تست جهانی زوئیک رول (ب) آزمایش کشش (ج) نمودار تنش- کرنش برای ماده ترموپلاستیک پلی اورتان (د) نمودار تنش- کرنش ماده سازنده حسگر (ه) جزئیات فیکسچر (و) تنظیمات تجربی

Fig. 3. (a) Overview of the Zwick Roll Universal Testing Machine (b) Tensile test (c) Stress-strain curve of polyurethane thermoplastic material (d) Stress-strain curve of sensor material (e) Details of the fixture (f) experimental setup



شکل ۴. نمای شماتیک ساخت حسگر پیزومقاوم با حساسیت بالا برای کرنش پایین

Fig. 4. Schematic view of making a high-sensitivity piezoresistive auxetic sensor for low strain values



شکل ۵. مش المان محدود نمونه تولیدشده با نرم افزار متلب با تعداد ۱۳۶۰۰۰ المان غشایی چهار گره‌ای با فرمول‌بندی کاهش‌یافته

Fig. 5. Finite element mesh of specimen produced with MATLAB software with 136,000 four-node membrane element with reduced formulation (S4R)

۳- روش شبیه‌سازی:

مدل آنالیز المان محدود نمونه‌ها با استفاده از نرم‌افزار تجاری آباکوس ۲۰۱۷^۱ انجام شده‌است. معیار مارلو^۲ برای واردکردن اطلاعات تجربی به نرم‌افزار استفاده شده‌است و مرحله عمومی استاتیک^۳ به کار گرفته شده‌است. به منظور اعمال کرنش یکنواخت برابر ۸/۱، یک طرف نمونه ثابت شده و به طرف دیگر جابجایی ۱۵۰ میلی‌متر مطابق شکل ۵ اعمال شده‌است. روش شبکه‌بندی نمونه با استفاده از نرم‌افزار متلب با تعداد مش ۱۳۶۰۰۰ از نوع المان غشایی چهار گره‌ای با فرمول‌بندی کاهش‌یافته^۴ انجام شده‌است. در این کار، برای به‌دست‌آوردن ساختارهای آگرتیک از الگوریتم توپولوژی بهینه‌سازی سطح تراز استفاده شده‌است که این امکان را فراهم می‌کند تا ساختار آگرتیک با ضریب پواسون و درصد حجمی دلخواه را به دست آوریم. خروجی این روش یک عکس می‌باشد که با استفاده از مقاله [۳۶] که کد متلب آن هم در پیوست مقاله موجود می‌باشد عکس به‌دست‌آمده به یک فایل مش خورده تبدیل شده که قابل واردشدن به برنامه آباکوس می‌باشد. حال آن که روش بسیار ساده‌تر آن است که عکس را وارد نرم افزار سالیدورکس نماییم و آن را طراحی کنیم و بعد به نرم افزار آباکوس وارد گردد و در داخل نرم افزار آباکوس کار مش‌زنی انجام شود.

۴- نتایج و بحث:

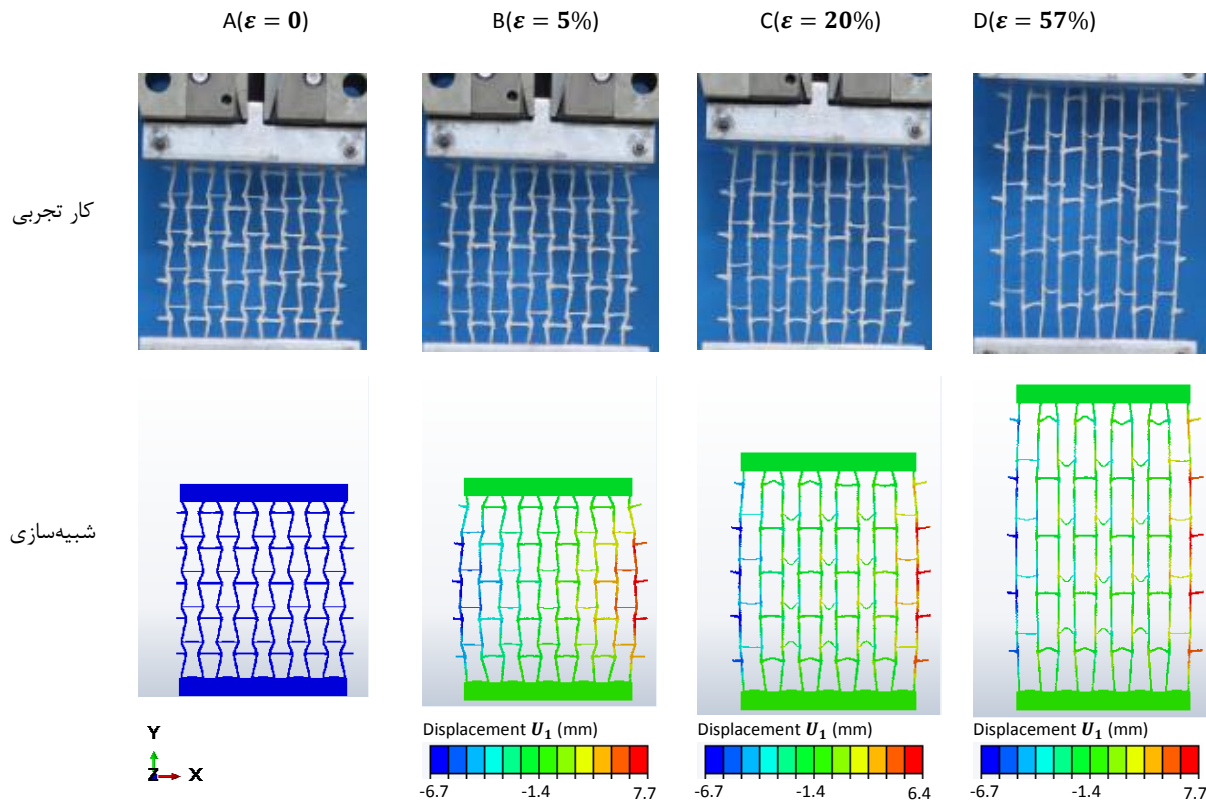
۴-۱- تغییر شکل بزرگ ساختارهای شش ضلعی آگرتیکی:

به منظور بررسی رفتار تغییر شکل ساختارهای شش ضلعی آگرتیک، نمونه‌های ۱ تا ۴ با ابعاد ۱۵۰×۱۵۰×۲ میلی‌متر مکعب انتخاب شده‌اند. شکل‌های ۶ تا ۹ تصاویر متوالی از تغییر شکل نمونه‌های ۱ تا ۴ را تحت بارگذاری کششی به صورت تجربی و عددی را به ترتیب نمایش می‌دهند که انبساط جانبی ساختارها از روی شکل مشخص می‌باشد. به منظور نمایش تغییرات ضریب پواسون بر حسب کرنش، ضریب پواسون ساختار در کرنش‌های متفاوت محاسبه شده و نتیجه در شکل ۱۰ نمایش داده شده‌است. نتایج روش عددی سازگاری خوبی با نتایج تجربی دارند. این نتایج در قسمت بعدی بحث خواهند شد.

۴-۲- الگوی تغییر شکل:

وقتی که ساختارهای شش ضلعی آگرتیک در جهت Y کشیده می‌شوند انبساط جانبی رخ می‌دهد (شکل‌های ۶ تا ۹). این انبساط جانبی به دلیل چرخش ضلع‌های مایل و تبدیل شدن به ضلع‌های عمودی می‌باشد که باعث ایجاد ضریب پواسون منفی می‌گردد (شکل‌های ۹ تا ۱۰). شکل ۱۰ ضریب پواسون ساختار را بر حسب نرخ کرنش نشان می‌دهد. در این کار، کرنش تغییر کرنشی تعریف شده‌است که در آن ضریب پواسون ساختار از منفی به مثبت تغییر علامت پیدا می‌کند. از کرنش صفر تا کرنش تغییر، ضریب

- 1 -commercial ABAQUS2017 software
- 2 -Marlow criterion
- 3 -static general step
- 4 - Four-node membrane element with reduced formulation (S4R)



شکل ۶. توالی تصاویر تغییر شکل یافته نمونه ۱ در طول بارگذاری با روش‌های تجربی و عددی برای کشش در جهت Y

