ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی تجربی رفتار بالستیکی صفحات ساندویچی با هسته لانه‌زنبوری

نساء پیرمحمدی[1]، غلامحسین لیاقت[2*]، محمد حسین پل[3]

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:
لانه‌زنبوری
کامپوزیت
سرعت حد بالستیک
سازه ساندویچی

چکیده

در این مقاله ضربه سرعت بالا بر روی سازه ساندویچی با رویه‌های کامپوزیتی از جنس الیاف شیشه/ اپوکسی و هسته لانه‌زنبوری از جنس آلومینیوم به طور تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین رفتار بالستکی هر یک از اجزای سازه ساندویچی (رویه کامپوزیتی و لانه‌زنبوری) به طور جداگانه بررسی شدند تا تأثیر افزودن کامپوزیت به دو طرف لانه‌زنبوری در میزان انرژی جذب شده توسط لانه‌زنبوری مشخص شود. آزمایش‌های بالستیکی بر روی نمونه‌های ساخته شده با پرتابه سرتخت به جرم 8/5 gr و قطر 10 mm در سرعت‌های مختلف انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد لانه‌زنبوری در حالت ساندویچ شده انرژی بیشتری را نسبت به زمانی که به تنهایی آزمایش بالستیک روی آن انجام شده جذب می‌کند 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 Pirmohammadi[1], Golamh Hossein. Liaghat[1*], Mohammad Hossein Pol[2]

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

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

لانه زنبوری شبکه‌هایی از سلول‌های میان تهی است که از اتصال ورقه‌های بسیار نازک از یک ماده به یکدیگر تشکیل شده است. مقاومت به له‌شدگی بالا در مقایسه با وزن کم آن‌ها لانه‌زنبوری‌ها را از دیگر سازه‌ها متمایز کرده است [1]. به دلیل این که لانه‌زنبوری به تنهایی خواص بالستیکی مناسبی ندارد، معمولاً با افزودن لایه‌های رویی و پشتی (فلزی، سرامیکی و کامپوزیتی) به کار گرفته می‌شوند. در واقع هر یک از اجزا سازه ساندویچی به تنهایی کارایی ضعیفی دارند اما وقتی با هم استفاده می‌شوند، سازه‌ای با سفتی بالا و در عین حال سبک تشکیل می‌دهند. همچنین با افزودن لانه‌زنبوری به کامپوزیت ممان سطح سازه افزایش می‌یابد، در نتیجه سفتی خمشی سازه ساندویچی بیشتر می‌شود.

برای بررسی خواص بالستیکی سازه‌های ساندویچی، تحقیقاتی روی این

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

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)

