



## مطالعه اثر جنس و ضخامت لایه میانی بر جذب انرژی شبه استاتیکی ورق‌های فلزی الیافی

الهام انصاری<sup>1</sup>، غلامحسین مجذوبی<sup>2\*</sup>، کاوه رحمانی<sup>3</sup>، محمد کشفی<sup>3</sup>

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد تاکستان، تاکستان

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

3- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

\* همدان، صندوق پستی 651754161، basu.ac.ir، gh\_majzoobi@basu.ac.ir

## اطلاعات مقاله

دریافت: 96/7/12

پذیرش: 96/9/27

## کلیدواژگان:

ورق فلزی الیافی

جذب انرژی

شبیه‌سازی عددی

مواد مرکب

## چکیده

در این تحقیق، اثر جنس و ضخامت لایه میانی بر جذب انرژی ورق‌های فلزی الیافی (FML) با مقطع مربعی تحت بار محوری شبه استاتیکی به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفته است. چهار لایه میانی شیشه-اپکسی، کربن-اپکسی، فوم پلی‌یورتان و آلومینیوم 2024 برای ساخت نمونه‌ها در نظر گرفته شد. در حالی که لایه‌های درونی و بیرونی تمامی نمونه‌ها، آلومینیوم 2024 انتخاب شده است. نمونه‌ها با استفاده از دستگاه پرس با جابجایی و سرعت یکسان فشرده شدند و ویژگی جذب انرژی آن‌ها شامل نیروی بیشینه، نیروی متوسط لهدیگی، انرژی جذب شده و تعداد چین‌خوردگی هر مورد مطالعه و مقایسه شد. سپس، شبیه‌سازی عددی بر روی نمونه‌ها انجام و مدل عددی به وسیله آزمایش‌های صورت گرفته اعتبار سنجی شد. حال، به وسیله مدل عددی اعتبار سنجی شده، اثر تغییر ضخامت لایه میانی برای یافتن ضخامت بهینه، مطالعه شد. نتایج پژوهش نشان داد که نمونه ساخته شده با لایه میانی الیاف کربن، بیشترین میزان جذب انرژی و نیروی متوسط را دارا می‌باشد. همچنین، نمونه با لایه میانی فوم کمترین بازدهی را از خود نشان داد. سرانجام با تغییر ضخامت لایه میانی نتیجه شد که بهترین عملکرد مربوط به نمونه‌های است که ضخامت هر سه لایه تشکیل‌دهنده آن با هم برابر هستند.

## The effect of middle layer material and thickness on the quasi-static energy absorption of FML

Elham Ansari<sup>1</sup>, Gholamhossein Majzoobi<sup>2\*</sup>, Kaveh Rahmani<sup>2</sup>, Mohammad Kashfi<sup>2</sup>

1- Mechanical Engineering Department, Islamic University of Takestan, Takestan, Iran.

2- Mechanical Engineering Department, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

\* P.O.B. 651754161, Hamedan, Iran, gh\_majzoobi@basu.ac.ir

## Keywords

Fiber metal laminates  
Energy absorption  
Numerical simulation  
Composite materials

## Abstract

In the present study the effect of change in thickness and material of the middle layer in fiber metal laminates (FMLs) with squared section on the energy absorption is investigated. In this work four types of specimens, based on the change in the material of the middle layer, were produced. In order to fabricate FML samples, Glass-epoxy, Carbon-epoxy, polyurethane foam and aluminum 2024 were utilized as the middle layer and aluminum 2024 for inner and outer layers, respectively. The specimens were then subjected to the compression test and their force-displacement curves were experimentally obtained. Additionally, the effect of the middle layer thickness on the energy absorption performance was studied by numerical simulation using Ls-Dyna explicit code. The numerical model was initially validated by experiment. In conclusion, it was found that the maximum and minimum efficiency were determined for the FML specimen made of Carbon-epoxy and foam, respectively. Moreover, by changing the middle layer thickness, it was numerically demonstrated that the specimen with three layers of the same thickness yields the best absorption energy capability.