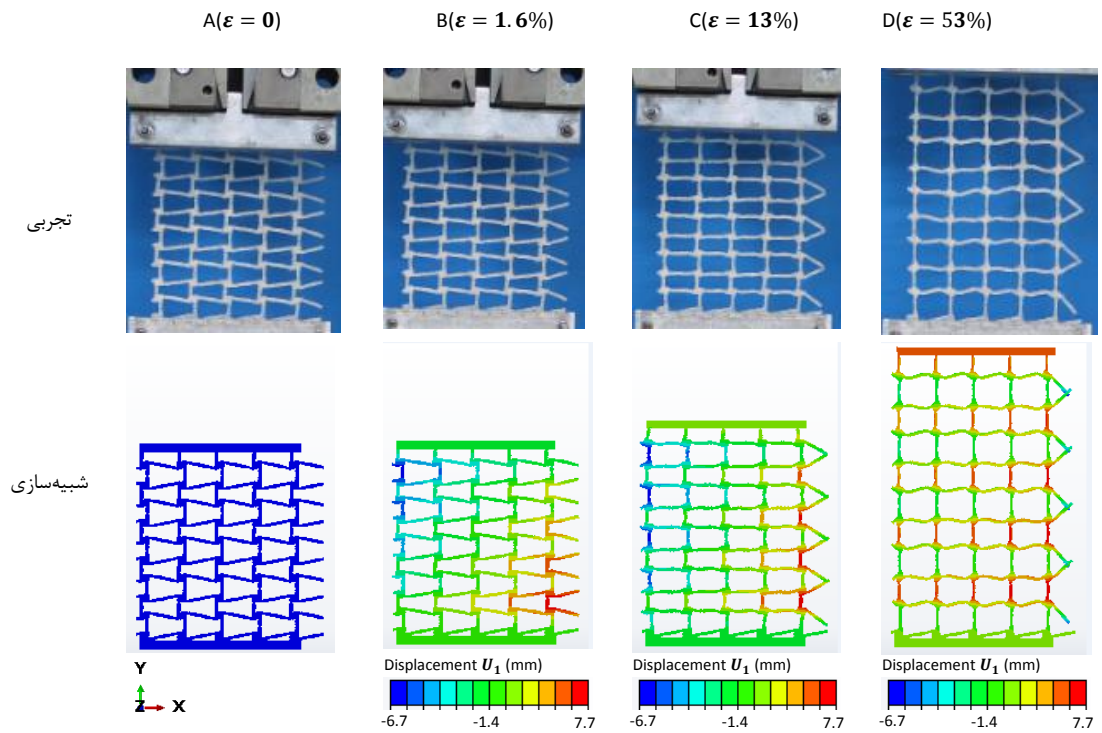
Fig. 6. Sequence of deformed of specimen 1 during tensile loading in direction Y experimentally and numerically

این دو را به عنوان دو ساختار با ضریب پواسون متفاوت به دست آورده‌است. ضریب پواسون نمونه ۳ از نمونه ۲ کمتر است چون ساختارهای شش ضلعی آگزتیک میزان آگزتیک‌بودنشان در یک جهت بیشتر از جهت دیگر می‌باشد. مقایسه هندسی ساختارهای ۱، ۲ و ۴ نشان می‌دهد که پارامترهای آن‌ها به جز ضخامت (t) و موقعیت اتصال چرخشی (d) با هم یکسان می‌باشند. سفتی اتصال چرخشی با افزایش ضخامت ساختار (t) افزایش پیدا می‌کند و منجر به آن می‌گردد که ضلع‌های مایل ساختار سخت‌تر بچرخند و ضریب پواسون ساختار بزرگتر باشد. بنابراین ساختار با ضخامت دیواره بیشتر میزان آگزتیک‌بودن کمتری دارد. به طور مثال، نمونه ۱ میزان آگزتیک بودن بیشتری دارد چون ضخامت دیواره‌های کمتری دارد و اتصال چرخشی آن راحت‌تر می‌تواند بچرخد.

اگرچه نمونه ۳ ضخامت کمتری در قیاس با نمونه ۴ دارد اما آگزتیک بودن کمتری دارد. این به دلیل پارامتر دیگری به نام موقعیت اتصال چرخشی (d) می‌باشد که برای نمونه ۴ فاصله ی اتصال چرخشی از مرکز نزدیکتر از

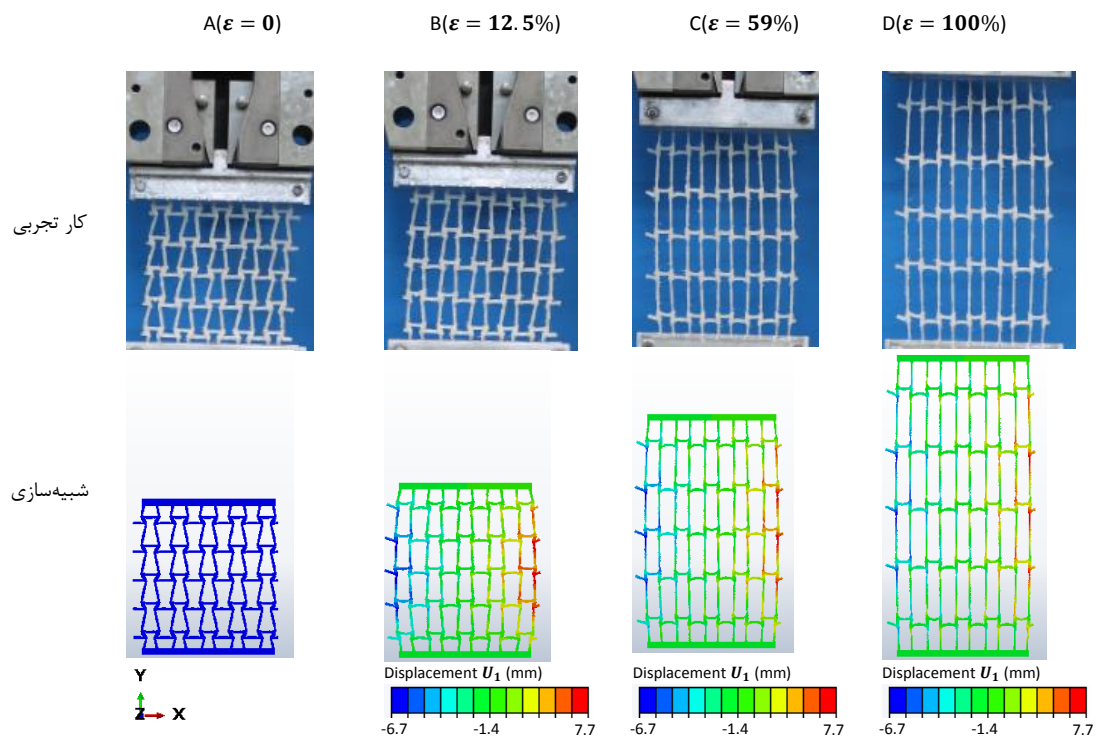
پواسون ساختار منفی و از آن به بعد ضریب پواسون ساختار مثبت است و رفتارش مشابه مواد معمولی می‌باشد. برای مثال، کرنش اشاره شده برای نمونه ۱، ۲۰٪ بوده در حالی که برای نمونه ۴، ۸۵٪ است. بر طبق شکل ۱۰، یک رفتار مشابه برای همه ساختارهای شش ضلعی آگزتیک وجود دارد که در ابتدا نمودار خیلی شدید تغییر کرده و بعد به یک ناحیه پایا می‌رسد. کرنش تغییر برای نمونه ۲ کمترین مقدار (۱۳٪) است چون دارای بیشترین ضریب پواسون (-۴۹/۰) می‌باشد و ضلع‌های مایل آن زودتر تبدیل به ضلع‌های عمودی در مقایسه با ساختارهای دیگر می‌شوند (شکل ۷ب).

در این بخش دلایلی که سبب می‌شود تا ساختارها ضرایب پواسون متفاوتی داشته باشند، بررسی شده است. مکانیزم تغییر شکل ساختارها چرخش ضلع‌های مایل می‌باشد. سلول واحد نمونه‌ها در شکل ۱۱ آورده شده است. نقاط سیاه، اتصال‌های چرخشی را نشان می‌دهند. جدول ۲ پارامترهای هندسی سلول‌های واحد را نشان می‌دهد. نمونه ۲ و نمونه ۳ دقیقاً یکی هستند و تفاوتشان فقط در جهت بارگذاری است که بهینه‌ساز