سازه‌ها و لایه‌های تشکیل دهنده آن‌ها انجام شده است. تعدادی از این موارد در رابطه با رفتار بالستیکی کامپوزیت‌ها و لانه‌زنبوری‌ها 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، پیش‌بینی تخریب‌های ناشی از ضربه، استحکام باقی‌مانده پس از ضربه، ضربات بالستیک در اجزای سازه‌ای کامپوزیتی و ضربه روی سازه‌های ساندویچی، از مهم ترین عناوین این گردآوری است. چوکرون بنلولو و همکارانش [3] مدل نسبتاً ساده‌ای برای تعیین حد بالستیک کامپوزیت‌های 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 آزمایش‌هایی اثر زاویه قرارگیری الیاف را در مقاومت بالستیک و مقدار انرژی جذب شده کامپوزیت که تحت شلیک گلوله‌های سرتخت برنزی قرار داشت بررسی نمودند. گلداسمیت و ساکمن [5] تأثیر چند پارامتر مانند سرعت، شرایط مرزی، استحکام اتصالات بین هسته لانه‌زنبوری و رویه‌های آلومینیومی را روی جذب انرژی در طول نفوذ کامل به طور تجربی بررسی کردند. پل و همکارانش [6] یک مدل تحلیلی برای نفوذ پرتابه‌های سر تخت در مواد مرکب چند لایه شیشه/ اپوکسی، براساس تقسیم مدت زمان نفوذ به جزءهای کوچک و محاسبه انرژی جذب شده توسط هدف ارائه کرد. لونت اختای و همکارانش [7] هسته‌های لانه زنبوری در ساختار ساندویچی با رویه‌های کربن/ اپوکسی و چسب واسط فنولیک را به صورت عددی و تجربی، تحت بار محوری و برشی بررسی کردند، در این آزمایش‌ها از لانه زنبوری‌های 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. آن‌ها فرض کردند که می‌توان 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 سلول‌های مربعی تحت ضربه‌های 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 لانه‌زنبوری ساندویچ شده بین دو صفحه فلزی که در برابر ضربه عمودی پرتابه‌های سرتخت و سر کروی قرار گرفته بود را ارائه دادند. فعلی و نامداری [11] یک مدل تحلیلی برای بررسی رفتار سازه ساندویچی با هسته لانه‌زنبوری که در معرض ضربه عمودی سرعت بالا قرار داشت، ارائه کردند. بویتراگو و همکارانش [12] ضربه‌های سرعت بالا را بر روی سازه‌های ساندویچی متشکل از هسته‌های لانه زنبوری آلومینیومی و رویه‌های کربن/ اپوکسی را به صورت عددی و تجربی بررسی کردند. برای بررسی عددی از نرم‌افزار آباکوس استفاده کردند و یک مدل سه بعدی از یک چهارم هدف را شبیه‌سازی و با نتایج تجربی مقایسه نمودند. مدل ارائه شده آنها تنها 2% با داده‌های 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 مدل‌های تحلیلی و یا عددی ارائه شده با نتایج تجربی مقایسه شده است. درحالی که تحلیل مناسبی روی داده‌های تجربی صورت نگرفته است. از جمله تأثیر لانه‌زنبوری بر مکانیزم‌های تخریب هر یک از رویه‌ها و میزان انرژی جذب شده توسط رویه‌های جلویی و پشتی مورد بررسی قرار نگرفته است.

موضوع اصلی تحقیق حاضر بررسی خواص بالستیکی سازه ساندویچی شامل هسته لانه‌زنبوری آلومینیومی با رویه و پشتی کامپوزیت شیشه/ اپوکسی می‌باشد. در این تحقیق تأثیر افزودن کامپوزیت و ایجاد ساختار ساندویچی در میزان انرژی جذب شده توسط لانه‌زنبوری و همچنین تأثیر لانه‌زنبوری بر انرژی جذب شده توسط رویه‌های کامپوزیتی به صورت تجربی مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

2- آزمایش

2-1- مواد

2-1-1- 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 هانسمن با نام تجاری CY 219 و با سخت کننده HY 5161 می‌باشد. در مرجع [14] خواص و مشخصات مکانیکی کامپوزیت ساخته شده آورده شده است (جدول 1).

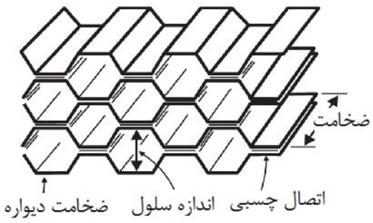
2-1-2- لانه‌زنبوری

لانه‌زنبوری استفاده شده از جنس آلومینیوم 5052 و مدل H38 می‌باشد. ویژگی‌های این نوع آلومینیوم در جدول 2 آورده شده است. این نوع لانه‌زنبوری به روش کرکره‌ای ساخته شده است (شکل 1).

