



بررسی تجربی رفتار بالستیکی صفحات ساندویچی با هسته لانه زنبوری

نساء پیرمحمدی¹، غلامحسین لیاقت^{2*}، محمد حسین پل³

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

2- استاد مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

3- استادیار، دانشگاه تفرش، تفرش

* تهران، صندوق پستی 143-14115، ghlia530@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 09 شهریور 1392

پذیرش: 24 شهریور 1392

ارائه در سایت: 31 اردیبهشت 1393

کلید واژگان:

لانه زنبوری

کامپوزیت

سرعت حد بالستیک

سازه ساندویچی

چکیده

در این مقاله ضربه سرعت بالا بر روی سازه ساندویچی با رویه های کامپوزیتی از جنس الیاف شیشه/ اپوکسی و هسته لانه زنبوری از جنس آلومینیوم به طور تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین رفتار بالستیکی هر یک از اجزای سازه ساندویچی (رویه کامپوزیتی و لانه زنبوری) به طور جداگانه بررسی شدند تا تأثیر افزودن کامپوزیت به دو طرف لانه زنبوری در میزان انرژی جذب شده توسط لانه زنبوری مشخص شود. آزمایش های بالستیکی بر روی نمونه های ساخته شده با پرتابه سرتخت به جرم 8/5 gr و قطر 10 mm در سرعت های مختلف انجام شده است. نتایج نشان می دهد لانه زنبوری در حالت ساندویچ شده انرژی بیشتری را نسبت به زمانی که به تنهایی آزمایش بالستیک روی آن انجام شده جذب می کند و رویه جلویی در مقایسه با رویه پشتی سازه ساندویچی انرژی کمتری جذب کرده است. همچنین با افزایش سرعت برخورد انرژی بیشتری توسط سازه ساندویچی جذب شده است.

Experimental investigation on ballistic behavior of sandwich panels made of honeycomb core

Neas Pirmohammadi¹, Golamh Hossein. Liaghat^{1*}, Mohammad Hossein Pol²

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

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

*P.O.B. 14115-143 Tehran, Iran. ghlia530@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 31 August 2013
Accepted 15 September 2013
Available Online 21 May 2014

Keywords:

Honeycomb
Composite
Ballistic Limit
Sandwich Panel

ABSTRACT

In this paper, ballistic impact on sandwich panel with composite face sheet made of Glass/Epoxy and aluminum honeycomb core has been investigated experimentally. Ballistic impact test also carried out on Honeycomb and composite and the effect absorption energy by adding composite on two sides honeycomb is studied. By this model the influence of the components on the behavior of the sandwich panel under impact load was evaluated. Ballistic impact tests is carried out on the samples by flat-ended projectile with 8/5 gr mass and 10 mm diameter in difference velocities. Also, the contribution of the failure mechanisms to the energy absorption of the projectile kinetic energy was determined. The results show that honeycomb sandwich has more energy than when alone ballistic tests conducted on has absorbed and front cover compared with back cover sandwich structure has lower energy absorption. Also bigger than ballistic limit velocity absorbed the maximum amount of energy.

1- مقدمه

له شدگی بالا در مقایسه با وزن کم آن ها لانه زنبوری ها را از دیگر سازه ها متمایز کرده است [1]. به دلیل این که لانه زنبوری به تنهایی خواص بالستیکی مناسبی ندارد، معمولاً با افزودن لایه های رویی و پشتی (فلزی، سرامیکی و کامپوزیتی) به کار گرفته می شوند. در واقع هر یک از اجزا سازه ساندویچی به تنهایی کارایی ضعیفی دارند اما وقتی با هم استفاده می شوند، سازه ای با سفتی بالا و در عین حال سبک تشکیل می دهند. همچنین با افزودن لانه زنبوری به کامپوزیت ممان سطح سازه افزایش می یابد، در نتیجه سفتی خمشی سازه ساندویچی بیشتر می شود.

برای بررسی خواص بالستیکی سازه های ساندویچی، تحقیقاتی روی این

سازه های ساندویچی شامل دو ورق خارجی با استحکام بالا هستند که به یک هسته با چگالی پایین چسبانده شده است. این سازه ها به دلیل خواص مکانیکی و بالستیکی ویژه بالا (نسبت به وزن) کاربردهای گسترده ای در صنایع خودروسازی، هوافضا و نظامی - تدافعی دارند. این نوع سازه ها توانایی خوبی در تحمل هر دو بارهای درون صفحه ای و برون صفحه ای را دارند و در برابر فشار مقاومت نسبتاً بالایی دارند [1].

