

Numerical and Experimental Analysis of Responses of Sandwich Panel with Fiber Metal Laminate (FML) Skin and Aluminum Foam Core under High Velocity Impact

Pooya Pirali ^{a*}, Arsalan Sahmani ^b, Mohsen Heydari Beni ^c

^{a,b,c}. Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

Original Article

Use your device to scan
and read the article online



Citation: Pirali P, Sahmani A, Heydari Beni M. Numerical and Experimental Analysis of Responses of Sandwich Panel with Fiber Metal Laminate (FML) Skin and Aluminum Foam Core under High Velocity Impact. *Mechanics of Advanced and Smart Materials*. 2024;4(3):404-424.

 <https://10.52547/masm.4.3.404>

KEYWORDS

Sandwich plate,
FML,
High velocity impact,
Energy absorption,
Penetration.

ABSTRACT

In recent years, research on sandwich plates has increased due to capabilities such as energy absorption, strength to weight ratio, thermal insulation, and so on in major industries such as aerospace and marine industries. In this study, by using low-density aluminum foams and making sandwich plates by FML layers (including aluminum and composite sheets) and aluminum foam core, an experiment was carried out with the help of a high-speed impact with gas gun, and the effect of density of foam, number of FML layers, velocity and mass of the projectile were investigated in terms of energy absorption of sandwich structures and ballistic limit of the projectile. Also, the results of empirical experiments on foam and composite layers, collision simulation and bullet penetration in a sandwich structure were performed using LS-DYNA software, and the results were compared and verified with experimental results. Experimental experiments and parametric studies show that aluminum foam (33%) and aluminum sheet (25%) have the highest energy absorption against the Bullet. Also, with the addition of a FML layer, the energy absorption of the sandwich plate increased by 40%.

Extended Abstract

1. Introduction

Understanding the properties of engineering materials is the first step and one of the most important indicators in selecting materials for the successful design of a product. A correct understanding of the behavior of materials and the response of engineering structures under different conditions is of great importance. Impact strength in engineering materials is very important along with other properties such as tensile, bending and torsional properties, and researchers have long been interested in understanding the behavior of materials under impact [1, 2]. Nowadays, the use of composites as strong and lightweight structures has been considered in various industries. One of the most widely used types of composite structures is sandwich panels. In recent years, research on this type of structure has increased due to its high capabilities such as energy absorption, high strength despite low weight, thermal insulation, etc. in important industries such as aerospace [4, 5]. Sandwich panels are a type of composite structure that is made of two thin but strong skins and a thick but light core. The core type is usually soft foam, honeycomb, truss and lattice, which usually have low strength but high bending stiffness and generally have low core density [7, 8].

* Corresponding author. Tel.: 02122945140

E-mail address: ppirali@mut.ac.ir

DOI: <https://10.52547/masm.4.3.404>

Received: Nov 27, 2024; Received in revised form: December 18, 2024; Accepted: December 19, 2024.2022

© Author



FML consists of two metal sheets and a composite layer, which is why they have high mechanical properties such as high strength and stiffness, high density, good toughness, corrosion resistance, high fatigue life and impact resistance. FML generally consists of alloy sheets made of aluminum alloys and are layered with composite reinforcement [9].

Liu et al. investigated the behavior of sandwich panels with FML facing and aluminum foam core under high-velocity impact. They conducted an experimental test on this type of sandwich panel by firing a bullet at a speed of 210 m/s using a gas gun, and after numerical simulation in LS-DAYNA software, the results were compared. In this study, parameters such as the effect of shell and core thickness, comparison of FML shell and composite shells, bullet geometry, and impact angle were considered [13].

Studies show that so far, the study on the effect of high-velocity impact on the behavior of sandwich panels with aluminum foam has been very limited, and very little research has been reported on this type of panels with FML facing. Therefore, in this study, by preparing low-density closed-pore aluminum foam and manufacturing sandwich panels with FML facing and aluminum foam core and changing the number of FML layers, using a gas gun device, the sandwich panels were subjected to bullet impact tests, and according to the experimental and numerical results, the effect of the material, thickness, and number of shell layers, as well as the bullet velocity and geometry, is investigated.

2. Method & Material

In this study, the penetration of projectiles with different geometries, including spherical, hemispherical, Ojai, and conical heads, in sandwich panels with different layering has been investigated and analyzed. By preparing low-density aluminum foams and making sandwich panels from FML layers (including aluminum foil and composite) and aluminum foam core, a high-velocity impact test was conducted experimentally using a gas gun device, and the effect of foam density, number of FML layers, velocity, and mass of the projectile on the energy absorption rate of the sandwich structure and the ballistic limit of the projectile was investigated. Also, with the help of the results of experimental tests conducted on foam and composite layers, simulation of projectile impact and penetration in the sandwich structure was performed using LS_DYNA software, and the results were compared and validated with experimental results.

3. Results & Discussion

Figure 1 compares the velocity-time graphs of samples SP31, SP32, and SP33. According to this graph, sample SP33, because it has one FML layer in front of the aluminum foam, initially reduces the bullet velocity with a smaller downward slope, while in samples SP31 and SP32, because there are two FML layers in front of the aluminum foam, the bullet velocity initially decreases sharply.

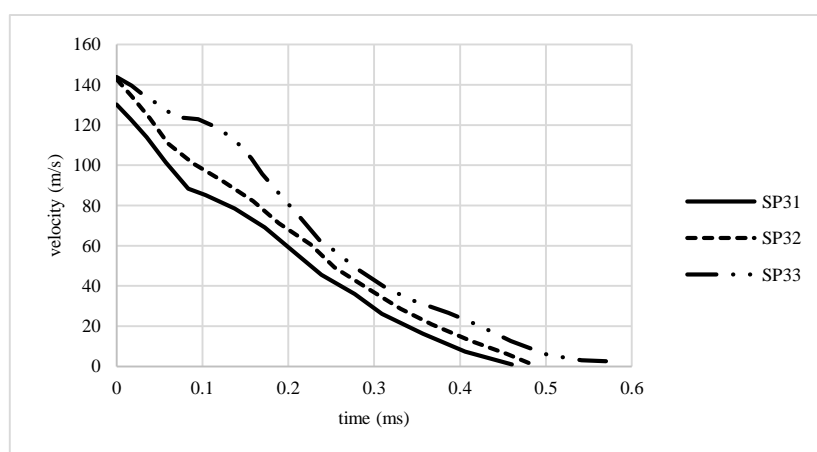


Figure. 1 Velocity-time diagram of bullet hitting samples SP31, SP32 and SP33.

To obtain the ballistic limit of the sandwich plates made due to their greater strength compared to the reference [13], they must be subjected to impacts with higher energy. Therefore, by using a bullet with different geometry and weight, the bullet energy has increased, as shown in Table 1. Specifications and results of tests conducted at Ahrar University of Rasht.

Table 1 Crash test specifications and results

Sample name	Impact speed (m/s)	Full penetration	Absorbed energy (J)
SP21	182	No	151.54
SP22	141	Yes	-
SP23	131.57	No	316
SP31	130.43	No	310
SP32	143.21	No	371
SP33	144.52	No	378

4. Conclusion

One of the basic parameters in the design of industrial structures is the resistance and energy absorption rate against dynamic loads, especially with high stress concentration and in a time interval of a few milliseconds, which causes the stress concentration to increase at one point of the structure and its destruction. Another important parameter in the design of structures is the weight of its body. Considering these parameters, the use of composite materials is increasing today. In this research, a new type of composite material called sandwich panels with fiber-metal surface was analyzed and investigated, and the results of numerical and experimental simulation are as follows:

- By examining the internal energy of each layer of the sandwich plate, it was determined that aluminum foam has the largest contribution to absorbing bullet energy, so that the projectile loses more than 33% of its energy when it hits this layer.
- A study of finite element modeling showed that the bullet geometry parameter has a high impact on the penetration of the projectile in the sandwich plate, so that a conical-headed bullet loses about 60% of its energy when it hits the sandwich plate.
- By increasing the number of FML layers, the resistance of the sandwich plates and their energy absorption against the projectile, the results obtained show the high impact of this parameter, so that by adding an FML layer, the energy absorption of the sandwich plate increases by about 40%.



تحلیل عددی و تجربی رفتار صفحه ساندویچی با رویه FML و هسته فوم آلومینیومی تحت ضربه سرعت بالا

پویا پیرعلی الف*، ارسلان سهمانی ب، محسن حیدری بنی پ

الف استادیار، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران. ppirali@mut.ac.ir
 ب دانش آموخته کارشناسی ارشد، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران. sahmani.arsalan@yahoo.com
 پ دانشجوی دکتری، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران. mohsenheydari1371@gmail.com

واژگان کلیدی	چکیده
نفوذ، صفحه ساندویچی، فوم آلومینیومی، جذب انرژی، برخورد سرعت بالا.	در سال‌های اخیر تحقیقات بر روی صفحات ساندویچی به دلیل قابلیت‌هایی همانند جذب انرژی، نسبت استحکام به وزن مناسب، عایق حرارتی و غیره در صنایع مهم همچون هوافضا و صنایع دریایی افزایش یافته است. در این تحقیق، با تهیه فوم‌های آلومینیومی با چگالی پایین و ساخت صفحات ساندویچی از لایه‌های FML (شامل ورقه آلومینیومی و کامپوزیت) و هسته فوم آلومینیومی، به کمک دستگاه تفنگ گازی آزمایش ضربه سرعت بالا به صورت تجربی انجام گرفت و اثر چگالی فوم، تعداد لایه‌های FML، سرعت و جرم پرتابه در میزان جذب انرژی ساختار ساندویچی و حد بالستیک پرتابه بررسی شد. همچنین به کمک نتایج آزمایش‌های تجربی انجام شده روی فوم و لایه‌های کامپوزیت، شبیه‌سازی برخورد و نفوذ پرتابه در ساختار ساندویچی با استفاده از نرم‌افزار LS_DYNA انجام شده و نتایج آن با نتایج تجربی مقایسه و صحت‌سنجی شده است. آزمایش‌های تجربی و مطالعات پارامتریک انجام شده، نشان می‌دهد که فوم آلومینیومی (۳۳٪) و ورقه آلومینیومی (۲۵٪) بیشترین میزان جذب انرژی در برابر پرتابه را دارند. همچنین با اضافه شدن یک لایه FML میزان جذب انرژی سازه ساندویچی ۴۰٪ افزایش یافت.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۰۷	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۹/۲۸	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۲۹	