## 1-مقدمه

مهم در طراحی این پروفیل‌ها می‌باشند [2]. از طرفی سبک‌سازی خودرو جهت کاهش مصرف انرژی اهمیت بسزایی دارد؛ بنابراین در ساخت این پروفیل‌ها می‌توان از مواد ترکیبی مانند ورق‌های فلزی الیافی<sup>1</sup> استفاده نمود. خواص این مواد ترکیبی از خواص لایه فلزی و ماده مرکب است، پس می‌توانند با توجه به استحکام بالا قابلیت جذب انرژی در سازه را افزایش دهند [3-5]. ورق‌های فلزی الیافی از لایه‌های فلز و ماده مرکب تقویت‌شده با الیاف ساخته شده‌اند. خواص مکانیکی مطلوب این مواد منجر شده است تا در ساخت قطعاتی که باید در شرایط محیطی با اختلاف دمای زیاد از جمله

یکی از مسائلی که امروزه بیش‌ازپیش موردتوجه طراحان قرار گرفته، افزایش ایمنی وسایل و ابزارها به‌خصوص وسایل حمل‌ونقل است که مهم‌ترین هدف آن کاهش صدمات جانی و مادی در تصادف‌ها می‌باشد. اهمیت بالای موضوع حفاظت از افراد و تجهیزات، باعث گردیده است که همواره، محققین به دنبال یافتن راهی برای افزایش مقاومت سازه‌ها و تجهیزات، در برابر خطرات ناشی از خرابی‌های مختلف باشند [1]. برای افزایش ایمنی سرنشینان خودرو در تصادفات جانبی، پروفیل‌های مختلف به‌عنوان ضربه‌گیر در درب‌های خودرو مورد استفاده قرار می‌گیرند. استحکام و قابلیت جذب انرژی بالا از پارامترهای

<sup>1</sup> Fiber Metal Laminates (FML)

## Please cite this article using:

Ansari, E. Majzoobi, G. Rahmani, K. and Kashfi, M., "The effect of middle layer material and thickness on the quasi-static energy absorption of FML", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 3, pp. 427-436, 2018.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

همگی دارای مقطع مربعی هستند، تشکیل شده است. نمایی از ابعاد، هندسه و ساختار نمونه‌های مورد استفاده در این کار در شکل 1 نشان داده شده است. در تمامی نمونه‌ها، ضخامت و جنس لایه‌های بیرونی و درونی ثابت بوده و تنها لایه میانی تغییر خواهد کرد. برای ساخت لایه‌های درونی و بیرونی نمونه‌ها، آلومینیوم 2024 با ضخامت 0.8 میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفت. با تغییر جنس لایه میانی چهار دسته نمونه مختلف تولید شد که برای سهولت بر اساس جنس لایه میانی کدگذاری شدند. کدهای به کاررفته برای هر کدام از نمونه‌ها در جدول 1 آمده است.

برای تولید نمونه‌ها، لایه درونی با استفاده از برش، خم‌کاری و جوشکاری ورق آلومینیوم تحت دمای کنترل‌شده تهیه شد. سپس، لایه میانی با توجه به نوع آن بر روی لایه درونی قرار گرفت. در نهایت، لایه بیرونی نمونه‌ها مشابه لایه درونی بر روی لایه میانی چسبانده شد. سپس، نمونه‌ها برای پخت رزین مورد استفاده به مدت 8 ساعت در دمای 80 درجه سلسیوس در کوره قرار گرفتند تا اپکسی خشک شده و به خواص بهینه مکانیکی خود برسد. شکل 2 نمونه ساخته‌شده قبل از عملیات سنگ‌زنی و پرداخت، را نشان داده شده است.

