



بررسی تجربی برهم کنش رویه‌های آلومینیومی با هسته لانه زنبوری در سازه ساندویچ پنل در نفوذ شبه استاتیکی و دینامیکی

فاطمه حسن پور رودبنه¹، غلامحسین لیاقت^{2*}، هادی صبور³، همایون هادوی نیا⁴

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

2- استاده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه خوارزمی، تهران

4- استاده مهندسی مکانیک، دانشگاه کینگ استون، لندن

* تهران، صندوق پستی 14115-141، mme.modares.ac.ir، ghlia530@modares.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 26 فروردین 1395

پذیرش: 03 خرداد 1395

ارائه در سایت: 23 تیر 1395

کلیدواژگان:

سازه ساندویچی

لانه زنبوری

نفوذ شبه استاتیکی

آزمایش بالستیک

سرعت حدبالستیک

در این مقاله نفوذ شبه استاتیکی و نفوذ دینامیکی بر روی سازه ساندویچی با رویه‌های آلومینیومی و هسته لانه زنبوری آلومینیومی به طور تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین نفوذ در هر یک از اجزای سازه ساندویچی (رویه‌های آلومینیومی و سازه لانه زنبوری) به طور جداگانه بررسی شدند تا تأثیر بر هم کنش رویه‌های آلومینیومی با هسته لانه زنبوری در میزان انرژی جذب شده و سرعت حدبالستیک توسط سازه ساندویچی مشخص شود. آزمایش شبه استاتیکی بر روی نمونه‌های ساخته شده با نفوذکننده سرتخت به قطر 10 میلی‌متر با استفاده از دستگاه یونیورسال انجام شده است همچنین آزمایش بالستیک با پرتابه سرتخت به قطر 10 میلی‌متر و جرم 8.5 گرم با استفاده از دستگاه تفنگ گازی انجام شده است. نتایج آزمایش نفوذ شبه استاتیکی نشان می‌دهد مجموع انرژی جذب شده در دو رویه و سازه لانه زنبوری کمتر از حالتی است که این اجزا به شکل ساندویچ مورد استفاده قرار می‌گیرند در واقع انرژی جذب شده ساندویچ پنل در مقایسه با این مجموعه (مجموع دو عدد ورق آلومینیومی و لانه زنبوری) 42% بیشتر شده است؛ اما مجموع مقدار نفوذ این اجزا (مجموع دو رویه آلومینیومی و لانه زنبوری) 30% بیشتر از ساندویچ پنل می‌باشد. در آزمایش بالستیک نیز سرعت حدبالستیک و انرژی بالستیک سازه ساندویچی از اجزای آن به میزان قابل ملاحظه‌ای بیشتر می‌باشد. نتایج به دست آمده از نفوذ شبه استاتیکی و نفوذ دینامیکی برتری سازه‌های ساندویچی به سازه‌های معمولی را نشان می‌دهد. بنابراین سازه ساندویچی به عنوان یک سازه جاذب انرژی مناسب می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

Investigation of Interaction between Aluminum Facing and Honeycomb Structure in Quasi-static and Impact Loading

Fatemeh Hassanpour Roudbeneh¹, Gholamhossein Liaghat^{1*}, Hadi Sabouri², Homayoun Hadavinia³

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

2- Department of Mechanical Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran

3- School of Mechanical and Automotive Engineering, Kingston University, London, UK

* P.O.B. 14115-141, Tehran, Iran, ghlia530@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 14 April 2016
Accepted 07 June 2016
Available Online 13 July 2016

Keywords:

Sandwich panel
Honeycomb structure
Quasi-static penetration
Ballistic impact
Ballistic limit velocity

ABSTRACT

In this paper, the interaction between aluminum facing and honeycomb structure in the quasi-static and the impact loading has been investigated experimentally. The structural elements used in this research were aluminum plate, aluminum 5052 honeycomb structure. The quasi-static penetration tests and ballistic impact experiments were performed on aluminum plate, honeycomb structure and sandwich panel by flat ended penetrator and flat ended projectile respectively. The failure mechanisms, ballistic limit velocities, absorbed energies due to penetration, the damage modes and some structural responses were studied. Also, the effect of interaction between aluminum facing and honeycomb structure in the quasi-static penetration and the ballistic impact response in this honeycomb sandwich panel were discussed and commented upon. Comparing energy absorption in these structures showed that the amount of absorbed energy by the sandwich panel with honeycomb core is more than the absorbed energy by the aluminum plate and honeycomb structure in the quasi-static penetration. These results indicated that, using the honeycomb structure as the core of sandwich panel resulted in increasing the stiffness and the strength of the sandwich panel. The ballistic impact results showed that the absorbed energy and the ballistic limit velocity in the sandwich panel compared with the individual components were increased. Therefore, the sandwich structure can be used as a suitable energy absorber.

1-مقدمه

اتصال ورقه‌های بسیار نازک از یک ماده به یکدیگر تشکیل شده است. معمولاً

سازه لانه زنبوری (کندویی) شبکه‌ای از سلول‌های باز (میان تهی) است که از سلول‌ها به شکل شش ضلعی منتظم هستند؛ اما می‌توانند شکل‌های دیگری

نظیر سلول‌های چهار گوش و دایره‌ای نیز داشته باشند.

مفهوم اصلی سازه ساندویچی از چسباندن صفحات نازک، متراکم و قوی به سلول‌های لانه زنبوری ضخیم و سبک ایجاد می‌شود. در این محصولات، نسبت استحکام به وزن و سفتی به وزن بالا قابل دسترسی است. لانه زنبوری، پیکربندی بی‌همتا و جالب توجهی از مواد است که امتیازات فراوانی نظیر خواص مکانیکی خوب، خواص برخورد عالی، خاصیت دی الکتریکی پایین، ضرایب انتقال حرارت پایین، توانایی کنترل جریان سیال، خواص صوتی خوب، قابلیت جذب انرژی بالا، مستهلک کردن فرکانس‌های رادیویی و مساحت سطح مقطع پایین در این سلول‌ها را فراهم می‌کند. امروزه سازه‌های لانه زنبوری به دلیل نسبت استحکام به وزن بسیار بالا و همچنین جذب انرژی تا حدود 70% ارتفاع اولیه خود، اهمیت ویژه‌ای در صنایع مختلف اعم از هواپیمایی، حمل و نقل، ساختمان‌سازی و صنایع نظامی پیدا کرده‌اند. مدت‌ها پیش از این که بشر به تکنولوژی سازه‌های زنبوری دست یابد؛ این ساختارها در طبیعت وجود داشته‌اند. سابقه تحقیقات بر روی این سازه‌ها به حدود نیم قرن قبل برمی‌گردد و تاکنون هم ادامه دارد [1]. تحقیقات بسیاری بر روی رفتار این سازه‌ها تحت نفوذ پرتابه‌ها، بارگذاری‌های دینامیکی و شبه استاتیکی (به صورت منفرد یا در ساندویچ پل‌ها) انجام گرفته است. تعدادی از این تحقیقات به صورت زیر است:

گلداسمیت و ساکن [2] تأثیر چند پارامتر مانند سرعت، شرایط مرزی، استحکام اتصالات بین هسته هانی کامب و رویه‌های آلومینیومی را روی جذب انرژی در طول نفوذ کامل را به‌طور تجربی بررسی کردند. مور و همکاران [3] نحوه تغییر شکل سازه‌های لانه زنبوری و تغییرات تنش برحسب کرنش آن را تا زمان گسیختگی به صورت تجربی بررسی کردند. آن‌ها بیان نمودند که در ابتدا نمودار حالت الاستیک به صورت خطی می‌باشد و در ادامه حالت الاستیک نمودار به صورت غیرخطی درمی‌آید و زمانی که تنش موضعی و اعمالی بر دیواره سلول‌ها به آستانه تسلیم می‌رسد، محدوده الاستیک تمام شده و محدوده پلاستیک آغاز می‌گردد. هو و همکاران [5,4] بارگذاری ضربه-ای و شبه استاتیکی سازه‌های کندویی را به‌صورت ترکیب بارهای فشاری و برشی مورد بررسی قرار دادند. در این بررسی که با استفاده از دستگاه هایپکینسون فشاری صورت گرفت، نمونه‌ها تحت بارگذاری در زوایای مختلف قرار گرفتند. این بررسی به روش عددی نیز انجام شد. در این بررسی مشخص گردید که اعمال بارهای ترکیبی، یعنی بار محوری به همراه بار برشی، تأثیر بسزایی در رفع نیروی حداکثر اولیه و کاهش مقاومت لهیدگی اهداف دارد. به علاوه مشخص گردید که دو کمیت مذکور برای حالت دینامیکی همواره بیشتر از حالت شبه استاتیک می‌باشد. همچنین مطالعه عددی انجام شده مطابقت خوبی در مدهای تغییرشکل و منحنی‌های نیروی فشاری و لهیدگی با روش‌های تجربی انجام شده داشت و مشخص گردید که مقاومت محوری لانه زنبوری‌ها افزایش نیروی برشی در بار ترکیبی کاهش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد. علوی‌نیا و همکارانش [6] سرعت حد بالستیک، انرژی تلف شده و ناحیه صدمه دیده سازه‌های کندویی آلومینیومی را در برخورد عمودی پرتابه-ها مورد بررسی قرار دادند. در این بررسی سرعت حد بالستیک محاسبه شده برای موارد مختلف مطابقت خوبی با نتایج به‌دست آمده از رابطه‌ی تحلیلی و پیشنهاد شده، دارد. با مقایسه این نتایج مشخص گردید که اختلاف نتایج به دست آمده تجربی با کمیت متناظر محاسبه شده از رابطه تحلیلی دارای خطای کمتر 10 درصد می‌باشد. همچنین مشاهده گردید که انرژی جنبشی گلوله به واسطه مکانیزم‌های خمش دیواره سلول‌ها، پاره شدن دیواره‌ها، برش

پلاگ و انرژی جنبشی پلاگ مستهلک می‌گردد. به علاوه دیده شد که نقش اصلی در اتلاف انرژی در برخورد گلوله به اهداف بر عهده مکانیزم‌های خمش دیواره سلول‌ها و برش پلاگ تشکیل شده می‌باشد. بوتراگو و همکارانش [7] سوراخ شدن سازه‌های ساندویچی کامپوزیتی را در برخورد گلوله با سرعت بالا مورد بررسی قرار دادند. این مطالعه که هم به صورت تجربی و هم به صورت عددی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس صورت گرفته است، مواردی همچون سرعت خروجی، میزان جذب انرژی، سرعت حد بالستیک و زمان برخورد مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج عددی مطابقت بسیار خوبی با نتایج تجربی داشت. لیاقت و همکارانش [8] مکانیزم نفوذ و عبور گلوله استوانه‌ای سر تخت را در اهداف لانه زنبوری به‌صورت تئوری و تجربی بررسی کردند. پیرمحمدی و همکارانش [10,9] ضربه سرعت بالا بر روی سازه ساندویچی با رویه کامپوزیتی از جنس الیاف شیشه/پوکسی و هسته لانه زنبوری از جنس آلومینیوم را به طور تجربی مورد بررسی قرار دادند. این بررسی به روش عددی و تحلیلی نیز انجام شد و نتایج مطابقت خوبی با روش تجربی داشتند. 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.

همچنین تحقیقات زیادی روی مدل‌های مختلف سازه ساندویچی در بارگذاری‌های مختلف صورت گرفته است بیشتر نتایج مدل‌های تحلیلی و یا عددی ارائه شده با نتایج روش تجربی مقایسه شده است در حالی که تحلیل مناسبی روی داده‌های تجربی صورت نگرفته است. همچنین رفتار سازه‌های ساندویچی در بارگذاری‌های استاتیکی و دینامیکی و برتری سازه‌های ساندویچی نسبت به سازه‌های معمولی به‌طور دقیق در بارگذاری متمرکز بررسی نشده است. یکی از بحث‌های جامانده در روش‌های تجربی بر روی سازه‌های ساندویچی تأثیر بر هم کنش رویه‌ها و هسته در سازه ساندویچی می‌باشد. که با بررسی این موضوع می‌توان از این سازه‌ها به‌صورت بهینه و در کاربردهای مناسب استفاده نمود.

در این مقاله نفوذ شبه استاتیکی و نفوذ دینامیکی بر روی اجزای ساندویچ پل به صورت جداگانه و همچنین خود سازه ساندویچی با هسته لانه زنبوری انجام شد تا اثر بر هم کنش رویه‌ها و هسته لانه زنبوری در میزان جذب انرژی و سرعت حد بالستیک در سازه ساندویچی بررسی شود.

2- مواد

نمونه‌های آماده شده در این تحقیق، ورق آلومینیومی، لانه زنبوری آلومینیومی و ساندویچ پل با هسته لانه زنبوری و رویه‌های آلومینیومی می‌باشد و در زیربخش‌های آینده درباره خواص و ابعاد آن‌ها توضیح داده شده است.

2-1- ورق آلومینیومی

ورق آلومینیومی استفاده شده در این پژوهش آلومینیوم 1200 اراک است که ضخامت آن 0.5 میلی‌متر می‌باشد با توجه به فیکسچر طراحی شده ابعاد انتخابی برای این نمونه 75×75 میلی‌متر مربع است (شکل 1). با انجام آزمایش کشش روی ورق آلومینیومی 1200 طبق استاندارد ASTM E8M-[12]04 مشخصات فیزیکی و مکانیکی آن در جدول 1 آورده شده است.

2-2- سازه لانه زنبوری

لانه زنبوری استفاده شده از جنس آلومینیوم 5052-H38 می‌باشد. ویژگی‌های این نوع آلومینیوم در جدول 2 آورده شده است [13]. این نوع لانه زنبوری به

جدول 1- خصوصیات مربوط به آلومینیوم 1200

Table 1 The properties of 1200 aluminum

مقادیر	خصوصیات آلومینیوم 1200
E	76 (GPa)
σ_y	131.33 (MPa)
σ_u	133 (MPa)
ϵ_u	8 (%)
ρ	2637 (kg/m ³)

جدول 2- خصوصیات مربوط به جنس لانه زنبوری مورد استفاده در آزمایش‌ها

Table 2 The properties of 5052-H38 aluminum

مقادیر	خصوصیات آلومینیوم 5052-H38
E	70 (GPa)
ν	0.3
σ_y	255 (MPa)
σ_u	290 (MPa)
τ_u	165 (MPa)
ρ	2680 (kg/m ³)

همان‌طور که در "شکل 3" مشخص است، فیکسچر به شکل مربعی و دارای ابعاد داخلی 50×50 میلی‌متر مربع ساخته شده است. فیکسچر با هشت پیچ M16 در طرفین، به گونه‌ای سفت می‌شود تا شرایط مرزی گیردار در مرزهای نمونه ایجاد گردد و برای جلوگیری از لغزش فیکسچر حین آزمون نفوذ شبه-استاتیکی، دو پیچ M8 در طرفین آن تعبیه شده است تا فیکسچر به میز دستگاه یونیورسال بسته شود. لازم به ذکر است که این فیکسچر دو منظوره ساخته شده است همان‌طور که در "شکل 4" دیده می‌شود اولین تکه از سمت راست هم در آزمایش نفوذ شبه استاتیکی و هم در آزمایش بالستیک مورد استفاده قرار می‌گیرد.

