



## بررسی جذب انرژی ساختارهای آگزتیک الاستومری در بارگذاری‌های شبه‌استاتیک و ضربه‌ای

مجید پرورش<sup>1</sup>، حامد احمدی<sup>2\*</sup>، غلامحسین لیاقت<sup>3</sup>

1-دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

\* تهران، صندوق پستی 14115-111، h\_ahmadi@modares.ac.ir

### چکیده

در این مقاله به دسته جدیدی از ساختارهای مشبک تحت عنوان ساختارهای آگزتیک پرداخته شده است که به دلیل وزن پایین، سفتی و مقاومت برشی بالا کاربردهای مختلفی در انواع سازه‌ها از جمله سازه‌های جذب انرژی دارند. ویژگی‌های منحصر به فرد این ساختارهای مشبک را می‌توان به هندسه خاص و منفی بودن ضریب پواسون آنها مرتبط دانست. در این مطالعه، به بررسی تجربی رفتار سه سازه آگزتیک الاستومری از جنس تی‌پی‌یو با هندسه‌های آنتی تتراکایرال، آرهد (سرنیزه‌ای)، ری‌اینترنت در بارگذاری شبه استاتیک و ضربه‌ای و مقایسه آنها با یک سازه غیرآگزتیک لانه‌زنبوری پرداخته شده است. نمونه‌ها با استفاده از روش ساخت افزایشی (پرینت سه بعدی) تهیه شده و پارامترهایی مانند میزان جذب انرژی و میزان جذب انرژی بر واحد طول فشردگی برای ارزیابی این ساختارها مورد استفاده قرار گرفته است. بارگذاری ضربه‌ای در دو سطح انجام شده تا قابلیت جذب انرژی و مکانیزم‌های تغییرشکل هر سازه در سطوح مختلف انرژی بررسی شود. نتایج حاکی از آن است که ساختارهای آگزتیک در بارگذاری شبه استاتیک به مراتب جذب انرژی بیشتری داشته و در بارگذاری ضربه‌ای قابلیت جذب انرژی بر واحد طول فشردگی بیشتری نسبت به سازه غیرآگزتیک لانه زنبوری از خود نشان می‌دهند.

### اطلاعات مقاله

دریافت: 1400/02/04

پذیرش: 1400/04/17

### کلیدواژگان:

ساختارهای آگزتیک الاستومری  
جذب انرژی  
انرژی جذب شده بر واحد طول فشردگی  
بارگذاری شبه استاتیک  
بارگذاری ضربه‌ای

## Investigation on the Energy Absorption of Elastomeric Auxetic Structures in Quasi-static and Impact Loading

Majid Parvaresh, Hamed Ahmadi\*, Gholamhossien Liaghat

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

\*P.O.B, 14115-111 Tehran, Iran, h\_ahmadi@modares.ac.ir

### Keywords

Elastomeric Auxetic Structures  
Cobalt Energy Absorption  
absorbed Energy Per Unit length of compaction  
Mechanical milling  
Quasi-Static Loading  
Impact Loading

### Abstract

In this paper, a new category of lattice structures called auxetic structures has been studied, which due to low weight, high stiffness and shear strength, have various applications including energy absorption. The unique features of these lattice structures can be related to their special geometry and the Negative Poisson's ratio. In this study, three elastomeric auxetic structures made of TPU with geometries of Anti-tetra chiral, Arrowhead and Reentrant were investigated experimentally at quasi-static and impact loading and compared with a non-auxetic Honeycomb structure. The specimens were fabricated by additive manufacturing method and evaluated using the parameters such as the absorbed energy and the energy per unit length of compaction. Impact loading was performed at two level to investigate the energy absorption capability and deformation mechanisms of the structures in different level of loading. The results show that the auxetic structures absorb much more energy than non-auxetic conventional ones in quasi-static loading and absorb more energy per unit length compaction in impact loading.

### 1- مقدمه

تکرار شونده تشکیل شده‌اند و اغلب آنها مانند ساختار لانه‌زنبوری از ساختار سلولی مواد مشبک طبیعی مانند چوب پنبه تقلید کرده‌اند [2]. رفتار تغییرشکل ساختارهای سلولی به این معناست که آنها برای کاربردهای متفاوتی از جمله جذب انرژی مفید هستند [3].

در طول سه دهه گذشته، تحولات زیادی در ساختارها و طراحی مهندسی سازه در صنعت هوافضا، خودرو، پزشکی و ورزشی صورت گرفته است تا خصوصیات فیزیکی و مکانیکی تجهیزات را بهبود بخشند [1]. از جمله این ساختارهای نوظهور و پرکاربرد، ساختارهای مشبک هستند که از یک یا چندین سلول واحد

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Parvaresh, M., Ahmadi, H., and Liaghat, Gh., "Investigation on the Energy Absorption of Elastomeric Auxetic Structures in Quasi-static and Impact Loading", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, No. 1, pp. 1431-1442, 2021.

الاستومر ها موادی هستند که میتوانند با خاصیت الاستیک فوق العاده ای که دارند این هدف را پوشش دهند.

اریک و همکاران [14] طی مطالعه‌ای بر روی ضربه‌گیرهای میکروشبکه‌ای ساخته شده از رزین‌های الاستومری به این نتیجه رسیدند که با طراحی بهینه، پاسخ تنش-کرنش دینامیکی شبکه‌های الاستومری می‌تواند برای دسترسی بهتر به عملکرد ضربه‌گیرها از جمله کلاه ایمنی بیش از فوم‌های پیشرفته در سناریوهای تک و چند ضربه‌ای باشد. پیتر وویک و رایبل هارن [15] در تحقیقی میزان کاهش شوک در ساختارهای مشبک الاستومری را با داده‌های ویدیویی با سرعت بالا و اندازه‌گیری همزمان نیرو به اثبات رساندند. شانگتین یوان و همکاران [16] مطالعه‌ای بر روی ساختارهای آگزتیک نرم مشبک (فوم‌های آگزتیک) سه بعدی ساخته شده از پودرهای تی‌پی‌یو<sup>1</sup> (TPU) انجام دادند که پتانسیل زیاد این ساختارها را برای جذب انرژی نشان دادند.

مطالعه دیگری که توسط فی شن و همکاران [17] صورت گرفت به مدل‌سازی و پیش‌بینی میزان جذب انرژی ساختارهای مشبک پلیمری ساخته شده با تی‌پی‌یو پرداخته شد و پیش‌بینی‌ها نشان داد که ارتباط غیرخطی بین ظرفیت جذب انرژی و کرنش فشاری وجود دارد. همچنین ظرفیت جذب انرژی با افزایش تخلخل کاهش می‌یابد.

اگرچه تحقیقات زیاد و متنوعی روی ساختارهای آگزتیک صورت گرفته ولی تاکنون پژوهشی روی میزان جذب انرژی ساختارهای آگزتیک از جنس الاستومر انجام نشده است. با توجه به خواص و رفتار فوق‌العاده ساختارهای آگزتیک به منظور استفاده در جاذب‌های انرژی و ضربه‌گیرها، در کار حاضر برای اولین بار سه ساختار آگزتیک ری اینترنت<sup>2</sup>، آرهد<sup>3</sup> و آنتی تتراکایرال<sup>4</sup> و یک ساختار غیرآگزتیک لانه زنبوری با الاستومری از جنس تی‌پی‌یو بوسیله فرایند ساخت افزایشی (چاپ 3 بعدی) ساخته شده و تحت بارگذاری شبه استاتیک و ضربه‌ای قرار گرفته است تا رفتار آنها در جذب انرژی مورد بررسی قرار گیرد.

## 2- ساخت نمونه‌ها و آزمایش‌ها

### 2-1- هندسه و طراحی نمونه‌ها

در کار حاضر، سه نوع ساختار هندسی آگزتیک ری اینترنت، آرهد (سرنیزه‌ای)، آنتی تتراکایرال و یک نوع ساختار هندسی غیرآگزتیک لانه زنبوری مطابق شکل 1 نشان داده شده است.

همانطور که در شکل 1 می‌بینید در سلول واحد سازنده هریک از مدل‌ها، پارامترهایی وجود دارند که عبارت اند از:

h: طول ضلع عمودی سلول واحد

l: طول ضلع مورب سلول واحد

a: طول ضلع مربع موجود در سازه آنتی تتراکایرال

t: ضخامت اضلاع سلول واحد

a: زاویه ضلع مورب با افق

این ابعاد برای هر سلول واحد سازنده هریک از مدل‌ها در جدول 1 آمده است. لازم به ذکر است که ارتفاع و طول و عرض تمامی سازه‌ها 45 میلی‌متر در نظر گرفته شده است. طراحی نهایی سازه‌ها در شکل 2 مشاهده می‌گردد.