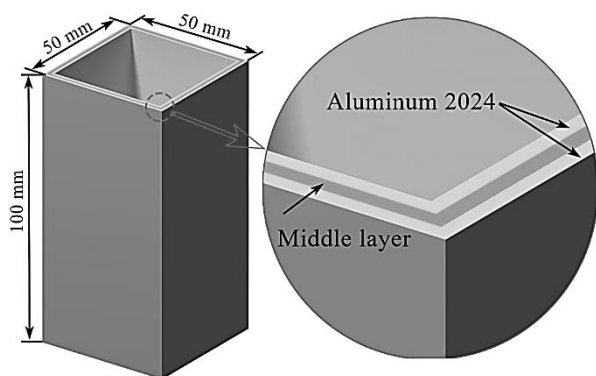


Fig. 1 Dimensions and layer configuration of FML specimen

شکل 1 نمایی از ابعاد نمونه‌های فلزی الیافی تولیدی جهت آزمایش جذب انرژی و ترتیب لایه‌ها

جدول 1 کدگذاری نمونه‌ها بر اساس جنس لایه میانی

کد	چیدمان لایه‌ها در نمونه‌ها
FML, C	آلومینیوم/ماده مرکب کربن اپکسی/آلومینیوم
FML, G	آلومینیوم/ماده مرکب شیشه اپکسی/آلومینیوم
Al, Al	آلومینیوم/آلومینیوم/آلومینیوم
Al, F	آلومینیوم/فوم پلی یورتان/آلومینیوم

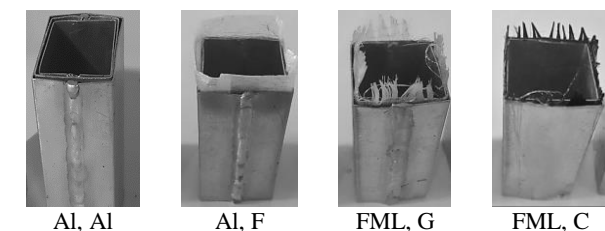


Fig. 2 Prepared specimens for experiment

شکل 2 نمونه‌های تولید شده جهت انجام آزمایش‌ها

صنایع هوافضا و مخازن تحت فشار چندلایه‌ای استفاده شوند، کاربرد وسیعی داشته باشند [6]. سازه‌های جدار نازک، به دلیل نسبت استحکام به وزن بالا، قابلیت جذب انرژی بالایی نیز دارند به همین دلیل استفاده از آن‌ها در صنایع خودروسازی و هوافضا بسیار مورد توجه است [7، 8]. ضربه‌گیرهای مکانیکی انرژی جنبشی را توسط انجام کار پلاستیک جذب کرده و مانع از آسیب رسیدن به سایر قطعات مهم و ضروری دستگاه مدنظر خواهند بود [9]. اکثر جاذب‌های انرژی مکانیکی یک‌بار مصرف بوده و به‌عنوان عضو فدا شونده در سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. بنابراین، الزام طراحی برای چنین جاذب‌هایی معمولاً دستیابی به جذب انرژی حداکثر در عین سبک بودن است [10]. در میان طراحی‌های مختلف فرآیند لهیدگی محوری معمولاً شامل سه مرحله می‌باشد، اول نیروی لهیدگی به بیشینه اولیه می‌رسد تا بر مقاومت اولیه جاذب غلبه کند، دوم به دلیل پیشرفت لهیدگی، نیرو کاهش و نوسان پیدا می‌کند و سوم نیرو به سرعت افزایش یافته و قسمت‌های له‌شده را افزایش داده تا به پایان لهیدگی برسد [11]. تاجداری و همکاران [12] به بررسی کمناش حاصل از لهیدگی محوری در پوسته جدار نازک با مقطع دایروی پرداختند و با استفاده از نرم‌افزار آباکوس توانستند حالت‌های مختلف ارتعاشی در حین لهیدگی را شبیه‌سازی کنند. پیرمحمد و همکاران [13] به بررسی عددی و تجربی رفتار لهیدگی لوله‌های جدار نازک تقویت‌شده با ورق‌های درونی تحت بارگذاری دینامیکی پرداختند. نامبردگان دریافتند که میزان جذب انرژی لوله دوجداره هشت‌ضلعی با تعداد چهار تقویتی به‌عنوان حالت بهینه در مجموع می‌باشد. دامغانی نوری و همکاران [14] به بررسی استوانه‌های مشبک تحت بارگذاری ضربه‌ای محوری پرداختند. محققین بارگذاری‌های خود را به صورت ضربه‌ای و با دستگاه وزنه سقوطی بررسی نموده و دریافتند که جاذب‌هایی با زاویه سلول صفر درجه دارای فروریزش متقارن بوده و ظرفیت جذب بالاتری نسبت به حالت‌های دیگر از خود نشان می‌دهند. آذرافزا و همکاران [15] به بررسی حالت‌های مختلف واماندگی در پانل‌های ساندویچی پرداختند. نامبردگان دریافتند که تغییر جنس از شیشه به کربن مؤثرتر از افزایش ضخامت لایه میانی است. خسروی و همکاران [16] به بررسی رفتار سازه‌های مشبک کامپوزیتی تقویت شده با ذرات نانو پرداختند و دریافتند که با افزایش سه درصد نانوذره، بیست‌وپنج درصد افزایش در خاصیت جذب انرژی مشاهده می‌شود. توسلی و همکاران [3] میزان جذب انرژی ضربه‌گیرهای کامپوزیتی کلاهی شکل تحت نیروی عرضی را به صورت عددی و تجربی مورد بررسی قرار دادند. نامبردگان با ارائه مدلی توانستند رفتار جاذب‌های مذکور را با دقت بالایی نسبت به نتایج آزمایشگاهی، پیش‌بینی نمایند.