۱- مقدمه

شناخت خواص مواد مهندسی اولین قدم و از اصلی‌ترین شاخص‌ها، در انتخاب مواد برای طراحی موفق یک محصول می‌باشد. درک صحیح از رفتار مواد و پاسخ ساختارهای مهندسی در شرایط مختلف از اهمیت بالایی برخوردار است و این البته به نوع و شرایط بارگذاری روی آن ساختار بستگی دارد. استحکام ضربه‌ای در مواد مهندسی در کنار دیگر خواص مانند خواص کشش، خمش و پیچش بسیار مهم می‌باشد و محققین از دیرباز علاقه‌مند به شناخت رفتاری مواد تحت ضربه بوده‌اند. از این رو همراه با دیگر خواص مهندسی مواد، مطالعه استحکام ضربه‌ای را در دستور کار خود داشته و همواره خواهند داشت [۱، ۲]. این علاقه‌مندی به دلیل شرایط کاربردی است که برخی از سازه‌ها در طول عمر کاری خود تجربه می‌کنند. از جمله این شرایط بارگذاری برای پدیده ضربه می‌توان به اصابت احتمالی ابزار سازه در حال تعمیر که شرایط بارگذاری ضربه‌ی سرعت پایین را دارد اشاره نمود. از طرف دیگر برای شرایط ضربه‌ای سرعت بالا، فرار ریز سنگ‌ها از زیر لاستیک خودروی در حال حرکت، برخورد پرنده در حال پرواز با بدنه هواپیما، برخورد گلوله با یک سازه مهندسی و یا برخورد تگرگ با وزن بالا را ذکر نمود [۳].

امروزه استفاده از کامپوزیت‌ها به‌عنوان سازه‌های مستحکم و سبک در صنایع مختلف مورد توجه قرار گرفته است. یکی از انواع پرکاربرد سازه‌های کامپوزیتی، صفحات ساندویچی می‌باشد، در سال‌های اخیر تحقیقات بر روی این نوع سازه‌ها به دلیل قابلیت‌های بالای آن همانند قابلیت جذب انرژی، استحکام بالا با وجود وزن پایین، عایق حرارتی و ... در صنایع مهم همچون هوافضا افزایش یافته است [۴، ۵]. تعدادی از سازه‌هایی که از این نوع مواد ساخته می‌شوند عبارت‌اند از: سازه‌های هوایی همچون هواپیماهای مسافربری، تجاری و نظامی، پهبادها، سازه‌های دریایی همچون قایق‌های تندرو، صنایع موشکی، صنایع خودروسازی و تحلیل رفتار صفحات ساندویچی در برابر ضربه‌های سرعت بالا یکی از حوزه‌های تحقیقاتی مهم به‌منظور بررسی رفتار دینامیکی این سازه‌ها است که در این پژوهش به آن پرداخته می‌شود. پارامترهای اساسی مانند تغییر شکل پلاستیک، میزان تخریب، مقدار انرژی جذب شده از جرم اصابت‌کننده، میزان افت سرعت پس از برخورد یا نفوذ که در پژوهش حاضر مورد ارزیابی قرار می‌گیرند [۶].

صفحات ساندویچی نوعی ساختار کامپوزیتی هستند که از دو رویه نازک اما محکم و یک هسته ضخیم اما سبک ساخته شده‌اند. نوع هسته معمولاً از فوم نرم، لانه زنبوری، خرپا و مشبک می‌باشد که معمولاً استحکام کمی دارند اما سختی خمشی بالایی دارند و عموماً چگالی هسته پایین است. رویه‌ها معمولاً از نوع فلز نازک یا ورقه‌های کامپوزیتی با استحکام بالا می‌باشند. فوم فلزی نوعی از مواد با تخلخل بالا می‌باشد که وزن کمی دارند و قابلیت جذب انرژی در آن‌ها بالاست. از بین فوم‌های فلزی مختلف (مانند فوم آلومینیومی، فوم فولادی، فوم نیکل، فوم تیتانیوم، فوم منیزیم، فوم کوپر، فوم سربی) فوم آلومینیومی دارای وزن کمتر، مقاومت در برابر ضربه بیشتر و قابلیت جذب انرژی مناسب و از طرفی برخوردار از رفتار مکانیکی متعادل و متناسب با این قابلیت‌ها می‌باشد [۷، ۸].

FML از دو ورق فلزی و یک لایه کامپوزیتی تشکیل شده است به همین دلیل دارای خواص مکانیکی بالایی مانند استحکام و سفتی بالا، چگالی بالا، چقرمگی مناسب، مقاوم در برابر خوردگی، عمر خستگی بالا و قابلیت مقاومت در برابر ضربه می‌باشند. FML عموماً شامل ورقه‌های آلیاژی نازک اما مستحکم هستند که غالباً از جنس آلیاژهای آلومینیوم بوده و به طور لایه‌ای با کامپوزیتی تقویت شده‌اند [۹]. از میان انواع مختلف FML مانند ARALL، GLARE و CARALL استفاده از FML GLARE بخصوص در صنعت هوافضا بسیار گسترده‌تر است و در آزمایش‌های بالاترین مقاومت در برابر ضربه را در بین انواع FML از خود نشان داده است [۹].

وینگ هو و همکارانش در سال ۲۰۱۰ آزمایش‌های ضربه بالستیک را بر روی صفحات ساندویچی با هسته فوم آلومینیومی انجام داده‌اند. آن‌ها مشاهده کردند ساختارهای ساندویچی با هسته فوم آلومینیومی قابلیت جذب انرژی مناسبی برای محافظت در برابر ضربه را دارا می‌باشند. آزمایش‌ها به‌منظور مطالعه عملکرد بالستیک، شبه استاتیک و نفوذ انجام گرفت و نتایج به‌دست‌آمده بررسی شد. در آزمایش‌ها اثرات پارامترهای کلیدی مانند: سرعت ضربه، ضخامت پوسته، ضخامت و چگالی هسته و هندسه گلوله بر روی حد بالستیک و میزان جذب انرژی صفحات در طول زمان نفوذ مورد بحث و بررسی قرار گرفت [۲].

باسترک و همکارانش در سال ۲۰۱۳ رفتار مکانیکی صفحات ساندویچی با هسته فوم آلومینیومی و رویه FML را مورد بررسی قرار دادند. در این مقاله رفتار خمشی این نوع پنل‌ها در فشارها و دماهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است و با انواع دیگر صفحات ساندویچی با پوسته کامپوزیتی مقایسه شده است [۱۰].

قلمی و صادقی در سال ۲۰۱۴ رفتار پنل‌های ساندویچی با پوسته FML و هسته پلی اورتان را در برابر ضربه سرعت بالا مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق، آزمون تجربی و شبیه‌سازی عددی با هم انجام گرفته و نتایج آن‌ها با هم مقایسه شده‌اند. برای مدل کردن برخورد گلوله استوانه‌ای به صفحه ساندویچی از مدل سه بعدی المان محدود در نرم‌افزار شبیه‌سازی LS-DAYNA با شرایط مرزی کلمپ استفاده شده است. مطالعات بر روی پارامترهای اثر چگالی هسته، سرعت اولیه گلوله و نحوه لایه چینی رویه کامپوزیتی انجام گرفته است [۱۱].

لیو^۱ و همکارانش در سال ۲۰۱۴ در مقاله‌ای دیگر مقاومت در برابر ضربه و قابلیت پیوند بین هسته و پوسته در صفحات

^۱ Liu

ساندویچی با هسته فوم آلومینیومی و پوسته FML را با استفاده از آزمون سقوط وزنه مورد بررسی قرار دادند. پوسته‌های FML به کمک ترکیبی از ورقه‌های آلومینیومی و کامپوزیت فایبرگلاس/اپوکسی^۲ ساخته شده است. آزمون سقوط وزنه بر روی دو گروه از صفحات ساندویچی انجام شد. در گروه اول هسته فوم آلومینیومی با ورقه آلومینیومی پیوند خورده است و در گروه دوم هسته فوم آلومینیومی با کامپوزیت فایبرگلاس/اپوکسی پیوند خورده است [۱۲].

لیو و همکارانش در سال ۲۰۱۶ رفتار پنل‌های ساندویچی با رویه FML و هسته فوم آلومینیومی را تحت ضربه با سرعت بالا مورد بررسی قرار داده‌اند. در تحقیق لیو و همکارانش بر روی این نوع از پنل ساندویچی تست تجربی با شلیک گلوله با سرعت ۲۱۰ متر بر ثانیه با استفاده از تفنگ گازی انجام شده است و پس از شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار LS-DAYNA نتایج با هم مقایسه شده‌اند. در این پژوهش به پارامترهایی مانند تأثیر ضخامت پوسته و هسته، مقایسه پوسته FML و پوسته‌های کامپوزیتی، هندسه گلوله و زاویه برخورد پرداخته شده است [۱۳].