3-2- آزمایش‌های نفوذ شبه استاتیکی

آزمایش‌های نفوذ شبه استاتیکی در آزمایشگاه مکانیک ضربه دانشگاه تربیت مدرس با استفاده از دستگاه یونیورسال که در "شکل 4" مشخص است، انجام شد. نمونه‌ها در فیکسچر بطور ثابت قرار می‌گیرد و نفوذ کننده به بخش متحرک دستگاه وصل می‌شود و با نرخ جابجایی 2 میلی‌متر بر دقیقه، درون نمونه نفوذ می‌کند. نیروی وارد شده به هدف، توسط لودسل موجود در بالای محل اتصال نفوذ کننده، اندازه‌گیری می‌شود. چون در آزمایش بالستیک از پرتابه سرتخت استفاده شده است نفوذ کننده مورد استفاده در این پژوهش دارای دماغه تخت با قطر 10 میلی‌متر و استحکام نهایی 1200 مگاپاسکال می‌باشد. نفوذ کننده ساخته شده به گونه‌ای طراحی شده که به دستگاه پیچ شود و مانع هر گونه لغزش و جابجایی به طرفین باشد. آزمایش مذکور بر روی ورق آلومینیومی، سازه لانه زنبوری و ساندویچ پل انجام شد و تا نفوذ کامل نفوذ کننده درون هر یک از این نمونه‌ها و ثابت شدن نمودار نیرو-جابجایی، ادامه یافت.

3-3- آزمایش‌های بالستیک

آزمایش‌های بالستیک در آزمایشگاه مکانیک ضربه دانشگاه تربیت مدرس با



Fig. 3 Three pieces of the dual-purpose fixture

شکل 3 سه تکه‌ی فیکسچر دو منظوره

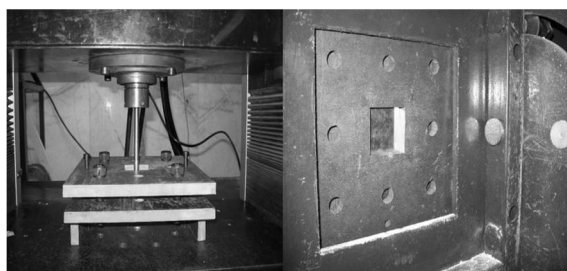


Fig. 4 The quasi-static and dynamic tests of the dual-purpose fixture performance

شکل 4 عملکرد فیکسچر دو منظوره در آزمایش شبه استاتیکی و دینامیکی

روش کرکره‌ای ساخته شده است (شکل 1). ابعاد لانه زنبوری مورد استفاده نیز با توجه به فیکسچر 75×75 میلی‌متر مربع می‌باشد و سایر ابعاد آن در "شکل 2" آورده شده است.

3-2- سازه ساندویچ پل

لانه زنبوری و ورق آلومینیومی به طور جداگانه در اندازه‌های 75×75 میلی‌متر مربع بریده شده‌اند و سپس توسط رزین به هم چسبانده شده‌اند (شکل 2). رزین استفاده شده محصول کارخانه شل می‌باشد که از دو جزء اپوکسی CY219 و سخت کننده HY5161 تشکیل شده که با نسبت وزنی دو به یک ترکیب شده است.

3- شرح آزمایش‌ها

3-1- ساخت فیکسچر

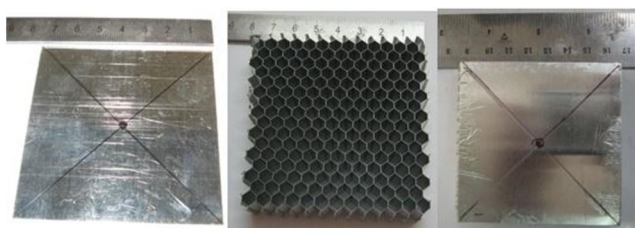


Fig. 1 The specimens from left to right aluminum plate, honeycomb structure and sandwich panel

شکل 1 نمونه‌ها از چپ به راست ورق آلومینیومی، لانه زنبوری و ساندویچ پل ساخته شده

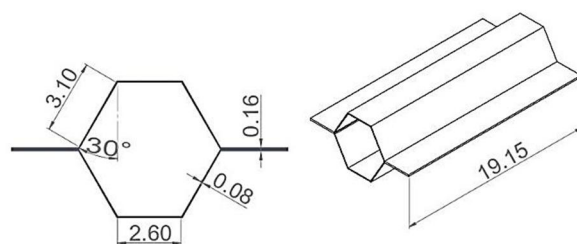


Fig. 2 The geometrical size of each cell in the honeycomb structure in mm

شکل 2 ابعاد هندسی هر سلول از سازه لانه زنبوری مورد استفاده در آزمایش‌ها (ابعاد به میلی‌متر)

شده است. شکل تخریب نمونه‌ها با یکدیگر متفاوت بود (شکل 7).

4-1-1- نفوذ شبه استاتیک در ورق آلومینیومی

پس از انجام آزمایش نفوذ بر روی ورق آلومینیومی، مشاهده شد که سطح بالایی نمونه که با نفوذ کننده در تماس بوده ایجاد سوراخ به اندازه قطر نفوذکننده کرده است. در "شکل 7" سطح پشتی در ورق آلومینیوم ایجاد پلاگ¹ (برش سکه‌ای) کرده است. این رفتار به علت برش بخشی از ورق که در مواجهه با پیشانی سرتخت نفوذ کننده قرار دارد، اتفاق می‌افتد.

منحنی نیرو- نفوذ برای ورق آلومینیومی در "شکل 8" ارائه گردیده است. منحنی نشان داده شده در "شکل 8" را می‌توان به سه بخش تقسیم کرد تا رفتار نفوذکننده از لحظه نفوذ تا لحظه عبور و خروج از نمونه بررسی گردد. قسمت AB این نمودار مربوط به لحظاتی می‌شود که نفوذکننده روی نمونه استقرار می‌یابد. بخش مقعر BC نشان دهنده رفتار سفت شوندگی در نمونه با پیشروی نفوذ کننده است. در نقطه C نفوذکننده ورق را سوراخ کرده است و بیشترین ظرفیت باربری ورق را نمایش می‌دهد. فاصله CD نشان می‌دهد نفوذکننده از ورق خارج می‌شود و لغزش صورت گرفته میان دیواره نفوذ کننده و لبه سوراخ، ایجاد اصطکاک کرده و منحنی نزولی می‌شود.

4-1-2- نفوذ شبه استاتیک در سازه لانه زنبوری

در سازه لانه زنبوری به علت ساختار شبکه‌ای و اتصال چسبی که بین دیواره‌های مشترک هر سلول وجود دارد شکل نفوذ و تخریب سازه متفاوت بوده است. نفوذکننده شبکه لانه‌زنبوری را فشرده نموده و با حرکت تدریجی رو به پایین، بخشی از لانه زنبوری اطراف خود را به همراه خود به سمت پایین کشیده است. وضعیت تخریب در این حالت، ترکیبی از برش و مچالگی خواهد بود.