لانه زنبوری شبکه هایی از سلول های میان تهی است که از اتصال ورقه های بسیار نازک از یک ماده به یکدیگر تشکیل شده است. مقاومت به

Please cite this article using:

N. Pirmohammadi, G.H. Liaghat, M. Hossein Pol, Experimental investigation on ballistic behavior of sandwich panels made of honeycomb core, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 4, pp. 21-26, 2014 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

شامل هسته لانه زنبوری آلومینیومی با رویه و پشتی کامپوزیت شیشه/اپوکسی می باشد. در این تحقیق تأثیر افزودن کامپوزیت و ایجاد ساختار ساندویچی در میزان انرژی جذب شده توسط لانه زنبوری و همچنین تأثیر لانه زنبوری بر انرژی جذب شده توسط رویه های کامپوزیتی به صورت تجربی مورد بحث و بررسی قرار می گیرد.

2- آزمایش

1-1-2 مواد

2-1-1-1 کامپوزیت

در این تحقیق از کامپوزیت شیشه/اپوکسی با بافت دوبعدی (خواص هر دو جهت کاملاً یکسان) استفاده شده است. رزین مورد استفاده، از خانواده اپوکسی و ساخت شرکت هانسن با نام تجاری CY 219 و با سخت کننده HY 5161 می باشد. در مرجع [14] خواص و مشخصات مکانیکی کامپوزیت ساخته شده آورده شده است (جدول 1).

2-1-2 لانه زنبوری

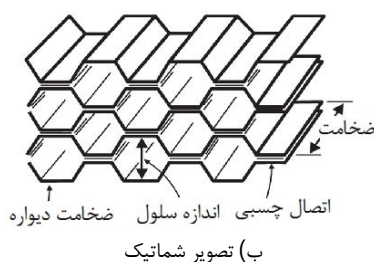
لانه زنبوری استفاده شده از جنس آلومینیوم 5052 و مدل H38 می باشد. ویژگی های این نوع آلومینیوم در جدول 2 آورده شده است. این نوع لانه زنبوری به روش کرکرای ساخته شده است (شکل 1).

جدول 1 خواص مکانیکی کامپوزیت [14]

مشخصات کامپوزیت	
جنس	کامپوزیت شیشه/اپوکسی با بافت دوبعدی
ضخامت (mm)	2
تعداد لایه ها	10
چگالی (kg/m³)	1700
مدول الاستیسیته (GPa)	$E_{11}=E_{22}=17$ و $E_{33}=7/48$
مدول برشی (GPa)	$G_{12}=4$ و $G_{13}=G_{23}=1/73$
ضریب پواسون	$\nu_{12}=\nu_{31}=0/12$ و $\nu_{23}=0/28$
تنش کششی نهایی (MPa)	$\sigma_1=\sigma_2=270$
تنش برشی نهایی (MPa)	$\tau_{12}=\tau_{13}=\tau_{23}=45$ و $\tau_{11}=\tau_{22}=51$



الف) تصویر واقعی



شکل 1 شکل واقعی و شماتیک لانه زنبوری

سازه ها و لایه های تشکیل دهنده آن ها انجام شده است. تعدادی از این موارد در رابطه با رفتار بالستیکی کامپوزیت ها و لانه زنبوری ها به صورت زیر است:

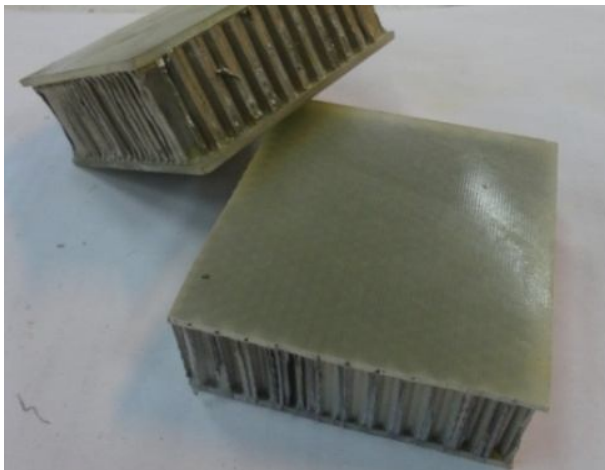
ابریت [2] در سال 1998 با تدوین کتابی تحقیقات و مطالعات انجام شده در زمینه ضربه در مواد کامپوزیت را گردآوری کرد. ضربه کم سرعت، پیش بینی تخریب های ناشی از ضربه، استحکام باقی مانده پس از ضربه، ضربات بالستیک در اجزای سازه های کامپوزیتی و ضربه روی سازه های ساندویچی، از مهم ترین عناوین این گردآوری است. چوکرون بنلولو و همکارانش [3] مدل نسبتاً ساده ای برای تعیین حد بالستیک کامپوزیت های با الیاف بافته شده ارائه نمود. مدل مذکور، بر مبنای محاسبه انرژی لازم برای تخریب تارها و تعمیم آن به پارچه بافته شده و در نهایت کامپوزیت با الیاف بافته شده استوار بود. چان و همکاران [4] با انجام آزمایش هایی اثر زاویه قرارگیری الیاف را در مقاومت بالستیک و مقدار انرژی جذب شده کامپوزیت که تحت شلیک گلوله های سرتخت برنزی قرار داشت بررسی نمودند. گلداسمیت و ساکن [5] تأثیر چند پارامتر مانند سرعت، شرایط مرزی، استحکام اتصالات بین هسته لانه زنبوری و رویه های آلومینیومی را روی جذب انرژی در طول نفوذ کامل به طور تجربی بررسی کردند. پل و همکارانش [6] یک مدل تحلیلی برای نفوذ پرتابه های سرتخت در مواد مرکب چند لایه شیشه/اپوکسی، براساس تقسیم مدت زمان نفوذ به جزء های کوچک و محاسبه انرژی جذب شده توسط هدف ارائه کرد. لونت اختی و همکارانش [7] هسته های لانه زنبوری در ساختار ساندویچی با رویه های کربن/اپوکسی و چسب واسط فنولیک را به صورت عددی و تجربی، تحت بار محوری و برشی بررسی کردند، در این آزمایش ها از لانه زنبوری های آلومینیومی و نومکس استفاده شد. کپلر و همکاران [8]، یک مدل نیمه تحلیلی برای تعیین مقدار انرژی جذب شده توسط ساندویچ تحت ضربه سرعت بالا ارائه کردند. آن ها فرض کردند که می توان کل انرژی جذب شده توسط سازه ساندویچی را به دو بخش، انرژی واکنش الاستیک (انرژی جنبشی و انرژی تغییر شکل سراسری) و انرژی آسیب تقسیم کرد. رادرفورد و همکارانش [9] به بررسی عملکرد تیرهای ساندویچی تحت بارهای ضربه به صورت تجربی و عددی پرداختند. در این تحقیق رفتار تیر لانه زنبوری با سلول های مربعی تحت ضربه های یکسان مقایسه شده است. رویه و هسته لانه زنبوری مورد آزمایش از جنس فولاد ضد زنگ بود. هوفت و پارک [10] یک حل تحلیلی برای محاسبه حد بالستیک لانه زنبوری ساندویچ شده بین دو صفحه فلزی که در برابر ضربه عمودی پرتابه های سرتخت و سر کروی قرار گرفته بود را ارائه دادند. فعلی و نامداری [11] یک مدل تحلیلی برای بررسی رفتار سازه ساندویچی با هسته لانه زنبوری که در معرض ضربه عمودی سرعت بالا قرار داشت، ارائه کردند. بویترگو و همکارانش [12] ضربه های سرعت بالا را بر روی سازه های ساندویچی متشکل از هسته های لانه زنبوری آلومینیومی و رویه های کربن/اپوکسی را به صورت عددی و تجربی بررسی کردند. برای بررسی عددی از نرم افزار آباکوس استفاده کردند و یک مدل سه بعدی از یک چهارم هدف را شبیه سازی و با نتایج تجربی مقایسه نمودند. مدل ارائه شده آنها تنها 2% با داده های تجربی اختلاف داشت. لیاقت و همکارانش [13] مکانیزم نفوذ و عبور گلوله استوانه ایی سرتخت را در اهداف لانه زنبوری به صورت تئوری و تجربی بررسی کردند.

در تحقیقات صورت گرفته بیشتر نتایج مدل های تحلیلی و یا عددی ارائه شده با نتایج تجربی مقایسه شده است. درحالی که تحلیل مناسبی روی داده های تجربی صورت نگرفته است. از جمله تأثیر لانه زنبوری بر مکانیزم های تخریب هر یک از رویه ها و میزان انرژی جذب شده توسط رویه های جلویی و پشتی مورد بررسی قرار نگرفته است.

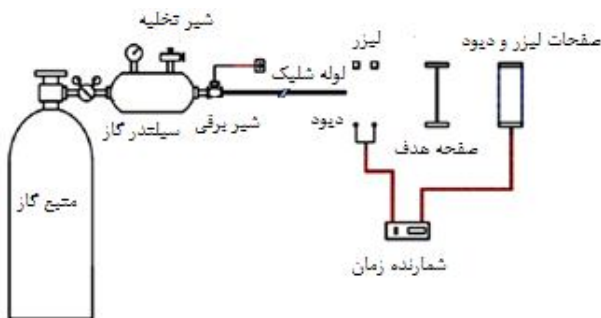
موضوع اصلی تحقیق حاضر بررسی خواص بالستیکی سازه ساندویچی

به طور ثابت قرار می‌گیرد. پرتابه یک استوانه فولادی سرتخت به طول 15mm، قطر 10mm، جرم 8/5gr و سختی 60RC می‌باشد (شکل 5). برخورد در سرعت‌های مختلف، نزدیک حد بالستیک و سرعت‌های بیش از حد بالستیک اهداف بوده و هر دو سرعت‌های اولیه و باقی‌مانده در آزمایش‌ها اندازه‌گیری شده است. حداقل تکرار هر آزمایش 4 بار است.

