



طراحی و تحلیل رفتار مکانیکی یک ساختار مشبک آگزتیک جدید بر پایه مکانیزم صلب چرخنده

رضا جعفری ندوشن^۱، محمدجواد عبقری^۲

۱ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران
۲ دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۱۵
بازنگری: ۱۴۰۱/۱۱/۰۷
پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۱۵
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۱۲/۲۷

کلمات کلیدی:

ساختارهای آگزتیک
نسبت پواسون منفی
ساختار مشبک
چاپ سه بعدی
شبیه‌سازی اجزای محدود

خلاصه: مواد آگزتیک با نسبت پواسون منفی به عنوان یکی از انواع فرامواد به دلیل خواص مکانیکی جذاب و قابل توجه، توجه بسیاری از محققین را به خود جلب کرده‌اند. سازه‌های صلب چرخنده یکی از انواع مواد آگزتیک هستند که با تنظیم متغیرها، رفتار همسانی را در جهات مختلف نشان می‌دهند، اما این سازه‌ها به دلیل استفاده از بلوک‌های صلب دارای چگالی نسبی زیادی می‌باشند. از طرفی علی‌رغم چگالی نسبی بالا این سازه‌ها در اتصالات اجزای چرخنده به یکدیگر ضعیف بوده و دارای سفتی و استحکام بالایی نیستند و با توجه به چگالی نسبی بالا خواص ویژه مکانیکی کمی دارند. در این پژوهش یک ساختار مشبک جدید با الهام از سازه‌های صلب چرخنده ولی با چگالی نسبی بسیار کمتر ایجاد گردید. برای کاهش چگالی نسبی در این ساختار بجای بلوک‌های صلب از المان‌های میله‌ای استفاده شده است. ساختار جدید با استفاده از فرآیند چاپ سه‌بعدی ساخته شد و تحت آزمایش کشش قرار گرفت. با عکس‌برداری از ساختار قبل و در حین تغییر شکل، ضریب پواسون آن اندازه‌گیری گردید. همچنین با روش اجزای محدود، رفتار تغییر شکل ساختار پیشنهاد شده شبیه‌سازی و با نتایج تجربی مقایسه شد. هر دو روش نشان‌دهنده رفتار آگزتیک ساختار جدید هستند. در ادامه مکانیزم تغییر شکل ساختار و همچنین محدوده‌ای از شکل ساختار که رفتار آگزتیک در آن مشاهده می‌شود بررسی گردید.

۱- مقدمه

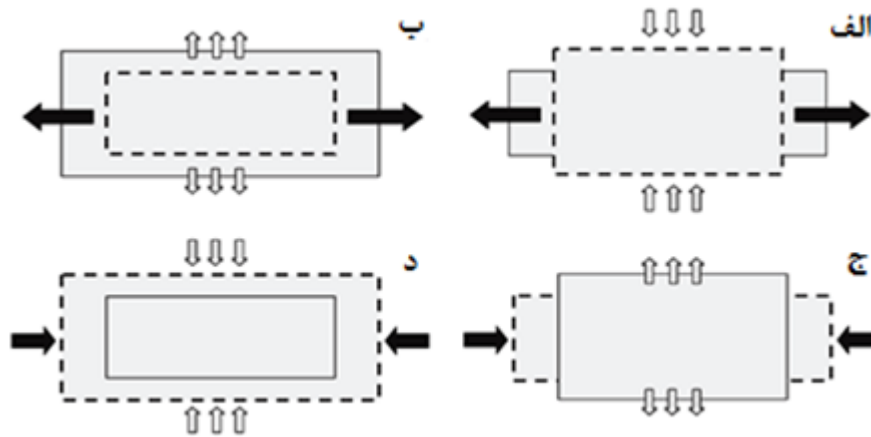
فرامواد به دسته‌ای از مواد گفته می‌شود که در مقایسه با مواد رایج دارای خواص غیرمعمول هستند. معمولاً خواص غیرمعمول این مواد نتیجه ساختار مهندسی شده آن‌ها که عمدتاً به صورت سلولی می‌باشند است. از فرامواد مکانیکی می‌توان به مواد آگزتیک یا مواد با ضریب پواسون منفی و مواد با ضریب انبساط حرارتی منفی اشاره نمود. واژه آگزتیک از کلمه یونانی آگزتیکاز به معنای چیزی که تمایل به افزایش و رشد دارد، مشتق شده است و ریشه آن کلمه آکزیس به معنای افزایش است. پژوهشگران واژه آگزتیک را برای بیان خاصیت ضریب پواسون منفی مطرح کردند که امروزه به‌طور متداول استفاده می‌شود [۱]. در سال ۱۹۸۷ اولین نمونه از مواد آگزتیک تولید شد [۲]. در شکل ۱ عملکرد مواد متداول و مواد آگزتیک زیر کشش و فشار نشان داده شده است [۳]. مواد با نسبت پواسون منفی، یا مواد آگزتیک^۱ تحت بارهای کششی/فشاری طولی به‌ترتیب در جهت عرضی منبسط/

منقبض می‌گردند. مواد آگزتیک، خواص ویژه‌ای در مقایسه با مواد متداول از جمله افزایش مدول برشی، افزایش مقاومت در برابر برخورد، قابلیت انحنای دوگانه، افزایش چقرمگی شکست، مقاومت در برابر ترک، افزایش قابلیت جذب انرژی و قابلیت نفوذپذیری متغیر را دارند [۴]. مواد آگزتیک طبیعی دسته‌ای از مواد آگزتیک هستند که به‌طور طبیعی ایجاد و بیش از صد سال است که کشف شده‌اند. امروزه مواد آگزتیک طبیعی بسیاری مورد بررسی قرار گرفته‌اند که از جمله آن‌ها می‌توان به پوست‌ها [۵ و ۶]، سرامیک‌ها [۷]، گرافیت [۸]، فلزات [۹] و ژئولیت‌ها [۱۰] اشاره نمود.

طراحی مواد با ساختار مشبک روشی برای ایجاد مواد با وزن کم، قابلیت جذب انرژی بالا و فرامواد با خواص غیرمعمول می‌باشد. این مواد دارای خواصی هستند که در اکثر مواد طبیعی یافت نمی‌شوند. خواص این مواد صرف‌نظر از مواد اولیه به ساختار معماری شده آن‌ها نیز مرتبط است. از طرفی مشبک بودن این مواد باعث کاهش چگالی نسبی و در نتیجه افزایش خواص مکانیکی ویژه این مواد می‌شود [۴].

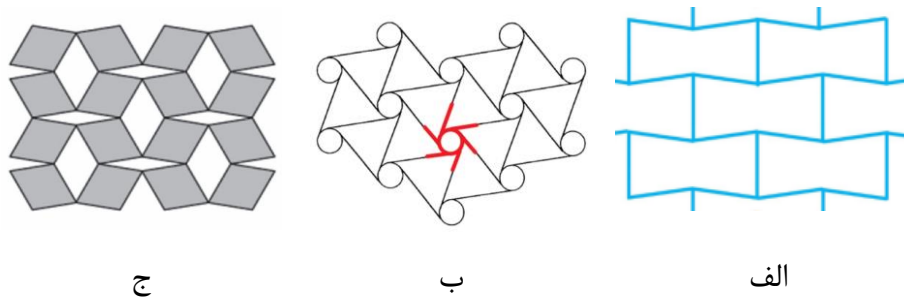
1 Auxetic

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: rjafari@cc.iut.ac.ir



شکل ۱. عملکرد مواد متداول تحت الف) اعمال کشش و ج) اعمال فشار، و عملکرد مواد آگزتیک تحت ب) اعمال کشش و د) اعمال فشار [۳].

Fig. 1. Performance of conventional materials under a) tensile and c) compressive loads, and performance of auxetic materials under b) tensile and d) compressive loads [3].



