



# Experimental Investigation of the Effect of Using Shear-Thickening Fluid in the Structure of Honeycomb-Core Sandwich Panels on Energy Absorption in Low-Velocity Impact Loading

## ARTICLE INFO

### Article Type

Original Research

### Authors

Astaraki S.<sup>1</sup>

Zamani E.<sup>1\*</sup>

Pol M.H.<sup>2</sup>

### How to cite this article

Astaraki S., Zamani E., Pol M.H. Experimental Investigation of the Effect of Using Shear-Thickening Fluid in the Structure of Honeycomb-Core Sandwich Panels on Energy Absorption in Low-Velocity Impact Loading. Modares Mechanical Engineering; 2023;23(09):531-541.

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

<sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering, Tafresh University, Tafresh, Iran

### \*Correspondence

Address: Shahrekord University, Department of Mechanical Engineering, Shahrekord, Iran.

zamani.ehsan@sku.ac.ir

### Article History

Received: July 3, 2023

Accepted: August 10, 2023

ePublished: October 29, 2023

## ABSTRACT

In this research, energy absorption in sandwich panel structures with honeycomb core and skin made of glass-epoxy multi-layer composite, aluminum, and two-dimensional glass fabrics impregnated with shear-thickening fluid under low-velocity impact loading has been investigated. Polyethylene glycol 400 and hydrophilic fumed silica with nanometer dimensions were used to make the shear thickening fluid, and then a rheometer was used to verify the rheological properties of the fluid. The test was carried out at two heights of 100 and 500 mm with a drop weight device. The sandwich panel honeycomb core has been tested once filled with shear thickening fluid and again empty of shear thickening fluid. The results of the rheology test show that the viscosity value increases with the increase of the shear rate. The impact test results show an increase in energy absorption in the structure of sandwich panels filled with shear thickening fluid compared to empty sandwich panels. At the drop height of 500 mm, the absorption of specific energy in the sandwich panel structure with a skin made of two-dimensional glass fabrics impregnated with shear thickening fluid, the ratio of sandwich panel with a skin made of aluminum and composite increased by 27.93, and 9.47%, respectively, and energy absorption in The sandwich panel with composite skin has increased by 16.86% compared to the sandwich panel with aluminum skin.

**Keywords** Energy Absorption, Sandwich Panel, Shear Thickening Fluid, Composite

## CITATION LINKS

1- Experimental and numerical study ... 2- Drop-weight impact ... 3- Crushing behaviors... 4- Behaviour of continuous fiber ... 5- Impact responses of sandwich 6- An experimental 7- Single and double-layer... 8- Experimental study ... 9- Low-velocity impact behaviour of a shear... 10- Performance and damage .... 11- A review of properties and .... 12- Numerical simulation of shear .... 13- Performance Analysis of Ultra High 14- An Experimental and numerical... 15- Hypervelocity impacts of ... 16- Dynamic properties of sandwich .... 17- Dynamic response ... 18- An introduction ... 19- Dynamic properties ... 20- The influence of... 21- Shear thickening ... 22- Rheometry of novel shear thickening ... 23- Numerical modeling of fabrics ... 24- The influences of rheological ... 25- Ballistic performance of Kevlar ... 26- Impact response of... 27- Designing of hybrid soft ... 28- Deconstructing the role of shear... 29- The ballistic impact ... 30- An investigation on composite ... 31- Investigating the behavior ... 32- The effect of silicon carbide additives... 33- Functionalization of silica ... 34- Structure induced thickening ... 35- Ballistic impact performance of multi-... 36- The stab resistance of fabrics ... 37- Mechanical behavior of 3D GFRP composite... 38- Improving the impact resistance ... 39- Stab resistance of shear thickening fluid ... 40- The role of shear-thickening ... 41- Numerical and experimental investigations ... 42- Tuning the structure of 3D woven ... 43- Behavior of Shear Thickening Fluid ... 44- Discontinuous and dilatant ... 45- Explanations for the cause of shear thickening ... 46- The rheology of Brownian suspensions... 47- Shear thickening ... 48- Hydrodynamic and contact ... 49- Mechanical characterization of... 50- Low velocity impact behavior... 51- Investigation of mechanical performance of 3D ... 52- Off-axis angle sensitivity... 53- Effect of bias yarn on tensile... 54- Experimental and numerical... 55- Dynamic computer simulation... 56- Crashworthiness analysis and ... 57- An experimental study on... 58- Drop-weight impact behavior ... 59- Dynamic compressive response ... 60- Loading noise effects on. 61- Exploring concentration, surface. .... 62- Rheology of fumed silica... 63- Preparation and ... 64- The rheology of Brownian...

## بررسی تجربی تاثیر استفاده سیال غلیظ شونده برشی در ساختار ساندویچ پانل های هسته لانه زنبوری بر جذب انرژی در بارگذاری ضربه سرعت

### پایین

سجاد استرکی<sup>۱</sup>، احسان زمانی<sup>۲\*</sup>، محمدحسین پل<sup>۲</sup>

۱- دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد، ایران  
۲- دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تفرش، ایران

### چکیده

در این پژوهش، جذب انرژی در سازه ساندویچ پنل با هسته لانه زنبوری و پوسته از جنس کامپوزیت شیشه-اپوکسی چند لایه، آلومینیم و پارچه های شیشه ای دوبعدی آغشته به سیال غلیظ شونده برشی تحت بارگذاری ضربه سرعت پایین مورد بررسی قرار گرفته است. برای ساخت سیال غلیظ شونده برشی از پلی اتیلن گلیکول ۴۰۰ و سیلیکای دوده شده آب دوست با ابعاد نانومتری استفاده شده و سپس برای صحت سنجی از خواص رئولوژی سیال از دستگاه رئومتر استفاده شده است. آزمایش در دو ارتفاع ۱۰۰ و ۵۰۰ میلی متری با دستگاه سقوط وزنه انجام شده است. هسته لانه زنبوری ساندویچ پنل یک بار با سیال غلیظ شونده برشی پر شده و بار دیگر خالی از سیال غلیظ شونده برشی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج آزمایش رئولوژی نشان دهنده آن است که با افزایش نرخ برش مقدار ویسکوزیته افزایش پیدا می کند. نتایج آزمایش ضربه نشان دهنده افزایش میزان جذب انرژی در سازه ساندویچ پنل های پر شده با سیال غلیظ شونده برشی نسبت به ساندویچ پنل های تو خالی می باشد. در ارتفاع سقوط ۵۰۰ میلی متری جذب انرژی ویژه در سازه ساندویچ پنل با جنس پوسته از پارچه آغشته به سیال غلیظ شونده برشی نسبت ساندویچ پنل با جنس پوسته از آلومینیم و کامپوزیت به ترتیب ۲۷/۹۳ و ۹/۴۷ درصد افزایش یافته و جذب انرژی در ساندویچ پنل با جنس پوسته از کامپوزیت نسبت به ساندویچ پنل با جنس پوسته از آلومینیم ۱۶/۸۶ درصد افزایش یافته است.

