



تحلیل پارامترهای مؤثر در ساختار کامپوزیت آکستیک تقویت شده چندلایه‌ای متعامد به روش المان محدود

محسن صفی خانی نسیم¹، احسان عتمادی^{2*}

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار

* سبزوار، صندوق پستی 9617976487، etemadi@hsu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 29 آبان 1395

پذیرش: 28 اسفند 1395

ارائه در سایت: 03 اردیبهشت 1396

کلید واژگان:

ضریب پواسون منفی

روش المان محدود

کامپوزیت چندلایه‌ای متعامد

ساختار آکستیک

بارگذاری شبه‌استاتیکی

چکیده

در این مقاله، با استفاده از روش المان محدود، رفتار نوع جدیدی از کامپوزیت آکستیک (کامپوزیت با ضریب پواسون منفی) که از الیاف پلی‌استر و لوله‌های ABS به‌عنوان تقویت‌کننده و فوم پلی‌اورتان به‌عنوان ماتریس، تشکیل شده است، مورد بررسی قرار گرفته شده است. همچنین، اثرات ضریب پواسون منفی و رفتار مکانیکی کامپوزیت آکستیک تحت فشار شبه‌استاتیکی بررسی و با نتایج تجربی موجود مقایسه شده است. توافق خوبی بین نتایج وجود دارد. از نمودار تنش برحسب کرنش، نتیجه‌گیری می‌شود که رفتار این نوع کامپوزیت در کرنش‌های بالاتر همانند مواد میراکننده عمل می‌کند؛ و با توجه به خواص خاص کامپوزیت آکستیک، از جمله مقاومت برشی بالا و مقاومت در برابر فرورفتگی و چقرمگی شکست، پتانسیل کاربردی بالا در صنایع مختلف دارد. در این تحقیق پارامترهای مؤثر در رسیدن به ضریب پواسون منفی بیشتر کامپوزیت آکستیک مورد بررسی قرار گرفته شده است. این پارامترها، شامل چگالی فوم، جنس و قطر لوله‌های ABS، فاصله بین لوله‌های ABS می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که کاهش چگالی فوم و کاهش فاصله بین لوله‌های ABS در ابتدا، تا رسیدن به یک مقدار بحرانی سبب افزایش ضریب پواسون منفی شده و سپس کاهش پیدا می‌کند.

Analysis of effective parameters of auxetic composite structure made with multilayer orthogonal reinforcement by finite element method

Mohsen Safikhani Nasim, Ehsan Etemadi*

Department of Mechanical Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

* P.O.B. 9617976487, Sabzevar, Iran, etemadi@hsu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 19 November 2016
Accepted 18 March 2017
Available Online 23 April 2017

Keywords:

Negative Poisson's ratio
Finite element method
Multilayer orthogonal composite
Auxetic structure
Quasi-static loading

ABSTRACT

In this paper, the behavior of a new type of auxetic composite (composite with negative Poisson's ratio) consisting of polyester fibers and ABS tubes as reinforcement as well as polyurethane foam as matrix was investigated by finite element method. Furthermore, the effect of negative Poisson's ratio and mechanical properties of auxetic composite under quasi-static pressure were analyzed and the results were compared with the published experimental works. Good agreements were found between the results. Considering stress-strain diagram, it is concluded that this type of composite can operate as a damping material due to the specific properties such as high shear strength, indentation strength toughness. So, the foresaid properties make them a great choice with high potential application in various industries. Also, the ways to get the effective parameters to achieve more negative Poisson's ratio were investigated. The parameters include the foam density as well as material, diameter and distances between ABS tubes. The results show that with decreasing foam density and decreasing distances between ABS tubes, the negative Poisson's ratio first increases to reach the critical value and then decreases.

1- مقدمه

معرفی شده‌اند [3]. این مواد مطابق "شکل 1" تحت بارگذاری‌های مختلف رفتار متفاوتی از خود نشان می‌دهند به این صورت که وقتی در جهت عرضی کشیده می‌شوند در جهت طولی کرنش مثبت دارند و یا به‌عبارتی دیگر اگر در یک‌جهت بار کششی اعمال کنیم در تمامی جهات گسترش می‌یابد و وقتی در جهت عرضی، تحت فشار باشند در جهت طولی کرنش منفی دارند [4]. مواد آکستیک را می‌توان در طبیعت یافت به‌عنوان مثال عناصر فلزات

ضریب پواسون در اغلب مواد مثبت است اما با در نظر گرفتن ملاحظات ترمودینامیکی و انرژی کرنشی در تئوری الاستیسیته، نسبت پواسون برای مواد جامد همسانگرد همگن¹ می‌تواند بین 0.5 و -1 باشد، بنابراین از لحاظ تئوری و ساختاری مواد با ضریب پواسون منفی وجود دارند [2,1].

دسته جدیدی از مواد با ضریب پواسون منفی² به نام مواد آکستیک

¹ homogeneous solid isotropic material

² negative Poisson's ratio material

Please cite this article using:

M. Safikhani Nasim, E. Etemadi, Analysis of effective parameters of auxetic composite structure made with multilayer orthogonal reinforcement by finite element method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 4, pp. 247-254, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

ویژگی‌های هندسی قطعات، خواص اجزا و تغییر در سختی اجزا و مواد زمینه بهبود یابد [21].

این تحقیق به تحلیل پارامترهای مؤثر در رفتار کامپوزیت آکستیک با ساختار تقویت شده چندلایه‌ای متعامد تحت بارگذاری شبه استاتیکی⁸ با استفاده از روش المان محدود می‌پردازد. ابتدا نتایج با نتایج موجود در کار تجربی [22] مقایسه شده و سپس راه‌های رسیدن به ضریب پواسون منفی بیشتر ارائه شده است. این پارامترها شامل چگالی فوم پلی‌اورتان، قطر و جنس لوله‌های ABS و فاصله بین لوله‌های ABS هست.

2- ساختار آکستیکی برسی شده در تحقیق

ساختار متعامد چندلایه از کار تجربی [22] در "شکل 2" نشان داده شده است، ساختار شامل، دو جزء تقویت کننده الیاف پلی‌استر و لوله‌های ABS⁹ است؛ که تقویت کننده الیاف پلی‌استر¹⁰ در جهت x و تقویت کننده لوله‌های ABS در جهت y است.

شماتیک رفتار مکانیکی این ساختار آکستیک در "شکل 3" نمایش داده شده است. نحوه رفتار ساختار به این صورت است که اعمال و افزایش بار فشاری سبب خم شدن و پیچیده شدن لوله‌های ABS دور الیاف و در نتیجه سبب منقبض شدن کل ساختار در راستای x می‌شود. در نتیجه همین پدیده باعث نسبت پواسون منفی می‌شود.

کامپوزیت با یک فرایند تزریق و فومینگ ساخته می‌شود و در ابعاد $100\text{mm} \times 98\text{mm} \times 28\text{mm}$ برش زده شده است که کامپوزیت نهایی در "شکل 4" مشاهده می‌کند. خواص فوم پلی‌اورتان و الیاف پلی‌استر و لوله‌های ABS مورد استفاده در این کامپوزیت در جدول 1 نشان داده شده است.