بررسی‌ها نشان می‌دهد تاکنون مطالعه بر روی تأثیر ضربه سرعت بالا بر رفتار صفحه ساندویچی با فوم آلومینیومی بسیار محدود بوده و تحقیقات بسیار کمی روی این نوع صفحات با رویه از جنس FML گزارش شده است. با توجه به تحقیقات انجام گرفته در زمینه‌ی صفحات ساندویچی و کاربردهای وسیع آن در صنعت می‌توان به اهمیت این شاخه از ساختارهای مرکب پی‌برد و از طرفی با توجه به کاربردهای آن در قسمت‌های مختلف صنایع لزوم بررسی ویژگی‌های مکانیکی همچون استحکام بالا به همراه وزن پایین مشخص می‌شود. در این تحقیق به‌عنوان یک کار نو، با تهیه فوم آلومینیومی تخلخل بسته با چگالی پایین و ساخت صفحات ساندویچی با رویه FML و هسته فوم آلومینیومی و تغییر تعداد لایه‌های FML، به کمک دستگاه تفنگ گازی، صفحات ساندویچی تحت آزمایش برخورد گلوله قرار گرفت و با توجه به نتایج تجربی و عددی اثر جنس، ضخامت و تعداد لایه‌های پوسته همچنین سرعت و هندسه گلوله مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- روش پژوهش

هدف اصلی این پژوهش بررسی برخورد پرتابه سرعت بالا بر صفحه ساندویچی با رویه FML و هسته فوم آلومینیوم از نظر پارامترهای هندسی، مقاومت صفحه ساندویچی، جذب انرژی صفحات و مقایسه آن با نمونه‌های مشابه است؛ لذا نفوذ پرتابه با هندسه‌های متفاوت اعم از کروی، نیم کروی، اوجیو و سرمخروطی در صفحات ساندویچی با لایه چینی‌های متفاوت مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته است و از جمله پارامترهای مورد بررسی در این پژوهش می‌توان به تأثیر چگالی هسته، تعداد لایه‌ها و ضخامت صفحه ساندویچی، نحوه لایه چینی، هندسه، جرم و سرعت گلوله اشاره نمود. پارامترهای خروجی نیز شامل میزان جذب انرژی صفحه ساندویچی، حد بالستیک صفحه، تغییرات سرعت و انرژی جنبشی گلوله، میزان برجستگی لایه پشتی صفحه ساندویچی و قطر سوراخ می‌باشد.

۲-۱- شبیه‌سازی عددی

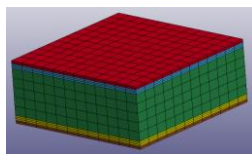
با توجه به اینکه گلوله استفاده شده در تست‌های عملی از جنس فولاد بوده و پس از برخورد تغییر شکلی در آن ایجاد نشده در شبیه‌سازی صلب فرض شده است. گلوله به صورت یک استوانه سرمخروطی طراحی شده که نوک آن ابتدا به صورت تخت به طول ۱ میلی‌متر در نظر گرفته شده، سپس به جهت انحناء نوک به شعاع ۱/۲ میلی‌متر فیلت^۳ خورده است. به جهت مش‌ریزی دقیق، گلوله در سه قسمت مجزا طراحی شده که در نهایت پرتابه مطابق شکل (الف) ساخته می‌شود که ۱۱۱۵ المان^۴ و ۱۳۱۲ گره^۵ دارد. هر لایه ورق آلومینیوم دارای ۲۸۸ المان و ۵۰۷ گره، هر لایه کامپوزیت دارای ۴۳۲ المان و ۶۷۶ گره و فوم آلومینیوم دارای ۷۲۰ المان و ۱۰۱۴ گره می‌باشد. لایه‌های صفحه ساندویچی در **Error! Reference source not found.** نشان داده شده است.

^۲ Fiber glass/epoxy

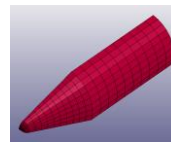
^۳ Fillet

^۴ Element

^۵ Node



(ب)



(الف)

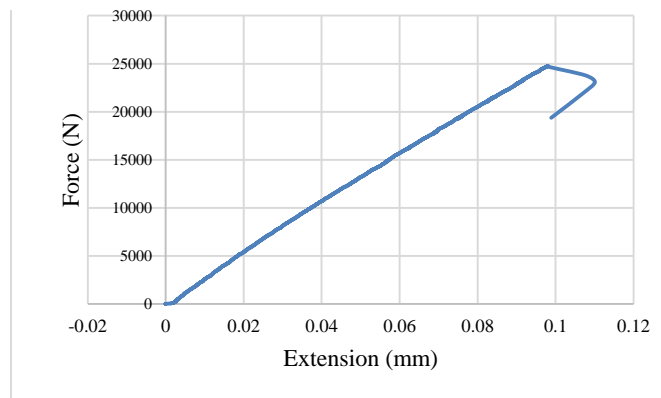
شکل ۱ الف) مدل سه بعدی گلوله مش خورده، ب) صفحه ساندویچی سه بعدی

۲-۲-۲- ساخت نمونه تجربی

۲-۲-۲-۱- الیاف تقویت کننده

برای ساخت نمونه‌های کامپوزیتی مورد استفاده در لایه‌های الیاف - فلز از الیاف تقویت کننده به صورت پارچه استفاده شده است. الیاف استفاده شده در این آزمایش پارچه‌های شیشه (E glass) می‌باشد که پارچه شیشه نوع E دارای چگالی ۲۰۰ گرم بر مترمربع با بافت ساده (Plane) و ضخامت ۰/۲ میلی‌متر است. به منظور به دست آوردن خواص کامپوزیت (E، ν و ...) و استفاده آن در شبیه‌سازی‌های عددی، در آزمایشگاه تست‌های لازم انجام گرفت که در ادامه نحوه انجام تست برای الیاف شیشه شرح داده می‌شود. آزمایش کشش برای الیاف تقویت کننده طبق استاندارد ASTM D3039 با ابعادی به طول ۲۸/۷، عرض ۲۳/۶ و ضخامت ۲/۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

نمودار نیرو-جاب‌جایی به دست آمده از تست در شکل ۲ نشان داده شده است. به وسیله نمودار نیرو-جاب‌جایی، مدول الاستیک (E)، استحکام کششی (S_t) و کرنش حداکثر به دست می‌آید که در مرحله شبیه‌سازی برای مدل کردن ماده از آن‌ها استفاده شده است.

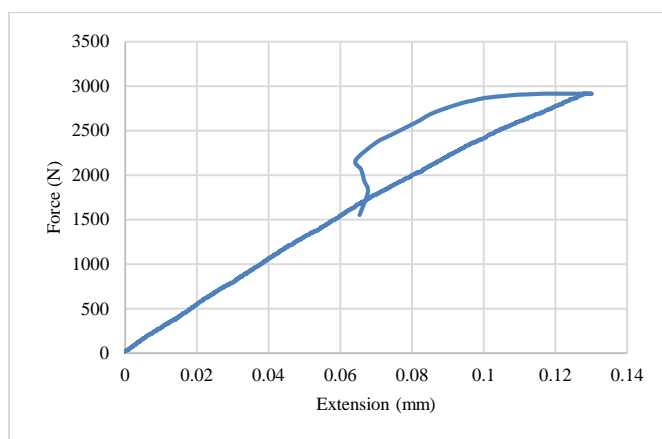


شکل ۲ نمودار نیرو-جاب‌جایی الیاف شیشه

۲-۲-۲-۲- رزین اپوکسی

برای ساخت نمونه‌های الیاف - فلز از رزین اپوکسی ۲۰۱۷ ساخت شرکت آکسون فرانسه استفاده شده است. در این رزین باید از هاردنر ۲۰۱۸ با نسبت حجمی ۳۷ به ۱۰۰ استفاده نمود. این رزین در دمای اتاق (C°25) و در زمان ۱۲ ساعت پخت می‌شود، نمونه‌های تست خواص طبق استاندارد ASTM D7905 با ابعادی به طول ۲۹/۷، عرض ۱۲/۵ و ضخامت ۳/۹۴ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

نمودار نیرو-جاب‌جایی به دست آمده از تست در شکل ۳ نشان داده شده است. خواص مکانیکی به دست آمده از این نمودار در مدل‌سازی نرم‌افزار برای کامپوزیت استفاده شده است.

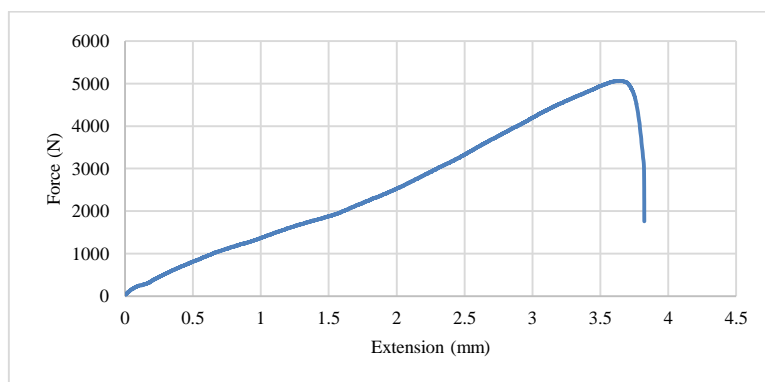


شکل ۳ نمودار نیرو-جابجایی رزین اپوکسی

۳-۲-۲- چسب

در ساخت صفحات ساندویچی برای چسباندن لایه‌های مختلف از یک نوع رزین استفاده می‌شود، اما در این پژوهش با توجه به اینکه اتصال بین کامپوزیت و فوم آلومینیومی به وسیله رزین از استحکام مناسبی برخوردار نیست که این مسئله در پژوهش‌های گذشته دیده شده است، از یک نوع چسب ویژه فلزات استفاده شده است که استحکام مناسب بین فوم و کامپوزیت را ایجاد می‌کند. از مدل چسب H9940 BK ساخت شرکت آکسون فرانسه به همراه هاردنر مخصوص آن استفاده شده است، نمونه‌های تست خواص برای استحکام برشی چسب طبق استاندارد ASTM D5868 با ابعادی به طول ۱، عرض ۲۵ و ضخامت ۲۵/۱ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

نمودار نیرو-جابجایی تست برشی در شکل ۴ نشان داده شده است. استحکام برشی به دست آمده از این نمودار در مدل‌سازی نرم‌افزار برای اتصال بین فوم و کامپوزیت استفاده شده است.