در این پژوهش با استفاده از روش اجزاء محدود و نتایج آزمایشگاهی اثر ضخامت و ماده لایه میانی نمونه‌های فلزی الیافی بر میزان جذب انرژی مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای بررسی جامعیت، چهار نوع نمونه با لایه میانی کربن-اپکسی، شیشه-اپکسی، فوم پلی‌یورتان<sup>1</sup> و آلومینیوم 2024 تهیه و آزمایش می‌شوند. بعد از اعتبارسنجی مدل اجزاء محدود با استفاده از نتایج آزمایشگاهی، ضخامت لایه میانی به‌گونه‌ای محاسبه می‌شود که بیشترین میزان جذب انرژی حاصل گردد.

## 2- مواد و آزمایش‌ها

نمونه‌های فلزی الیافی مورد آزمایش از سه لایه درونی، میانی و بیرونی که

<sup>1</sup> Polyurethane Foam

جدول 2 خواص مکانیکی آلومینیوم 2024 مستخرج از آزمایش کشش

Table 2 Mechanical properties of Al 2024 determined by experiment

مقدار	نماد	خواص مکانیکی
73.04	$E$	ضریب الاستیسیته (GPa)
0.34	$\nu$	نسبت پواسان
95.5	$S_y$	تنش تسلیم (MPa)
172	$S_{ult}$	تنش نهایی (MPa)

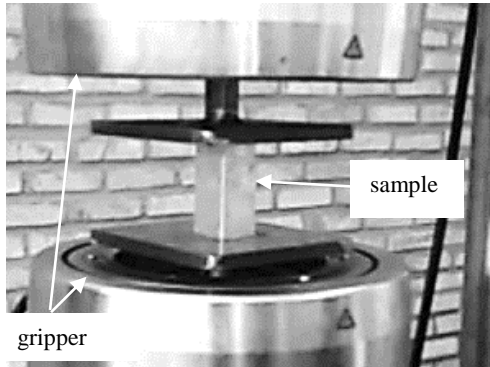


Fig. 5 Instron machine and the configuration of specimen and grippers  
شکل 5 نمایی از دستگاه اینسترون جهت انجام آزمایش شبه استاتیکی و محل قرارگیری نمونه در بین فک‌ها

### 3-مدل‌سازی اجزاء محدود

شبه‌سازی عددی برای بررسی رفتار مکانیکی نمونه‌ها توسط نرم‌افزار LS-DYNA صورت گرفت. مدل‌سازی نمونه‌ها به صورت سه بعدی و شرایط مرزی کاملاً مطابق با شرایط آزمایش در نظر گرفته شده است. مدل اجزاء محدود نمونه‌ها همانند نمونه آزمایشگاهی از سه لایه تشکیل شده است. برای شبکه‌بندی لایه‌ها از المان‌های shell استفاده شده است. برای لایه‌های درونی و بیرونی آلومینیوم 2024 با ضخامت 0.8 میلی‌متر و لایه میانی بر اساس کد نمونه مورد نظر، از ماده مرکب شیشه-پوکسی، کربن-پوکسی، فوم پلی‌یورتان و آلومینیوم 2024 استفاده شده است.