یکی از انواع این ساختارهای مشبک، ساختارهای آگزتیک بوده که خاصیت ویژه آنها ضریب پواسون منفی است [4]. اگرچه سالها وجود موادی با ضریب پواسون منفی امری بعید تلقی می‌شد اما در سال 1987، لیکس برای نخستین بار فوم‌هایی با ضریب پواسون منفی را ارائه داد [5].

ساختارهای آگزتیک ساختارهای مشبکی هستند که وقتی در جهت طولی کشیده می‌شوند در جهت جانبی گسترش پیدا می‌کنند. به زبان ساده‌تر وقتی کشیده می‌شوند، چاق‌تر می‌شوند و یا اینکه در اثر نیروی فشاری در جهت طولی، در جهت جانبی منقبض می‌شوند [6]. ساختارهای آگزتیک خواصی چون مدول برشی بالا [5]، مقاومت در برابر شکست و دیگر خصوصیات مکانیکی و فیزیکی بهبود یافته را برای طراحی بهتر به نمایش می‌گذارد [1].

دنگبائو شیائو و همکاران [7] در مطالعه‌ای در سال 2019 از سازه آگزتیک ری اینترنت برای مقایسه میزان هدر رفت انرژی و مقایسه آن با یک سازه لانه زنبوری استفاده کرد که برتری جذب انرژی سازه آگزتیک را اثبات کرد. اینگرو و همکاران [8] در سال 2017 مطالعه‌ای بر روی میزان جذب انرژی 5 نوع ساختار آگزتیک ری اینترنت اصلاح شده انجام دادند و مقایسه آنها با سازه لانه زنبوری به نتیجه جذب انرژی بیشتر سازه‌های آگزتیک رسید. شکری راد و همکاران [9] در سال 2018 مطالعه‌ای بصورت آزمایشگاهی و عددی بر روی جذب انرژی ساختار ری اینترنت و مقایسه آن با هندسه‌های اصلاح شده آن پرداختند و به این نتیجه رسیدند که با تغییر و اصلاح هندسه ری اینترنت می‌توان جذب انرژی بیشتری از حالت مرسوم آن را شاهد بود.

عامر الومرا و همکاران [10] مطالعه‌ای بر روی خواص فشاری و جذب انرژی ساختار ری اینترنت و کایرال ری اینترنت (ترکیب ری اینترنت و کایرال لانه زنبوری) انجام دادند که به استحکام و جذب انرژی سازه‌های آگزتیک در بارگذاری محوری در راستای y پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که با ترکیب سازه‌های مشبک می‌توان رفتار متفاوت در استحکام و جذب انرژی سازه‌ها بوجود آورد و علاوه بر آن ساختارهای آگزتیک خواص مکانیکی بهتری نسبت به سازه‌های غیرآگزتیک دارند.

توماس استرک و همکاران [11] ساختاری آگزتیک را به عنوان هسته ساندویچ پل‌ها بین دو صفحه صلب شبیه سازی کردند و به افزایش خواص مانند مدول یانگ دست یافتند. نجفی و همکاران [12] در مطالعه‌ای که بصورت تجربی و عددی انجام دادند، به مقایسه جذب انرژی ساختارهای آگزتیک و غیرآگزتیک به منظور مقایسه جذب انرژی آنها پرداختند. نتایج آزمایش تجربی و تحلیل المان محدود حاکی از آن بود که ساختارهای آگزتیک به مراتب جذب انرژی بیشتری نسبت به ساختار غیرآگزتیک دارند به طوری که یکی از ساختارهای آگزتیک، 161٪ جذب انرژی بیشتری نسبت به سازه غیرآگزتیک جذب کرده بود.

حبیب و همکاران [13] مطالعه‌ای در سال 2018 بصورت تجربی و تحلیل المان محدود بر روی ساختارهای مشبک پلیمری انجام دادند که نتایج بدست آمده حاکی از آن بود که ساختارهای مشبک پلیمری به مراتب از فوم جذب انرژی بیشتری دارند و ادعان کردند که جذب انرژی این شبکه‌ها با تغییر و دستکاری میکروتوپولوژی آنها بهبود می‌یابد. از آنجا که عمده ساختارها تحت ضربات چندباره قرار میگیرند، استفاده از ماده‌ای که بتواند هم جاذب انرژی باشد و هم تخریب قابل ملاحظه‌ای نداشته باشد حائز اهمیت است.

<sup>3</sup> Arrowhead

<sup>4</sup> Anti-tetra chiral

<sup>1</sup> Thermoplastic Poly Urethane

<sup>2</sup> Re-entrant

2-2- ساخت نمونه‌ها

مطابق شکل 3 چهار نوع هندسه ری اینترنت، آرهد، آنتی تتراکایرال و لانه زنبوری را با اندازه‌های مشخص شده در جدول 1 بوسیله نرم افزار کتیا طراحی شدند و فایل ذخیره شده با فرمت (STL) را درون نرم افزار سیمپلی فای سه بعدی که یکی از نرم افزارهای رایج در چاپ سه بعدی است قرار داده و فایل خروجی آن مطابق شکل 3 بوسیله چاپگر سه بعدی (فرایند ساخت افزایشی) چاپ شدند. پرینتر سه بعدی استفاده شده برای چاپ سازه‌ها Quantum-2025 و فیلامنت استفاده شده برای ساخت، تی پی یو (ترموپلاستیک پلی اورتان) بوده است. ارتفاع لایه‌های مورد استفاده برای چاپ هر کدام از نمونه‌ها برابر با 0.2 میلی‌متر در نظر گرفته شد تا اثر لایه‌لایه بودن قطعه‌ها تا حد امکان کمتر شود و سازه نهایی بیشترین قرابت را با حالت همسانگرد داشته باشد. درصد خروج ماده 100٪ بوده و قطر ماده مذاب خروجی 0.51 میلی‌متر در نظر گرفته شده است. تعداد 24 نمونه در این فرایند ساخته شدند و مورد مطالعه قرار گرفتند.

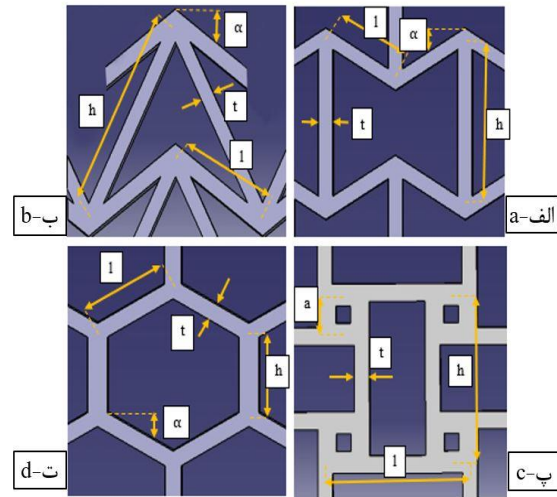


Fig. 1 Cell unit of the structures: a- reentrant, b- arrowhead, c- anti-tetra chiral, d- honeycomb

شکل 1 سلول واحد سازنده سازه‌ها، الف- ری اینترنت، ب- سرنیزه ای، پ- آنتی تتراکایرال، ت- لانه زنبوری

جدول 1 ابعاد سلول واحدها برای طراحی سازه‌ها

Table 1 Cell dimensions for structures' pattern

وزن (گرم)	a (mm)	l (mm)	h (mm)	t (mm)	$\alpha$ (°)	ساختار
32	-	5	10	1	-30	ری اینترنت
34	-	8.40	13.5	1	30	آرهد
32	2	9.80	9.80	1	-	آنتی تتراکایرال
24	-	5.20	5.20	1	30	هانی کمب

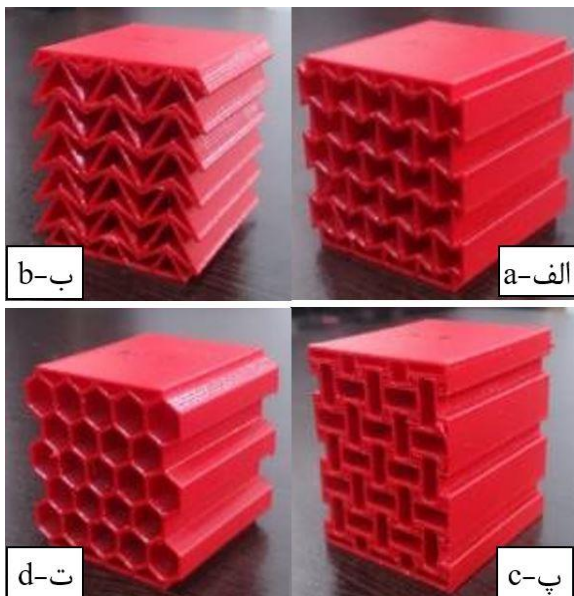


Fig. 3 final printed specimens: a- reentrant, b- arrowhead, c- anti-tetra chiral, d- honeycomb

شکل 3 سازه‌های چاپ شده توسط پرینتر سه بعدی، الف- ری اینترنت، ب- سرنیزه ای، پ- آنتی تتراکایرال، ت- لانه زنبوری

3-2- دستگاه‌ها و آزمایش‌ها

آزمون فشار شبه استاتیکی بوسیله دستگاه یونیورسال سروو هیدرولیک انجام گرفت. صفحه متصل به فک فوقانی با سرعت 10 میلی متر بر دقیقه سازه‌های ثابت شده را به میزان 25 میلی متر (50 درصد طول اولیه فشرده می نماید (شکل 4).