Fig. 7 The backside of specimens, after the quasi-static penetration (From left to right aluminum plate, honeycomb structure and sandwich panel)

شکل 7 تصویر پشت نمونه‌ها بعد از نفوذ شبه استاتیک (از چپ به راست ورق آلومینیومی، لانه زنبوری و ساندویچ پل)

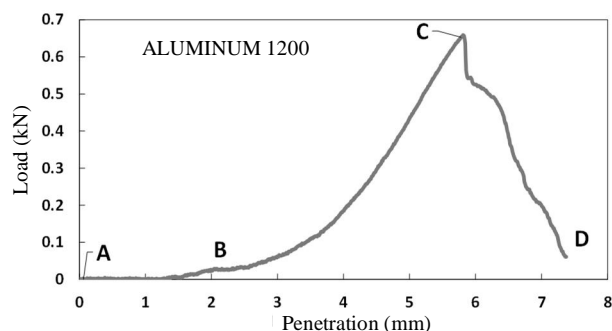


Fig. 8 The force-penetration curve of the aluminum sheet

شکل 8 نمودار نیرو- نفوذ برای ورق آلومینیومی

استفاده از یک تفنگ گازی که طرح شماتیک آن در "شکل 5" نشان داده شده است، انجام گرفت. برخورد در سرعت‌های مختلف، نزدیک حد بالستیک و سرعت‌های بیش از حد بالستیک اهداف بوده و سرعت‌های ورودی و خروجی در آزمایش‌ها اندازه‌گیری شده است. حداقل تکرار برای هر نمونه سه مرتبه بوده است.

دستگاه تفنگ گازی مورد استفاده با ایجاد فشار گاز هلیوم یا هوا پشت گلوله باعث سرعت گرفتن و خروج آن از لوله دستگاه می‌گردد. به‌منظور اندازه‌گیری سرعت اولیه در جلوی تفنگ گازی از یک جفت منبع لیزر و دیود حساس نوری که متصل به یک شمارنده زمان هستند، استفاده شده بود. به دلیل این که پس از نفوذ و خروج پرتابه از هدف، پرتابه از مسیر خود منحرف می‌شود امکان اندازه‌گیری سرعت خروجی مشابه با روش اندازه‌گیری سرعت ورودی وجود ندارد.

هنگام آزمایش هر یک از نمونه‌ها، درون فیکسچر ساخته شده با ابعاد داخلی 50×50 میلی‌متر مربع به طور ثابت قرار گرفت (شکل 4). پرتابه (گلوله) یک استوانه فولادی سرتخت به طول 15 میلی‌متر، قطر 10 میلی‌متر، جرم 8.5 گرم و سختی RC 60 می‌باشد (شکل 6).

4- نتایج و بحث

نتایج بدست آمده از آزمایش‌های نفوذ شبه استاتیک و دینامیک به شرح زیر می‌باشد.

4-1- نتایج آزمایش نفوذ شبه استاتیک

آزمایش نفوذ شبه استاتیک بر روی هر یک از اجزای ساندویچ پل و خود سازه ساندویچی انجام شد که نتایج آن در زیربخش‌های بعدی توضیح داده

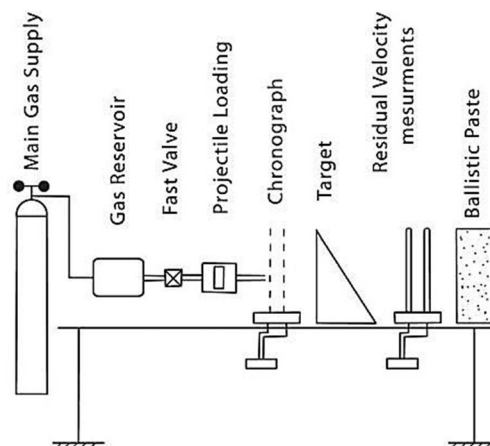


Fig. 5 The Schematic drawing of the gas gun

شکل 5 شکل شماتیک از تفنگ گازی [14]

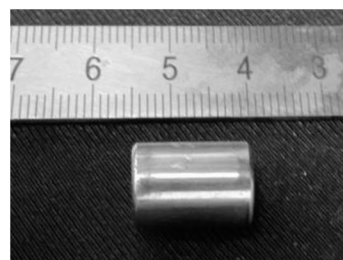


Fig. 6 The projectile used in the ballistic impact test

شکل 6 گلوله مورد استفاده در آزمایش شلیک

¹ Plugging

کار پلاستیک موضعی انجام شده روی ورق بالایی، باعث رفتار سفت شونده در ورق شده و در نهایت در نقطه E، حداکثر ظرفیت تحمل نیروی فشاری موضعی اتفاق افتاده و یک پلاگ از آن جدا می‌شود. پس از نقطه E، نفوذ کننده از رویه بالایی عبور نموده و وارد هسته می‌گردد. در این حالت، نیرو افت نموده و پلاگ بریده شده به پیشانی نفوذ کننده متصل بوده و همراه با پیشروی آن، چین‌خوردگی کوچکی در دیواره بالایی هسته در ناحیه زیر نفوذ کننده و اطراف آن اتفاق می‌افتد. این عامل، سبب کاهش سفتی موضعی شده و رفتار نرم‌شونده از E تا F مشاهده می‌گردد. هسته لانه‌زنبوری در برابر نفوذ کننده مقاومت نموده و در نقطه G اتصال چسبی بین دیواره‌های آن گسیخته شده و افت موضعی بار اتفاق می‌افتد. بین نقاط G تا H، تخریب اتصال چسبی بین دیواره‌های لانه‌زنبوری افزایش یافته و چین‌خوردگی و همچنین مچالگی دیواره‌ها، گسترش پیدا می‌کند که افت و خیزهای کوچک و متعدد در این فاصله روی منحنی بار - نفوذ مشاهده می‌گردد. در نقطه H، آخرین بخش از لانه‌زنبوری زیر پلاگ، بریده شده و سفتی مجموعه ساندویچی به‌شکل قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. پیشروی نفوذکننده، با افزایش تراکم بخش‌های بریده شده لانه زنبوری همراه است. فشار نفوذکننده به بخش متراکم زیر پلاگ، با مقاومت لایه پوششی زیرین همراه بوده و منحنی بار - نفوذ تا نقطه I بالا خواهد رفت. در نهایت در این نقطه، برش گلبرگی و ایجاد یک پتال در ورق زیرین اتفاق می‌افتد. تمایل به خروج بخش بریده شده لانه‌زنبوری از پتال بریده شده، سبب گسترش آن شده و نقاط J و K را پدید خواهد آورد (شکل 10).

4-1-4- انرژی جذب شده شبه استاتیکی

با مقایسه انرژی جذب شده در این سازه‌ها مشاهده می‌شود که مقدار انرژی جذب شده در سازه ساندویچی، بیشتر از انرژی جذب شده توسط ورق آلومینیومی و لانه زنبوری بوده است. این مطلب بیانگر این است که لانه زنبوری وقتی به عنوان هسته در سازه ساندویچی مورد استفاده قرار می‌گیرد، سفتی و استحکام مجموعه ساندویچ شده افزایش یافته و در نتیجه میزان انرژی جذب شده‌ی آن افزایش چشمگیر پیدا می‌کند (شکل 11). همچنین این امر را می‌توان با مقایسه سوراخ ایجاد شده در آزمایش نفوذ شبه استاتیکی بر روی هر یک از این سازه‌ها مشاهده کرد. سوراخ ایجاد شده در لانه زنبوری، بزرگ و نامنظم می‌باشد؛ اما با برداشتن رویه بالایی ساندویچ پل، دیده می‌شود که سوراخ ایجاد شده در آن هم اندازه قطر نفوذکننده و منظم می‌باشد (شکل 12).