ضخامت لایه میانی برای تمامی کدها برابر 0.8 میلی‌متر فرض شده است. پس از اعتبار سنجی مدل عددی، شبه‌سازی‌های دیگری با ضخامت‌ها مختلف لایه میانی به منظور بررسی رفتار جذب انرژی، نیز انجام شده است. به جهت تخصیص مدل ماده مربوط به مواد مرکب الیافی از مدل ماده شماره 54<sup>2</sup> و برای لایه فوم از مدل ماده شماره 57<sup>3</sup> در نرم‌افزار استفاده شده است [18, 19]. خواص مکانیکی لایه آلومینیومی و لایه‌های میانی به ترتیب بر اساس جدول 2 و مقادیر موجود در مراجع با توجه به درصد کسر حجمی الیاف به کاررفته، به عنوان ورودی به نرم‌افزار داده شدند [20-24].

هندسه مدل اجزاء محدود ایجاد شده شامل یک مقطع مربع جدار نازک سه لایه و دو جسم صلب (به عنوان فک‌های دستگاه) در دو انتهای آن است. فک بالایی در تمام جهات مقید شده است در حالی که فک پایینی تنها می‌تواند در راستای محوری جابجا شود. مطابق با شرایط آزمایش، بارگذاری با سرعت 20 میلی‌متر بر دقیقه با اعمال جابجایی از طریق فک پایین به نمونه اعمال می‌شود.

### 1-2-محاسبه خواص مکانیکی آلومینیوم 2024 به وسیله آزمایش کشش

نمونه‌های ورق آلومینیوم 2024 با استفاده از دستگاه برش وایرکات با دقت 0.05 میلی‌متر آماده شدند. سپس، آزمایش کشش برای محاسبه خواص مکانیکی آن طبق استاندارد ASTM E8M [17] انجام شد. شکل 3 ابعاد نمونه کشش ساخته شده از ورق آلومینیوم را نشان می‌دهد. آزمایش کشش مذکور به وسیله دستگاه کشش اینسترون<sup>1</sup> و با سرعت فک 1.52 میلی‌متر در دقیقه انجام شد. شکل 4 نمودار تنش-کرنش حقیقی آلومینیوم 2024 را نشان می‌دهد و خواص مکانیکی آن در جدول 2 آورده شده است.

### 2-2-آزمایش لهیدگی

به منظور بررسی اثر جنس لایه میانی بر نیروی متوسط لهیدگی، بیشینه نیرو، انرژی جذب شده بر واحد جرم و نوع چین‌خوردگی نمونه‌ها، آزمایش فشار شبه استاتیکی بر روی نمونه‌های انجام می‌شود. این آزمایش به دلیل ایجاد تغییر شکل‌های پلاستیک در نمونه که منجر به چین‌خوردگی‌های متعدد در آن می‌شود، تحت عنوان آزمایش لهیدگی نیز شناخته می‌شود. بارگذاری نمونه‌ها به صورت شبه استاتیکی و با سرعت 20 میلی‌متر بر دقیقه و توسط دستگاه اینسترون با ظرفیت 60 تن انجام می‌شود. فک بالا دستگاه ثابت و فک پایین با حرکت به سمت بالا، نمونه‌ها را فشرده می‌کند. دستگاه مذکور و همچنین، نحوه قرارگیری نمونه در بین فک‌های آن در شکل 5 نشان داده شده است.