**کلیدواژه‌ها:** جذب انرژی، ساندویچ پنل، سیال غلیظ شونده برشی، کامپوزیت

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۱۹

\*نویسنده مسئول: zamani.ehsan@sku.ac.ir

### ۱- مقدمه

سازه های ساندویچ پنل به طور گسترده ای به عنوان مواد کامپوزیتی سبک وزن به دلیل سفتی و ظرفیت جذب انرژی بالا برای کاربردهای مهندسی بالا مانند خودروسازی، حمل و نقل، کشتی سازی و وسایل محافظ شخصی استفاده می شوند [1-4]. استحکام بالا و وزن کم یکی از خواص مهم ساندویچ پانل است. ساندویچ پانل از پوسته و هسته تشکیل شده است و هسته دارای چگالی کم است که پوسته های بیرونی را به هم متصل می کند [5-6]. وجود صدمات ناشی از تصادفات باعث افزایش تقاضا برای استفاده از ساندویچ با جرم کم شده است. استفاده از ساندویچ پانل با مواد جدید می تواند در جذب انرژی ناشی از برخورد شدید موثر باشد. در کامپوزیت های پلیمری تقویت شده با الیاف کربن و شیشه نشان دهنده بهبود جذب انرژی می باشد [7-14]. علاوه بر این،

ساندویچ پنل ها را می توان با مواد جاذب انرژی مختلف مانند سیال غلیظ کننده برشی تقویت کرد تا مقاومت در برابر ضربه و جذب انرژی را بهبود بخشد. به طور معمول، سازه های ساندویچ پنل تقویت شده با سیال غلیظ شونده برشی به دلیل خواص میرایی، پر شدن راحت و رفتار جذب انرژی مورد توجه قابل توجهی قرار گرفته اند [15-17]. سیال غلیظ شونده برشی یک سیال غیر نیوتنی است که به دلیل افزایش نرخ برش ویسکوزیته آن تغییر می کند. هنگامی که اثر نرخ برش را حذف شود ویسکوزیته سیال به حالت اولیه خود باز می گردد [18-21]. سیالات غلیظ شونده برشی اخیراً در سازه های انرژی و ضربه گیرها به دلیل تغییر ویسکوزیته آن ها با تغییر نرخ برش استفاده شده است [22-43]. پس از انجام مطالعات، نظریه نظم و به هم ریختگی توسط هافمن و همکاران بحث شده است [44,45]. دلایل مهمی در خواص غلیظ شدن برشی در جذب انرژی وجود دارد که می توان گفت در اثر افزایش نرخ برش، جریان یک لایه منظم به یک جریان چسبناک و نامنظم تبدیل می شود و تغییر حالت جریان از نظم به بی نظمی باعث تعلیق شدید می شود. با حذف نرخ برش، ویسکوزیته به حالت اولیه باز می گردد. محققان به این نتیجه رسیدند که این رفتار خاص به طور کامل تحت تاثیر یک جهت گیری منظم طبق فرضیه هیدروکلاستر (Hydrocluster)، تشکیل خوشه هایی از ذرات سیلیکا در اثر افزایش نرخ برش منجر به رفتار غلیظ شدن برشی می شود [46-48]. اخیراً استفاده از پارچه های سه بعدی به عنوان پوسته برای پانل های ساندویچ و مواد کامپوزیت افزایش یافته است [49-54] و به دلیل پتانسیل بالای سیالات غلیظ کننده برشی در جذب انرژی در این پژوهش سعی بر استفاده از این نوع مواد در ساختار جاذب انرژی شده است. مطالعات رئولوژی توسط یک رئومتر دینامیکی (MCR301: Anton Paar) انجام شده است. در واقع، تعداد زیادی از مطالعات بر روی سیالات غلیظ شونده برشی انجام شده که ساخت بیش تر آن ها بر روی پلی اتیلن گلیکول ۲۰۰ متمرکز شده اند. سعی شده است تا خواص رئولوژی سیال غلیظ شونده برشی تهیه شده با پلی اتیلن گلیکول ۴۰۰ و سیلیکای دوده شده با کسر وزنی ۲۵ % نسبت به وزن کل سیال مورد بررسی قرار گیرد. استفاده از سیال غلیظ شونده برشی به عنوان پرکننده در ساختار ساندویچ پنل با تزریق مستقیم درون سازه لانه زنبوری و مقایسه پوسته های گوناگون بر جذب انرژی در ساختار ساندویچ پنل و روش استفاده از هات پلیت برای حذف اتانول از سیال غلیظ شونده برشی که مانع از تشکیل حباب هایی که ممکن است بر عملکرد سیال غلیظ شونده برشی تاثیر بگذارد می توان از جنبه های نو آورانه این پژوهش نام برد. در این سازه از پوسته های کامپوزیت آلومینیم و پارچه های شیشه ای آغشته به سیال غلیظ شونده برشی استفاده شده است. یک اثر هم افزایی بین پارچه های شیشه ای و افزودنی سیال غلیظ شونده برشی به دست آمد که قبلاً بررسی

## ۲-۵- بازده نیروی لهیدگی

اندازه گیری این معیار بر اساس نیروهای وارد بر جسم است. هنگامی که یک جاذب بتواند نیروی زیادی را در حین ضربه (نیروی متوسط) جذب کند و همچنین در ابتدای ضربه نیروی کمتری داشته باشد، به حالت بهینه نزدیک است و از نظر کارایی مطلوب تری محسوب می شود.

$$CFE = \frac{P_m}{P_{max}} * 100 \quad (5)$$

## ۳- آزمایش تجربی

### ۳-۱- مواد

پوسته ساندویچ پانل های مورد استفاده در این تحقیق شامل ورق-هایی با ضخامت ۰/۶ میلی متر از آلومینیوم با آلیاژ ۱۱۰۰، کامپوزیت شیشه- اپوکسی و پارچه شیشه ای (با چگالی سطحی ۰/۱۶۵ کیلوگرم بر متر مربع) ۵ لایه آغشته به سیال غلیظ شونده برشی با کسر وزنی ۲۵٪ در نظر گرفته شده است. سازه لانه زنبوری با آلیاژ ۱۱۰۰ با طول ضلع سلولی ۵ میلی متر و ضخامت ورق ۸۰ میکرون و ارتفاع ۸ میلی متر در نظر گرفته شده است. موادی چون نانوذرات سیلیکای دوده شده آب دوست با اندازه ذرات اولیه ۱۲ نانومتر، پلی اتیلن گلیکول با علامت تجاری PEG400، با وزن مولکولی متوسط ۴۰۰ گرم بر مول ساخته شده توسط شرکت مرک آلمان و اتانول با خلوص ۹۹/۵٪ برای ساخت سیال غلیظ شونده برشی استفاده شده است.

### ۳-۲- روش ساخت ورق کامپوزیت شیشه- اپوکسی

در این پژوهش کسر وزنی ورق کامپوزیت اپوکسی ۴۰٪ در نظر گرفته شده است. برای ساخت ورق کامپوزیت ابتدا ۵ لایه پارچه شیشه ای دوبعدی با چگالی سطح ۰/۱۶۵ کیلوگرم بر متر مربع و ابعاد ۵۰۰×۵۰۰ میلی متر برش داده شده است. در این تحقیق رزین پلیمری انتخاب شده است و این نوع رزین دارای دو قسمت است در قسمت اول پایه اپوکسی از رزین با ویسکوزیته کم با نام تجاری ML-506 و قسمت دوم از پلی آمین با نام تجاری HA-11 می باشد که با نسبت وزنی ۱۰۰:۳۰ ساخته شده است. رزین با استفاده از برس به صورت دستی روی پارچه ها اضافه شده است. روش کیسه خلاء برای حباب زدایی پارچه آغشته به رزین اپوکسی مورد استفاده قرار گرفت و در دمای اتاق عملیات پخت کامپوزیت به مدت ۲۴ ساعت انجام شد و در پایان ورق کامپوزیتی به ابعاد مربعی به طول ضلع ۵۰ میلی متر برش داده شده است.



شکل ۱) نمایی آماده برخی از مواد اولیه: (الف) سیلیکای دوده شده، (ب) پلی اتیلن گلیکول، (پ) سازه لانه زنبوری

نشده است. هدف از این مطالعه و بررسی تاثیر جذب انرژی در یک ساندویچ پانل هسته لانه زنبوری پر شده با سیال غلیظ شونده برشی با کسر وزنی ۲۵ درصد در بارگذاری ضربه ای با سرعت پایین است. ابتدا پاسخ رئولوژیکی سیال غلیظ شونده برشی پرداخته و رفتار ضخیم شدن برشی مشاهده شد. سپس رفتار ضربه ای سرعت پایین در ساختار ساندویچ پانل های ساخته شده با پوسته های مختلف و پرکننده سیال غلیظ شونده برشی مورد بررسی قرار گرفت.

## ۲- پارامترهای جذب انرژی

پارامترهای زیادی در بررسی جذب انرژی وجود دارد و پژوهشگران سعی کرده اند این پارامترها را برای ساخت سازه جاذب انرژی و بهینه سازی آن ها استفاده کنند تعدادی از پارامترهای مورد بررسی در این پژوهش به شرح زیر می باشد<sup>[55,56]</sup>.