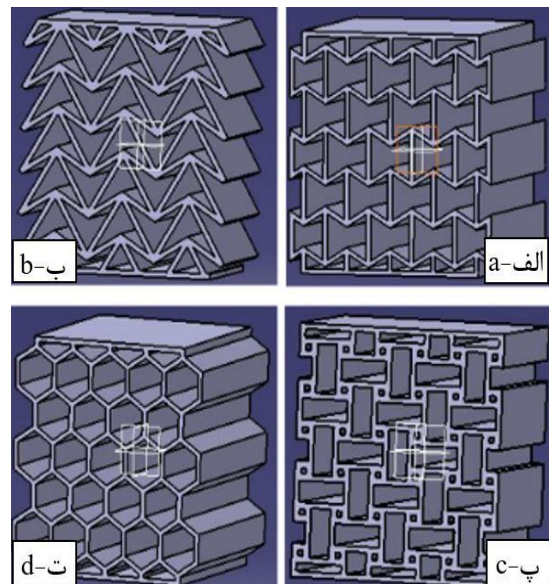


Fig. 2 final designed structures: a- reentrant, b- arrowhead, c- anti-tetra chiral, d- honeycomb

شکل 2 سازه‌های طراحی شده، الف- ری اینترنت، ب- سرنیزه ای، پ- آنتی تتراکایرال، ت- لانه زنبوری

بارگذاری ضربه ای بوسیله دستگاه دراپ همر در دو آزمایش مجزا در ارتفاع های 25 سانتی متری و 75 سانتی متری صورت گرفت. در این آزمایش از وزنه ثابت 9 کیلوگرمی برای ضربه استفاده گردید (شکل 5). در طی آزمایش زمان و شتاب برخورد بوسیله شتاب سنج متصل به ضربه زننده اندازه گیری شدند و نمودارهای شتاب زمان حاصل شدند. از طریق انتگرال گیری و قانون دوم نیوتن ( $F = ma$ ) نمودارهای نیرو جابه جایی بدست آمده و با انتگرال گیری مساحت زیر نمودار به انرژی جذب شده توسط سازه دست پیدا شده است.

### 3- نتایج و بحث

#### 1-3- بارگذاری شبه استاتیکی

نتایج آزمایش فشار شبه استاتیکی روی نمونه های ساخته شده، نمودار نیرو-جابجایی، در شکل 7 مشاهده میشود. با تقسیم نیرو بر سطح اولیه نمونه و با تقسیم میزان جابجایی بر طول اولیه نمونه، به ترتیب میزان تنش و کرنش معادل روی سازه بدست می‌آید. نتایج مزبور در شکل 8 آمده است.

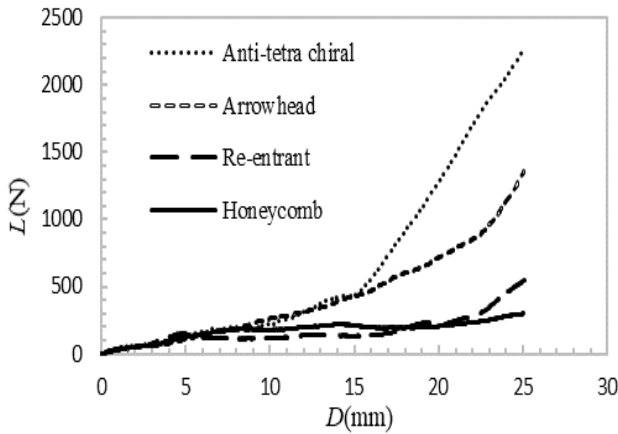


Fig. 6 Load-displacement diagrams of specimens under quasi-static loading

شکل 6 نمودار نیرو-جابه جایی سازه ها تحت بارگذاری شبه استاتیکی

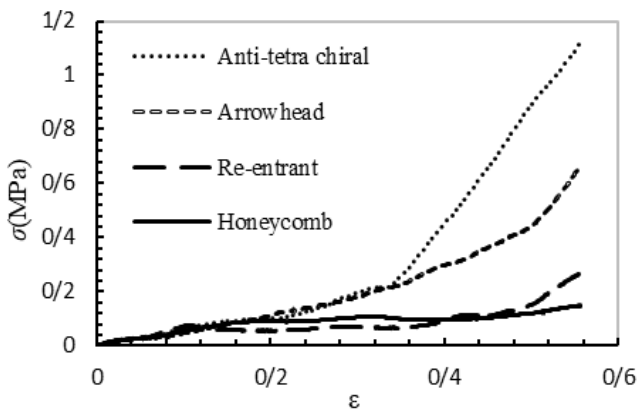


Fig. 7 Stress-Strain diagrams of specimens under quasi-static loading

شکل 7 نمودار تنش-کرنش سازه ها در بارگذاری شبه استاتیکی



Fig. 4 universal test apparatus for quasi-static test

شکل 4 دستگاه یونیورسال برای تست شبه استاتیکی



Fig. 5 Drop hammer test apparatus for impact test

شکل 5 دستگاه دراپ همر برای بارگذاری ضربه ای

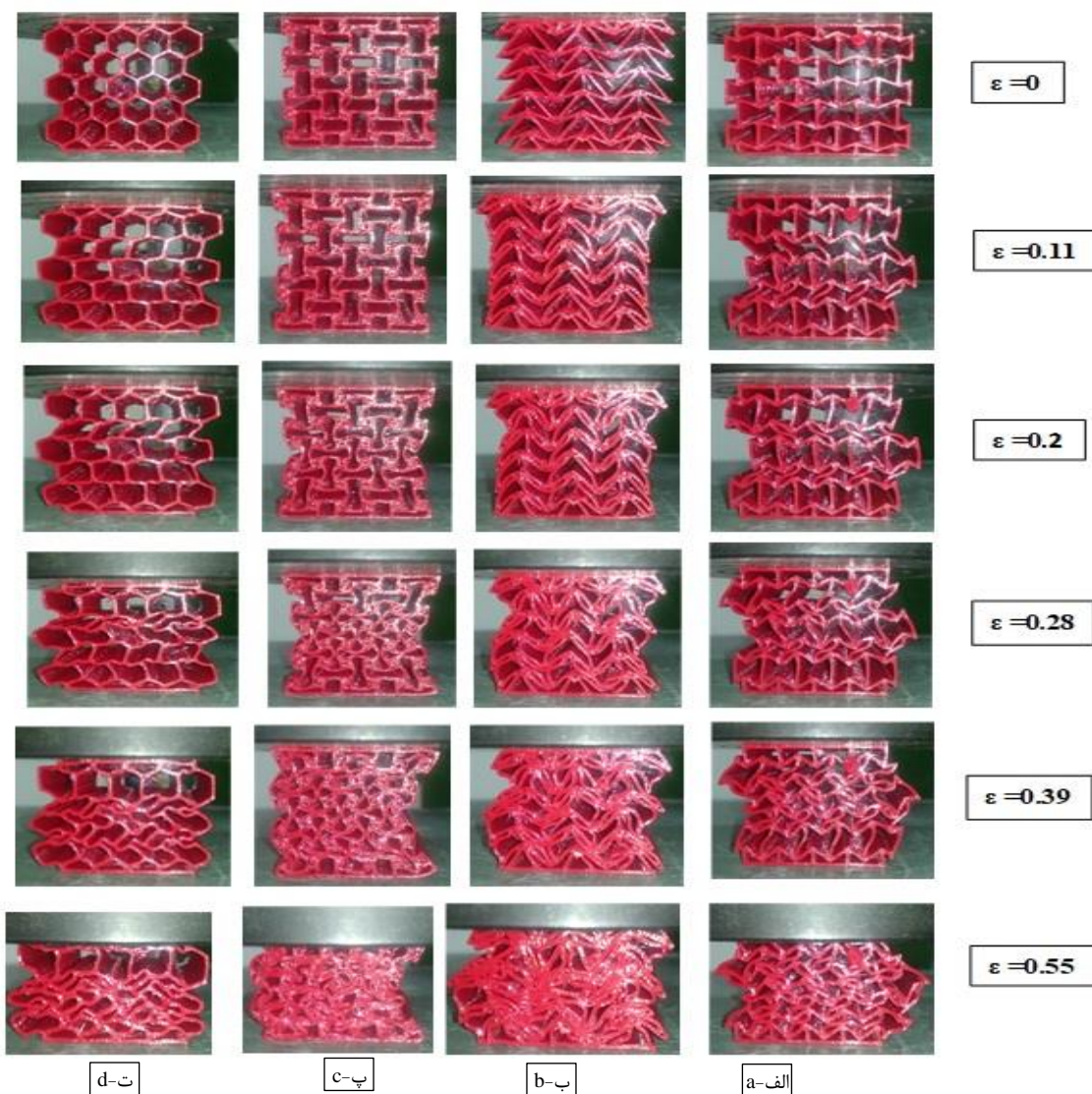


Fig. 8 deflection mechanisms of specimens under quasi-static compression test: a- reentrant, b- arrowhead, c- anti-tetra chiral, d- honeycomb