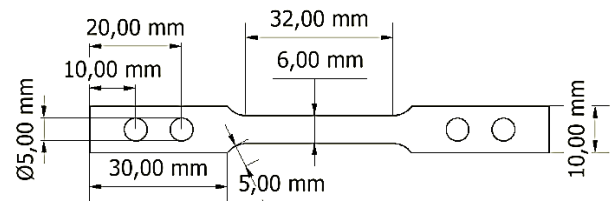


Fig. 3 Dimensions of aluminum quasi-static tensile test specimen

شکل 3 ابعاد نمونه آزمایش کشش شبه استاتیکی لایه آلومینیومی

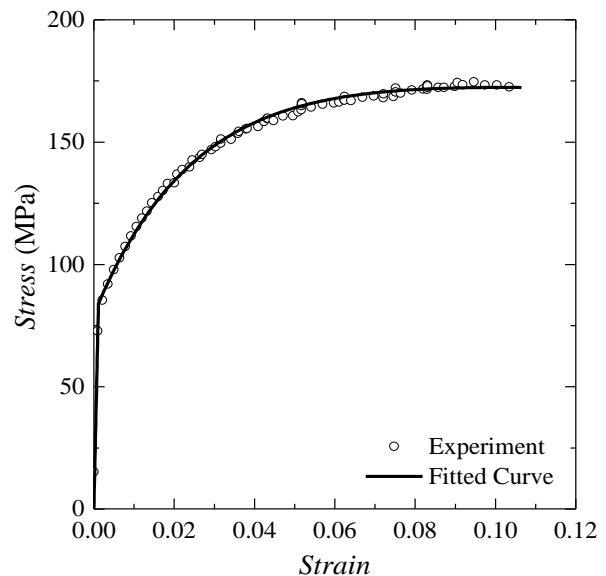


Fig. 4 True stress-strain curve of Al 2024 obtained from tensile test

شکل 4 منحنی تنش-کرنش حقیقی آزمایش کشش شبه استاتیکی برای آلومینیوم 2024

<sup>2</sup> Enhanced-Composite-Fabric

<sup>3</sup> Crushable-Foam

<sup>1</sup> Instron

## 4-1- نتایج و اعتبار سنجی مدل اجزاء محدود

به منظور بررسی صحت مدل اجزاء محدود، نتایج آن با استفاده از نتایج تجربی موجود اعتبار سنجی می‌شود. جهت مقایسه، شکل چین خوردگی نمونه میزان جذب انرژی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

شکل 8 نحوه چین خوردگی نمونه‌ها را تحت نیروی فشاری محوری، نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود شبیه‌سازی به خوبی توانسته است رفتار نمونه‌های مختلف را پیش‌بینی کرده و چین خوردگی هر کدام را به نحو مطلوبی مدل‌سازی نماید.

بیشترین تراکم چین خوردگی مربوط به Al, F می‌باشد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، چین‌های Al, F نسبت به دیگر نمونه‌ها، متراکم‌تر هستند. در حالی که، کمترین تراکم چین خوردگی مربوط به FML, C می‌باشد.

شکل و تعداد چین خوردگی‌های تجربی و پیش‌بینی شده به وسیله شبیه‌سازی در شکل 9 مقایسه شده است. همان‌گونه که شکل نشان می‌دهد، تطابق بالایی از لحاظ هندسه و تعداد چین خوردگی‌ها بین نمونه‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی مشاهده می‌شود. علی‌رغم وجود درز جوش در نمونه‌های آزمایشگاهی، تغییر شکل پیش‌بینی شده با استفاده از روش عددی به خوبی با نتایج آزمایشگاهی مطابقت دارد. همچنین، یکی از معیارهای مهم در اعتبار سنجی مدل اجزاء محدود تعداد چین خوردگی‌ها در هر آزمایش است که مدل عددی با دقت بالایی از این لحاظ، توانسته نتایجی نزدیک به آزمایش را پیش‌بینی نماید.

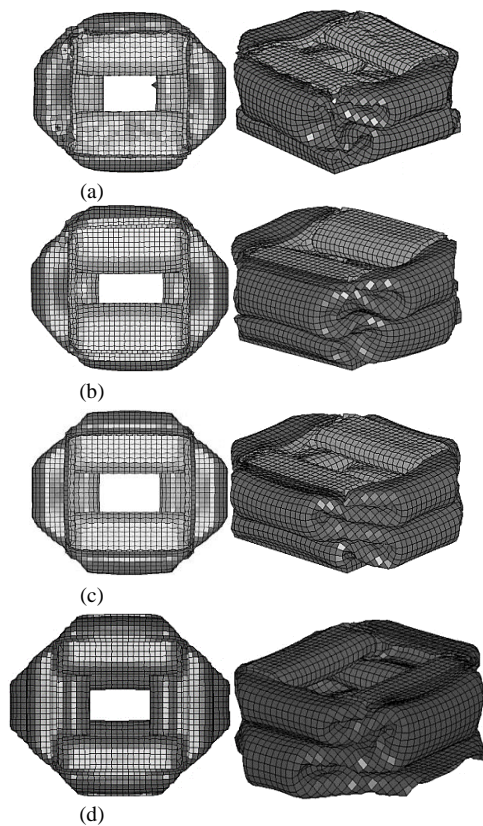


Fig. 8 Numerical prediction of deformed specimen (a) FML, C, (b) FML, G, (c) Al, F and (d) Al, Al