به منظور اندازه‌گیری سرعت اولیه در جلوی لوله تفنگ گازی از یک جفت منبع نور لیزر و دیود حساس نوری که متصل به یک شمارنده زمان هستند، استفاده می‌شود به دلیل این که پس از نفوذ، پرتابه از مسیر خود منحرف می‌شود امکان اندازه‌گیری سرعت باقی‌مانده با روش اندازه‌گیری سرعت ورودی وجود ندارد. به همین دلیل از دو پرده دو بعدی موازی، که هر یک شامل 80 عدد منبع نور لیزر در دو راستای افقی و عمودی می‌باشند، برای تعیین موقعیت محل عبور پرتابه استفاده می‌شود. این دیودهای حساس به نور هر یک به طور جداگانه به شمارنده زمان متصل می‌باشند.



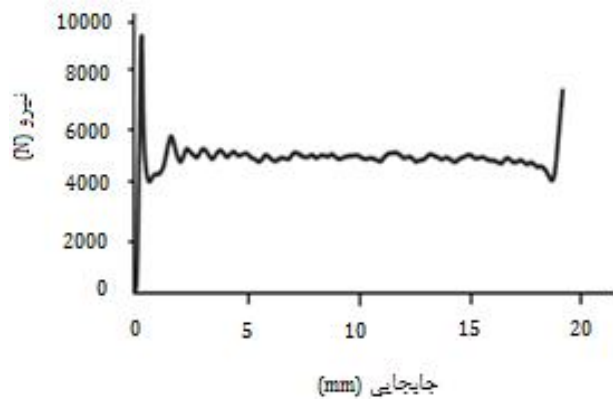
شکل 3 صفحات ساندویچی ساخته شده



شکل 4 طرح شمایک تفنگ گازی



شکل 5 پرتابه استفاده شده



شکل 2 نمودار نیرو-جابجایی لانه زنبوری [15]

جدول 2 ویژگی‌های آلومینیوم استفاده شده در لانه زنبوری [14]

نوع ماده	AL5052
مدول الاستیسیته (GPa)	70
تنش تسلیم (MPa)	255
تنش کششی نهایی (MPa)	290
تنش برشی نهایی (MPa)	160
چگالی (kg/m ³)	2680

جدول 3 خواص مکانیکی لانه زنبوری [15]

مشخصات لانه زنبوری	جنس
Al 5052_H38	ارتفاع (mm)
25/4	چگالی (kg/m ³)
50	اندازه سلول (mm)
3/175	ضخامت جداره سلول (mm)
0/08	مدول الاستیسیته فشاری (GPa)
E ₃₃ =517	تنش مجاله شوندگی (MPa)
4/94	کرش مجاله شوندگی
0/71	

تنش و کرنش مجاله شدگی لانه زنبوری از خواص مهم لانه زنبوری است که در مرجع [15] برای بدست آوردن این خواص، لانه زنبوری به ابعاد 3/3×3/3cm² و ارتفاع 25/4mm تحت آزمایش فشار در سرعت بارگذاری 2/5mm/min قرار گرفته است. شکل 2 نمودار نیرو-جابجایی حاصل از آزمون فشار را نشان می‌دهد که تنش و کرنش مجاله شدگی لانه زنبوری در آن قابل محاسبه می‌باشد. سایر خواص مکانیکی لانه زنبوری در جدول 3 آورده شده است.

3-1-2- صفحات ساندویچی

لانه زنبوری‌ها و صفحات کامپوزیتی به طور جداگانه در اندازه‌های 7/5×7/5cm² بریده شده‌اند و سپس توسط چسب فنولیک تحت فشار زیاد، مکش و گرفتن هوا و رزین اضافی به هم چسبانده شده‌اند (شکل 3). چسب استفاده شده به ترتیب دارای استحکام فشاری و برشی 70MPa و 35MPa می‌باشد [15].

2-2- آزمایش‌های بالستیک

آزمایش‌های بالستیک در دانشگاه تربیت مدرس با استفاده از یک تفنگ گازی که طرح شماتیک آن در شکل 4 نشان داده شده است، انجام گرفت. هنگام آزمایش هر یک از صفحات هدف، درون یک نگهدارنده به ابعاد 65×65mm²

3- نتایج و بحث

مکانیزم‌های شکست در کامپوزیت‌ها می‌تواند شامل شکست الیاف، ترک ماتریس و یا لایه‌لایه شدن باشد. در لانه زنبوری‌ها جذب انرژی بیشتر به صورت برش، چین خوردگی یا مجاله شدگی محوری و جدایش اتصال چسبی می‌باشد [13].

انتظار می‌رود در مورد سازه ساندویچی ساخته شده از رویه‌های کامپوزیتی و هسته لانه زنبوری نیز ترکیبی از مکانیزم‌های بیان شده انرژی را جذب کنند.