شکل ۴ نمودار نیرو-جابجایی تست برش چسب

۳-۲- ساخت صفحه ساندویچی

ابتدا ورق آلومینیومی در ابعاد ۱۲×۱۲ میلی‌متر مربع به وسیله دستگاه گیوتین برش داده شد. در مرحله بعد برای رفع آلودگی ورقه‌های آلومینیوم در محلول استون تمیز شده سپس برای آماده‌سازی سطح جهت اتصال قوی با کامپوزیت، به وسیله سنباده ۱۰۰۰ برجسته‌سازی شد. در این پژوهش برای ساخت نمونه‌های FML برخلاف رویه معمول که نمونه‌های کامپوزیتی را به روش لایه‌گذاری دستی تولید می‌کنند، از روش فرایند نفوذ در خلأ استفاده شده است. در ادامه به اختصار این روش توضیح داده می‌شود.

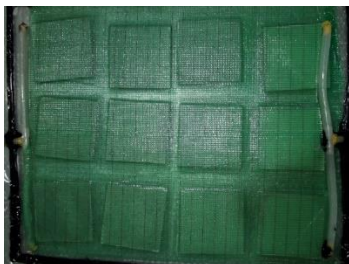
⁶ Vacuum Infusion Process

۲-۳-۱- فرآیند نفوذ در خلأ

فرآیند نفوذ در خلأ، که به اختصار (VIP) نامیده می‌شود روشی است که از خلأ برای وارد کردن رزین درون قالب استفاده می‌کند، در این روش الیاف خشک درون قالب قرار داده شده با کیسه خلأ آب بندی شده، به آن خلأ اعمال می‌شود. وقتی خلأ کامل ایجاد شد رزین از طریق یک مجرا به درون قالب کشیده می‌شود. از این روش برای ساخت قطعات کامپوزیتی در مقیاس بزرگ با کیفیت بالا و حجم کم تولید استفاده می‌شود و در جایی که استحکام بالا و وزن کم ضروری است، مناسب می‌باشد. فرآیند نفوذ در خلأ یک فرآیند قالب بسته است انتشار مواد فرار تقریباً صفر است. زیرا آغشته شدن الیاف در کیسه خلأ رخ می‌دهد و در نتیجه آلودگی محیط کار کمتر خواهد بود. طراحی قالب فرآیند VIP مشکل است، چرا که از روی تجربه طراحی می‌شود. نیمه بالایی قالب انعطاف پذیر بوده در نتیجه هزینه ساخت قالب کاهش می‌یابد. اگر فرآیند اتوماتیک شده باشد نمونه‌ها تفاوت زیادی در کیفیت ندارند. سرعت ساخت در این فرآیند بالا، دقت جزئیات افزایش و هزینه ساخت کاهش یافته است. هدف نهایی فرآیند VIP این است که رزین سریع‌تر و بهتر جریان یابد و محصول با کمترین Void تولید شود.

بنابراین می‌توان از یک سیستم کنترل فعال که قادر به کنترل و هدایت جریان رزین بوده و هرگونه انحرافی را از الگوی جریان واقعی مشخص می‌سازد و عملکرد اصلاحی مناسبی بکار می‌گیرد، استفاده کرد و بدین وسیله فرآیند نفوذ را تا به دست آوردن کیفیت مورد نظر قطعات کنترل کرد. یکنواختی تولید، درصد الیاف بالاتر و در نتیجه قطعات با استحکام بیشتر، نیاز به نیروی انسانی کمتر، کاهش اتلاف رزین و تجهیزات ارزان تولید از مزایای این فرآیند محسوب می‌شوند.

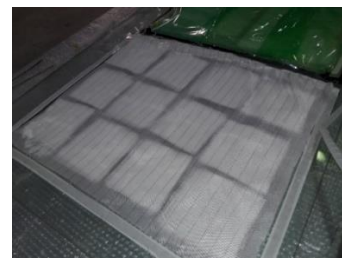
فرآیند نفوذ در خلأ را هنوز می‌توان فرآیند جدیدی در صنعت کامپوزیت دانست. در این روش، از فشار خلأ برای آغشته کردن الیاف خشک درون قالب آب‌بندی شده استفاده می‌شود. نفوذ رزین در خلأ به کمک تجهیزات و مواد مخصوصی انجام می‌گیرد که در ادامه تشریح خواهند شد. در روش لایه چینی معمولی، الیاف درون قالب قرار گرفته، به کمک قلم مو و به صورت دستی با رزین آغشته می‌شوند. در روش بهبود یافته لایه چینی، از یک کیسه خلأ روی قطعات آغشته شده استفاده می‌شود تا رزین‌های اضافی قبل از پخت از داخل قطعه بیرون کشیده شوند. قالب‌گیری کیسه خلأ تا حد زیادی نسبت الیاف به رزین را ارتقاء می‌دهد و در نتیجه قطعات با استحکام بالاتر و وزن کمتر تولید می‌شود. فرآیند ساخت نمونه‌های FML به ترتیب در شکل ۵ نشان داده شده است.



ج) پخت رزین در دمای محیط



ب) ورود رزین به قالب



الف) قرارگیری صفحات ساندویچی در قالب خلأ

شکل ۵ فرآیند ساخت نمونه‌های FML

در مرحله نهایی برای ساخت صفحات ساندویچی روی فوم آلومینیومی به چسب آغشته شده و با قرار دادن لایه‌های FML در بالا و پایین فوم مجموعه صفحه ساندویچی برای پخت چسب در دمای محیط داخل محفظه نگهدارنده (fixture) به مدت ۶ ساعت قرار داده می‌شود.

۲-۴- ساخت گلوله

در تست ضربه به وسیله تفنگ گازی از گلوله سرمخروطی استفاده شده است. از آنجاکه قطر لوله تفنگ گازی بزرگ‌تر از قطر گلوله مدنظر بود، یک استوانه توخالی از جنس ارتالون برای آن ساخته شد (شکل ۶). این استوانه پس از شلیک و در برخورد با صفحه ساندویچی از گلوله جدا می‌شود. مشخصات هندسی گلوله و استوانه توخالی در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱ مشخصات فیزیکی و هندسی گلوله

ماده	چگالی (kg/m ³)	وزن (gr)	قطر گلوله (mm)	ارتفاع استوانه (mm)	ارتفاع مخروط (mm)	قطر داخلی و بیرونی ارتالون (mm)	وزن ارتالون (gr)
فولاد VCN	۸۰۲۲	۳۵/۳	۱۴	۲۴	۱۳	۲۲-۱۴	۴/۱



شکل ۶ گلوله مخروطی به همراه استوانه ارتالونی

۲-۵- آزمون ضربه سرعت بالا

بعد از انجام کالیبراسیون دستگاه ضربه سرعت بالا و تعیین دقیق تغییرات سرعت پرتابه با دماغه مخروطی با فشار گاز هوا، کلیه نمونه‌ها تحت ضربه سرعت بالا قرار گرفت. در آزمون‌های ضربه سرعت بالا چهار هدف دنبال می‌شود که عبارت‌اند از:

- الف) پایین‌ترین سرعتی که در آن گلوله نفوذ کامل گلوله حاصل شود و سرعت باقی‌مانده برابر صفر گردد.
- ب) تعیین میزان جذب انرژی در شرایط عبور کامل و شرایط حد بالستیک برای نمونه‌های صفحات ساندویچی.
- ج) میزان وابستگی رفتار مقاومت در برابر ضربه سرعت بالای نمونه‌ها به پارامتر تعداد لایه‌ها و سرعت برخورد.
- د) مطالعه ناحیه شکست و تعیین مکانیزم جذب انرژی ساندویچ.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نام‌گذاری نمونه‌های صفحات ساندویچی

به جهت تنظیم مناسب نتایج نمونه‌های صفحات ساندویچی ساخته شده در این فصل صفحه ساندویچی با دو لایه FML را به اختصار SP2n نام‌گذاری شده است که SP به معنی صفحه ساندویچی، عدد ۲ به معنی دو لایه FML و n شماره آزمایش است (۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶). همچنین صفحات ساندویچی با سه لایه FML را به صورت SP3n کدگذاری شده است. در جدول ۲ نحوه نام‌گذاری صفحات ساندویچی توضیح داده شده است.