جدول 1 خواص مکانیکی کامپوزیت [14]

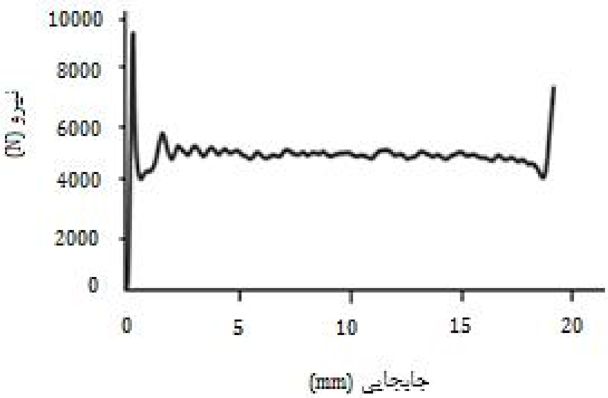
مشخصات کامپوزیت	
جنس	کامپوزیت شیشه/ اپوکسی با بافت دوبعدی
ضخامت (mm)	2
تعداد لایه‌ها	10
چگالی (kg/m^3)	1700
مدول الاستیسیته (GPa)	$E_{11}=E_{22}=17$ و $E_{33}=7/48$
مدول برشی (GPa)	$G_{12}=4$ و $G_{13}=G_{23}=1/73$
ضریب پواسون	$v_{12}=v_{31}=0/12$ و $v_{23}=0/28$
تنش کششی نهایی (MPa)	$\sigma_{1f}=\sigma_{2f}=270$
تنش برشی نهایی (MPa)	$\tau_{12f}=51$ و $\tau_{13f}=\tau_{23f}=45$

الف) تصویر واقعی



ب) تصویر شماتیک

شکل 1 شکل واقعی و شماتیک لانه‌زنبوری



شکل 2 نمودار نیرو-جابجایی لانه‌زنبوری [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 لانه‌زنبوری [15]

مشخصات لانه‌زنبوری	
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 الاستیسته فشاری (GPa)	E_{33}=517
تنش مچاله شوندگی (MPa)	4/94
کرنش مچاله شوندگی	0/71

تنش و کرنش مچاله شدگی لانه‌زنبوری از خواص مهم لانه‌زنبوری است که در مرجع [15] برای بدست آوردن این خواص، لانه‌زنبوری به ابعاد $3/3\times3/3cm^2$ 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 مچاله شدگی لانه‌زنبوری در آن قابل محاسبه می‌باشد. سایر خواص مکانیکی لانه‌زنبوری در جدول 3 آورده شده است.

2-1-3- صفحات ساندویچی

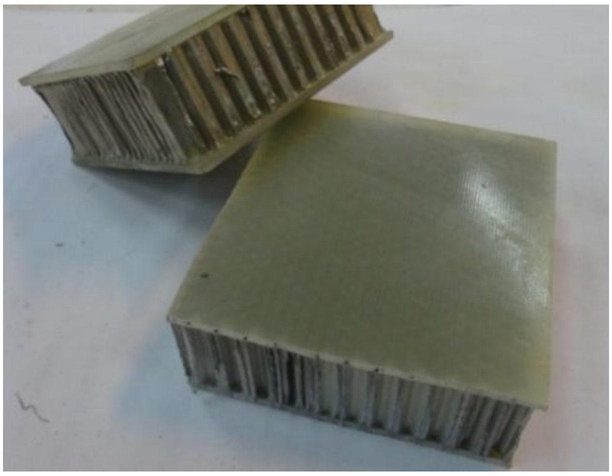
لانه‌زنبوری‌ها و صفحات کامپوزیتی به طور جداگانه در اندازه‌های $7/5\times7/5cm^2$ بریده شده‌اند و سپس توسط چسب فنولیک تحت فشار زیاد، مکش و گرفتن هوا و رزین اضافی به هم چسبانده شده‌اند (شکل 3).

چسب استفاده شده به ترتیب دارای استحکام فشاری و برشی 70MPa و 35MPa می‌باشد [15].