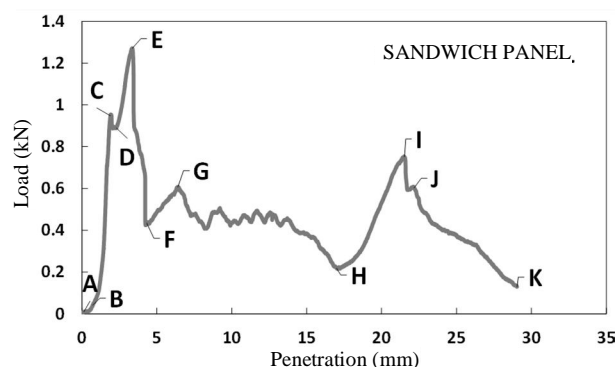


Fig. 10 The force-penetration curve of the sandwich panel

شکل 10 نمودار نیرو- نفوذ برای ساندویچ پل

منحنی نفوذ در سازه لانه زنبوری به شش قسمت تقسیم شده است (شکل 9). همان‌طور که در ورق آلومینیومی به آن اشاره شد، بخش AB نشانگر استقرار نفوذکننده بر روی نمونه است. فاصله BC بارگذاری دیواره سلول‌ها توسط نفوذ کننده را نشان می‌دهد. این وضعیت، نشان‌گر رفتار غیرخطی از نوع سفت‌شوندگی در هسته لانه‌زنبوری می‌باشد. از نقطه C به بعد، نفوذکننده در مرز مشترک سلول‌ها وارد شده و مقدار کمی چین‌خوردگی موضعی در دیواره سلول‌ها ایجاد می‌نماید که نشان‌گر رفتار نرم‌شونده از C تا D خواهد بود. در فاصله DE منحنی حالت صعودی داشته و پیشروی نفوذ کننده، با مقاومت کششی هسته همراه است. نیروی فشاری نفوذ کننده در نقطه E به ماکزیمم خود رسیده و از آنجا، تخریب اتصال چسبی میان دیواره سلول‌های اطراف نفوذ کننده و مچالگی سلول‌ها آغاز می‌شود. تخریب لانه‌زنبوری، چندین برابر سطح مقطع نفوذ کننده بوده و در نقطه F، به حداکثر خود خواهد رسید. خروج تدریجی نفوذ کننده از هسته، از نقطه F شروع شده و همراه با ایجاد اصطکاک می‌باشد. آزمایش تا نقطه G ادامه یافته است. فاصله FG، عبور تدریجی نفوذکننده از هسته لانه‌زنبوری را نشان می‌دهد.

4-1-3- نفوذ شبه استاتیکی در سازه ساندویچی

نفوذکننده به هنگام نفوذ در سازه ساندویچ پل ابتدا در صفحه رویی آلومینیومی ایجاد پلاگ کرده و بعد از آن وارد لانه زنبوری شده و به هنگام خروج از صفحه پشتی آلومینیومی، با بیرون راندن بخش مچاله شده لانه زنبوری تخریب شده ایجاد پتال¹ (غنچه شدن) کرده است. پتال در نزدیکی لبه نفوذکننده اتفاق می‌افتد و این شکست نتیجه ممان‌های خمشی و نیروهای برشی در صفحه پوششی پایینی در نمونه می‌باشد.

آنچه در سازه ساندویچ پل وجود دارد ترکیب دو رفتار قبلی (نفوذ در ورق آلومینیومی و سازه لانه زنبوری) می‌باشد. منحنی ساندویچ پل دارای نه بخش است. در ابتدا فاصله AB بیانگر نشست نفوذکننده بر روی پل ساندویچی است. با پیش‌روی نفوذکننده، منحنی نیرو- نفوذ فرم مقعر داشته و نشان‌دهنده رفتار سفت‌شوندگی نمونه در بخش BC می‌باشد. با افزایش نیرو تنش برشی در فصل مشترک هسته لانه زنبوری و رویه بالایی افزایش یافته؛ سبب تخریب موضعی اتصال رزینی شده و سفتی به شکل موضعی از C تا D افت می‌کند. پس از نقطه D، با جدایش موضعی ورق بالایی از پل ساندویچی، پیشروی نفوذ کننده با پلاستیسیتته، کشیدگی موضعی ورق، مچالگی و چین‌خوردگی در بخش بالایی دیواره لانه زنبوری همراه می‌باشد.

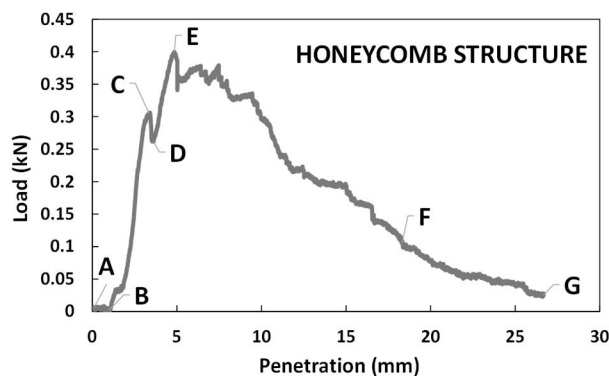


Fig. 9 The force-penetration curve of the honeycomb structure

شکل 9 نمودار نیرو- نفوذ برای سازه لانه زنبوری

¹ Petaling

توجه به انرژی بدست آمده برای هر نمونه و با دانستن جرم گلوله سرتخت (8.5 گرم) که در آزمایش شلیک مورد استفاده قرار خواهد گرفت حد پایین سرعت اولیه برای هر نمونه محاسبه شده است. که برای ورق آلومینیومی، سازه لانه زنبوری و سازه ساندویچی به ترتیب 18، 33 و 52 متر بر ثانیه می‌باشد. تقریباً 20% تا 25% بیشتر از این مقادیر سرعت اولین شلیک روی هر یک از نمونه‌ها می‌باشد و با توجه به نفوذ پرتابه در اهداف و همچنین تعریف حد بالستیک کاهش یا افزایش سرعت برای شلیک‌های بعدی تعیین می‌شود. نتایج بدست آمده از نفوذ دینامیکی برای هر یک از سازه‌ها در زیربخش‌های بعدی توضیح داده شده است.

4-2-1- شکل تخریب

آزمایش‌های شلیک بر روی ورق آلومینیومی، سازه لانه زنبوری، ساندویچ پل با هسته لانه زنبوری انجام شد. آزمایش‌های شلیک در سرعت‌های مختلف انجام شد تا سرعت حد بالستیک برای هر نمونه پیدا شود. با بررسی نمونه‌ها چندین حالت برای ورود و خروج گلوله به اهداف پیش‌بینی می‌شود. این امر به علت ساختارهای متفاوت سازه‌ها نیز می‌باشد.

در ورق آلومینیومی گلوله به اندازه قطر خود در سطح جلویی هدف سوراخ ایجاد کرده و در نهایت به هنگام خروج در سطح پشتی ورق آلومینیوم ایجاد پلاگ کرده است.