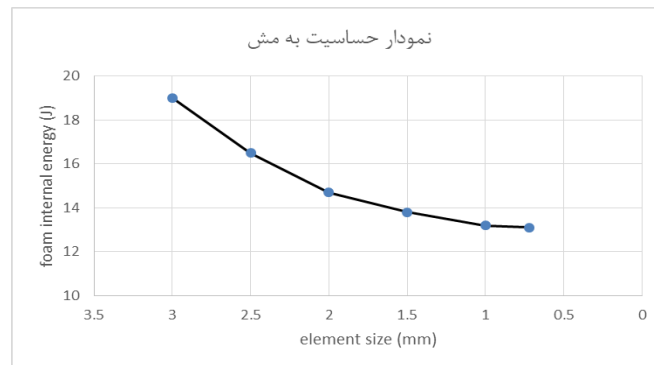
جدول ۲ نحوه نام‌گذاری صفحات ساندویچی بر اساس شماره آزمایش

شماره	صفحه ساندویچی	تعداد لایه FML	تعداد لایه پست
۱	صفحه ساندویچی با دو لایه FML	۲	متقارن
۲	صفحه ساندویچی با دو لایه FML	۲	متقارن
۳	صفحه ساندویچی با دو لایه FML	۲	متقارن
۴	صفحه ساندویچی با سه لایه FML	۳	دو لایه FML جلو و یک لایه پست
۵	صفحه ساندویچی با سه لایه FML	۳	دو لایه FML جلو و یک لایه پست
۶	صفحه ساندویچی با سه لایه FML	۳	یک لایه FML جلو و دو لایه پست

طبق جدول تست نمونه‌های ۲ تا ۶ با گلوله سر مخروطی انجام گرفته است. مشخصات و وزن گلوله در جدول ۱ آورده شده است.

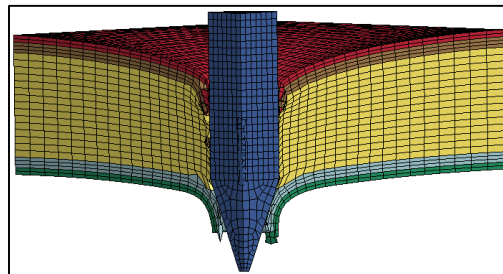
۳-۲- حساسیت به مش

برای انجام یک تحلیل عددی صحیح، در ابتدا باید اندازه‌ی دانه‌بندی مناسب در شبیه‌سازی‌ها به دست آید. مش بسیار ریز سبب بالا رفتن زمان حل مسئله می‌شود و حتی ممکن است ناپایداری یا واگرا شدن جواب‌ها را در پی داشته باشد. از دیگر سو، مش درشت نیز سبب بالا رفتن درصد خطا شده و باعث عدم اطمینان به جواب به‌دست‌آمده خواهد شد. بنابراین بررسی در این زمینه برای یافتن اندازه‌ی مش مناسب و قابل‌اعتماد، لازم و ضروری به نظر می‌رسد به‌گونه‌ای که نتایج به‌دست‌آمده، مستقل از سایز مش‌بندی باشد [۱۴]. در شکل ۸۷ نمودار حساسیت به مش برای نمونه SP22 نشان داده شده است. نتایج شبیه‌سازی برای اندازه‌های ۳، ۲، ۱/۵، ۱ و ۰/۷۲ میلی‌متر ارائه شده که مشاهده می‌گردد انرژی جذب‌شده فوم آلومینیومی به ازای مش ۰/۷۲ میلی‌متر همگرا شده است، لذا در ادامه تحلیل‌ها با استفاده از این اندازه مش انجام خواهد گرفت.



شکل ۷ نمودار حساسیت به مش انرژی جذب شده فوم آلومینیومی

در شکل ۸ نفوذ گلوله در نمونه SP22 با اندازه مش ۰/۷۲ میلی‌متر در راستای طول و عرض صفحه ساندویچی نشان داده شده است.



شکل ۸ نفوذ پرتابه در نمونه SP22 با اندازه مش ۰/۷۲ میلی‌متر

۳-۳- تست تجربی نمونه SP21

در ابتدا آزمایش ضربه سرعت بالا تفنگ گازی در دانشگاه تربیت مدرس با فشار هوا انجام گرفت. در شکل ۹ دستگاه تفنگ گازی دانشگاه تربیت مدرس با لوله تفنگ ۱۰ میلی‌متر و گلوله استفاده شده در نمونه SP21 نشان داده شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۹ الف) دستگاه تفنگ گازی دانشگاه تربیت مدرس، ب) گلوله استفاده شده در نمونه SP21

مشخصات هندسی گلوله و نتایج آزمایش نمونه SP21 در جدول آورده شده است. با توجه به جدول نمونه SP21 استفاده

شده در تست تجربی، انرژی گلوله را به طور کامل جذب کرده و سرعت گلوله به صفر رسیده است.

جدول ۳ مقایسه مشخصات هندسی و نتایج آزمایش نمونه SP21 با مرجع [۱۳]

نام نمونه	نوع گلوله	قطر گلوله (mm)	وزن گلوله (gr)	چگالی فوم (kg/m ³)	سرعت برخورد (m/s)	سرعت باقی مانده (m/s)	انرژی جذب شده (J)
SP21	استوانه‌ای دماغه نیم کره	۱۰	۹/۱۵	۴۷۰	۱۸۲	۰	۱۵۱/۵۴

۳-۴- مقایسه نتایج المان محدود و تجربی

۳-۴-۱- نمونه SP22

در نمونه SP22 طبق نتایج شبیه‌سازی، گلوله پس از برخورد با صفحه ساندویچی در آن نفوذ کرده و با سرعت باقیمانده از آن خارج می‌شود. نتایج شبیه‌سازی عددی و تست تجربی در جدول ۴ آمده است.

جدول ۴ نتایج المان محدود و تجربی نمونه SP22

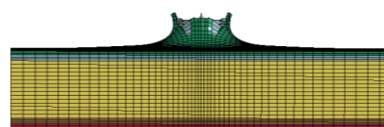
SP22			
تجربی (mm)	عددی (mm)	درصد تطابق	
۱۳/۴	۱۳/۷	٪۹۷/۷	قطر سوراخ FML بالا
۱۸/۳	۱۵	٪۸۲	برآمدگی FML انتها

در شکل ۱۰ نتایج شبیه‌سازی و تست تجربی از زوایای مختلف نشان داده شده است. در تست نمونه SP22 همان‌طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده، گلوله با سرعت اولیه ۱۴۱ متر بر ثانیه برخورد می‌کند و پس از نفوذ کامل در صفحه ساندویچی با یک سرعت باقیمانده از آن عبور کرده است. با توجه به محدودیت امکانات، محاسبه سرعت باقی مانده در تست عملی این نمونه ممکن نبوده است ولی با شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار و صحت سنجی آن‌ها با دیگر تست‌های عملی انجام شده، سرعت باقی مانده به دست آمده است.

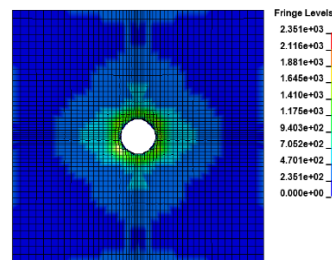
تست تجربی



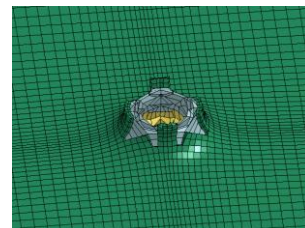
شبیه‌سازی عددی



الف) نمای پهلو



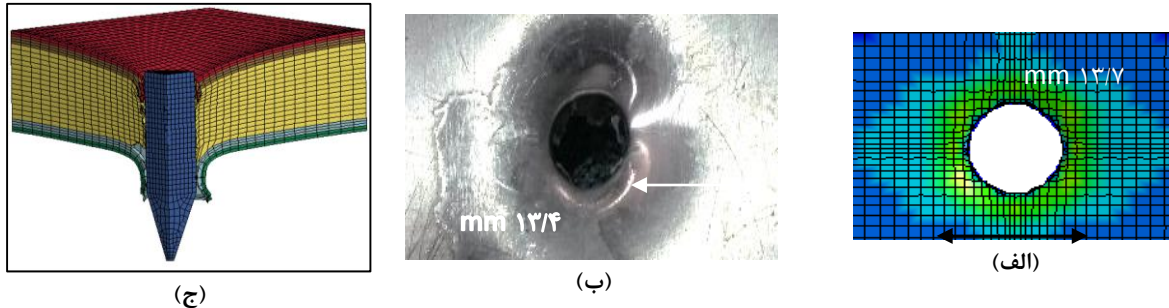
ب) نمای جلو



ج) نمای پشت

شکل ۱۰ نمونه SP22 پس از برخورد گلوله از زوایای مختلف

همان طور که در تست تجربی دیده شد، گلوله پس از برخورد با صفحه ساندویچی در آن نفوذ کامل کرده و از ساندویچ عبور می‌کند. شکل ۱۱ قطر سوراخ لایه بالا برای نمونه SP22 در تست تجربی و شبیه‌سازی عددی و شکل ۱۱ عبور گلوله با سرعت ۱۲ متر بر ثانیه از نمونه SP22 را نشان می‌دهد. صفحه ساندویچی در این آزمایش ۳۵۷ ژول از انرژی گلوله را جذب کرده است.