### ۲-۱- جذب انرژی

مقدار جذب انرژی به طور گسترده ای برای ارزیابی ویژگی های جذب انرژی سازه های جاذب انرژی استفاده شده است که نشان دهنده مقدار انرژی جذب شده در طول فرآیند ضربه می باشد و می توان به صورت روابط زیر محاسبه شود که در آن  $F(x)$  مقدار نیرو تابعی از جابجایی ( $x$ ) در هنگام ضربه است و  $d$  نشان دهنده مقدار فشردگی ساندویچ پنل می باشد.

$$EA = \int_0^d F(x) dx \quad (1)$$

### ۲-۲- نیروی متوسط

انرژی جذب شده تقسیم بر فاصله ای که جسم فشرده می شود به عنوان نیروی متوسط شناخته می شود و طبق رابطه زیر محاسبه می شود. که در آن  $E$  و  $\delta t$  به ترتیب نیرو و جابجایی کل (فشرده سازی) هستند.

$$P_m = \frac{E}{d} = \frac{(\int_0^d F(x) dx)}{\delta t} \quad (2)$$

### ۲-۳- بازده ضربه

با توجه به رابطه زیر، این پارامتر بر اساس اندازه گیری طول اولیه جسم و طول بعد از آسیب و بر اساس درصدی محاسبه می شود که  $L_f$  طول نهایی پس از ضربه و  $L_0$  طول اولیه جسم است.

$$SE = \frac{L_f - L_0}{L_0} * 100 \quad (3)$$

### ۲-۴- جذب انرژی ویژه

برای مقایسه قابلیت جذب انرژی مواد و سازه های مختلف، معمولاً از جذب انرژی ویژه برای ارزیابی قابلیت جذب انرژی مورد استفاده قرار گرفته است میزان جذب انرژی ویژه بر اساس رابطه زیر محاسبه می شود که در آن  $M$  جرم جاذب انرژی است. در سازه جاذب انرژی، هر چه جذب انرژی ویژه بزرگ تر باشد کارایی جاذب انرژی بیشتر می شود.

$$SEA = \frac{EA}{M} \quad (4)$$

## ۳-۳ ساخت سیال غلیظ شونده برشی

برای ساخت سیال غلیظ شونده برشی از تکنیک‌های ترکیب مکانیکی و امواج فراصوت استفاده شد. سیال غلیظ شونده برشی مورد استفاده در این مطالعه حاوی غلظت ۲۵٪ از نانو ذرات سیلیکای دوده شده می‌باشد. مراحل زیر برای ساخت نمونه‌ها انجام شده است.

۱- ذرات سیلیکای دوده شده آبدوست و حساس به جذب رطوبت می‌باشند. قبل از آماده سازی، سیلیکای دوده شده به مدت ۲۴ ساعت در یک محفظه خلاء در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد حرارت قرار داده شد و تا هرگونه رطوبت در آن از بین برود.

۲- از روش اختلاط مستقیم سیلیکای دوده شده با اتانول توسط همزن مکانیکی با سرعت ۵۰۰۰ دور در دقیقه در دمای اتاق مخلوط شده است. مقدار وزنی اتانول مورد استفاده ۳ برابر وزن سیال غلیظ شونده در نظر گرفته شده است.

۳- امواج فراصوت می‌تواند به بهبود توزیع ذرات و کاهش تجمع آن‌ها در محلول کمک کند [57,58]. برای این منظور، سیلیکای دوده شده ترکیب شده با اتانول با دستگاه سونیکاتور نوک شاخ (Hielscher-UP400S) به مدت ۳ ساعت در سیکل های ۰/۵ و دامنه ۳۰٪ تحت امواج قرار گرفته است.

۴- از روش اختلاط مستقیم پلی اتیلن گلیکول ۴۰۰ با ترکیب سیلیکای دوده شده و اتانول به وسیله همزن مغناطیسی با سرعت ۱۵۰۰ دور در دقیقه در دمای اتاق به مدت ۱۸ ساعت هم زده شده است و با سونیکاتور نوک شاخ به مدت ۵ ساعت در سیکل‌های ۰/۵ و دامنه ۳۰٪ سونیک شده است و بعد از آن به مدت ۸ ساعت توسط یک همزن مکانیکی با سرعت ۱۰۰۰۰ دور در دقیقه مخلوط شد. در این مرحله برای حذف الکل اضافی از سیال غلیظ شونده برشی توسط دستگاه هات پلیت در حمام روغن با دمای ۸۰ درجه سانتیگراد قرار داده شد و مشاهده شد که در این دما الکل اضافی به میزان بسیار قابل توجهی حذف می‌شود.

۵- برای حذف حباب‌ها از سیال غلیظ شونده برشی نمونه‌ها به مدت ۱۰ ساعت توسط پمپ خلاء در دمای اتاق حباب زدایی شد.



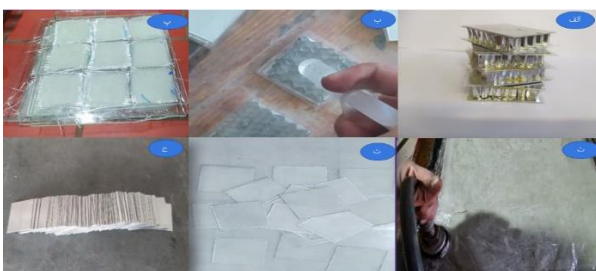
**شکل ۲)** نمایی آماده سازی سیال غلیظ شونده برشی: (الف) رطوبت زدایی از سیلیکای دوده شده، (ب) آلتراسونیک مواد، (پ) اختلاط مستقیم مواد با یکدیگر، (ت) همزدن و الکل زدایی، (ث) حباب زدایی، (ج) سیال غلیظ شونده برشی

## ۳-۴ ساخت ساندویچ پانل

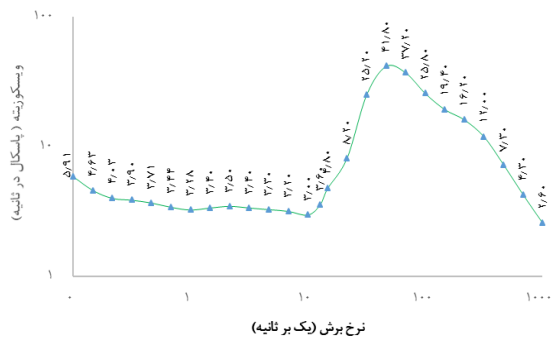
برای ساخت ساندویچ پنل سه نوع پوسته در نظر گرفته شده است. در حالت اول، پوسته از آلیاژ آلومینیوم ۱۱۰۰، در حالت دوم، ساندویچ پنل پوسته از کامپوزیت شیشه ( پنج لایه )\_ اپوکسی و در حالت سوم، ساندویچ پنل پوسته از پارچه (پارچه شیشه ای پنج لایه) آغشته به سیال غلیظ شونده برشی ساخته شده است. ابعاد ساندویچ پانل به شکل مربع به طول ضلع ۵۰ میلی متر و ضخامت هسته ۸ میلی متر در نظر گرفته شده است. از سیال غلیظ شونده برشی به عنوان پرکننده در فضای توخالی ساختار سلولی لانه زنبوری استفاده شده است. ضخامت ساندویچ پنل برای هریک از نمونه ها قبل و بعد از بارگذاری اندازه گیری می شود اما با توجه به ساختار هندسی واجزای ساندویچ پنل و به طور متوسط ضخامت ۹/۴ میلی متر برای این سازه در نظر گرفته شده است.