شکل 8 نحوه تغییر شکل سازه‌ها تحت آزمون فشاری شبه استاتیک: الف- ری اینترنت، ب- سرنیزه ای، پ- آنتی تتراکایرال، ت- لانه زنبوری

نداشته و ردیف مجاور در خلاف جهت خود دچار برش می‌شود. به عبارتی ردیف‌های سلول واحد یک در میان در یک جهت مانند حالت مارپیچ دچار برش می‌شوند. روند افزایش نیرو و کاهش مقاومت دیواره‌ها و تخریب ردیف به ردیف سلول‌ها تا کرنش 0.55 ادامه می‌یابد تا اینکه سازه در بیشترین فشردگی خود قرار دارد که با افزایش نیرو بیش از این حالت، به دلیل صلب شدن سازه به صورت صعودی در حال نزدیک شدن به بینهایت می‌باشد. در این حالت جذب انرژی اتفاق نمی‌افتد و افزایش نیرو باعث چگال‌تر شدن سازه می‌گردد که با افزایش سفتی سازه همراه است. همانطور که گیسون و اشبی [18] در مطالعه‌ای بر روی تغییر شکل داخل صفحه لانه زنبوری آلومینیومی به اثبات رساندند زمانیکه تمامی سلول‌ها دچار فروریزی شدند افزایش انرژی به چگال شدن سازه می‌انجامد و شیب نیرو به بینهایت میل می‌کند.

دربارگذاری شبه استاتیکی ساختار ری اینترنت در کرنش‌های کمتر از 0.11 دو ردیف غیرمجاور از سلول‌ها دچار برش شده و ردیف بین این دو ریف نخورده باقی می‌ماند. با ادامه بارگذاری تا کرنش‌های حدود 0.2، برش دو ریف

یکی از روش‌های بررسی و درک بهتر مسائل جذب انرژی نحوه فروریزی سازه‌ها است؛ زیرا که نحوه تغییر شکل سازه‌ها تحت بارگذاری، میزان جذب انرژی را تعیین می‌کنند و این نکته بسیار حائز اهمیت است که نحوه فروریزی‌ها بسته به جنس سازه‌ها متفاوت می‌باشد [8]. شکل 8 نحوه تغییر شکل سازه‌ها تحت بارگذاری فشاری شبه استاتیک را نشان می‌دهد. ساختار لانه زنبوری هنگامی که تحت بارگذاری شبه استاتیکی قرار می‌گیرد، از ابتدا تا کرنش‌های کمتر از 0.11 انبساط دیواره‌های سلولی مورب در جهت جانبی دیده می‌شود (به علت غیرآگزتیک بودن). با افزایش نیرو تا کرنش حدود 0.11 دیواره‌های عمودی سلولی یکی از ردیف‌ها دچار برش شده و ردیف مجاور نیز در خلاف جهت آن دچار برش می‌شود. در واقع فروریزی ساختار لانه زنبوری به دلیل برش دیواره‌های عمودی سلول‌ها اتفاق می‌افتد. هنگامیکه دیواره عمودی اولین ردیف از سلول‌ها دچار برش می‌شود، با افزایش نیرو مقاومت دیواره عمودی رفته رفته کاهش یافته تا اینکه دیواره‌های سلولی به یکدیگر رسیده و همدیگر را لمس می‌کنند (کرنش حدود 0.28). در این هنگام دیگر مقاومتی در برابر نیرو

در مواقعی که وزن سازه نیز مهم باشد پارامتر دیگری به نام جذب انرژی ویژه نمایان می‌شود که از تقسیم انرژی کل بر روی وزن سازه محاسبه می‌گردد. انرژی ویژه نمونه‌ها در شکل 10 نشان داده شده است.

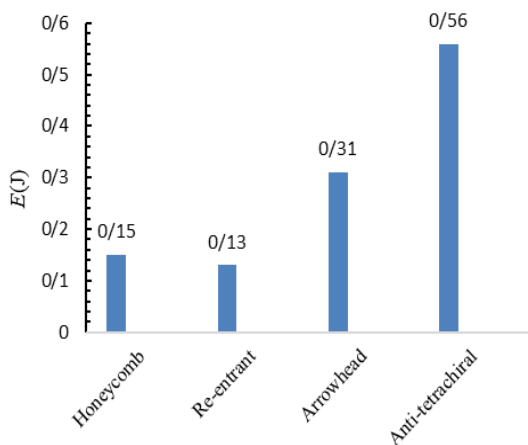


Fig. 10 Specific Absorbed energy of specimens

شکل 10 مقادیر جذب انرژی ویژه سازه‌ها

از شکل 9 مشخص می‌شود که جذب انرژی هر سه سازه آگزتیک ری اینترنت، سرنیزه ای و آنتی تتراکیرال از سازه غیرآگزتیک لانه زنبوری بیشتر است که از این بین، سازه آنتی تتراکیرال با 247٪ نسبت به سازه لانه زنبوری بیشترین جذب انرژی را در بین سازه‌های آگزتیک و سازه سرنیزه ای با 147٪ و سازه ری اینترنت با 57٪ نسبت به سازه لانه زنبوری را دارا می‌باشند. از شکل 10 نیز مشخص می‌شود که بیشترین جذب انرژی ویژه مربوط به سازه آنتی تتراکیرال با مقدار 186٪ نسبت به سازه لانه زنبوری می‌باشد و بعد از آن سازه سرنیزه ای با مقدار 103٪ نسبت به سازه لانه زنبوری بهترین عملکرد را داشته است.

### 2-3- بارگذاری ضربه ای در ارتفاع 25 سانتی متر

در این آزمون ضربه زننده 9 کیلوگرمی از ارتفاع 25 سانتی متری رها شده تا به سازه‌های ثابت شده در زیر ضربه زننده، برخورد کند و از لحظه رهاشدن ضربه زننده تا توقف کامل آن مقدار شتاب و زمان اندازه‌گیری شده‌اند. خروجی این آزمایش مقادیر شتاب-زمان بودند که با زوم کردن نمودار شتاب-زمان لحظه برخورد را پیدا و با عمل انتگرال گیری و قانون دوم نیوتن میزان جذب انرژی برای هر چهار سازه مطابق نمودارهای شکل 11 بدست آمده است.

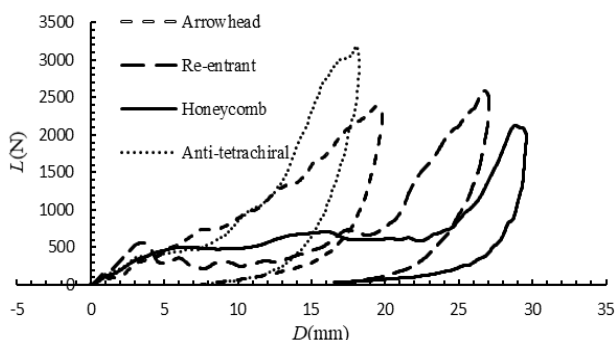


Fig. 11 Load-displacement diagrams of specimens at 20 J impact loading

شکل 11 نمودار نیرو-جابجایی سازه‌ها در بارگذاری ضربه با انرژی 20 ژول

غیرمجاور تاجایی ادامه می‌یابد که دیواره‌های سلولی به یکدیگر می‌رسند. در این حالت به دلیل عدم مقاومت دیواره‌های سلولی به هم رسیده امکان جذب انرژی در این دو ردیف وجود نداشته و دو ردیف غیر مجاور دیگر شروع به برش می‌کنند و روند جذب انرژی برای این دو ردیف تا جایی ادامه می‌یابد که در برابر تنش برشی دچار تسلیم شده و ردیف‌های بعدی شروع به تخریب کنند. در واقع می‌توان گفت که عامل تخریب سازه‌های لانه زنبوری و ری اینترنت به دلیل برش دیواره‌های عمودی سلول واحد‌ها اتفاق می‌افتد. در عین حال نتایج آزمایش فشاری شبه‌استاتیک حاکی از آن است که فروریزی دیواره‌های عمودی در سازه ری اینترنت نیروی بیشتری نسبت به سازه لانه زنبوری می‌طلبد که به دلیل خاصیت آگزتیک بودن سازه است.