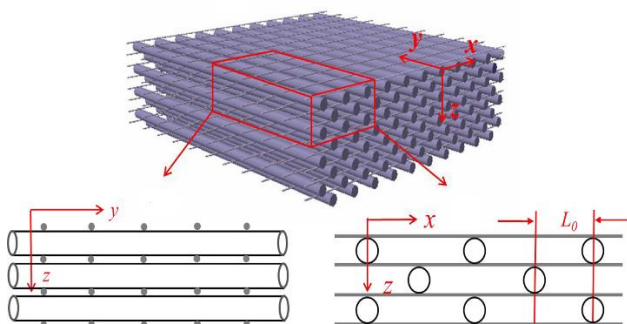


Fig. 2 Three-dimensional view of the Multilayer orthogonal auxetic structure

شکل 2 نمایش سه‌بعدی ساختار آکستیک چندلایه‌ای متعامد

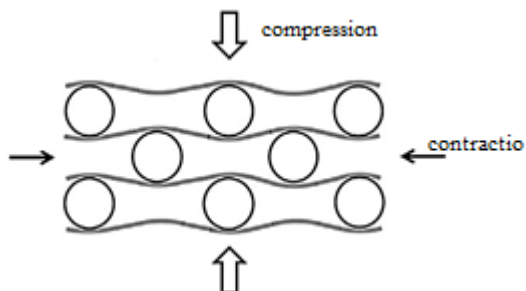


Fig. 3 contraction of auxetic structure in x direction under compression

شکل 3 انقباض در جهت x ساختار آکستیک تحت فشار

⁸ Quasi-static

⁹ Acrylonitrile butadiene styrene

¹⁰ Polyester

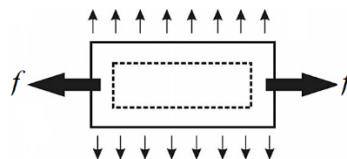


Fig. 1 Material behavior with negative Poisson's ratio under tensile loading

شکل 1 رفتار مواد با ضریب پواسون منفی تحت بارگذاری کششی

مکعب شکل¹ [5]، کریستوبالیت² [6] و بافت‌های بیولوژیکی³ و بافت استخوان [7] دارای ضریب پواسون منفی هستند.

از دیگر ویژگی‌های منحصر به فردی که مواد آکستیک دارند این است که می‌توانند در برابر بارهای وارده خود را متمرکز کنند [4]. که این ویژگی خاص در ترکیب با خاصیت‌های مقاومت برشی [8]، مقاومت در برابر فرورفتگی [9] و جذب انرژی [10] و چقرمگی شکست بهبود یافته است [11]. در دو دهه اخیر، مواد آکستیک با توجه به کاربرد فراوان در صنایع خودروسازی [12]، هوافضا و صنایع دفاعی [13] و سنسورها [14]، موردتوجه قرار گرفته شده‌اند. اولین ساختار با ضریب پواسون منفی در سال 1987 از فوم پلی‌اورتان ساخته شده است [15]. هو و همکاران نوعی از ساختار کامپوزیتی با خاصیت NPR⁴ را که به‌وسیله قرار دادن تصادفی المان‌های مثلثی، درون کامپوزیت بود را پیشنهاد کرده‌اند [16]. چی و همکاران [17] با استفاده از روش المان محدود، مطالعات بر روی سازه ساندویچی با هسته آکستیک لانه‌زنبوری تحت ضربه با سرعت بالا انجام داده و نشان دادند که عملکرد سازه ساندویچی در محدوده 150m/s و 350m/s بهبود یافته است.

یانگ و همکاران [18] به مطالعه نفوذ بر ساختار آکستیکی پرداختند و نتیجه گرفتند که ساختار آکستیک همانند مقاومت بالستیک نفوذ بر ساختار آکستیک را انجام داده‌اند و نتیجه گرفتند که سرعت پرتابه در هنگام برخورد کاهش یافته است و ضریب پواسون منفی سازه علت اصلی افزایش مقاومت در برابر نفوذ این سازه است. جریستیک و همکاران [19] با استفاده از محاسبات مولکولی با استفاده از یک‌لایه زئولیت رفتار آکستیک سازه را برای حفاظت بالستیک بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که حداکثر فشار و شتاب در ساختار آکستیک کاهش می‌یابد.

کامپوزیت‌های آکستیک امروزه کاربردهای فراوانی در زمینه‌های مختلف دارند. الدرسون و همکاران گزارش کرده‌اند که کامپوزیت آکستیکی می‌تواند از دو روش ساخته شود:

1- تولید لایه‌های کامپوزیتی⁵ با استفاده از الیاف غیرآکستیک: در این روش لایه‌های کامپوزیتی می‌توانند طوری طراحی و روی هم قرار بگیرند که اثر NPR ایجاد کنند.

2- با استفاده از تقویت کننده‌های آکستیک⁶: در این روش، الیاف آکستیکی که به‌عنوان تقویت کننده درون کامپوزیت قرار می‌گیرند و این الیاف تحت بار کششی ضخیم‌تر می‌شوند و باعث عدم خروج الیاف از ماتریس⁷ می‌شوند [20].

نسبت پواسون ساختارهای کامپوزیتی می‌توانند به‌وسیله تغییر

¹ cubic elemental metals

² a-cristobalite

³ biological tissues

⁴ negative Poisson's ratio

⁵ composite laminates

⁶ fiber

⁷ matrix

جدول 1 هندسه و خواص مکانیکی اجزاء

Table 1 Geometry and mechanical properties of components

نمونه	مدول یانگ E (GPa)	چگالی (g/cm ³)	ضریب پواسون ν	قطر (mm)
لوله‌های ABS	2.2	1.05	0.394	3
الیاف پلی‌استر	12.77	1.38	0.305	0.2
فوم پلی‌اورتان	0.00278	0.27	0.32	-

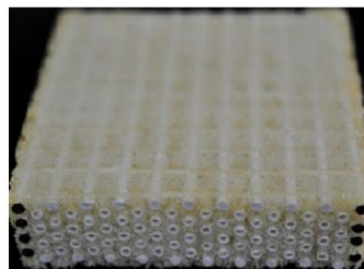


Fig.4 Auxetic composite made with multilayer orthogonal structural [22]

شکل 4 کامپوزیت آکستیک، با ساختار تقویت‌شده چندلایه‌ای متعامد [22]

به‌منظور بررسی خاصیت ضریب پواسون منفی و رفتار مکانیکی کامپوزیت آکستیکی تولید شده، تست فشار شبه استاتیک، بر طبق استاندارد ASTM D1621 به‌وسیله یک ماشین تست انسترون 5900، همان‌طور که در "شکل 5" نشان داده شده است با سرعت 2mm/min انجام شده است و اگر محور z جهت بارگذاری باشد، کرنش طولی ϵ_z و کرنش عرضی ϵ_x اندازه‌گیری و ضریب پواسون نمونه تست شده از رابطه (1) محاسبه می‌شود.