## ۳-۵- آزمایش ضربه سرعت پایین

ساندویچ پنل که در معرض ضربه با سرعت پایین قرار می‌گیرد، اعوجاج پلاستیک، خم شدن صفحه، و خرد شدن هسته از آسیب‌های است که در این سازه اتفاق می‌افتد [59]. برای بررسی ظرفیت جذب انرژی در ساندویچ پنل از روش آزمایش ضربه با سرعت پایین توسط دستگاه سقوط وزنه استفاده شد. نمونه‌ها بدون هیچ قیدی و آزادانه درست زیر ضربه زننده دستگاه سقوط وزنه قرار داده شده‌اند. یک ضربه زننده سر استوانه‌ای با قطر ۱۰۰ میلی‌متر به وزن ۵/۴ کیلوگرم آزادانه از دو ارتفاع ۱۰۰ و ۵۰۰ میلی‌متری بر روی نمونه‌ها سقوط کرده تا به ساندویچ پانل‌ها ضربه بزند. برای اندازه گیری شتاب بر حسب زمان در حین آزمایش ضربه از دستگاه دیتالاگر استفاده شد و با دانستن جرم ضربه‌زننده و با استفاده از قانون دوم نیوتن میزان نیرو به دست آمده است. با دو بار آنتگرال گیری از نمودار شتاب-زمان، مقدار جابجایی را می‌توان به دست آورد [60,61].



**شکل ۳)** فرآیند تولید ساندویچ پانل: (الف) ساندویچ پانل تهیه شده با هسته لانه زنبوری، (ب) پر کردن سازه لانه زنبوری، (پ) نمونه‌هایی از آغشته سازی پارچه‌ها، (ت) عملیات وکیوم بگ، (ث) ورق های کامپوزیتی، (ج) ورق های آلومینیومی



شکل ۴) منحنی ویسکوزیته-نرخ برش سیال غلیظ شونده برشی

که از برهمکنش بین ذرات سیلیکای دوده شده جلوگیری می‌کند و در نتیجه پراکندگی سیلیکای دوده شده را تثبیت می‌کند. با افزایش نرخ برش آسیب افزایش می‌یابد و برهمکنش بین سنگدانه‌های کوچک سیلیکای دوده شده باعث ایجاد یک هیدروکلاستر می‌شود. هیدروکلاستر بزرگ می‌تواند مانند یک دیوار عمل کند و به طور قابل توجهی مانع از جریان سیال شود. در نتیجه ویسکوزیته سیستم افزایش شدیدی را نشان می‌دهد.

۲-۴- خواص مکانیکی کامپوزیت

در این بخش به بررسی خواص مکانیکی ورق های کامپوزیتی ساخته شده پرداخته شده است. از روش آزمون کشش و فشار خواص مکانیکی استخراج شده است. ابتدا به استخراج خواص مکانیکی کامپوزیت ساخته شده از رزین- اپوکسی و سپس به استخراج خواص مکانیکی ورق های کامپوزیتی ساخته شده با الیاف چند لایه شیشه ای دو بعدی چند لایه پرداخته شده است. در جدول ۱ نتایج به دست آمده از آزمون کشش و فشار نشان داده شده است.

۳-۶- آزمایش رئولوژی

رئومترها یکی از پرکاربردترین ابزارها برای تعیین خواص رئولوژیکی سیالات هستند. رئومتر چرخشی یکی از رایج‌ترین این تجهیزات است [62,63]. آزمایش با یک رئومتر صفحه تحت موازی (MCR 301 Anton Paar) با افزایش فرکانس زاویه‌ای انجام شده است. هندسه صفحات دارای قطر ۲۰ میلی‌متر (PP-20) با فاصله ۰/۸ میلی متر برای اطمینان از پر شدن کافی سیال غلیظ شونده برشی روی دیسک آزمایش استفاده شد. ویسکوزیته به صورت تابعی از نرخ برش در محدوده ۱۰۰۰-۰/۱ یک بر ثانیه در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد بررسی شده است.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- رفتار غلیظ شدن برشی پلی اتیلن گلایکول ۴۰۰ و سیلیکای دوده شده

ابتدا با افزایش نرخ برش ویسکوزیته شروع به کاهش می‌کند تا هنگامی که نرخ برش به یک مقدار بحرانی افزایش می‌یابد، ویسکوزیته به طور چشمگیری افزایش می‌یابد و رفتار غلیظ شدن برشی نشان می‌دهد، سپس ویسکوزیته با افزایش زیادی در نرخ برش شروع به کاهش می‌کند. بنابراین، ویسکوزیته سیال غلیظ شونده برشی تابعی از نرخ برش است. مکانیسم این رفتار غلیظ شدن برشی را می‌توان با نظریه هیدروکلاستر ارائه شده توسط بویس و برادی بر اساس مدل هیدرودینامیکی استوکس [64,65] به دلیل وجود هیدروکسیل انتهایی بر روی مولکول سیلیس توضیح داد. پلی اتیلن گلایکول و گروه‌های سیلانول فراوان روی سطح سیلیس ایجاد پیوند هیدروژنی می‌نماید. مولکول‌های پلی اتیلن گلایکول که توسط پیوند هیدروژنی بر روی سطح سیلیکای دوده شده جذب می‌شوند و به عنوان یک لایه انحلال پذیر عمل می‌کنند

جدول ۱) نتایج به دست آمده از آزمون کشش و فشار

حالت بارگذاری	کششی	فشاری
نمونه	کرنش شکست (درصد)	مدول یانگ (مگا پاسکال)
کامپوزیت چند لایه	۱/۹۶	۱۹۷/۰۰
کامپوزیت رزین- اپوکسی	۶/۵۲	۱۷۴۹/۴۱

جدول ۲) نام گذاری نمونه‌ها

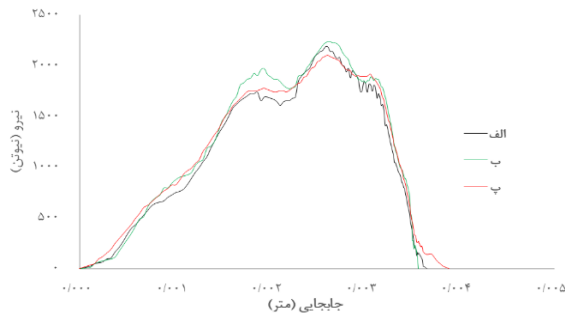
نمونه	الف	ب	پ
نام	ساندویچ پنل با پوسته آلومینیم و هسته تو خالی	ساندویچ پنل با پوسته کامپوزیت و هسته تو خالی	ساندویچ پنل با پوسته از جنس پارچه آغشته شده به سیال غلیظ شونده برشی و هسته تو خالی
وزن (g)	۹/۵۸	۸/۳۶	۷/۷۸
نمونه	ت	ث	ج
نام	ساندویچ پنل با پوسته آلومینیم و هسته پر شده	ساندویچ پنل با پوسته کامپوزیت و هسته پر شده	ساندویچ پنل با پوسته از جنس پارچه آغشته شده به سیال غلیظ شونده برشی و هسته پر شده
وزن (g)	۲۹/۱۸	۲۵/۹۶	۲۵/۳۸

## ۳-۴- نتایج آزمایش ضربه سرعت پایین

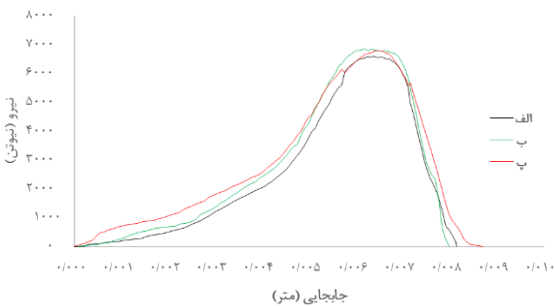
آزمایش ضربه با سرعت پایین بر روی ساندویچ پانل در دو ارتفاع ۱۰۰ و ۵۰۰ میلی متر انجام شد. وزن ۵/۴ کیلوگرمی برای جسم ضربه زننده در نظر گرفته شده است. در جدول دو نمونه‌های ساخته شده نام گذاری شده است و وزن هرکدام از نمونه‌ها اندازه گیری شده است.

