



نشریه علمی پژوهشی

علوم و فناوری کامپوزیت

http://jstc.iust.ac.ir



## بررسی تأثیر سیم حافظه‌دار بر رفتار بالستیکی ساندویچ پنل هوشمند با هسته موجدار

رهام ماهر<sup>1</sup>، سید محمد رضا خلیلی<sup>2\*</sup>، رضا اسلامی فارسانی<sup>3</sup>

1- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

3- استاد، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

\* تهران، صندوق پستی 1999143344، khalili@kntu.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله:

در این مطالعه، رفتار ساندویچ پنل هسته دوزنقه‌ای آلومینیومی با پوسته‌های کامپوزیتی شیشه/اپوکسی تقویت شده با آلیاژ حافظه‌دار تحت بار ضربه‌ای سرعت بالا، به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفته است. نمونه‌های کامپوزیتی جهت انجام آزمایش‌های کشش، فشار و برش ساخته شدند و خواص مورد نیاز از آزمایش‌ها به دست آمد. سپس سازه‌های ساندویچی با هسته موجدار آلومینیومی و پوسته‌های 4 لایه کامپوزیت شیشه‌ای/اپوکسی با استفاده از روش لایه‌چینی دستی ساخته شد. به منظور تقویت پوسته‌های کامپوزیتی، از سیم آلیاژ حافظه‌دار در سه حالت، سه سیم بدون پیش کرنش، سه سیم با 3% پیش کرنش و سه سیم با 6% پیش کرنش استفاده شده است. نمونه‌ها تحت آزمایش ضربه سرعت بالا به وسیله تفنگ گازی قرار گرفتند. برای اعتبارسنجی و مقایسه نتایج، مدل‌های عددی نمونه‌ها در نرم‌افزار LS-Dyna با در نظر گرفتن شرایط آزمایش تجربی تهیه شد. نتایج شامل سرعت محدود بالستیک و انرژی جذب شده توسط سازه با راه‌حل‌های تجربی مقایسه و اعتبارسنجی شد. هدف از انجام این مطالعه، بررسی اثر افزودن سیم آلیاژ حافظه‌دار به جهت تقویت پوسته‌ها و تأثیر پیش کرنش بر رفتار بالستیکی سازه ساندویچی بوده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که وجود سیم آلیاژ حافظه‌دار و اعمال پیش کرنش باعث افزایش میزان جذب انرژی می‌شود. میزان جذب انرژی در مقایسه با نمونه بدون سیم، در نمونه 3 سیم بدون پیش کرنش تقریباً 10%، در نمونه 3 سیم با 3 درصد پیش کرنش تقریباً 22% و در نمونه 3 سیم با 6 درصد پیش کرنش تقریباً 30% افزایش یافته است.

دریافت: 1400/07/29

پذیرش: 1400/10/08

### کلیدواژگان

ضربه سرعت بالا، ساندویچ پنل، هسته موجدار، پوسته کامپوزیتی هوشمند، آلیاژ حافظه‌دار

## The effect of shape memory wire on the ballistic behavior of smart corrugated core sandwich panels

Roham Maher<sup>1</sup>, Seyed Mohammad Reza Khalili<sup>2\*</sup>, Reza Eslami-Farsani<sup>3</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2- Faculty of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

3- Faculty of Materials Science and Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

\* P.O.B. 1999143344, Tehran, Iran, khalili@kntu.ac.ir

### Keywords

High Velocity Impact, Sandwich Panel, Corrugated core, Smart composite Face-sheet, Shape Memory Alloy

### Abstract

In this research, the impact behavior of trapezoidal corrugated core sandwich panel reinforced with SMA wires, has been investigated experimentally and numerically. Composite specimens were made to perform tensile, compression and shear tests, and the requisite properties were acquired from the tests. Then, sandwich structures with aluminum corrugated core and 4-layer glass/epoxy composites face-sheets were made using the hand-layup technique. In order to reinforce the composite face-sheets, SMA wires were used in two models: 3 SMA wires without pre-strain, 3 SMA wires with 3% pre-strain and 3 SMA wires with 6% pre-strain. The test was performed using a gas gun. To validate and compare the results, the numerical models of the specimens were prepared in LS-Dyna, considering the experimental testing conditions. The results, including ballistic limited velocity and the absorbed energy of the structure were compared and validated by the experimental solutions. The aim of this study was to investigate the effect of adding shape memory alloy wire to reinforce the face-sheets and the effect of pre-strain on the ballistic behavior of the sandwich structure. The results shows that the presence of the SMA wires and applying pre-strain, leads to increasing the energy absorption. Comparing to the wireless sample, the absorbed energy increased about 10%, 22% and 30% in the 3-wires sample without pre-strain, 3-wires sample with 3% pre-strain and 3-wires sample with 6% pre-strain, respectively.

Please cite this article using:

Maher, R., Khalili, S. M. R., Eslami-Farsani, R., "The effect of shape memory wire on the ballistic behavior of smart corrugated core sandwich panels", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, No. 2, pp. 1612-1627, 2021. <https://doi.org/10.22068/JSTC.2021.540982-1752>

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

## 1- مقدمه

سازه‌های کامپوزیتی پیشرفته در مقیاس وسیع و در سازه‌های مختلف به صورت روزافزون مورد استفاده قرار می‌گیرند. ساختارهای ساندویچی با هسته موجدار نمونه‌ای از کامپوزیت‌های پیشرفته می‌باشند. سازه‌های ساندویچی عموماً از سه بخش ساخته می‌شوند، بخش هسته میانی و پوسته بالایی و پایینی. سازه‌های ساندویچی با داشتن وزن کم نسبت به مقاومت بالایشان، باعث بهبود خواص سازه و جذب بیشتر انرژی توسط سازه می‌شوند [1-4]. این ساختارها در بسیاری از سازه‌های دریایی، شهری، خودروها و به خصوص در سامانه‌های هوافضایی کاربرد دارند. برخی از موارد کاربرد آن‌ها در زندگی روزمره عبارت‌اند از: هسته‌های ساندویچی مقوایی برای بسته‌بندی، سقف‌های موج‌دار فلزی، بدنه کشتی، شاسی و سپر خودرو، بدنه و بال‌سازی استفاده می‌شوند. در طبیعت، جایی که عملکرد مکانیکی باید بهینه شود، از ساختارهای ساندویچی استفاده می‌شود، به عنوان مثال جمجمه انسان که از دو لایه استخوان فشرده متراکم تشکیل شده است که توسط یک "هسته" از مواد با چگالی کمتر جدا شده است. ساندویچ‌پنل‌های هسته موجدار در امتداد موج هسته سفتی بالا و عمود بر امتداد موج هسته انعطاف‌پذیری بالایی دارند. از دیگر مزایای استفاده از ساندویچ‌پنل هسته موجدار مقاومت خستگی بالای این سازه‌ها می‌باشد. [5] با توجه به کاربرد گسترده سازه‌های ساندویچی هسته موجدار با رویه‌های کامپوزیتی در ساخت اجزای مکانیکی بکار رفته در صنایع مختلف از جمله صنایع هوافضا، شناخت خواص ضربه‌ای این ساختارها همچون خواص ایستایی آن‌ها به منظور اطمینان یافتن از قابلیت اطمینان سازه حین باربری و برخوردهای ناخواسته امری لازم و ضروری است. هسته موجدار نقش جدا کننده دو پوسته را از یکدیگر دارد. همچنین هسته موجدار با مقاومت در برابر تغییر شکل‌های عمودی، پوسته‌ها را تثبیت کرده و کل سازه را با توجه به مقاومت برشی بالای خود قادر می‌سازد تا به عنوان یک سازه ضمیمه مورد استفاده قرار گیرد. هسته موجدار در راستای جهت موج انعطاف قابل توجهی دارد، همچنین در جهت عرضی، این سازه‌ها دارای سفتی بیشتری هستند [6-7]. علاوه بر این یک هسته موجدار بر خلاف هسته‌های نرم لانه زنبوری، در برابر خمش، پیچش و برش عمودی از خود مقاومت نشان می‌دهد.

ترکیب پوسته‌های کامپوزیتی با هسته فلزی مانند سازه‌های ساندویچی با هسته لانه زنبوری امروزه در صنایع هوافضا کاربرد بسیاری دارند. این نوع ساندویچ‌پنل‌ها می‌تواند با استفاده از پوسته‌های کامپوزیتی، سفتی و استحکام ویژه خمشی را افزایش دهد، در حالی که استفاده از هسته‌های فلزی ظرفیت جذب انرژی را همراه با تغییر شکل‌های بزرگ نیز بهبود می‌بخشد. کاترمن و همکاران [8] نشان دادند که ساختارهای ساندویچی با هسته لانه زنبوری و مواد فوم پلیمری ممکن است هوا و رطوبت را حفظ کنند. حفظ رطوبت یکی از مشکلات ساخت ساندویچ‌پنل مورد استفاده در هواپیما است. این مشکل ممکن است منجر به افزایش وزن ساندویچ‌پنل و ضعیف شدن خواص اصلی آن شود. به منظور حل مشکل، جایگزینی یک هسته توخالی مانند هسته موجدار می‌تواند از تجمع رطوبت جلوگیری کند.

در سال‌های اخیر، استفاده از آلیاژ حافظه‌دار به منظور تقویت سازه‌های کامپوزیتی مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. نیتینول<sup>1</sup> یکی از اولین مواد هوشمند است که در سال 1962 کشف شد [9]. نیتینول‌ها دارای دو فاز کریستالی هستند: 1) فاز آستنیت که قوی‌تر است و در دمای بالا پایدار

است و 2) فاز مارتنزیت که نرم‌تر است و در دمای پایین پایدار است [10]. نیتینول در فاز مارتنزیت خود به دلیل نرمی نسبی، به راحتی تغییر شکل می‌پذیرد. فاز آستنیت دارای ساختار مکعبی است. فاز مارتنزیت دارای تقارن کمتری است و بسته به نوع تغییر فاز ممکن است شکل کریستالی مختلفی داشته باشد. تبدیل فاز از آستنیت به مارتنزیت از چندین روش امکان‌پذیر است، درحالی که تبدیل فاز از مارتنزیت به آستنیت فقط از یک روش امکان‌پذیر است. آلیاژهای حافظه‌دار می‌توانند در اثر تغییر فاز از حالت آستنیت به مارتنزیت و بالعکس باعث جذب انرژی بیشتری در راستای تقویت صفحات کامپوزیتی گردند. به علاوه این مواد تحت بارگذاری سیکلی مکانیکی، می‌توانند از طریق ایجاد حلقه‌ی برگشت‌پذیر هیستریزس، انرژی مکانیکی را جذب و یا تلف کنند.

استفاده از آلیاژ حافظه‌دار در کاربردهای علمی و مهندسی، به خاطر ویژگی‌های منحصر به فرد آن‌ها رو به گسترش است. سازه‌های کامپوزیتی تقویت شده با آلیاژ حافظه‌دار، قابلیت تغییر در سفتی خود را دارند. همچنین آلیاژ حافظه‌دار بر اساس آزمایش سان [11] و تجزیه و تحلیل شریعات [12]، توانایی تغییر شکل، تعمیر آسیب و بهبود خاصیت ضربه را دارد. در این مطالعه، سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار به همراه پیش کرنش در دمای بالا در بین لایه‌های پوسته کامپوزیتی ساندویچ پنل قرار گرفته‌اند. تمایل سیم‌هایی که در معرض کشش اولیه<sup>2</sup> قرار گرفته‌اند به بازگشت به حالت ابتدایی، باعث ایجاد یک تنش فشاری در جسم شده و بنابراین مقاومت سازه در برابر ضربه را افزایش می‌دهد.

یکی از مهمترین دلایل استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار به منظور تقویت کامپوزیت‌ها، بالا بردن میزان جذب انرژی سازه‌های کامپوزیتی در بارگذاری ضربه‌ای است. سازه‌های کامپوزیتی در حین ساخت و یا حمل و نقل، مستعد قرار گرفتن در معرض آسیب‌های ناشی از ضربه هستند [13]. خسارت ناشی از ضربه بر روی سطوح کامپوزیتی اغلب غیر قابل اجتناب است، لذا باید راه‌حلی پیدا کرد تا این خسارت را به حداقل رساند تا سازه به‌طور کامل عملکرد خود را از دست ندهد.

در سال‌های اخیر محققان بسیاری بر روی پاسخ ضربه‌ای سازه‌های کامپوزیتی تحقیق کرده‌اند [14-15]. خدادادی و همکاران [16] به بررسی تجربی و عددی ضربه بالستیک روی کامپوزیت لایه‌ای پرداختند. آن‌ها تأثیر تعداد لایه‌های کامپوزیت بر میانگین انرژی جذب شده و همچنین اثر شکل پرتابه بر عملکرد بالستیکی کامپوزیت کولار/ اپوکسی را مورد بررسی قرار دادند. سانچز و همکاران [17] بصورت تجربی نتایج اثر زاویه پرتابه را روی پاسخ یک ورق چندلایه کامپوزیتی تحت ضربه سرعت بالا مورد بررسی قرار دادند. خلیلی و همکاران [18] به بررسی اثر شکل سر پرتابه و زاویه برخورد در ضربه سرعت بالا بر روی کامپوزیت‌های لایه‌ای پرداختند. آن‌ها با بررسی کامپوزیت‌های لایه‌ای با 3 مدل لایه‌چینی دریافتند که کمترین خسارت و حد بالستیک در 4 لایه پارچه الیاف کربن و بیشترین خسارت و حد بالستیک در 4 لایه پارچه الیاف شیشه ایجاد خواهد شد. با ترکیب این دو پارچه و ساخت 4 لایه پارچه کربن-شیشه، حد بالستیک بالاتر و خسارت پایین‌تر خواهد آمد. ورما و همکاران [19] به بررسی تجربی ضربه سرعت بالا بر روی کامپوزیت‌های تقویت شده با آلیاژ حافظه‌دار پرداختند. آن‌ها نحوه قرارگیری سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار در بین لایه‌های کامپوزیتی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که قرارگرفتن سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار بصورت شبکه‌بندی

<sup>2</sup> prestrain<sup>1</sup> nitinol

گردیده است. به منظور ساخت و شکل دادن هسته موجدار دوزنقه‌ای، از دستگاه خم (شکل 1) استفاده گردیده است. هندسه سطح مقطع هسته موجدار دوزنقه‌ای در شکل 2 نمایش داده شده است. شکل 3، هسته موجدار آلومینیومی را نمایش می‌دهد. خواص آلومینیوم در جدول 1 آورده شده است.