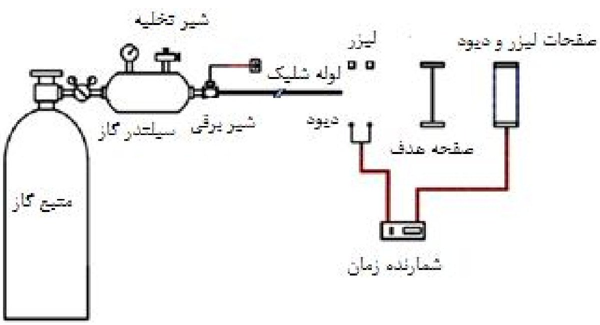
2-2- آزمایش‌های بالستیک

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 $65\times65mm^2$ 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 تعین 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 شماتیک تفگ گازی

شکل 5 پرتابه استفاده شده

3- نتایج و بحث

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

انتظار می‌رود در مورد سازه ساندویچی ساخته شده از رویه‌های کامپوزیتی و هسته لانه‌زنبوری 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].

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

در 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 صرف‌نظر کرد.

همچنین با صرف‌نظر 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.

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

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.

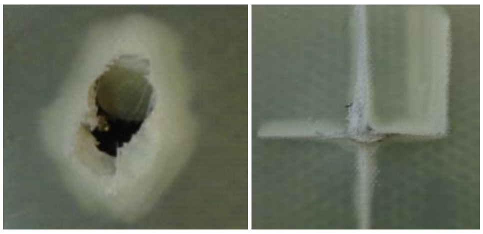
با توجه به نتایج، سرعت حد بالستیک برای صفحه ساندویچی تقریباً برابر با 164m/s است. به دلیل شکل سر پرتابه و بزرگی سطح مقطع پرتابه نسبت به اندازه سلول‌های لانه‌زنبوری (حدود 3)، سرعت حد بالستیک به محل اصابت گلوله وابسته نیست [13].

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 پشتی بیان کرد (شکل 6).

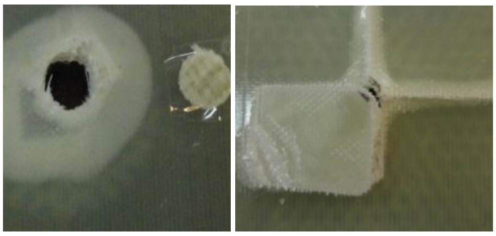
همان‌طور که در شکل 6 مشاهده می‌شود، در سرعت‌های بالاتر پتال ایجاد شده در رویه پشتی و لبه‌های برش ایجاد شده نسبتاً بزرگ‌تر است و هرچه سرعت کم شده است لبه‌های برشی کوچک شده‌اند.

جدول 4 نتایج آزمایش‌های بالستیک بر روی صفحات ساندویچی

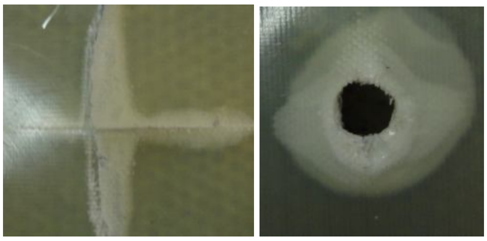
شماره	سرعت ورودی (m/s)	سرعت خروجی (m/s)	انرژی جذب شده (kJ)
1	187/1	58/2	133/2
2	180/3	69/1	117/2
3	169/9	37/8	115/7
4	164/1	0	114/3



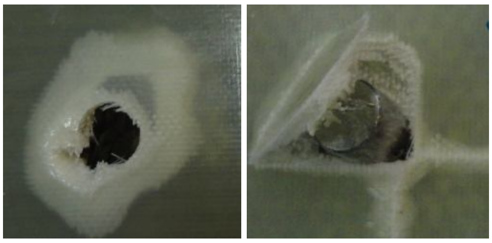
الف) سرعت برخورد 187m/s



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 پشتی 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 می شود 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 لانه‌زنبوری پشتی می‌شود.