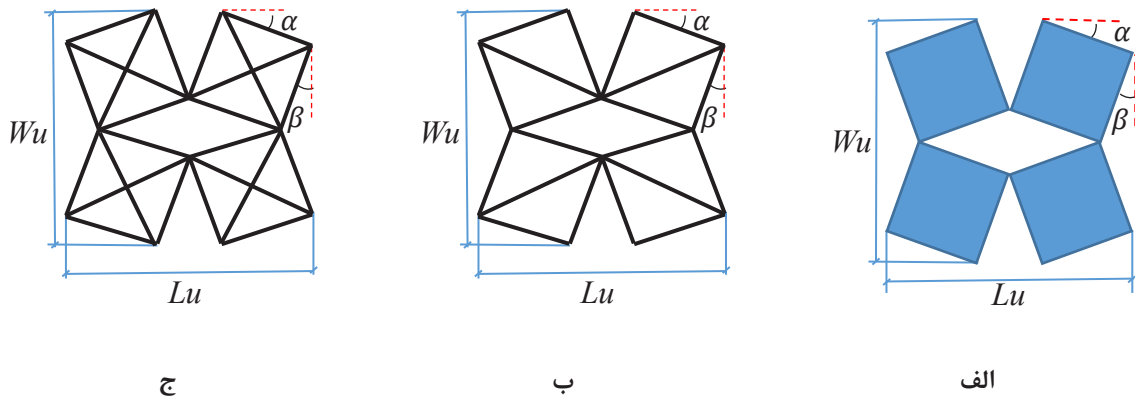
شکل ۲. نمایی از ساختارهای رایج آگزتیک الف) درون رو ب) کایرال ج) صلب چرخنده [۵]

Fig.2. Illustration of common auxetic structures: a) re-entrant, b) chiral, c) rotating rigid blocks [5].

بلوک‌ها حول نقاط اتصال چرخیده و تغییر شکل کلی سازه را ایجاد می‌کنند. شکل ۲ نمایی از ساختارهای رایج آگزتیک را نشان می‌دهد. از عیوب اصلی ساختارهای آگزتیکی که از بلوک‌های چرخنده و یا صفحه‌های سوراخ‌شده استفاده می‌کنند وزن بالای این ساختارها در مقایسه با ساختارهای مشبک مشابه است. از طرفی ساختارهای مشبک سلولی و آگزتیک [۲۵] معمولاً دارای خواص ناهمسانگرد هستند و همچنین دارای تغییر شکل‌های بسیار کمی تا نقطه شکست می‌باشند. در این مقاله با الهام از ساختارهای دارای بلوک‌های چرخنده یک ساختار مشبک سلولی آگزتیک جدید پیشنهاد می‌گردد که در مقایسه با ساختارهای چرخنده دارای وزن بسیار کمی است. از طرفی این ساختار دارای رفتار مکانیکی تقریباً مشابهی در دو راستا بوده و حتی می‌توان با تغییر میله‌های ساختار به رفتار کاملاً یکسان در دو جهت دست یافت.

مواد آگزتیک مشبک با توجه به ویژگی‌های منحصر به فردشان، برای کاربردهای مختلف [۵]، از جمله دستگاه‌های زیست‌پزشکی [۶-۹]، تجهیزات ورزشی [۱۰]، سیستم‌های جذب انرژی [۱۱ و ۱۲]، حسگرها [۱۳ و ۱۴]، و محرک‌ها [۱۵] مورد بررسی قرار گرفته‌اند. این مواد اغلب شامل سازه‌هایی با هندسه درون‌رو^۱ [۲۲-۱۶] و کایرال^۲ [۲۳ و ۲۴] هستند. در مواردی نیز ساختارهای خرپایی با خاصیت آگزتیک پیشنهاد شده‌اند که به دلیل بار محوری در اعضا از سفتی و استحکام بالایی برخوردارند [۲۵ و ۲۶]. یکی از ساختارهای دیگری که خاصیت آگزتیک نشان می‌دهند ساختارهایی با بلوک‌های چرخنده و یا صفحه‌های سوراخ‌شده است [۲۷-۳۱]. در این ساختارها بلوک‌های صلب در نقاطی به هم متصل شده‌اند و با اعمال بار این

- 1 Re-entrant
- 2 Chiral



شکل ۳. ایجاد ساختارهای آگزتیک میله‌ای با الهام از ساختارهایی با بلوک‌های چرخنده: الف) سلول واحد ساختار رایج با بلوک‌های چرخنده، ب) ساخت سلول واحد با اعضای میله‌ای با رفتار مشابه در دو جهت، ج) ساختاری میله‌ای با خواص کاملاً یکسان در دو راستا.

Fig. 3. Creating auxetic structures inspired by structures with rotating blocks: a) a unit cell of the structure with rotating blocks, b) construction of a unit cell with similar behavior in two directions, c) a unit cell with completely identical properties in two directions.

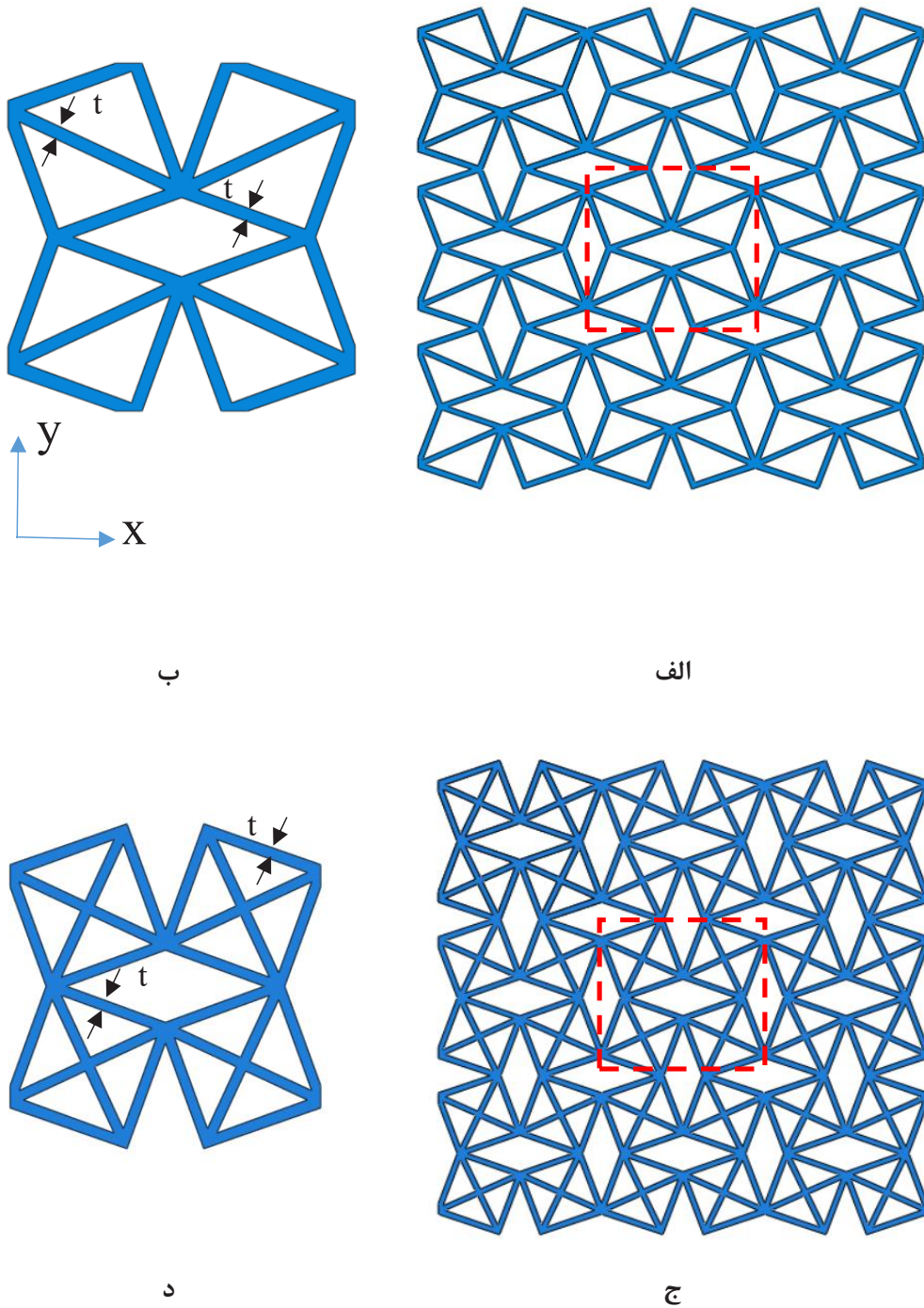
ساختار در دو راستا دارای تفاوت کمی خواهد بود. در صورتی که هدف رسیدن به ساختاری با خواص کاملاً یکسان در دو سمت باشد ساختار شکل ۳ ج پیشنهاد می‌شود. شکل ۴ الف یک سازه با ساختاری متشکل از تعداد نه سلول واحد بر اساس شکل ۳-ب را نشان می‌دهد و یک سلول واحد این ساختار با در نظر گرفتن تمام جزئیات مربوط به ضخامت اعضا در شکل ۴ ب مشخص گردیده است شکل‌های ۴ ج و ۴ د نیز ساختاری را بر اساس سلول واحد شکل ۳ ج نشان می‌دهند.