Fig. 1 Bending machine to shape the aluminum core

شکل 1 نمونه دستگاه خم برای شکل دادن هسته آلومینیومی

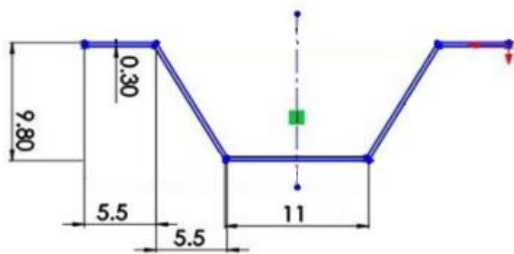


Fig. 2 geometry of aluminum corrugated core

شکل 2 هندسه هسته موجدار آلومینیومی

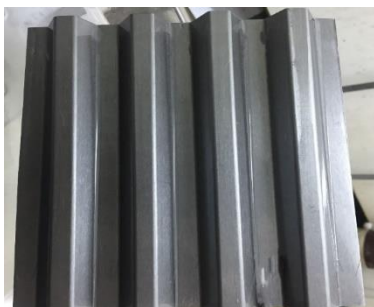


Fig. 3 Aluminum corrugated core

شکل 3 هسته موجدار آلومینیومی

جدول 1 خواص آلومینیوم سری 3000 [28]

پارامتر	مقدار
دانشیته ( $kg/m^3$ )	2770
مدول کششی (GPa)	70
ضریب پواسون	0.33
استحکام نهایی ( $MPa$ ) $S_{ut}$	295

پوسته‌های کامپوزیتی از پارچه شیشه/ اپوکسی دوجهته به روش لایه‌چینی دستی و در دمای اتاق ساخته شده‌اند. به منظور ساخت پوسته‌های کامپوزیتی پارچه شیشه و رزین اپوکسی<sup>۲</sup> با 10% هاردنر ترکیب شده‌اند.

شده جذب انرژی بیشتری نسبت به نمونه‌هایی دارد که سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار بصورت خطی و در یک راستا در نمونه قرار گرفته‌اند. اسلامی-فارسانی و همکاران [20] به بررسی تجربی پاسخ FMLهای تقویت شده با آلیاژ حافظه‌دار و بررسی سطوح تخریب شده در اثر ضربه سرعت بالا پرداختند. پیرمحمدی و همکاران [21] به بررسی ضربه سرعت بالا بر روی ساندویچ پنل با هسته لانه زنبوری بصورت تجربی پرداختند. آن‌ها با بررسی مکانیزم شکست در سازه لانه زنبوری و میزان جذب انرژی توسط هر بخش ساندویچ پنل دریافتند که پوسته روی نسبت به پوسته زیرین نقش بیشتری در جذب انرژی دارد. جی و همکاران [22] به بررسی تجربی ضربه سرعت پایین و بالا بر روی ساندویچ پنل پرداختند. آن‌ها از شبکه فلزی توخالی تقویت شده با اپوکسی به عنوان هسته و چندلایه کامپوزیتی به عنوان پوسته‌های استفاده کردند. شهبازی و همکاران [23] به بررسی ضربه سرعت بالا بر روی ساندویچ پنل‌های هسته موجدار پرداختند. آن‌ها تأثیر تعداد موج بر روی میزان جذب انرژی سازه را بصورت عددی و تجربی مورد بررسی قرار دادند. لیاقت و همکاران [24] به بررسی تجربی نفوذ دینامیکی بر روی ساندویچ پنل با پوسته‌های آلومینیومی و هسته لانه‌زنبوری آلومینیومی پرداختند. هو و همکاران [25] به بررسی اثرات شکل هندسی و پارامترهای ابعادی اصلی، بر رفتار ساندویچ پنل‌های هسته موجدار و بهبود هسته‌های ساندویچ پنل با شکل هسته دوزنقه‌ای و خرابایی بر اساس استانداردهای تصادم پرداختند. وادلی و همکاران [26] تغییر شکل و شکست پنل‌های ساندویچی با هسته موجدار مثلثی، تحت بارگذاری ضربه‌ای سرعت بالا را مورد بررسی قرار دادند. کیلیکاسلان و همکاران [27] به بررسی و مدل‌سازی المان محدود ضربه بر روی سازه ساندویچی با هسته موجدار دوزنقه‌ای آلومینیومی با پوسته‌های آلومینیومی پرداختند.

هدف از این پژوهش، ارتقای خواص ضربه‌ای ساندویچ پنل‌های هسته موجدار در مواجهه با برخورد سرعت بالا است تا بتوان با استفاده از تقویت پوسته‌های کامپوزیتی سازه به واسطه قرار دادن سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار و اعمال پیش کرنش به آن‌ها، مقاومت سازه در مقابل بارهای ضربه‌ای را افزایش داد.

اگرچه مطالعات بسیاری بر روی رفتار ضربه‌ای کامپوزیت‌های لایه‌ای تقویت شده با آلیاژ حافظه‌دار انجام شده است، اما بررسی تأثیر افزودن سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار در پوسته‌های کامپوزیتی ساندویچ پنل‌های با هسته موجدار در معرض ضربه با سرعت بالا مورد بررسی قرار نگرفته است. در این پژوهش، پاسخ ساندویچ پنل‌های هسته موجدار با پوسته‌های کامپوزیتی که تحت تأثیر سرعت زیاد قرار گرفته‌اند به صورت عددی و تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر این، تأثیر افزودن سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار سوپرالاستیک به پوسته‌های کامپوزیتی مورد بررسی قرار گرفته است تا درک بهتری از بهبود ویژگی‌های سازه، هنگام قرار گرفتن در معرض ضربه با سرعت بالا بدست آید. در ادامه تأثیر اعمال پیش کرنش به سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار بر رفتار سازه در مواجهه با ضربه سرعت بالا مورد بررسی قرار گرفته است.

## 2- تحلیل آزمایشگاهی

### 1-2 آماده‌سازی نمونه‌ها

آلومینیوم به علت چگالی کم و انعطاف‌پذیری زیاد و استحکام بالا در بسیاری از مصارف مهندسی به کار گرفته می‌شود. در این مطالعه، از آلومینیوم سری 3000 با ضخامت 0.3 میلی‌متر، برای ساخت هسته موجدار استفاده

<sup>2</sup> EPON828

<sup>1</sup> Fibe Metal Laminate

$$v = v_F V_F + v_E V_E \quad (1)$$

که در آن  $v_F = 0.22$  و  $v_E = 0.35$  است [32]. همچنین خواص سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار سوپر الاستیک استفاده شده در جدول 3 آورده شده است.

جدول 3 خواص آلیاژ حافظه‌دار [33]

Table 3 Properties of shape memory alloys [33]

پارامتر	مقدار
دانشیه $(\text{kg/m}^3)$	6500
مدول الاستیک در فاز آستنیت (GPa)	55
مدول الاستیک در فاز مارتنزیت (GPa)	46
ضریب پواسون	0.3
تنش شروع آستنیت (MPa)	190
تنش شروع مارتنزیت (MPa)	380
تنش پایان آستنیت (MPa)	120
تنش پایان مارتنزیت (MPa)	460

در این مطالعه، تأثیر حضور سیم آلیاژ حافظه‌دار و اعمال پیش کرنش به سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار به منظور تقویت سازه ساندویچی، در پاسخ سازه ساندویچ پنل هوشمند به ضربه سرعت بالا مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور مشاهده اثر افزوده شدن سیم آلیاژ حافظه‌دار به سازه، 2 نمونه، شامل نمونه‌های بدون سیم آلیاژ حافظه‌دار (شکل 5 الف - a)، نمونه‌های با 6 سیم آلیاژ حافظه‌دار (3 سیم در پوسته رویی و 3 سیم در پوسته زیرین) (شکل 5 ب - b) ساخته و آزمایش شده است. به منظور مشاهده اثر پیش کرنش، سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار در نمونه‌های دارای 6 سیم در دو حالت بدون پیش کرنش و 3% پیش کرنش در پوسته‌های کامپوزیتی قرار گرفتند. تمامی نمونه‌ها در ابعاد  $15 \times 15$  سانتی‌متر مربع ساخته شده‌اند. کد نمونه‌ها و تعریف پارامترهای هر نمونه در جدول 4 آمده است.

#### 2-2- آزمایش ضربه سرعت بالا

آزمایش ضربه سرعت بالا توسط دستگاه تفنگ گازی که در شکل 6 نمایش داده شده است انجام شده است. تفنگ گازی مورد استفاده از یک مخزن تحت فشار، سرعت مورد نظر را برای پرتابه فراهم می‌کند.

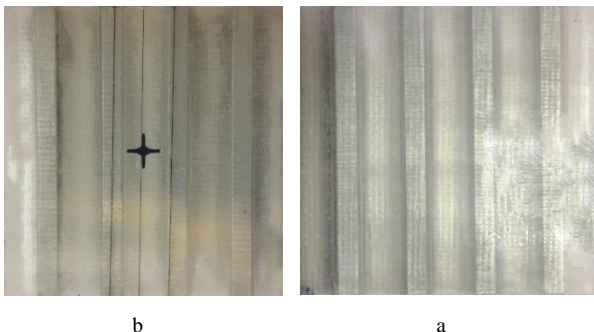
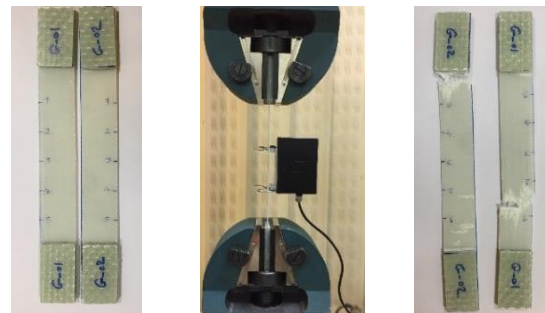


Fig. 5 The fabricated smart sandwich panels a) without wire, b) with 6 wires

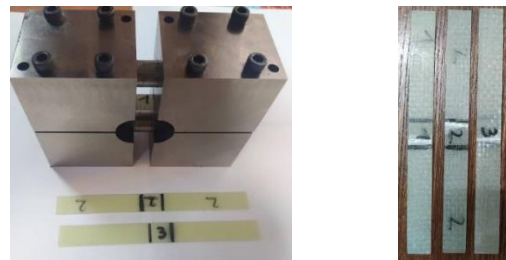
شکل 5 نمونه‌های ساخته شده ساندویچ پنل هوشمند الف) نمونه بدون سیم ب) نمونه با 6 سیم

پوسته‌های کامپوزیتی از چهار لایه و مجموعاً به ضخامت 1.1 میلی‌متر ساخته شده‌اند. به منظور دستیابی به خواص پوسته‌های کامپوزیتی، آزمایش کشش (شکل 4 الف-a)، فشار (شکل 4 ب-b) و برش (شکل 4 ج-c) به ترتیب بر اساس استانداردهای ASTM D3039 [29]، ASTM D6641 [30] و ASTM D5379 [31] انجام شده است. نتایج حاصل از آزمایش‌ها در جدول 2 آورده شده است.

از آنجا که نسبت اختلاط پارچه شیشه و اپوکسی در پوسته‌های کامپوزیتی به گونه‌ای است که 77 درصد پوسته‌ها را پارچه شیشه و 23 درصد را اپوکسی تشکیل می‌دهد، مقدار ضریب پواسون ذکر شده در جدول 2 از قانون مخلوط‌ها و رابطه زیر محاسبه می‌گردد.



a



b



c

Fig. 4 a) tensile test b) shear test c) compressive test of composite laminates

شکل 4 آزمایش الف) کشش ب) برش ج) فشار پوسته کامپوزیتی

جدول 2 خواص پوسته‌های کامپوزیتی

Table 2 Composite laminate properties

پارامتر	مقدار
دانشیه $(\text{kg/m}^3)$	1460
ضریب پواسون	0.25
مدول کششی (GPa)	19.84
مدول برشی (GPa)	5
استحکام نهایی کششی (MPa)	369
استحکام نهایی فشاری (MPa)	375
استحکام نهایی برشی (MPa)	75.8



آلیاژ حافظه‌دار جهت تقویت صفحه‌های کامپوزیتی که در شکل 8 مدل المان محدود ایجاد شده نمایش داده شده است.