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

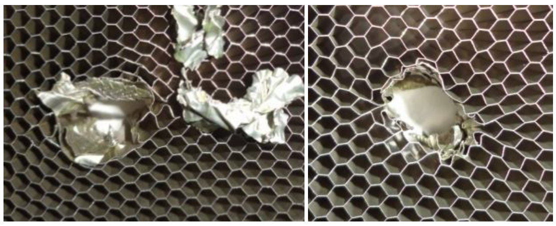
ارتفاع باقی مانده، برش و جدایش اتصال چسبی در لانه‌زنبوری اتفاق می‌افتد. دلیل این مکانیزم را می‌توان با توجه به نمودار نیرو- جابجایی لانه‌زنبوری در شکل 2 توضیح داد. با توجه به شکل 2، منحنی نیرو- جابجایی لانه‌زنبوری به سه قسمت تقسیم می‌شود: قسمت اول ناحیه الاستیک خطی است تا زمانی که تنش به مقدار ثابتی (تنش مچاله شوندگی لانه‌زنبوری) برسد. در قسمت دوم تنش تقریباً ثابت است تا زمانی که کرنش به مقدار کرنش مچاله شدگی لانه‌زنبوری برسد در این مرحله لانه‌زنبوری دچار چین‌خوردگی می‌شود و چگالی آن افزایش پیدا می‌کند. در قسمت سوم تنش با افزایش تغییر شکل به سرعت افزایش می‌یابد تا زمانی که به تنش نهایی لانه‌زنبوری برسد و دیواره‌های سلول‌های لانه‌زنبوری دچار شکست شود.

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

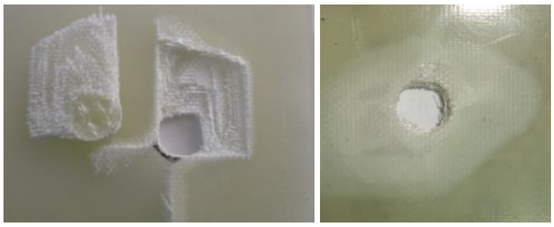
با توجه به مراحل نفوذ پرتابه می‌توان گفت به علت وجود لانه‌زنبوری، کامپوزیت رویی در مقایسه با کامپوزیت پشتی انرژی کمتری جذب می‌کند، به طوری که در شکل 6 مشخص است سطح تخریب کامپوزیت پشتی بیشتر از کامپوزیت جلویی می‌باشد و لایه‌لایه شدگی و لبه‌های برشی در کامپوزیت جلویی اتفاق نمی‌افتد. در واقع لانه‌زنبوری با مچاله شدن به صورت یک بستر (پی) پلاستیک برای کامپوزیت جلویی عمل می‌کند.

آزمایش‌های بالستیک روی لانه‌زنبوری و کامپوزیت (اجزای تشکیل دهنده سازه ساندویچی) هر یک به صورت جداگانه انجام شد و حد بالستیک لانه‌زنبوری و کامپوزیت به ترتیب برابر 56/2m/s و 108m/s اندازه‌گیری شد (شکل 7).

با انجام آزمایش بالستیک روی کامپوزیت، مشخص شد با افزایش سرعت برخورد (سرعت‌های 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 سرعت‌های بالاتر و همچنین ایجاد لبه‌های برشی بزرگ‌تر در سرعت‌های بیشتر می‌باشد. در حالی که افزایش سرعت برخورد روی مقدار انرژی جذب شده توسط لانه‌زنبوری اثر زیادی ندارد چرا که کرنش نهایی آلومینیوم حساسیت زیادی به نرخ کرنش ندارد [۱۸،۱۲].



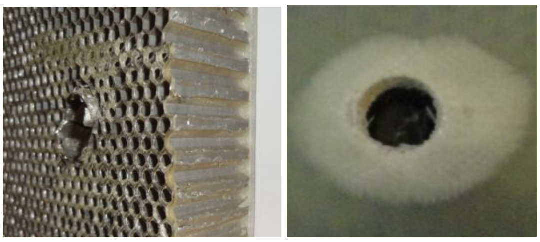
الف) لانه‌زنبوری



ب) کامپوزیت

شکل 7 نمونه های تحت برخورد

(سمت چپ جلوی هدف و سمت راست پشت هدف)



شکل 8 نمونه های تحت برخورد

(سمت چپ جلو و سمت راست پشت صفحه ساندویچی با یک رویه کامپوزیت جلویی)