شکل ۱۱ قطر سوراخ لایه بالا برای نمونه SP22 در (الف) شبیه‌سازی عددی و (ب) تست تجربی، (ج) لحظه عبور گلوله از نمونه SP22 با سرعت ۱۲ متر بر ثانیه

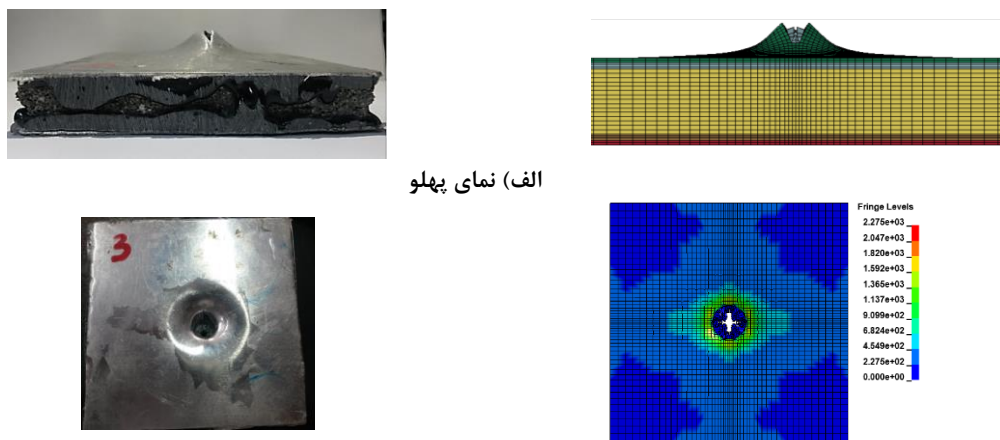
۳-۴-۲- نمونه SP23

در نمونه SP23 طبق نتایج شبیه‌سازی، گلوله پس از برخورد با صفحه ساندویچی در آن نفوذ کرده و سرعت گلوله به صفر می‌رسد. نتایج شبیه‌سازی عددی و تست تجربی در جدول ۵ آمده است.

جدول ۵ نتایج المان محدود و تجربی نمونه SP23

SP23			
درصد تطابق	عددی (mm)	تجربی (mm)	
۹۶/۲٪	۱۳/۶	۱۳/۱	قطر سوراخ FML بالا
۸۳/۷٪	۱۱/۸	۱۴/۱	برآمدگی FML انتها

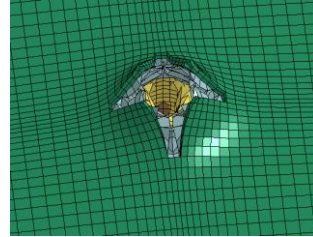
در شکل ۱۲، نتایج شبیه‌سازی و تست تجربی از زوایای مختلف برای نمونه SP23 نشان داده شده است. در تست نمونه SP23 همان طور که در شکل ۱۲ نشان داده شده، گلوله با سرعت اولیه ۱۳۱/۵۷ متر بر ثانیه پس از برخورد با صفحه ساندویچی به ورقه آلومینیومی انتهایی رسیده و سبب پارگی در آن می‌شود و در نهایت سرعت گلوله به صفر می‌رسد. برای به دست آوردن حد بالستیک صفحه ساندویچی، سرعت گلوله در تست تجربی کاهش داده شد. صفحه ساندویچی در این آزمایش ۳۱۶ ژول از انرژی گلوله را جذب کرده است.



(الف) نمای پهلو

(ب) نمای جلو

شکل ۱۲ مقایسه نتایج تجربی و المان محدود نمونه SP23 از زوایای مختلف، (الف) نمای پهلو، (ب) نمای جلو



(ج) نمای پشت

شکل ۱۲ مقایسه نتایج تجربی و المان محدود نمونه SP23 از زوایای مختلف، (ج) نمای پشت

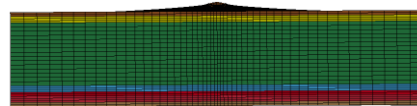
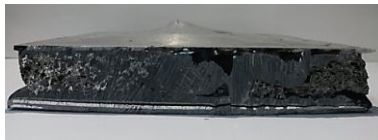
۳-۴-۳- نمونه SP31

در نمونه SP31 طبق نتایج شبیه‌سازی، گلوله پس از برخورد با صفحه ساندویچی در آن نفوذ کرده و سرعت گلوله به صفر می‌رسد. نتایج شبیه‌سازی عددی و تست تجربی در جدول ۶ آمده است.

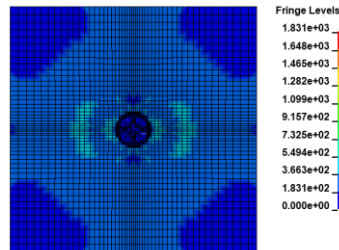
جدول ۶ نتایج المان محدود و تجربی نمونه SP31

SP31			
درصد تطابق	عددی (mm)	تجربی (mm)	
٪۹۵/۴	۱۳/۶	۱۳	قطر سوراخ FML بالا
٪۸۱/۱	۷/۳	۹	برآمدگی FML انتها

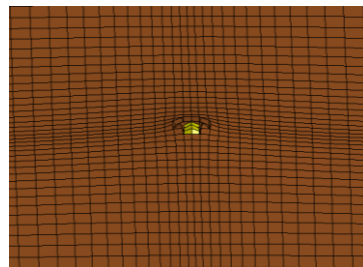
در شکل ۱۳، نتایج شبیه‌سازی و تست تجربی از زوایای مختلف برای نمونه SP31 نشان داده شده است. در تست نمونه SP31 همان‌طور که در ۱۳ نشان داده شده، گلوله با سرعت اولیه ۱۳۰/۴۳ متر بر ثانیه با صفحه ساندویچی برخورد کرده و متوقف می‌شود. نمونه ساندویچ در این آزمایش ۳۱۰ ژول انرژی گلوله را جذب کرده است. از آنجاکه این نمونه دارای یک لایه FML بیشتر نسبت به نمونه‌های قبلی می‌باشد، گلوله پس از برخورد در صفحه ساندویچی به ورقه آلومینیومی انتهایی رسیده و طبق جدول سبب برآمدگی و پارگی کمتری در آن می‌شود.



(الف) نمای پهلو



(ب) نمای جلو



(ج) نمای پشت

شکل ۱۳ مقایسه نتایج المان محدود و تجربی نمونه SP31

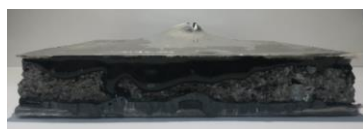
۳-۴-۴- نمونه SP32

در نمونه SP32 طبق نتایج شبیه‌سازی، گلوله پس از برخورد با صفحه ساندویچی در آن نفوذ کرده و سرعت گلوله به صفر می‌رسد. نتایج شبیه‌سازی عددی و تست تجربی در جدول آمده است.

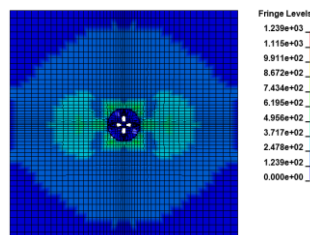
جدول ۷ نتایج المان محدود و تجربی نمونه SP32

SP32			
درصد تطابق	عددی (mm)	تجربی (mm)	
٪۹۶/۳	۱۴/۱	۱۳/۶	قطر سوراخ FML بالا
٪۷۹/۲	۱۰/۳	۱۳	برآمدگی FML انتها

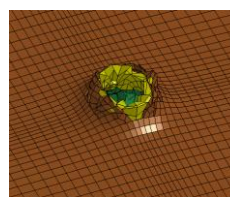
در شکل ۱۴، نتایج شبیه‌سازی عددی و تست تجربی از زوایای مختلف برای نمونه SP32 نشان داده شده است. در تست نمونه SP32 همان‌طور که در شکل ۱۴ مشخص می‌باشد، گلوله با سرعت اولیه ۱۴۳/۲۱ متر بر ثانیه پس از برخورد با صفحه ساندویچی به ورقه آلومینیومی انتهایی رسیده و سبب پارگی در آن می‌شود و در نهایت سرعت گلوله به صفر می‌رسد. انرژی گلوله در این نمونه نسبت به SP31، ۶۱ ژول بیشتر است، لذا طبق جدول ۷ برآمدگی پشت ساندویچ ۴ میلی‌متر بیشتر شده است.



الف) نمای پهلو



ب) نمای جلو



ج) نمای پشت

شکل ۱۴ مقایسه نتایج المان محدود و تجربی نمونه SP32 از زوایای مختلف

۳-۴-۵- نمونه SP33

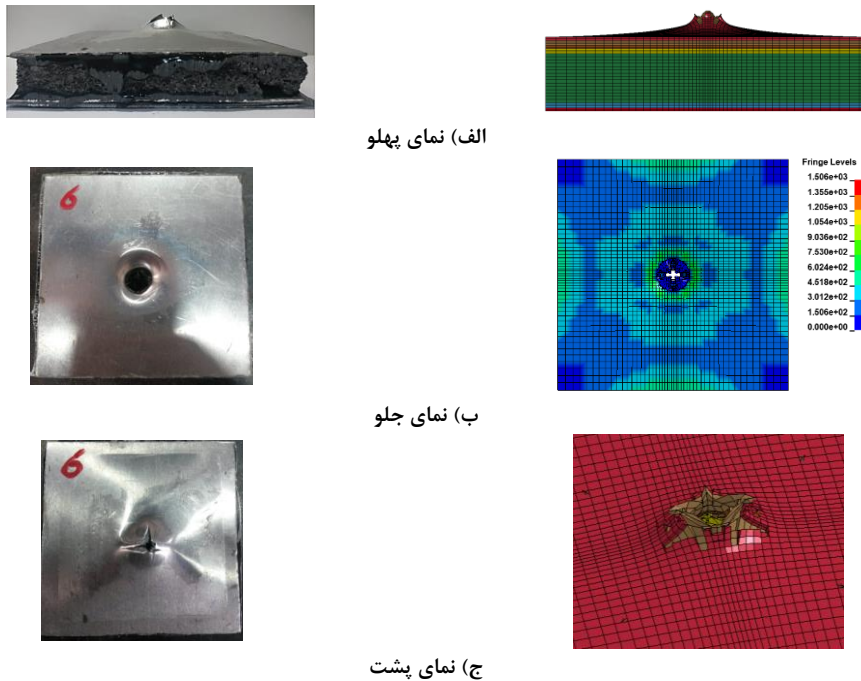
در نمونه SP33 طبق نتایج شبیه‌سازی، گلوله پس از برخورد با صفحه ساندویچی در آن نفوذ کرده و سرعت گلوله به صفر می‌رسد. نتایج شبیه‌سازی عددی و تست تجربی در جدول ۸ آمده است.

