



## بررسی تجربی خواص ضربه‌ای ساختارهای سلولی الگوبرداری شده از پوسته جانوران

رضا محمودی<sup>1</sup>، محمدحسین پل<sup>2\*</sup>، یوسف گلین امیری<sup>1</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تفرش، تفرش

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تفرش، تفرش

\* صندوق پستی 143-14115، tafreshu.ac.ir، m\_h\_pol@

### اطلاعات مقاله:

دریافت: 1402/05/02

پذیرش: 1402/06/29

### چکیده

بشر همواره می‌کوشد تا از طبیعت الهام گرفته و سازه‌های جدید خلق کند. یکی از این سازه‌های نوین، سازه‌های سلولی و مشبک هستند که به دلیل وزن پایین و استحکام فشاری مناسب مورد توجه محققان قرار گرفته‌اند. در این مقاله با الهام از طبیعت و ساختارهای موجود در آن به بررسی این سازه‌ها و با الگوبرداری از موجوداتی مانند لاک‌پشت، حلزون و صدف دریایی پرداخته شده است. به این منظور از هر الگو دو مدل جدید که مشابه آن قبلاً طراحی و ساخته نشده است، طراحی و با استفاده از روش افزایشی از جنس Petg ساخته شد. نمونه‌ها تحت آزمایش دو ضربه (سرعت پایین) متوالی با وزن ضربه‌زننده 2.2 kg و در دو ارتفاع 5 cm و 10 cm قرار گرفتند. نتایج نشان داد بیشترین نیروی حاصل از ضربه در ارتفاع 5 cm به ترتیب مربوط به یکی از نمونه‌های الگوبرداری شده از لاک‌پشت و یکی از نمونه‌های الگوبرداری شده از حلزون و با نسبت 325% و کمترین نیروی حاصل از ضربه در ارتفاع 10 cm به ترتیب مربوط به یکی از نمونه‌های لاک‌پشت و یکی از نمونه‌های حلزون و با نسبت 200% می‌باشد. بیشترین و کمترین جابجایی در حداکثر نیروی حاصل از ضربه در ارتفاع 5cm به ترتیب مربوط به یکی از نمونه‌های الگوبرداری شده از حلزون و یکی از نمونه‌های الگوبرداری شده از لاک‌پشت و با نسبت 252% و در ارتفاع 10cm به ترتیب مربوط به یکی از نمونه‌های حلزون و یکی از نمونه‌های لاک‌پشت و با نسبت 238% می‌باشد.

### کلیدواژگان

ضربه، سازه‌های سلولی، لاک‌پشت، حلزون، صدف دریایی

## Experimental investigation of impact properties of cell structures patterned from animal shells

Reza Mahmoudi<sup>1</sup>, Mohammad Hossein Pol<sup>1\*</sup>, Yusef Galian Amiri<sup>1</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Tafresh University, Tafresh, Iran

\* P.O.B. 14115-143 Tafresh, Iran, m\_h\_pol@tafreshu.ac.ir

### Keywords

Impact, cellular structures, turtle, snail, sea shell

### Abstract

Man always tries to get inspiration from nature and create new structures. One of these new structures is cellular and lattice structures, which have attracted the attention of researchers due to their low weight and appropriate compressive strength. In this article, inspired by nature and the structures in it, these structures have been investigated and modeled on creatures such as turtles, snails and sea shells. For this purpose, two models of each pattern were designed and made of Petg material using the additive method. The samples were subjected to the test of two consecutive impacts with the impact weight of 2.2 kg and at two heights of 5 cm and 10 cm. The results showed that the highest and the lowest impact force at a height of 5cm respectively correspond to one of the samples taken from a turtle and one of the samples taken from a snail with a ratio of 325% and at a height of 10 cm, respectively, it corresponds to one of the turtle samples and snail samples, with a ratio of 200%. The highest and lowest displacement in the maximum force resulting from the impact is at a height of 5 cm, respectively, related to one sample taken from a snail and a turtle with a ratio of 252%, and at a height of 10 cm, respectively, it corresponds to one of the snail samples and turtle samples, with a ratio of 238%.

### 1- مقدمه

جدید با خواص مطلوب است. در همین راستا نیز محققان مواد از قبیل کامپوزیت‌ها، سرامیک‌ها و غیره را ساخته و به‌کار برده‌اند. این مواد علی‌رغم مزایا و ویژگی‌های جالبی که دارند معایبی نیز داشته‌اند که عمده مشکل آن‌ها هزینه تولید و طراحی بالا و دشوار بودن ساخت برخی از این مواد بوده است [1]. سازه‌های سلولی و مشبک با چگالی پایین و سفتی بالا کاربردهای زیادی

علم تقلیدات زیستی علم جدیدی است که با استفاده از ظرفیت‌های موجود و تقلید از سیستم‌های حیاتی به حل مشکلات و ارتقای طراز تکنولوژی‌های موجود پرداخته و امیدبخش حل این معضلات است. علم تقلیدات زیستی با تقلید از طبیعت، سیستم‌ها و سازه‌های موجود به دنبال رسیدن به نمونه‌های

گاستروپود پرداختند و سپس با کمک نرم‌افزار انسیس<sup>1</sup> مدل‌ها شبیه‌سازی کردند. نتایج تجربی و عددی نشان داد شباهت خوبی بین ساختار بیرونی مدل‌های طراحی شده و پوسته گاستروپود وجود دارد.

عملکرد مکانیکی بهینه صدف‌ها و صدف‌های حلزون در سال‌های اخیر توجه زیست‌شناسان، مهندسان و دانشمندان علم مواد را به خود جلب کرده است. مطالعات قبلی نشان داد که کربنات کلسیم (کلسیت یا آراگونیت) با مواد آلی بسیار کمی (کمتر از 5 درصد وزنی) ساختار ترکیبی منحصر به فردی را با سطح سخت تشکیل می‌دهد [13].

صدف مروارید یک بیوکامپوزیت بسیار پیچیده است که اگرچه از یک ماده معدنی شکننده ساخته شده است، اما به طرز قابل توجهی سخت است. بنابراین، آزمایش‌ها و مدل‌های مکانیکی متعددی برای مشخص کردن ویژگی‌های ریزساختاری این عملکرد، به منظور تکرار آن‌ها در مواد مصنوعی مورد استفاده قرار گرفت. در حال حاضر به طور گسترده‌ای شناخته شده است که لغزش صفحه یک مکانیسم کلیدی در استحکام صدف مروارید است [14].