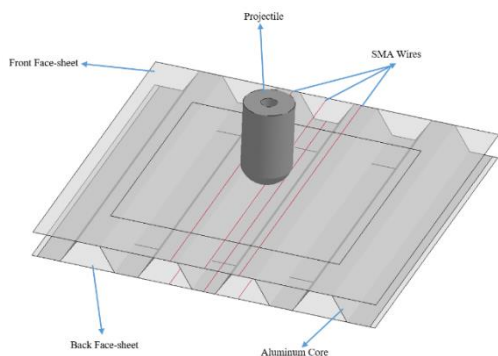


Fig. 8 FEM Geometry of the presented sandwich structure

شکل 8 مدل المان محدود سازه ساندویچی مورد مطالعه

برای جسم ضربه زننده از خواص جسم صلب استفاده شده است. هسته آلومینیومی توسط المان پوسته<sup>3</sup> با فرمول Belytschko-Tsay و با 3 نقطه انتگرال گیری در راستای ضخامت مدل شده است. ضخامت هسته آلومینیومی همانند نمونه‌های آزمایش گرفته شده، 0.3 میلی‌متر در نظر گرفته شده است. برای صفحات کامپوزیتی از المان پوسته با 4 نقطه انتگرال گیری در راستای ضخامت استفاده شده است. ضخامت صفحات کامپوزیتی 1.1 میلی‌متر متشکل از 4 لایه می‌باشد. همچنین برای مدل‌سازی سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار از المان تیر<sup>4</sup> با فرمول Hughes-Liu with cross section integration و سطح مقطع دایره‌ای و قطر 0.5 میلی‌متر استفاده شده است.

ابعاد کلی نمونه به شکل مربع و با ابعاد 15×15 سانتی‌متر مربع و ارتفاع هسته آلومینیومی 1.1 سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. شکل 9 سطح مقطع هسته را نمایش می‌دهد.

جسم ضربه زننده بصورت استوانه با سر گرد با طول 3.75 سانتی‌متر، شعاع 1.08 سانتی‌متر و جرم 27 گرم مدل شده است که در شکل 10 مشاهده می‌شود. محل اصابت ضربه زننده دقیقاً در وسط نمونه می‌باشد.

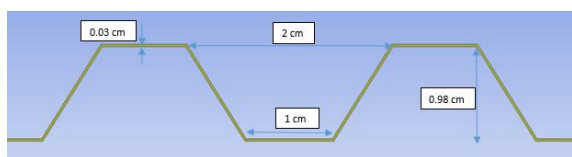


Fig. 9 Core cross section view

شکل 9 سطح مقطع هسته موجدار

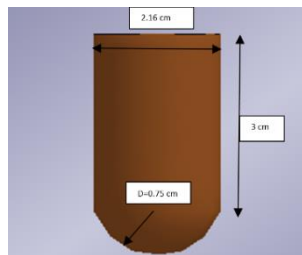


Fig. 10 Geometry of Projectile

شکل 10 هندسه ضربه زننده

جدول 4 کد نمونه‌ها

Table 4 Codes of samples

ردیف	کد نمونه	تعداد سیم	درصد پیش کرنش
1	GE-0W0	0	0
2	SGE-3W0	3	0
3	SGE-3W3	3	3

پرتابه از لوله تفنگ گازی عبور کرده و در آستانه خروج، از سنسور عبور می‌کند. دستگاه اندازه‌گیری سرعت از یک دیود ساطع کننده نور و یک آشکارساز پرتو نوری تشکیل شده است. پرتابه که طول معینی دارد، پرتو نور را قطع می‌کند و سرعت پرتابه با استفاده از سنسور اندازه‌گیری می‌شود. صفحه نگهدارنده‌ی نمونه‌ها به صورتی عمل می‌کند که از هر وجه نمونه 5 cm را مقید می‌کند (شکل 7 الف - a). پرتابه مورد استفاده در این مطالعه، بصورت استوانه‌ای با سر کروی با قطر 21 میلی‌متر و وزن 27 گرم در نظر گرفته شده است (شکل 7 ب - b). سرعت پرتابه در این مطالعه برابر 119m/s است.

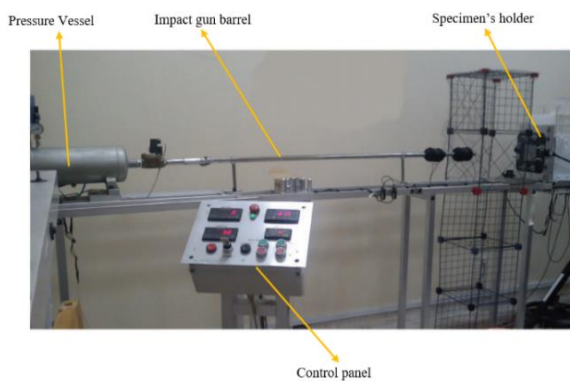


Fig. 6 Gas gun impact tester

شکل 6 دستگاه تفنگ گازی

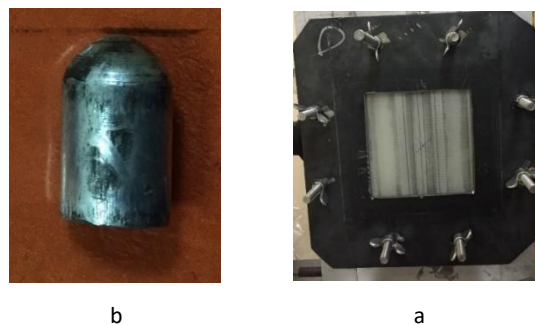


Fig. 7 a) Fixture b) Projectile

شکل 7 الف) نگهدارنده ب) ضربه زننده

### 3- تحلیل المان محدود

#### 1-3- مدل‌سازی

نرم‌افزار المان محدود تجاری ال اس داینا<sup>1</sup>، به منظور شبیه‌سازی عددی استفاده شده است. ال اس داینا یک نرم‌افزار مدل‌سازی دینامیک غیرخطی است که از معادلات صریح<sup>2</sup> به منظور شبیه‌سازی مسائل بهره می‌برد. در این مطالعه هندسه از 5 جزء تشکیل شده است، ضربه زننده (پرتابه)، هسته آلومینیومی، دو صفحه کامپوزیتی در بالا و پایین هسته آلومینیومی و سیم‌های

<sup>3</sup> shell  
<sup>4</sup> beam

<sup>1</sup> LS-Dyna  
<sup>2</sup> Explicit

$$e_t^2 = \left(\frac{\sigma_{22}}{Y_t}\right)^2 + \beta \left(\frac{\sigma_{12}}{S_c}\right)^2 - 1, \quad (4)$$

$$e_t^2 \geq 0 \Rightarrow \text{failed}$$

$$e_t^2 < 0 \Rightarrow \text{elastic}$$

در حالت فشار محوری وقتی  $\sigma_{22} < 0$

$$e_c^2 = \left(\frac{\sigma_{22}}{Y_c}\right)^2 - 1, \quad e_c^2 \geq 0 \Rightarrow \text{failed} \quad (5)$$

$$e_c^2 < 0 \Rightarrow \text{elastic}$$

برای حالت شکست برشی داریم:

$$e_t^2 = \left(\frac{\sigma_{12}}{S_c}\right)^2 - 1 \quad (6)$$

در معادلات بالا  $\sigma_{11}$  تنش در راستای محوری،  $\sigma_{22}$  تنش عرضی،  $\sigma_{12}$  تنش برشی می‌باشد. همچنین  $X_t, X_c, Y_t$  و  $Y_c$  به ترتیب استحکام نهایی کشش در حالت محوری، استحکام فشاری در حالت محوری، استحکام کشش در حالت عرضی و استحکام فشاری در حالت عرضی می‌باشند. همچنین  $S_c$  بیانگر استحکام برشی است.

هسته آلومینیومی:

هسته آلومینیومی توسط مدل ماده Piecewise linear plasticity مدل شده است. خواص الاستو-پلاستیک<sup>3</sup> برای این مدل ماده توسط تعریف نمودار تنش-کرنش انجام گرفته است. شکست ماده توسط تعریف حد کرنش پلاستیک در لحظه شکست<sup>4</sup> تعریف شده است. خواص تعریف شده برای آلومینیوم در جدول 1 آمده است.

آلیاژ حافظه‌دار:

به منظور تعریف خواص آلیاژ حافظه‌دار، از مدل ماده Shape Memory استفاده شده است. [36] این مدل ماده، رفتار سوپر الاستیک مواد آلیاژ حافظه‌دار را تعریف می‌کند که در آن ماده قادر به تحمل تغییر شکل‌های بزرگ در اثر بارگذاری و بازگشت به حالت اولیه در اثر باربرداری است. پارامترهای مورد نیاز برای تعریف آلیاژ حافظه‌دار شامل دانسیته، مدول الاستیک در فاز آستنیت، ضریب پواسون، تنش شروع آستنیت، تنش پایان آستنیت، تنش شروع مارتنزیت، تنش پایان مارتنزیت، مدول الاستیک در فاز مارتنزیت می‌باشد. این پارامترها در جدول 3 آمده است.

### 3-3- تأثیرات نرخ کرنش در خواص مکانیکی مواد

با توجه به اینکه آزمایش‌های صورت گرفته در سرعت بالا انجام شده است، تأثیر نرخ کرنش بر روی خواص مواد می‌بایست در نظر گرفته شود. نرخ کرنش در تحقیق پیش رو حدود  $370s^{-1}$  می‌باشد.

با توجه به نتایج تحقیق ارائه شده در مرجع [37]، نرخ کرنش تأثیری بر روی مدول الاستیسیته صفحات کامپوزیتی شیشه/اپوکسی ندارد و تنها بر روی مقادیر استحکام تأثیر خواهد گذاشت. نتایج ارائه شده در مرجع [38] نشان می‌دهد با افزایش نرخ کرنش از  $0.001s^{-1}$  به  $1000s^{-1}$ ، میزان استحکام ماده 50% افزایش یافته است. لذا با توجه به نرخ کرنش  $370s^{-1}$ ، با میانبایی می‌توان نتیجه گرفت مقادیر استحکام بدست آمده از آزمون‌های مکانیکی استاتیکی می‌بایست به میزان 18.5% افزایش پیدا کند.

جهت در نظر گرفتن نرخ کرنش برای مدل‌سازی هسته آلومینیومی از مدل کوپر-سایموند [39] استفاده شده است (معادله 7):

در این مطالعه، 4 نمونه جهت تحلیل عددی مدل‌سازی شده است: مدل بدون سیم (شکل 11 الف-a)، مدل دارای 3 سیم در هر صفحه کامپوزیتی (شکل 11 ب-b) که بصورت بدون پیش کرنش، با 3% پیش کرنش و با 6% پیش کرنش در نظر گرفته شده است. در مدل‌های دارای 3 سیم در هر صفحه کامپوزیتی، سیم میانی دقیقاً در وسط جسم و محل برخورد ضربه زنده قرار گرفته است.

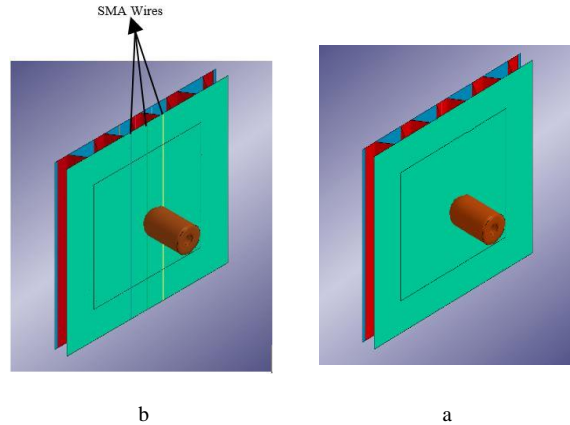


Fig. 11 Geometry of Samples a) without SMA Wires b) With 3 SMA Wires

شکل 11 هندسه نمونه الف) بدون سیم ب) 3 سیم

### 2-3- خواص مواد

پوسته‌های کامپوزیتی:

برای صفحات کامپوزیتی از مدل ماده Enhanced Composite Damage استفاده شده است. خواص ارتوتروپیک تعریف شده برای ماده کامپوزیتی در جدول 2 آمده است. برای تعریف شکست صفحات کامپوزیتی از مدل چانگ-چانگ<sup>1</sup> استفاده شده است [34-35]. در این مدل ماده هرگاه میزان تنش المان‌ها در راستای ضخامت و نقاط انتگرال‌گیری به تنش شکست برسد، المان حذف می‌شود. معادلات شکست چانگ-چانگ بر طبق فرمول‌های زیر و بر اساس پارامترهای  $e_t$  و  $e_c$  که به ترتیب متغیرهای شکست در حالت کشش و فشار هستند بیان می‌شود.

در حالت کشش محوری وقتی  $\sigma_{11} > 0$

$$e_t^2 = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_t}\right)^2 + \beta \left(\frac{\sigma_{12}}{S_c}\right)^2 - 1, \quad e_t^2 \geq 0 \Rightarrow \text{failed} \quad (2)$$

$$e_t^2 < 0 \Rightarrow \text{elastic}$$

در معادله 2،  $\beta$  ضریب وزنی تنش برشی است. در معیار شکست هشین<sup>2</sup> مقدار  $\beta$  برابر 1 می‌باشد. هرگاه  $\beta = 0$  در نظر گرفته شود، معادله 2 بیانگر حداکثر معیار تنش شکست می‌باشد.