جدول ۸ نتایج المان محدود و تجربی نمونه SP33

SP33			
درصد تطابق	عددی (mm)	تجربی (mm)	
٪۹۴/۸	۱۴/۳	۱۳/۶	قطر سوراخ FML بالا
٪۸۳/۳	۱۲/۵	۱۵	برآمدگی FML انتها

در شکل ۱۵، نتایج شبیه‌سازی و تست تجربی از زوایای مختلف برای نمونه SP33 نشان داده شده است. در تست نمونه

SP33 همان طور که در شکل ۱۵ مشخص می‌باشد، گلوله با سرعت اولیه ۱۴۴/۵۲ متر بر ثانیه پس از برخورد با صفحه ساندویچی به ورقه آلومینیومی انتهایی رسیده و سبب برآمدگی و پارگی در آن می‌شود و در نهایت سرعت گلوله به صفر می‌رسد. در این تست، گلوله بیشترین انرژی را نسبت به نمونه‌های پیشین دارد به طوری که نمونه ساندویچی ۳۷۸ ژول انرژی جذب کرده است و میزان پارگی و برآمدگی پشت ساندویچ مطابق جدول بیشتر شده است.



شکل ۱۵ مقایسه نتایج المان محدود و تجربی نمونه SP33

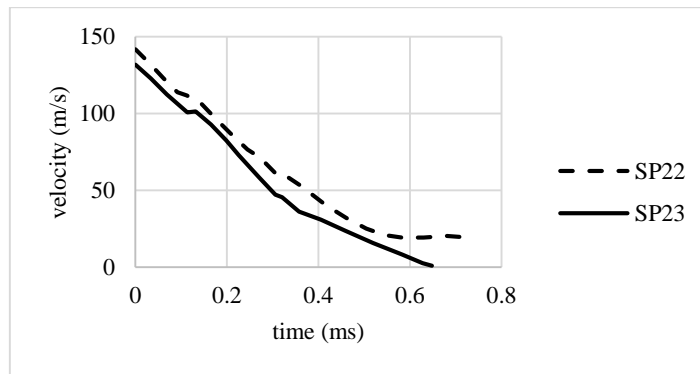
۳-۵- بررسی سرعت برخورد گلوله

برای به دست آوردن حد بالستیک صفحات ساندویچی ساخته شده به دلیل استحکام بیشتر نسبت به مرجع [۱۳] باید تحت برخوردهایی با انرژی بالاتر قرار گیرند، لذا با به کار بردن گلوله‌ای با هندسه و وزن متفاوت، انرژی گلوله افزایش پیدا کرده است که مشخصات گلوله ساخته شده در جدول ۱ آورده شده است. در جدول ۹ مشخصات و نتایج تست‌های انجام شده در دانشگاه احرار رشت نشان داده شده است.

جدول ۹ مشخصات و نتایج تست‌های برخورد

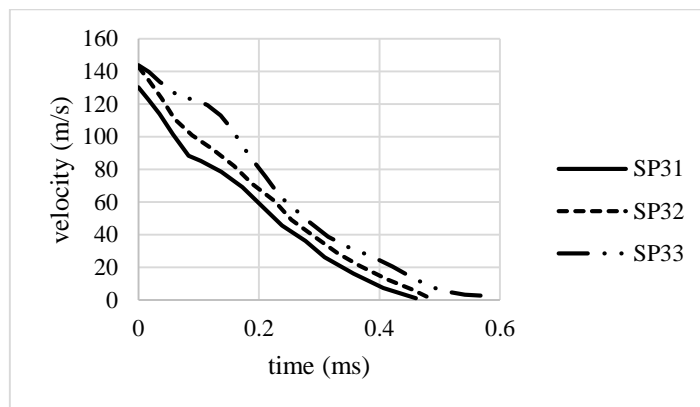
نام نمونه	سرعت برخورد (m/s)	نفوذ کامل	انرژی جذب شده (J)
SP21	۱۸۲	خیر	۱۵۱/۵۴
SP22	۱۴۱	بله	-
SP23	۱۳۱/۵۷	خیر	۳۱۶
SP31	۱۳۰/۴۳	خیر	۳۱۰
SP32	۱۴۳/۲۱	خیر	۳۷۱
SP33	۱۴۴/۵۲	خیر	۳۷۸

در شکل ۱۶ نمودار سرعت-زمان نمونه‌های SP22 و SP23 با یکدیگر مقایسه شده‌اند. طبق شکل ۱۶ نمونه SP22 با سرعت بالاتری نسبت به نمونه SP23 به صفحه ساندویچی اصابت می‌کند. در نتیجه گلوله با سرعت باقی‌مانده ۱۲ متر بر ثانیه از ساندویچ عبور می‌کند. سرعت حد بالستیک برای نمونه SP22، ۱۳۹/۵ به دست آمد.



شکل ۱۶ نمودار سرعت-زمان گلوله در برخورد با نمونه‌های SP22 و SP23

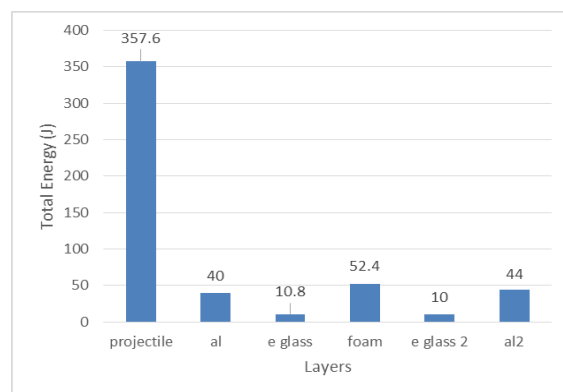
در شکل ۱۷ نمودار سرعت-زمان نمونه‌های SP31، SP32 و SP33 با یکدیگر مقایسه شده‌اند. طبق این نمودار، نمونه SP33 به دلیل اینکه در جلو فوم آلومینیومی یک لایه FML دارد، در ابتدا با شیب نزولی کمتری از سرعت گلوله کاسته می‌شود، این در حالی است که در دو نمونه SP31 و SP32 به دلیل وجود دو لایه FML در جلو فوم آلومینیومی در ابتدا موجب کاهش شدید سرعت گلوله می‌شوند.



شکل ۱۷ نمودار سرعت-زمان گلوله در برخورد با نمونه‌های SP31، SP32 و SP33

۳-۶- انرژی درونی لایه‌های صفحه ساندویچی

از آنجاکه جذب انرژی یکی از پارامترهای مهم در زمینه‌ی ضربه سرعت بالا می‌باشد، در این بخش انرژی درونی هر لایه از صفحه ساندویچی مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۱۸ نمودار انرژی درونی-زمان لایه‌های مختلف نمونه SP22 را نشان می‌دهد.



شکل ۱۸ نمودار مجموع انرژی جنبشی و درونی گلوله و لایه‌های مختلف نمونه SP22

همان‌طور که در شکل ۱۸ مشاهده می‌شود، فوم آلومینیومی و ورقه‌های آلومینیومی بیشترین نقش را در جذب انرژی گلوله دارند، به طوری که در حدود ۳۴٪ از کل انرژی جذب شده به فوم آلومینیومی و ۲۵٪ به هر لایه از ورقه‌های آلومینیومی اختصاص

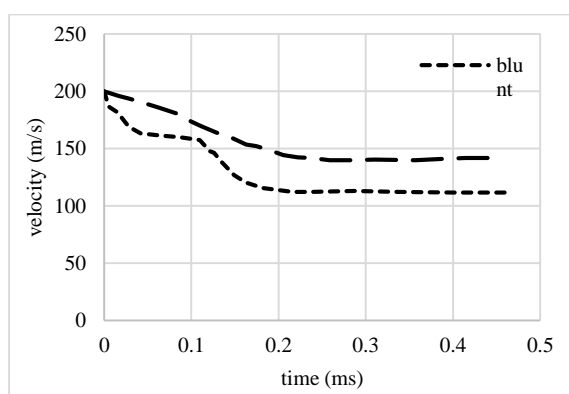
دارد. از طرفی لایه‌های کامپوزیتی سهمی بسیار اندک (هر لایه حدود ۷٪) از مقاومت صفحه ساندویچی در برابر گلوله را دارند.

۷-۳- تأثیر هندسه گلوله

با تغییر هندسه گلوله در شبیه‌سازی عددی تأثیر این پارامتر در جذب انرژی صفحه ساندویچی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی عددی در جدول ۱۰ آورده شده است.