همچنانکه گفته شد سازه‌های سلولی به دلیل سبکی دارای کاربردهای فراوانی به‌ویژه در صنعت هوافضا می‌باشد. الگوبرداری از طبیعت جهت طراحی اولیه این سازه‌ها مورد توجه تعدادی از محققین می‌باشد. در این تحقیق با الگوبرداری از لاک‌پشت، پوسته حلزون و صدف دریایی، شش سازه سلولی نوین طراحی و با استفاده از تکنولوژی چاپ سه‌بعدی ساخته شد. سپس این سازه‌ها تحت آزمایش ضربه سرعت پایین قرار گرفتند و در نهایت نتایج بدست آمده با یکدیگر مقایسه شدند.

## 2- ساخت

شش مدل در سه گروه ( دو مدل از هر یک از لاک‌پشت، پوسته حلزون و صدف دریایی) طراحی شد (جدول 1). شش مدل طراحی شده با ابعاد  $30 \times 30 \times 30 \text{ mm}^3$  در جدول 1 با استفاده از روش ساخت افزایشی ساخته شدند. برای ایجاد مدل‌ها از نرم‌افزار سالدورکز<sup>2</sup> استفاده شد. برای ایجاد فایل‌های چاپ سه‌بعدی از نرم‌افزار سیمپلیفای<sup>3</sup> استفاده شد و با استفاده از فرآیند لایه نشانی مذابی<sup>4</sup> نمونه‌ها ساخته شدند. نمونه‌ها با استفاده از فیلامنت شرکت آیسان و از جنس PETG که یکی از مواد پلیمری رایج در ساخت قطعات بوده و دارای خواص مکانیکی و ضربه‌ای خوبی می‌باشد ساخته شده‌اند. مشخصات فیلامنت مورد استفاده در جدول 2 داده شده است.

## 3- آزمایش

آزمون ضربه روی نمونه‌های ساخته شده توسط دستگاه سقوط وزنه واقع در دانشگاه تفرش انجام شد. ارتفاع مفید این دستگاه در حدود 2.3 m و سیستم بالابر آن توانایی جابه‌جا کردن وزنه تا 160 kg را دارد. اجزا اصلی این دستگاه شامل شاسی، الکتروموتور و گیربکس، سیستم مگنت، میل راهنما و سکوی قرارگیری نمونه می‌باشد (شکل 1).

در این پژوهش داده‌های حاصل از آزمایش توسط حسگر شتاب سنج پیزوالکتریک با ظرفیت 2000 g دریافت می‌شود (شکل 2) این حسگر در قسمت فوقانی پیچ مخصوص سنبه متصل می‌شود. پس از انجام آزمایش ضربه، داده‌ها توسط کابل حسگر به شارژ آمپلی‌فایر و سپس به دیتالاگر ارسال می‌گردد (شکل 3). به منظور ثبت داده‌ها از فیلتراسیون 1000 Hz استفاده گردید.

در زمینه‌های حمل‌ونقل، مهندسی مکانیک، مهندسی پزشکی و دیگر زمینه‌ها دارند [2]. امروزه برخی از ساختارهایی که توسط انسان تولید شده است با الهام از طبیعت و اجزای تشکیل‌دهنده آن بوده است از همین رو می‌توان به چسب‌هایی که با الگوبرداری از پای حشرات تولید شده است اشاره داشت [3]. صنعت دارو و بخشی از علم نانو نیز تحت تأثیر این علم قرار گرفته است [4]. به همین جهت این علم بسیار مورد توجه محققان در علوم مختلف قرار گرفته است و از آنجایی که ساختارهای موجود در طبیعت دارای پیچیدگی‌هایی هستند، ایده‌های بسیار خلاقانه و جدیدی در این زمینه وجود دارد که به مرحله تجاری‌سازی نرسیده‌اند به عنوان مثال تار عنکبوت مقاومتی به اندازه جلیقه ضدگلوله دارد اما با بافتی سبک تشکیل شده است [5] و یا در علم رباتیک نحوه حرکت ربات‌ها با الهام از راه رفتن موجودات با پاها به آن‌ها آزادی عمل و قدرت بیشتری نسبت به چرخ‌ها داده است [6].

محققان با مطالعات بسیار به این موضوع دست یافته‌اند که سازه‌های مشبک هنگامی که در راستای خارج از صفحه خود بارگذاری شوند، استحکام و سفتی بسیار بالایی دارند. زیرا، در این حالت برای تغییر شکل نیاز به کشیده شدن یا فشردن دیواره‌های سازه دارد. با توجه به این امر این سازه‌ها نسبت به وزن خود از مقاومت به ضربه بسیار بالایی برخوردار هستند و به همین علت مورد توجه بیشتر قرار گرفته‌اند [7,8].

درویزه و همکارانش [9] با الهام گرفتن از پوسته خارجی خرماکی ساختار میکروسکوپی این حشره را بررسی و آزمون ضربه را در دو حالت صاف و کروی بر روی پوسته این حشره شبیه‌سازی کردند آن‌ها در زوایای مختلف و در دو سرعت مختلف پوسته را مورد بررسی قرار دادند و در انتهای تحقیق به این نتیجه رسیدند که مکانیزم دفاعی این جانور در زمانی که تنش بر بدن این حشره وارد می‌شود در مواقعی بیش از 600 درصد تنش را کاهش می‌دهد. در مطالعه دیگری که بر روی سازه‌های مشبک توسط میلاد نجفی و همکارانش [10] صورت گرفت آن‌ها چندین سازه سلولی آگزتیک را با سازه‌های غیر آگزتیک تحت آزمون فشار قرار دادند. نتایج نشان داد که سازه‌های آگزتیک سرنیزه‌ای، آنتی تتراکایرال و ری اینترنت به ترتیب 161، 136 و 57 درصد جذب انرژی بیشتری نسبت به سازه غیر آگزتیک لانه زنبوری داشته‌اند.

چانگ و همکاران [11] با الهام از واکنش‌های مکانیکی پوسته لاک‌پشت در برابر بار استاتیکی و دینامیکی، یک مدل از پوسته لاک‌پشت ساخته و این مدل را تحت بارگذاری فشاری به‌صورت عددی و تجربی بررسی کرده و توزیع تنش و جابه‌جایی را در قسمت‌های مختلف پوسته لاک‌پشت به دست آورده‌اند. نتایج نشان داد پوسته لاک‌پشت تحت بار فشاری بیشترین جابه‌جایی عمودی را در انتهای پشتی خود دارد درحالی‌که جابه‌جایی عمودی در قسمت جلویی نصف آن مقدار است. همچنین بیشترین جابه‌جایی افقی پوسته در قسمت انتهایی آن صورت گرفته است. با توجه به این موضوع این باور به وجود آمد که این الگوی تغییر شکل به‌منظور حفاظت بیشتر از اندام‌های داخلی لاک‌پشت و سر آن می‌باشد.