در حالت فشار محوری وقتی  $\sigma_{11} < 0$

$$e_c^2 = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_c}\right)^2 - 1, \quad e_c^2 \geq 0 \Rightarrow \text{failed} \quad (3)$$

$$e_c^2 < 0 \Rightarrow \text{elastic}$$

در حالت کشش عرضی وقتی  $\sigma_{22} > 0$

<sup>3</sup> Elasto-Plastic

<sup>4</sup> Effective Plastic Strain (EPS)

<sup>1</sup> Chang-Chang

<sup>2</sup> Hashin

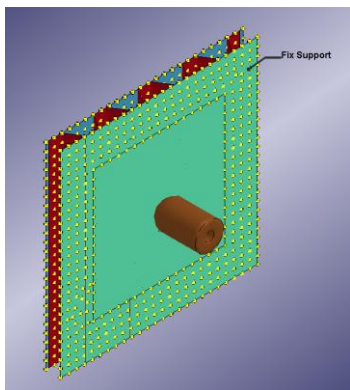


Fig. 12 Boundary Condition

شکل 12 شرایط مرزی

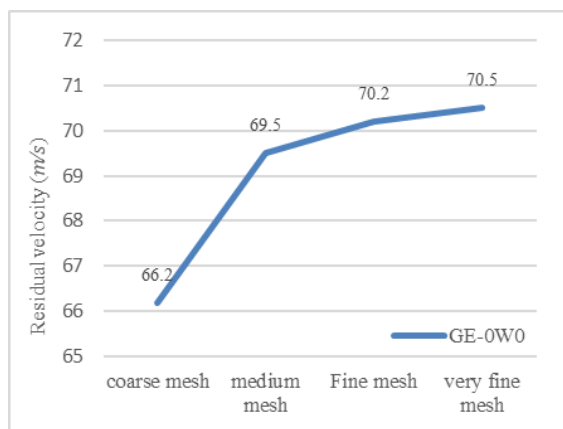


Fig. 13 Mesh size results on convergence rate

شکل 13 بررسی نتایج اندازه مش بر نرخ همگرایی

نتایج حاصل از بررسی حساسیت مش نشان می‌دهد که تغییرات ناشی از کوچک‌تر شدن ابعاد مش در سه حالت مش با ابعاد نصف و مش با ابعاد یک‌چهارم و یک‌هشتم تقریباً 1 درصد خواهد بود. زمان تحلیل از 30 دقیقه برای نمونه اولیه تا 4 ساعت برای نمونه با مش یک‌چهارم افزایش خواهد یافت.

#### 4- نتایج و بحث

در این مطالعه، سرعت حد بالستیک و انرژی جذب شده توسط نمونه‌های ساندویچ پنل محاسبه و نتایج با یکدیگر مقایسه شده‌اند. برای این منظور، سرعت خروجی پرتابه به دست آمده است. پس از بدست آوردن سرعت خروجی، سرعت حد بالستیک و انرژی جذب شده محاسبه شده است. سرعت حد، حداقل سرعت مورد نیاز برای نفوذ کامل پرتابه در جسم است که از معادله 8 بدست می‌آید. پس از بدست آوردن سرعت حد بالستیک، انرژی جذب شده نیز از معادله 9 محاسبه شد. [20]

$$V_l = \sqrt{V_i^2 - V_r^2} \text{ m/s} \quad (8)$$

$$E_{abs} = \frac{1}{2} M_p V_l^2 \quad (9)$$

در ادامه، به بررسی اندازه سطح آسیب دیده<sup>1</sup> در سطوح کامپوزیتی پرداخته شده است. با مقایسه مساحت سطح آسیب دیده می‌توان نتیجه گرفت کدام یک از صفحات انرژی بیشتری در فرآیند ضربه جذب کرده است. مساحت

$$1 + \left(\frac{\epsilon}{C}\right)^{1/P} \quad (7)$$

که در آن  $P=4$  و  $C=6500 \frac{1}{s}$  لحاظ شده است. همچنین نتایج تحقیق ارائه شده در مرجع [40] نشان می‌دهد، افزایش نرخ کرنش موجب می‌شود که سطح تنش در ناحیه تنش ثابت در مرحله بارگذاری (تبدیل فاز آستنیت به مارتنزیت) افزایش یافته و سطح تنش در ناحیه تنش ثابت در مرحله باربرداری (تبدیل فاز مارتنزیت به آستنیت) ثابت می‌ماند. نتایج تحقیق [41] نشان می‌دهد با افزایش نرخ کرنش از  $0.001s^{-1}$  در حالت شبه استاتیکی به  $1200s^{-1}$  در حالت دینامیکی، میزان تنش‌های شروع و پایان حالت مارتنزیت به میزان 100 MPa افزایش پیدا خواهند کرد. با میانمایی صورت گرفته می‌توان نتیجه گرفت در تحقیق پیش رو، میزان تنش‌های شروع و پایان حالت مارتنزیت می‌بایست به میزان 30 MPa افزایش یابند.

#### 3-4 شرایط تماس

تماس بین ضربه‌زننده با سایر اجسام از طریق مدل تماس CONTACT AUTOMATIC Single Surface تعریف شده است. در این مدل تماس، هرگاه گره‌های سطحی ضربه‌زننده با گره‌های دیگر اجسام برخورد کند تماس شکل می‌گیرد.

تماس بین هسته آلومینیومی و پوسته‌های کامپوزیتی با مدل تماس CONTACT Tied Surface to Surface offset مدل شده است. در این مدل ماده، با تغییر شکل المان‌های یکی از سطوح، سطوح در تماس با آن نیز تغییر شکل پیدا می‌کند.

تماس بین سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار با پوسته‌های کامپوزیتی توسط مدل تماس CONTACT Tied Nodes to Surface offset تعریف شده است.

#### 3-5 شرایط مرزی و اولیه

در این مطالعه، با توجه به شرایط آزمایش تجربی، ضربه زننده با سرعت  $119m/s$  بصورت عمود و دقیقاً به مرکز جسم برخورد می‌کند. با توجه به شرایط مرزی و نگهدارنده در آزمایش تنگ گازی، چهار وجه صفحات کامپوزیتی هر یک به اندازه 5 سانتی‌متر مقید در نظر گرفته شده‌اند. (شکل 12)

در نمونه‌های دارای پیش کرنش هر یک از سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار قبل از شروع تحلیل دینامیک یکبار به اندازه 1.5% طول اولیه خود معادل 2.25 میلی‌متر از بالا و پایین (مجموعه 3% پیش کرنش برای هر سیم) و بار دیگر به میزان 3% طول اولیه خود معادل 4.5 میلی‌متر کشیده شده‌اند (مجموعه 6% پیش کرنش برای هر سیم).

#### 3-6 بررسی حساسیت مش

در مدل‌های المان محدود صریح، اندازه مش در نتایج بسیار تأثیرگذار خواهد بود. همچنین با کوچک‌تر شدن هرچه بیشتر اندازه مش‌ها و افزایش تعداد المان‌ها، زمان حل افزایش پیدا خواهد کرد. مطالعه حساسیت مش بدین منظور انجام شده است که به مقدار ساینز بهینه برای المان‌ها دست یابیم. بدین منظور باید مش‌ها ریز شوند تا حدی که نتایج حاصل از دو نمونه مش تغییر چندانی نداشته باشند. در این مطالعه مش‌ها یک‌بار نصف و یک‌بار یک‌چهارم و بار دیگر بصورت یک‌هشتم شده و نتایج حاصل با نمونه‌های اولیه مقایسه شده است. با توجه به نتایج ارائه شده در شکل 13، مش با ابعاد نصف (medium mesh) جهت تحلیل مورد استفاده قرار گرفته است.

جدول 6 مساحت سطح تخریب در نمونه GE-0W0

Table 6 Damage Area of GE-0W0

اجزاء	حل تجربی	حل عددی	درصد اختلاف
رویه جلویی	7.86	7.76	1.3
رویه پشتی	8.53	9.36	8.86

4-2- ضربه سرعت بالا بر روی نمونه سه سیم بدون پیش کرنش

نمونه با 3 سیم آلیاژ حافظه‌دار در شکل 5 (ب - ب) نمایش داده شده است. مدل عددی این نمونه در شکل 11 (ب - ب) نمایش داده شده است. سرعت باقیمانده، سرعت حد و انرژی جذب شده توسط سازه، برای نمونه SGE-3W0 در دو حالت حل تجربی و عددی محاسبه شده و در جدول 7 نمایش داده شده است.

جدول 7 سرعت باقیمانده، سرعت حد و انرژی جذب شده توسط نمونه SGE-3W0

پارامتر	حل تجربی ( $cm^2$ )	حل عددی ( $cm^2$ )	درصد اختلاف
$V_r (m/s)$	68	66.3	2.5
$V_t (m/s)$	97.66	98.8	1.17
$E_{abs} (J)$	128.749	131.83	2.4

شکل 15، نمونه‌ی SGE-3W0 را در دو حالت تجربی و عددی پس از برخورد نمایش می‌دهد. مساحت سطح تخریب ناشی از برخورد سرعت بالا برای هر سطح در جدول 8 آورده شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که اضافه کردن سیم آلیاژ حافظه‌دار به نمونه، باعث بزرگ‌تر شدن ناحیه آسیب دیده در قسمت جلوی (شکل 15 (الف-ا)) و پشتی (شکل 15 (ب-ب)) شده و این پانل‌ها انرژی بیشتری را جذب می‌کنند. همچنین جهت گسترش خرابی در راستای سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار و عمود بر آن است.

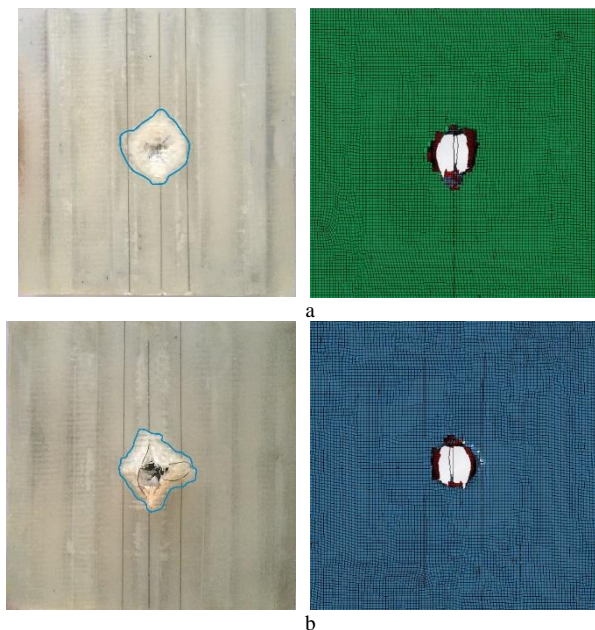


Fig. 15 Damage area of composite face-sheet in SGE-3W0 specimen by experiment and by numerical analysis a) front view b) back view.

شکل 15 سطح تخریب شده در نمونه SGE-3W0 توسط آزمایش و توسط آنالیز عددی (الف) صفحه جلویی (ب) صفحه پشتی

دقیق ناحیه آسیب دیده با مقایسه تعداد پیکسل‌های آن ناحیه با تعداد پیکسل‌های سطح کل سازه توسط نرم‌افزار فتوشاپ بدست می‌آید.

4-1- ضربه سرعت بالا بر روی نمونه بدون سیم

در اولین قدم، نمونه بدون سیم آلیاژ حافظه‌دار که در شکل 5 (الف - a) نمایش داده شده است، به عنوان نمونه مرجع مورد آزمایش قرار گرفته شده است. مدل عددی این نمونه در شکل 11 (الف - a) نمایش داده شده است. سرعت باقیمانده، سرعت حد بالستیک از معادله 8 و انرژی جذب شده توسط سازه از معادله 9، برای نمونه GE-0W0 در دو حالت حل تجربی و عددی محاسبه شده و در جدول 5 نمایش داده شده است.

جدول 5 سرعت باقیمانده، سرعت حد و انرژی جذب شده توسط نمونه GE-0W0

Table 5 Residual Velocity, limited velocity and energy absorbed for GE-0W0

پارامتر	حل تجربی ( $cm^2$ )	حل عددی ( $cm^2$ )	درصد اختلاف
$V_r (m/s)$	74	69.5	6.1
$V_t (m/s)$	93.19	96.5	3.55
$E_{abs} (J)$	117.247	126	7.5

در شکل 14، سطوح روئی (شکل 14 (الف-ا)) و پشتی (شکل 14 (ب-ب)) نمونه GE-0W0 بعد از برخورد، در دو حالت حل تجربی و عددی نمایش داده شده است. همچنین در جدول 6 مساحت سطح تخریب ناشی از برخورد سرعت بالا برای هر سطح آورده شده است.

از نتایج ارائه شده در جدول 6 می‌توان نتیجه گرفت، به علت اتصال پوسته پشتی به سطح هسته با توجه دوزنقه بودن هسته، باعث تقویت هسته در محل برخورد پرتابه با هسته و پوسته خواهد شد. از این رو با شکست و پارگی هسته آلومینیومی، شکست و پارگی در پوسته پشتی رخ می‌دهد، این شکست عاملی بر تخریب بیشتر پوسته‌های پشتی بوده و با افزایش سطح تخریب پوسته‌های پشتی، میزان انرژی صرف شده جهت تخریب بیشتر خواهد بود.