$$\nu_{\text{exp}} = -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_z} \quad (1)$$

3- شبیه‌سازی به روش المان محدود

3-1- شبیه‌سازی فشار شبه استاتیک به روش المان محدود

روش تحلیل اجزای محدود صریح¹ در حل مسائل شبه استاتیکی به‌صورت گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته شده است [23]. نرخ بارگذاری در مسائل شبه استاتیکی واقعی بسیار پایین است. به‌عنوان مثال در آزمایش‌های شبه استاتیک سرعت حرکت فک دستگاه معادل 5mm/min در نظر گرفته می‌شود در صورتی که همین سرعت به سازه اعمال شود برای تغییر شکلی معادل با 300mm زمان تحلیل باید معادل با 3600 ثانیه در نظر گرفته شود که این مقدار بسیار بزرگ و عملاً غیرممکن است. از این‌رو برای انجام یک

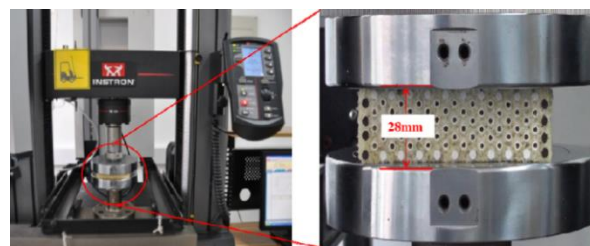


Fig.5 Quasi-static compressive test of auxetic composite [22]

شکل 5 تست فشار شبه استاتیک کامپوزیت آکستیک [22]

¹ Explicit finite element method

تحلیل کم هزینه، صحیح و دقیق باید هم تأثیر اثر جرمی و هم‌زمان تحلیل کاهش داده شود. در این خصوص دو روش وجود دارد که می‌توان آن‌ها را به‌صورت جداگانه یا هم‌زمان برای انجام تحلیلی شبه استاتیکی به کار بست. در ادامه هر یک از این دو روش، جداگانه بیان شده‌اند.

1- مقیاس کردن جرم²: در این روش برای کم کردن تأثیرات اثر جرمی، جرم سازه در یک مقداری ضرب یا بر یک مقداری تقسیم می‌شود. در روش حل صریح، کمترین مقدار زمان هر نمو از رابطه (2) استخراج می‌شود.

$$\Delta t = L^e \sqrt{\frac{\rho}{E}} \quad (2)$$

که در آن L^e مشخصه طول المان‌ها، E مدول الاستیسیته می‌باشد. مطابق رابطه (2) افزایش مجازی چگالی با ضریب f^2 مقدار هر نمو را با ضریب f افزایش می‌دهد و در نتیجه کل زمان به دلیل آن که به نمو‌های کمتری احتیاج دارد کاهش می‌یابد. همان‌طور که مشخص است افزایش چگالی ماده تأثیرات اثر جرمی را افزایش می‌دهد. بنابراین برای این که تحلیل انجام شده به یک تحلیل شبه استاتیکی صحیح نزدیک‌تر باشد، باید مقدار نرخ بار اعمالی تا حد ممکن کاهش پیدا کند.

2- اعمال بار به‌صورت ملایم³: اعمال بار (جابه‌جایی، سرعت، نیرو) به‌صورت ناگهانی باعث ایجاد موج‌های تنش و جابه‌جایی می‌شود که می‌توانند باعث ایجاد نویز⁴ و اشتباه در تحلیل شوند. از این‌رو برای انجام یک تحلیل شبه استاتیکی، بار اعمالی باید تا حد ممکن به‌صورت ملایم به سازه اعمال شود. یک نمونه از اعمال بار به‌صورت ملایم در "شکل 6" نشان داده شده است [24].

همان‌طور که در "شکل 6" مشخص است، سرعت اولیه و شیب نمودار در نقطه صفر که معادل با شتاب اولیه است برابر صفر می‌باشند. این نوع بارگذاری ما را از اعمال بار به‌صورت تدریجی و حذف تأثیرات دینامیکی ناخواسته مطمئن می‌سازد. پس از انجام یک تحلیل شبه استاتیکی می‌توان صحت انجام آن را با دو امتحان ساده بررسی کرد:

1 - اگر تحلیل انجام شده کاملاً شبه استاتیکی باشد سرعت ماده تشکیل دهنده پایین بوده و در نتیجه نیروهای جرمی قابل صرف‌نظر کردن هستند. در این صورت مقدار انرژی داخلی برابر با کار انجام شده خارجی خواهد بود و

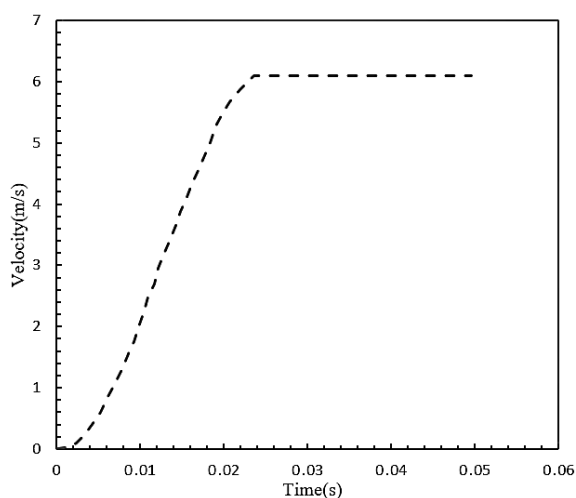


Fig. 6 Load history used in quasi-static simulations

شکل 6 تاریخچه بار اعمالی استفاده‌شده در شبیه‌سازی شبه استاتیک

² Mass scaling

³ Smooth

⁴ noise

همان‌طور که از نمودار مشخص است انرژی جنبشی بسیار ناچیز و نزدیک به صفر می‌باشد که بنا به آنچه گفته شد با مقایسه‌ی بین انرژی جنبشی و انرژی داخلی، تحلیل انجام شده به‌صورت شبه استاتیکی می‌باشد.

2-3- شبیه‌سازی عددی کامپوزیت آکستیک چندلایه‌ای متعامد

برای شبیه‌سازی کامپوزیت موردنظر تحت فشار شبه استاتیک، از نرم‌افزار تجاری آباکوس استفاده شده است و برای المان‌بندی نمونه با توجه به محدودیت‌های نرم‌افزار آباکوس و پیچیده بودن ساختار نمونه، از نرم‌افزار هایپرمش⁷ برای المان‌بندی استفاده شده است. "شکل‌های 8 و 9" به ترتیب مراحل مختلف شبیه‌سازی، نشان داده شده است.