رفتار سازه‌های سرنیزه‌ای و آنتی تتراکیرال در بارگذاری شبه‌استاتیکی با سازه‌های لانه زنبوری و ری اینترنت متفاوت می‌باشد و علت این تفاوت‌ها بدین شکل است که اولاً در سازه لانه زنبوری و ری اینترنت فروریزی سازه بصورت ردیف به ردیف می‌باشد ولی در سازه‌های آنتی تتراکیرال و سرنیزه ای کل سازه باهم دچار فروریزی می‌گردد. دوماً علت فروریزی در سازه لانه زنبوری و ری اینترنت، برش ولی سازه‌های آنتی تتراکیرال و سرنیزه ای کمانش دیواره‌ی سلول واحدها می‌باشد. سوماً چون که کل دیواره‌های سلولی سازه‌های آنتی تتراکیرال و سرنیزه‌ای از همان کرنش‌های ابتدائی تا کرنش 0.55 دچار کمانش می‌شوند و این روند تا فشردگی نهایی ادامه می‌یابد که بعد از این حالت بارگذاری به چگال شدن سازه و سفتی خیلی زیاد سازه می‌انجامد و سازه دیگر قادر به جذب انرژی نخواهد بود. ولی در ری اینترنت و لانه زنبوری جذب انرژی ردیف به ردیف جذب می‌شود و بعد از تخریب کامل هر ردیف توانایی جذب انرژی نداشته و ردیف بعد شروع به جذب انرژی می‌کند. درحقیقت در سازه آنتی تتراکیرال و سرنیزه‌ای جذب انرژی را می‌توان به جذب همزمان همه سلول واحدها دانست ولی در سازه‌های ری اینترنت و لانه زنبوری جذب انرژی را می‌توان به جذب ردیف به ردیف سلول واحد دانست. همانطور که قبلاً اشاره شد در تغییرشکل‌ها بر اثر بارگذاری میزان جذب انرژی مهمترین پارامتر در مقایسه بین سازه‌ها و هندسه برای انتخاب بهترین سازه می‌باشد. در آزمایش فوق که به وسیله دستگاه یونیورسال انجام گرفت بعد از بارگذاری سازه‌ها و فشرده سازی آن‌ها تا حدود نصف طول اولیه‌شان (25 میلی متر) نمودارهای نیرو-جابجایی و تنش-کرنش (شکل 6 و 7) حاصل شدند. همانطور که مشخص است سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی برابر با کل انرژی جذب شده می‌باشد که با انتگرال گیری از این نمودار مساحت سطح زیرین این نمودار یعنی ظرفیت جذب انرژی سازه‌ها بدست آمدند (شکل 9).

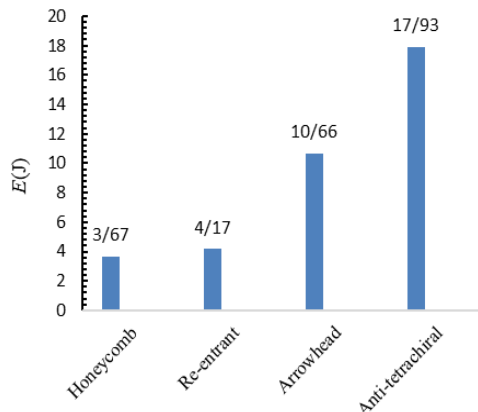


Fig. 9 Absorbed energy of specimens

شکل 9 میزان جذب انرژی سازه‌ها

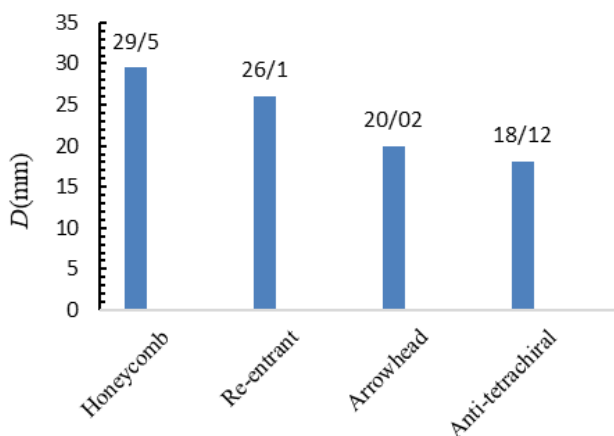


Fig. 13 Maximum deflection of specimens at 20J impact loading

شکل 13 حداکثر فشردگی نمونه‌ها در اثر ضربه ۲۰ ژول

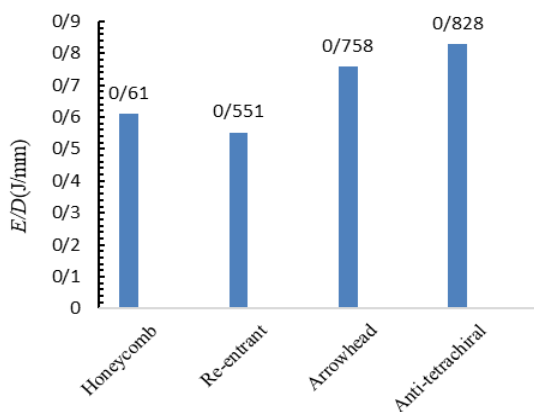


Fig. 14 Absorbed energy per unit length of deflection at 20J impact loading

شکل 14 انرژی بر واحد طول فشردگی برای سازه‌ها در اثر ضربه ۲۰ ژول

همانطور که نتایج شکل 13 نشان می‌دهد، سازه لانه زنبوری بیشترین فشردگی و سازه آنتی تتراکایرال کمترین فشردگی را داراست. همچنین مطابق با نتایج شکل 14، سازه آنتی تتراکایرال بیشترین مقدار انرژی را به ازای یک میلیمتر فشردگی جذب کرده است که نشان از بالابودن میزان ظرفیت جذب انرژی این سازه دارد. این سازه 67 درصد نسبت به سازه غیر آگزتیک لانه زنبوری ظرفیت جذب انرژی بیشتری دارد.

علاوه بر دو پارامتر مهم میزان جذب انرژی و ظرفیت جذب انرژی بر واحد طول هر سازه، میزان پیک نیرویی در حین آزمایش نیز از موارد مهم در ارزیابی ضربه‌گیرها هستند. حداکثر نیرو در حین آزمایش مشخص کننده میزان شوکی است که ضربه گیر به سازه یا سرنشینانی که از آنها محافظت میکند وارد مینماید. بنابراین هرچه این میزان کمتر باشد، شوک وارد شده کمتر خواهد بود و سازه قابلیت جذب ضربه بهتری را خواهد داشت. حداکثر نیروی ثبت شده در حین آزمایش ضربه 20 ژول در شکل 15 نمایش داده شده است. همانطور که از نتایج پیداست، حداقل نیرو متعلق به سازه لانه زنبوری بوده و حداکثر نیرو متعلق به سازه آنتی تتراکایرال است. این بدان معناست که سازه لانه زنبوری قابلیت دمپ نیرویی بیشتری نسبت به بقیه سازه‌ها در ضربه 20 ژولی دارد. با توجه به موارد گفته شده، نتیجه می‌شود که سازه لانه زنبوری علی‌رغم ظرفیت

سرعت لحظه برخورد و همینطور مقدار انرژی وارده به سازه‌ها به ترتیب برابر با 2.11 متر بر ثانیه و 20 ژول محاسبه گردید. باتوجه به جنس لاستیکی و الاستومری سازه‌ها هیچگونه تغییرشکل پلاستیکی مشاهده نشده و همه تغییرشکل‌ها در فاز الاستیک بوده که بعد از ضربه و برخورد ضربه زننده به سازه‌ها و تا حد اکثر میزان فشردگی، نمودار نیرو-جابجایی به پیک نیرویی رسیده و به علت انعطاف پذیر بودن جنس نمونه‌ها سازه به حالت قبل از ضربه برگشته است.