برای بدست آوردن سرعت حد بالستیک سازه ساندویچی ابتدا در چند سرعت آزمایش‌هایی انجام گرفت سپس با استفاده از رابطه 1 (رابطه رشت-ایپسون) حد بالستیک به صورت تقریبی تخمین زده شد. سپس در برخورد بعدی سرعت کاهش و یا افزایش داده شد تا نفوذ کامل انجام گیرد به طوری که سرعت باقی‌مانده صفر شود، در این صورت سرعت اولیه پرتابه سرعت حد بالستیک نامیده می‌شود [16].

$$v_{50} = \sqrt{v_0^2 - \frac{m_0 + m_{\text{plug}}}{m_0} v_r^2} \quad (1)$$

در آن v_{50} سرعت حد بالستیک، v_0 سرعت ورودی و v_r سرعت خروجی پرتابه می‌باشد. m_0 و m_{plug} به ترتیب جرم پرتابه و جرم پلاگ تشکیل شده در اثر برخورد گلوله سرتخت است، که به دلیل کوچک بودن جرم پلاگ می‌توان از آن صرف نظر کرد.

همچنین با صرف نظر کردن از جرم پلاگ می‌توان انرژی جنبشی که صرف فرایند نفوذ و مکانیزم‌های شکست جذب شده است را با توجه به رابطه (2) محاسبه نمود.

$$E_p = \frac{1}{2} m_0 (v_0^2 - v_r^2) \quad (2)$$

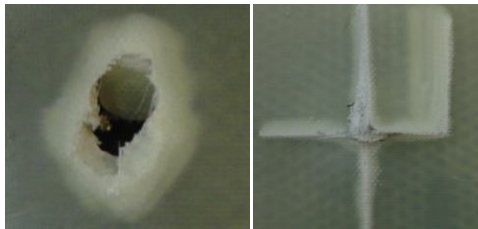
در جدول 4 نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی صفحات ساندویچی شامل سرعت‌های ورودی و خروجی و میزان انرژی جذب شده آورده شده است. در این جدول برای هر سرعت پرتابه حداقل 4 بار آزمایش تکرار شده است و میانگین مقادیر آن‌ها در نظر گرفته شده است.

با توجه به نتایج، سرعت حد بالستیک برای صفحه ساندویچی تقریباً برابر با 164m/s است. به دلیل شکل سر پرتابه و بزرگی سطح مقطع پرتابه نسبت به اندازه سلول‌های لانه زنبوری (حدود 3)، سرعت حد بالستیک به محل اصابت گلوله وابسته نیست [13].

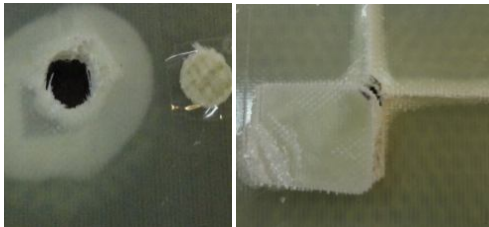
نتایج آزمایش‌های بالستیک نشان می‌دهد، با افزایش سرعت برخورد انرژی جذب شده در فرایند نفوذ افزایش پیدا کرده است، به طوری که در سرعت 187m/s بیشترین میزان انرژی جذب شده است. دلیل این افزایش را می‌توان با مشاهده سطوح شکست در کامپوزیت پستی بیان کرد (شکل 6). همان‌طور که در شکل 6 مشاهده می‌شود، در سرعت‌های بالاتر پتال ایجاد شده در رویه پستی و لبه‌های برش ایجاد شده نسبتاً بزرگتر است و هرچه سرعت کم شده است لبه‌های برشی کوچک شده‌اند.

جدول 4 نتایج آزمایش‌های بالستیک بر روی صفحات ساندویچی

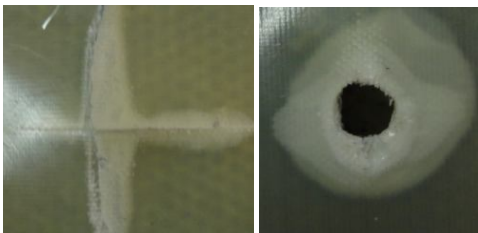
شماره	سرعت ورودی (m/s)	سرعت خروجی (m/s)	انرژی جذب شده (kJ)
1	187/1	58/2	133/2
2	180/3	69/1	117/2
3	169/9	37/8	115/7
4	164/1	0	114/3



الف) سرعت برخورد 187m/s



ب) سرعت برخورد 180m/s



پ) سرعت برخورد 170m/s



ت) سرعت برخورد 164m/s

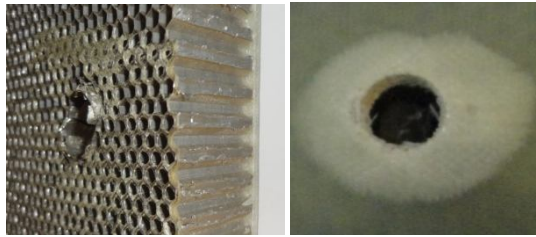
شکل 6 نمونه‌های تحت برخورد (سمت چپ جلوی هدف و سمت راست پشت هدف) برای سرعت‌های برخورد مختلف

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت یکی از دلایل افزایش میزان انرژی جذب شده در سرعت‌های بالاتر، افزایش میزان انرژی جذب شده توسط رویه کامپوزیتی پستی می‌باشد. از دلایل دیگر افزایش انرژی جذب شده توسط سازه ساندویچی در سرعت‌های بالاتر از حد بالستیک، سخت شوندگی وابسته به نرخ کرنش الیاف شیشه می‌باشد [17].