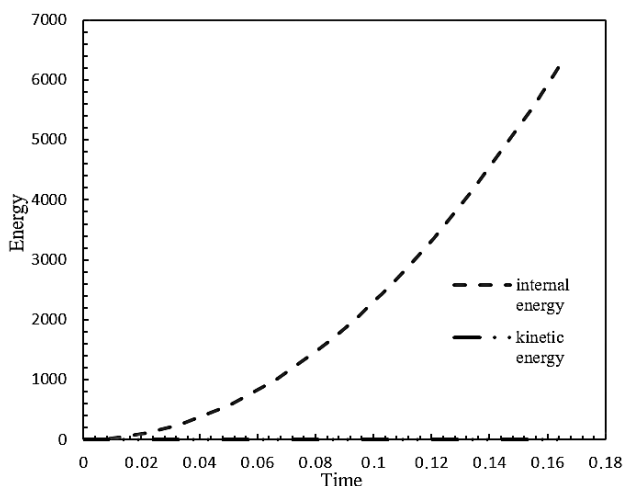


Fig. 7 Comparison between internal energy and kinetic energy

شکل 7 مقایسه انرژی داخلی و انرژی جنبشی

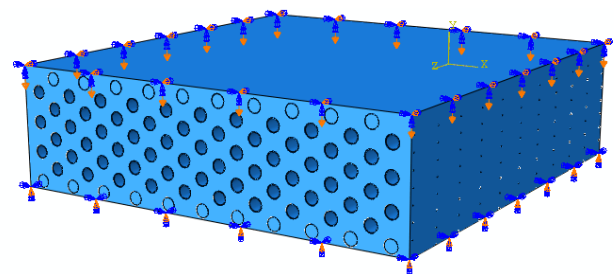


Fig.8 Auxetic composite with multilayer orthogonal structural as well as boundary conditions

شکل 8 کامپوزیت آکستیک، با ساختار تقویت شده چندلایه‌ای متعامد مورد بررسی این تحقیق همراه شرایط مرزی

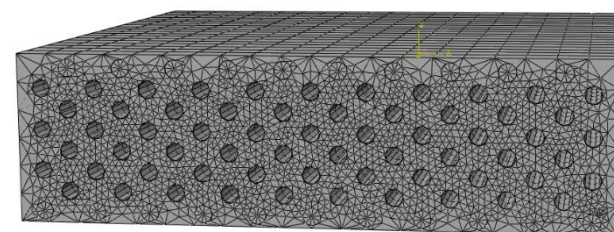


Fig. 9 sweep mesh with tetrahedral elements

شکل 9 شبکه‌بندی سوپ با عنصرهای چهارضلعی

انرژی جنبشی بسیار ناچیز و نزدیک به صفر در مقایسه با انرژی داخلی خواهد بود.

2 - نمودار نیرو به جابه‌جایی در سرعت‌های مختلف تغییر چندانی نخواهد کرد.

محققان مختلفی از روش حل صریح برای شبیه‌سازی رفتار شبه استاتیکی استفاده کرده‌اند. مگولد و همکاران [25] از ال‌اس‌دینا¹ برای شبیه‌سازی شبه استاتیکی قوطی‌هایی که از فوم پر شده بودند استفاده کردند. آن‌ها از ضریب 10 برای افزایش جرم ماده تشکیل‌دهنده و در نتیجه کاهش زمان تحلیل استفاده کردند. آن‌ها برای تأیید کار خود نشان دادند که انرژی جنبشی در مقابل انرژی داخلی بسیار کوچک‌تر بوده و همچنین نمودار نیرو جابه‌جایی با تغییر ضریب مقیاس جرم تغییری نمی‌کند. سنتاس و همکاران [26] از نرم‌افزار پمکراش² برای شبیه‌سازی شبه استاتیکی مقاطع پر شده از فوم استفاده کردند. آن‌ها جرم ماده را با ضریب 1000 کاهش دادند و در مقابل سرعت بارگذاری را تا حد 2m/s افزایش دادند. اکتی و همکاران [27] نیز از پمکراش برای مدل‌سازی شبه استاتیکی مقاطع مشابهی استفاده کردند. آن‌ها نیز جرم را در مقدار 0.001 ضرب کردند و در مقابل سرعت را تا مقدار 2m/s افزایش دادند. آن‌ها همچنین در کار خود سرعت را از مقدار صفر تا مقدار 2m/s در نمونه‌های اولیه به‌صورت افزایشده و سپس به‌صورت ثابت در نظر گرفتند تا شرایط اعمال بار به‌صورت ملایم را تأمین کنند. آن‌ها نشان دادند که انرژی داخلی در مقایسه با انرژی جنبشی مقدار بسیار کمی دارد و همچنین نمودار نیرو - جابه‌جایی مستقل از سرعت اعمالی است.

ریز و همکارانش [28] با استفاده از ال‌اس‌دینا³ تحلیل شبه استاتیکی روی مقاطع آلومینیومی تحت بارگذاری مایل انجام دادند. آن‌ها معادله (3) را برای سرعت اعمالی در نظر گرفتند تا شرایط بارگذاری ملایم را تأمین کنند.

$$v(t) = \frac{\pi}{\pi - 2} \cdot \frac{d_{\max}}{T} \left[1 - \cos\left(\frac{\pi}{2T} \cdot t\right) \right] \quad (3)$$

که در آن T کل زمان بارگذاری و $d_{\max}$ جابه‌جایی نهایی است. این رابطه هنگامی که از 0 تا T انتگرال‌گیری شود مقدار آن برابر با $d_{\max}$ خواهد بود و هنگامی که در زمان صفر از آن مشتق‌گیری شود مقدار آن برابر صفر خواهد بود که معادل با شتاب اولیه است. تریگوپایلا و همکاران [18] از ال‌اس‌دینا برای شبیه‌سازی شبه استاتیکی مقاطع جدار نازک از فولاد پر مقاومت استفاده کردند. در کار آن‌ها سرعت در 25 میلی‌ثانیه اول به مقدار مشخصی می‌رسد و سپس در همین مقدار ثابت می‌ماند تا شرایط اعمال بار به‌صورت ملایم تأمین شود. ناگل و همکاران [29] از آباکوس اکس‌پلیسیت⁴ برای شبیه‌سازی شبه استاتیکی جاذب انرژی جدار نازک مخروطی و هرمی تحت بارگذاری مایل استفاده کردند. آن‌ها برای اعمال بار به‌صورت ملایم از ابزار امپتود⁵ و در این ابزار از امکان اسمود استپ⁶ استفاده کردند [30].

در این مقاله برای شبیه‌سازی فشار شبه استاتیک از روش اعمال بار به‌صورت ملایم (روش دوم)، استفاده شده است به این صورت که سرعت حرکت لایه مرزی بالایی کامپوزیت 2mm/min است. با توجه به توضیحات بیان شده برای کسب اطمینان از انجام شبیه‌سازی به‌صورت شبه استاتیکی، انرژی داخلی و انرژی جنبشی مقایسه می‌شوند. "شکل 7" مقایسه این دو نمودار را نشان می‌دهد.

¹ LSDYNA

² PAMCRASH

³ LSDYNA

⁴ ABAQUS/Explicit

⁵ AMPLITUDE

⁶ SMOOTH STEP

⁷ HyperMesh

جدول 2 مقایسه ضریب پواسون به دست آمده از شبیه‌سازی المان محدود و مرجع [22]
Table 2 Comparison Poisson's ratio between the finite element method and ref [22].