در سازه‌های لانه زنبوری شکل نفوذ متفاوت است. اغلب در این سازه‌ها انحراف گلوله به هنگام ورود و خروج از اهداف مشاهده می‌شود که این امر به خاطر وجود ساختار لانه زنبوری می‌باشد. در سازه لانه زنبوری به علت ساختار شبکه‌ای و اتصال چسبی که بین دیواره‌های مشترک هر سلول وجود دارد پرتابه شبکه لانه‌زنبوری را فشرده نموده و با حرکت رو به جلو، بخشی از لانه زنبوری اطراف خود را به همراه خود به سمت خارج کشیده است. وضعیت تخریب در این حالت، ترکیبی از برش و مچالگی خواهد بود.

در ساندویچ پل‌ها ابتدا گلوله در رویه جلویی ایجاد پلاگ می‌کند و به علت سرعت بالای گلوله جدایش موضعی بین رویه جلویی و هسته ایجاد می‌شود پس از آن گلوله به همراه پلاگ کنده شده از رویه جلویی وارد هسته می‌شود. به هنگام خروج گلوله و قسمت‌های تخریب شده هسته، جدایش موضعی بین هسته و رویه پشتی ایجاد می‌شود و در نهایت گلوله با قسمت‌های کنده شده از صفحه پشتی خارج می‌شود و در آن ایجاد پلاگ می‌کند (شکل 14).

یکی از مشاهده‌ها پس از انجام تست‌های شلیک انحراف گلوله در بعضی از اهداف بود. علت این انحراف موقعیت پرتابه نسبت به هدف بود. در واقع گلوله یا از ابتدا با انحراف وارد هدف شده بود یا پس از ورود به هسته منحرف شده بود که علت دوم به خاطر ساختار سازه لانه زنبوری می‌باشد. با توجه به بررسی لیاقت و همکارانش [8] چهار محل را به عنوان موقعیت‌های احتمالی برخورد پرتابه به هدف تعیین نمودند. برای بررسی کامل برخورد و در نظر گرفتن شرایط برخورد به شکل دقیق‌تر، در این تحلیل دو محل برای برخورد گلوله به لانه زنبوری در نظر گرفته شده است؛ موقعیت C و D که در "شکل 15" موقعیت این دو محل را نشان می‌دهد. محل اول وسط سلول لانه زنبوری و محل دیگر نقطه اتصال دیواره‌ها به یکدیگر است.

در "شکل 16" انحراف گلوله به هنگام خروج از سازه ساندویچی مشاهده می‌شود و همچنین پتال متقارن ایجاد شده در سازه ساندویچی که در این شکل نشان داده شده است بیانگر خروج پرتابه بدون انحراف از هدف بوده است.

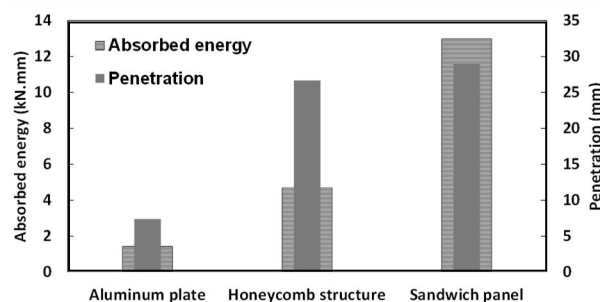


Fig. 11 The comparison of the energy absorption and penetration curves related to each specimen

شکل 11 مقایسه نمودارهای مربوط به انرژی جذب شده و نفوذ برای هر سه نمونه

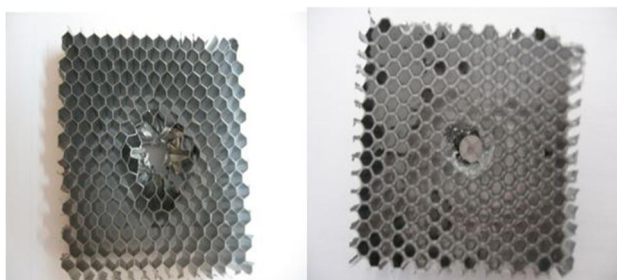


Fig. 12 The perforation (From left to right honeycomb structure and sandwich panel without the upper facing)

شکل 12 سوراخ شدگی (از چپ لانه زنبوری و ساندویچ پل بدون رویه جلویی)

همان‌طور که گفته شد سازه ساندویچی از دو رویه آلومینیومی و هسته لانه زنبوری آلومینیومی تشکیل شده است. مجموع انرژی جذب شده هر یک از این اجزاء به‌طور جداگانه با انرژی جذب شده سازه ساندویچی مقایسه شد که در این حالت نیز انرژی جذب شده در ساندویچ پل بیشتر از حالتی بوده است که دو ورق آلومینیومی به‌علاوه سازه لانه زنبوری بدون ساندویچ شدن جذب کرده‌اند. با بررسی نفوذ دیده شد مقدار نفوذ در ساندویچ پل کمتر از دو ورق آلومینیومی به‌علاوه لانه زنبوری بوده است. بنابراین سازه ساندویچی با نفوذ کمتر انرژی جذب شده‌ی بیشتری دارد و به عنوان یک سازه جاذب انرژی مناسب می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد (شکل 13).

4-2-2- نتایج آزمایش بالستیک

یکی از اهداف آزمایش نفوذ شبه استاتیک بدست آوردن انرژی جذب شده استاتیکی است تا بتوان طبق رابطه انرژی جنبشی حد پایین سرعت اولیه هر یک از نمونه‌ها را برای انجام آزمایش‌های پرسرعت بدست آورد. بنابراین با

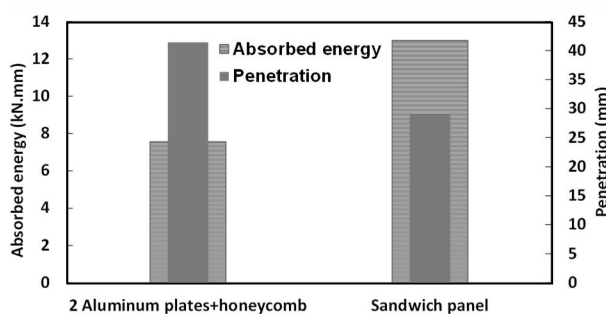


Fig. 13 The penetration and absorbed energy comparison chart of the sandwich panel with two aluminum facing and honeycomb structure

شکل 13 نمودار مقایسه نفوذ و انرژی جذب شده در ساندویچ پل با مجموع دو رویه آلومینیومی و سازه لانه زنبوری

گلوله در سرعت‌های بالاتر از حد بالستیک مربوط به هر نمونه از آن عبور کرده است و در سرعت‌های پایین‌تر در نمونه گیر کرده است. در "شکل 17" گلوله به علت سرعت کم در سازه ساندویچی گیر کرده است و نتوانسته از آن عبور نماید.

2-2-4- سرعت حد بالستیک

پس از پایان آزمایش‌های شلیک، داده‌های مربوط به سرعت ورودی و خروجی برای هر آزمایش بررسی شد.

تاکنون تعریف واحدی برای محاسبه حد بالستیک بیان نشده است و در مراجع مختلف تعاریف گوناگونی برای آن ارائه شده است. یکی از آن تعاریف محاسبه سرعت حد بالستیک به روش میانگین است در این روش مقدار میانگین بیشترین سرعتی که نفوذ کامل رخ نداده باشد و کمترین سرعتی که نفوذ کامل رخ داده باشد، حد بالستیک نامیده می‌شود.

