



طراحی و ساخت یک ساختار آگزتیک هیبریدی نوین پلیمری به روش پرینت سه بعدی با ترکیب ساختارهای سرپیکانی و میسینگ ریب

رزگار حسنزاده*

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: r.hasanzadeh@kut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۱۹ آبان ۱۴۰۳

پذیرش: ۴ دی ۱۴۰۳

کلیدواژگان:

پرینت سه بعدی

پلیمر

آگزتیک

نسبت پواسون منفی

فرامواد

چکیده

ساختارهای آگزتیک ساختارهایی پیشرفته هستند که برعکس ساختارهای مرسوم وقتی تحت کشش در یک راستا قرار می‌گیرند، در راستای دیگر به جای باریک شدن، پهن تر شده و این ویژگی آن‌ها با نسبت پواسون منفی همراه می‌شود که سبب می‌شود خواص مکانیکی آن‌ها بهبود یابد. یکی از روش‌های تولید ساختارهای آگزتیک استفاده از فناوری پرینت سه بعدی است که امکان تولید ساختارهای پیچیده و دقیق را فراهم می‌کند. هدف تحقیق حاضر، طراحی و ساخت یک ساختار آگزتیک نوین پلیمری می‌باشد که به وسیله فناوری پرینت سه بعدی ساخته می‌شود. ساختار آگزتیک نوین متشکل از چهار سلول واحد سرپیکانی است که دور یک سلول واحد میسینگ ریب را احاطه کرده‌اند. این ساختار در محیط سالیدورکس طراحی شده و سپس نمونه‌های پرینت سه بعدی با ساختار آگزتیک نوین ارائه شده در تحقیق حاضر تولید گردیدند. نمونه‌های پرینت سه بعدی با ساختار آگزتیک نوین ارائه شده در راستای طولی تحت کرنش‌های مختلف در بازه ۰ تا ۲۵٪ قرار گرفتند و نتایج نشان داد که نمونه‌ها پس از اعمال کرنش طولی، در راستای عرضی نیز افزایش طول داشته که اثبات می‌کند که ساختار ارائه شده در این تحقیق، یک ساختار آگزتیک است. ساختار آگزتیک نوین ارائه شده در این تحقیق در مقایسه با ساختارهای آگزتیک نوین ارائه شده در تحقیقات پیشین عملکرد مطلوبی را ارائه داد و بیشترین نسبت پواسون آن در کرنش طولی ۵٪ به میزان ۰٫۵۴- حاصل گردید.

Designing and manufacturing a novel polymeric hybrid auxetic structure using 3D printing method by combining arrow-head and missing rib structures

Rezgar Hasanzadeh*

Department of Mechanical Engineering, Kermanshah University of Technology, Kermanshah, Iran

* Corresponding Author's Email: r.hasanzadeh@kut.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 9 November 2024

Accepted: 24 December 2024

Keywords:

3D Printing

Polymer

Auxetic

Negative Poisson's Ratio

Metamaterials

Abstract

Auxetic metastructures are advanced structures that, unlike conventional structures, expand in width when stretched in one direction. This characteristic is associated with a negative Poisson's ratio, which enhances their mechanical properties. One method for creating auxetic structures is through 3D printing technology, which allows for the production of complex and precise designs. The aim of the present study is to design and fabricate a novel polymeric auxetic structure using 3D printing technology. The innovative auxetic structure consists of four arrow-head unit cells surrounding a single missing rib unit cell. This structure was designed in SolidWorks, and subsequently, 3D printed samples of the proposed novel auxetic structure were produced. The 3D printed samples of the novel auxetic structure presented were subjected to longitudinal strains ranging from 0% to 25%. The results demonstrated that the 3D printed samples, after being subjected to longitudinal strain, also exhibited an increase in width, confirming that the structure presented in this research is indeed auxetic. The novel auxetic structure presented in this research showed superior performance compared to the auxetic structures introduced in previous studies, achieving a maximum negative Poisson's ratio of -0.54 at 5% longitudinal strain.

Please cite this article using:

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. 2024 Jan 20;11(11):67-76. doi: 10.22034/ijme.2024.487862.2025 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

۱- مقدمه

ساختارهای آگزتیک به عنوان یکی از نوآورانه‌ترین ساختارهای پیشرفته در علوم مهندسی و مواد شناخته می‌شوند و خواص مکانیکی منحصر به فردی دارند [۱، ۲]. این ساختارها برخلاف مواد مرسوم، زمانی که تحت کشش قرار می‌گیرند، به جای باریک شدن، پهن‌تر می‌شوند [۳، ۴]. این ویژگی منحصر به فرد که با ارائه‌ی نسبت پواسون منفی همراه است، باعث بهبود خواص مکانیکی از جمله مقاومت به ضربه، جذب انرژی و انعطاف‌پذیری می‌شود [۵، ۶]. این خصوصیات، ساختارهای آگزتیک را به گزینه‌ای مطلوب برای کاربردهای مختلف مهندسی تبدیل کرده است. به عنوان مثال، این ساختارها می‌توانند در تجهیزات پزشکی، مهندسی بیومکانیک و حتی در صنایع خودروسازی و هوافضا استفاده شوند [۷، ۸]. اهمیت این ساختارها فقط به ویژگی‌های مکانیکی تقویت شده‌ی آن‌ها محدود نمی‌شود و شامل پتانسیل بالای آن‌ها در نوآوری‌های صنعتی و تحقیقاتی نیز خواهد شد.