## ۳-۴-۱- نتایج آزمایش ضربه سرعت پایین در ساندویچ پانل با هسته لانه زنبوری توخالی

بررسی میزان جذب انرژی در ساندویچ پانل تحت بارگذاری ضربه ای با سرعت پایین در دو ارتفاع سقوط ۱۰۰ و ۵۰۰ میلی متر با ضربه گیر با جرم ۵/۴ کیلوگرم به روش سقوط وزنه انجام شده است. برای دستیابی به بهترین نتایج برای هر آزمایش دو نمونه ساخته و آزمایش شده است و میانگین داده‌ها در دو آزمون به عنوان نتیجه آزمون در نظر گرفته شده است. ساندویچ پانل از یک هسته لانه زنبوری توخالی با پوسته‌ای از پارچه شیشه ای ۵ لایه آغشته به سیال غلیظ شونده برشی، کامپوزیت شیشه - اپوکسی ۵ لایه و آلومینیوم برای بارگذاری ضربه ساخته شده است. نتایج بدست آمده از دیتالاگر به صورت منحنی شتاب-زمان می‌باشد. با توجه به جرم ضربه زننده و با استفاده از معادله دوم نیوتن می‌توان مقدار نیرو را به دست آورد. جابجایی را می‌توان با دو بار انتگرال گیری منحنی شتاب-زمان به دست آورد. با بدست آوردن نیرو و جابجایی می‌توان منحنی نیرو - جابجایی را رسم کرد که در شکل ۵ ارائه شده است. در جدول ۳ پارامترهای جذب انرژی از منحنی های نیرو- جابجایی استخراج شده و در جداول ۴ نتایج نسبت به هم مقایسه شده‌اند. جذب انرژی ساندویچ پانل با پوسته از جنس پارچه شیشه ۵ لایه آغشته به سیال غلیظ شونده برشی نسبت به پوسته آلومینیومی و کامپوزیت در ارتفاع ۱۰۰ میلی متری به ترتیب ۴/۹۶۶٪ و ۲/۴۳۷٪ افزایش یافته است و جذب انرژی ساندویچ پانل با جنس از پوسته از کامپوزیت نسبت به پوسته آلومینیومی ۲/۴۹٪ افزایش داشته است. جذب انرژی ویژه در ساندویچ پانل با پوسته از جنس پارچه شیشه آغشته به سیال غلیظ شونده برشی نسبت به ساندویچ پانل با پوسته‌های آلومینیومی و کامپوزیت به ترتیب ۲۹/۲۶۸٪ و ۱۰/۰۰۱٪ افزایش یافته است و جذب انرژی ویژه در ساندویچ پانل با پوسته از کامپوزیت نسبت به پوسته آلومینیومی ۱۷/۵۱۶٪ افزایش داشته است. نتایج جذب انرژی در ساندویچ پانل تحت بارگذاری ضربه در ارتفاع ۵۰۰ میلی متر در ساندویچ پانل با پوسته ساخته شده از پارچه آغشته به سیال غلیظ شونده برشی در مقایسه با ساندویچ پانل پوسته از آلومینیوم و کامپوزیت باعث افزایش جذب انرژی به میزان ۷/۶۷۶٪ و ۳/۱۵۰٪ شده است و جذب انرژی ساندویچ پانل با جنس پوسته از کامپوزیت نسبت به پوسته آلومینیومی ۴/۳۸۷٪ افزایش داشته است. جذب انرژی



(الف) منحنی نیرو - جابجایی با ارتفاع سقوط ۱۰۰ میلی متر



(ب) منحنی نیرو جابجایی به ارتفاع سقوط ۵۰۰ میلی متر  
شکل ۵) منحنی نیرو-جابجایی ساندویچ پانل با هسته تو خالی

ویژه در ساندویچ پانل با پوسته ساخته شده از پارچه آغشته به سیال غلیظ شونده برشی در مقایسه با ساندویچ پانل پوسته از آلومینیوم و کامپوزیت باعث افزایش جذب انرژی ویژه میزان ۳۲/۸۵۹٪ و ۱۰/۸۳۴٪ شده است و جذب انرژی ویژه ساندویچ پانل با جنس پوسته از کامپوزیت نسبت به پوسته آلومینیومی ۱۹/۸۷۱٪ افزایش داشته است. در جداول و نمودارهای ارائه شده تأثیر اجزای ساختار پانل ساندویچ را بر پارامترهای جذب انرژی و سایر پارامترهای مهم در جذب انرژی نشان داده شده است.

وجود سیال غلیظ شونده در آغشته سازی پارچه به عنوان پوسته با جود وزن کم تر نسبت به پوسته کامپوزیتی و آلومینیوم در جذب انرژی و جذب انرژی ویژه نتایج بهتری داشته است.

## ۳-۴-۲- نتایج آزمایش ضربه سرعت پایین در ساندویچ پانل با هسته لانه زنبوری پر شده با سیال غلیظ شونده برشی

ساندویچ پانل با ساختار هسته لانه زنبوری پر شده با سیال غلیظ شونده برشی با کسر وزنی ۲۵٪ و جنس پوسته از پارچه شیشه ۵ لایه آغشته به سیال غلیظ شونده برشی، کامپوزیت شیشه- اپوکسی و آلومینیوم تحت بارگذاری ضربه ای با سرعت پایین قرار

جدول ۳) نتایج تجربی ساندویچ پانل جاذب انرژی با هسته لانه زنبوری توخالی

ارتفاع سقوط		۵۰۰ میلی متر			۱۰۰ میلی متر		
نمونه	نمونه الف	نمونه ب	نمونه پ	نمونه الف	نمونه ب	نمونه پ	
نیروی متوسط (نیوتن)	۱۱۷۹/۸۷۱	۱۲۵۵/۶۸۰	۱۱۸۵/۱۰۲	۲۵۹۳/۷۴۴	۲۷۲۸/۱۱۹	۲۶۶۱/۵۳۲	
بازده ضربه (درصد)	۱۴/۴۳۲	۱۰	۷/۵۴۷	۵۴/۲۱۶	۴۶/۶۶۶	۴۱/۸۳۶	
جذب انرژی ویژه (ژول بر کیلوگرم)	۰/۴۵۱	۰/۵۳۰	۰/۵۸۳	۲/۱۷۹	۲/۶۱۲	۲/۸۹۵	
بازده نیروی لهیدگی (درصد)	۰/۵۵۰	۰/۵۷۳	۰/۵۶۳	۰/۳۹۵	۰/۴۰۱	۰/۳۹۹	
جذب انرژی (ژول)	۴/۳۲۲	۴/۴۳۱	۴/۵۳۹	۲۰/۹۲۲	۲۱/۸۴۰	۲۲/۵۲۸	

جدول ۴) مقایسه نتایج نمونه های مختلف ساندویچ پانل با هسته لانه زنبوری توخالی

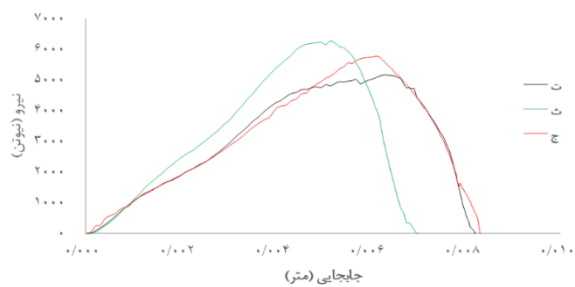
ارتفاع سقوط		۵۰۰ میلی متر			۱۰۰ میلی متر		
نمونه	مقایسه نتایج نمونه	مقایسه نتایج نمونه	مقایسه نتایج نمونه	مقایسه نتایج نمونه	مقایسه نتایج نمونه	مقایسه نتایج نمونه	
	پ نسبت به نمونه	پ نسبت به نمونه	پ نسبت به نمونه	پ نسبت به نمونه	پ نسبت به نمونه	پ نسبت به نمونه	
	الف (درصد)	ب (درصد)	الف (درصد)	الف (درصد)	ب (درصد)	الف (درصد)	
نیروی متوسط	۰/۴۴۳	-۵/۶۲۰	۶/۴۲۵	۲/۶۱۳	-۲/۴۴۰	۵/۱۸۰	
بازده ضربه	-۴۷/۷۰۶	-۲۴/۵۳۰	-۳۰/۷۰۹	-۲۲/۸۳۴	-۱۰/۳۵۰	-۱۳/۹۲۵	
جذب انرژی ویژه	۲۹/۲۶۸	۱۰/۰۰۱	۱۷/۵۱۶	۳۲/۸۵۹	۱۰/۸۳۴	۱۹/۸۷۱	
بازده نیروی لهیدگی	۲/۳۶۲	-۱/۷۴۵	۴/۱۸۱	۱/۰۱۲	-۰/۴۹۸	۱/۵۱۸	
جذب انرژی	۴/۹۹۶	۲/۴۳۷	۲/۴۹۸	۷/۶۷۶	۳/۱۵۰	۴/۳۸۷	