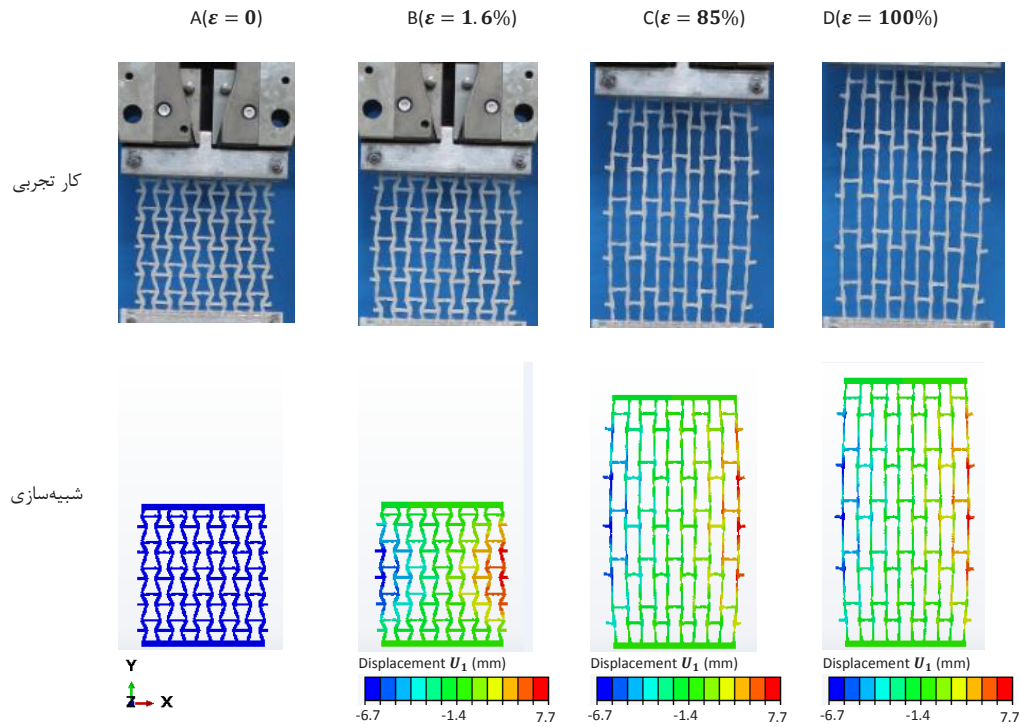
شکل ۷. توالی تصاویر تغییر شکل یافته نمونه ۲ در طول بارگذاری روش‌های تجربی و عددی برای کشش در جهت Y

Fig. 7. Sequence of deformed of specimen 2 during tensile loading in direction Y experimentally and numerically



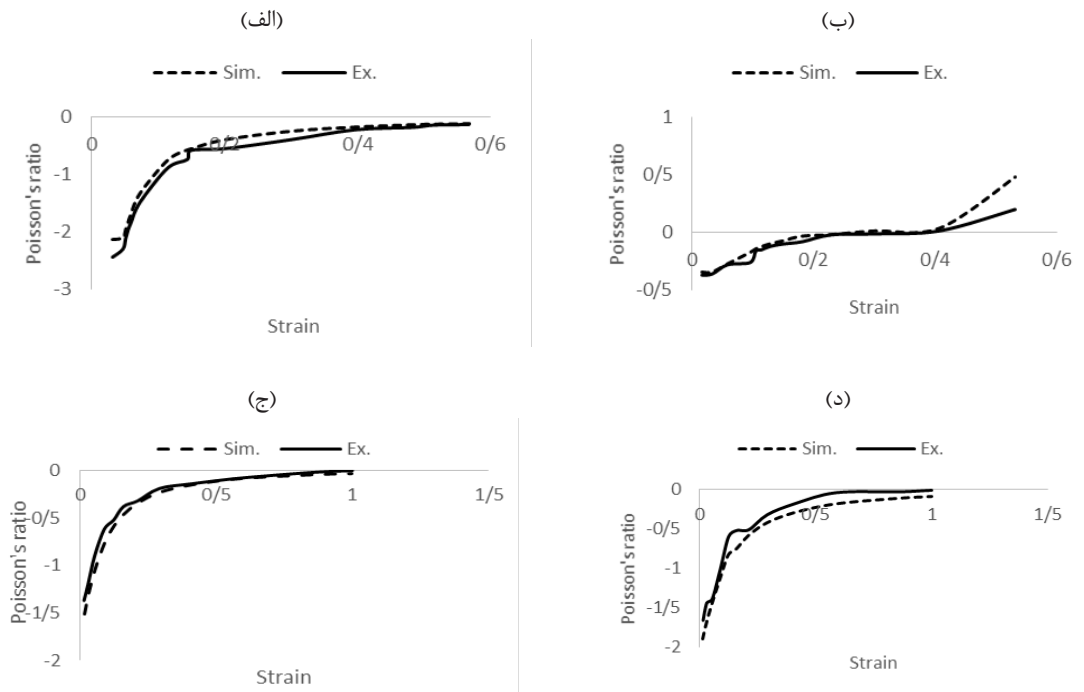
شکل ۸. توالی تصاویر تغییر شکل یافته نمونه ۳ در طول بارگذاری روش‌های تجربی و عددی برای کشش در جهت Y

Fig. 8. Sequence of deformed of specimen 3 during tensile loading in direction Y experimentally and numerically



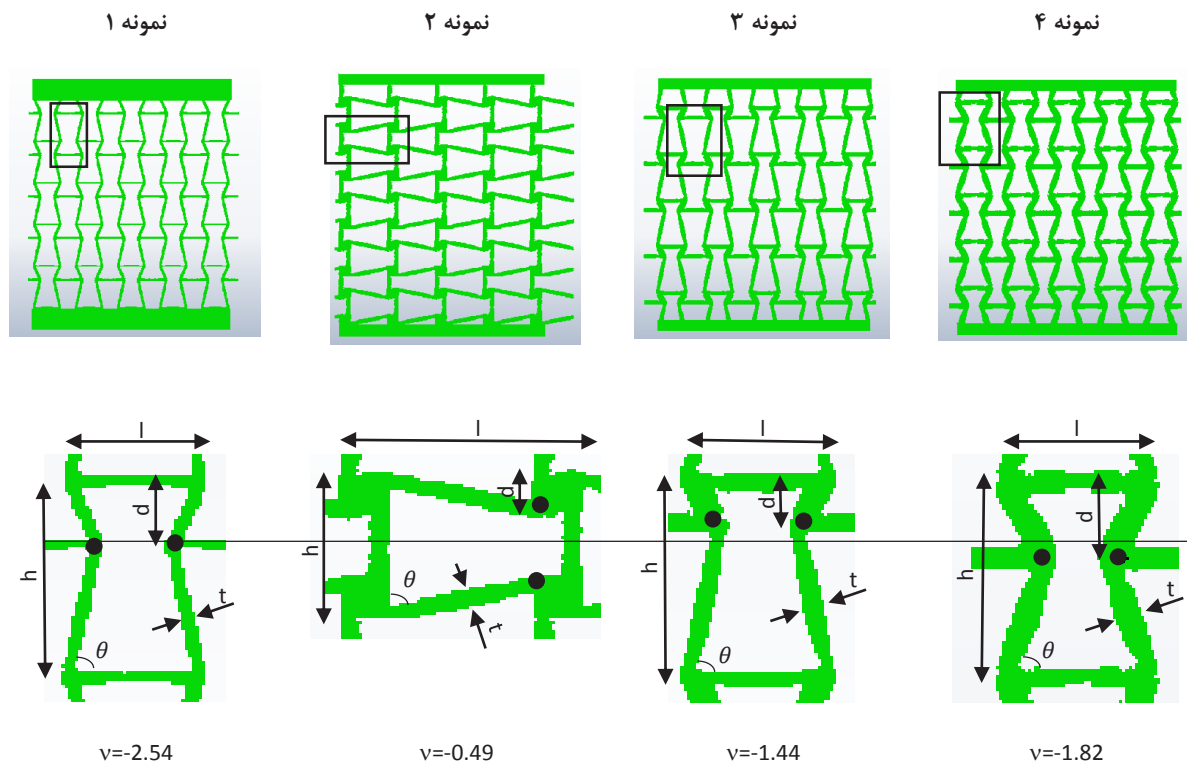
شکل ۹. توالی تصاویر تغییر شکل یافته نمونه ۴ در طول بارگذاری روش‌های تجربی و عددی برای کشش در جهت Y

Fig. 9. Sequence of deformed of specimen 4 during tensile loading in direction Y experimentally and numerically



شکل ۱۰. ضریب پواسون به دست آمده با روش تجربی و عددی: (الف) نمونه ۱ (ب) نمونه ۲ (ج) نمونه ۳ (د) نمونه ۴ در جهت Y

Fig. 10. Poisson's ratio obtained by experimental and numerical methods. (a) specimen1 (b) specimen2 (c) specimen3 (d) specimen4 in direction Y