با گسترش فناوری‌های نوین، استفاده از روش‌های پیشرفته برای تولید ساختارهای آگزتیک امکان‌پذیر شده است. پرینت سه بعدی یکی از این فناوری‌هاست که به محققان اجازه می‌دهد تا ساختارهایی با هندسه‌های پیچیده و دقیق را به‌سهولت تولید کنند [۹، ۱۰]. این روش نه تنها امکان طراحی و تولید ساختارهای آگزتیک با دقت بالا را فراهم می‌کند [۱۱]، بلکه هزینه‌ها و زمان تولید را نیز به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد [۱۲]. با این حال، چالش‌های زیادی همچنان در مسیر تولید این ساختارها وجود دارد. از جمله این چالش‌ها می‌توان به نیاز به مواد اولیه با خواص مناسب و همچنین بهینه‌سازی فرآیند پرینت برای دستیابی به بهترین عملکرد ممکن اشاره کرد [۱۳]. تلاش‌های مستمر در این زمینه می‌تواند به بهبود و توسعه بیشتر این فناوری و کاربردهای گسترده‌تر آن در صنعت منجر شود.

تحلیل خواص مکانیکی ساختارهای آگزتیک یکی از محورهای پژوهش در این زمینه محسوب می‌شود. بهین‌فر و نورانی [۱۴] به مطالعه خواص مکانیکی استنت‌های آگزتیک با ساختار ری‌انترنت پرداخته‌اند. آن‌ها با بهره‌گیری از روش سطح پاسخ، پارامترهای طراحی را بهینه‌سازی کرده و از تحلیل اجزای محدود برای بررسی مدل استفاده نمودند. نتایج نشان داد که مدل بهینه‌سازی شده دارای مدول یانگ معادل ۲۵۳ مگاپاسکال و نسبت پواسون ۰٫۵۸- می‌باشد. یکی از عوامل کلیدی در تعیین میزان جذب انرژی ساختارهای آگزتیک، ضخامت دیواره‌ی این ساختارها می‌باشد. در راستای طراحی ساختارهای آگزتیک جدید، اعتمادی و همکاران [۱۵] یک پژوهش جامع در مورد ساختارهای آگزتیک انجام دادند و یک ساختار هیبریدی جدید که از ساختارهای ری‌انترنت، ستاره‌ای و سرپیکانی الهام گرفته بود، معرفی کردند. آن‌ها با ترکیب این ساختارها، دو نوع جدید به نام‌های ری‌انترنت دوسرپیکانی و ستاره‌ای دوسرپیکانی ایجاد نمودند. ساختارهای جدید به روش چاپ سه بعدی تولید شدند و با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس و انجام آزمایش‌های تجربی، خواص مکانیکی و نسبت پواسون آن‌ها اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که این ساختارهای جدید دارای نسبت پواسون منفی بوده و بنابراین آگزتیک هستند. لی و همکاران [۱۶] ساختار آگزتیک هیبریدی جدیدی را معرفی کردند که ترکیبی از ساختارهای ری‌انترنت ستاره‌ای، کایرال و آنتی‌کایرال است. این ساختار از طریق جایگزینی المان‌های کایرال و آنتی‌کایرال در هر ضلع ساختار ری‌انترنت ستاره‌ای شکل گرفته است. در این پژوهش، آن‌ها از روش ذوب لیزری انتخابی برای ساخت نمونه‌ها و نرم‌افزارهای اجزای محدود برای تحلیل استفاده کردند. نتایج به‌دست‌آمده از تحقیقات تجربی و شبیه‌سازی‌ها نشان داد که کمترین نسبت پواسون در ساختار جدید در محدوده ۰٫۸۵- تا ۰٫۹- قرار دارد که نشان‌دهنده آگزتیک بودن این ساختار است. ژوو و همکاران [۱۷] پژوهشی انجام دادند که به مطالعه و مقایسه سه نوع ساختار آگزتیک تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی اختصاص داشت. آن‌ها ساختارهای لانه‌زنبوری، ری‌انترنت و دوسرپیکانی را بررسی کرده و نمونه‌هایی از این ساختارها را با استفاده از پرینت سه بعدی و با دو نوع ماده مختلف تولید کردند. نمونه‌های تولید شده تحت بارگذاری محوری و صفحه‌ای قرار گرفتند و به دو روش تجربی و مدل‌سازی اجزای محدود تحلیل شدند. نتایج نشان داد که از نظر میزان جذب انرژی و استحکام فشاری، ساختار دوسرپیکانی در هر دو جنس عملکرد بهتری نسبت به سایر ساختارها داشت.

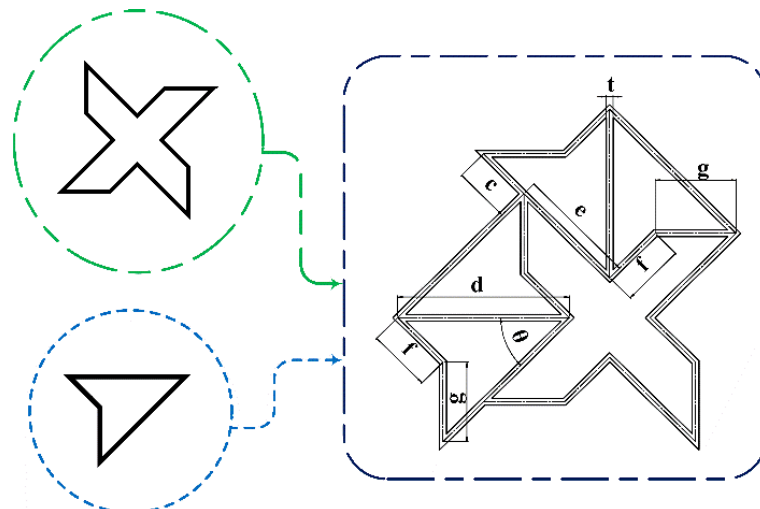
نوآوری تحقیق حاضر شامل ارائه یک ساختار آگزتیک نوین پلیمری می‌باشد که به وسیله فناوری پرینت سه بعدی ساخته شده است. ساختار پیشنهادی شامل ترکیبی از چهار سلول واحد سرپیکانی و یک سلول واحد میسینگ ریب می‌باشد که به صورت هیبریدی طراحی شده است. این ساختار با توجه به پارامترهای هندسی طراحی شده، نسبت پواسون منفی را از خود نشان می‌دهد که تاییدی بر آگزتیک بودن آن است. ضرورت انجام این تحقیق از آنجا نشأت می‌گیرد که دستیابی به ساختارهای آگزتیک با عملکرد