فقیه شجاعی و همکاران [12] با استفاده از روش جدیدی ویژگی‌های هندسی و مکانیکی پوسته نرم‌تنان را برای مدل‌سازی دقیق بررسی کردند. آن‌ها در این مقاله به تجزیه و تحلیل تجربی و مدل‌سازی عددی چهار گونه مختلف پوسته گاستروپود (موجوداتی با جنه نرم که عمدتاً توسط پوسته سنگ آهک مارپیچی حفاظت می‌شوند) پرداختند. آن‌ها ابتدا با کمک دستگاه میکروسکوپ الکترونی به مطالعه ویژگی‌های فیزیکی و ریزساختاری نمونه‌های پوسته

<sup>3</sup> Simplify3D  
<sup>4</sup> FDM

<sup>1</sup> Ansys  
<sup>2</sup> Solid Works

جدول 1 مشخصات نمونه‌ها

Table 1 Characteristics of samples

وزن (g)	مدل	عنوان	شماره نمونه
15		لاک پشت 1	T-1
15		لاک پشت 2	T-2
10		حلزون 1	S-1
10		حلزون 2	S-2
15		صدف 1	O-1
15		صدف 2	O-2

جدول 2 مشخصات فیلامنت PETG استفاده شده برای ساخت نمونه‌ها [15]

Table 2 Specifications of the PETG filament used to make the samples [15]

Filament type	Print temp (C°)	Bed temp (C°)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Tensile strength (MPa)
PETG	230-250	60-80	1.23	49



Fig.1 Drop weight machine

شکل 1 دستگاه سقوط وزنه



Fig. 2 Acceleration sensor

شکل 2 حسگر شتاب

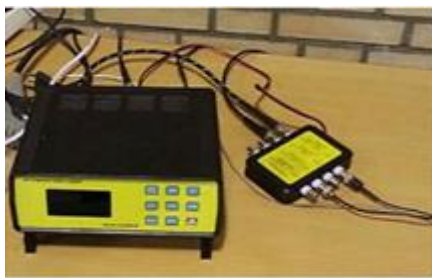


Fig. 3 Charging amplifier and data logger

شکل 3 شارژ آمپلی‌فایر و دیتالاگر

آزمایش بر روی نمونه‌ها ابتدا با ارتفاع سقوط 5 cm که آسیب مشهودی بر روی نمونه‌ها ایجاد نمی‌کند صورت گرفت و سپس بر روی همین نمونه‌ها آزمایش دیگری با ارتفاع سقوط وزنه 10 cm که سبب آسیب مشهودی در تمامی نمونه‌ها می‌شود، صورت گرفت. وزن جسم ضربه‌زننده برای تمام نمونه یکسان و برابر با 2.2 kg استفاده شد.

شکل 4 نمونه‌ای از نمودار خروجی آزمایش‌های انجام شده می‌باشد که توسط سیستم اندازه‌گیری ارائه می‌شود (آزمایش بر روی نمونه T1). همچنانکه

همچنانکه در شکل 6 دیده می‌شود نیروی ضربه نمونه T2 بیشتر از نمونه T1 در دو ارتفاع سقوط ضربه‌زنده می‌باشد. میزان نیرو اعمال شده در نمونه T2 نسبت به نمونه T1 در ارتفاع 5cm و 10cm به ترتیب برابر 11% و 53% بیشتر است. علت اینکه نمونه T2 نیروی ضربه بیشتری نسبت به نمونه T1 دریافت کرده را می‌توان به نوع طراحی و هندسه داخلی نمونه T2 و داشتن الگوی منظم‌تر نسبت به نمونه T1 مربوط دانست.

2-1-4- جابه‌جایی در حداکثر نیروی فشاری

شکل 7 مقدار جابه‌جایی در حداکثر نیروی ایجاد شده در حین ضربه را برای دو نمونه T1 و T2 ساخته شده با الگوبرداری از لاک پشت را نشان می‌دهد.

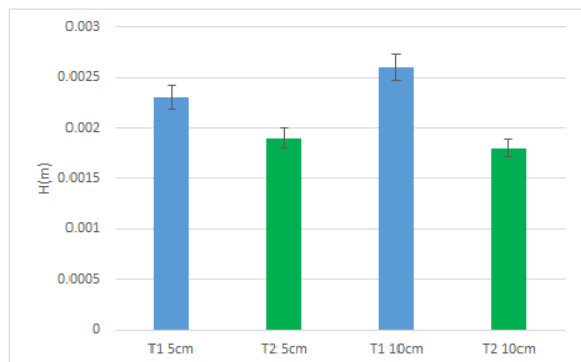


Fig. 7 Diagram of displacement in the maximum compressive force at the height of 5 cm and 10 cm

شکل 7 نمودار جابه‌جایی در حداکثر نیروی فشاری در ارتفاع 5 cm و 10 cm

همانطور که دیده می‌شود هرچه ارتفاع جسم ضربه‌زنده افزایش پیدا کرده است میزان جابه‌جایی نیز افزایش پیدا کرده است. همچنین دیده می‌شود در تمامی ارتفاع‌های سقوط، جابه‌جایی در حداکثر نیرو نمونه T1 بیش از نمونه T2 است. اختلاف بین دو نمونه در ارتفاع 5 cm و 10 cm با توجه به هندسه داخلی و مقاومتی که نسبت به ضربه وارده نشان داده به ترتیب 21% و 44% می‌باشد.

3-1-4- جابه‌جایی کل

شکل 8 مقدار جابه‌جایی کل ایجاد شده در حین ضربه را برای دو نمونه T1 و T2 ساخته شده با الگوبرداری از لاک پشت را نشان می‌دهد.

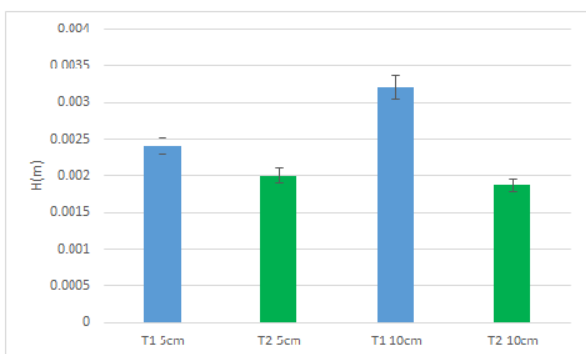


Fig. 8 Total displacement diagram at 5cm and 10cm height

شکل 8 نمودار جابه‌جایی کل در ارتفاع 5 cm و 10 cm

همانطور که دیده می‌شود هرچه ارتفاع جسم ضربه‌زنده افزایش پیدا کرده است، میزان جابه‌جایی کل نیز افزایش پیدا کرده است. همچنین دیده می‌شود در تمامی ارتفاع‌های سقوط، جابه‌جایی نمونه T1 بیش از نمونه T2 است. اختلاف بین دو نمونه در ارتفاع 5cm و 10cm به ترتیب 20% و 71% می‌باشد.

دیده می‌شود این نمودار شتاب برحسب زمان در طی فرآیند ضربه می‌باشد که جهت بررسی به نمودار نیرو-جابه‌جایی تبدیل می‌شود (شکل 5).