شکل ۱۱. پارامترهای هندسی سلول واحد نمونه‌های ۱ تا ۴

Fig. 11. The unit cell geometric parameters of specimens 1 to 4

جدول ۲. پارامترهای هندسی برای سلول واحد نمونه‌های ۱ تا ۴

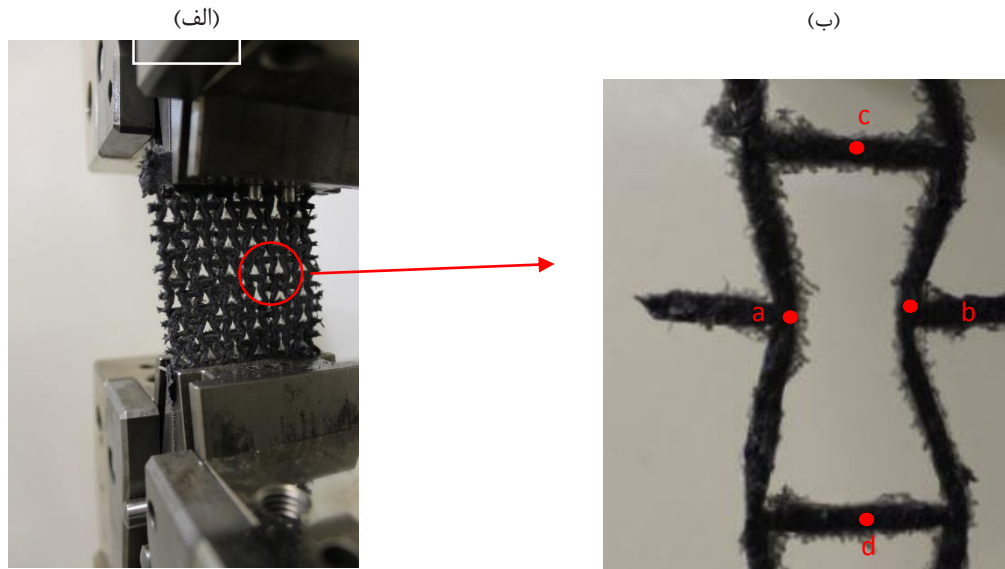
Table 2. Geometric parameters of unit cell for specimens 1 to 4

Specimen	h (mm)	l (mm)	t (mm)	θ (°)	d (mm)
۱	۳۰	۲۲/۸	۲/۶	۷۸	۹/۵
۲	۲۳/۸	۳۰	۳/۳	۷۸	۵/۱
۳	۳۰	۲۳/۸	۳/۳	۷۸	۵/۳
۴	۳۰	۲۴/۱	۴/۳	۷۴	۱۰/۷

۴-۳- ساخت حسگر آگزیٹیک پیزومقاوم برای کرنش‌های کوچک و با حساسیت بالا:

با توجه به نتایج قسمت قبل و نتایج چانگ و همکاران [۳۸] به ساخت حسگر آگزیٹیک پیزومقاوم پرداخته شده‌است. برای این منظور، یک سلول واحد از حسگر مطابق شکل ۱۲ انتخاب شده و رفتار تغییر شکل آن بررسی

نمونه ۳ است. بنابراین موقعیت (d) و سفتی (t) اتصال چرخشی تعیین‌کننده ضریب پواسون سه ساختار انتخاب شده می‌باشند. پارامترهای t و d که در کارهای قبلی [۱۲، ۳۷، ۳۸] بررسی نشده‌اند تاثیر زیادی روی مقدار ضریب پواسون دارند. ضریب پواسون با کم شدن سفتی و نزدیک تر شدن موقعیت اتصال چرخشی به مرکز، کمتر می‌گردد.



شکل ۱۲. (الف) ساختار آگزتیک استفاده شده به عنوان حسگر (ب) بزرگنمایی یک سلول واحد آن

Fig. 12. (a) The auxetic structure used as sensor (b) The magnification one of its unit cell

برقرار کنند. بنابراین جهت طولی کمک به افزایش حساسیت حسگر می‌کند در حالی که جهت عرضی باعث کاهش حساسیت حسگر می‌گردد. حال آنکه در حسگرهای آگزتیک این رقابت با هم همسو شده چون ساختارهای آگزتیک وقتی که تحت کشش قرار می‌گیرند در جهت عرضی نیز منبسط می‌گردند. به این دلیل است که عملکرد حسگرهای آگزتیک پیرومقاوم بهتر از حسگرهای معمولی می‌باشد [۲۱].

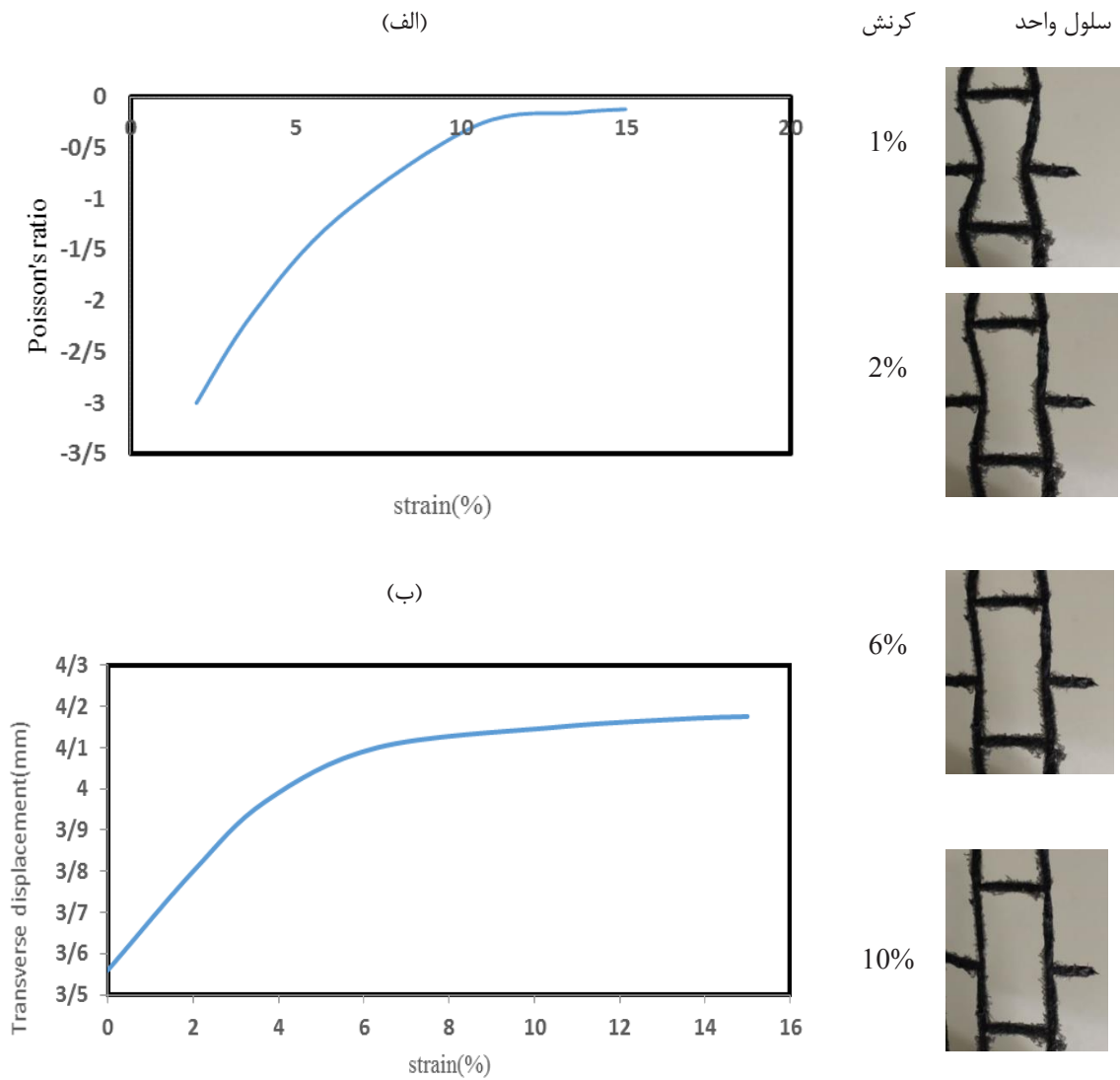
در این قسمت نشان داده شده است که حسگرهای آگزتیک عملکرد خوبی تا کرنش تغییر دارند و از آن به بعد عملکردشان افت می‌کند. برای این منظور، جابجایی عرضی بر حسب کرنش در شکل ۱۳ (ب) نشان داده شده است. جابجایی عرضی تا کرنش تغییر (۶٪) افزایش پیدا می‌کند و بعد از آن تقریباً ثابت می‌ماند که منجر به کاهش عملکرد حسگر آگزتیک بعد از کرنش ذکر شده می‌گردد.

مطالعات قبلی [۲۱، ۲۲، ۳۹، ۴۰] نشان داده‌اند که ساختارهای آگزتیک عملکرد خوبی در زمینه حسگر دارند چون ساختار در هر دو جهت X و Y منبسط شده و سبب افزایش تعداد جدایش‌ها می‌گردد. متعاقب آن، حساسیت حسگر نیز افزایش پیدا می‌کند. در حسگر ارائه شده، عملکرد حسگر تا کرنش تغییر بسیار عالی است چراکه ساختار دارای ضریب پواسون منفی است. این قابل ملاحظه است که کرنش تغییر وابسته به هندسه ساختار و

شکل ۱۳ (الف) نمودار ضریب پواسون و شکل ۱۳ (ب) نمودار جابجایی عرضی را بر حسب کرنش به همراه عکس‌های متوالی سلول واحد حسگر را در طول تغییر شکل نشان می‌دهد.