بهینه و خواص مکانیکی مطلوب، می‌تواند کاربردهای وسیعی در صنایع مختلف از جمله خودروسازی، هوافضا و تجهیزات حفاظتی داشته باشد. روند پژوهش شامل طراحی در نرم‌افزار سالیدورکس، تولید نمونه‌های پرینت سه بعدی و ارزیابی عملکرد آن‌ها تحت کرنش‌های مختلف می‌باشد که نتایج حاصل از آن می‌تواند به توسعه و بهبود بیشتر ساختارهای آگزتیک کمک کند.

۲- روند تحقیق

۲-۱- طراحی ساختار آگزتیک نوین

ساختار آگزتیک نوین ارائه شده در تحقیق حاضر بصورت هیبریدی از چهار سلول واحد سرپیکانی و یک سلول واحد میسینگ ریب می‌باشد. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، سلول واحد میسینگ ریب به وسیله‌ی چهار سلول واحد سرپیکانی احاطه شده است که دو وجه سمت چپ و بالای سلول واحد میسینگ ریب را پوشش می‌دهند. از آنجایی که هدف اصلی تحقیق حاضر طراحی ساختار آگزتیک و بررسی نسبت پواسون در کرنش‌های مختلف بود، پارامترهای ساختاری ثابت در نظر گرفته شدند. به این منظور پارامترهای نشان داده شده در شکل ۱ بر روی سطوح تنظیمی مطابق جدول ۱ تنظیم شدند. شایان ذکر است که انتخاب این سطوح به نحوی انجام شد که ساختار آگزتیک نوین ارائه شده شکل ظاهری مطلوبی داشته باشد و طبیعتاً انتخاب سطوح متفاوت می‌تواند باعث تغییرات در نسبت پواسون گردد که نیاز به تحقیقات بیشتر دارد.

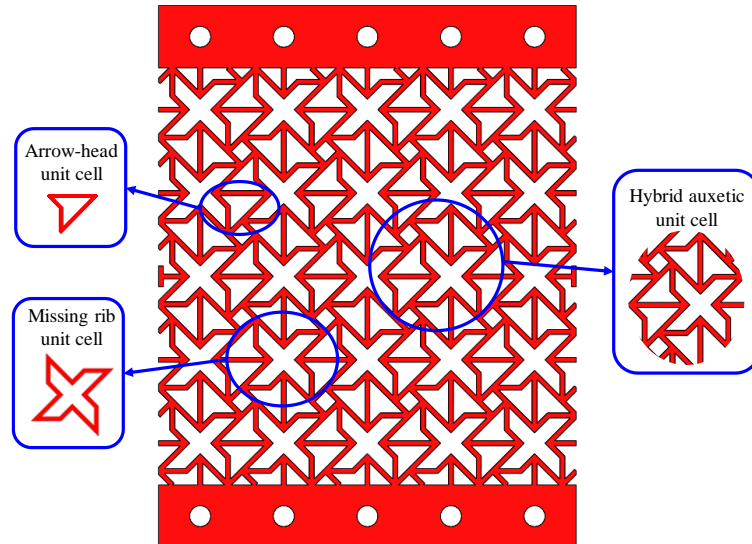


شکل ۱ طراحی ساختار آگزتیک نوین ارائه شده در تحقیق حاضر شامل چهار سلول واحد سرپیکانی و یک سلول واحد میسینگ ریب

جدول ۱ پارامترهای ساختاری تنظیمی برای طراحی ساختار آگزتیک نوین ارائه شده در تحقیق حاضر

سطح	پارامتر
15 mm	d
8 mm	g
5 mm	f
10 mm	e
5 mm	c
1.2 mm	t
45°	θ

با قرار دادن ۵ سلول واحد میسینگ ریب در راستاهای طولی و عرضی، ساختار قطعه طراحی شده متشکل از ساختار آگزتیک نوین ارائه شده، بصورت شکل ۲ حاصل می‌گردد که در محیط سالیدورکس طراحی شده و آماده ساخت بوسیله‌ی فرآیند پرینت سه بعدی می‌گردد. اندازه ساختار طراحی شده آگزتیک در هر دو راستا ۱۰۰ میلی‌متر می‌باشد. به منظور اندازه‌گیری و بررسی نسبت پواسون، ۲ نوار در بالا و پایین ساختار تعبیه شد و در هر نوار ۵ سوراخ قرار داده شد که به منظور اعمال کشش و اندازه‌گیری نسبت پواسون در مقادیر کرنش مختلف می‌باشد.