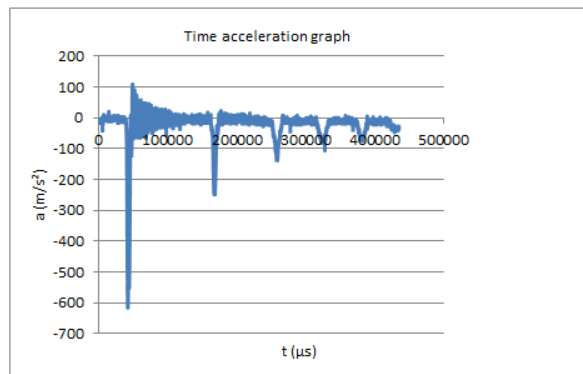


Fig. 4 Acceleration-time diagram of sample T1

شکل 4 نمودار شتاب-زمان نمونه T1

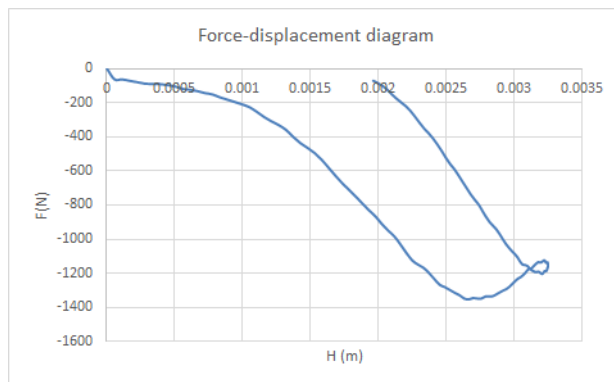


Fig. 5 Force-displacement diagram of sample T1

شکل 5 نمودار نیرو-جابه‌جایی نمونه T1

4- نتایج و بحث

1-1-4- نمونه‌ها با الگوی لاک پشت

1-1-4- حداکثر نیروی فشاری

شکل 6 مقدار حداکثر نیروی ایجاد شده در حین ضربه را برای نمونه‌های T1 و T2 ساخته شده با الگوبرداری از لاک پشت در دو ارتفاع سقوط وزنه را نشان می‌دهد.

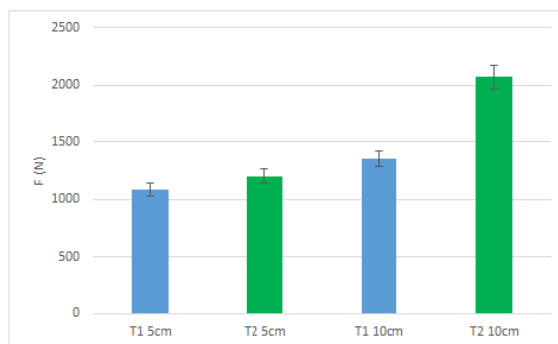


Fig. 6 Diagram of the maximum compressive force applied at the height of 5cm and 10cm

شکل 6 نمودار حداکثر نیروی فشاری اعمال شده در ارتفاع 5 cm و 10cm

حاصل از ضربه به هسته دایروی وارد شده و لذا حالت گنبدی شکل هسته مانع تغییر شکل زیاد سازه شود. میزان تغییر شکل در حداکثر نیروی فشاری در نمونه S1 نسبت به نمونه S2 در ارتفاع 5 cm ، 131% درصد بیشتر و در ارتفاع 10 cm ، 49% کمتر است.

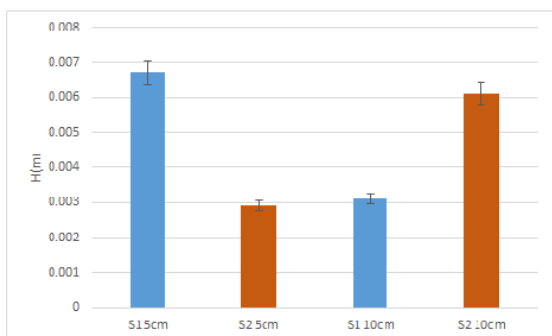


Fig. 10 Diagram of displacement in the maximum compressive force at the height of 5cm and 10cm

شکل 10 نمودار جابه‌جایی در حداکثر نیروی فشاری در ارتفاع 5 cm و 10 cm

### 3-2-4- جابه‌جایی کل

شکل 11 مقدار جابه‌جایی کل ایجاد شده در حین ضربه را برای دو نمونه ساخته شده با الگوبرداری از لاک حلزون را نشان می‌دهد.

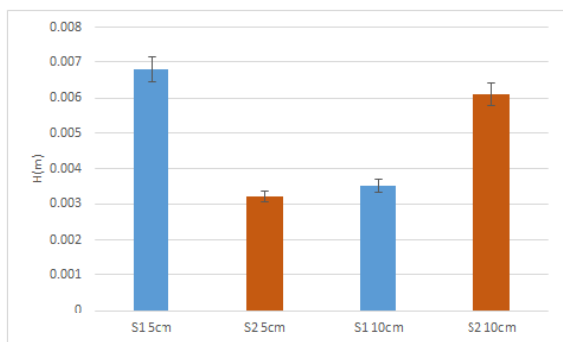


Fig. 11 Total displacement diagram at 5cm and 10cm height

شکل 11 نمودار جابه‌جایی کل در ارتفاع 5cm و 10cm

در شکل 11 مشابه شکل 10 دیده می‌شود هرچه ارتفاع جسم ضربه‌زننده در ضربات بعدی افزایش پیدا کرده است میزان جابه‌جایی کل نیز افزایش پیدا کرده است. همچنین دیده می‌شود کمترین مقدار جابه‌جایی کل مربوط به نمونه S2 در ارتفاع 5 cm و برابر با 0.0032 m و بیشترین مقدار جابه‌جایی نیز مربوط به نمونه S1 در ارتفاع 5 cm و برابر با 0.0068 m است.

### 3-4- بررسی نمونه با الگوی صدف

#### 1-3-4- حداکثر نیروی فشاری

شکل 12 مقدار حداکثر نیروی ایجاد شده در حین ضربه را برای نمونه‌های O1 و O2 ساخته شده با الگوبرداری از لاک صدف در دو ارتفاع سقوط وزنه را نشان می‌دهد.

همچنانکه دیده می‌شود نیروی ضربه نمونه O1 بیشتر از نمونه O2 در دو ارتفاع سقوط ضربه‌زننده می‌باشد. میزان نیرو اعمال شده در نمونه O1 نسبت به نمونه O2 در ارتفاع 5 cm و 10 cm به ترتیب برابر 10% و 4% بیشتر بوده است.