حسگر آگزتیک ارائه شده دارای عملکرد خوب تا کرنش تغییر می‌باشد چراکه ضریب پواسون آن منفی است و از کرنش تغییر به بعد عملکرد حسگر افت کرده و مشابه حسگرهای معمولی می‌باشد. کرنش تغییر برای حسگر ارائه شده ۶٪ است. شکل ۱۳ (الف) مشابه نتایج قسمت قبل و مرجع [۳۸] می‌باشد که در آن ضریب پواسون در ابتدا با شیب تند و سپس با شیب ملایم افزایش پیدا می‌کند. به منظور توجه عملکرد حسگر، جابجایی‌های طولی و عرضی حسگر با استفاده از نقاط a ، b ، c و d در شکل ۱۲ ب بررسی شده است. شکل ۱۳ (ب) جابجایی عرضی ساختار را بر حسب کرنش نشان می‌دهد.

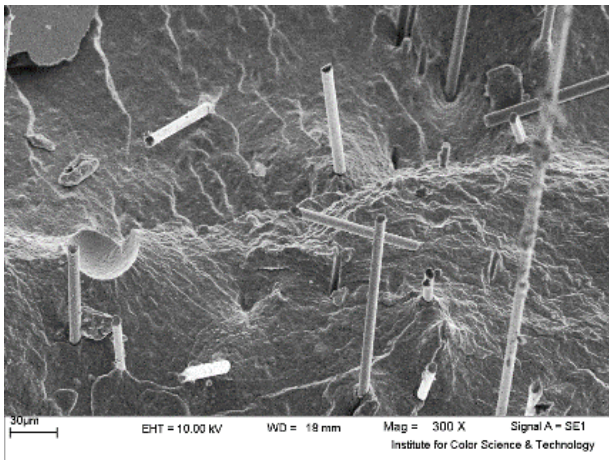
زمانی که مواد معمولی برای ساخت حسگر استفاده می‌شوند، یک حالت رقابت بین جهت‌های طولی و عرضی برای انجام جدایش الیاف‌های کربن خرد شده وجود دارد. با افزایش کرنش در جهت طولی، ساختار در جهت عرضی فشرده می‌گردد. افزایش طول در جهت طولی به افزایش جدایش‌های الیاف‌های کربن خرد شده کمک می‌کند در حالی که فشردگی در جهت عرضی سبب می‌گردد الیاف‌های کربن خرد شده اتصال‌های بیشتری را



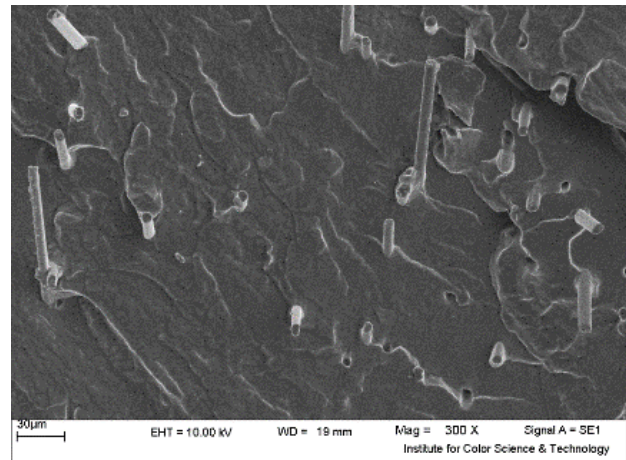
شکل ۱۳. الف) ضریب پواسون ب) جابجایی جانبی حسگر آگزیٹیک بر حسب کرنش به همراه توالی تصاویر تغییرشکل ساختار شش ضلعی آگزیٹیک در کرنش‌های مختلف

Fig. 13. (a) Poisson's ration (b) Lateral displacement of the auxetic sensor in terms of strain with the sequence images of re-entrant auxetic sensor drformation at different strains

(الف)



(ب)



شکل ۱۴. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی ساختار آگزتیک الف) قبل از بارگذاری کششی ب) بعد از بارگذاری کششی ۶٪

Fig. 14. SEM images of auxetic structure (a) before tensile loading (b) after tensile loading 6%

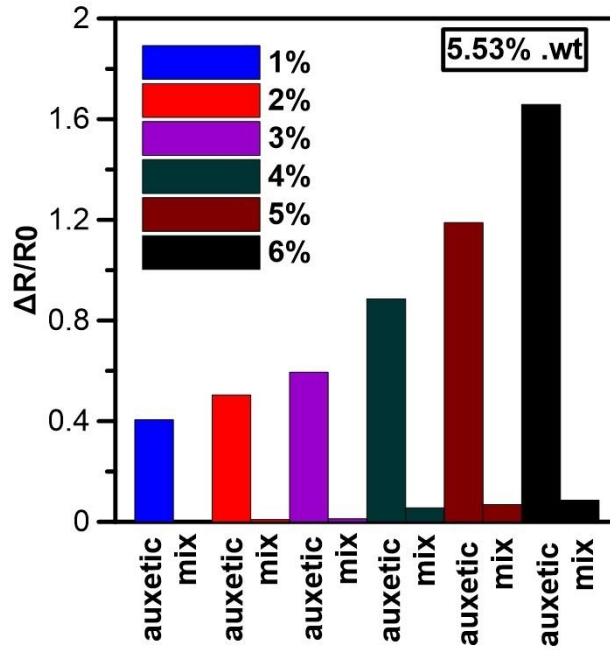
ب) کامپوزیت ساندویچی مواد حسگر الف [۴۲]. گروه اول فاکتور اندازه‌گیری نسبتاً کمی (تقریباً ۵۰٪) در کرنش ۲۵٪ داشت در حالی که حسگر کامپوزیتی نتایج بهتری در قیاس با گروه قبل شامل هستریسیس (۳٪ در کرنش ۵۰٪)، حساسیت بالاتر (۱۲۰٪ < فاکتور اندازه < ۱۰۰) و کشش‌پذیری قابل ملاحظه (حدوداً ۳۰۰٪) از خود نشان داد. اگرچه هر دو کار، محدود به کرنش‌های بزرگ بوده و قادر به اندازه‌گیری کرنش‌های کم نبودند. در این کار، ما از ساختار آگزتیک به منظور ایجاد حسگر با عملکرد خوب و در کرنش‌های کم (کمتر از ۶٪) استفاده کرده‌ایم.

شکل ۱۵ نتایج این کار را با کار قبلی [۴۱] برای کرنش‌های متفاوت از ۶٪-۱٪ را برحسب حساسیت نشان می‌دهد. بر طبق شکل ۱۷، هر دو حسگر قبلی نمی‌توانند کرنش‌های کمتر از ۴٪ را شناسایی کنند و برای کرنش‌هایی در محدوده ۶٪-۴٪ حساسیت حسگر ارائه‌شده به طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از حسگرهای معمولی قبلی است. در شکل ۱۶ عملکرد الکترومکانیکی حسگر نمایش داده شده است. در این شکل، محور Y سمت راست مشخصات مکانیکی حسگر را تا لحظه واماندگی نشان می‌دهد. در کرنش ۱۸٪ حسگر گسیخته می‌شود و قبل از کرنش ذکر شده نمودار مدام کاهش و افزایش پیدا می‌کند که این به دلیل گسیخته شدن سلول‌های ساختار می‌باشد و بعد از

ماد سازنده آن می‌باشد و با افزایش سختی ساختار، کرنش تغییر نیز افزایش پیدا می‌کند. برای ماده لاستیک سیلیکون که ماده‌ای بسیار نرم است، کرنش تغییر برابر ۶٪ می‌باشد. این دلیل آن است که ما نام این ساختار را حسگر پیرومقاوم با حساسیت بالا و در کرنش‌های پایین قرار دادیم. به منظور بررسی دقیق‌تر مکانیزم حسی حسگر آگزتیک ارائه شده، شناسایی مورفولوژی با استفاده از تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی صورت گرفته است. سطح حسگر آگزتیک پیرومقاوم در داخل محفظه خلا قرار داده شده و تغییر شکل میکروساختار در طول فرآیند بارگذاری / آزادسازی از طریق تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی^۱ در طول کرنش‌های متفاوت بررسی شده است. شکل ۱۴ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی حسگر را قبل و بعد از بارگذاری (در کرنش ۶٪) نشان می‌دهد. جدایش‌های الیاف‌های کربن در شکل ۱۴ ب قابل مشاهده است.