بر این اساس سرعت حد بالستیک به روش میانگین برای نمونه‌های آزمایش شده محاسبه شد که نتایج آن به شرح زیر است.

همان‌طور که در جدول 3 مشاهده می‌شود سرعت حد بالستیک ساندویچ پل افزایش قابل ملاحظه‌ای نسبت به هر یک از اجزا سازنده‌اش داشته است. بنابراین در نفوذ دینامیکی نیز سازه ساندویچی برتری ویژه‌ای نسبت به سازه‌های معمولی دارد.

3-2-4- انرژی حد بالستیک

با دانستن سرعت حد بالستیک و جرم گلوله مورد استفاده در آزمایش‌ها انرژی بالستیک از رابطه انرژی جنبشی ($E=mv^2/2$) محاسبه می‌شود. با بررسی نتایج همان‌طور که در نفوذ شبه استاتیک دیده شد، سرعت حد بالستیک و انرژی جذب شده در ساندویچ پل افزایش قابل ملاحظه‌ای نسبت به هر یک از اجزای ساندویچ پل (ورق و سازه لانه زنبوری) به طور جداگانه داشته است (شکل 18).

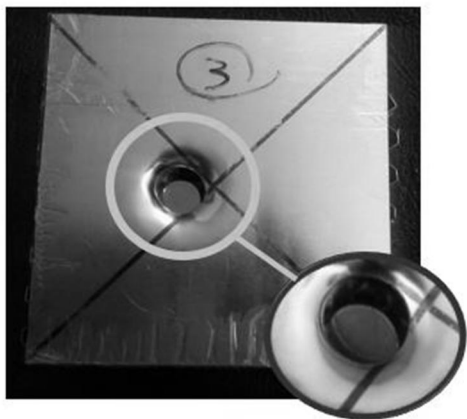


Fig.17 An example of the projectile stuck in the sandwich structure

شکل 17 نمونه‌ای از گیر کردن گلوله در سازه ساندویچی

جدول 3 نتایج مربوط به سرعت حد بالستیک هر یک از نمونه‌ها

Table 3 The results of the specimens ballistic limit velocity

نمونه	سرعت حد بالستیک (متر/ثانیه)
ورق آلومینیومی 1200	36.5
سازه لانه زنبوری	50.5
ساندویچ پل	72.75

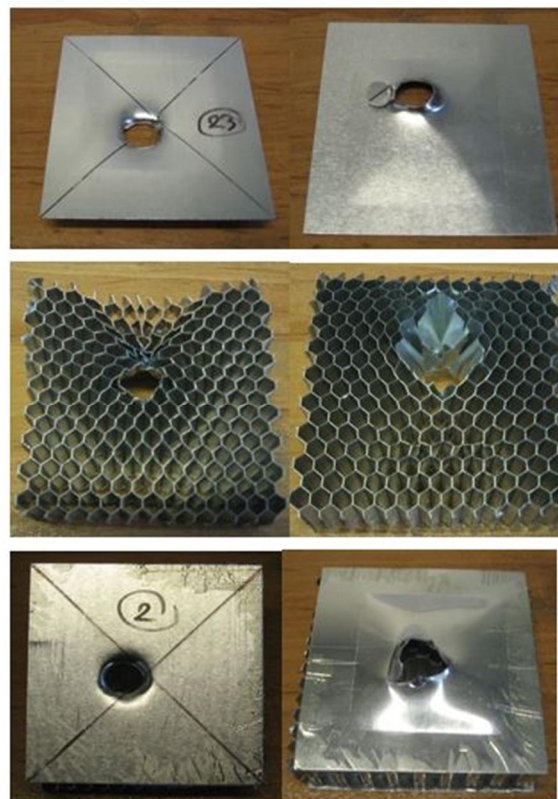


Fig. 14 The front and back specimens image after passing projectile

شکل 14 تصویر جلو و پشت نمونه‌ها پس از عبور کردن گلوله

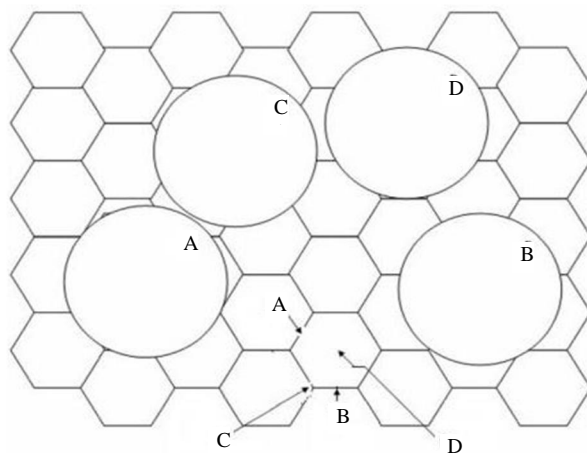


Fig. 15 The possible locations of the projectile collision with honeycomb

شکل 15 موقعیت محل‌های برخورد احتمالی گلوله به لانه زنبوری [8]

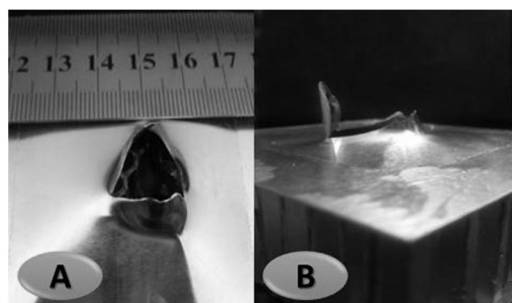


Fig. 16 A) The penetration without deviation B) The penetration with deviation

شکل 16 A) نفوذ گلوله بدون انحراف B) نفوذ گلوله با انحراف

سه قست (مجموع دو عدد ورق آلومینیومی و لانه زنبوری) بطور جداگانه تست نفوذ شبه استاتیکی شوند در هر کدام برای خروج نفوذکننده ایجاد اصطکاک جداگانه می‌شود که این امر در مجموع این سه قسمت تاثیر بسزایی دارد و این باعث شده مقدار نفوذ در این مجموعه 30% بیشتر از ساندویچ پل باشد.

- در آزمایش بالستیک سرعت حد بالستیک سازه ساندویچی 72.7 متر بر ثانیه و سرعت حد بالستیک سازه لانه زنبوری و ورق آلومینیومی به ترتیب 50.5 و 36.5 متر بر ثانیه بوده است. حد بالستیک ساندویچ پل افزایش چشمگیری نسبت به هریک از اجزا داشته است که این امر نشان‌دهنده اثر برهم کنش رویه آلومینیومی با سازه لانه زنبوری می‌باشد.

- تأثیر برهم کنش رویه‌های آلومینیومی با هسته لانه زنبوری در آزمایش بالستیک باعث تقریباً دو برابر و چهار برابر شدن انرژی بالستیکی سازه ساندویچی نسبت به سازه لانه زنبوری و ورق آلومینیومی به ترتیب شده است. بنابراین برهم کنش رویه‌های آلومینیومی و هسته لانه زنبوری در سازه ساندویچی تأثیر چشمگیری در افزایش میزان انرژی جذب شده و سرعت حد بالستیک این سازه دارد و مقایسه آن با هریک از اجزا بیانگر برتری سازه ساندویچی نسبت به سازه‌های معمولی می‌باشد و این امر سبب می‌شود ساندویچ پل به عنوان یک سازه جاذب انرژی خوب در صنایع مختلف مورد استفاده قرار گیرد.