با توجه به نمودار حداکثر نیروی فشاری این اختلاف را می‌توان به این شکل بیان کرد که هرچه نمونه نیروی کمتری در خود جذب کرده باشد جابه‌جایی بیشتری داشته است. به این مفهوم که نمونه سفتی کمتر و جابه‌جایی بیشتری از خود نشان داده است.

### 2-4- نمونه‌ها با الگوی حلزون

#### 1-2-4- حداکثر نیروی فشاری

شکل 9 مقدار حداکثر نیروی ایجاد شده در حین ضربه را برای نمونه‌های S1 و S2 ساخته شده با الگوبرداری از لاک حلزون در دو ارتفاع سقوط وزنه را نشان می‌دهد.

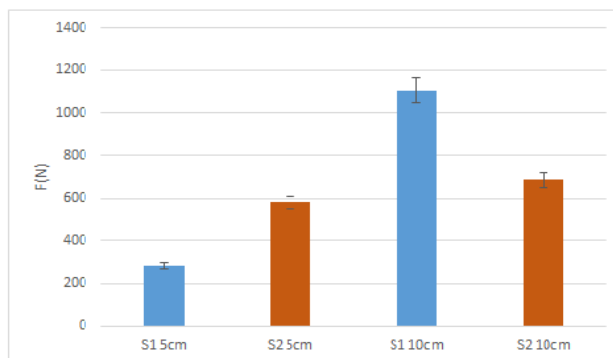


Fig. 9 Diagram of the maximum compressive force at the height of 5 cm and 10 cm

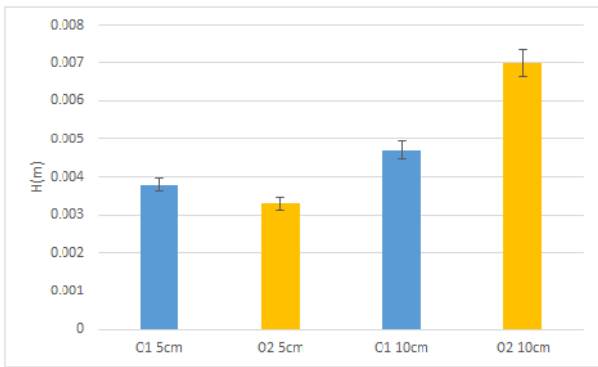
شکل 9 نمودار حداکثر نیروی فشاری در ارتفاع 5 cm و 10 cm

همانطور که مشاهده می‌شود نیروی ضربه نمونه S2 در ارتفاع 5 cm بیشتر از نمونه S1 و در ارتفاع 10 cm کمتر از نمونه S1 می‌باشد. لذا نمونه S2 در ارتفاع 5 cm نسبت به نمونه S1 تحمل نیروی بیشتری از خود نشان داده است اما با تغییر و افزایش ارتفاع، نمونه S2 نیروی کمتری از نمونه S1 جذب کرده است. علت نیروی کمتر نمونه S1 در ارتفاع 5 cm را می‌توان به این موضوع نسبت داد که چون این نمونه با قاب مربعی و هسته دایروی طراحی شده است، در ضربه اول قاب دچار شکست شده و حالت ارتجاعی هسته دایروی باعث شده است نیروی کمتری را به واسطه این شکست جذب کند و در ضربات بعدی نیروی حاصل از ضربه مستقیماً به هسته دایروی وارد شده و نیروی بیشتری تحمل کند.

میزان نیرو اعمال شده در نمونه S2 نسبت به نمونه S1 در ارتفاع 5cm 106% درصد بیشتر و در ارتفاع 10 cm ، 38% کمتر است.

#### 2-2-4- جابه‌جایی در حداکثر نیروی فشاری

شکل 10 مقدار جابه‌جایی در حداکثر نیروی ایجاد شده در حین ضربه را برای دو نمونه S1 و S2 ساخته شده با الگوبرداری از لاک حلزون را نشان می‌دهد. همچنانکه دیده می‌شود جابه‌جایی حداکثر نمونه S1 در ارتفاع 5 cm بیشتر از نمونه S2 و در ارتفاع 10 cm کمتر از نمونه S2 می‌باشد. لذا نمونه S1 در ارتفاع 5 cm نسبت به نمونه S2 حالت ارتجاعی بیشتری داشته و عملکرد بهتری از خود نشان داده است، اما با تغییر و افزایش ارتفاع، نمونه S2 به مراتب از نمونه S1 جابه‌جایی بیشتری داشته باشد. هرچه ارتفاع جسم ضربه‌زننده افزایش یافته نمونه S1 نیز تغییر شکل کمتری نسبت به نمونه S2 پیدا کرده است. علت این امر را همانطور که قبلاً گفته شد می‌توان به این موضوع نسبت داد که چون این نمونه با قاب مربعی و هسته دایروی طراحی شده است در ضربه اول قاب دچار شکست شده است و در ضربات بعدی نیروی



**Fig. 14** Total displacement diagram at 5 cm and 10 cm height  
 شکل 14 نمودار جابه‌جایی کل در ارتفاع 5 cm و 10 cm

در شکل 14 مشابه شکل 13 دیده می‌شود هرچه ارتفاع جسم ضربه‌زننده در ضربات بعدی افزایش پیدا کرده است میزان جابه‌جایی کل نیز افزایش پیدا کرده است. همچنین دیده می‌شود کمترین مقدار جابه‌جایی کل مربوط به نمونه O2 در ارتفاع 5 cm و برابر با 0.0032 m و بیشترین مقدار جابه‌جایی نیز مربوط به نمونه O2 در ارتفاع 10 cm و برابر با 0.007 m است.