درصد فشردگی	ضریب پواسون المان محدود	ضریب پواسون مرجع [22]	درصد خطا
5.00	0.000	0.000	0.0%
10.00	0.000	0.000	0.0%
15.00	0.000	0.000	0.0%
16.12	-0.017	0.016	5.5%
17.50	-0.033	-0.031	6.4%
20.90	-0.043	-0.040	5.0%
25.41	-0.050	-0.053	5.6%
27.50	-0.057	-0.060	5.0%
33.75	-0.077	-0.073	5.4%
35.00	-0.083	-0.078	6.4%
43.30	-0.101	-0.096	5.2%
45.00	-0.105	-0.098	6.4%
48.30	-0.110	-0.104	5.0%
49.79	-0.104	-0.100	4.0%
51.26	-0.101	-0.096	4.4%
52.92	-0.090	-0.093	3.2%

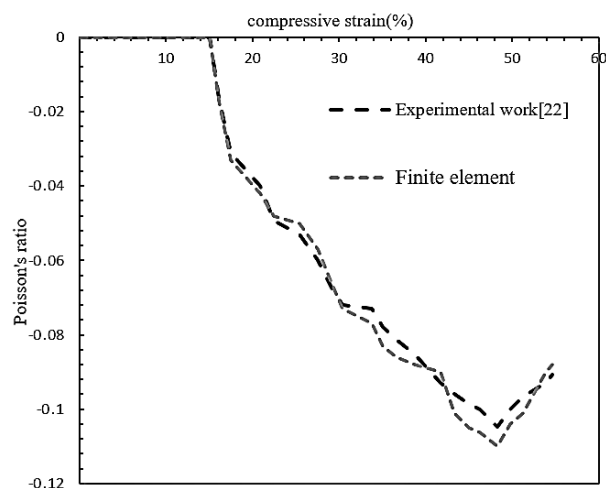


Fig. 11 Poisson's ratio- strain diagram for FEM and experimental works

شکل 11 نمودار ضریب پواسون برحسب کرنش برای روش المان محدود و کار تجربی لازم به ذکر است این تفاوت در ضخامت به وسیله انبساط فوم پلی‌اورتان در طول فرایند تزریق فوم به وجود می‌آید. همان‌طور که در "شکل 3" نشان داده شده است در یک ساختار آکستیک چندلایه‌ای متعامد، الیاف پلی‌استر که در جهت x قرار گرفته‌اند، ارتباط تنگاتنگی با لوله‌های ABS در جهت y دارند و هیچ فاصله‌ای بین نقاط اتصال وجود ندارد. باین‌حال، با توجه به انبساط فوم پلی‌اورتان در طول فرایند تزریق فوم این تفاوت چهار میلی‌متری ایجاد می‌شود.

زمانی که کرنش فشاری به بیش از 15% برسد، ضریب پواسون کامپوزیت منفی می‌شود. در "شکل 10" مشاهده می‌کنیم که مقدار NPR از 15% تا 50% تقریباً خطی افزایش می‌یابد و در کرنش فشاری 50% به ماکزیمم مقدار خود یعنی 0.105 می‌رسد. با افزایش کرنش بیش از 50% مقدار NPR شروع به کاهش می‌کند. در این مرحله از فشار فوم کاملاً فشرده شده می‌شود و در همین حال، سطح مقطع لوله‌های ABS توخالی از حالت دایره‌ای شروع به تغییر شکل به حالت بیضی شکل می‌کند؛ بنابراین فشار اضافی باعث افزایش اندازه‌ی عرضی و در نتیجه کاهش اثر NPR کامپوزیت می‌شود.

مطابق "شکل‌های 9 و 8" از مدل ماده الاستیک، برای فوم پلی‌اورتان و لوله‌های ABS و الیاف پلی‌استر استفاده شده است و از تعداد 156788 المان سوپ با عنصرهای چهارضلعی برای المان‌بندی کل کامپوزیت استفاده شده است و شرایط مرزی این‌گونه است که سطح پائینی کامپوزیت به صورت کامل مقید شده و سطح بالایی کامپوزیت مطابق کار تجربی با سرعت 2mm/min به سمت پایین جابه‌جا می‌شود.

برای رسیدن به یک المان‌بندی بهینه، باید از تأثیر حساسیت المان‌بندی¹ بر روی نتایج مطالعه اطمینان کسب کرد، در نتیجه لازم است، نوع، شکل و اندازه‌ای که برای المان‌بندی انتخاب می‌شود، بررسی گردد بدین منظور مطابق "شکل 10" ابتدا المان به طول 10mm برای سازه انتخاب شده و این المان تا طول 0.5mm کاهش پیدا می‌کند و همان‌طور که در شکل مشخص است از المانی به طول 3mm تغییر محسوسی در مقدار جابه‌جایی مشاهده نمی‌شود. در نتیجه المانی به طول 3mm برای شبیه‌سازی سازه انتخاب می‌گردد.

4- بررسی نتایج و بحث

کامپوزیت‌های آکستیک تحت فشار دچار فشردگی جانبی می‌شود. به این معنی که اثر NPR با کامپوزیت‌های آکستیک به دست می‌آید. رفتار تغییر شکل آن‌ها به دلیل تفاوت در نحوه چیدمان تقویت‌کننده‌ها در ساختار متعامد کاملاً متفاوت است. مقدار ضریب پواسون برای کامپوزیت‌های آکستیک به عنوان تابعی از کرنش فشاری برطبق رابطه‌ی (1) محاسبه شده است و در "شکل 11" رفتار NPR این کامپوزیت تحت فشار شبه استاتیک حاصل از کار تجربی و شبیه‌سازی انجام شده مقایسه شده است.

در "شکل 11" مشهود است که مقدار NPR با مقدار کرنش فشاری تغییر می‌کند و در این کامپوزیت کرنش‌های 0% تا 15%، ضریب پواسون کامپوزیت صفر است. علت این پدیده این است که ضخامت کامپوزیت تولیدشده 28mm است در حالی که ضخامت ساختار تقویت‌کننده متشکل از هشت لایه لوله ABS و هشت لایه الیاف پلی‌استر 24mm هست؛ و این تفاوت چهار میلی‌متری باعث به وجود آمدن ضریب پواسون صفر، تا 15% از کرنش فشاری شده است.