به طور کلی می‌توان مکانیزم‌های شکست سازه ساندویچی را با مشاهده آزمایش‌های انجام شده به سه مرحله تقسیم‌بندی کرد که شامل موارد زیر می‌باشد:

1) نفوذ پرتابه در ماده کامپوزیتی جلویی: این مرحله لحظه‌ای آغاز می‌شود که پرتابه با سرعت اولیه v_0 به کامپوزیت رویی برخورد می‌کند. مقداری از انرژی جذب شده در این مرحله موجب شکست الیاف، ترک ماتریس و برش پلاگ می‌شود، اما لایه‌لایه شدن کامپوزیت بسیار کم دیده می‌شود (شکل 6). علاوه بر آن مقداری از انرژی اولیه پرتابه صرف لهیدگی لانه زنبوری پستی می‌شود.

2) نفوذ پرتابه در لانه زنبوری: این مرحله زمانی شروع می‌شود که پرتابه، کامپوزیت رویی را کاملاً سوراخ نموده است و در حال نفوذ به ماده لانه زنبوری پستی می‌باشد. در این مرحله ابتدا لانه زنبوری تا عمق 0/7 ارتفاع (کرنش مجاله شدگی لانه زنبوری در جدول 3) دچار چین خوردگی می‌شود و در 0/3



شکل 8 نمونه های تحت برخورد

(سمت چپ جلو و سمت راست پشت صفحه ساندویچی با یک رویه کامپوزیت جلویی) به منظور بررسی تأثیر لانه زنبوری در مقدار انرژی جذب شده توسط رویه جلویی و همین طور تأثیر رویه جلویی در مقدار انرژی جذب شده توسط لانه زنبوری، با حد بالستیک صفحه ساندویچی (164m/s) به کامپوزیت تنها شلیک شد که سرعت باقی مانده برابر 113m/s شد. سپس با سرعت 113m/s به لانه زنبوری شلیک گردید که سرعت خروجی 98m/s شد. این سرعت کمتر از حد بالستیک کامپوزیت (108m/s) می باشد. در این حالت نمی توان تعیین کرد که ظرفیت جذب انرژی نفوذ سازه ساندویچی از مجموع انرژی های بالستیک جذب شده توسط سه قسمت سازنده سازه ساندویچی کمتر یا بیشتر است، چون کامپوزیت جلویی در سازه ساندویچی به علت وجود لانه زنبوری دارای سطح تخریب متفاوتی با لایه کامپوزیتی هست که به تنهایی آزمایش بالستیک روی آن انجام شده است. در واقع مکانیزم های جذب انرژی در کامپوزیت تنها همانند مکانیزم های کامپوزیت پشتی سازه ساندویچی است.

در این آزمایش انرژی جذب شده در برخورد با کامپوزیت و لانه زنبوری به ترتیب برابر $60/1\text{kJ}$ و $13/4\text{kJ}$ می باشد و انرژی باقی مانده برابر با $40/8\text{kJ}$ است. همچنین آزمایش بالستیک روی لانه زنبوری با یک رویه جلویی کامپوزیتی، انجام گرفت. به لانه زنبوری با یک رویه جلویی در سرعت 164m/s (حد بالستیک سازه ساندویچی) شلیک شد، که سرعت خروجی پرتابه $110/6\text{m/s}$ شد. انرژی جذب شده در این حالت $62/3\text{kJ}$ است (شکل 8).

با انجام این آزمایش نمی توان به طور دقیق مشخص کرد که لانه زنبوری و کامپوزیت جلویی هر کدام چه مقدار انرژی جذب کرده اند. ولی اگر فرض شود، انرژی جذب شده توسط لانه زنبوری در این حالت برابر انرژی هست که لانه زنبوری به تنهایی جذب می کند، (هر چند که در این حالت لانه زنبوری مانند یک بستر (پی) پلاستیک برای کامپوزیت جلویی عمل می کند و با چین خوردگی، نسبت به لانه زنبوری تنها انرژی بیشتری جذب می کند). یعنی اگر لانه زنبوری در حدود $13/4\text{kJ}$ انرژی جذب کرده باشد، انرژی جذب شده توسط کامپوزیت جلویی برابر $48/9\text{kJ}$ است. این در حالی است که کامپوزیت به تنهایی در برابر ضربه با سرعت 164m/s حدود $60/1\text{kJ}$ انرژی جذب می کند. این اختلاف انرژی برابر $11/2\text{kJ}$ است. در واقع لانه زنبوری با چین خوردگی باعث می شود سطح تخریب رویه جلویی کمتر از حالتی شود که این رویه به تنهایی مورد آزمایش قرار گرفته است.