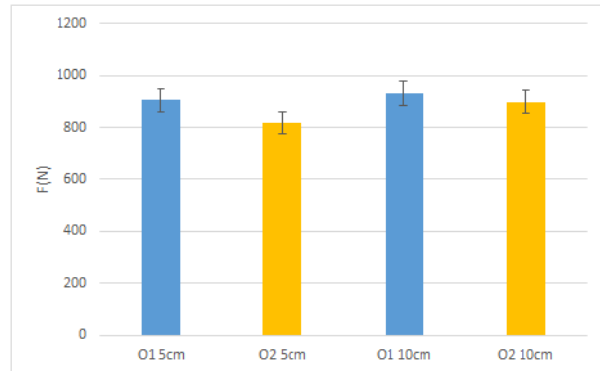
#### 4-4- مقایسه نمونه‌ها

##### 1-4-4- حداکثر نیروی فشاری

شکل 15 مقایسه حداکثر نیروی فشاری بین شش مدل طراحی شده را در ارتفاع سقوط 5 cm نشان داده است. همچنانکه دیده می‌شود در ارتفاع سقوط 5 cm، کمترین نیروی به وجود آمده در اثر ضربه مربوط به نمونه S1 به مقدار 282 N و سپس مربوط به نمونه S2 به مقدار 059 N می‌باشد. به عبارتی دو مدل الگوبرداری شده از حلزون بر اثر ضربه اول یکسان، کمترین نیروی ضربه را نسبت به نمونه‌های دیگر که با الگوبرداری از لاک لاک‌پشت و لاک صدف ساخته شده‌اند، دارا می‌باشند. در مقابل، نمونه‌های الگوبرداری شده از لاک‌پشت طی ضربه اول یکسان با ارتفاع سقوط 5 cm بیشترین نیرو ضربه وارده را متحمل می‌شوند. نیروی برآیند حاصل از ضربه برای دو نمونه الگوبرداری شده از لاک لاک‌پشت 1070 N و 1200 N به ترتیب برای نمونه‌های T1 و T2 می‌باشد. همچنانکه دیده می‌شود نیروی برآیند حداکثر (در نمونه T2) بیش از چهار برابر نیروی منتجه حداقل (در نمونه S1) می‌باشد. نتیجه مشابهی را در ضربه دوم (ارتفاع سقوط وزنه 10 cm) می‌توان با توجه به شکل 16 مشاهده کرد. در این حالت ضربه، نیروی برآیند حداکثر (در نمونه T2) به مقدار 2050 N و نیروی منتجه حداقل (در نمونه S2) به مقدار 685 N می‌باشد.

##### 2-4-4- جابه‌جایی در حداکثر نیروی فشاری

شکل 17 مقایسه جابه‌جایی در حداکثر نیروی فشاری بین شش مدل طراحی شده را در ارتفاع سقوط 5cm نشان داده است. همچنانکه دیده می‌شود در ارتفاع سقوط 5cm، کمترین جابه‌جایی در حداکثر نیروی فشاری در اثر ضربه مربوط به نمونه T2 به اندازه 0.002 m و سپس مربوط به نمونه T1 به اندازه 0.0023 m می‌باشد. به عبارتی دو مدل الگوبرداری شده از لاک لاک‌پشت بر اثر ضربه اول یکسان کمترین جابه‌جایی در حداکثر نیروی فشاری را نسبت به نمونه‌های دیگر که با الگوبرداری از لاک حلزون و لاک صدف ساخته شده‌اند را دارا می‌باشند. در مقابل، نمونه S1 الگوبرداری شده از لاک حلزون طی ضربه اول یکسان با ارتفاع سقوط 5cm بیشترین جابه‌جایی در حداکثر نیروی فشاری

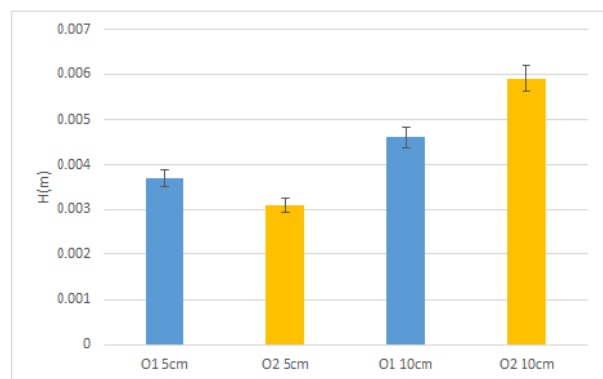


**Fig. 12** Diagram of the maximum compressive force at the height of 5 cm and 10 cm

شکل 12 نمودار حداکثر نیروی فشاری در ارتفاع 5 cm و 10 cm

#### 2-3-4- جابه‌جایی در حداکثر نیروی فشاری

شکل 13 مقدار جابه‌جایی در حداکثر نیروی ایجاد شده در حین ضربه را برای نمونه‌های O1 و O2 ساخته شده با الگوبرداری از لاک صدف در دو ارتفاع سقوط وزنه را نشان می‌دهد.



**Fig. 13** Diagram of displacement in the maximum compressive force at the height of 5 cm and 10 cm

شکل 13 نمودار جابه‌جایی در حداکثر نیروی فشاری در ارتفاع 5 cm و 10 cm

همچنانکه دیده می‌شود جابه‌جایی حداکثر نمونه O1 در ارتفاع 5 cm بیشتر از نمونه O2 و در ارتفاع 10 cm کمتر از نمونه O2 می‌باشد. لذا نمونه O1 در ارتفاع 5 cm نسبت به نمونه O2 حالت ارتجاعی بیشتری داشته و عملکرد بهتری از خود نشان داده است اما با تغییر و افزایش ارتفاع، نمونه O2 به مراتب از نمونه O1 جابه‌جایی بیشتری داشته باشد. هرچه ارتفاع جسم ضربه‌زننده افزایش یافته نمونه O1 نیز تغییر شکل کمتری نسبت به نمونه O2 پیدا کرده است. به عبارتی نمونه O1 در ارتفاع 5 cm درحالی که نیروی بیشتری را تحمل کرده است میزان جابه‌جایی بیشتری هم داشته که این امر به علت ضعف هسته داخلی نمونه در نقطه اتصال آن بوده است.

میزان تغییر شکل در حداکثر نیروی فشاری در نمونه O1 نسبت به نمونه O2 در ارتفاع 5 cm 19% درصد بیشتر و در ارتفاع 10 cm، 22% کمتر است.

#### 3-3-4- جابه‌جایی کل

شکل 14 مقدار جابه‌جایی کل ایجاد شده در حین ضربه را برای دو نمونه ساخته شده با الگوبرداری از لاک صدف را نشان می‌دهد.

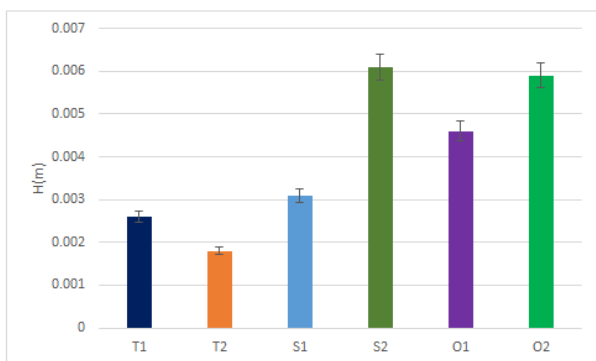


Fig. 18 Comparison of displacement in the maximum compressive force at a height of 10 cm