در این پروسه مقداری از انرژی وارده به سازه بصورت انرژی ریباند<sup>1</sup> (انرژی برگشتی) به ضربه زننده وارد می‌شود. از نتایج و نمودارها می‌توان استنباط کرد که ضربه در ارتفاع 25 سانتی متری رفتار متفاوتی از سازه‌های آگزتیک و غیرآگزتیک از خود نشان می‌دهد. به طوریکه در انرژی ثابت 20 ژول پیک نیرویی و میزان فشردگی برای هر سازه متفاوت خواهد بود. به عنوان مثال سازه آنتی تتراکایرال دارای پیک نیرویی 3200 نیوتن در مقدار فشردگی 17 میلی متر را دارد در صورتیکه سازه لانه زنبوری پیک نیرویی 2100 نیوتن را در فشردگی 28 میلی متر دارا می‌باشد.

همینطور سازه ری اینترنت در پیک نیرویی 2600 نیوتن مقدار فشردگی 26 میلی متر و سازه سرنیزه ای در پیک نیرویی 2400 نیوتن مقدار فشردگی 20 میلی متر را دارا می‌باشد. باتوجه به کاربرد ضربه گیرها انتخاب بهترین سازه ممکن است متفاوت باشد. کل انرژی خالص جذب شده توسط سازه‌ها از تفریق انرژی وارد شده به سازه‌ها و انرژی برگشتی محاسبه می‌گردد (شکل 12).

شکل 12 فقط بیانگر انرژی خالص جذب شده توسط سازه‌ها بدون احتساب میزان فشردگی می‌باشد. بر این اساس تمامی نمونه‌ها انرژی ضربه زننده را تقریباً به یک اندازه جذب کرده‌اند. برای مقایسه بهتر و درست‌تر انرژی جذب شده، پارامتر فشردگی سازه‌ها در حین جذب انرژی باید لحاظ گردد. این پارامتر حداکثر فشردگی سازه را در حین جذب انرژی نشان می‌دهد (شکل 13). با در نظر گرفتن این پارامتر ظرفیت جذب انرژی هر سازه به ازای طول واحد فشردگی محاسبه خواهد شد. نتایج در شکل 14 آمده است.

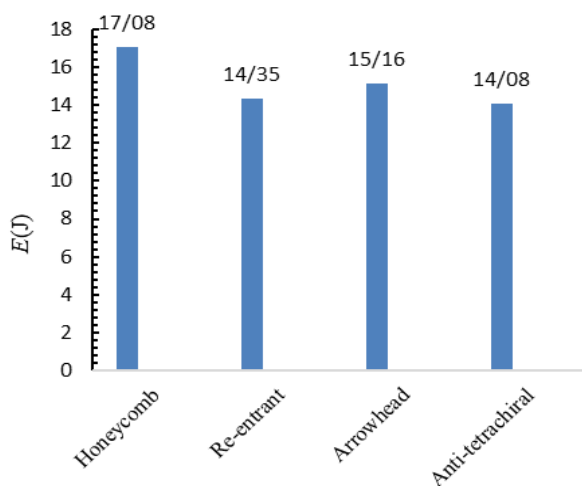


Fig. 12 Absorbed energy of specimens at 20J impact loading

شکل 12 کل انرژی خالص جذب شده توسط سازه‌ها بدون احتساب فشردگی

<sup>1</sup> Rebound Energy

جذب انرژی را داشته‌اند. بنابراین سازه‌ها در اثر ضربه، به حداکثر فشردگی خود نرسیده‌اند. میزان انرژی خالص جذب شده بدون احتساب فشردگی سازه‌ها در شکل 17 مشاهده می‌شود. مطابق انتظار، میزان جذب انرژی سه سازه آگزتیک تقریباً برابر بوده و از میزان جذب انرژی سازه غیر آگزتیک لانه زنبوری بیشتر است. همانطور که در بخش قبلی ذکر شد، حداکثر فشردگی و میزان جذب انرژی بر واحد طول فشردگی می‌تواند مقایسه بهتری را ایجاد کند و ظرفیت جذب انرژی هر سازه را بهتر نشان دهد. نتایج مذکور به ترتیب در شکل‌های 18 و 19 آمده است. نتایج نشان می‌دهند که سازه‌های آگزتیک و در راس آن آنتی تتراکایرال بسیار کمتر از سازه لانه زنبوری فشرده شده و همچنان توانایی جذب انرژی ضربه بیشتری را دارند در حالی که ظرفیت جذب انرژی سازه لانه زنبوری بسیار کمتر از 60 ژول وارد شده است. بدین ترتیب انرژی بر واحد طول فشردگی سازه آنتی تتراکایرال در انرژی ضربه 60 ژول از دیگر سازه‌ها بیشتر است. این افزایش نسبت به سازه لانه زنبوری بیش از 4.7 برابر است. همانطور که در قسمت قبلی نیز ذکر شد، علاوه بر میزان انرژی جذب شده و انرژی جذب شده بر واحد طول فشردگی، حداکثر نیرو در حین فرایند ضربه نیز پارامتر مهمی در تعیین قابلیت هر ضربه گیر است. شکل 20 نتایج مربوط به حداکثر نیروی ثبت شده در حین ضربه 60 ژول را نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که سازه آنتی تتراکایرال با ثبت حداکثر نیروی 7500 نیوتن کمترین شوک را داشته و بیشترین اثر دمپینگ ضربه را دارا می‌باشد.

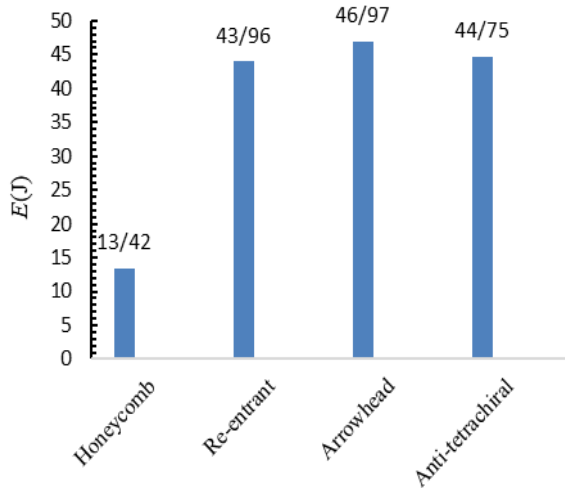


Fig. 17 Absorbed energy of specimens at 60J impact loading

شکل 17 انرژی خالص جذب شده سازه‌ها در ضربه 60 ژول بدون احتساب فشردگی

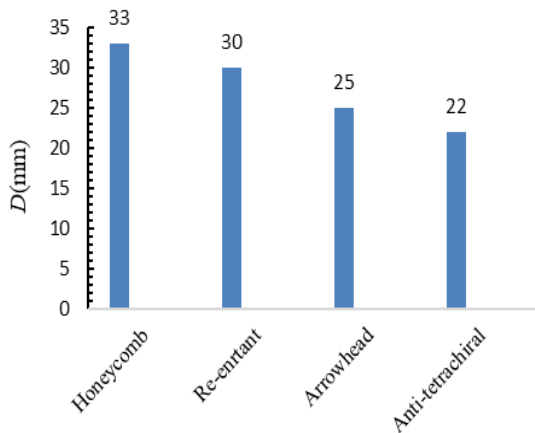


Fig. 18 Maximum deflection of specimens at 60J impact loading

شکل 18 حداکثر فشردگی سازه در ضربه 60 ژول

پایین جذب انرژی به ازای واحد طول خود، به دلیل پایین بودن حداکثر نیرو در حین ضربه، می‌تواند گزینه مناسبی برای جذب انرژی در ضربات با انرژی کم باشد. قابل ذکر است از آنجا که قطعات مورد بررسی از الاستومر ساخته شده و تحت آزمون فشار شبه استاتیک و ضربه هیچ تخریبی در آنها صورت نمی‌گیرد، لذا نمونه‌ها پس از آزمون کاملاً شبیه نمونه‌ها قبل از آزمون هستند.

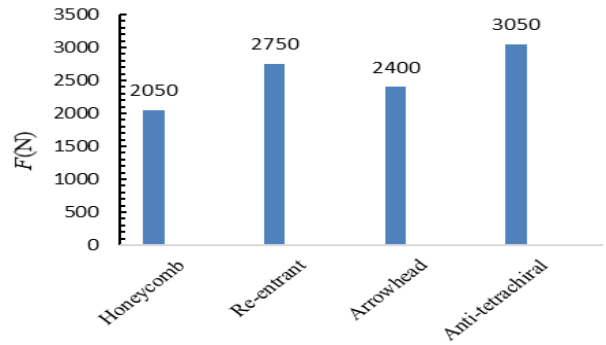


Fig. 15 Peak force during 20 J impact

شکل 15 حداکثر نیروی ثبت شده در ضربه 20 ژول

### 3-3- بارگذاری ضربه‌ای در ارتفاع 75 سانتی متر

در آزمایش دیگری وزنه 9 کیلوگرمی از ارتفاع 75 سانتی متری بر روی سازه‌های ثابت شده در کف دستگاه رها شد. سرعت لحظه برخورد و همینطور انرژی وارد به سازه به ترتیب برابر با 3.65 متر بر ثانیه و 60 ژول می‌باشد. شکل 16 نتایج نتایج آزمون ضربه را به شکل نمودارهای نیرو-جابجایی نشان می‌دهد.