انجام این آزمایش نشان می دهد که لانه زنبوری هنگامی که در سازه ساندویچی تحت آزمایش بالستیک قرار گرفته است نسبت به حالتی که به تنهایی آزمایش بالستیک روی آن انجام شده انرژی بیشتری را جذب کرده است، هر چند که نمی توان مقدار دقیق آن را مشخص کرد.

4- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر اثر افزودن کامپوزیت به دو طرف لانه زنبوری بر میزان انرژی جذب شده توسط لانه زنبوری بررسی شد. همچنین حد بالستیک برای صفحه

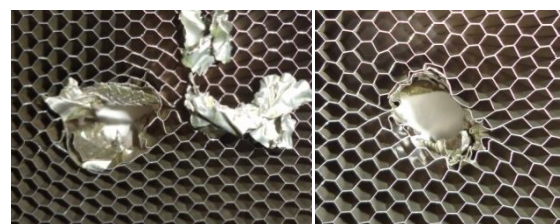
ارتفاع باقی مانده، برش و جدایش اتصال چسبی در لانه زنبوری اتفاق می افتد. دلیل این مکانیزم را می توان با توجه به نمودار نیرو- جابجایی لانه زنبوری در شکل 2 توضیح داد. با توجه به شکل 2، منحنی نیرو- جابجایی لانه زنبوری به سه قسمت تقسیم می شود: قسمت اول ناحیه الاستیک خطی است تا زمانی که تنش به مقدار ثابتی (تنش مجاله شونده لانه زنبوری) برسد. در قسمت دوم تنش تقریباً ثابت است تا زمانی که کرنش به مقدار کرنش مجاله شدگی لانه زنبوری برسد در این مرحله لانه زنبوری دچار چین خوردگی می شود و چگالی آن افزایش پیدا می کند. در قسمت سوم تنش با افزایش تغییر شکل به سرعت افزایش می یابد تا زمانی که به تنش نهایی لانه زنبوری برسد و دیواره های سلول های لانه زنبوری دچار شکست شود.

3) نفوذ پرتابه در ماده کامپوزیتی پشتی: در این مرحله پرتابه از صفحه لانه زنبوری خارج شده و به کامپوزیت زیری برخورد می کند. مکانیزم جذب انرژی در این مرحله شامل شکست الیاف، ترک ماتریس، لایه لایه شدگی کامپوزیت و شکل گیری پتال است (شکل 6).

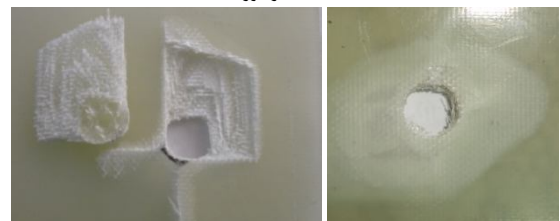
با توجه به مراحل نفوذ پرتابه می توان گفت به علت وجود لانه زنبوری، کامپوزیت رویی در مقایسه با کامپوزیت پشتی انرژی کمتری جذب می کند. به طوری که در شکل 6 مشخص است سطح تخریب کامپوزیت پشتی بیشتر از کامپوزیت جلویی می باشد و لایه لایه شدگی و لبه های برشی در کامپوزیت جلویی اتفاق نمی افتد. در واقع لانه زنبوری با مجاله شدن به صورت یک بستر (پی) پلاستیک برای کامپوزیت جلویی عمل می کند.

آزمایش های بالستیک روی لانه زنبوری و کامپوزیت (اجزای تشکیل دهنده سازه ساندویچی) هر یک به صورت جداگانه انجام شد و حد بالستیک لانه زنبوری و کامپوزیت به ترتیب برابر $56/2\text{m/s}$ و 108m/s اندازه گیری شد (شکل 7).

با انجام آزمایش بالستیک روی کامپوزیت، مشخص شد با افزایش سرعت برخورد (سرعت های بیشتر از حد بالستیک کامپوزیت) مشابه با سازه ساندویچی انرژی بیشتری جذب شده است. دلیل این امر سخت شوندگی وابسته به نرخ کرنش الیاف شیشه در سرعت های بالاتر و همچنین ایجاد لبه های برشی بزرگ تر در سرعت های بیشتر می باشد. در حالی که افزایش سرعت برخورد روی مقدار انرژی جذب شده توسط لانه زنبوری اثر زیادی ندارد چرا که کرنش نهایی آلومینیوم حساسیت زیادی به نرخ کرنش ندارد [۱۸، ۱۲].