شکل 18 مقایسه جابه‌جایی در حداکثر نیروی فشاری در ارتفاع 10cm

#### 3-4-4- جابه‌جایی کل

شکل 19 مقایسه جابه‌جایی کل بین شش مدل طراحی شده را در ارتفاع سقوط 5 cm نشان داده است. همچنانکه دیده می‌شود در ارتفاع سقوط 5 cm کمترین جابه‌جایی کل در اثر ضربه مربوط به نمونه T2 به اندازه 0.002 m و سپس مربوط به نمونه T1 به اندازه 0.0024 m می‌باشد. به عبارتی دو مدل الگوبرداری شده از لاک لاک پشت بر اثر ضربه اول یکسان کمترین جابه‌جایی کل را نسبت به نمونه‌های دیگر که با الگوبرداری از لاک حلزون و لاک صدف ساخته شده‌اند را دارا می‌باشند. در مقابل، نمونه S1 الگوبرداری شده از لاک حلزون طی ضربه اول یکسان با ارتفاع سقوط 5 cm بیشترین جابه‌جایی کل را به مقدار 0.0067 m تجربه می‌کند. نمونه O1، O2 و S2 به ترتیب در جایگاه بعدی بیشترین جابه‌جایی کل طی ضربه اول یکسان با ارتفاع سقوط را دارند. نتیجه مشابهی را در ضربه دوم (ارتفاع سقوط وزنه 10 cm) می‌توان با توجه به شکل 20 برای کمترین جابه‌جایی کل مشاهده کرد. در این حالت ضربه، کمترین جابه‌جایی کل (در نمونه T2) به مقدار 0.002 m و بیشترین جابه‌جایی کل (در نمونه O2) به اندازه 0.007 m می‌باشد.

#### 5- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر خواص ضربه‌ای ساختارهای سلولی با الگوی جانوری مورد بحث و بررسی قرار گرفت. در این مطالعه خواص نظیر حداکثر نیروی فشاری، جابه‌جایی در حداکثر نیروی فشاری و جابه‌جایی کل بررسی شد. ساخت نمونه‌ها و مدل‌ها در ابتدا با انتخاب الگوی مناسب آغاز گردید و سپس با استفاده از یک فرآیند ساخت افزایشی (چاپ سه‌بعدی) به روش لایه نشانی مذابی صورت گرفت. سازه‌های ساخته شده تحت بارگذاری ضربه سرعت پایین با وزنه 2.2kg و در ارتفاع 5 cm و 10 cm تحت بررسی قرار گرفتند.

بررسی نتایج آزمون ضربه که در نمونه‌های لاک‌پشت انجام شد نشان داد، در ضربه اول با ارتفاع 5 cm نمونه T2، 11 درصد نیروی فشاری بیشتری را نسبت به نمونه T1 متحمل شده است. همچنین، در بررسی میزان جابه‌جایی در حداکثر نیروی فشاری و جابه‌جایی کل مشخص گردید، نمونه T2 نسبت به نمونه T1، 21 و 20 درصد به ترتیب در جابه‌جایی در حداکثر نیروی فشاری و جابه‌جایی کل مقدار کمتری داشته است. در ارتفاع 10cm نمونه T2، 53 درصد نیروی فشاری بیشتری را نسبت به نمونه T1 متحمل شده است. همچنین میزان جابه‌جایی در حداکثر نیروی فشاری و جابه‌جایی کل نمونه T2 نسبت به نمونه T1 به ترتیب 44 و 71 درصد مقدار کمتری داشته است.

را به مقدار 0.0067 m تجربه می‌کند. نمونه O2، S2 و O1 به ترتیب در جایگاه بعدی بیشترین جابه‌جایی در حداکثر نیروی فشاری طی ضربه اول یکسان با ارتفاع سقوط را دارند.

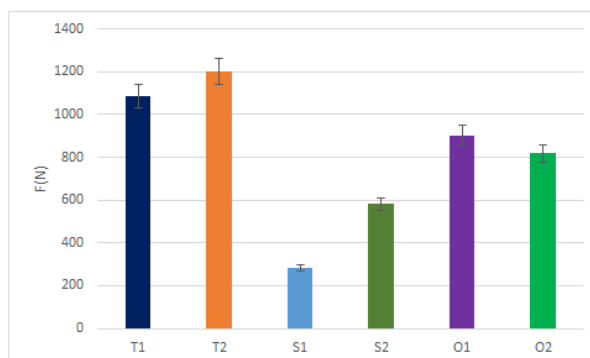


Fig. 15 Comparison of the maximum compressive force at a height of 5 cm

شکل 15 مقایسه حداکثر نیروی فشاری در ارتفاع 5cm

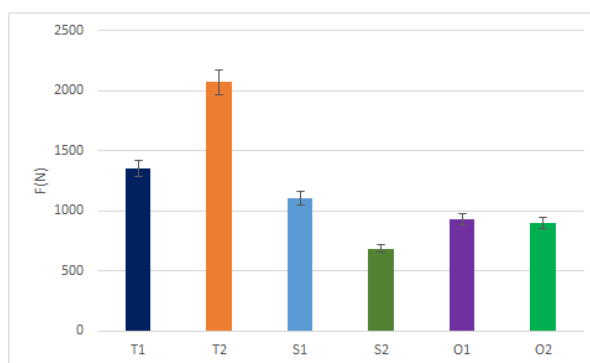


Fig. 16 Comparison of the maximum compressive force at a height of 10 cm

شکل 16 مقایسه حداکثر نیروی فشاری در ارتفاع 10 cm

نتیجه مشابهی را در ضربه دوم (ارتفاع سقوط وزنه 10 cm) می‌توان با توجه به شکل 18 برای کمترین جابه‌جایی در حداکثر نیروی فشاری مشاهده کرد. در این حالت ضربه، کمترین جابه‌جایی در حداکثر نیروی فشاری (در نمونه T2) به مقدار 0.0018 m و بیشترین جابه‌جایی در حداکثر نیروی فشاری (در نمونه S1) به مقدار 0.0061 m می‌باشد.

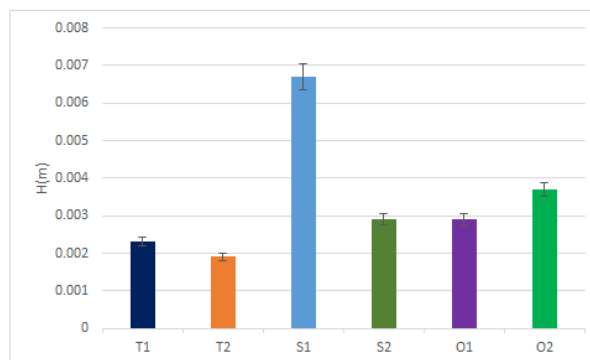


Fig. 17 Comparison of displacement in the maximum compressive force at a height of 5 cm

شکل 17 مقایسه جابه‌جایی در حداکثر نیروی فشاری در ارتفاع 5 cm

نمونه S1 به ترتیب 71 و 70 درصد مقدار کمتری داشته است. در ارتفاع 10cm نمونه T2، 200 درصد نیروی فشاری بیشتری را نسبت به نمونه S2 متحمل شده است. همچنین، میزان جابه‌جایی در حداکثر نیروی فشاری مشخص گردید، نمونه T2 نسبت به نمونه S2، 70 درصد و در میزان جابه‌جایی در جابه‌جایی کل نمونه T2 نسبت به نمونه O2، 70 درصد جابه‌جایی کمتری داشته است.