۳- بررسی تجربی رفتار سازه

برای ارزیابی آگزتیک بودن و بررسی خواصی مثل سفتی ساختار ارائه شده، بررسی تجربی و مدل‌سازی اجزای محدود نمونه‌ها با سه سلول واحد انجام شد. شکل ۵ نمونه‌های آگزتیک میله‌ای که توسط پرینت سه بعدی با دستگاه چاپ سه بعدی و رشته پلی‌لاکتیک اسید تولید شده‌اند را نشان می‌دهد. هر نمونه شامل سه سلول واحد است و در دو سر نمونه بخشی برای گرفتن نمونه در فک دستگاه کشش در نظر گرفته شده است. ابعاد نمونه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. با توجه به این جدول هر یک از دیواره‌های نمونه‌ها مقطعی به شکل مستطیل با ابعاد تقریبی ۱ در ۴ میلی‌متر دارند. برای تولید نمونه‌ها، هر نمونه در جهت عمود بر صفحه نشان داده شده در شکل ۵-الف به صورت لایه به لایه پرینت شده است و برای پرینت هر لایه نازل دستگاه پرینتر در جهت دیواره‌های هر سلول حرکت داده شده است. نمونه‌ها بر

۲- طراحی ساختار لانه‌زنبوری آگزتیک

همان‌گونه که در بخش قبل اشاره شد، غالب ساختارهای آگزتیک مشبک دارای رفتار ناهمسانگرد هستند و در مواردی نیز این ناهمسانگردی بسیار شدید است [۲۵]. از طرفی ساختارهای کشش غالب معمولاً کرنش تا شکست بسیار کمی را از خود نشان می‌دهند. شکل ۳ الف واحد ساختاری یک ماده آگزتیک با بلوک‌های چرخنده را نشان می‌دهد. این ساختار شرایط خاصی از ابعاد می‌تواند رفتاری کاملاً یکسان در دو راستا داشته باشد ولی دارای وزن زیادی نسبت به ساختارهای مشبک است. برای تبدیل این ساختار به یک ساختار آگزتیک که اجزای آن میله‌ای هستند، با جایگزینی هر یک از مربع‌های صلب با چند میله ساختار جدید نشان داده شده در شکل ۳ ب پیشنهاد می‌شود. صلب بودن میله‌هایی که جایگزین مربع‌های ساختار شکل ۳ الف می‌شوند در رفتار آگزتیک سازه بسیار حائز اهمیت است. به این منظور میله‌های جایگزین شده در این قسمت شامل دو مثلث هستند که تشکیل یک ساختار شبه صلب در این ناحیه می‌دهند و تغییر شکل کمی در بارگذاری خواهند داشت. قابل ذکر است که با تغییر مقادیر α ، β و یا تغییر نسبت ابعاد واحد ساختاری ارائه شده در شکل ۳ ب، می‌توان به ساختارهای مختلف آگزتیک دیگر با رفتار متفاوت دست یافت. در ادامه، برای ایجاد ساختاری با خواص مشابه در هر دو جهت، ساختاری با $\alpha = \beta$ و $Wu = Lu$ در نظر گرفته می‌شود. اگرچه این ساختار شباهت زیادی با بلوک‌های چرخنده دارد ولی با توجه به اینکه میله‌هایی که به عنوان قطر مربع‌های چرخنده در نظر گرفته شده‌اند می‌توانند در دو حالت مختلف قرارگیرند خواص این



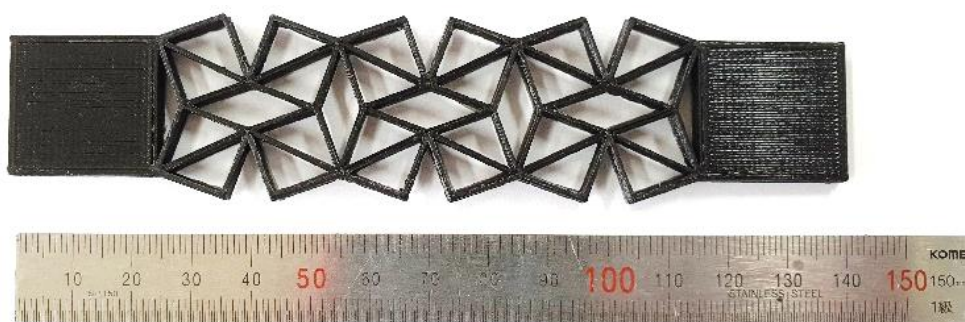
شکل ۴. (الف) ساختار آگزتیک متشکل از ۹ سلول واحد بر پایه طرح شکل ۳-ب، و (ب) سلول واحد این ساختار (ج) ساختار آگزتیک متشکل از ۹ سلول واحد بر پایه طرح شکل ۳-ج، و (د) سلول واحد این ساختار.

Fig. 4. (a) An auxetic structure consisting of 9 unit cells based on the design of Figure 3 b, (b) the unit cell of this structure, (c) an auxetic structure consisting of 9 unit cells based on the design of Figure 3 c, and (d) the unit cell of this structure.

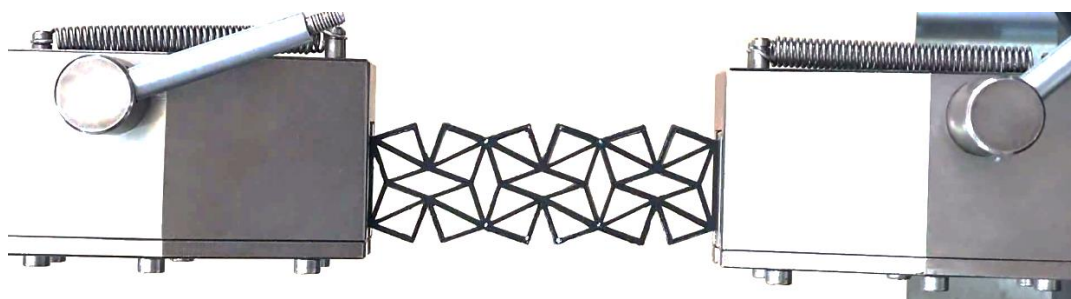
جدول ۱. ویژگی‌های نمونه‌های کششی تولیدشده با پرینت سه‌بعدی

Table 1. Characteristics of 3D printed tensile test specimens

پارامترهای سلول‌های واحد*			ابعاد نمونه‌ها		
t	α	Lu	ضخامت	عرض	طول (میلی‌متر)
(میلی‌متر)	(درجه)	(میلی‌متر)	(میلی‌متر)	(میلی‌متر)	
۰/۹۹	۲۰	۳۰	۴	۳۰	۱۴۰



الف



ب

شکل ۵. الف) نمونه چاپ‌شده سه‌بعدی با سه سلول واحد به همراه دو انتها برای نصب در فک‌های دستگاه کشش (ب) نمونه در دستگاه کشش به همراه نقاط کنترل کرنش.