الف) لانه زنبوری



ب) کامپوزیت

شکل 7 نمونه های تحت برخورد

(سمت چپ جلوی هدف و سمت راست پشت هدف)

- [4] S. Chan, Z. Fawaz, K. Behdinan, R. Amid, Ballistic limit prediction using a numerical model with progressive damage capability, *Composite Structures*, 77(4), pp. 466-474, 2007.
- [5] W. Goldsmith, J. L. Sackman, An experimental study of energy absorption in impact on sandwich plates, *International Journal Impact Eng*, pp. 241-262, 1992.
- [6] H. pol, G.H. Liaghat, Analytical modeling propagation of projectiles into Glass/Epoxy composite, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 12, pp. 11-19, 2013. (In Persian)
- [7] L. Aktay, F. Alastair, B. Johnson, Numerical modeling of honeycomb core crush behavior, *Engineering Fracture Mechanics*, pp. 2616-2630, 2007.
- [8] J. Kepler, E. Bozhevolnaya, Energy partition for ballistic penetration of sandwich panels, *International Journal of Impact Engineering*, pp. 697-716, 2003.
- [9] D. Radford, V. S. Deshpande, N. A. Fleck, The response of clamped sandwich plates with lattice cores subjected to shock loading, *European Journal of Mechanics*, pp 215-229, 2005
- [10] M. S. Hoo Fatt, K. S. Park, Perforation of honeycomb sandwich plates by projectiles, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 31, pp. 889-899, 2000.
- [11] S. Feli, M. H. Namdari Pour, An analytical model for composite sandwich panels with honeycomb core subjected to high-velocity impact, *Composites Part B: Engineering*, 43, pp. 2439-2447, 2012.
- [12] B. L. Buitrago, C. Santiuste, E. Barbero, Modeling of composite sandwich structures with honeycomb core subjected to high-velocity impact, *Composite Structures* 92, pp. 2090-2096, 2010
- [13] G. H. Liaghat, A. Alavi Nia, Ballistic limit evaluation for impact of cylindrical projectiles on honeycomb panels, *Thin-Walled Structures*, pp. 55-61, 2010.
- [14] N. Abdolrahim, Experimental study of low velocity impact on Sandwich panels with honeycomb core and Comparison with the F.E.M results, MSc thesis, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, 2007. (In Persian)
- [15] M. Talebi, Experimental and theoretical investigation on Static and Ballistic Behavior polyurethane Foam Filled Honeycomb Panels, MSc thesis, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, 2012. (In Persian)
- [16] G. Ben-Dor, A. Dubinsky, T. Elperin, On the Lambert Jonas approximation for ballistic impact, *Mechanics Research Communications*, pp. 137- 139, 2002.
- [17] M. S. Hoo Fatt, C. Lin, Ballistic impact of GLARE fiber metal laminates, *Composite Structures*, 61, pp. 73-88, 2003
- [18] H. Zhao, I. Elnasri, Y. Girard, Perforation of aluminum foam core sandwich panels under impact loading-An experimental study, *International Journal of Impact Engineering*, 34(7), pp. 1246-1257, 2007

ساندویچی، لانه زنبوری و کامپوزیت به دست آمد. با مشاهده آزمایش های انجام شده روی سازه ساندویچی مکانیزم های تخریب برای هر لایه مشخص گردید، به طوری که مکانیزم شکست کامپوزیت جلویی شامل شکست الیاف، ترک ماتریس و برش پلاگ می باشد، برای لانه زنبوری به صورت چین خوردگی، برش لانه زنبوری و جدایش اتصال چسبی می باشد و برای کامپوزیت پشتی شامل شکست الیاف، ترک ماتریس، لایه لایه شدگی کامپوزیت و شکل گیری پتال است. همچنین با بررسی آزمایش های بالستیک نتایج زیر حاصل شد.

- حد بالستیک صفحه ساندویچی، لانه زنبوری و کامپوزیت به ترتیب برابر 164m/s ، $56/2\text{m/s}$ و 108m/s می باشد.

- لانه زنبوری هنگامی به صورت ساندویچ شده تحت آزمایش بالستیک قرار می گیرد انرژی بیشتری را نسبت به حالتی که به تنهایی آزمایش بالستیک روی آن انجام شده جذب می کند. هر چند که با آزمایش مقدار دقیق آن قابل محاسبه نیست.

- در سازه ساندویچی به علت وجود لانه زنبوری، کامپوزیت رویی در مقایسه با کامپوزیت پشتی انرژی کمتری جذب می کند، به طوری که لایه لایه شدگی و لایه های برشی در کامپوزیت جلویی اتفاق نمی افتد.

- با افزایش سرعت برخورد مقدار انرژی جذب شده توسط سازه ساندویچی افزایش می یابد. به طوری که در سرعت 187m/s بیشترین مقدار انرژی جذب شده مشاهده شد.

- لانه زنبوری در مقایسه با رویه های کامپوزیتی انرژی کمتری جذب می کند.

5- مراجع

- [1] T. Bitzer, Honeycomb Technology, Materials, Design, Manufacturing, Applications and Testing, pp. 10-42, London, England, Chapman & Hall 1997.
- [2] S. Abrate, Impact on Composite Structures, Cambridge University Press, 1998.
- [3] S. Chocron Benloulou, J. Rodriguez, V. Sanchez Galvez, A simple analytical model for ballistic impact in composites, *Journal De Physique*, 7(3), pp. C3-821-C823-826, 1997.