در مقایسه با ساندویچ پنل پوسته از آلومینیوم و کامپوزیت باعث افزایش جذب انرژی به میزان ۲۷/۹۳۱٪ و ۹/۴۷۰٪ شده است و جذب انرژی ویژه ساندویچ پنل با جنس پوسته از کامپوزیت نسبت به پوسته آلومینیومی ۱۶/۸۶۴٪ افزایش داشته است. وجود پرکننده در ساختار ساندویچ پانل نسبت به حالتی که سازه لانه زنبوری خالی است، جذب انرژی و جذب انرژی ویژه را به میزان قابل توجهی افزایش داده است و سایر پارامترهای جذب انرژی نیز تغییرات قابل توجهی داشته اند. وجود سیال غلیظ کننده برشی تأثیر چشم گیری در جذب انرژی دارد. نتایج به وضوح اثر سیال غلیظ کننده برشی بر پارامترهای جذب انرژی را نشان می دهد.

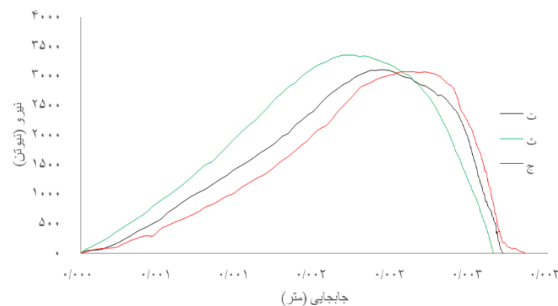
#### ۵- نتیجه گیری ها

سیالات غلیظ کننده برشی پتانسیل بالایی برای جذب انرژی دارند. توسط دستگاه سقوط وزنه عملکرد جذب انرژی در ساندویچ پانل در شرایط بارگذاری ضربه سرعت پایین در دو ارتفاع ۱۰۰ و ۵۰۰ میلی متر مورد بررسی قرار گرفته است. یکی از مهمترین خواص سیالات غلیظ کننده برشی افزایش ویسکوزیته با افزایش نرخ برش است و این خاصیت به جذب انرژی کمک می کند. نتایج به دست آمده از ضربه سرعت پایین نشان داد که ساندویچ پنل با پوسته از جنس پارچه شیشه ای ۵ لایه آغشته به سیالات غلیظ شونده برشی نسبت به ساندویچ پنل با پوسته های آلومینیومی و کامپوزیت جذب انرژی بهتری دارد.

گرفته و در دو ارتفاع ۱۰۰ و ۵۰۰ میلی متری توسط دستگاه سقوط وزنه این آزمایش مورد بررسی قرار گرفته است. برای دستیابی به بهترین نتایج برای هر آزمایش دو نمونه ساخته و آزمایش شده و میانگین داده ها در دو آزمون به عنوان نتیجه آزمون در نظر گرفته شده است. نتایج آزمایش ضربه با سرعت پایین در منحنی نیرو-جابجایی در شکل ۶ ارائه شده است. در جدول ۵ پارامترهای جذب انرژی از منحنی های نیرو-جابجایی استخراج شده و در جدول ۶ نتایج به دست آمده با هم مقایسه شده اند. در ارتفاع ۱۰۰ میلی متری به ترتیب ۴۷/۳۴۷٪ و ۱/۱۵۹٪ افزایش یافته است و جذب انرژی ساندویچ پنل با جنس از پوسته از کامپوزیت نسبت به پوسته آلومینیومی ۲/۸۶۴٪ افزایش داشته است. جذب انرژی ویژه در ساندویچ پانل با پوسته از جنس پارچه شیشه آغشته به سیال غلیظ شونده برشی نسبت به ساندویچ پانل با پوسته های آلومینیومی و کامپوزیت به ترتیب ۲۱/۲۹۰٪ و ۵/۰۲۸٪ افزایش یافته است و جذب انرژی ویژه در ساندویچ پنل با پوسته از کامپوزیت نسبت به پوسته آلومینیومی ۱۵/۴۸۴٪ افزایش داشته است. در ارتفاع ۵۰۰ میلی متری نتایج جذب انرژی در ساندویچ پانل تحت بارگذاری ضربه در ارتفاع ۵۰۰ میلی متر در ساندویچ پنل با پوسته ساخته شده از پارچه آغشته به سیال غلیظ شونده برشی در مقایسه با ساندویچ پنل پوسته از آلومینیوم و کامپوزیت باعث افزایش جذب انرژی به میزان ۱۱/۲۳۲٪ و ۷/۰۲۲٪ شده است و جذب انرژی ساندویچ پنل با جنس پوسته از کامپوزیت نسبت به پوسته آلومینیومی ۳/۹۳۳٪ افزایش داشته است. جذب انرژی ویژه در ساندویچ پنل با پوسته ساخته شده از پارچه آغشته به سیال غلیظ شونده برشی



(ب) منحنی نیرو جابجایی به ارتفاع سقوط ۵۰۰ میلی‌متر



(الف) منحنی نیرو - جابجایی با ارتفاع سقوط ۱۰۰ میلی‌متر  
شکل ۶) منحنی جابجایی نیرو

جدول ۵) نتایج تجربی ساندویچ پانل جاذب انرژی با هسته لانه زنبوری پرشده

ارتفاع سقوط			۵۰۰ میلی متر			۱۰۰ میلی متر		
نمونه	نمونه ت	نمونه ج	نمونه ت	نمونه ج	نمونه ت	نمونه ج	نمونه ت	نمونه ج
نیروی متوسط (نیوتن)	۱۶۷۴/۳۷۸	۱۷۷۸/۴۳۹	۱۶۸۸/۹۵۴	۲۶۹۴/۹۲۶	۳۳۴۰/۳۴۳	۲۹۷۰/۹۱۲	۲۹۷۰/۹۱۲	۲۹۷۰/۹۱۲
بازده ضربه (درصد)	۳/۰۲۹	۲/۹۷۰	۲/۷۲۷	۲۷/۹۵۶	۲۳/۴۶۹	۲۰/۵۶۰	۲۰/۵۶۰	۲۰/۵۶۰
جذب انرژی ویژه (ژول بر کیلوگرم)	۰/۱۵۵	۰/۱۷۹	۰/۱۸۸	۰/۷۵۹	۰/۸۸۷	۰/۹۷۱	۰/۹۷۱	۰/۹۷۱
بازده نیروی لهیدگی (درصد)	۰/۵۳۸	۰/۵۴۲	۰/۵۵۰	۰/۵۲۴	۰/۵۳۲	۰/۵۳۹	۰/۵۳۹	۰/۵۳۹
جذب انرژی (ژول)	۴/۵۳۲	۴/۶۶۱	۴/۷۲۹	۲۲/۱۶۹	۲۳/۰۴۱	۲۴/۶۵۹	۲۴/۶۵۹	۲۴/۶۵۹

جدول ۶) مقایسه نتایج نمونه های مختلف ساندویچ پانل با هسته لانه زنبوری پرشده

ارتفاع سقوط		۵۰۰ میلی متر		۱۰۰ میلی متر	
نمونه	مقایسه نتایج نمونه ج نسبت به نمونه ت (درصد)	مقایسه نتایج نمونه ج نسبت به نمونه ت (درصد)	مقایسه نتایج نمونه ج نسبت به نمونه ت (درصد)	مقایسه نتایج نمونه ج نسبت به نمونه ت (درصد)	مقایسه نتایج نمونه ج نسبت به نمونه ت (درصد)
نیروی متوسط	۰/۸۷۱	۶/۲۱۵	۱۰/۲۴۱	-۵/۰۳۲	۲۳/۹۴۹
بازده ضربه	-۱۱/۸۲۵	-۳/۹۶۷	-۲۶/۴۵۶	-۸/۱۸۲	-۱۶/۰۵۰
جذب انرژی ویژه	۲۱/۲۹۰	۱۵/۴۸۴	۲۷/۹۳۱	۵/۰۲۸	۱۶/۸۶۴
بازده نیروی لهیدگی	۲/۲۳۰	۰/۷۴۳	۳/۴۵۵	۱/۴۷۶	۲/۱۱۱
جذب انرژی	۴/۳۴۷	۲/۸۴۶	۱۱/۲۳۲	۱/۱۵۹	۳/۹۳۳

شونده برشی و پوسته از جنس پارچه ۵ لایه آغشته به سیال غلیظ شونده برشی در مقایسه با پوسته از آلومینیوم و کامپوزیت به ترتیب ۴۷/۳٪ و ۱۰۹٪ جذب انرژی افزایش یافته است. میزان جذب انرژی ویژه در این ساندویچ پانل به ترتیب ۲۹۰/۲۱٪ و ۲۸/۵٪ افزایش یافته است. نتایج به وضوح اثر سیال غلیظ کننده برشی بر جذب انرژی را نشان می‌دهد.