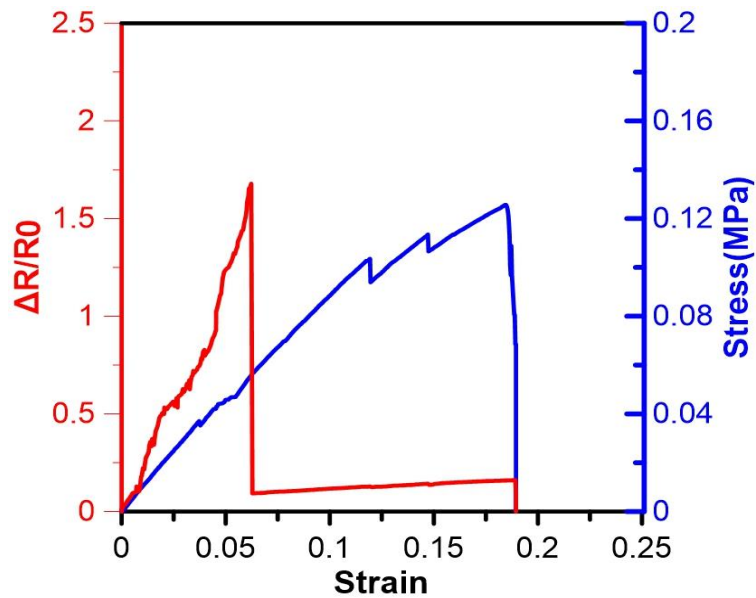
۴-۴ عملکرد حسگر آگزتیک:

در کارهای قبلی عملکرد دو گروه از حسگرها مورد بررسی قرار گرفته است: الف) ترکیب الیاف کربن خردشده و لاستیک سیلیکون [۴۱]



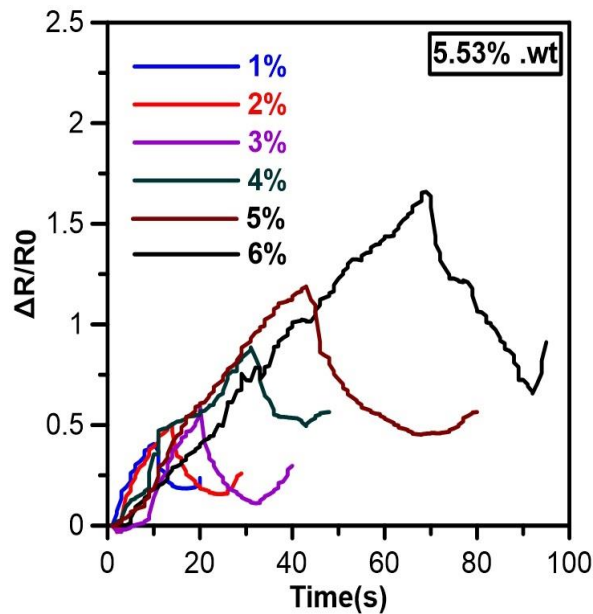
شکل ۱۵. مقایسه عملکرد حسگرهای معمولی و حسگرهای آگزتیک ساخته شده با مخلوط لاستیک سیلیکون و الیاف کربن خردشده

Fig. 15. Comparison of performance of conventional and auxetic sensors made with a mixture of silicone rubber and chopped carbon fibers



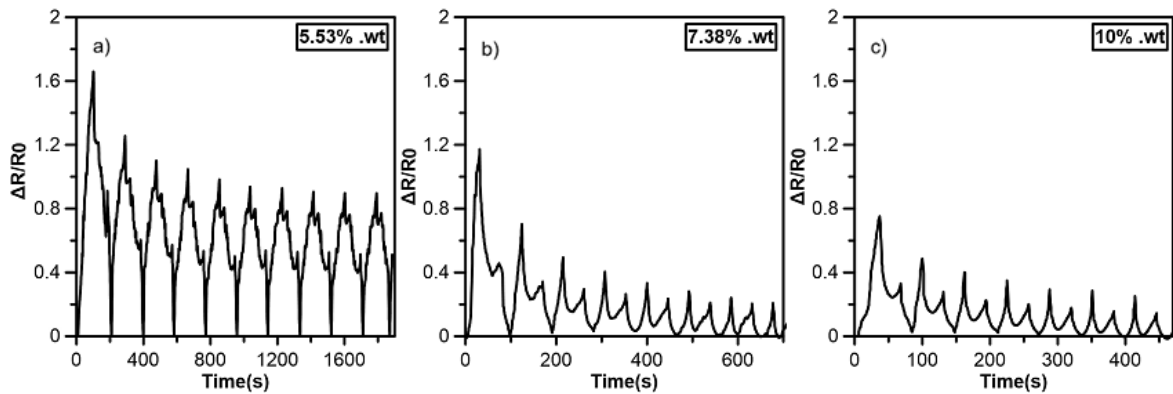
شکل ۱۶. عملکرد الکترومکانیکی (نمودار تنش- کرنش و مشخصات فاکتور اندازه) حسگر آگزتیک

Fig. 16. Electromechanical performance (stress-strain diagram and GF characteristics) of an auxetic sensor



شکل ۱۷. تغییرات مقاومت بر حسب زمان برای اولین سیکل حسگر ترکیبی با درصد حجمی الیاف کربن خردشده ۵/۵۳٪.

Fig. 17. Resistance changes over time for the first cycle of a mixed sensor with a volume fraction of chopped carbon fibers of 5.53%.



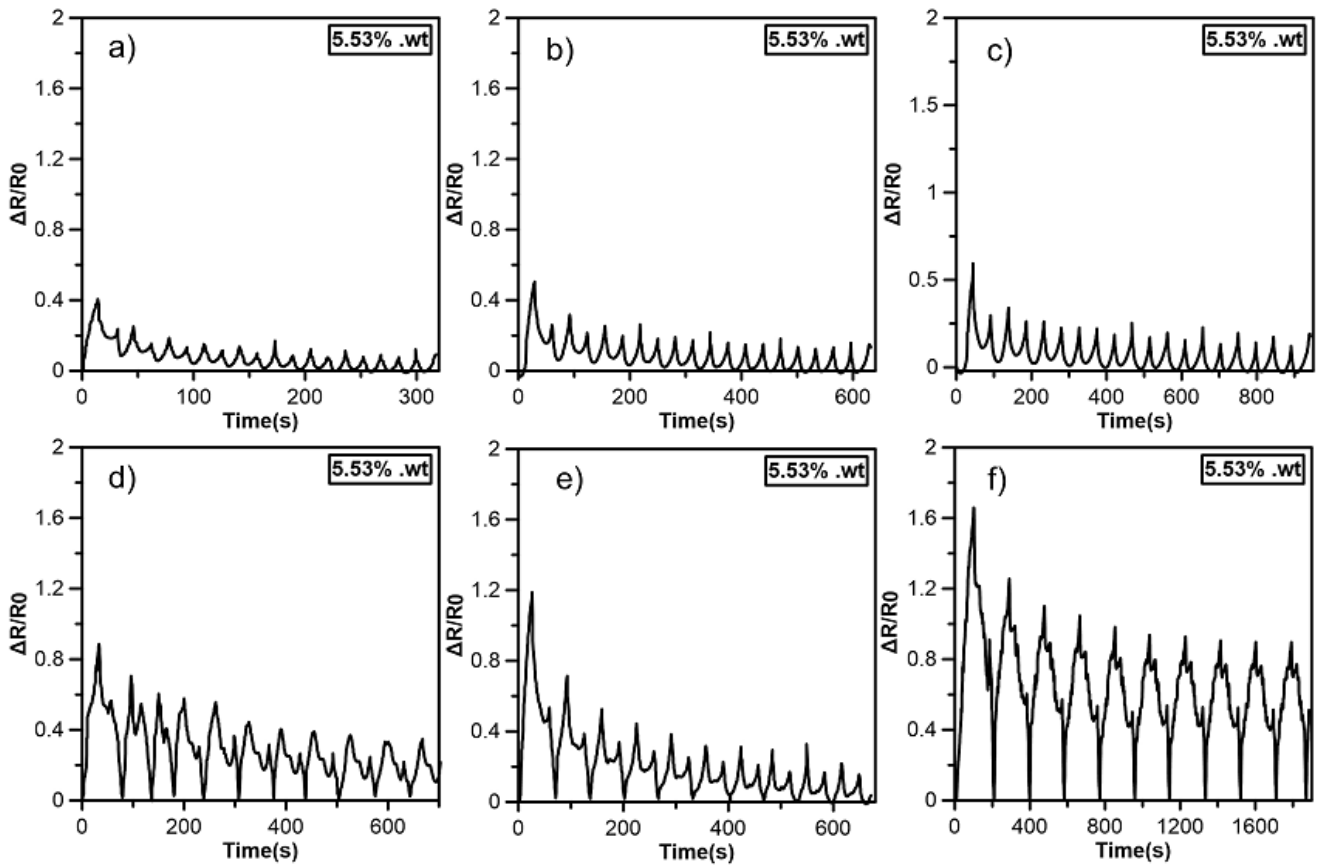
شکل ۱۸. تغییرات مقاومت بر حسب زمان برای اولین ده سیکل برای درصدهای حجمی متفاوت الیاف کربن خردشده

Fig. 18. Resistance changes over time for the first ten cycles for different volume fractions of chopped carbon fiber

شیب آن در قیاس با قسمت قبل کاهش یافته است.