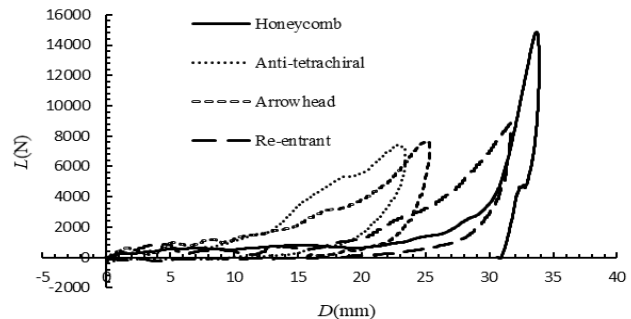
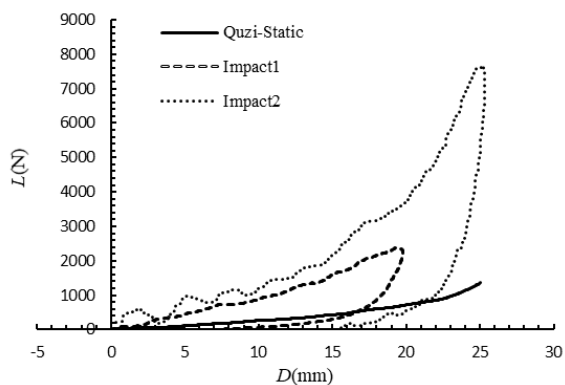


Fig. 16 Load-displacement diagrams of specimens at 60 J impact loading

شکل 16 نمودار نیرو-جابجه جایی سازه‌ها در بارگذاری ضربه‌ای 60 ژول

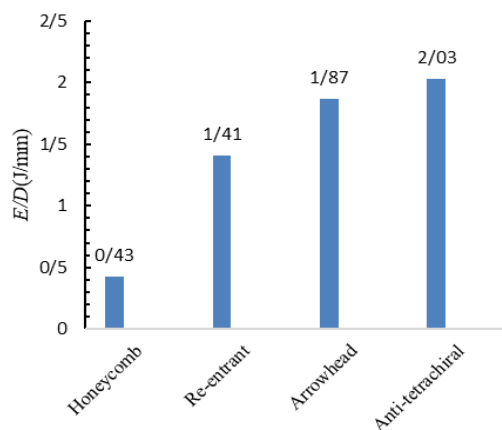
نتایج نشان می‌دهند که سازه لانه زنبوری در اثر ضربه تا ماکزیمم حالت فشردگی خود (حدود 33 میلی متر) فشرده شده بدون اینکه اندازه نیرو افزایش یابد و بعد از این حالت شاهد پیک نیرویی خیلی زیاد (حدود 15 کیلونیوتن) هستیم. در واقع سازه لانه زنبوری قابلیت جذب نیروی وارد شده بیش از 33 میلیمتر را نداشته و علت پیک نیرویی خیلی زیاد نیز بخاطر ادامه حرکت ضربه زنده و فشرده شدن مواد لاستیکی سازه بوده است. لذا در محاسبه میزان جذب انرژی که همان سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی است، این مورد باید لحاظ شود. در سازه ری اینترنت، جذب انرژی با پیک نیرویی 8000 هزار نیوتن در فشردگی 31 میلی متر شاهد هستیم. همینطور سازه‌های سرنیزه‌ای و آنتی تتراکایرال با پیک نیرویی 7500 و 7000 در فشردگی 25 و 22 بیشترین





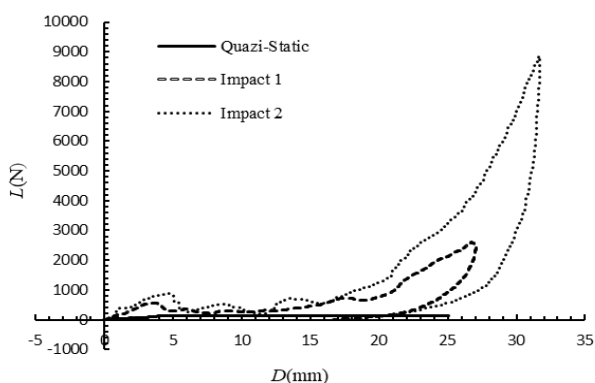
**Fig. 22** Comparison of load-displacement results of Arrowhead structure under quasi-static and impact loading

شکل 22 مقایسه نتایج نیرو-جابجایی سازه سرنیزه ای در بارگذاری های شبه استاتیکی و ضربه ای



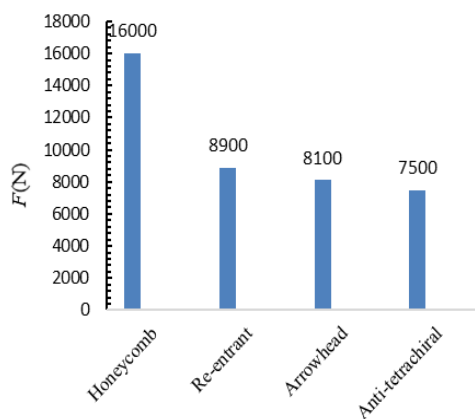
**Fig. 19** Absorbed energy per unit length of deflection at 60J impact loading

شکل 19 انرژی بر واحد طول فشردگی سازه ها در ضربه 60 ژول



**Fig. 23** Comparison of load-displacement results of Re-entrant structure under quasi-static and impact loading

شکل 23 مقایسه نتایج نیرو-جابجایی سازه ری اینترنت در بارگذاری های شبه استاتیکی و ضربه ای

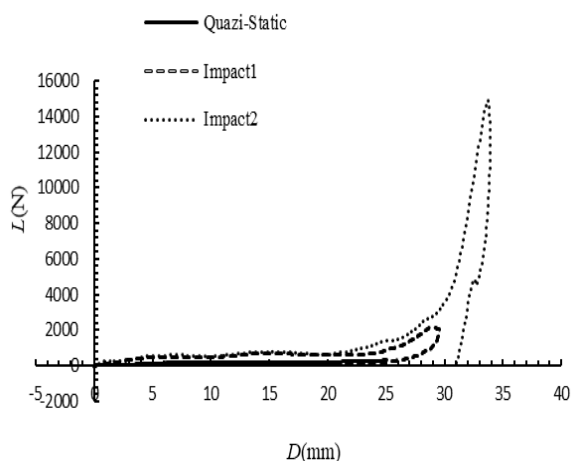


**Fig. 20** Peak force during 60 J impact

شکل 20 حداکثر نیروی ثبت شده در ضربه 60 ژول

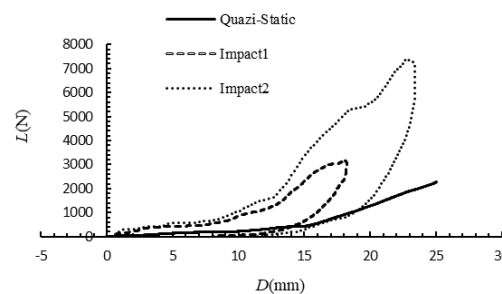
### 4-3- مقایسه بارگذاری شبه استاتیکی و ضربه ای

برای درک بهتر رفتار ساختارها در بارگذاری شبه استاتیکی و ضربه ای، مقایسه ای از پاسخ سازه ها به بارگذاری های شبه استاتیکی و ضربه ای انجام شده است. نتایج هر کدام از نمونه ها به صورت مجزا در شکل های 21 تا 24 آمده است. در نمودار های زیر Impact1 (بارگذاری ضربه ای 20 ژول) و Impact2 (بارگذاری ضربه ای 60 ژول) و Quasi-static (بارگذاری شبه استاتیکی) می باشد.



**Fig. 24** Comparison of load-displacement results of Honeycomb structure under quasi-static and impact loading

شکل 24 مقایسه نتایج نیرو-جابجایی سازه لانه زنبوری در بارگذاری های شبه استاتیکی و ضربه ای



**Fig. 21** Comparison of load-displacement results of Anti-tetra chiral structure under quasi-static and impact loading

شکل 21 مقایسه نتایج نیرو-جابجایی سازه آنتی تتراکیرال در بارگذاری های شبه استاتیکی و ضربه ای

$E$  انرژی (J)

$E/D$  انرژی بر واحد طول فشردگی (J/mm)

#### 6- تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند از صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (INSF) به دلیل حمایت از این پژوهش که با شماره قرارداد 98008972 به انجام رسیده، تشکر و قدردانی نمایند.