شکل ۲ ساختار قطعه طراحی شده متشکل از ۵ سلول واحد میسینگ ریب در راستاهای طولی و عرضی

۲-۲- پرینت سه بعدی

در مطالعه‌ی حاضر، ساختارهای آگرتیک با استفاده از دستگاه پرینت سه بعدی CREALITY-CR 10-Smart (شکل ۳) تولید شدند. به منظور ارزیابی نسبت پواسون، نمونه‌ها از پلی‌اورتان گرمانرم (TPU) ساخته شدند. فیلامنت e-TPU-95A ساخته شده توسط شرکت Shenzhen eSUN Industrial Co., Ltd تهیه گردید. این فیلامنت دارای شاخص جریان مذاب 1.2 g/10 min در 190 °C/2.16 kg و چگالی ۱,۲۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد.



شکل ۳ دستگاه پرینت سه بعدی CREALITY-CR 10-Smart استفاده شده در تحقیق حاضر

به منظور تولید ساختارهای آگرتیک پلیمری TPU، پارامترهای فرآیند پرینت سه بعدی بر اساس پیشنهادات شرکت سازنده‌ی فیلامنت و تنظیم تجربی پارامترها به نحوی که زمان پرینت سه بعدی و مقدار ماده‌ی مصرفی مناسب باشد، مطابق جدول ۲ تنظیم گردیدند. دمای پرینت بر روی ۲۱۵ درجه سانتی‌گراد، سرعت پرینت بر روی ۲۵ میلی‌متر بر ثانیه، دمای صفحه گرم بر روی ۶۰ درجه سانتی‌گراد، چگالی پر شدن بر روی ۱۰۰٪، تعداد دیواره‌ها بر روی ۴، ارتفاع لایه‌ها بر روی ۲۰۰ میکرومتر و قطر نازل بر روی ۴۰۰ میکرومتر تنظیم شدند. شکل ۴ یک نمونه از ساختارهای پرینت سه بعدی شده را نشان می‌دهد.

جدول ۲ پارامترهای فرآیندی پرینت سه بعدی تنظیمی برای تولید ساختار آگزتیک نوین ارائه شده در تحقیق حاضر

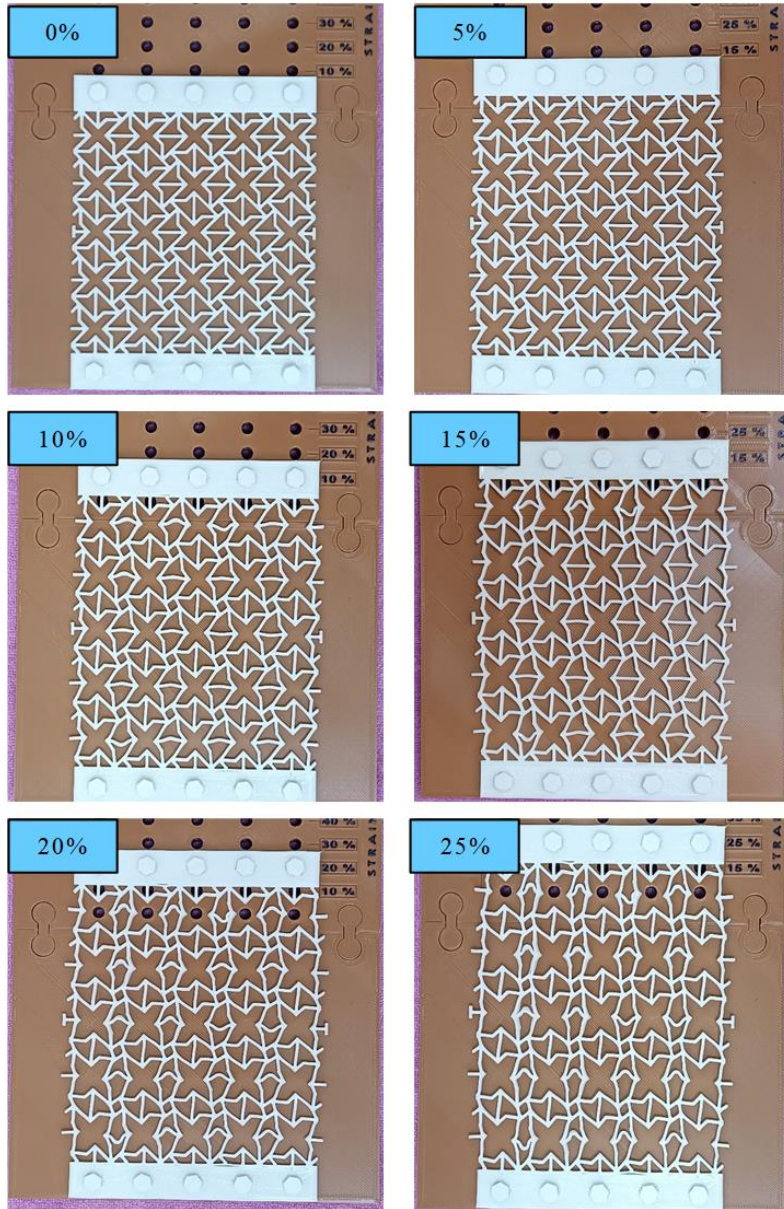
پارامتر	سطح
دمای پرینت	215 °C
سرعت پرینت	25 mm/s
دمای صفحه گرم	60 °C
چگالی پر شدن	100%
تعداد دیواره‌ها	4
ارتفاع لایه‌ها	200 μm
قطر نازل	400 μm