#### 6- مراجع

- [1] Grossmann, J. N., Schmitz, H., "Mechanical properties of terrestrial isopods," pp. 35-44, 2012.
- [2] Vinson, J., "The behavior of sandwich structures of isotropic and composite materials," New York: Routledge, pp.378, 2018.
- [3] Saracoglu, B. O., "Identification of Technology Performance Criteria for CAD/CAM/CAE/CIM/CAL in Shipbuilding Industry," pp. 1635-1646, 2006.
- [4] Kamm, B., and Kamm, M., "Principles of biorefineries Applied microbiology and biotechnology," Vol. 64, No. 2, pp.137-145. 2004.
- [5] Benyus, J., "Innovation Inspired by Nature. New York, USA: William Morrow & Company," pp. 308, 1997.
- [6] Zang, M.Q., "Self healing in polymers and polymer composites. Concepts, realization and outlook: A review". Polymer Letters, Vol. 2, No. 4, pp238-250, 2008.
- [7] Yazdani Sarvestani, H., Akbarzadeh, A. H., Niknam, H., Hermenean, K., "3D printed architected polymeric sandwich panels: Energy absorption and structural performance," Composite Structures. pp. 886-909. 2018.
- [8] Summers, J. D., Ju, J., "Compliant hexagonal periodic lattice structures having both high shear strength and high shear strain," Materials & Design. pp. 512-524. 2011.
- [9] Darvizah, A., "Investigation of the microscopic structure and mechanical behavior of the shell using experimental observations and numerical modeling," In Persian, Modares Mechanical Engineering Journal, pp. 183-190, 2013.
- [10] Najafi, M., Ahmadi, H., Liaghat, G. H. "Experimental and Numerical Investigation of Energy Absorption in Auxetic Structures under Quasistatic Loading," In Persian, Modares Mechanical Engineering. pp. 415- 424. 2020.
- [11] Zhang, W., Zhang, C., and Chen, Z., "Numerical Study of the Mechanical Response of Turtle Shell," Journal of Bionic Engineering, pp 330-335, 2012.
- [12] Faghieh Shojaei, M., Mohammadi, V., Rajabi, H., Darvizeh, A., "Experimental analysis and numerical modeling of mollusk shells as a three-dimensional integrated volume", journal of the mechanical behavior of biomedical materials pp. 38-54. 2012.
- [13] Luz, G. M., Mano, J. F., "Biomimetic design of materials and biomaterials inspired by the structure of nacr," Mathematical Physical and Engineering Sciences pp. 1587-1605. 2009.
- [14] Currey, J. D., Taylor, J. D., "The mechanical behavior of some molluscan hard tissues," Journal of Zoology pp. 395-406. 1974.
- [15] www.esun3d.net

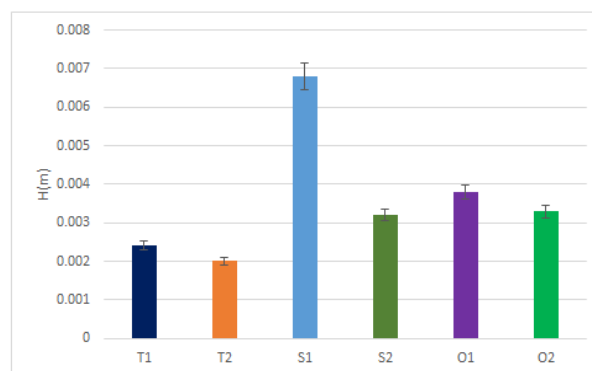


Fig. 19 Comparison of total displacement at a height of 5cm

شکل 19 مقایسه جابه‌جایی کل در ارتفاع 5 cm

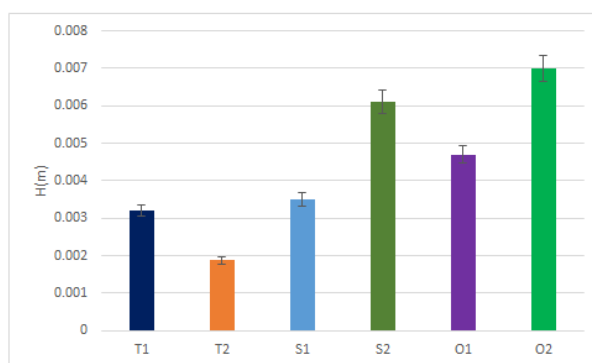


Fig. 20 Comparison of total displacement at a height of 10 cm

شکل 20 مقایسه جابه‌جایی کل در ارتفاع 10 cm

بررسی انجام شده از نتایج آزمون ضربه بر روی نمونه‌های حلزون نشان داد، در ضربه اول با ارتفاع 5cm نمونه S2، 106 درصد نیروی فشاری بیشتری را نسبت به نمونه S1 متحمل شده است. همچنین، در بررسی میزان جابه‌جایی در حداکثر نیروی فشاری و جابه‌جایی کل مشخص گردید که نمونه S2 نسبت به نمونه S1 به ترتیب 131 و 52 درصد مقدار کمتری داشته است. در ارتفاع 10 cm نمونه S2، 38 درصد نیروی فشاری کمتری را نسبت به نمونه S1 متحمل شده است. همچنین میزان جابه‌جایی در حداکثر نیروی فشاری و جابه‌جایی کل نمونه S2 نسبت به نمونه S1 به ترتیب 49 و 42 درصد مقدار بیشتری داشته است.

بررسی انجام شده از نتایج آزمون ضربه بر روی نمونه‌های صدف نشان داد که، در ضربه اول با ارتفاع 5 cm نمونه O2، 10 درصد نیروی فشاری کمتری را نسبت به نمونه O1 متحمل شده است. همچنین، در بررسی میزان جابه‌جایی در حداکثر نیروی فشاری و جابه‌جایی کل مشخص گردید که نمونه O2 نسبت به نمونه O1 به ترتیب 19 و 15 درصد مقدار کمتری داشته است. در ارتفاع 10cm نمونه O2، 4 درصد نیروی فشاری کمتری را نسبت به نمونه O1 متحمل شده است. همچنین میزان جابه‌جایی در حداکثر نیروی فشاری و جابه‌جایی کل نمونه O2 نسبت به نمونه O1 به ترتیب 22 و 48 درصد مقدار بیشتری داشته است.

بررسی نتایج آزمون ضربه که در بین شش نمونه انجام شد نشان داد که در ضربه اول با ارتفاع 5 cm نمونه T2، 325 درصد نیروی فشاری بیشتری را نسبت به نمونه S1 متحمل شده است. همچنین، در بررسی میزان جابه‌جایی در حداکثر نیروی فشاری و جابه‌جایی کل مشخص گردید، نمونه T2 نسبت به