#### 7- مراجع

- [1] Wang, X.T., Wang, B., Li, X.W., and Ma, L. "Mechanical Properties of 3D Re-Entrant Auxetic Cellular Structures", International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 52, No. 23, pp. 3265-3273, 2017.
- [2] Maconachie, T., Leary, M., Lozanovski, B., Zhang, X., Qian, M., Faruque, O., and Brandt, M. "SLM Lattice Structures: Properties, Performance, Applications and Challenges", Materials & Design, Vol. 183, Mater. Des. 2019.
- [3] Zhu, F., Lu, G., Ruan, D., and Wang, Zh. "Plastic Deformation, Failure and Energy Absorption of Sandwich Structures with Metallic Cellular Cores", International Journal of Protective Structures, Vol. 1, No. 4, pp. 507-541. 2010.
- [4] Yang, Ch., Vora, H. D., and Chang, Y. "Behavior of Auxetic Structures under Compression and Impact Forces", Smart Materials and Structures, Vol. 27, No. 2, 2018.
- [5] Lakes, R. "Foam Structures with a Negative Poisson's Ratio", Science, Vol. 235, No. 4792, pp.1038-1040. 1987.
- [6] Mir, M., Najabat Ali, M., Sami, J., and Ansari, U. "Review of Mechanics and Applications of Auxetic Structures", Advances in Materials Science and Engineering, Vol. 2014, pp. 1-17, 2014.
- [7] Dengbao, X., Dong, Zh., Li, Y., Wu, W., and Fang, D. "Compression Behavior of the Graded Metallic Auxetic Reentrant Honeycomb: Experiment and Finite Element Analysis", Materials Science and Engineering, Vol. 758, pp. 163-171, 2019.
- [8] Ingrole, A., Hao, A., and Liang, R. "Design and Modeling of Auxetic and Hybrid Honeycomb Structures for In-Plane Property Enhancement", Materials & Design, Vol. 117, pp. 72-83, 2017.
- [9] Shokri Rad, M., Hatami, H., Alipouri, R., Farokhi Nejad, A., and Omidinasab, F. "Determination of Energy Absorption in Different Cellular Auxetic Structures", Mechanics & Industry, Vol. 20, No. 3, PP. 1-11, 2018.
- [10] Alomarah, A., Masood, S.H., Sbarsk, L., Faisal, B., Gaol, Zh., and Ruan, D. "Compressive Properties of 3D Printed Auxetic Structures: Experimental and Numerical Studies", Virtual and Physical Prototyping, Vol. 15, No. 1, 2019.
- [11] Streck, T., Jopek, H., and Nienartowicz, M. "Dynamic Response of Sandwich Panels with Auxetic Cores", physica status solidi, Vol. 252, No. 7, pp. 1540-1550. 2015.
- [12] Najafi, M., Ahmadi, H., and Liaghat, Gh. "Experimental and Numerical Investigation of Energy Absorption in Auxetic Structures under Quasi-static Loading", In Persian, Modares Mechanical Engineering, Vol. 20, No. 2, pp. 415-424. 2020.
- [13] Habib, F.N., Lovenitti, P., Masood, S.H., and Nikzad, M. "Fabrication of Polymeric Lattice Structures for Optimum Energy Absorption using Multi Jet Fusion Technology", Materials & Design, Vol. 155, pp. 86-98, 2018.
- [14] Eric C. Clough, Thomas A. Plaisted, Zak C. Eckel, Kenneth Cante, Jacob M. Hundley, and Tobias A. Schaedler. "Elastomeric Microlattice Impact Attenuators", Matter, Vol. 1, No. 6, pp. 1519-1531, 2019.

با مقایسه نمودارهای نیرو-جابجایی در ضربه و نیرو-جابجایی در شبه استاتیکی می‌توان مشاهده کرد که شباهت در مراحل بارگذاری (به خصوص در مراحل ابتدایی) وجود دارد. همچنین می‌توان دریافت که، رابطه ای معقول بین بارگذاری شبه استاتیکی و ضربه ای در جذب انرژی وجود دارد بطوریکه در بارگذاری شبه استاتیکی میزان حداکثر فشردگی موثر برای جذب انرژی همان مقداری بوده که در بارگذاری ضربه ای شاهد هستیم. در واقع حین بارگذاری شبه استاتیکی به یک میزان فشردگی بحرانی رسیدیم که بعد از آن افزایش نیرو به چگال شدن سازه و در نهایت با پیک نیرویی با شیب رو به بینهایت روبرو شدیم که در بارگذاری ضربه ای نیز جذب انرژی موثر تا همان حداکثر میزان فشردگی بحرانی رخ داد. همینطور ماکزیمم نیروی ضربه ای و ماکزیمم نیروی شبه استاتیکی سازه آنتی تراکایرال و سرنیزه ای در مقایسه با سازه های لانه زنبوری و ری اینترنت نزدیکتر به یکدیگر هستند.

#### 4- نتیجه گیری

- در بارگذاری فشاری شبه استاتیکی سازه‌های آگزتیک ری اینترنت، ازهد، آنتی تراکایرال به مراتب جذب انرژی بالاتری نسبت به سازه غیر آگزتیک لانه زنبوری داشتند بطوری که سازه آنتی تراکایرال با جذب انرژی 247٪ نسبت به سازه لانه زنبوری بیشترین جذب انرژی را دارا بود و بعد از آن سازه سرنیزه‌ای با 147٪ و سازه ری اینترنت با 57٪ جذب انرژی بیشتری نسبت به سازه لانه زنبوری داشتند.
- بارگذاری ضربه‌ای در دو سطح انرژی 20 و 60 ژول انجام شد که با توجه به هندسه هر سازه رفتاری متفاوت در پیک نیرویی و حداکثر میزان فشردگی وجود داشت. در هر دو آزمایش سازه‌های آگزتیک و در رأس آنها سازه آنتی تراکایرال میزان جذب انرژی بر واحد طول فشردگی بیشتری نسبت به سازه متداول غیر آگزتیک داشتند. از اینرو می‌توان نتیجه گرفت که سازه های مزبور ظرفیت جذب انرژی بالاتری را دارا هستند.
- پیک نیرویی ثبت شده در حین آزمون ضربه نشان دهنده میزان شوکی است که به سازه وارد میشود و هر چقدر کمتر باشد، دمپ ضربه موثرتر خواهد بود. در آزمایش ضربه 20 و 60 ژول حداقل این مقدار به ترتیب متعلق به سازه لانه زنبوری و آنتی تراکایرال بود. با بررسی این پارامتر مشخص می‌شود، علی رغم برتری سازه های آگزتیک در جذب انرژی در تمامی سطوح ضربه، برای دمپ ضربه با انرژی کم، میتوان از سازه متداول لانه زنبوری استفاده کرد به شرط آنکه ظرفیت جذب انرژی سازه از میزان انرژی وارده کمتر نشود.
- با توجه به شباهت زیاد رفتار سازه ها در بارگذاری شبه استاتیکی و ضربه ای، میتوان با ایجاد یک تناسب بین خروجی آنها، از نتایج یک آزمون برای آزمون دیگری استفاده کرد.

#### 5- فهرست علائم

$L$  نیرو (N)

$D$  جابه جایی (mm)

$\sigma$  تنش (MPa)

$\epsilon$  کرنش

- [15] Vuyk, P., and Harne, R. L. "Collapse Characterization and Shock Mitigation by Elastomeric Metastructures", *Extreme Mechanics Letters*, Vol. 37, 100682, 2020.
- [16] Yuan, Sh., Shen, F., Bai, J., Chua, Ch. K., Wei, J., and Zhou, K. "3D Soft Auxetic Lattice Structures Fabricated by Selective Laser Sintering: TPU Powder Evaluation and Process Optimization", *Materials & Design*, Vol. 120, pp. 317-327, 2017.
- [17] Shen, F., Yuan, Sh., Guo, Y., Zhao, B., Bai, J., Qwamizadeh, M., Chua, Ch. K., Wei, J., and Zhou, K. "Energy Absorption of Thermoplastic Polyurethane Lattice Structures via 3D Printing: Modeling and Prediction", *International Journal of Applied Mechanics*, Vol. 8, No. 7, 2016.
- [18] Gibson, L.J., and Ashby, MF. "Cellular Solids: Structure and Properties", Cambridge, London, England, 1997.