به منظور بررسی تأثیر لانه‌زنبوری در مقدار انرژی جذب شده توسط رویه جلویی و همین طور تأثیر رویه جلویی در مقدار انرژی جذب شده توسط لانه‌زنبوری، با حد بالستیک صفحه ساندویچی (164m/s) به کامپوزیت تنها شلیک شد که سرعت باقی‌مانده برابر 113m/s شد. سپس با سرعت 113m/s به لانه‌زنبوری شلیک گردید که سرعت خروجی 98m/s شد. این سرعت کم‌تر از حد بالستیک کامپوزیت (108m/s) می‌باشد. در این حالت نمی‌توان تعیین کرد که ظرفیت جذب انرژی نفوذ سازه ساندویچی از مجموع انرژی‌های بالستیک جذب شده توسط سه قسمت سازنده سازه ساندویچی کمتر یا بیشتر است، چون کامپوزیت جلویی در سازه ساندویچی به علت وجود لانه‌زنبوری دارای سطح تخریب متفاوتی با لایه کامپوزیتی هست که به تنهایی آزمایش بالستیک روی آن انجام شده است. در واقع مکانیزم‌های جذب انرژی در کامپوزیت تنها همانند مکانیزم‌های کامپوزیت پشتی سازه ساندویچی است.

در این آزمایش انرژی جذب شده در برخورد با کامپوزیت و لانه‌زنبوری به ترتیب برابر 60/1kJ و 13/4kJ می‌باشد و انرژی باقی‌مانده برابر با 40/8kJ است.

همچنین آزمایش بالستیک روی لانه‌زنبوری با یک رویه جلویی کامپوزیتی، انجام گرفت. به لانه‌زنبوری با یک رویه جلویی در سرعت 164m/s (حد بالستیک سازه ساندویچی) شلیک شد، که سرعت خروجی پرتابه 110/6m/s شد. انرژی جذب شده در این حالت 62/3kJ است (شکل 8).

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

انجام این آزمایش نشان می‌دهد که لانه‌زنبوری 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، هرچند که نمی‌توان مقدار دقیق آن را مشخص کرد.

4- نتیجه‌گیری

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

ساندویچی، لانه‌زنبوری و کامپوزیت به دست آمد. با مشاهده آزمایش‌های انجام شده روی سازه ساندویچی مکانیزم‌های تخریب برای هر لایه مشخص گردید، به طوری که مکانیزم شکست کامپوزیت جلویی شامل شکست الیاف، ترک ماتریس و برش پلاگ می‌باشد، برای لانه‌زنبوری به صورت چین خوردگی، برش لانه‌زنبوری و جدایش اتصال چسبی می‌باشد و برای کامپوزیت پشتی شامل شکست الیاف، ترک ماتریس، لایه لایه شدگی کامپوزیت و شکل‌گیری پتال است. همچنین با بررسی آزمایش‌های بالستیک نتایج زیر حاصل شد.

- حد بالستیک صفحه ساندویچی، لانه‌زنبوری و کامپوزیت به ترتیب برابر 164m/s، 56/2m/s و 108m/s می‌باشد.

- لانه‌زنبوری هنگامی به صورت ساندویچ شده تحت آزمایش بالستیک قرار می‌گیرد انرژی بیشتری را نسبت به حالتی که به تنهایی آزمایش بالستیک روی آن انجام شده جذب می‌کند. هر چند که با آزمایش مقدار دقیق آن قابل محاسبه نیست.

- در سازه ساندویچی به علت وجود لانه‌زنبوری، کامپوزیت رویی در مقایسه با کامپوزیت پشتی انرژی کمتری جذب می‌کند، به طوری که لایه‌لایه‌شدگی و لبه‌های برشی در کامپوزیت جلویی اتفاق نمی‌افتد.

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

- لانه‌زنبوری در مقایسه با رویه‌های کامپوزیتی انرژی کمتری جذب می‌کند.

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 Benloulo, 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.

[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. Goldsmidth, 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