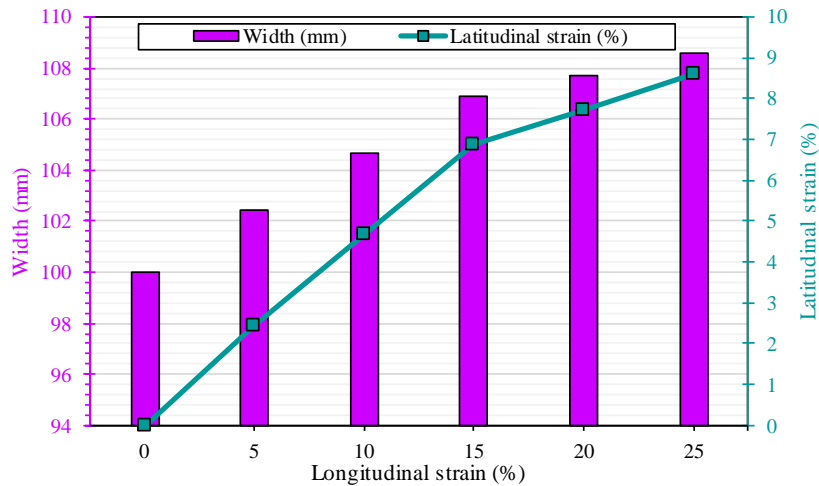
شکل ۴ نمونه تولید شده به وسیله پرینت سه بعدی با ساختار آگزتیک متشکل از سلول واحد نوین ارائه شده در تحقیق حاضر

۳- نتایج و بحث

نمونه‌های آگزتیک ساخته شده توسط فرآیند پرینت سه بعدی، تحت کرنش‌های طولی به میزان ۰٪، ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪، ۲۰٪ و ۲۵٪ قرار گرفتند. شکل ۵ نمایی از شکل تغییر یافته‌ی نمونه‌های آگزتیک را پس از اعمال کرنش‌ها نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است نمونه‌ها پس از اعمال کرنش طولی، در راستای عرضی افزایش طول پیدا می‌کنند که مشخصه‌ی ساختارهای آگزتیک می‌باشد. به منظور بررسی کمی تغییرات عرض نمونه‌های پرینت سه بعدی با ساختار آگزتیک نوین ارائه شده، این مقادیر به همراه کرنش‌های عرضی به ازای کرنش‌های طولی مختلف در شکل ۶ ارائه شده است. همانطور که نتایج نشان می‌دهد، تغییرات عرضی نمونه‌های پرینت سه بعدی مثبت بوده است که این رفتار برعکس ساختارهای رایج موجود می‌باشد. در ساختارهای مرسوم، وقتی نمونه تحت کرنش طولی قرار می‌گیرد، تغییرات عرضی منفی می‌باشد و به عبارتی، عرض نمونه کاهش می‌یابد [۱۸، ۱۹]. ولی در نمونه‌های پرینت سه بعدی با ساختار آگزتیک نوین ارائه شده مشابه با دیگر ساختارهای آگزتیک، تغییرات عرضی مثبت می‌باشد و عرض نمونه‌ها افزایش یافته است. در ساختارهای مرسوم، با توجه به کاهش عرض نمونه‌ها در اثر اعمال کرنش طولی، کرنش عرضی منفی خواهد شد ولی در ساختارهای آگزتیک، در اثر اعمال کرنش طولی، عرض نمونه‌ها افزایش یافته و کرنش عرضی نیز مثبت خواهد بود [۲۰، ۲۱]. نتایج شکل ۶ این ادعا را ثابت می‌کند و همانطور که از نتایج مشخص است، کرنش عرضی مربوط به نمونه‌های پرینت سه بعدی با ساختار آگزتیک نوین ارائه شده مثبت می‌باشند. نتایج نشان دادند که به ازای کرنش طولی ۵٪، کرنش عرضی ۲٫۴۲٪ حاصل گردید. کرنش‌های عرضی به ازای کرنش‌های طولی ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ به ترتیب برابر ۴٫۶۷٪، ۶٫۸۸٪ و ۷٫۷۱٪ بودند. همچنین به ازای کرنش طولی ۲۵٪، کرنش عرضی به میزان ۸٫۶۱٪ حاصل گردید.



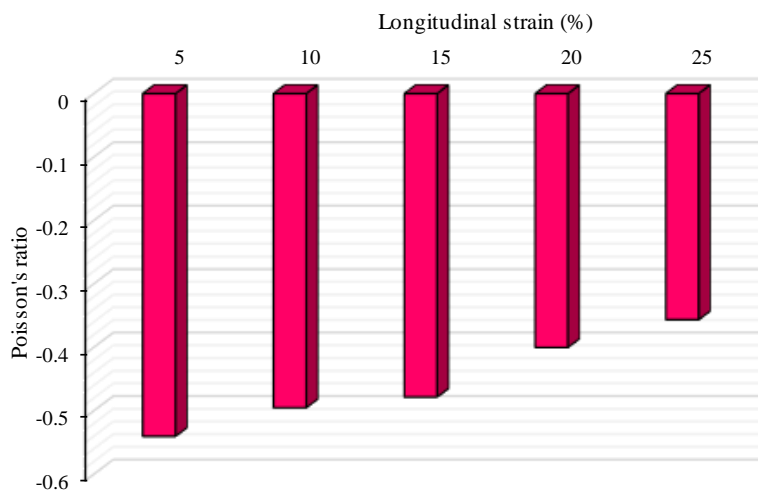
شکل ۵ نمونه‌های پرینت سه بعدی با ساختار آگزتیک نوین ارائه شده پس از اعمال کرنش‌های طولی مختلف



شکل ۶ تغییرات عرض و کرنش عرضی نمونه‌های پرینت سه بعدی با ساختار آگزتیک نوین ارائه شده به ازای کرنش‌های طولی مختلف

شکل ۷ مقادیر نسبت پواسون نمونه‌های پرینت سه بعدی با ساختار آگزتیک نوین ارائه شده را به ازای کرنش‌های طولی مختلف نشان می‌دهد.