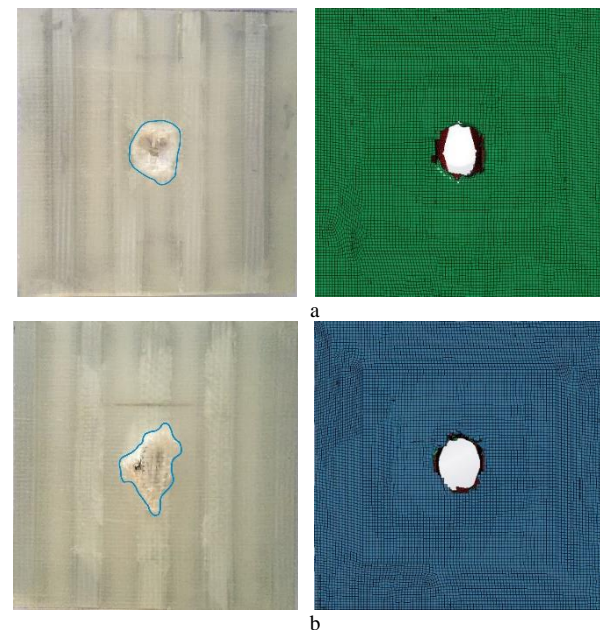
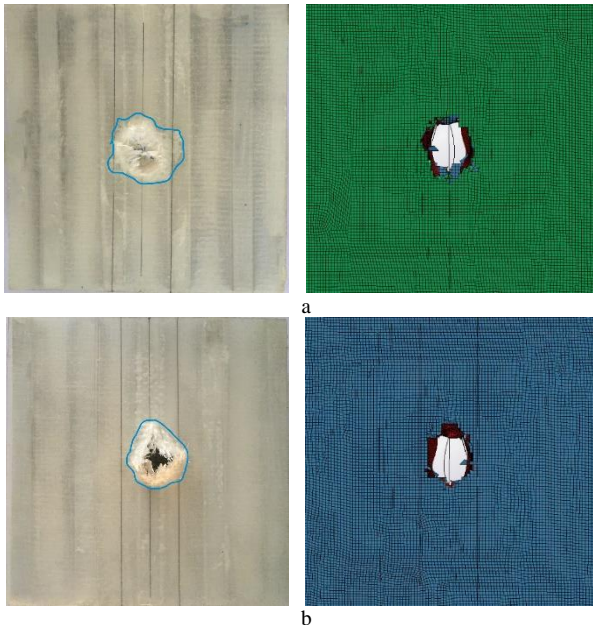


Fig. 14 Damage area of composite face-sheet in GE-0W0 specimen by experiment and by numerical analysis a) front view b) back view.

شکل 14 سطح تخریب شده در نمونه GE-0W0 توسط آزمایش و توسط آنالیز عددی (الف) صفحه جلویی (ب) صفحه پشتی



سرعت باقیمانده، سرعت حد انرژی جذب شده برای نمونه SGE-3W6 در جدول 11 نمایش داده شده است. در شکل 17، سطوح رویی (شکل 17 الف) و پشتی (شکل 17 ب-ب) نمونه SGE-3W3 بعد از برخورد نمایش داده شده است. مساحت سطح تخریب در پوسته‌های جلویی و پشتی (جدول 12) نشان می‌دهد که با افزایش پیش کرنش از 3% به 6%، ناحیه آسیب دیده در قسمت جلویی افزایش یافته و در قسمت پشتی کاهش یافته است.

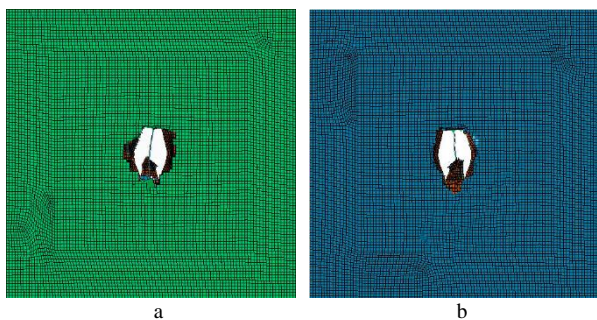


**Fig. 16** Damage Area of composite face-sheet in SGE-3W3 specimen by experiment and by numerical analysis numerically a) front view b) back view.

شکل 16 سطح تخریب شده در نمونه SGE-3W3 توسط آزمایش و توسط آنالیز عددی الف) صفحه جلویی ب) صفحه پشتی

جدول 11 سرعت باقیمانده، سرعت حد و انرژی جذب شده توسط نمونه SGE-3W6

پارامتر	حل عددی
$V_r (m/s)$	54.9
$V_l (m/s)$	105.6
$E_{abs} (J)$	150.5



**Fig. 17** Damage Area of composite face-sheet in SGE-3W6 specimen by numerical analysis a) front view b) back view.

شکل 17 سطح تخریب شده در نمونه SGE-3W6 توسط آنالیز عددی الف) صفحه جلویی ب) صفحه پشتی

جدول 8 مساحت سطح تخریب در نمونه SGE-3W0

**Table 8** Damage Area of SGE-3W0

اجزاء	حل تجربی ( $cm^2$ )	حل عددی ( $cm^2$ )	درصد اختلاف
رویه جلویی	9.3	9.21	0.96
رویه پشتی	9.86	9.26	6.1

با مقایسه نتایج حل تجربی ارائه شده در جداول 5 و 7 می‌توان نتیجه گرفت که سازه با 3 سیم حافظه‌دار به طوری که سیم در محل برخورد قرار گرفته باشد، مقدار 9.81 درصد جذب انرژی بیشتری نسبت به نمونه بدون سیم دارد.

3-4- ضربه سرعت بالا بر روی نمونه سه سیم با 3 درصد پیش کرنش شکل‌های 5 (ب-ب) و 11 (ب-ب) نمونه با سه سیم آلیاژ حافظه‌دار با 3٪ پیش کرنش را به ترتیب در حالت تجربی و عددی نمایش می‌دهد. سرعت باقیمانده، سرعت حد و انرژی جذب شده برای نمونه SGE-3W3 در محاسبه و در جدول 9 نمایش داده شده است.

جدول 9 سرعت باقیمانده، سرعت حد و انرژی جذب شده توسط نمونه SGE-3W3

**Table 9** Residual Velocity, limited velocity and energy absorbed for SGE-3W3

پارامتر	حل تجربی	حل عددی	درصد اختلاف
$V_r (m/s)$	60	57	5
$V_l (m/s)$	102.77	104.46	1.6
$E_{abs} (J)$	142.574	147.312	3.3

در شکل 16، سطوح رویی (شکل 16 الف) و پشتی (شکل 16 ب-ب) نمونه SGE-3W3 بعد از برخورد، در دو حالت حل تجربی و عددی نمایش داده شده است. از نتایج ارائه شده در جدول 10 می‌توان نتیجه گرفت که با اضافه کردن پیش کرنش به سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار، ناحیه آسیب دیده در قسمت جلویی افزایش یافته و در قسمت پشتی نسبت به حالت بدون پیش کرنش کاهش یافته است. همچنین جهت گسترش خرابی همچنان در راستای سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار و عمود بر آن است.

جدول 10 مساحت سطح تخریب در نمونه SGE-3W3

**Table 10** Damage area of SGE-3W3

اجزاء	حل تجربی ( $cm^2$ )	حل عددی ( $cm^2$ )	درصد اختلاف
رویه جلویی	9.34	9.5	1.7
رویه پشتی	7.97	8.4	5.1

با توجه به نتایج ارائه شده در جداول 9 و 7 می‌توان نتیجه گرفت، اعمال 3 درصد پیش کرنش به سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار، مقدار 10.74 درصد جذب انرژی را در مقایسه با نمونه بدون پیش کرنش افزایش می‌دهد.

3-4- ضربه سرعت بالا بر روی نمونه سه سیم با 6 درصد پیش کرنش پس از حصول اطمینان از مطابقت نتایج عددی و تجربی در نمونه‌های قبلی، در این بخش به بررسی نمونه با سه سیم آلیاژ حافظه‌دار با 6٪ پیش کرنش بصورت عددی پرداخته شده است.

نتایج حاصل از حل عددی نمونه SGE-3W6 نشان می‌دهد که با افزایش پیش کرنش در نمونه از 3% به 6%، میزان جذب انرژی 2.7٪ افزایش یافته است.

با توجه به نتایج، سرعت حد بالستیک برای سازه ساندویچ پل با هسته موجدار با قرار دادن سیم آلیاژ حافظه‌دار دقیقاً در محل ضربه و همچنین اعمال پیش کرنش به سیم‌ها افزایش خواهد یافت.

#### 4-6- مراحل نفوذ

در نمونه‌های دارای سیم آلیاژ حافظه‌دار مراحل نفوذ را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

مرحله 1. پرتابه با پوسته جلویی برخورد کرده و باعث شکستگی و پارگی در الیاف و ماتریس می‌شود.

مرحله 2. برخورد پرتابه به سیم میانی باعث حرکت سیم میانی داخل پوسته کامپوزیتی و در عین حال بیرون کشیدگی و افزایش طول سیم میانی و در نتیجه، جذب انرژی توسط سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار خواهد شد. سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار پاره نشده‌اند، اما به مقدار کمی از پوسته‌های کامپوزیتی بیرون کشیده شده‌اند. ناحیه آسیب دیده در پوسته‌های جلویی (شکل 15 الف - a) و 16 (الف - a)) نشان می‌دهد که انرژی برخورد پرتابه در سطح پوسته‌ها پخش نشده و فقط قسمت‌های میانی آسیب دیده است.

مرحله 3. با ادامه روند نفوذ، پرتابه با هسته آلومینیومی برخورد کرده و منجر به شکست هسته آلومینیومی خواهد شد و در نتیجه، پارگی و شکست در الیاف و ماتریس پوسته‌های کامپوزیتی پستی ایجاد می‌شود.

مرحله 4. در هر نمونه، برخورد پرتابه با هسته آلومینیومی و سپس پوسته پستی منجر به تغییر شکل سیم آلیاژ حافظه‌دار و جذب انرژی بیشتر به دلیل این تغییر شکل می‌شود. تنش زیاد در محل برخورد منجر به جدا شدن موضعی پوسته پستی و هسته آلومینیومی خواهد شد.

#### 4-7- مکانیزم جذب انرژی

مکانیزم جذب انرژی در نمونه‌ها شامل موارد زیر می‌باشد:

1. جذب انرژی حاصل از تخریب پوسته جلویی.
2. جذب انرژی حاصل از تخریب هسته موجدار آلومینیومی.
3. جذب انرژی حاصل از تخریب پوسته پستی.
4. جذب انرژی حاصل از اثر قرار دهی سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار.
5. جذب انرژی حاصل از بیرون کشیدگی و افزایش طول سیم حافظه‌دار.

از آنجا که پوسته‌های جلویی در محل برخورد با پرتابه به هسته اتصال ندارند، جهت بررسی تأثیر حضور سیم آلیاژ حافظه‌دار بر میزان جذب انرژی پوسته‌های کامپوزیتی می‌توان نتایج حاصل از سطح تخریب در پوسته‌های جلویی را مورد بررسی قرار داد. نتایج ارائه شده در جداول 6، 8 و 10 و 12 نشان می‌دهد میزان جذب انرژی توسط پوسته‌های کامپوزیتی جلویی با قرار دادن سیم آلیاژ حافظه‌دار، با افزایش سطح تخریب، افزایش خواهد یافت. به علت عدم وابستگی کرنش نهایی آلومینیوم به سرعت پرتابه [42,43]، کاهش سرعت برخورد پرتابه با هسته (در اثر عبور از پوسته جلویی نمونه‌ها و از دست دادن انرژی) تأثیری بر میزان جذب انرژی توسط هسته آلومینیومی در نمونه‌ها ندارد.

با اعمال پیش کرنش به سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار، پس از آنکه پرتابه با تخریب پوسته جلویی مقداری از انرژی خود را از دست داد، با ادامه فرآیند برخورد و بیرون کشیدگی و افزایش طول سیم آلیاژ حافظه‌دار میزان انرژی جذب شده توسط سیم‌ها افزایش خواهد یافت. از آنجا که در نمونه SGE-3W3 و SGE-3W6، سطح تخریب پوسته پستی نسبت به دو نمونه دیگر کاهش یافته و میزان جذب انرژی در این نمونه‌ها بالاتر رفته است، می‌توان نتیجه گرفت که اعمال پیش کرنش به سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار باعث افزایش

جدول 12 مساحت سطح تخریب در نمونه SGE-3W6

Table 12 Damage area of SGE-3W6

اجزاء	حل عددی (cm <sup>2</sup> )
رویه جلویی	9.49
رویه پستی	7.35

#### 4-5- سرعت حد و انرژی جذب شده

مقایسه نتایج بدست آمده از نمونه‌های تقویت شده با سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار با نمونه بدون سیم نشان می‌دهد که در نمونه SGE-3W0، که سیم میانی دقیقاً در محل ضربه قرار داشته باشد، سرعت حد و در نتیجه آن انرژی جذب شده توسط نمونه افزایش می‌یابد. همچنین با اعمال پیش کرنش در نمونه SGE-3W3 و SGE-3W6 مشاهده گردید، سرعت حد ضربه زنده و انرژی جذب شده توسط سازه افزایش قابل ملاحظه‌ای با افزایش پیش کرنش داشته است. این نتایج در شکل 18 و 19 نمایش داده شده‌اند. سرعت حد در اثر افزودن سیم آلیاژ حافظه‌دار بدون پیش کرنش (SGE-3W0) نسبت به نمونه بدون سیم (GE-0W0)، به میزان 4.8٪ افزایش یافته است. همچنین با اعمال پیش کرنش به سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار، سرعت حد به میزان 5.2٪ در نمونه SGE-3W3 و 6.9٪ در نمونه SGE-3W6 نسبت به نمونه SGE-3W0 افزایش یافته است.