**تاییدیه اخلاقی:** محتویات علمی مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و صحت نتایج آن نیز بر عهده آن‌ها است.

**تعارض منافع:** بدین وسیله نویسندگان اعلام می‌کنند که این اثر، هیچ‌گونه تضاد منافی با سازمان‌ها و اشخاص دیگر ندارد.

سیال غلیظ کننده برشی در ساختار ساندویچ پانل به عنوان پرکننده در ساختار لانه زنبوری باعث افزایش جذب انرژی شده است. نتایج به دست آمده از پانل ساندویچ با هسته پر شده با سیال غلیظ شونده برشی در مقایسه با هسته خالی از پرکننده، بهبود پارامترهای جذب انرژی را نشان می‌دهد. میزان جذب انرژی ساندویچ پانل توخالی با پوسته از جنس پارچه آغشته به شیشه ۵ لایه نسبت به پوسته از آلومینیومی و کامپوزیت در ارتفاع سقوط ۱۰۰ میلی‌متری به ترتیب ۹۹۶/۴٪ و ۴۳۷/۲٪ افزایش یافته است. جذب انرژی ویژه در ساندویچ پانل توخالی با پوسته از جنس پارچه شیشه آغشته به سیال غلیظ شونده برشی در مقایسه ساندویچ پانل با پوسته‌های آلومینیومی و کامپوزیت به ترتیب ۲۶۸/۲۹٪ و ۱۰۰/۱٪ افزایش یافته است. در آزمایش ضربه با ارتفاع سقوط ۱۰۰ میلی‌متر در ساندویچ پانل با ساختار هسته لانه زنبوری پر شده با سیال غلیظ



- 14- Rashiddadash S. An Experimental and numerical investigation on low velocity impact properties of sandwich panels with bilateral connection. *Modares Mechanical Engineering*. 2018;18(4):23-31.
- 15- Warren J, Kota KR, Westberg SM, Lacy T, Kundu S, Toghiani H, Pittman Jr CU. Hypervelocity impacts of shear thickening fluid imbided metallic foam core sandwich panels. In 30th technical conference of American Society of Composites, East Lansing, USA 2015 (pp. 28-30).
- 16- Fischer C, Braun SA, Bourban PE, Michaud V, Plummer CJ, Manson JE. Dynamic properties of sandwich structures with integrated shear-thickening fluids. *Smart materials and structures*. 2006;15(5):1467.
- 17- Tan ZH, Zuo L, Li WH, Liu LS, Zhai PC. Dynamic response of symmetrical and asymmetrical sandwich plates with shear thickening fluid core subjected to penetration loading. *Materials & Design*. 2016;94:105-10.
- 18- Barnes HA, Hutton JF, Walters K. An introduction to rheology. Elsevier; 1989.
- 19- Lee YS, Wagner NJ. Dynamic properties of shear thickening colloidal suspensions. *Rheologica acta*. 2003;199-208.
- 20- Wang QS, Sun RJ, Yao M, Chen MY, Feng Y. The influence of temperature on inter-yarns fictional properties of shear thickening fluids treated Kevlar fabrics. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2019;116:46-53.
- 21- Wagner NJ, Brady JF. Shear thickening in colloidal dispersions. *Physics Today*. 2009;62(10):27-32.
- 22- Ghosh A, Majumdar A, Butola BS. Rheometry of novel shear thickening fluid and its application for improving the impact energy absorption of p-aramid fabric. *Thin-Walled Structures*. 2020 ;155:106954.
- 23- Gürgen S. Numerical modeling of fabrics treated with multi-phase shear thickening fluids under high velocity impacts. *Thin-Walled Structures*. 2020;148:106573.
- 24- Liu L, Yang Z, Zhao Z, Liu X, Chen W. The influences of rheological property on the impact performance of kevlar fabrics impregnated with SiO<sub>2</sub>/PEG shear thickening fluid. *Thin-Walled Structures*. 2020;151:106717.
- 25- Khodadadi A, Liaghat G, Vahid S, Sabet AR, Hadavinia H. Ballistic performance of Kevlar fabric impregnated with nanosilica/PEG shear thickening fluid. *Composites Part B: Engineering*. 2019;162:643-52.
- 26- Asija N, Chouhan H, Gebremeskel SA, Bhatnagar N. Impact response of Shear Thickening Fluid (STF) treated ultra high molecular weight poly ethylene composites-study of the effect of STF treatment method. *Thin-Walled Structures*. 2018;126:16-25.
- 27- Mawkhlieng U, Majumdar A. Designing of hybrid soft body armour using high-performance unidirectional and woven fabrics impregnated with shear thickening fluid. *Composite Structures*. 2020;253:112776.

## منابع

- 1- Sun G, Huo X, Chen D, Li Q. Experimental and numerical study on honeycomb sandwich panels under bending and in-panel compression. *Materials & Design*. 2017;133:154-68.
- 2- Zhang D, Fei Q, Zhang P. Drop-weight impact behavior of honeycomb sandwich panels under a spherical impactor. *Composite Structures*. 2017;168:633-45.
- 3- Hou Y, Zhang Y, Yan X, Lai X, Lin J. Crushing behaviors of the thin-walled sandwich column under axial load. *Thin-Walled Structures*. 2021;159:107229.
- 4- S. Zangana, J. Epaarachchi, W. Ferdous, J. Leng, P. Schubel, Behaviour of continuous fiber composite sandwich core under the low velocity impact, *Thin-Walled Struct*. 158,2021, 107157.
- 5- Liu C, Zhang YX, Li J. Impact responses of sandwich panels with fibre metal laminate skins and aluminium foam core. *Composite Structures*. 2017 182:183-90.
- 6- Jeon KW, Shin KB. An experimental investigation on low-velocity impact responses of sandwich panels with the changes of impact location and the wall partition angle of honeycomb core. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2012:1789-96.
- 7- Palomba G, Epasto G, Crupi V, Guglielmino E. Single and double-layer honeycomb sandwich panels under impact loading. *International Journal of Impact Engineering*. 2018;121:77-90.
- 8- Wu X, Xiao K, Yin Q, Zhong F, Huang C. Experimental study on dynamic compressive behaviour of sandwich panel with shear thickening fluid filled pyramidal lattice truss core. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2018;138:467-75.
- 9- Fu K, Wang H, Chang L, Foley M, Friedrich K, Ye L. Low-velocity impact behaviour of a shear thickening fluid (STF) and STF-filled sandwich composite panels. *Composites Science and Technology*. 2018;165:74-83.
- 10- Liu Y, Zhuang W, Wu D. Performance and damage of carbon fibre reinforced polymer tubes under low-velocity transverse impact. *Thin-Walled Structures*. 2020 151:106727.
- 11- Shakil UA, Hassan SB, Yahya MY, Nurhadiyanto D. A review of properties and fabrication techniques of fiber reinforced polymer nanocomposites subjected to simulated accidental ballistic impact. *Thin-Walled Structures*. 2021;158:107150.
- 12- Zarei HR, Rezaei M, Soveity S. Numerical simulation of shear thickening fluid impregnated polypropylene fabric and comparing with experimental results. *Modares Mechanical Engineering*. 2017;17(2):221-30.
- 13- Zarei H, Shahnazar P, Meskini M, Sarkhosh R. Ballistic Performance Analysis of Ultra High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE) Composite. *Modares Mechanical Engineering* 2022:347-346.