همانطور که از نتایج مشخص است، تمامی نسبت‌های پواسون منفی می‌باشند که آگزتیک بودن ساختار ارائه شده در تحقیق حاضر را به اثبات می‌رساند. نتایج نشان می‌دهند که بیشترین نسبت پواسون به دست آمده در کرنش طولی ۵٪ حاصل گردید که برابر ۰٫۵۴- می‌باشد. با افزایش کرنش طولی، نسبت‌های پواسون کاهش یافت. در کرنش‌های طولی ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ نسبت‌های پواسون به ترتیب ۰٫۴۸-، ۰٫۴۰- و ۰٫۳۶- حاصل گردید. همچنین در کرنش طولی ۲۵٪ نسبت پواسون ۰٫۳۶- بدست آمد. بنابراین در تمامی کرنش‌های طولی اعمال شده، نمونه‌های پرینت سه بعدی با ساختار آگزتیک نوین ارائه شده عملکرد آگزتیک خود را حفظ نموده و نسبت‌های پواسون منفی را ارائه دادند.



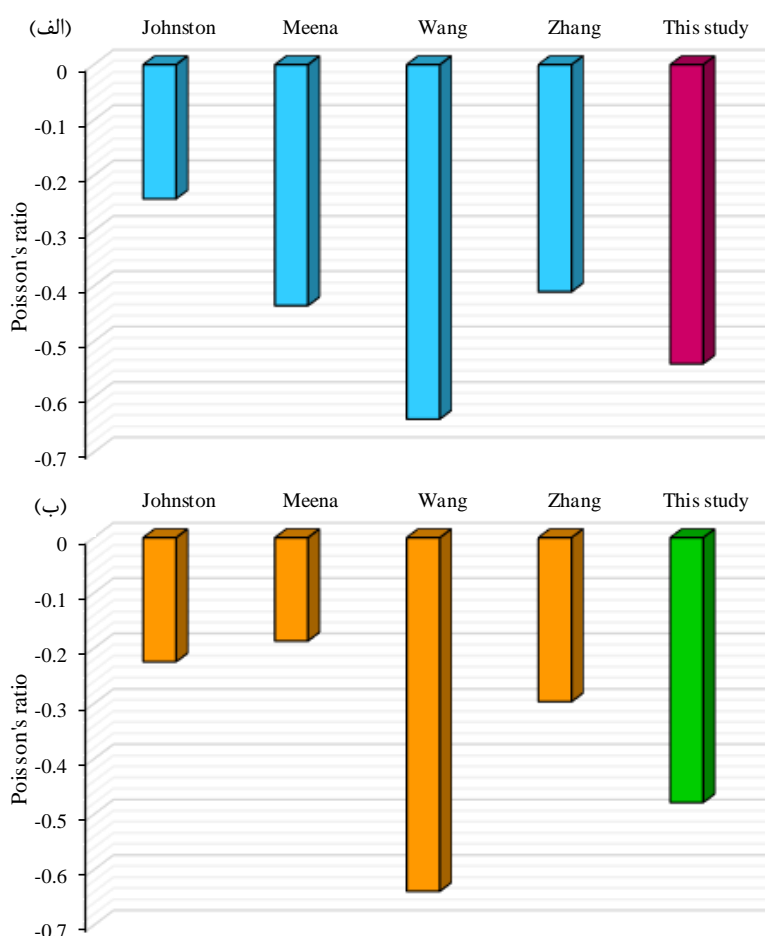
شکل ۷ نسبت پواسون نمونه‌های پرینت سه بعدی با ساختار آگزتیک نوین ارائه شده به ازای کرنش‌های طولی مختلف

شکل ۸ مقایسه‌ی نسبت پواسون بدست آمده توسط ساختار آگزتیک نوین ارائه شده در تحقیق حاضر را با تعدادی از ساختارهای آگزتیک ارائه شده در سالیان اخیر در کرنش طولی ۵٪ و ۱۵٪ نشان می‌دهد.

همانطور که نتایج شکل ۸-الف نشان می‌دهد، ساختار آگزتیک نوین ارائه شده در تحقیق حاضر عملکرد خوبی را نسبت به سایر ساختارها از خود نشان داده است و با ارائه‌ی نسبت پواسون برابر ۰٫۵۴- در کرنش طولی ۵٪ جزو بهترین ساختارها بوده است و عملکرد آن نسبت به ساختارهای ارائه شده توسط جانسون [۲۲] با نسبت پواسون ۰٫۲۴-، میینا [۲۳] با نسبت پواسون ۰٫۴۴- و ژانگ [۲۴] با نسبت پواسون ۰٫۴۱- بهتر بوده است. همچنین عملکرد ساختار آگزتیک نوین ارائه شده در تحقیق حاضر نزدیک‌ترین عملکرد را به تحقیق وانگ [۲۵] با نسبت پواسون ۰٫۶۴- داشته است. همچنین از نتایج شکل ۸-ب مشخص است که ساختار آگزتیک نوین ارائه شده در تحقیق حاضر عملکرد چشمگیری را در کرنش طولی ۱۵٪ نیز از خود نشان داده است. علیرغم اینکه اکثر ساختارهای دیگر عملکردشان به شدت تحت تاثیر این کرنش طولی بالاتر قرار گرفته است و نسبت پواسون آن‌ها به شدت کاهش یافته است، ساختار آگزتیک نوین ارائه شده در تحقیق حاضر و ساختار آگزتیک ارائه شده توسط وانگ [۲۵] تنها ساختارهایی بوده‌اند که نسبت پواسون بالایی را ارائه داده‌اند.