Fig. 5. (a) 3D printed sample with three unit cells and two ends for mounting in the grippers of the tensile testing machine, (b) the sample in the tensile testing machine along with strain gauge points.

(شکل ۵ ب). با استفاده از نرم افزار ایمیج^۲ از دیاد طول سلول واحد وسط در راستای طولی و عرضی اندازه‌گیری شد و از این طریق نسبت پواسون محاسبه گردید.

* پارامترهای هندسی در شکل های ۳ و ۴ تعریف شده‌اند. مقادیر ضخامت پس از چاپ نمونه‌ها اندازه‌گیری شده و میانگین تمام نمونه‌ها ذکر شده است.

روی یک دستگاه تست کشش کوسار^۱ تحت بارگذاری کششی قرار گرفتند و منحنی‌های نیرو-جابجایی استخراج گردیدند. آزمایش کشش با سرعت بارگذاری ۵ میلی‌متر در دقیقه و پنج بار تکرار انجام شد.

یک دوربین برای ثبت رفتار تغییرشکل نمونه‌ها تحت بار کششی برای به‌دست آوردن نسبت پواسون به‌کارگرفته شد. مرزهای سلول واحد در مرکز نمونه با استفاده از یک قلم رنگی قبل از آزمایش کشش مشخص گردید

2 ImageJ (NIH, Bethesda, MD, USA)

1 Quasar 5,^۴ Galdabini Com., Varese, Italy

جدول ۲. نیروی عکس‌العمل محاسبه شده در اندازه المان‌های مختلف

Table 2. The reaction force calculated at different element sizes.

اندازه تقریبی المان ها (mm)	۱	۰/۵	۰/۲۵	۰/۱۵
تعداد تقریبی المان در ضخامت هر دیواره	۱	۲	۴	۶
نیروی عکس‌العمل کششی (N)	۸۱/۲۷	۷۸/۶۷	۷۶/۷۴	۷۶/۹۶

۴- مدل‌سازی اجزای محدود

برای ارزیابی بیشتر آگزتیک بودن ساختار میله‌ای ارائه‌شده و محاسبه خواص مکانیکی آن و همچنین بررسی توزیع تنش و کرنش در نمونه‌ها و نحوه ایجاد خاصیت آگزتیک در آن، شبیه‌سازی کشش بر روی این نمونه‌ها با روش اجزای محدود نیز در کنار بررسی‌های تجربی انجام پذیرفت. ابتدا، مدل هندسی مشابه نمونه‌های کششی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس ساخته شد. به این منظور ابعاد تمامی ساختارهای تولیدشده اندازه‌گیری و میانگین‌گیری شد و با استفاده از یک کد پایتون یک نمونه با جزئیات کامل شبیه‌سازی گردید. به منظور اختصاص خواص ماده به هر یک از دیواره‌ها، مدول یانگ پلی‌لاکتیک اسید تولیدشده با چاپ سه‌بعدی در شرایط کاملاً مشابه [۲۵] و [۲۶] در شبیه‌سازی‌ها استفاده گردید. این مدول یانگ که نشان‌دهنده مدول یانگ ماده در جهت حرکت نازل پرینتر است برابر با ۲۲۳۲ مگاپاسکال است. همچنین ضریب پواسون ماده ۰/۳۴ در نظر گرفته شد. همانند آزمایش‌های کشش، تمام درجات آزادی یک سمت قطعه ثابت گردید و در سمت دیگر درجات آزادی عمود بر راستای کشش ثابت شد و در راستای کشش جابجایی مشخص به قطعه اعمال گردید. مدل‌ها توسط المان مکعبی (C3D8I) با اندازه تقریبی ۰/۲۵ میلی‌متر شبکه‌بندی شدند. یک مطالعه بر روی همگرایی شبکه نشان داد که استفاده از شبکه ریزتر نتایج را به‌طور قابل‌توجهی تغییر نمی‌دهد. به عنوان مثال نیروی عکس‌العمل کششی محاسبه شده در اندازه المان‌های مختلف در جدول ۲ گزارش شده است. حل‌گر ضمنی آباکوس برای محاسبه جابجایی‌ها، تنش‌ها و نیروهای واکنش سازه‌ها استفاده شد.

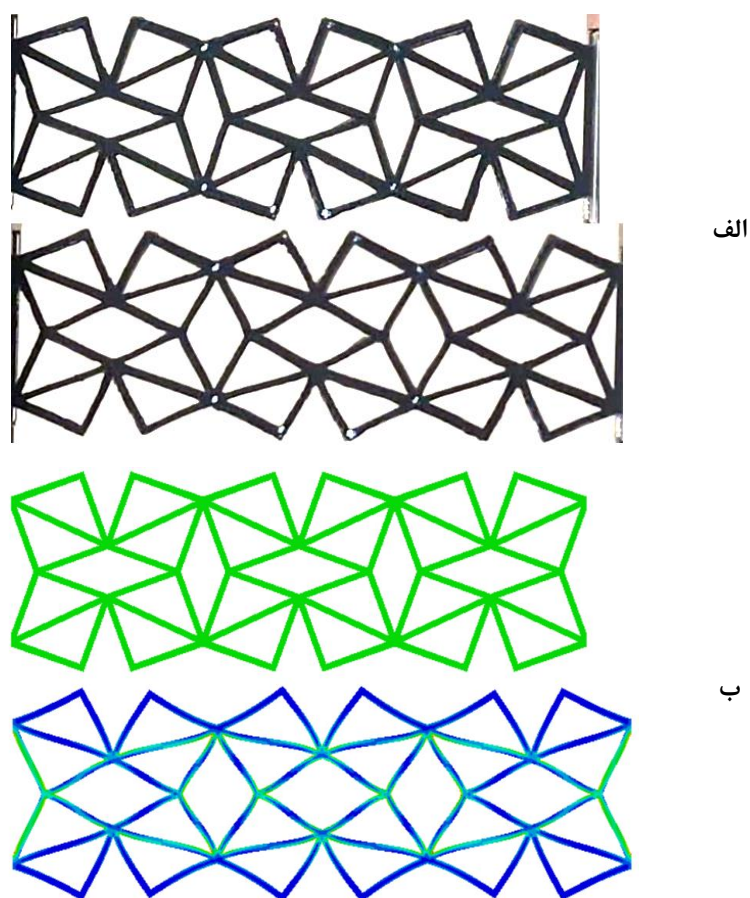
۵- نتایج و بحث

در این بخش با ارائه نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها و شبیه‌سازی‌ها، در ابتدا آگزتیک بودن ساختار پیشنهاد شده بررسی می‌گردد. در ادامه مکانیزم

تغییر شکلی که باعث رفتار آگزتیک می‌گردد بررسی شده و در پایان ضمن بررسی رفتار سازه‌ها در دو راستا، محدوده‌ای از متغیرهای ساختار که در آن رفتار آگزتیک مشاهده می‌شود نشان داده می‌شود.