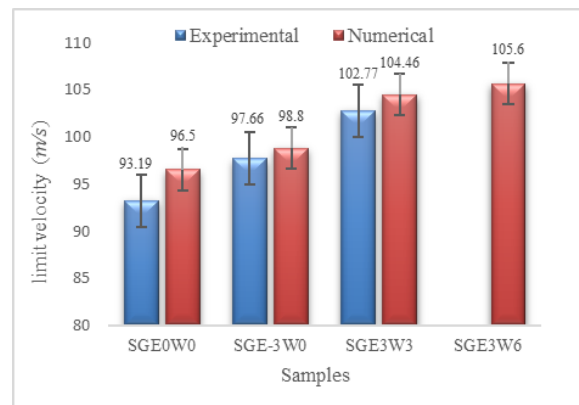


Fig. 18 Comparison of limited velocities by experiment and numerical analysis

شکل 18 مقایسه سرعت حد در نتایج عددی و تجربی

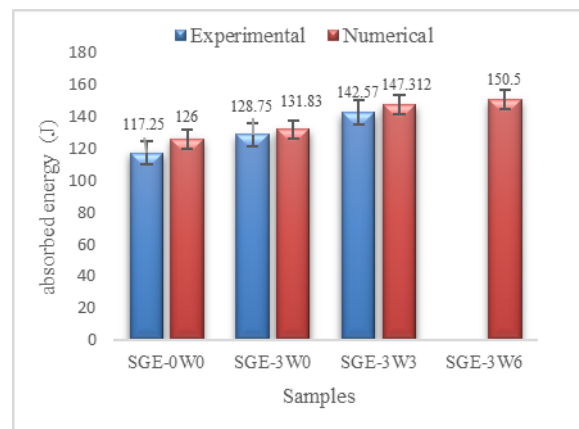
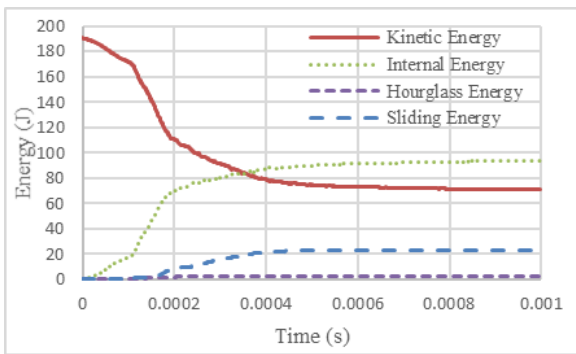
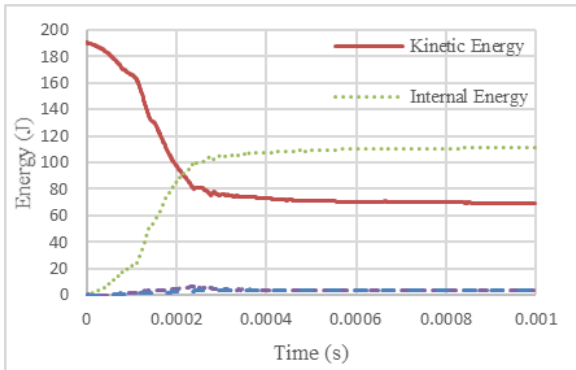


Fig. 19 Comparison of absorbed energies by experiment and numerical analysis

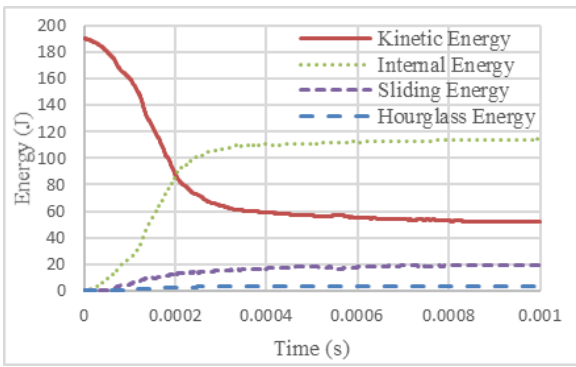
شکل 19 مقایسه انرژی جذب شده در نتایج عددی و تجربی



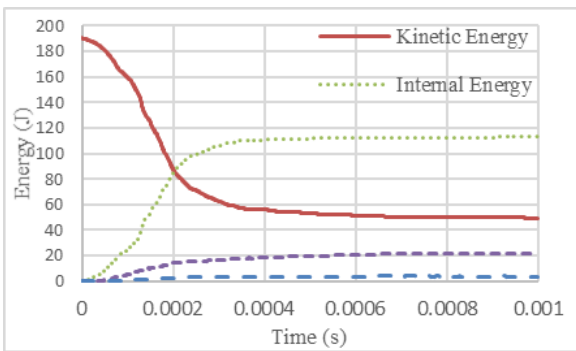
a



b



c



d

**Fig. 20** Simulation Energy Balance Analysis, a) GE-0W0 b) SGE-3W0 c) SGE-3W3 d) SGE-3W6

شکل 20 بررسی تعادل انرژی در شبیه‌سازی، الف) نمونه GE-0W0 ب) SGE-3W0 پ) SGE-3W3 ت) SGE-3W6

جذب انرژی بیشتر توسط سیم‌ها شده و علاوه بر بهبود خواص بالستیکی سازه، باعث کاهش سطح تخریب شده در سازه خواهد شد.

#### 8-4- بررسی نتایج عددی

بررسی نمودارهای بدست آمده از میزان انرژی جذب شده توسط سازه در حل عددی، تأثیرگذاری حضور سیم آلیاژ حافظه‌دار و همچنین اعمال پیش کرنش به سیم‌ها در جهت تقویت سازه را بهتر نمایش خواهد داد.

#### 1-8-4 تعادل انرژی

بررسی شرایط تعادلی انرژی یکی از مهم‌ترین شرایط اطمینان از تحلیل عددی سازه می‌باشد. تعادل انرژی در نرم‌افزار ال اس داینما از معادله زیر محاسبه می‌شود. [44]

$$E_{kin} + E_{int} + E_{gi} + E_{rw} + E_{damp} + E_{hg} = E_{kin}^0 + E_{in}^0 + W_{ext} \quad (10)$$

از آنجا که انرژی‌های جسم صلب و میرایی در این مطالعه بسیار پایین است می‌توان نتیجه گرفت غالب انرژی جذب شده توسط سازه ناشی از انرژی داخلی، انرژی ساعت شنی<sup>1</sup> و انرژی سایش است. انرژی ساعت شنی انرژی حاصل از تغییر شکل‌های غیر فیزیکی المان‌ها است که نرم‌افزارهای المان محدود در حل صریح از آن جهت همگرایی مسئله استفاده می‌کنند.

تعادل سراسری<sup>2</sup> انرژی در طول شبیه‌سازی برای تمامی نمونه‌ها در شکل 20 نمایش داده شده است. با برخورد پرتابه به سازه، انرژی جنبشی کاهش یافته و انرژی داخلی افزایش می‌یابد. همانطور که در شکل 20 نمایش داده شده است، انرژی جنبشی اولیه در تمامی نمونه‌ها برابر با 191J (معادله 9) می‌باشد. انرژی جنبشی در پایان فرآیند تماس و پس از خروج کامل پرتابه از سازه برابر 70.7J در نمونه GE-0W0 (شکل 20 الف-ا)، 69J در نمونه SGE-3W0 (شکل 20 ب-ب)، 52J در نمونه SGE-3W3 (شکل 20 پ-پ) و 49.4J در نمونه SGE-3W6 (شکل 20 ت-د) شده است. میزان انرژی جنبشی کاهش یافته اغلب صرف افزایش میزان انرژی داخلی سازه و در نتیجه جذب انرژی اولیه پرتابه شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که قرار گرفتن سیم آلیاژ حافظه‌دار بدون پیش کرنش در سازه، باعث کاهش انرژی جذب شده از طریق سایش و افزایش جذب انرژی داخلی در سازه می‌شود. قرار گرفتن سیم آلیاژ حافظه‌دار بدون پیش کرنش باعث کاهش انرژی سایش از 22.8J در نمونه GE-0W0 به 6.65J در نمونه SGE-3W0 خواهد شد. همچنین انرژی داخلی سازه از 93.8J در نمونه GE-0W0 به 111J در نمونه SGE-3W0 افزایش یافته است.

اعمال پیش کرنش به سیم آلیاژ حافظه‌دار سبب افزایش اثر مکانیزم جذب انرژی توسط افزایش میزان انرژی داخلی و سایشی می‌شود. انرژی داخلی سازه از 111J در نمونه SGE-3W0، به 114J در نمونه SGE-3W3 و 113J در نمونه SGE-3W6 افزایش یافته است. انرژی سایشی سازه از 6.65J در نمونه SGE-3W0، به 19J در نمونه SGE-3W3 و 21.8J در نمونه SGE-3W6 رسیده است. نتایج حاصل از اعمال پیش کرنش نشان می‌دهد با افزایش پیش کرنش از 3% به 6%، به خاطر نرم‌تر شدن سیم آلیاژ حافظه‌دار و تغییر شکل بیشتر سیم در حین برخورد، زمان تماس بین پرتابه و سیم‌ها افزایش یافته و در نتیجه مکانیزم جذب انرژی از طریق سایش افزایش می‌یابد.

<sup>2</sup> Global

<sup>1</sup> HourGlass

2-8-4- نیروی تماسی

سیم‌های قرار گرفته در پوسته پستی است، میزان جذب انرژی توسط سیم‌ها به ترتیب 17.21% و 61.8% در نمونه‌های دارای 3% و 6% پیش کرنش نسبت به حالت بدون پیش کرنش افزایش یافته است. با افزایش پیش کرنش، پیک دوم به سمت راست نمودار انتقال پیدا خواهد کرد که نشان دهنده کاهش شوک ضربه و افزایش مقاومت سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار در مقابل ضربه به سبب نرم‌تر شدن سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار در اثر اعمال پیش کرنش و در نتیجه زمان بیشتر تماس بین سیم‌ها و پرتابه است. نتایج نشان می‌دهند جذب انرژی توسط سیم‌های قرار گرفته در پوسته پستی بیشتر از جذب انرژی توسط سیم‌های قرار گرفته در پوسته جلویی است. دلیل این اتفاق کاهش سرعت اولیه پرتابه در اثر برخورد با پوسته جلویی است.

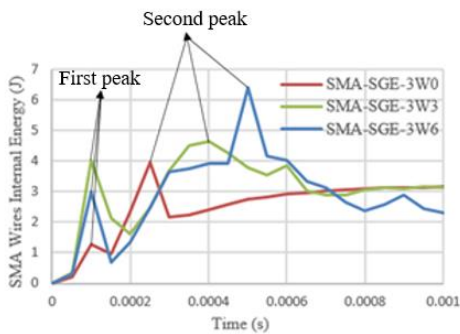


Fig. 23 SMA wires Internal Energy diagram for SGE-3W0, SGE-3W3 and SGE-3W6 specimens

شکل 23 نمودار انرژی داخلی سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار برای نمونه‌های SGE-3W0 و SGE-3W3 و SGE-3W6

4-8-4- واماندگی هسته موجدار آلومینیومی

در این پژوهش، پوسته‌های کامپوزیتی نمونه SGE-3W3 از هسته جدا شده- اند تا بر روی نحوه واماندگی هسته آلومینیومی بررسی دقیق‌تر صورت گیرد. پس از مطالعه نمونه ذکر شده و مقایسه با نتایج عددی و اطمینان از صحت نتایج عددی به بررسی پارامتری در نمونه‌های دیگر به روش عددی پرداخته شده است.

شکل 24 الی 26 هسته آلومینیومی نمونه SGE-3W3 را پس از برخورد در روش تجربی و حل عددی نمایش می‌دهد. جذب انرژی توسط هسته ابتدا به واسطه تغییر شکل الاستیک، و پس از رسیدن به تنش تسلیم، با تغییر شکل پلاستیک و پس از آن با عبور از تنش واماندگی با جذب انرژی به واسطه ایجاد پارگی در هسته صورت می‌گیرد. در حین عبور پرتابه از هسته، مقداری انرژی از طریق اصطکاک مابین هسته و پرتابه هدر خواهد رفت. همچنین بخشی از انرژی جنبشی پرتابه صرف غلبه بر اتصال مابین هسته و پوسته شده که این انرژی بصورت محلی<sup>1</sup> در اطراف محل تماس قابل مشاهده خواهد بود. همانطور که در شکل 24 نمایش داده شده، پس از برخورد و عبور پرتابه از هسته موجدار، تغییر شکل‌های پلاستیک در اطراف محل برخورد شکل می‌گیرد، این تغییر شکل‌های پلاستیک اغلب باعث جدایش هسته از پوسته کامپوزیتی در محل تغییر شکل پلاستیک خواهد شد.

شکل 25 نشان دهنده ایجاد 4 ترک دقیقاً در محل خم‌شدگی هسته می‌باشد. در اثر برخورد پرتابه با هسته، به علت ایجاد تمرکز تنش در محل‌های دارای خم، ترک‌هایی در این محل‌ها ایجاد شده و در راستای خط خم رشد پیدا خواهند کرد.