برخلاف تحقیقات جانسون [۲۲]، میینا [۲۳] و ژانگ [۲۴] که نسبت پواسون ساختارهای ارائه شده توسط آنان به ترتیب به ۰٫۲۲-، ۰٫۱۹- و ۰٫۳۰- کاهش یافت، ساختار آگزتیک نوین ارائه شده در تحقیق حاضر نسبت پواسون خود را به میزان ۰٫۴۸- بالا نگه داشت که نسبت به ساختارهای اشاره شده، مقدار چشمگیری می‌باشد.

هرچند شایان ذکر است که ساختار ارائه شده توسط وانگ [۲۵]، نسبت پواسون بالایی به میزان ۰٫۶۳- در کرنش طولی ۱۵٪ ارائه داد.



شکل ۸ مقایسه نسبت پواسون نمونه پرینت سه بعدی با ساختار آگزتیک نوین ارائه شده در تحقیق حاضر با تحقیقات پیشین در الف) کرنش طولی ۵٪ و ب) کرنش طولی ۱۵٪

۴- نتیجه‌گیری

ساختارهای آگزتیک پلیمری با ویژگی‌های منحصر بفردی مانند مقاومت به ضربه‌ی بالا، قابلیت جذب انرژی بالا و انعطاف‌پذیری بالا، از اهمیت زیادی برخوردار هستند. این ساختارها، در هنگام کشش به جای باریک شدن، پهن‌تر شده که این ویژگی با نسبت پواسون منفی همراه است. تحقیق حاضر با ارائه‌ی یک ساختار آگزتیک نوین متشکل از چهار سلول واحد سرپیکانی و یک سلول واحد میسینگ ریب، در راستای توسعه و بهبود ساختارهای آگزتیک گام برمی‌دارد. این ساختار آگزتیک نوین با عملکرد مطلوب و نسبت پواسون منفی قابل توجه، امکان استفاده در کاربردهای مهندسی و صنعتی متعدد را می‌تواند بهبود چشمگیری را در کارایی ساختارهای آگزتیک پلیمری ایجاد کند. با توجه به نتایج حاصل از آزمایش‌ها، ساختار آگزتیک نوین ارائه شده در این تحقیق تحت کرنش‌های طولی مختلف، عملکرد مطلوبی از خود نشان داده است. نمونه‌های پرینت سه بعدی با ساختار آگزتیک، در تمامی کرنش‌های طولی اعمال شده، تغییرات عرضی مثبت داشته و نسبت‌های پواسون منفی را ارائه داده‌اند که مشخصه‌ی بارز ساختارهای آگزتیک می‌باشد. بیشترین نسبت پواسون در کرنش طولی ۵٪ بدست آمده که برابر ۰٫۵۴- می‌باشد. همچنین مقایسه عملکرد این ساختار با ساختارهای ارائه شده در تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که ساختار آگزتیک نوین این تحقیق دارای عملکرد بهتری در برخی موارد بوده و در مقایسه با سایر ساختارها، نسبت پواسون بالاتری را حتی در کرنش‌های طولی بالا حفظ کرده است. این نتایج نشان‌دهنده پتانسیل بالای استفاده از این ساختار در کاربردهای مختلف مهندسی و صنعتی می‌باشد و تحقیقات آتی می‌تواند به بهبود و بهینه‌سازی بیشتر این ساختار کمک کند.