۵-۱- بررسی نتایج آزمون کشش و صحت شبیه‌سازی سازه

شکل ۶ الف و ب سازه را قبل و بعد از تغییرشکل در آزمایش و شبیه‌سازی نشان می‌دهند. با توجه به این شکل، هم در نتایج تجربی و هم در نتایج تئوری می‌توان اتساع جانبی سازه در اثر کشش را مشاهده نمود که بیانگر خاصیت آگزتیک است. از دیگر مواردی که در این شکل مشخص است هم‌خوانی پیش‌بینی اجزای محدود با رفتار تجربی سازه از نظر نحوه تغییرشکل است. نتایج میانگین به‌دست آمده برای مدول یانگ و ضریب پواسون سازه از آزمایش‌های تجربی با پیش‌بینی اجزای محدود در جدول ۳ مقایسه شده است. قابل ذکر است که مدول یانگ سازه در اینجا بیانگر مدول یانگ موثر سازه است. به عبارتی با فرض اینکه سازه یک ماده پیوسته است میزان نیروی عکس‌العمل لازم برای تغییرشکل سازه به مساحت کل ناحیه اعمال نیرو تقسیم شده و تنش با فرض پیوسته بودن سازه به‌دست آمده است. در مرحله بعد این تنش بر کرنش موثر سازه که از تقسیم جابجایی سازه بر طول اولیه سازه به‌دست می‌آید تقسیم شده و مدول یانگ محاسبه می‌گردد. ضریب پواسون نیز با تقسیم کرنش جانبی محاسبه شده در نرم‌افزار ایمپج بر کرنش طولی به‌دست می‌آید. برای محاسبه هر یک از این کرنش‌ها فاصله دو نقطه سفید رنگ در راستای مورد نظر قبل و بعد از تغییرشکل اندازه‌گیری و مقایسه می‌شود. با توجه به داده‌های جدول ۳ ابتدا می‌توان نتیجه گرفت که سازه دارای ضریب پواسون منفی و یا به‌عبارتی خاصیت آگزتیک است. همچنین می‌توان به هم‌خوانی خوب نتایج تجربی و شبیه‌سازی اشاره نمود. بنابراین برای تحلیل بیشتر این سازه از شبیه‌سازی



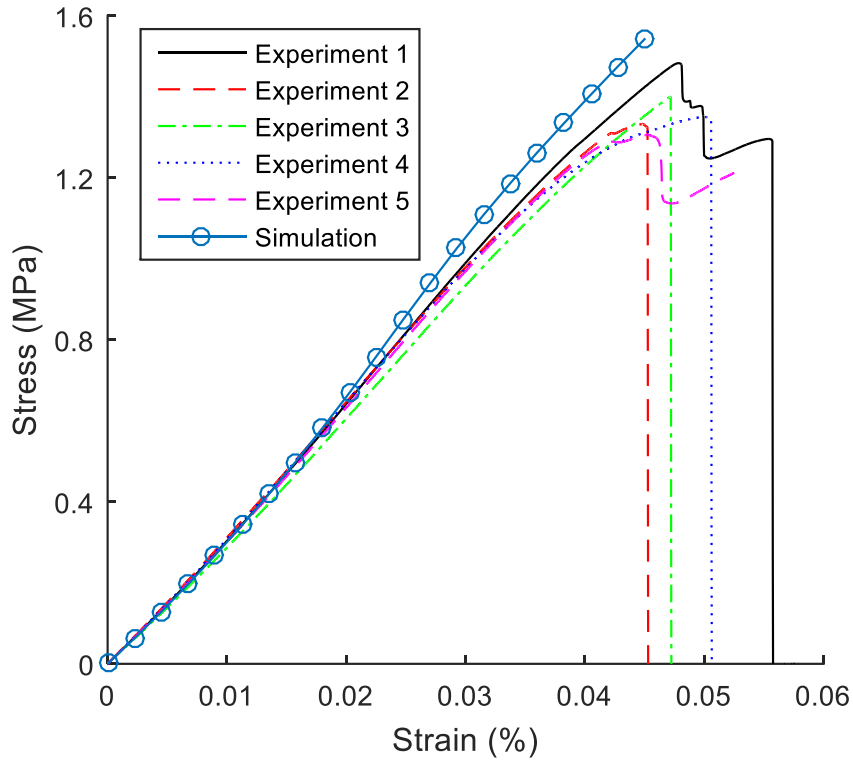
شکل ۶. مقایسه سازه اولیه و سازه بعد از کرنش ۲ درصد (الف) در آزمایش (ب) در شبیه‌سازی

Fig. 6. Comparison of the initial structure and the structure after 2% strain (a) experiment (b) simulation.

ماده و شرایط مرزی در این شبیه‌سازی با شبیه‌سازی بخش قبل یکسان است. سازه تغییرشکل یافته در شکل ۸ نشان داده شده است. در این شکل توزیع تنش میز و توزیع تنش اصلی حداکثر در سازه پس از اعمال کرنش کششی ۲ درصد نشان داده شده است. شکل‌های ۸-الف و ۸-ب بیانگر ترکیبی از بارهای کششی و خمشی در هر یک از دیواره‌ها هستند. با توجه به این شکل نحوه تغییرشکل این سازه نیز به صورت کلی شبیه به نمونه شکل ۶-ب است. ضریب پواسون این سازه 0.51 محاسبه گردید. اختلاف ضریب پواسون سازه شکل ۸ و ۶-ب به شرایط مرزی دو سمت سلول‌ها بازمی‌گردد. در شکل ۶-ب چون دو سمت سلول وسط آزاد است تغییرشکل جانبی راحت‌تر صورت گرفته و ضریب پواسون بزرگ‌تر است. برای محاسبه رفتار واقعی یک ماده با تعداد زیاد سلول باید شرایط مرزی متناوب را به یک سلول اعمال نمود که در بخش‌های بعدی این مقاله به این شکل عمل خواهد شد.

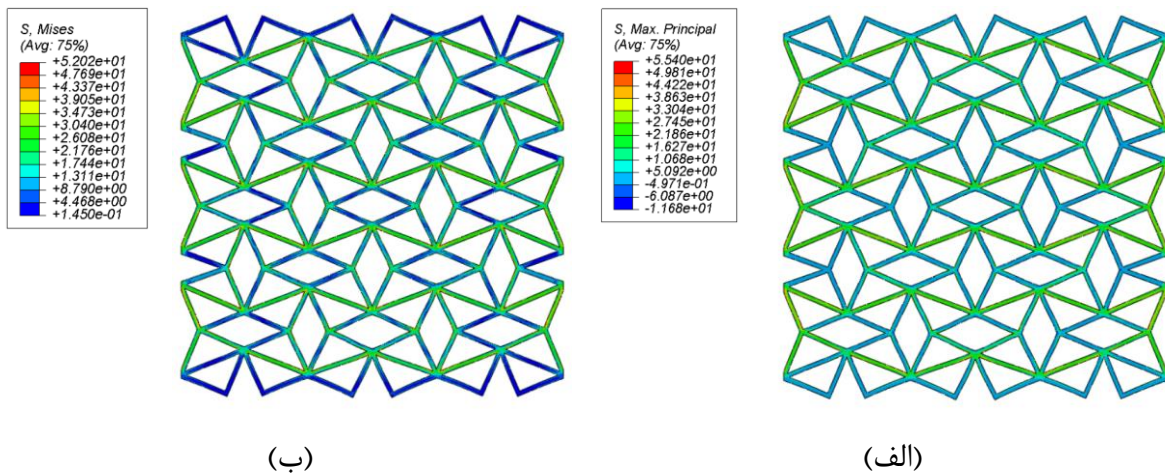
اجزای محدود استفاده خواهد شد. شکل ۷ نمودارهای تنش-کرنش بدست آمده از آزمایش نمونه‌های تجربی را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل میانگین حداکثر تنش نمونه‌ها $1/37$ مگاپاسکال بوده است. در این شکل نمودار تنش پیش‌بینی شده توسط شبیه‌سازی اجزای محدود نیز برای مقایسه نشان داده شده است. اختلاف کمی که بین نمودار عددی و مقادیر تجربی در این شکل دیده می‌شود ناشی از عدم دقت ساخت نمونه‌ها بخصوص در نواحی اتصال دیواره‌ها به یکدیگر است.

یکی از مواردی که در رفتار مواد سلولی که از تکرار یک سلول واحد ساخته می‌شوند تاثیرگذار است تعداد سلول‌هاست. با توجه به اینکه در نمونه‌های آزمایشگاهی ارائه شده در شکل ۶ تنها یک سلول در ضخامت هر نمونه وجود داشت برای بررسی تاثیر افزایش تعداد سلول و تغییر شرایط مرزی دو لبه سلول‌ها آزمایش کشش یک نمونه با سه ردیف سلول در ضخامت نیز شبیه‌سازی گردید. کلیه مراحل شبیه‌سازی از جمله اختصاص



شکل ۷. نمودار تنش-کرنش ۵ نمونه آزمایش مختلف در مقایسه با نمودار حاصل از شبیه‌سازی عددی

Fig. 7. Stress-strain curves of 5 different experimental samples compared with the curve obtained from numerical simulation.