شکل ۱۷ میانگین مقادیر $\Delta R / R_0$ را برحسب کرنش‌های ۱٪-۶٪ را برای پنج حسگر انتخاب شده با درصد حجمی ۵۳/۵٪ را نشان می‌دهد. مقادیر $\Delta R / R_0$ با افزایش کرنش کششی افزایش پیدا می‌کند به این صورت که مقدار آن در کرنش ۶٪ بیشتر از مقدار آن در کرنش ۱٪ می‌باشد. شکل ۱۸ مقادیر $\Delta R / R_0$ را بر حسب زمان برای درصدهای حجمی متفاوت از الیاف کربن خردشده را در کرنش ۶٪ نشان می‌دهد. بر طبق شکل

گسیخته شدن کامل نمودار یک افت ناگهانی پیدا می‌کند. محور Y سمت چپ نمودار به طور همزمان رفتار الکتریکی حسگر را نشان می‌دهد. همان طور که قبلاً توضیح داده شد، عملکرد حسگر تا کرنش ۶٪ بسیار خوب است اگرچه بعد از این کرنش، حسگر خاصیت آگزیتریک بودن خود را از دست می‌دهد و مانند حسگرهای معمولی رفتار می‌کند. قبل از کرنش ۶٪ رفتار نمودار عملکرد الکتریکی افزایش پیدا می‌کند. این قابل ملاحظه است که بعد از کرنش ذکر شده تا کرنش ۱۸٪، $\Delta R / R_0$ هنوز افزایش پیدا می‌کند ولی



شکل ۱۹. تغییرات مقاومت بر حسب زمان برای حسگر با درصد حجمی الیاف کربن خردشده ۵۳/۵٪ تحت بارگذاری کششی ۱٪ تا ۶٪.

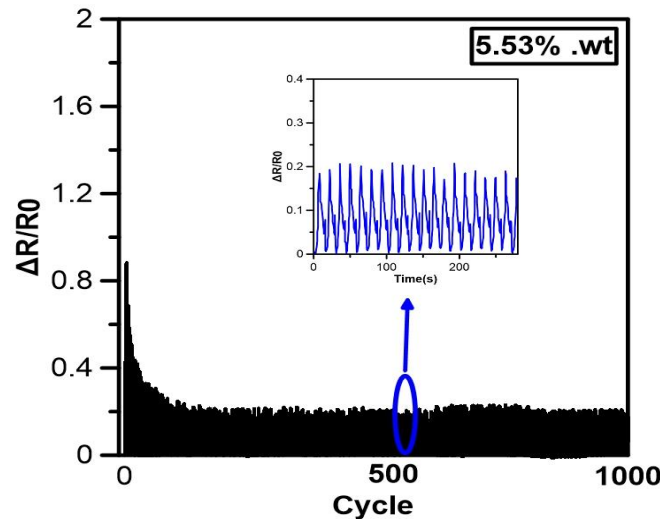
Fig. 19. Resistance changes in terms of time for a sensor with a volume fraction of 5.53% chopped carbon fiber under a tensile loading of 1% to 6%.

را نشان می‌دهد. بر طبق شکل ۲۰ نمودار رفتار کاهش با گذشت زمان دارد ولی بعد از تقریباً ۱۰۰ سیکل نمودار پایدار می‌گردد. حسگر پیشنهاد شده محدودیت‌های موجود در کارهای قبلی را برطرف کرده‌است.

۵- نتیجه‌گیری

در این کار، رفتار تغییر شکل ساختارهای شش ضلعی آگرتیک تحت بارگذاری کشش بزرگ به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفته‌است. این نشان داده شده‌است که وقتی ساختارهای شش ضلعی آگرتیک در جهت Y بارگذاری می‌گردند در ابتدا مقدار ضریب پواسون به شدت تغییر می‌کند و

۱۸، مقدار $\Delta R / R_0$ با افزایش درصد حجمی الیاف کربن خردشده کاهش پیدا می‌کند بنابراین درصد حجمی ۵۳/۵٪ بیشترین میزان حساسیت را دارد. تغییرات مقاومت با افزایش کرنش به دلیل افزایش فاصله بین تکه‌های الیاف کربن خردشده و ساختار آگرتیک افزایش پیدا می‌کند. بر طبق شکل ۱۹، تغییرات مقاومت در اول سیکل در کرنش ۱٪ و ۶٪ به ترتیب ۴/۰ و ۶/۱ می‌باشد. یکی از محدودیت‌های حسگرهای مخلوط کاهش رفتار تغییرات مقاومت در بارگذاری ثابت است. اگرچه بعد از استفاده از ساختار آگرتیک، مشخصات حسگر با این محدودیت بعد از ۱۰۰ سیکل مواجه شد. شکل ۲۰ تغییرات مقاومت بر حسب زمان را برای حسگر تحت ۱۰۰۰ سیکل بارگذاری



شکل ۲۰. تغییرات مقاومت بر حسب تعداد سیکل‌های بارگذاری برای ۱۰۰۰ سیکل کششی / آزاد

Fig. 20. Resistance changes in terms of the number of loading cycles for 1000 tensile loading / unloading cycles.

دلیل نرم‌بودن لاستیک سیلیکون و پایین بودن کرنش تغییر آن، کرنش‌های کمتر از ۶٪ با حسگر ارائه‌شده به خوبی قابل اندازه‌گیری هستند.

منابع

- [1][1] S. Shan, S.H. Kang, Z. Zhao, L. Fang, K. Bertoldi, Design of planar isotropic negative Poisson's ratio structures, *Extreme Mechanics Letters*, 4 (2015) 96-102.
- [2] L.J. Gibson, M.F. Ashby, G.S. Schajer, C.I. Robertson, The mechanics of two-dimensional cellular materials, *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, 382(1782) (1982) 25-42.
- [3] R. Lakes, Foam Structures with a Negative Poisson's Ratio, *Science*, 235(4792) (1987) 1038.
- [4] K.E. Evans, A. Alderson, Auxetic Materials: Functional Materials and Structures from Lateral Thinking!, *Advanced Materials*, 12(9) (2000) 617-628.
- [5] Y. Liu, H. Hu, A review on auxetic structures and polymeric materials, *Scientific research and essays*, 5 (2010) 1052-1063.
- [6] K.K. Saxena, R. Das, E.P. Calius, Three Decades of

بعد یک ناحیه پایا ایجاد می‌گردد. ساختارهای شش ضلعی آگرتیک تا زمانی که ضلع‌های مایل تبدیل به ضلع‌های عمودی شوند دارای ضریب پواسون منفی هستند و بعد از آن مانند مواد معمولی رفتار می‌کنند. بررسی ما نشان داد که موقعیت و سفتی اتصال چرخشی تعیین کننده مقدار ضریب پواسون این ساختارها می‌باشد به گونه‌ای که هر قدر سفتی کمتر باشد ساختار ضریب پواسون منفی‌تری دارد و هر قدر اتصال چرخشی از مرکز دورتر باشد ساختار ضریب پواسون بزرگتری دارد.

علاوه بر آن، یک حسگر با حساسیت بالا در کرنش‌های پایین ساخته‌شده از مخلوط سیلیکون لاستیک و الیاف کربن خردشده با استفاده از ساختار آگرتیک ارائه شده‌است. ساختارهای آگرتیک بعد از کرنش مشخصی که ما آن را کرنش تغییر نامیده‌ایم مانند مواد معمولی رفتار می‌کنند. این پارامتر به هندسه ساختار و ماده سازنده آن بستگی دارد. ما نشان داده‌ایم که حسگر آگرتیک عملکرد خوبی تا کرنش تغییر دارد و بعد از آن عملکردشان مانند حسگرهای معمولی می‌باشد چراکه کرنش تغییر ضریب پواسون ساختار منفی بوده و بعد از آن مثبت می‌گردد. بهبود قابل توجهی در فاکتور اندازه و حساسیت ساختار مشاهده گردیده‌است. لاستیک سیلیکون به عنوان ماده زمینه و الیاف کربن خرد شده به عنوان عنصر رسانا با هم مخلوط شده‌اند و در قالب‌هایی به شکل ساختار شش ضلعی آگرتیک ساخته شده‌اند. مطالعات قبلی نمی‌توانستند کرنش‌های پایین را اندازه‌گیری کنند ولی در این کار به