همانطور که در شکل 21 و 22 نمایش داده شده است، قرار دادن سیم آلیاژ حافظه‌دار، باعث افزایش حداکثر نیروی تماسی از 12.1KN (GE-0W0) تا 19.1KN (SGE-3W6) شده است. با توجه به اینکه این افزایش در حداکثر نیروی تماسی، همراه با حرکت نقطه اوج به سمت راست نمودار و افزایش زمان تماس از 61.7ms در نمونه بدون سیم به 7.92ms در نمونه 3 سیم با 6 درصد پیش کرنش است می‌توان نتیجه گرفت در اثر قرار دادن سیم آلیاژ حافظه‌دار و همچنین با اعمال پیش کرنش به سیم‌ها، از شوک ضربه کاسته و در نتیجه مقاومت در برابر ضربه افزایش می‌یابد.

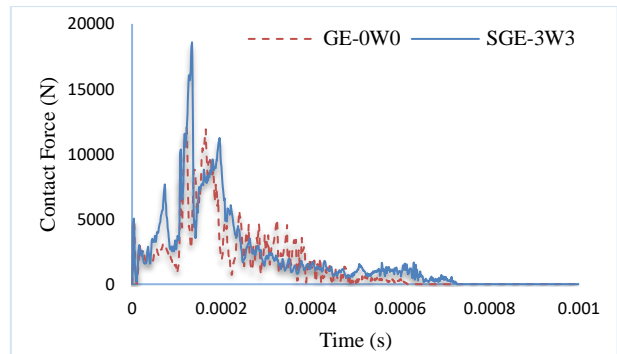


Fig. 21 Contact force-Time diagram for GE-0W0 and SGE-3W3 specimens

شکل 21 نمودار نیروی تماسی - زمان برای نمونه‌های SGE-3W3 و GE-0W0

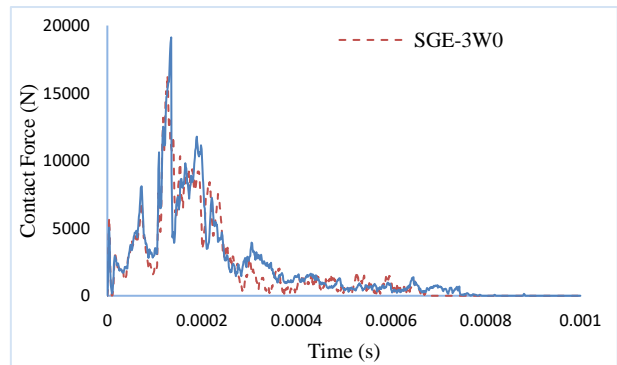


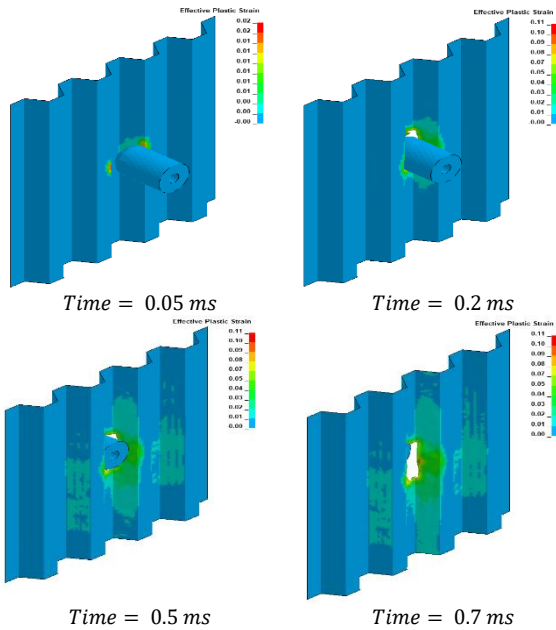
Fig. 22 Contact force-Time diagram for SGE-3W0 and SGE-3W6 specimens

شکل 22 نمودار نیروی تماسی - زمان برای نمونه‌های SGE-3W0 و SGE-3W6

3-8-4- انرژی جذب شده توسط سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار

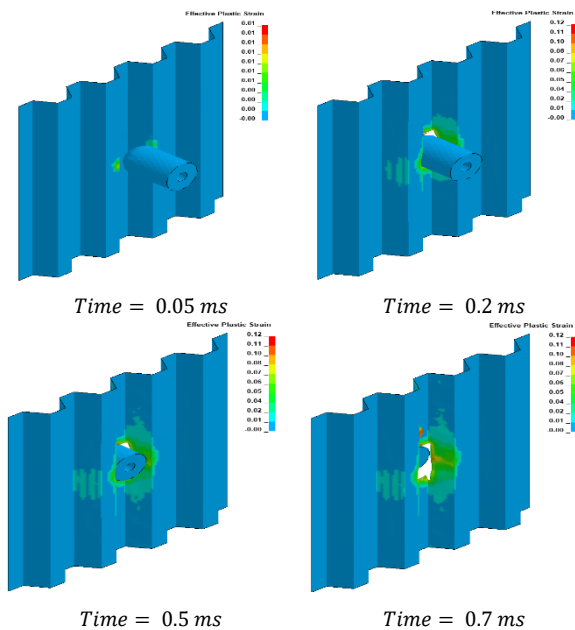
انرژی جذب شده توسط سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار در شکل 23 نمایش داده شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد با افزایش مقدار پیش کرنش، حداکثر انرژی جذب شده توسط سیم‌ها افزایش یافته است. نمودارهای نمایش داده شده دارای 2 نقطه پیک برای هر نمونه می‌باشند، که پیک اول مربوط به میزان انرژی جذب شده توسط سیم‌های قرار گرفته در پوسته جلویی و پیک دوم مربوط به میزان انرژی جذب شده توسط سیم‌های قرار گرفته در پوسته پستی است. در مرحله اول و با برخورد پرتابه به پوسته جلویی، با افزایش پیش کرنش به سیم‌ها، میزان جذب انرژی توسط سیم‌ها به ترتیب 139% و 219% در نمونه‌های دارای 3% و 6% پیش کرنش نسبت به حالت بدون پیش کرنش افزایش یافته است. همچنین در پیک دوم که حاصل از برخورد پرتابه به





**Fig. 27** Perforation of projectile at initial velocity of 119 m/s for GE-0W0 core

شکل 27 نفوذ پرتابه با سرعت 119 m/s در هسته نمونه GE-0W0

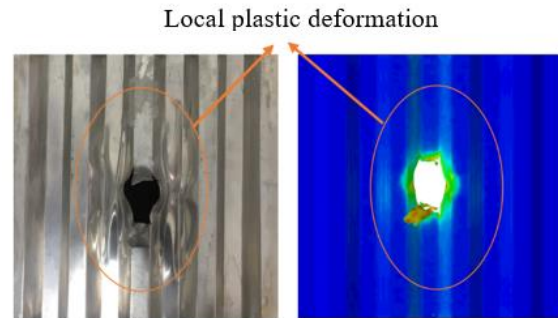


**Fig. 28** Perforation of projectile at initial velocity of 119 m/s for SGE-3W0 core

شکل 28 نفوذ پرتابه با سرعت 119 m/s در هسته نمونه SGE-3W0

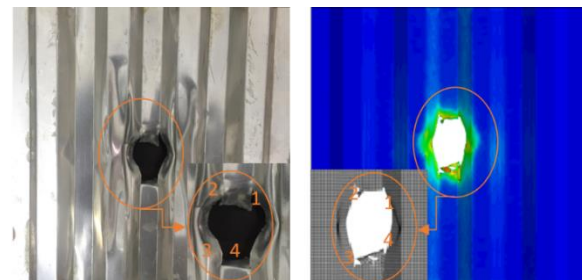
شکل 18 و 19 مقایسه‌ای بین سرعت حد پرتابه و انرژی جذب شده توسط نمونه‌ها از دو روش حل تجربی و حل عددی را نشان می‌دهد. روش تجربی به عنوان مبنای مقایسه انتخاب شده است. همانطور که نتایج ارائه شده نشان می‌دهد، تفاوت بین نتایج بدست آمده از حل تجربی و عددی بسیار اندک است.

بیشترین اختلاف بین نتایج عددی و تجربی در نمونه GE-0W0 و به میزان 3.55% برای سرعت حد پرتابه و 7.5% در میزان انرژی جذب شده توسط سازه بوده است.



**Fig. 24** Plastic deformation in SGE-3W3 core

شکل 24 تغییر شکل پلاستیک در هسته نمونه SGE-3W3



**Fig. 25** Crack growth in SGE-3W3 core

شکل 25 گسترش ترک در هسته نمونه SGE-3W3



**Fig. 26** Core fracture in SGE-3W3 specimen

شکل 26 واماندگی هسته در نمونه SGE-3W3

شکل 26 نحوه واماندگی هسته آلومینیومی پس از خروج پرتابه از سازه را نمایش می‌دهد. همانطور که نشان داده شده است، پس از خروج پرتابه از سازه در راستای موج، هسته پاره شده و دو گلبرگ تشکیل خواهد شد، این گلبرگ‌ها باعث ایجاد و رشد ترک در پوسته‌های کامپوزیتی نیز خواهد بود. مکانیزم واماندگی در هسته تمامی نمونه‌ها مانند یکدیگر می‌باشد. شکل 27 الی 30 تغییر شکل پلاستیک هسته نمونه‌ها را در زمان‌های مختلف نشان می‌دهد.

نتایج ارائه شده در شکل‌های 27 تا 30 نشان می‌دهند که پرتابه ابتدا با جداره موج‌های هسته برخورد دارد و باعث تغییر شکل در جداره‌ها خواهد شد. در این مرحله جذب انرژی توسط سایش و همچنین از طریق ایجاد تغییر شکل پلاستیک در هسته می‌باشد. سپس با برخورد به سطح زیرین هسته باعث پارگی و عبور از هسته می‌گردد. در این مرحله جذب انرژی از طریق ایجاد تغییر شکل پلاستیک و در نهایت پارگی هسته صورت می‌گیرد. در هسته‌های موجدار این مراحل باعث جذب انرژی بیشتری در سازه می‌گردد.

بر رفتار ضربه، نمونه‌هایی با 6 سیم آلیاژ حافظه‌دار با 0٪ و 3٪ و 6٪ پیش کرنش مورد آزمایش قرار گرفتند. به منظور صحت‌سنجی نتایج، مدل المان محدود تمامی نمونه‌های آزمایش شده، در نرم‌افزار LS-Dyna شبیه‌سازی شده و صحت نتایج مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به شرح زیر است:

1. وجود سیم آلیاژ حافظه‌دار بدون پیش کرنش باعث کاهش سرعت باقیمانده پرتابه از  $74 \text{ m/s}$  در نمونه GE-0W0 به  $68 \text{ m/s}$  در نمونه SGE-3W0 می‌شود.

2. اعمال پیش کرنش به سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار باعث کاهش سرعت خروجی پرتابه از سازه و افزایش انرژی جذب شده توسط سازه می‌شود. سرعت خروجی پرتابه از  $68 \text{ m/s}$  در نمونه SGE-3W0 به  $60 \text{ m/s}$  و  $54.9 \text{ m/s}$  به ترتیب در نمونه‌های SGE-3W3 و SGE-3W6 رسیده است.

3. وجود سیم آلیاژ حافظه‌دار بدون پیش کرنش باعث افزایش سطح تخریب در رویه‌های جلویی و پشتی کامپوزیتی می‌شود.

4. اعمال پیش کرنش به سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار باعث افزایش سطح تخریب در رویه جلویی کامپوزیتی و کاهش سطح تخریب در پوسته پشتی کامپوزیتی نمونه‌ها شده است.

#### 6-فهرست علائم

$U_F$	ضرب پوآسون پارچه شیشه
$V_F$	درصد حجمی پارچه شیشه
$U_E$	ضرب پوآسون اپوکسی
$V_E$	درصد حجمی اپوکسی
$V_l$	سرعت حد
$V_i$	سرعت ورودی
$V_o$	سرعت خروجی
$E_{abs}$	انرژی جذب شده
$M_p$	جرم ضربه‌زننده
$E_{kin}$	انرژی جنبشی پایانی
$E_{int}$	انرژی داخلی پایانی
$E_{gi}$	انرژی لغزشی پایانی
$E_{rw}$	انرژی جسم صلب پایانی
$E_{damp}$	انرژی میرایی پایانی
$E_{hg}$	انرژی ساعت شنی
$E_{kin}^0$	انرژی جنبشی اولیه
$E_{in}^0$	انرژی داخلی اولیه
$W_{ext}$	کار نیروهای خارجی
$\varepsilon$	نرخ کرنش
$C$	ضرب ثابت معادله کوپر-سایموند
$P$	ضرب ثابت معادله کوپر-سایموند

#### 7-مراجع

[1] Li, Z., Chen, W., Hao, H., "Numerical Study of Sandwich Panel with a New Bi-Directional Load-Self-Cancelling (Lsc) Core under Blast Loading", Thin-Walled Structures, Vol. 127, pp. 90-101, 2018.