- 41- Hasanzadeh M, Mottaghtalab V, Rezaei M, Babaei H. Numerical and experimental investigations into the response of STF-treated fabric composites undergoing ballistic impact. *Thin-Walled Structures*. 2017;119:700-6.
- 42- Majumdar A, Laha A, Bhattacharjee D, Biswas I. Tuning the structure of 3D woven aramid fabrics reinforced with shear thickening fluid for developing soft body armour. *Composite Structures*. 2017;178:415-25.
- 43- Kim Y, Park Y, Cha J, Ankem VA, Kim CG. Behavior of Shear Thickening Fluid (STF) impregnated fabric composite rear wall under hypervelocity impact. *Composite Structures*. 2018;204:52-62.
- 44- Hoffman RL. Discontinuous and dilatant viscosity behavior in concentrated suspensions. I. Observation of a flow instability. *Transactions of the Society of Rheology*. 1972;16(1):155-73.
- 45- Hoffman RL. Explanations for the cause of shear thickening in concentrated colloidal suspensions. *Journal of Rheology*. 1998;42(1):111-23.
- 46- Bossis G, Brady JF. The rheology of Brownian suspensions. *The Journal of chemical physics*. 1989;91(3):1866-74.
- 47- Gürgen S, Kuşhan MC, Li W. Shear thickening fluids in protective applications: A review. *Progress in Polymer Science*. 2017;75:48-72.
- 48- Lin NY, Guy BM, Hermes M, Ness C, Sun J, Poon WC, Cohen I. Hydrodynamic and contact contributions to continuous shear thickening in colloidal suspensions. *Physical review letters*. 2015;115(22):228304.
- 49- Safari H, Karevan M, Nahvi H. Mechanical characterization of natural nano-structured zeolite/polyurethane filled 3D woven glass fiber composite sandwich panels. *Polymer Testing*. 2018;67:284-94.
- 50- Azadian M, Hasani H, Shokrieh MM. Low velocity impact behavior of 3D hollow core sandwich composites produced with flat-knitted spacer fabrics. *Fibers and Polymers*. 2018;19:2581-9.
- 51- Neje G, Behera BK. Investigation of mechanical performance of 3D woven spacer sandwich composites with different cell geometries. *Composites Part B: Engineering*. 2019;160:306-14.
- 52- Wu Z, Li S, Pan Z, Hu X. Off-axial angle sensitivity of 3D orthogonal woven composite failure behavior subjected to in-plane compressive loading. *Thin-Walled Structures*. 2020;157:107149.
- 53- Guo Q, Zhang Y, Li D, Guo R, Ma M, Chen L. Effect of bias yarn on tensile fracture mechanism of multiaxial 3D angle-interlock woven composites. *Thin-Walled Structures*. 2021;159:107269.
- 54- Guo Q, Zhang Y, Li D, Lv Q, Sun X, Ma M, Chen L. Experimental and numerical investigation of open-hole tensile properties and damage mechanisms of 3D woven composites under weft-loading. *Thin-Walled Structures*. 2021;161:107455.
- 55- Ahmad Z, Thambiratnam DP. Dynamic computer simulation and energy absorption of foam-filled
- 28- Mawkhlieng U, Majumdar A. Deconstructing the role of shear thickening fluid in enhancing the impact resistance of high-performance fabrics. *Composites Part B: Engineering*. 2019;175:107167.
- 29- Lee YS, Wetzel ED, Wagner NJ. The ballistic impact characteristics of Kevlar® woven fabrics impregnated with a colloidal shear thickening fluid. *Journal of materials science*. 2003;38:2825-33.
- 30- Gürgen S. An investigation on composite laminates including shear thickening fluid under stab condition. *Journal of Composite Materials*. 2019;53(8):1111-22.
- 31- Abbaszadeh A, Yazdani M, Abbasi F, Rashed A. Investigating the behavior of silicon-coated Kevlar fabric under low-velocity impact: An experimental and numerical study. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. 2019;32(5):635-56.
- 32- Gürgen S, Kuşhan MC. The effect of silicon carbide additives on the stab resistance of shear thickening fluid treated fabrics. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. 2017;24(16):1381-90.
- 33- Talreja K, Chauhan I, Ghosh A, Majumdar A, Butola BS. Functionalization of silica particles to tune the impact resistance of shear thickening fluid treated aramid fabrics. *RSC advances*. 2017;7(78):49787-94.
- 34- Arora S, Majumdar A, Butola BS. Structure induced effectiveness of shear thickening fluid for modulating impact resistance of UHMWPE fabrics. *Composite Structures*. 2019;210:41-8.
- 35- Liu L, Cai M, Liu X, Zhao Z, Chen W. Ballistic impact performance of multi-phase STF-impregnated Kevlar fabrics in aero-engine containment. *Thin-Walled Structures*. 2020 157:107103.
- 36- Gürgen S, Kuşhan MC. The stab resistance of fabrics impregnated with shear thickening fluids including various particle size of additives. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2017;94:50-60.
- 37- Hasan-nezhad H, Yazdani M, Salami-Kalajahi M, Jeedi M. Mechanical behavior of 3D GFRP composite with pure and treated shear thickening fluid matrix subject to quasi-static puncture and shear impact loading. *Journal of Composite Materials*. 2020;54(26):3933-48.
- 38- Srivastava A, Majumdar A, Butola BS. Improving the impact resistance performance of Kevlar fabrics using silica based shear thickening fluid. *Materials Science and Engineering: A*. 2011 529:224-9.
- 39- Decker MJ, Halbach CJ, Nam CH, Wagner NJ, Wetzel ED. Stab resistance of shear thickening fluid (STF)-treated fabrics. *Composites science and technology*. 2007;67(3-4):565-78.
- 40- Hasanzadeh M, Mottaghtalab V. The role of shear-thickening fluids (STFs) in ballistic and stab-resistance improvement of flexible armor. *Journal of materials engineering and performance*. 2014;23:1182-96.

- conical tubes under axial impact loading. *Computers & Structures*. 2009;87(3-4):186-97.
- 56- Wu S, Li G, Sun G, Wu X, Li Q. Crashworthiness analysis and optimization of sinusoidal corrugation tube. *Thin-Walled Structures*. 2016;105:121-34.
- 57- Haris A, Lee HP, Tan VB. An experimental study on shock wave mitigation capability of polyurea and shear thickening fluid based suspension pads. *Defence technology*. 2018;14(1):12-8.
- 58- Zhang D, Fei Q, Zhang P. Drop-weight impact behavior of honeycomb sandwich panels under a spherical impactor. *Composite Structures*. 2017;168:633-45.
- 59- Jeddi M, Yazdani M. Dynamic compressive response of 3D GFRP composites with shear thickening fluid (STF) matrix as cushioning materials. *Journal of Composite Materials*. 2021;55(16):2151-64.
- 60- Fabbrocino F, Farina I, Modano M. Loading noise effects on the system identification of composite structures by dynamic tests with vibrodyne. *Composites Part B: Engineering*. 2017 115:376-83.
- 61- Chauhan RR, Dullens RP, Velikov KP, Aarts DG. Exploring concentration, surface area and surface chemistry effects of colloidal aggregates on fat crystal networks. *Rsc Advances*. 2017;7(46):28780-7.
- 62- Aliabadian E, Sadeghi S, Kamkar M, Chen Z, Sundararaj U. Rheology of fumed silica nanoparticles/partially hydrolyzed polyacrylamide aqueous solutions under small and large amplitude oscillatory shear deformations. *Journal of rheology*. 2018 62(5):1197-216.
- 63- Kang TJ, Hong KH, Yoo MR. Preparation and properties of fumed silica/Kevlar composite fabrics for application of stab resistant material. *Fibers and Polymers*. 2010;11:719-24.
- 64- Bossis G, Brady JF. The rheology of Brownian suspensions. *The Journal of chemical physics*. 1989;91(3):1866-74.