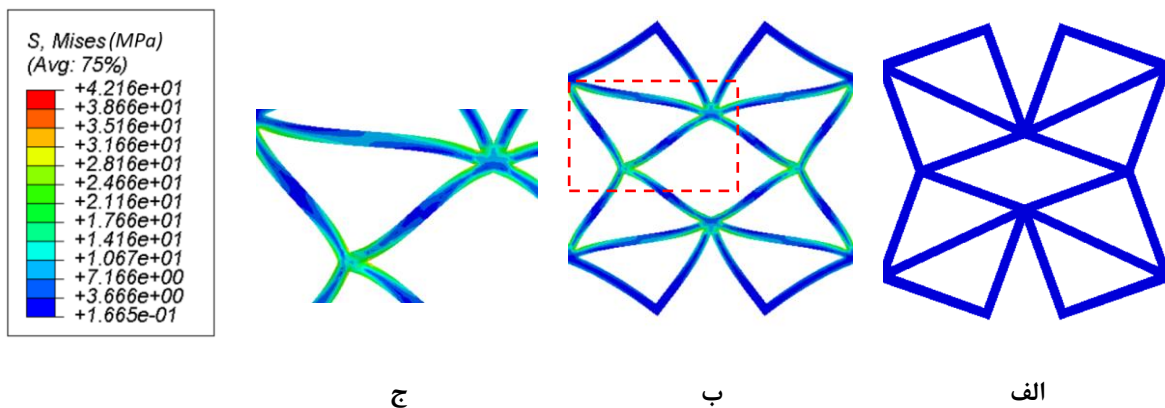
شکل ۸. تغییرشکل یک ساختار با ۹ سلول واحد در کشش افقی در کرنش ۲ درصد (الف) توزیع تنش اصلی حداکثر (ب) توزیع تنش میزز در دیواره ها

Fig. 8. Deformation of a structure with 9 unit cells under horizontal tension at 2% strain. (a) distribution of maximum principal stress (b) distribution of Mises stress in the walls.

جدول ۳. مقایسه مدول یانگ و ضریب پواسون حاصل از شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده در آزمایش‌ها در کرنش ۲ درصد.

Table 3. Comparison of Young's Moduli and Poisson's Ratios obtained from simulation and measured in experiments at 2% strain.

متغیر	مقدار تجربی	پیش‌بینی شبیه‌سازی	درصد خطا
مدول یانگ (مگا پاسکال)	۲۸/۲	۲۹/۰۶	۳
ضریب پواسون	-۰/۶۴	-۰/۶۵	۱/۵



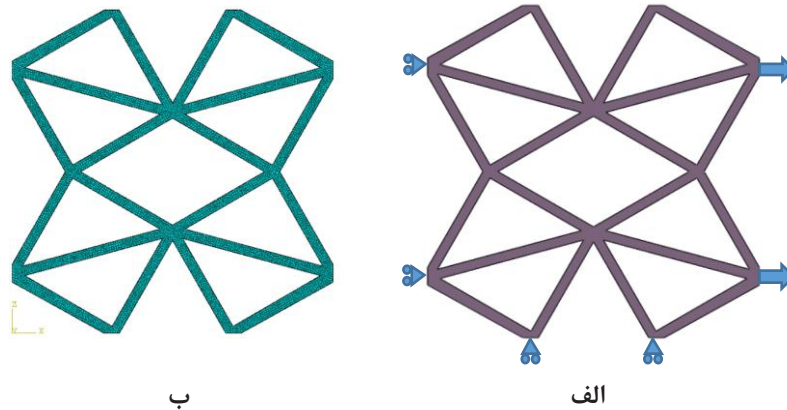
شکل ۹. الف) یک سلول واحد سازه قبل از کشش ب) سلول واحد بعد از کشش و تنش‌های ایجاد شده در آن ج) نمای نزدیک از توزیع تنش در ضخامت دیواره‌ها.

Fig. 9. a) A single unit cell of the structure before tension, b) The unit cell after tension and the stresses induced in it, c) a close-up view of the stress distribution in the thickness of the walls.

۵-۲- بررسی دلیل آگزتیک بودن سازه و نحوه تغییر شکل آن
با بررسی علت یک رفتار خاص در یک ماده می‌توان این علت را تقویت نمود و یا با استفاده از این مکانیزم سازه‌های مشابهی را نیز طراحی نمود. به این منظور در این بخش، به بررسی دلیل آگزتیک بودن سازه و مکانیزم تغییر شکل در این سازه پرداخته می‌شود. شکل ۹ سلول واحد وسط سازه را قبل و بعد از کشش در راستای افقی نشان می‌دهد. باتوجه به این شکل می‌توان گفت دلیل اصلی اتساع جانبی سازه باز شدن لوزی مرکز سلول واحد است. با دقت در شکل ۹ ب که سازه را پس از تغییر شکل نشان می‌دهد لوزی افقی مرکز سلول واحد و همچنین دو لوزی عمودی در دو سمت سلول واحد (که نصف هر کدام در سلول واحد قرار گرفته است) در اثر اعمال کشش به سلول واحد باز شده‌اند. به عبارتی قطر کوچک‌تر این لوزی‌ها به میزان زیادی ازدیاد طول داده است. این ازدیاد طول معادل چرخش بلوک‌های صلب یا همان مربع‌های سلول واحد است. با ازدیاد قطر کوچک لوزی افقی موجود در

مرکز سلول واحد، طول کلی سازه در جهت جانبی افزایش می‌یابد. البته در شرایطی تغییر شکل مربع‌هایی که جایگزین بلوک‌های صلب شده‌اند باعث کاهش ازدیاد طول کلی سازه در جهت جانبی خواهد شد. حتی در مواردی ممکن است به دلیل تغییر شکل زیاد این مربع‌ها این سازه‌ها در جهت جانبی کاهش طول بدهند و یا به عبارتی ضریب پواسون مثبت داشته باشند. در بخش بعد با بررسی اثر زاویه دیواره، محدوده‌ای که در آن ضریب پواسون منفی است بررسی خواهد شد.

نکته حائز اهمیت دیگر در بررسی رفتار این سازه‌ها نحوه توزیع تنش در سازه است. شکل ۹ ج نشان‌دهنده توزیع نایکنواخت تنش در طول و ضخامت هر یک از میله‌های سازه است. به‌وضوح می‌توان در این شکل تغییرات تنش در ضخامت هر یک از دیواره‌ها را دید. همچنین میله‌ها دچار انحنای شده‌اند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در هر دیواره اثر خمش قابل توجه است. در صورتی که مکانیزم غالب تغییر شکل یک سازه میله‌ای کشش و فشار در



شکل ۱۰. الف) نمونه‌ای از سلول واحد و بارگذاری اعمال شده به آن ب) شبکه‌بندی سلول واحد با اندازه المان ۰/۲۵ میلی‌متر

Fig. 10. a) A sample of a unit cell and the applied load on it. b) meshing of the unit cell with an element size of 0.25 mm.