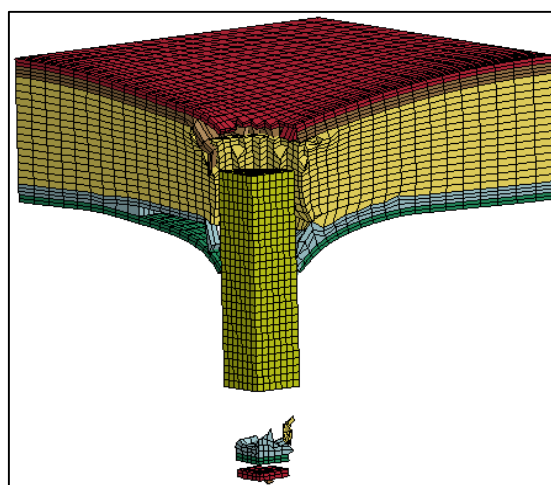
جدول ۱۰ مشخصات و نتایج شبیه‌سازی عددی برای گلوله سرتخت

هندسه گلوله	سرعت باقیمانده (m/s)	انرژی جذب شده (J)	حد بالستیک (m/s)
سرتخت	۱۱۲	۵۰۸	۱۶۵/۷
سرمخروطی	۱۴۳/۵	۳۵۹/۰۴	۱۳۹/۵



شکل ۱۹ نمودار سرعت-زمان گلوله سرتخت و سرمخروطی برای نمونه SP22

در شکل ۱۹، تغییرات سرعت دو نوع گلوله با انرژی یکسان و هندسه متفاوت نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص می‌باشد هندسه گلوله تأثیر زیادی بر میزان و نحوه نفوذ در صفحه ساندویچی دارد، نحوه نفوذ گلوله سرمخروطی در صفحه ساندویچی به صورت ایجاد پارگی در پوسته می‌باشد در حالی که گلوله سرتخت در پوسته ایجاد کوبش می‌کند و ناحیه برخورد از صفحه ساندویچی جدا می‌شود. این تفاوت در نحوه نفوذ باعث می‌شود گلوله سرتخت در اصابت با صفحه ساندویچی انرژی بیشتری را از دست دهد. به طوری که حد بالستیک صفحه ساندویچی در برابر گلوله سرتخت ۲۶ متر بر ثانیه بیشتر از گلوله سرمخروطی است، همچنین انرژی جذب شده صفحه ساندویچی برای این نوع گلوله در حدود ۱/۵ برابر حالت سرمخروطی می‌باشد. شکل ۲۰ عبور پرتابه سرتخت با سرعت ۱۱۲ متر بر ثانیه از نمونه SP22 را نشان می‌دهد.



شکل ۲۰ عبور پرتابه سرتخت با سرعت ۱۱۲ متر بر ثانیه

۴- نتیجه‌گیری

یکی از پارامترهای اساسی در طراحی سازه‌های صنعتی مقاومت و میزان جذب انرژی در برابر بارهای دینامیکی بخصوص با تمرکز تنش بالا و در بازه زمانی چند میلی‌ثانیه است که موجب بالا رفتن تمرکز تنش در یک نقطه از سازه و تخریب آن می‌شود. یکی دیگر از پارامترهای مهم در طراحی سازه‌ها، بخصوص سازه‌های هوایی و دریایی وزن بدنه آن می‌باشد، با توجه به این پارامترها امروزه کاربرد مواد مرکب در حال افزایش است. در این تحقیق به یک نوع جدید از مواد مرکب به نام صفحات ساندویچی با رویه الیاف-فلز پرداخته شده است. برای بررسی صفحات ساندویچی نمونه‌های تست در آزمایشگاه به روش VIP ساخته شد، سپس نمونه‌ها در تست عملی ضربه سرعت بالا با گلوله سرمخروطی، مورد آزمایش قرار گرفت. با تغییر دادن پارامترهای سرعت گلوله و تعداد لایه‌های صفحه ساندویچی، خروجی‌هایی همچون جذب انرژی، حد بالستیک، تخریب ساندویچ بررسی شد. سپس برای شبیه‌سازی‌های المان محدود نمونه‌ها برخی خواص مواد به کار رفته در صفحه ساندویچی مانند الیاف شیشه و چسب در آزمایشگاه به دست آمد. در مدل‌سازی با استفاده از نرم‌افزار ال‌اس-داین‌ا ابتدا نمونه‌های عملی مدل‌سازی شده سپس جهت بررسی خروجی‌های مختلف نظیر سرعت باقی‌مانده گلوله، جذب انرژی هر لایه و انتخاب حالت بهینه از نظر وزن، ضخامت و غیره، پارامترهایی همچون تعداد لایه‌ها، ضخامت فوم و هندسه گلوله بررسی شد که نتایج زیر حاصل گردید:

- بررسی نتایج تست‌هایی عملی و مقایسه آن با نمونه‌های ساندویچی ساخته شده در مرجع [۱۵] نشان داد چگالی هسته فوم آلومینیومی از اهمیت بالایی برخوردار است به طوری که میزان جذب انرژی صفحه ساندویچی را بیش از دو برابر مرجع اشاره شده افزایش داده است.
- با بررسی انرژی درونی هر لایه از صفحه ساندویچی مشخص شد فوم آلومینیومی بیشترین سهم در جذب انرژی گلوله را دارد، به طوری که پرتابه در برخورد با این لایه بیش از ۳۳٪ انرژی خود را از دست می‌دهد. این در حالی است که اثر لایه‌های کامپوزیتی در برابر ضربه بسیار اندک است به طوری که ۷٪ مجموع انرژی گلوله را جذب می‌کند.
- بررسی مدل‌سازی المان محدود نشان داد پارامتر هندسه گلوله تأثیر بالایی در نفوذ پرتابه در صفحه ساندویچی دارد به طوری که گلوله سرمخروطی در برخورد با صفحه ساندویچی در حدود ۶۰٪ گلوله سرتخت انرژی خود را از دست می‌دهد.
- نحوه نفوذ گلوله سرمخروطی در صفحه ساندویچی به صورت ایجاد پارگی در پوسته می‌باشد در حالی که گلوله سرتخت در پوسته ایجاد کوبش می‌کند و ناحیه برخورد از صفحه ساندویچی جدا می‌شود. این تفاوت در نحوه نفوذ باعث می‌شود گلوله سرتخت در اصابت با صفحه ساندویچی انرژی بیشتری را از دست دهد.
- با افزایش تعداد لایه‌های FML، مقاومت صفحات ساندویچی و جذب انرژی آن‌ها در برابر پرتابه بررسی شد. نتایج به دست آمده تأثیر بالای این پارامتر را نشان می‌دهد به طوری که با اضافه شدن یک لایه FML، در حدود ۴۰٪ جذب انرژی صفحه ساندویچی بالا می‌رود.

Authorship Contribution Statement

Dr. Pooya Pirali

Biography: Pooya Pirali is currently an Assistant Professor at Department of Mechanical Engineerin, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran. His field of research is Impact mechanics.

Contribution Statement: Conceptualization, Methodology, Validation, Investigation, Software, Visualization

Arsalan Sahmani

Biography: Arsalan Sahmani received his M.Sc in Mechanical Engineering from University of Malek Ashtar. His field of research is mechanical analysis of composite materials.

Contribution Statement: Investigation, Visualization, Formal analysis, Validation, Writing- Original draft preparation.

Mohsen Heydari Beni

Biography: Mohsen Heydari Beni is currently a Ph. D student at Malek Ashtar University of Technology and his main reaserch interests are composite structures, plates and shell analysis and nanomechanics.

Contribution Statement: Conceptualization, Methodology, Formal analysis, Validation, Data Curation, Project administration, Writing- Reviewing and Editing, Resources.

۵- مراجع

- [1] Vogelesang LB, Vlot A. Development of fibre metal laminates for advanced aerospace structures. Journal of materials processing technology. 2000;103:1-5.
- [2] Hou W, Zhu F, Lu G, Fang D-N. Ballistic impact experiments of metallic sandwich panels with aluminium foam core. International journal of impact engineering. 2010;37:1045-55.
- [3] Sinmazçelik T, Avcu E, Bora MÖ, Çoban O. A review: Fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods. Materials & Design. 2011;32:3671-85.
- [4] Bagnoli F, Bernabei M, Figueroa-Gordon D, Irving PE. The response of aluminium/GLARE hybrid materials to impact and to in-plane fatigue. Materials Science and Engineering: A. 2009;523:118-24.
- [5] Fatt MSH, Sirivolu D. A wave propagation model for the high velocity impact response of a composite sandwich panel. International journal of impact engineering. 2010;37:117-30.
- [6] Moloodi A, Babakhani A, Haddad Sabzevar M. An Investigation of aluminum foam produced by sintering evaporation process. 2012.
- [7] Botelho EC, Silva RA, Pardini LC, Rezende MC. A review on the development and properties of continuous fiber/epoxy/aluminum hybrid composites for aircraft structures. Materials Research. 2006;9:247-56.
- [8] Jing L, Wang Z, Zhao L. Response of metallic cylindrical sandwich shells subjected to projectile impact— Experimental investigations. Composite Structures. 2014;107:36-47.
- [9] Mina M, Mohammad Esmail G, Ebrahim ZVK. Experimental and numerical investigation of mechanical properties of fiber-metal multilayers .The Second National Conference on Applied Mechanical Engineering1397.
- [10] Baştürk SB, Tanoğlu M. Development and mechanical behavior of FML/aluminium foam sandwiches. Applied composite materials. 2013;20:789-802.

- [11] Ghalami-Choobar M, Sadighi M. Investigation of high velocity impact of cylindrical projectile on sandwich panels with fiber–metal laminates skins and polyurethane core. *Aerospace Science and Technology*. 2014;32:142-52.
- [12] Liu C, Zhang Y, Heslehurst R. Impact resistance and bonding capability of sandwich panels with fibre–metal laminate skins and aluminium foam core. *Journal of Adhesion Science and Technology*. 2014;28:2378-92.
- [13] Liu C, Zhang Y, Ye L. High velocity impact responses of sandwich panels with metal fibre laminate skins and aluminium foam core. *International journal of impact engineering*. 2017;100:139-53.
- [14] Nourbakhsh Shabanloo S, Pirali P, Raad H. Numerical investigation of AMP2 bullet penetration in multilayer AA5016-H116 aluminum target. *The Fourth National Conference and the Second International Conference on Applied Research in Electrical, Mechanical and Mechatronics Engineering*. 1395.
- [15] Vertical Impact Foam-Composite Sandwich Analytical Plates: Ministry of Science, Research and Technology - Razi University - Faculty of Technology and Engineering, 1391.