6- فهرست علائم

E مدول الاستیسیته (GPa)

علائم یونانی

ϵ_u	کرنش پارگی
ν	ضریب پواسن
ρ	چگالی (kg/m^3)
σ_u	استحکام کششی نهایی (MPa)
σ_y	استحکام تسلیم (MPa)
τ_u	استحکام برشی نهایی (MPa)

7- مراجع

- [1] T. Bitzer, *Honeycomb Technology- Material Design, Manufacturing Applications and Testing*, pp. 10-42, London: Springer Netherlands, 1997.
- [2] W. Goldsmith, J. L. Sackman, An experimental study of energy absorption in impact on sandwich plates, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 12, No. 2, pp. 241-262, 1992.
- [3] D. Mohr, M. Doyoyo, Deformation-induced folding systems in thin-walled monolithic hexagonal metallic honeycomb, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 41, No. 11, pp. 3353-3377, 2004.
- [4] B. Hou, A. Ono, S. Abdennadher, S. Patoatto, Y. L. Li, H. Zhao, Impact behavior of honeycombs under combined shear-compression, Part I: Experiments, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 48, No. 5, pp. 687-697, 2011.
- [5] B. Hou, S. Patoatto, Y. L. Li, H. Zhao, Impact behavior of honeycombs under combined shear-compression, Part II: Analysis, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 48, No. 5, pp. 698-705, 2011.
- [6] A. Alavi Nia, S. Razavi, G. Majzoobi, Ballistic limit determination of aluminum honeycombs—experimental study, *Materials Science and Engineering*, Vol. 448, No. 1, pp. 273-280, 2008.
- [7] B. L. Buitrago, C. Santiuste, S. Sanchez-Saez, E. Barbero, C. Navarro, Modelling of composite sandwich structures with honeycomb core subjected to high-velocity impact, *Composite Structures*, Vol. 92, No. 9, pp. 2090-2096, 2010.

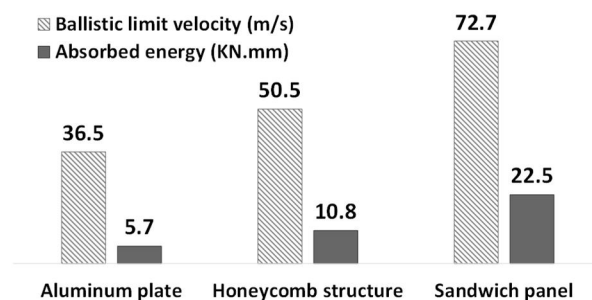


Fig. 18 The ballistic limit velocity and ballistic energy comparison between the components of the sandwich panel and sandwich structure

شکل 18 مقایسه سرعت حد بالستیک و انرژی بالستیک بین اجزای ساندویچ پل با خود سازه ساندویچی

به علت این که سرعت حد بالستیک یک پارامتر تقریبی می‌باشد و همچنین میزان خطای آن به علت سرعت بالا زیاد است نمی‌توان در این بخش همانند آزمایش نفوذ شبه استاتیکی انرژی جذب شده بین مجموع دو ورق آلومینیومی به علاوه لانه زنبوری را با سازه ساندویچی مقایسه کرد. اما با توجه به "شکل 18" انرژی جذب شده دینامیکی سازه ساندویچی در مقایسه با هریک از دو جزء تفاوت قابل ملاحظه‌ای دارد. که این موضوع بیانگر برتری سازه ساندویچی حتی در نفوذ دینامیکی نیز می‌باشد.

5- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر اثر برهم کنش رویه‌های آلومینیومی و سازه لانه زنبوری بر میزان انرژی جذب شده و سرعت حد بالستیک در سازه ساندویچی بررسی شد. نفوذ و انرژی جذب شده در سازه ساندویچی، لانه زنبوری و ورق آلومینیوم از آزمایش نفوذ شبه استاتیکی و سرعت حد بالستیک و انرژی جذب شده بالستیکی از آزمایش شلیک به دست آمد. با مشاهده آزمایش‌های انجام شده می‌توان به نتایج زیر دست یافت:

- وقتی اجزای ساندویچ پل به طور جداگانه مورد آزمایش نفوذ شبه استاتیکی قرار گرفتند میزان انرژی جذب شده در ورق آلومینیومی 1.44 ژول و در لانه زنبوری 4.69 ژول بود در حالی که انرژی جذب شده توسط ساندویچ پل 12.99 ژول شد این نتایج نشان می‌دهد انرژی جذب شده ساندویچ پل در مقایسه با تک تک اجزا افزایش چشمگیری دارد.

علت این است که در ورق آلومینیوم به علت ضخامت کم و استحکام پایین به محض نشست نفوذکننده روی نمونه شروع به سوراخ کردنش می‌کند با مقایسه "شکل‌های 8 و 10" دیده خواهد شد ورق آلومینیوم استفاده شده در رویه ساندویچ پل مقاومت بیشتری نشان می‌دهد و نقطه سوراخ شدگی بالاتری نسبت به حالتی که ورق آلومینیومی بصورت جداگانه آزمایش شده است را دارد و این به خاطر وجود هسته در زیر رویه بالایی می‌باشد همچنین با مقایسه "شکل‌های 9 و 10" سطح منحنی مربوط به هسته در ساندویچ پل بیشتر از لانه زنبوری جداگانه است و این به خاطر رویه بالایی و پایینی می‌باشد که استحکام هسته (کندویی) را بالا برده است.

- با مجموع انرژی دو رویه آلومینیومی و لانه زنبوری در نفوذ شبه استاتیکی دیده شد که انرژی جذب شده باز هم کمتر از حالت ساندویچ شده بود و انرژی جذب شده ساندویچ پل در مقایسه با این مجموعه (دو عدد ورق آلومینیومی + لانه زنبوری) 42% بیشتر می‌باشد اما مقدار نفوذ در ساندویچ پل کمتر از این مجموعه است و به علت این است که وقتی هر یک از این

- sandwich panels with honeycomb core subjected to high-velocity impact, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 43, No. 5, pp. 2439-2447, 2012.
- [12] Standard, A. E8. *Standard test method for tension testing of metallic materials*. West Conshohocken (USA): ASTM. 2004.
- [13] N. Abdolrahim, GH. Liaghat, H. A. Askari, Experimental study of low velocity impact on Sandwich panels with honeycomb core and Comparison with the FEM results, *A A* , Vol. 49, No. 1, pp. 45, 2008.
- [14] H. Ahmadi, GH. Liaghat, H. Sabouri, E. Bidkhouri, Investigation on the high velocity impact properties of glass-reinforced fiber metal laminates, *Journal of Composite Materials*, Vol. 47, No. 13, pp. 1605-1615, 2012.
- [8] GH. Liaghat, A. Alavi Nia, H. R. Daghyani, M. Sadighi, Ballistic limit evaluation for impact of cylindrical projectiles on honeycomb panels, *Thin-Walled Structures*, Vol. 48, No. 1, pp. 55-61, 2010.
- [9] N. Pirmohammadi, G. H. Liaghat, M. H. 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 فارسی)
- [10] N. Pirmohammadi, G. H. Liaghat, M. H. Pol, H. Sabouri, Analytical, experimental and numerical investigation of sandwich panels made of honeycomb core subjected projectile impact, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 6, pp. 153-164, 2014. (in Persian فارسی)
- [11] S. Feli and MH. Namdari Pour, An analytical model for composite