واحد مدنظر باشد باید شرط مرزی متناوب را به یک سلول واحد این سازه اعمال نمود. برای اعمال شرط مرزی متناوب مطابق شکل ۱۰ الف در سطح پایین سازه جابجایی عمودی ثابت شده و جابجایی افقی آزاد است. به همین ترتیب در سطح عمودی سمت چپ جابجایی افقی ثابت شده است و جابجایی عمودی آزاد است. در سمت راست نیز جابجایی عمودی آزاد است و جابجایی افقی باتوجه به کرنش مورد نظر به مقدار مساوی به همه نودها اعمال می‌گردد. در سطح بالای سازه جابجایی افقی آزاد است ولی با استفاده از تعریف قیود، جابجایی همه نودها در جهت عمودی مساوی در نظر گرفته شده است. ضریب پواسون برای مقادیر مختلف زاویه α محاسبه گردید. جدول ۴ ضریب پواسون را برحسب زاویه نشان می‌دهد. باتوجه به این جدول در مقادیر زاویه α بیشتر از ۳۰ درجه، سازه رفتار آگزتیک نخواهد داشت. به عبارتی با بازتر شدن لوزی افقی وسط سازه منفی بودن ضریب پواسون کاهش می‌یابد. باتوجه به مکانیزم ایجادشدن ضریب پواسون منفی یعنی بازشدن لوزی مرکز سلول، که در بخش قبل توضیح داده شد، اگر زاویه α به نحوی باشد که لوزی مورد نظر از ابتدا شکلی نزدیک به مربع داشته باشد این مکانیزم فعال نشده و سازه آگزتیک نخواهد بود. از طرف دیگر هر چه زاویه α کمتر باشد یا به عبارتی لوزی حالت بسته‌تری داشته باشد ضرایب پواسون منفی‌تری به دست خواهد آمد. حساسیت ضریب پواسون به هندسه سازه نشان‌دهنده قابلیت تنظیم‌پذیری بالای این سازه است. به عبارتی با توجه به جدول ۴ طراح می‌تواند ضریب پواسون مطلوب خود را از مقادیر مثبت تا منفی با تغییر زاویه α بدست آورد.

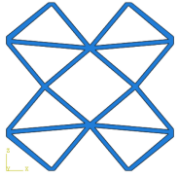

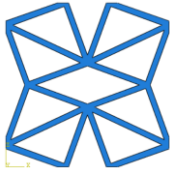

میله‌ها باشد توزیع تنش در هر یک از میله‌ها یکنواخت است. در چنین سازه‌هایی سفتی و استحکام بالاتر بوده و کرنش شکست کمتری نسبت به سازه‌های دیگر مشاهده می‌شود [۲۵ و ۲۶]. در صورتی که علاوه بر کشش و فشار در میله‌ها خمش نیز وجود داشته باشد توزیع کرنش در ضخامت هر میله ثابت نبوده و گرادینان تنش و کرنش در ضخامت مشاهده خواهد شد. در این حالت سازه به‌عنوان یک سازه خمش غالب در نظر گرفته می‌شود. سازه‌های خمش غالب از سفتی و استحکام کمتری برخوردارند ولی کرنش شکست بالاتری از خود نشان می‌دهند. سازه معرفی شده در این مقاله به‌عنوان یک سازه خمش غالب می‌تواند در طراحی سازه‌های آگزتیکی که نیاز به کرنش بالا دارند مورد استفاده قرار گیرد. همچنین سازه‌های خمش غالب قابلیت جذب انرژی بهتری دارند.

۵-۳- تاثیر شکل سلول واحد بر آگزتیک بودن سازه

در این بخش محدوده‌ای از شکل سازه که سازه خاصیت آگزتیک خود را حفظ می‌کند مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به شکل ۳ اگر طول و ارتفاع سازه مساوی در نظر گرفته شوند و همچنین زاویه‌های نشان‌داده شده نیز مساوی باشند رفتار سازه در دو جهت شبیه خواهد بود. بنابراین تنها متغیری که در چنین سازه‌های باعث تغییر ضریب پواسون خواهد شد زاویه α خواهد بود. برای بررسی اثر زاویه α بر ضریب پواسون یک سلول واحد از سازه مطابق شکل ۱۰ الف تحت بار کشش با شرایط مرزی متناوب قرار گرفت. در صورتی که رفتار سازه‌های با تعداد زیاد سلول

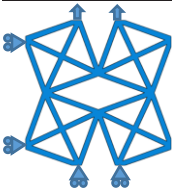
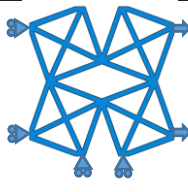
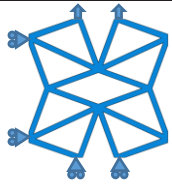
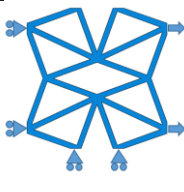
جدول ۴. ضریب پواسون برای مقادیر مختلف زاویه α

Table 4. Poisson's ratios for different values of angle α .

شکل سلول واحد				
مقدار زاویه (درجه)	$\alpha = 40$	$\alpha = 30$	$\alpha = 20$	$\alpha = 10$
ضریب پواسون	+۰/۶۱	-۰/۳۸	-۰/۶۹	-۰/۷۵

جدول ۵. ضرایب پواسون و مدول یانگ سازه‌ها در دو راستای افقی و عمودی

Table 5. Poisson's ratios and Young's moduli of structures in horizontal and vertical directions

شکل سازه و جهت کشش				
مدول یانگ (MPa)	۲۴/۵۱	۲۴/۱۳	۱۹/۱۴	۲۵/۳
ضریب پواسون	-۰/۸۴	-۰/۸۳	-۰/۶۴	-۰/۶۹

رفتاری تقریباً یکسان از خود نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۳-ج انتظار رفتاری کاملاً یکسان از این سازه در دو راستا می‌رفت. اختلاف بسیار اندک رفتار این سازه در دو راستا نیز بدلیل خطاهای محاسباتی می‌باشد. در پایان قابل ذکر است که می‌توان با الهام از سازه‌های آگزتیک صلب چرخنده مشابه دیگر به ساختارهای سلولی آگزتیک جدید دست یافت که در تحقیقات بعدی قابل بررسی است.

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق در ابتدا با الهام از سازه‌های صلب چرخنده سازه‌های مشبک جدید با خاصیت آگزتیک پیشنهاد شد. در ادامه این سازه‌ها با پرینت سه‌بعدی تولید و خواص مکانیکی آن‌ها با استفاده از آزمایش کشش بررسی شد. شبیه‌سازی اجزای محدود رفتار مکانیکی سازه‌ها نیز انجام گرفت و نتایج

۴-۵ بررسی رفتار سازه‌ها در راستاهای مختلف

با توجه به سازه‌های ارائه شده در شکل ۳ می‌توان نتیجه گرفت که سازه ارائه شده در شکل ۳-ب در راستای افقی و عمودی رفتار کمی متفاوتی خواهد داشت چرا که میله‌هایی که در قطر قسمت صلب سازه قرار گرفته‌اند در دو راستا یکسان نیستند، ولی سازه شکل ۳-ج در هر دو راستا رفتاری کاملاً یکسان دارد. با دقت در شکل ۴ ج یکسانی سازه دوم در دو راستا به وضوح مشخص است. رفتار هر دو سازه در دو راستا با استفاده از شبیه‌سازی یک سلول واحد با شرایط مرزی متناوب بررسی گردید. جدول ۵ مدول یانگ و ضرایب پواسون محاسبه شده برای هر یک از سازه‌ها در دو راستای افقی و عمودی را نشان می‌دهد. اگرچه سازه اول در دو راستا رفتار متفاوتی نشان می‌دهد ولی اختلاف مدول یانگ و ضریب پواسون در دو راستا نسبت به سازه‌های ناهمسانگرد آگزتیک [۲۵] بسیار کم است. سازه دوم نیز در دو راستا

زیر به دست آمد:

- and structures, 27(2) (2018) 023001.
- [6] M.N. Ali, J.J. Busfield, I.U. Rehman, Auxetic oesophageal stents: structure and mechanical properties, *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 25(2) (2014) 527-53.
- [7] M.N. Ali, I.U. Rehman, An Auxetic structure configured as oesophageal stent with potential to be used for palliative treatment of oesophageal cancer; development and in vitro mechanical analysis, *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 22(11) (2011) 2573-81.
- [8] G. Burriesci, G. Bergamasco, inventors; Sorin Biomedica Cardio SpA, assignee. Annuloplasty prosthesis with an auxetic structure, United States patent US 8,034,103. (2011)
- [9] K. Kuribayashi, K. Tsuchiya, Z. You, D. Tomus, M. Umemoto, T. Ito, M. Sasaki, Self-deployable origami stent grafts as a biomedical application of Ni-rich TiNi shape memory alloy foil, *Materials Science and Engineering: A*, 419(1-2) (2006) 131-7.
- [10] T.M. Cross, K.W. Hoffer, D.P. Jones, P.B. Kirschner, E. Langvin, J.C. Meschter, inventors; Nike Inc, assignee, Auxetic structures and footwear with soles having auxetic structures, United States patent US 9,402,439. (2016).
- [11] T. Li, F. Liu, L. Wang, Enhancing indentation and impact resistance in auxetic composite materials, *Composites Part B: Engineering*, 198 (2020) 108229.
- [12] Q. Wang, Z. Li, Y. Zhang, S. Cui, Z. Yang, Z. Lu, Ultra-low density architected metamaterial with superior mechanical properties and energy absorption capability, *Composites Part B: Engineering*, 202 (2020) 108379.
- [13] M.L. De Bellis, A. Bacigalupo, Auxetic behavior and acoustic properties of microstructured piezoelectric strain sensors, *Smart Materials and Structures*, 26(8) (2017) 085037.
- [14] J. Ko, S. Bhullar, Y. Cho, P.C. Lee, M.B. Jun, Design and fabrication of auxetic stretchable force sensor for hand rehabilitation, *Smart Materials and Structures*, 24(7) (2015) 075027.
- همخوانی بسیار خوب نتایج تجربی و تئوری بیان گر کارایی شبیه‌سازی برای تحلیل بیشتر این سازه‌ها، طراحی سازه‌های جدید و بهبود خصوصیات آن‌ها است.
- نتایج تجربی و شبیه‌سازی نشان می‌دهند با وجود اینکه این سازه‌ها دارای چگالی نسبی کمتری نسبت به سازه‌های صلب پرخنده هستند دارای خاصیت آگزتیک هستند.
- با افزایش زاویه این سازه‌ها خاصیت آگزتیک کمتر شده و در زاویه‌های بیشتر خاصیت آگزتیک مشاهده نمی‌شود. بنابراین می‌توان با تغییر هندسه این سازه به ضریب پواسون دلخواه دست یافت.
- رفتار سازه‌های بیان شده در این مقاله در دو راستا کاملاً یکسان و یا بسیار نزدیک است.
- با توجه به نحوه توزیع تنش در دیواره‌ها، این سازه‌ها، سازه‌های خمش غالب هستند.
- تأییدیه‌های اخلاقی:** این مقاله تاکنون در نشریه دیگری به چاپ نرسیده است. محتوای نشریه منتج از فعالیت‌های علمی نویسندگان بوده و صحت و اعتبار آن برعهده ایشان می‌باشد.
- تعارض منافع:** مقاله حاضر هیچگونه تعارض منافی با پایان‌نامه و طرح پژوهشی ندارد.
- منابع مالی/حمایت‌ها:** توسط نویسندگان تأمین شده است.

منابع

- [1]- K. Evans, M. Nkansah, I. Hutchinson, S. Rogers, Molecular network design, *Nature*, 353(6340), (1991) 124-124.
- [2] R. Lakes, Foam structures with a negative Poisson's ratio, *Science*, 235(4792) (1987) 1038-40.
- [3] A. Boakye, Y. Chang, R.K. Raji, P. Ma, A review on auxetic textile structures, their mechanism and properties, *Journal of Textile Science & Fashion Technology*, 2(1) (2019) 1-0.
- [4] T.A. Schaedler, W.B. Carter, Architected cellular materials, *Annual Review of Materials Research*, 46 (2016) 187-210.
- [5] X. Ren, R. Das, P. Tran, T.D. Ngo, Y.M. Xie, Auxetic metamaterials and structures: a review, *Smart materials*

- Zied, Elastic constants of 3-, 4-and 6-connected chiral and anti-chiral honeycombs subject to uniaxial in-plane loading, *Composites Science and Technology*, 70(7) (2010) 1042-8.
- [24] C. Hu, J. Dong, J. Luo, Q.H. Qin, G. Sun, 3D printing of chiral carbon fiber reinforced polylactic acid composites with negative Poisson's ratios, *Composites Part B: Engineering*, 201 (2020) 108400.
- [25] R. Jafari Nedoushan, Y. An, WR. Yu, New auxetic materials with stretch-dominant architecture using simple trusses., *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, (2021) 1-7.
- [26] R. Jafari Nedoushan, Y. An, WR. Yu, M.J. Abghary, Novel triangular auxetic honeycombs with enhanced stiffness, *Composite Structures*, 277 (2021) 114605.
- [27] FG. Broeren, V. van der Wijk, JL. Herder, Spatial pseudo-rigid body model for the analysis of a tubular mechanical metamaterial, *Mathematics and Mechanics of Solids*, 25(2) (2020) 305-16.
- [28] J.N. Grima, K.E. Evans Auxetic behavior from rotating squares, *Journal of Materials Science Letters*, 19(17) (2000) 1563–1565.
- [29] J.N. Grima, R. Gatt, B. Ellul, E. Chetcuti, Auxetic behaviour in non-crystalline materials having star or triangular shaped perforations, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 356(37-40) (2010) 1980-7.
- [30] L. Mizzi, A. Spaggiari, Lightweight mechanical metamaterials designed using hierarchical truss elements, *Smart Materials and Structures*, 29(10) (2020) 105036.
- [31] R. Jafari Nedoushan, WR. Yu, A new auxetic structure with enhanced stiffness via stiffened elliptical perforations, *Functional Composites and Structures*, 2(4) (2020) 045006.
- [15] S. Jacobs, C. Coconnier, D. DiMaio, F. Scarpa, M. Toso, J. Martinez, Deployable auxetic shape memory alloy cellular antenna demonstrator: design, manufacturing and modal testing, *Smart Materials and Structures*, 21(7) (2012) 075013.
- [16] A. Alomarah, J. Zhang, D. Ruan, S. Masood, G. Lu, Mechanical properties of the 2D re-entrant honeycomb made via direct metal printing, *InIOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 229(1) (2017) 012038.
- [17] Z. Dong, Y. Li, T. Zhao, W. Wu, D. Xiao, J. Liang, Experimental and numerical studies on the compressive mechanical properties of the metallic auxetic reentrant honeycomb, *Materials & Design*, 182 (2019) 108036.
- [18] MS. Rad, H. Hatami, Z. Ahmad, AK. Yasuri, Analytical solution and finite element approach to the dense re-entrant unit cells of auxetic structures, *Acta Mechanica*, 230(6) (2019) 2171-85.
- [19] M.H. Fu, Y. Chen, L.L.Hu, A novel auxetic honeycomb with enhanced in-plane stiffness and buckling strength, *Composite Structures*, 160 (2017) 574-85.
- [20] J. Huang, Q. Zhang, F. Scarpa, Y. Liu, J. Leng, In-plane elasticity of a novel auxetic honeycomb design, *Composites Part B: Engineering*, 110 (2017) 72-82.
- [21] Z.X. Lu, X. Li, Z.Y. Yang, F. Xie, Novel structure with negative Poisson's ratio and enhanced Young's modulus, *Composite Structures*, 138 (2016) 243-52.
- [22] J. Zhang, G. Lu, Z. You, Large deformation and energy absorption of additively manufactured auxetic materials and structures: A review, *Composites Part B: Engineering*, 201 (2020) 108340.
- [23] A. Alderson, K.L. Alderson, D. Attard, K.E. Evans, R. Gatt, J.N. Grima, W. Miller, N. Ravirala, C.W. Smith, K.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

R. Jafari Nedoushan , M. J. Abghary, Design and analysis of mechanical behavior of a novel lattice auxetic structure based on rigid rotating mechanism, Amirkabir J. Mech Eng., 55(2) (2023) 179-192.

DOI: [10.22060/mej.2023.21749.7506](https://doi.org/10.22060/mej.2023.21749.7506)