- Level-Set-Based Topology Optimization, *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 17(4) (2017).
- [18] H.A. Eschenauer, N. Olhoff, Topology optimization of continuum structures: A review*, *Applied Mechanics Reviews*, 54(4) (2001) 331-390.
- [19] G.I.N. Rozvany, Aims, scope, methods, history and unified terminology of computer-aided topology optimization in structural mechanics, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 21(2) (2001) 90-108.
- [20] O. Sigmund, K. Maute, Topology optimization approaches, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 48(6) (2013) 1031-1055.
- [21] M.F. Ahmed, Y. Li, C. Zeng, Stretchable and compressible piezoresistive sensors from auxetic foam and silver nanowire, *Materials Chemistry and Physics*, 229 (2019) 167-173.
- [22] Y. Jiang, Z. Liu, N. Matsuhisa, D. Qi, W.R. Leow, H. Yang, J. Yu, G. Chen, Y. Liu, C. Wan, Z. Liu, X. Chen, Auxetic Mechanical Metamaterials to Enhance Sensitivity of Stretchable Strain Sensors, *Advanced Materials*, 30(12) (2018) 1706589.
- [23] H.W. Kim, T.Y. Kim, H.K. Park, I. You, J. Kwak, J.C. Kim, H. Hwang, H.S. Kim, U. Jeong, Hygroscopic Auxetic On-Skin Sensors for Easy-to-Handle Repeated Daily Use, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 10(46) (2018) 40141-40148.
- [24] M. Li, H. Li, W. Zhong, Q. Zhao, D. Wang, Stretchable Conductive Polypyrrole/Polyurethane (PPy/PU) Strain Sensor with Netlike Microcracks for Human Breath Detection, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 6(2) (2014) 1313-1319.
- [25] D.J. Lipomi, M. Vosgueritchian, B.C.K. Tee, S.L. Hellstrom, J.A. Lee, C.H. Fox, Z. Bao, Skin-like pressure and strain sensors based on transparent elastic films of carbon nanotubes, *Nature nanotechnology*, 6(12) (2011) 788-792.
- [26] H. Ota, K. Chen, Y. Lin, D. Kiriya, H. Shiraki, Z. Yu, T.-J. Ha, A. Javey, Highly deformable liquid-state Auxetics Research – Materials with Negative Poisson's Ratio: A Review, *Advanced Engineering Materials*, 18(11) (2016) 1847-1870.
- [7] F. Scarpa, S. Blain, T. Lew, D. Perrott, M. Ruzzene, J.R. Yates, Elastic buckling of hexagonal chiral cell honeycombs, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38(2) (2007) 280-289.
- [8] D. Prall, R.S. Lakes, Properties of a chiral honeycomb with a poisson's ratio of -1 , *International Journal of Mechanical Sciences*, 39(3) (1997) 305-314.
- [9] R. Gatt, L. Mizzi, J.I. Azzopardi, K.M. Azzopardi, D. Attard, A. Casha, J. Briffa, J.N. Grima, Hierarchical Auxetic Mechanical Metamaterials, *Scientific Reports*, 5(1) (2015) 8395.
- [10] J.B. Choi, R.S. Lakes, Non-linear properties of polymer cellular materials with a negative Poisson's ratio, *Journal of Materials Science*, 27(17) (1992) 4678-4684.
- [11] J. Schwerdtfeger, F. Schury, M. Stingl, F. Wein, R.F. Singer, C. Körner, Mechanical characterisation of a periodic auxetic structure produced by SEBM, *physica status solidi (b)*, 249(7) (2012) 1347-1352.
- [12] X.-T. Wang, X.-W. Li, L. Ma, Interlocking assembled 3D auxetic cellular structures, *Materials & Design*, 99 (2016) 467-476.
- [13] Z.Y. Wei, Z.V. Guo, L. Dudte, H.Y. Liang, L. Mahadevan, Geometric mechanics of periodic pleated origami, *Phys Rev Lett*, 110(21) (2013) 215501.
- [14] M. Schenk, S.D. Guest, Geometry of Miura-folded metamaterials, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(9) (2013) 3276.
- [15] P. Vogiatzis, S. Chen, X. Wang, T. Li, L. Wang, Topology optimization of multi-material negative Poisson's ratio metamaterials using a reconciled level set method, *Computer-Aided Design*, 83 (2017) 15-32.
- [16] K. Bertoldi, P.M. Reis, S. Willshaw, T. Mullin, Negative Poisson's Ratio Behavior Induced by an Elastic Instability, *Advanced Materials*, 22(3) (2010) 361-366.
- [17] P. Vogiatzis, S. Chen, C. Zhou, An Open Source Framework for Integrated Additive Manufacturing and

- (2021) 100868.
- [35] B. Taherkhani, A.P. Anaraki, J. Kadkhodapour, S. Rezaei, H. Tu, Large deformation of TPU re-entrant auxetic structures designed by TO approach, *Journal of Elastomers & Plastics*, 0(0) 0095244320938411.
- [36] P. Vogiatzis, S. Chen, C. Zhou, An Open Source Framework for Integrated Additive Manufacturing and Level-Set-Based Topology Optimization, *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 17(4) (2017).
- [37] A. Ingrole, A. Hao, R. Liang, Design and modeling of auxetic and hybrid honeycomb structures for in-plane property enhancement, *Materials & Design*, 117 (2017) 72-83.
- [38] J. Zhang, G. Lu, Z. Wang, D. Ruan, A. Alomarah, Y. Durandet, Large deformation of an auxetic structure in tension: Experiments and finite element analysis, *Composite Structures*, 184 (2018) 92-101.
- [39] Y. Li, S. Luo, M.-C. Yang, R. Liang, C. Zeng, Poisson Ratio and Piezoresistive Sensing: A New Route to High-Performance 3D Flexible and Stretchable Sensors of Multimodal Sensing Capability, *Advanced Functional Materials*, 26(17) (2016) 2900-2908.
- [40] Y. Wei, S. Chen, Y. Lin, X. Yuan, L. Liu, Silver nanowires coated on cotton for flexible pressure sensors, *Journal of Materials Chemistry C*, 4(5) (2016) 935-943.
- [41] M.B. Azizkhani, J. Kadkhodapour, S. Rastgordani, A.P. Anaraki, B. Shirkavand Hadavand, Highly Sensitive, Stretchable Chopped Carbon Fiber/Silicon Rubber Based Sensors for Human Joint Motion Detection, *Fibers and Polymers*, 20(1) (2019) 35-44.
- [42] M.B. Azizkhani, S. Rastgordani, A.P. Anaraki, J. Kadkhodapour, B.S. Hadavand, Highly sensitive and stretchable strain sensors based on chopped carbon fibers sandwiched between silicone rubber layers for human motion detections, *Journal of Composite Materials*, (2019) 0021998319855758.
- heterojunction sensors, *Nature communications*, 5(1) (2014) 5032.
- [27] K. Takei, T. Takahashi, J.C. Ho, H. Ko, A.G. Gillies, P.W. Leu, R.S. Fearing, A. Javey, Nanowire active-matrix circuitry for low-voltage macroscale artificial skin, *Nature materials*, 9(10) (2010) 821-826.
- [28] H. Tian, Y. Shu, Y.-L. Cui, W.-T. Mi, Y. Yang, D. Xie, T.-L. Ren, Scalable fabrication of high-performance and flexible graphene strain sensors, *Nanoscale*, 6(2) (2014) 699-705.
- [29] H. Wang, M. Totaro, L. Beccai, Toward Perceptive Soft Robots: Progress and Challenges, *Advanced Science*, 5(9) (2018) 1800541.
- [30] T. Yamada, Y. Hayamizu, Y. Yamamoto, Y. Yomogida, A. Izadi-Najafabadi, D.N. Futaba, K. Hata, A stretchable carbon nanotube strain sensor for human-motion detection, *Nature nanotechnology*, 6(5) (2011) 296-301.
- [31] H.-B. Yao, J. Ge, C.-F. Wang, X. Wang, W. Hu, Z.-J. Zheng, Y. Ni, S.-H. Yu, A Flexible and Highly Pressure-Sensitive Graphene-Polyurethane Sponge Based on Fractured Microstructure Design, *Advanced Materials*, 25(46) (2013) 6692-6698.
- [32] B. Taherkhani, M.B. Azizkhani, J. Kadkhodapour, A.P. Anaraki, S. Rastgordani, Highly sensitive, piezoresistive, silicone/carbon fiber-based auxetic sensor for low strain values, *Sensors and Actuators A: Physical*, 305 (2020) 111939.
- [33] Y. Li, S. Luo, M.-C. Yang, R. Liang, C. Zeng, Poisson Ratio and Piezoresistive Sensing: A New Route to High-Performance 3D Flexible and Stretchable Sensors of Multimodal Sensing Capability, *Advanced Functional Materials*, 26(17) (2016) 2900-2908.
- [34] S. Rezaei, J. Kadkhodapour, R. Hamzehei, B. Taherkhani, A.P. Anaraki, S. Dariushi, Design and modeling of the 2D auxetic metamaterials with hyperelastic properties using topology optimization approach, *Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications*, 43

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Nazemian, E. Neshat, R. Khoshbakhti Saray, Effect of Start of Injection Timing on Waste Heat Recovery Capacity in a Reactivity Controlled Compression Ignition Engine, Amirkabir J. Mech Eng., 53(Special Issue 6)(2021) 3987-4008.

DOI: 10.22060/mej.2021.19043.6940