References

- [1] Li ZY, Wang WJ, Ye XD, Li HZ, Yang JS, Ho MM, Xu B, Xiong J, Hu H. Mechanical properties of 3D continuous CFRP composite graded auxetic structures. *Construction and Building Materials*. 2024 Aug 23;440:137379. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.137379
- [2] Zhang C, Lu F, Wei T, Huang Y, He Y, Zhu Y. A novel windmill-shaped auxetic structure with energy absorption enhancement. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2024 Oct 15;280:109635. doi: 10.1016/j.ijmecsci.2024.109635
- [3] Tabak A, Safaei B, Memarzadeh A, Arman S, Kizilors C. An extensive review of piezoelectric energy-harvesting structures utilizing auxetic materials. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*. 2024 Mar;12(3):3155-92. doi: 10.1007/s42417-023-01038-9
- [4] Mojaver M, Azdast T, Hasanzadeh R. An experimental and numerical study on an innovative metastructure for 3D printed thermoplastic polyurethane with auxetic performance. *Polymers for Advanced Technologies*. 2024 Feb;35(2):6298. doi: 10.1002/pat.6298
- [5] He P, Wang S, Zhang M, Sang L, Tong L, Hou W. Compression performance of 3D-printed thermoplastic auxetic structures. *Thin-Walled Structures*. 2024 Apr 1;197:111558. doi: 10.1016/j.tws.2024.111558
- [6] Zhong J, Zhao C, Chen C, Lai WL, Wang Q. Mechanical behaviors of composite auxetic structures under quasi-static compression and dynamic impact. *European Journal of Mechanics-A/Solids*. 2025 Jan 1;109:105454. doi: 10.1016/j.euromechsol.2024.105454
- [7] Momoh EO, Jayasinghe A, Hajsadeghi M, Vinai R, Evans KE, Kripakaran P, Orr J. A state-of-the-art review on the application of auxetic materials in cementitious composites. *Thin-Walled Structures*. 2024 Mar 1;196:111447. doi: 10.1016/j.tws.2023.111447
- [8] Shirzad M, Bodaghi M, Oh D, Yi M, Nam SY. Design and optimization of bioinspired auxetic structure for biomedical applications. *European Journal of Mechanics-A/Solids*. 2024 Jan 1;103:105139. doi: 10.1016/j.euromechsol.2023.105139
- [9] Hasanzadeh R, Mihankhah P, Azdast T, Rasouli A, Shamkhali M, Park CB. Biocompatible tissue-engineered scaffold polymers for 3D printing and its application for 4D printing. *Chemical Engineering Journal*. 2023 Oct 13:146616. doi: 10.1016/j.cej.2023.146616
- [10] Amini E, Fathi A, Baghestani AM. The effect of interlayer adhesion in predicting fatigue failure of 3D printed parts. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2023 Oct 23;10(8):36-48. doi: 10.22034/ijme.2024.434383.1906 [In Persian]
- [11] Hasanzadeh R, Mihankhah P, Azdast T, Bodaghi M, Moradi M. Process-property relationship in polylactic acid composites reinforced by iron microparticles and 3D printed by fused filament fabrication. *Polymer Engineering & Science*. 2024 Jan;64(1):399-411. doi: 10.1002/pen.26556
- [12] Pol MH, Liaghat G. Investigating the bending properties of polymeric orthopedic plaque made of different polymers by additive manufacturing method. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2022 Nov 22;9(9):21-5. doi: 10.22034/ijme.2023.376919.1726 [In Persian]
- [13] Hasanzadeh R, Azdast T. Optimization of FDM 3D Printing Process Parameters of Biodegradable Poly Lactic Acid Polymeric Samples. *Modares Mechanical Engineering*. 2021 Jan 10;21(2):69-78. doi: 20.1001.1.10275940.1399.21.2.2.8 [In Persian]
- [14] Behinfar P, Nourani, A. Analytical and numerical solution for auxetic stent with Re-entrant geometry and its multi-objective optimization. *Journal of Solid and Fluid Mechanics*. 2023 Jan;12:125-137. doi: 10.22044/jsfm.2023.12193.3637
- [15] Etemadi E, Gholikord M, Zeeshan M, Hu H. Improved mechanical characteristics of new auxetic structures based on stretch-dominated-mechanism deformation under compressive and tensile loadings. *Thin-Walled Structures*. 2023 Mar 1;184:110491. doi: 10.1016/j.tws.2022.110491
- [16] Li K, Zhang Y, Hou Y, Su L, Zeng G, Xu X. Mechanical properties of re-entrant anti-chiral auxetic metamaterial under the in-plane compression. *Thin-Walled Structures*. 2023 Mar 1;184:110465. doi: 10.1016/j.tws.2022.110465
- [17] Zhou J, Liu H, Dear JP, Falzon BG, Kazancı Z. Comparison of different quasi-static loading conditions of additively manufactured composite hexagonal and auxetic cellular structures. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2023 Apr 15;244:108054. doi: 10.1016/j.ijmecsci.2022.108054
- [18] Xue X, Lin C, Wu F, Li Z, Liao J. Lattice structures with negative Poisson's ratio: A review. *Materials Today Communications*. 2023 Mar 1;34:105132. doi: 10.1016/j.mtcomm.2022.105132
- [19] Zhao Y, Wang Y, Hao J, Wang Y, Wang K, Tai S. Study on mechanical properties of cellular structures with negative Poisson's ratio based on the development of Abaqus plug-in tool. *Composite Structures*. 2023 Oct 15;322:117348. doi: 10.1016/j.compstruct.2023.117348
- [20] Zhang Q, Zhu Y, Lu F, Yu C, Ren X, Shao Y. A novel buckling-induced planner isotropic auxetic meta-structure and its application in BRB: A numerical study. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. 2024 Dec 16;31(24):6081-94. doi: 10.1080/15376494.2023.2224810

- [21] Zhu Y, Gao D, Shao Y, Chen H, Yu C, Wang Q. A novel prefabricated auxetic honeycomb meta-structure based on mortise and tenon principle. *Composite Structures*. 2024 Feb 1;329:117782. doi: [10.1016/j.compstruct.2023.117782](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.117782)
- [22] Johnston R, Kazancı Z. Analysis of additively manufactured (3D printed) dual-material auxetic structures under compression. *Additive Manufacturing*. 2021 Feb 1;38:101783. doi: [10.1016/j.addma.2020.101783](https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101783)
- [23] Meena K, Singamneni S. Novel hybrid auxetic structures for improved in-plane mechanical properties via additive manufacturing. *Mechanics of Materials*. 2021 Jul 1;158:103890. doi: [10.1016/j.mechmat.2021.103890](https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2021.103890)
- [24] Wang M, Wu H, Yang L, Chen A, Chen P, Wang H, Chen Z, Yan C. Structure design of arc-shaped auxetic metamaterials with tunable Poisson's ratio. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. 2023 Apr 3;30(7):1426-36. doi: [10.1080/15376494.2022.2033890](https://doi.org/10.1080/15376494.2022.2033890)
- [25] Zhang Y, Ren X, Jiang W, Han D, Zhang XY, Pan Y, Xie YM. In-plane compressive properties of assembled auxetic chiral honeycomb composed of slotted wave plate. *Materials & Design*. 2022 Sep 1;221:110956. doi: [10.1016/j.matdes.2022.110956](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110956)