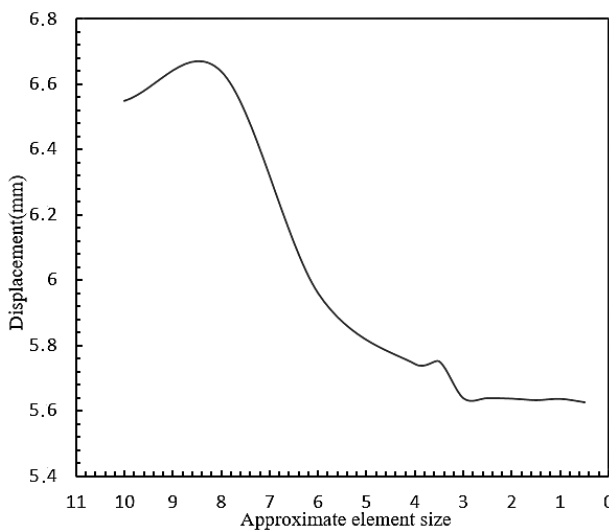


Fig. 10 optimum value for the mesh size

شکل 10 مقدار بهینه برای اندازه المان‌بندی

¹ Mesh sensitivity

می‌شود که الیاف پلی‌استر ولوله‌های ABS تحت فشار فوم را پاره کرده و در نتیجه خاصیت ضریب پواسون منفی کامپوزیت کاهش می‌یابد. در قسمت دوم این نمودار مشاهده می‌شود که چگالی 0.17g/cm^3 بیشترین خاصیت ضریب پواسون منفی را ایجاد می‌کند و دیگر مشکلات قسمت اول را ندارد و در قسمت سوم نمودار مشاهده می‌شود با افزایش چگالی فوم بیشتر 0.17g/cm^3 خاصیت ضریب پواسون منفی کامپوزیت کاهش پیدا می‌کند پس نتیجه می‌شود که چگالی 0.17g/cm^3 برای فوم پلی‌اورتان بیشترین خاصیت ضریب پواسون منفی یعنی مقدار -0.125 را برای این نوع کامپوزیت ایجاد می‌کند.

با توجه به "شکل 14"، اندازه قطر لوله‌ها از 0.5mm تا 6mm تغییر داده شده و نمودار تغییرات ضریب پواسون با توجه به اندازه قطر لوله‌های ABS، برای کرنش 50% که بیشترین ضریب پواسون منفی کامپوزیت را دارد، رسم شده است. برای قطر 0.5mm تا 3.5mm منحنی ضریب پواسون منفی افزایش و به بیشترین مقدار خود یعنی -0.119 برای قطر 3.5mm می‌رسد. علت کاهش ضریب پواسون منفی برای قطرهای بزرگ‌تر از 3.5mm آن است که با افزایش قطر، سطح مقطع لوله‌های ABS توخالی از حالت دایره‌ای شروع به تغییر شکل به حالت بیضی‌شکل می‌کند که این تغییر سطح مقطع باعث افزایش اندازه‌ی عرضی و در نتیجه کاهش اثر NPR کامپوزیت می‌شود.

در "شکل 15" نمودار تغییرات ضریب پواسون برحسب تغییر جنس لوله‌ها به پلی‌وینیل کلراید (PVC)¹، پلی‌وینیل کلراید کلره (CPVC)²، پلی‌پروپیلن (PP)³ و پلی‌اتیلن (PE)⁴ را در نرخ کرنش 50% نشان داده شده است آنچه از "شکل 15" نتیجه‌گیری می‌شود آنست که لوله‌های ABS با توجه به سفتی بالا و چسبندگی بیشتر با فوم پلی‌اورتان [22] مناسب‌تر از لوله‌های PVC و CPVC می‌باشند. لوله‌هایی از جنس PP و PE با توجه به کم بودن سفتی آن‌ها برای این کامپوزیت مناسب نمی‌باشند؛ زیرا هنگامی که تحت بارگذاری عرضی قرار گیرند، تغییر شکل در جهت عمود بر نیرو (تغییر شکل عرضی) بیشتر از راستای نیرو (تغییر شکل طولی) می‌باشد و سبب می‌شود لوله از حالت دایروی به حالت بیضی شکل تغییر شکل پیدا کند. بنابراین باعث افزایش کرنش عرضی و در نتیجه کاهش اثر NPR کامپوزیت می‌شود.

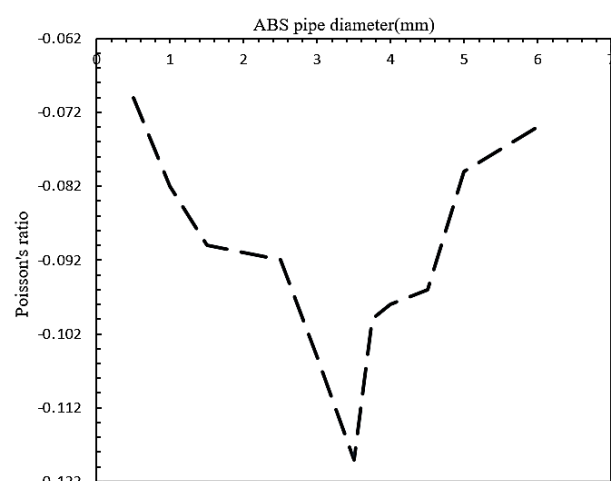


Fig. 14 Variations of Poisson's ratio auxetics composite according to ABS-diameter pipes

شکل 14 تغییرات ضریب پواسون کامپوزیت آکستیک با توجه به قطر لوله‌های ABS

با بررسی نمودار تنش-کرنش کامپوزیت آکستیک همان‌طور که در "شکل 12" مشاهده می‌شود به این نتیجه می‌رسیم که منحنی فشرده‌سازی کامپوزیت آکستیک تقریباً به سه مرحله تقسیم شده است. در مرحله اول فشرده‌سازی در کرنش بین 0% تا 15%، تنش به صورت خطی افزایش پیدا می‌کند. در دومین مرحله از 15% تا 35% از فشرده‌سازی شیب افزایش تنش فشاری بسیار کند است؛ و در مرحله سوم، برای فشرده‌سازی بیش از 35% از فشرده‌سازی، با توجه به افزایش چگالی فوم، تنش فشاری به سرعت در حال افزایش است؛ که این نوع رفتار کامپوزیت آکستیک بیشتر شبیه به مواد میراکننده و جاذب انرژی است.

پس از مقایسه نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی موجود، به بررسی پارامترهای مؤثر در هرچه بیشتر شدن ضریب پواسون منفی پرداخته می‌شود. این پارامترها شامل تغییر چگالی فوم پلی‌اورتان و تغییر قطر لوله‌های ABS می‌باشد. ابتدا چگالی فوم پلی‌اورتان از 0.1g/cm^3 تا 0.43g/cm^3 تغییر داده شده و نتایج شبیه‌سازی را برای کرنش 50% که بیشترین ضریب پواسون منفی کامپوزیت را دارد، بررسی می‌شود با توجه به "شکل 13" مشاهده می‌شود که با کاهش چگالی فوم به 0.11g/cm^3 فوم بسیار نرم می‌شود و باعث

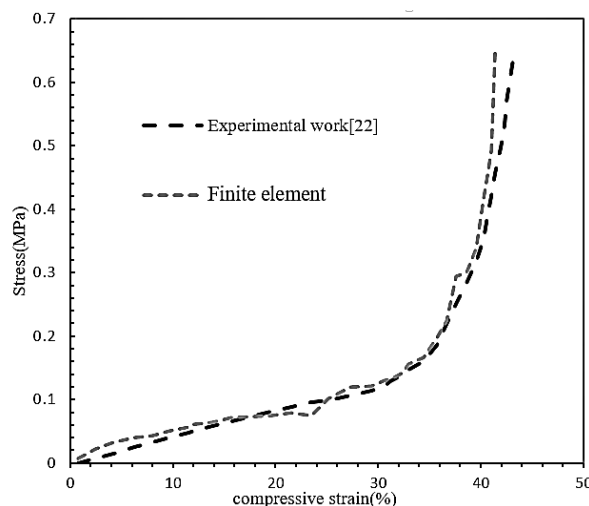


Fig. 12 Comparison of stress strain diagrams for experimental work and finite element method