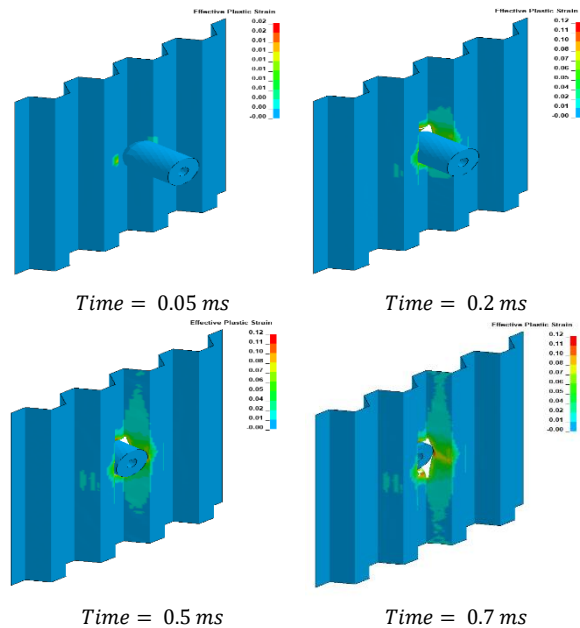


Fig. 29 Perforation of projectile at initial velocity of 119 m/s for SGE-3W3 core

شکل 29 نفوذ پرتابه با سرعت 119 m/s در هسته نمونه SGE-3W3

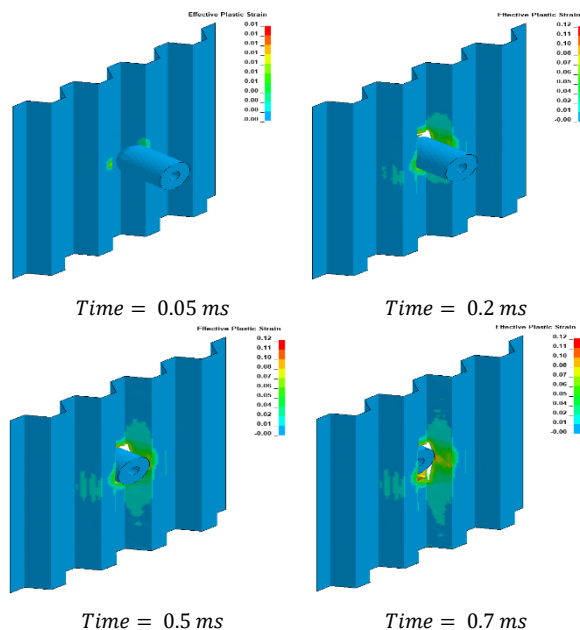


Fig. 30 Perforation of projectile at initial velocity of 119 m/s for SGE-3W6 core

شکل 30 نفوذ پرتابه با سرعت 119 m/s در هسته نمونه SGE-3W6

#### 5-نتیجه‌گیری

در این مطالعه، ضربه سرعت بالا بر روی ساندویچ پنل‌های با هسته موجدار آلومینیومی و پوسته‌های کامپوزیتی تقویت شده با آلیاژ حافظه‌دار سوپر الاستیک، به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفته است. تأثیر حضور سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار و درصد پیش کرنش سیم‌ها بر روی پدیده‌های ضربه مانند سرعت حد، سرعت باقیمانده و انرژی جذب شده توسط سازه ساندویچ پنل به عنوان متغیر مورد بررسی قرار گرفت. به منظور بررسی تأثیر حضور سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار، نمونه بدون سیم، نمونه با 6 سیم آلیاژ حافظه‌دار ساخته و آزمایش شد. برای بررسی تأثیر پیش کرنش در سیم آلیاژ حافظه‌دار

- Laminates" *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 37, No. 5, pp. 300-309, 2018.
- [21] N. Pirmohammadi, G.H. Liaghat, M. Hossein Pol, "Experimental investigation on ballistic behavior of sandwich panels made of honeycomb core", *Moddares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 4, pp. 21-26, 2014 (In Persian).
- [22] Ji G, Li G and Pang S. Novel sandwich panel with metallic millitube grid stiffened polymer core for impact mitigation. *Eng Struct*; Vol. 71, pp. 178-186, 2014.
- [23] Shahbazi, A. and Zeinedini, A., "Impact Response of E-Glass/Epoxy Composite Bi-Directional Corrugated Core Sandwich Panels" *Polymers and Polymer Composites*, Vol. 29, No. 9, pp. 1563-1574, 2021.
- [24] Hassanpoor, F. Liaghat, G. Sabouri, H. Hadavi, H., "Experimental Study of the interaction of surfaces with aluminum honeycomb core in sandwich panels in the quasistatic and dynamic penetration", *In Persian, Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 16, No. 16, pp. 23-31, 2016.
- [25] Hou, S., Zhao, S., Ren, L., Han, X. and Li, Q., "Crashworthiness Optimization of Corrugated Sandwich Panels" *Materials & Design*, Vol. 51, pp. 1071-1084, 2013.
- [26] Wadley, H. N., Børvik, T., Olovsson, L., Wetzel, J. J., Dharmasena, K. P., Hopperstad, O. S., Deshpande, V. and Hutchinson, J. W., "Deformation and Fracture of Impulsively Loaded Sandwich Panels" *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 61, No. 2, pp. 674-699, 2013.
- [27] Kılıçaslan, C., Güden, M., Odacı, İ. K. and Taşdemirci, A., "The Impact Responses and the Finite Element Modeling of Layered Trapezoidal Corrugated Aluminum Core and Aluminum Sheet Interlayer Sandwich Structures" *Materials & Design*, Vol. 46, pp. 121-133, 2013.
- [28] Navard Aluminum MFG Co., Arak Provience, I.R. Iran, <https://www.navardaluconam.com>, (accessed Feb. 24, 2020).
- [29] Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, Annual Book of ASTM Standard, 15.03, D 3039, 2014.
- [30] Standard AS. D6641-09, 2009 "Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials Using a Combined Loading Compression (CLC) Test Fixture". West Conshohocken, PA, 2008, DOI: 10.1520/D6641-09.
- [31] Standard AS. D5379-05, 2005 "Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method". West Conshohocken, PA, 2005, DOI: 10.1520/D5379-05.
- [32] Sudheer, M., Pradyoth, K. and Somayaji, S., "Analytical and Numerical Validation of Epoxy/Glass Structural Composites for Elastic Models" *American Journal of Materials Science*, Vol. 5, No. 3C, pp. 162-168, 2015.
- [33] Lagoudas, Dimitris C., ed. *Shape memory alloys: modeling and engineering applications*. Springer Science & Business Media, 2008.
- [34] Chang, F.-K. and Chang, K.-Y., "Post-Failure Analysis of Bolted Composite Joints in Tension or Shear-out Mode Failure" *Journal of Composite Materials*, Vol. 21, No. 9, pp. 809-833, 1987.
- [35] Chang, F.-K. and Chang, K.-Y., "A Progressive Damage Model for Laminated Composites Containing Stress Concentrations" *Journal of composite materials*, Vol. 21, No. 9, pp. 834-855, 1987.
- [36] Auricchio, F. and Taylor, R. L., "Shape-Memory Alloys: Modelling and Numerical Simulations of the Finite-Strain Superelastic Behavior" *Computer methods in applied mechanics and engineering*, Vol. 143, No. 1-2, pp. 175-194, 1997.
- [37] Reis, J., Coelho, J., Monteiro, A. and da Costa Mattos, H., "Tensile Behavior of Glass/Epoxy Laminates at Varying Strain Rates and Temperatures" *Composites Part B: Engineering*, Vol. 43, No. 4, pp. 2041-2046, 2012.
- [38] Armenakas, A. and Sciammarella, C., "Response of Glass-Fiber-Reinforced Epoxy Specimens to High Rates of Tensile Loading" *Experimental Mechanics*, Vol. 13, No. 10, pp. 433-440, 1973.
- [39] Spranghers, K., Kakogiannis, D., Ndambi, J., Lecompte, D. and Sol, H., "Deformation Measurements of Blast Loaded Plates Using
- [2] Jing, L. and Zhao, L., "Blast Resistance and Energy Absorption of Sandwich Panels with Layered Gradient Metallic Foam Cores" *Journal of Sandwich Structures & Materials*, Vol. 21, No. 2, pp. 464-482, 2019.
- [3] Wang, Z., "Recent Advances in Novel Metallic Honeycomb Structure" *Composites Part B: Engineering*, Vol. 166, pp. 731-741, 2019.
- [4] Ivañez, I., Santiuste, C., Barbero, E. and Sanchez-Saez, S., "Numerical Modelling of Foam-Cored Sandwich Plates under High-Velocity Impact" *Composite structures*, Vol. 93, No. 9, pp. 2392-2399, 2011.
- [5] Dayyani, I., Ziaei-Rad, S. and Friswell, M. I., "The Mechanical Behavior of Composite Corrugated Core Coated with Elastomer for Morphing Skins" *Journal of Composite Materials*, Vol. 48, No. 13, pp. 1623-1636, 2014.
- [6] Ansari, M., Golzar, M. and Behraves, A. H., "Evaluation of Corrugated Composite Beam Deflection by Shape Memory Alloy Wire" *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 8, 2014.
- [7] Kumar, P. A. and Rathakrishnan, E., "Corrugated Triangular Tabs for Supersonic Jet Control" *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 228, No. 6, pp. 831-845, 2014.
- [8] Katzman, H. A., Castaneda, R. M. and Lee, H. S., "Moisture Diffusion in Composite Sandwich Structures" *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 39, No. 5, pp. 887-892, 2008.
- [9] Buehler, W.J.; Wiley, R.C. *Nickel-Based Alloys*. U.S. Patent 3,174,851, 23 March 1965.
- [10] Taha OM, Bahrom MB, Taha OY, Aris MS. Experimental study on two way shape memory effect training procedure for nitinol shape memory alloy. *ARPN J. Eng. Appl. Sci.*; Vol. 10, No. 17, pp. 7847-51, 2015.
- [11] Sun, M., Wang, Z., Yang, B. and Sun, X., "Experimental Investigation of Gf/Epoxy Laminates with Different Smas Positions Subjected to Low-Velocity Impact" *Composite Structures*, Vol. 171, pp. 170-184, 2017.
- [12] Shariyat, M. and Hosseini, S., "Accurate Eccentric Impact Analysis of the Preloaded Sma Composite Plates, Based on a Novel Mixed-Order Hyperbolic Global-Local Theory" *Composite Structures*, Vol. 124, pp. 140-151, 2015.
- [13] Baker, A., Jones, R. and Callinan, R., "Damage Tolerance of Graphite/Epoxy Composites" *Composite Structures*, Vol. 4, No. 1, pp. 15-44, 1985.
- [14] Hazell, P. J. and Appleby-Thomas, G. J., "The Impact of Structural Composite Materials. Part 1: Ballistic Impact" *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, Vol. 47, No. 7, pp. 396-405, 2012.
- [15] Appleby-Thomas, G. J. and Hazell, P. J., "The Impact of Structural Composite Materials. Part 2: Hypervelocity Impact and Shock" *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, Vol. 47, No. 7, pp. 406-418, 2012.
- [16] Khodadadi, A., Liaghat, G., Ahmadi, H., Bahramian, A. R., shahgholian, D., Anani, Y. and Asemani, s., "Experimental and Numerical Analysis of High Velocity Impact on Kevlar/Epoxy Composite Plates" *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 6, No. 2, pp. 265-274, 2019 (In Persian).
- [17] Pernas-Sánchez, J., Artero-Guerrero, J. A., Varas, D. and López-Puente, J., "Experimental Analysis of Normal and Oblique High Velocity Impacts on Carbon/Epoxy Tape Laminates" *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 60, pp. 24-31, 2014.
- [18] Ahmadi, M., Khalili, SMR. And Eslami Faresani, R., "Investigation on Projectile Nose and Impact Angle Effects in High Velocity Impact on 4ply Glass/Carbon Laminates" *Journal of Energetic Materials*, Vol. 6, No. 2, 2012. (In Persian).
- [19] Verma, L., Sivakumar, S. M., Andrew, J. J., Balaganesan, G., Arockirajan, A. and Vedantam, S., "Compression after Ballistic Impact Response of Pseudoelastic Shape Memory Alloy Embedded Hybrid Unsymmetrical Patch Repaired Glass-Fiber Reinforced Polymer Composites" *Journal of Composite Materials*, Vol. 53, No. 28-30, pp. 4225-4247, 2019.
- [20] Eslami-Farsani, R. and Khazaie, M., "Effect of Shape Memory Alloy Wires on High-Velocity Impact Response of Basalt Fiber Metal

Digital Image Correlation and High-Speed Photography“in Proceeding of EDP Sciences, pp. 12006.

[40] Gur, S., Mishra, S. K. and Frantziskonis, G. N., “Thermo-Mechanical Strain Rate-Dependent Behavior of Shape Memory Alloys as Vibration Dampers and Comparison to Conventional Dampers“ Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 27, No. 9, pp. 1250-1264, 2016.

[41] Adharapurapu, R. R., Jiang, F., Vecchio, K. S. and Gray III, G. T., “Response of Niti Shape Memory Alloy at High Strain Rate: A Systematic Investigation of Temperature Effects on Tension-Compression Asymmetry“ Acta materialia, Vol. 54, No. 17, pp. 4609-4620, 2006.

[42] 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.

[43] H. Zhao, I. Elnasri, Y. Girard, Perforation of aluminum foam core sandwich panels under impact loading-An experimental study, International Journal of Impact Engineering, Vol. 34, No. 7, pp. 1246-1257, 2007.

[44] Hamid, I. A., Kamarudin, K., Osman, M., Abidin, A. Z., Zulkipli, Z., Jawi, Z. M., Isa, M. M., Solah, M., Hamzah, A. and Ariffin, A., “Finite Element Bus Rollover Test Verification“ Journal of the Society of Automotive Engineers Malaysia, Vol. 3, No. 4, 2019.