شکل 12 مقایسه نمودار تنش کرنش برای دو روش تجربی و شبیه‌سازی المان محدود

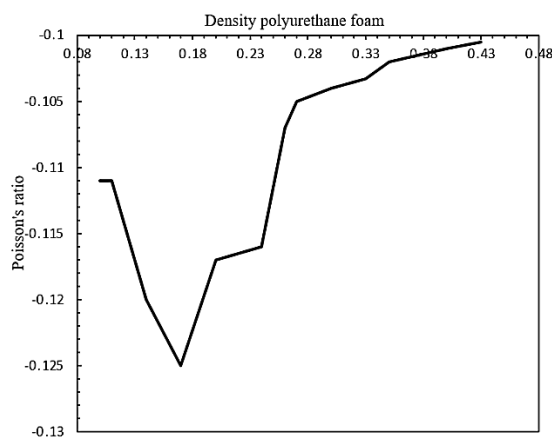


Fig. 13 Poisson's ratio-polyurethane density diagram

شکل 13 نمودار ضریب پواسون برحسب چگالی فوم پلی‌اورتان

¹ polyvinyl chloride
² post chlorinated polyvinyl chloride
³ polypropylene
⁴ polyethylene

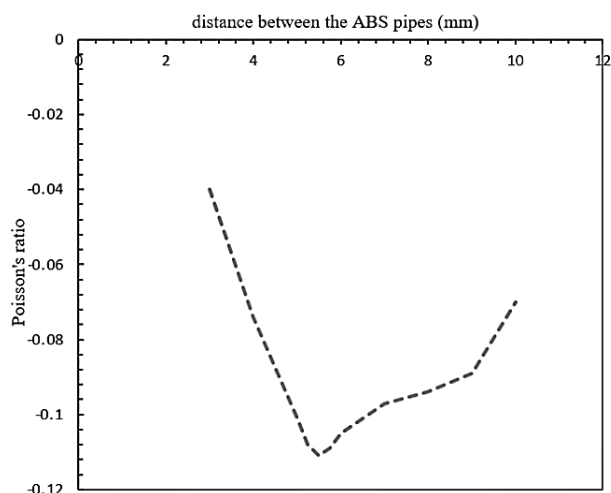


Fig. 16 Variations of Poisson's ratio in terms of the distances between the ABS pipes

شکل 16 نمودار تغییرات ضریب پواسون برحسب فاصله بین لوله‌های ABS

در نتیجه کاهش اثر NPR کامپوزیت می‌شود.

5- با بررسی نتایج شبیه‌سازی حاصل از تغییرات جنس لوله‌های به کار رفته در کامپوزیت آکستیک این نتیجه حاصل می‌شود که تنها، لوله‌های ABS مناسب کامپوزیت آکستیک است.

6- با افزایش فاصله بین لوله‌های ABS، ضریب پواسون منفی افزایش پیدا کرده و در قطر 5.5mm به مقدار ماکزیمم -0.111 رسیده و سپس کاهش پیدا می‌کند.

6- فهرست علائم

d	جابه‌جایی
E	مدول الاستیسیته
T	زمان

علائم یونانی

ν	نسبت پواسون
ρ	چگالی (g/cm^3)
ϵ	کرنش

7- مراجع

- [1] M. Bianchi, F. L. Scarpa, C. W. Smith, Stiffness and energy dissipation in polyurethane auxetic foams, *Journal of Materials Science*, Vol. 43, No. 17, pp. 5851-5860, 2008.
- [2] M. Bianchi, F. Scarpa, C. W. Smith, Shape memory behaviour in auxetic foams: Mechanical properties, *Acta Materialia*, Vol. 58, No. 3, pp. 858-865, 2010.
- [3] J. B. Choi, R. Lakes, Design of a fastener based on negative Poisson's ratio foam, *Cell polymer*, Vol. 10, No. 3, pp. 205-212, 1991.
- [4] E. V. KE, Auxetic materials: Functional materials and structures from lateral thinking, *Advanced Materials*, Vol. 15, pp. 617-626, 2000.
- [5] K. E. Evans, A. Alderson, Auxetic materials: Functional materials and structures from lateral thinking, *Advance materials*, Vol. 43, pp. 617-625, 2000.
- [6] N. Raviral, A. Alderson, K. L. Alderson, Hierarchical fibers with a negative poisson's ratio for tougher composites, *Journal of Materials Science*, Vol.42, pp. 7433-7440, 2007.
- [7] K. L. Alderson, The strain dependent indentation resilience of auxetic microporous polyethylene, *Journal of Materials Science*, Vol.56, pp.4039-4047, 2002.
- [8] J. B. Choi, R. Lakes, Nonlinear properties of polymer cellular

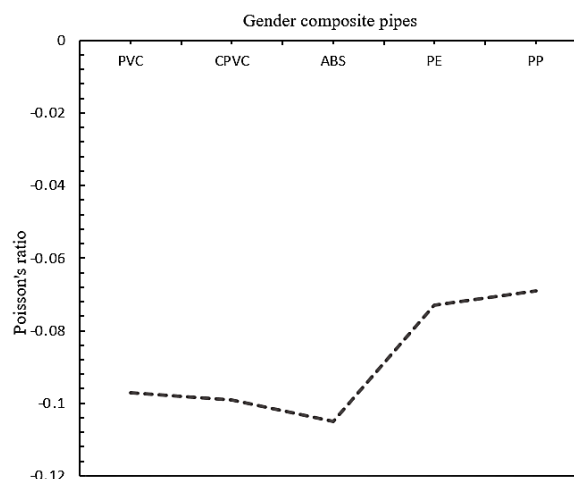


Fig. 15 Variations of Poisson's ratio according to kinds of ABS tubes.

شکل 15 نمودار ضریب پواسون برحسب جنس لوله‌های ABS

به‌منظور به‌دست آوردن مقدار بهینه فاصله بین لوله‌های ABS، فاصله بین آن‌ها را از مقدار 3mm تا 10mm جابه‌جا کرده و مطابق "شکل 16" نمودار نسبت پواسون برحسب فاصله بین لوله‌ها رسم شده است و با کاهش فاصله بین لوله‌های ABS، اثر ضریب پواسون منفی افزایش می‌یابد و به بیشترین مقدار خود یعنی -0.111 برای فاصله 5.5mm می‌رسد و بعد از این فاصله مقدار ضریب پواسون منفی کاهش پیدا می‌کند در نتیجه با کاهش فاصله بین لوله‌ها، ضریب پواسون منفی، افزایش یافته و به یک مقدار بیشینه رسیده و سپس کاهش پیدا می‌کند.

5- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، کامپوزیت با ساختار آکستیک متعامد چندلایه به‌عنوان تقویت‌کننده و فوم پلی‌اورتان به‌عنوان ماتریس تحت فشار شبه استاتیک، به روش المان محدود شبیه‌سازی شده و نتایج آن با نتایج تجربی موجود مقایسه گردید. همچنین به‌منظور تحلیل ساختار کامپوزیت آکستیک و رسیدن به ضریب پواسون منفی بیشتر، پارامترهای مختلفی مورد بررسی قرار گرفت. به‌طور خلاصه، نتایج زیر به دست آمد:

- 1- اثر ضریب پواسون منفی در یک کامپوزیت می‌تواند به‌وسیله چیدمان مناسب تقویت‌کننده در یک ساختار متعامد چندلایه به دست آید. در نتیجه یک ساختار آکستیک را می‌توان با استفاده از مواد متداول فراهم نمود.
- 2- رفتار کامپوزیت آکستیک، تحت بارگذاری شبه‌استاتیک شبیه به رفتار مواد میراکننده و جاذب انرژی است. این امر، اهمیت استفاده از این کامپوزیت‌ها را در صنایع مختلف، مشخص می‌نماید.
- 3- با کاهش چگالی فوم، ابتدا ضریب پواسون منفی افزایش پیدا کرده و به مقدار بیشینه -0.125 در چگالی 0.17g/cm^3 رسیده و سپس کاهش پیدا می‌کند. کاهش چگالی فوم و در نتیجه نرم شدن آن، باعث پاره شدن توسط پلی‌استر و لوله‌های ABS تحت فشار شده و در نتیجه خاصیت ضریب پواسون منفی کامپوزیت کاهش می‌یابد.

- 4- با افزایش قطر لوله‌های ABS، ضریب پواسون منفی ابتدا افزایش پیدا کرده و در قطر 3.5mm به مقدار بیشینه -0.119 رسیده و سپس کاهش پیدا می‌کند. کاهش ضریب پواسون منفی برای قطرهای بزرگ‌تر از 3.5mm ناشی از تغییر شکل مقاطع لوله‌های ABS توخالی از حالت دایره‌ای به حالت بیضی‌شکل می‌باشد که این تغییر سطح مقطع باعث افزایش اندازه‌ی عرضی و

- auxetic fibre reinforced composites, *physica status solidi*, Vol.46, pp. 509-518, 2005.
- [21] H. XN, S. Silberschmid, Numerical analysis of composite structure with in-plane isotropic negative Poisson's ratio, *Effects of materials properties and geometry features of inclusions*, *Composites Part B*, Vol.74, pp. 152-159, 2014.
- [22] L. Jiang, B. Gu, H. Hu, Auxetic composite made with multilayer orthogonal structural reinforcement, *Composite Structures*, Vol. 135, pp. 23-29, 2016.
- [23] ABAQUS/CAE User's Manual, Version 6.9; <http://www.abaqusdoc.ucalgary.ca/v6.9>.
- [24] V. Tarigopula, M. Lanseth, O. S. Hopperstad, A. H. Clausen, Axial crushing of thin-walled high-strength steel sections, *international journal Impact Engineering*, Vol.58, pp. 847-882, 2006.
- [25] S. A. Meguid, J. C. Stranart, J. Heyerman, On the layered micromechanical three-dimensional finite element modeling of foam-filled columns, *Int. J. Finite Elements in Analysis and Design*, Vol.35, pp. 1035-1057, 2004.
- [26] S. P. Santosa, T. Wierzbicki, A. G. Hanssen, M. Langseth, Experimental and numerical studies of foam-filled sections, *international journal Impact Engineering*, Vol.44, pp. 509-534, 2004.
- [27] L. Aktay, A. K. Toksoy, M. Guden, Quasi-static axial crushing of extruded polystyrene foam-filled thin-walled aluminum tubes: Experimental and numerical analysis, *international journal Materials and Design*, Vol.49, pp. 556-565, 2006.
- [28] A. Reyes, M. Langseth, O. S. Hopperstad, Crashworthiness of aluminum extrusions subjected to oblique loading: Experiments and numerical analyses, *international journal Mechanical Sciences*, Vol.52, pp. 1965-1984, 2002.
- [29] G. M. Nagel, D. P. Thambiratnam, Dynamic simulation and energy absorption of tapered thin-walled tubes under oblique impact loading, *Hit. journal Impact Engineering*, Vol.28, pp. 1595-1620, 2006.
- [30] A. Khalkhalil, *Abaqus finite element analysis to help*, pp. 383-385, Tehran, Art Institute Dibagaran Tehran, 2013. (in Persian فارسی)
- materials with anegative Poisson's ratio, *Journal of Materials Science*, Vol.42, pp. 4678-4684, 2000.
- [9] P. Ickles AP, Auxetic polyethylene: The effect of a negative Poisson's ratio on hardness, *Acta Metall Mater*, Vol.76, pp. 2261-2266, 1994.
- [10] K. E. Evans, The strain dependent indentation resilience of auxetic microporous polyethylene, *Journal of Materials Science*, Vol. 11, No. 7, pp. 4039-4047, 2000.
- [11] C. hoi JB, L. RS, Fracture toughness of re-entrant foam materials with a negative Poisson's ratio: Experiment and analysis, *International Journal of Fracture*, Vol.62, pp. 73-83, 1996.
- [12] M. ZD, H. Bian, H. GM, Functionally-graded NPR(Negative Poisson's Ratio) material for a blast-protective deflector, *Michigan University Ann Arbor*, Vol.57, pp. 1-12, 2000.
- [13] L. Qu, Materials with negative Poisson's ratios and potential applications to aerospace and defense, *Defense Science and Technology Organization*, Vol.84, pp. 31-37, 2006.
- [14] W. Miller, S. CW, F. Scarpa, K. Evans, Chiral honeycombs for structural applications, *European Conference on Composite Materials 13*, Stockholm, Sweden, June 2-5, 2008.
- [15] L. RS, Foam structures with a negative Poisson's ratio, *Journal of Mechanical Engineering*, Vol.72, pp. 1038-1040, 1987.
- [16] H. XN, V. A. Silberschmidt, A composite material with Poisson's ratio tunable from positive to negative values: An experimental and numerical study, *Journal of Materials Science*, Vol.93, pp. 8493-500, 2013.
- [17] Q. i C, S. Yang, D. Wang, Ballistic resistance of honeycomb sandwich panels under in-plane high-velocity impact, *The Scientific World Journal*, Vol.49, pp. 178-188, 2013.
- [18] Y. Soa, Q. Wang, A comparative study of ballistic resistance of sandwich panels with aluminum foam and auxetic honeycomb cores, *Advances in Mechanical Engineering*, Vol.67, pp. 673-682, 2013.
- [19] G. M, Y. R, S. Nipes, A zeolite absorbent/nano-fluidics protection-based blast-and ballistic-impact-mitigation system. *Journal of Materials Science*, Vol.41, pp. 1-19, 2014.
- [20] A. KL, S. VR, C. VL, D. PJ, A. Alderson, E. KE, How to make