شکل 8 نحوه چین خوردگی‌های نمونه‌ها بعد از شبیه‌سازی انجام گرفته

Al, Al (d) و Al, F (c). FML, G (b). FML, C (a)

نوع تماس بین تمامی لایه‌ها و همچنین، فک‌های دستگاه از نوع تماس خودکار سطح به سطح<sup>1</sup> انتخاب شده است. برای یافتن اندازه بهینه المان‌ها، شبیه‌سازی‌های متعددی با اندازه‌های مختلف المان تکرار شد و اثر اندازه المان بر انرژی جذب شده بررسی گردید. در نهایت تعداد المان‌های بهینه برابر 3744 در نظر گرفته شد. مدل اجزاء محدود و شبکه‌بندی آن در شکل 6 نشان داده است.

## 4- بحث و نتایج

نتایج تجربی نشان داد که با افزایش نیرو، چین خوردگی در ابتدا در نزدیکی فک ثابت دستگاه شکل گرفته، سپس در طول نمونه پیشروی می‌کند. الگوی لهیدگی و همچنین چین خوردگی‌ها به دلیل تغییر جنس لایه میانی از لحاظ ظاهری نیز تفاوت‌هایی دارد. در شکل 7 نحوه چین خوردگی و لهیدگی نمونه‌ها با کدهای مختلف نشان داده شده است. همان‌گونه که شکل نشان می‌دهد، به دلیل تغییر لایه میانی نمونه‌ها، چین خوردگی‌های به وجود آمده متفاوت هستند. منظم‌ترین چین خوردگی‌ها مربوط به نمونه با لایه میانی آلومینیوم است در حالی که عدم تقارن در دیگر نمونه‌ها قابل مشاهده است. زیرا در نمونه‌هایی که لایه میانی در آن‌ها ماده مرکب است احتمال تغییر ضخامت لایه میانی به دلیل برخی مشکلات ساخت وجود دارد که می‌تواند تقارن چین خوردگی‌ها را تحت شعاع قرار دهد.

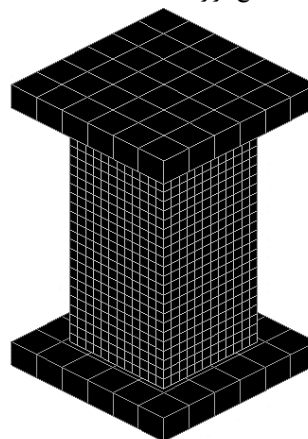
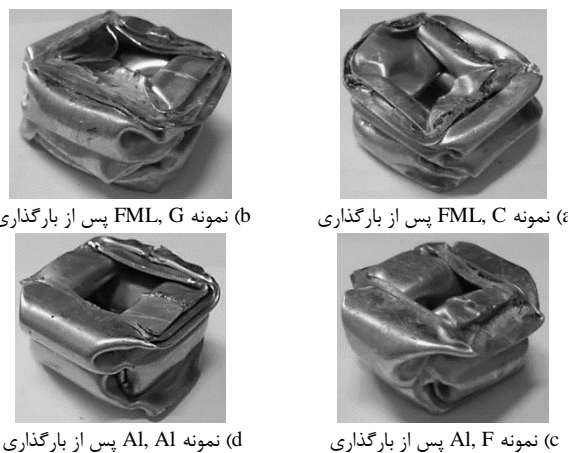


Fig. 6 FE model of compression test

شکل 6 نمایشی از مدل اجزاء محدود آزمایش جذب انرژی استاتیکی



(b) نمونه FML, G پس از بارگذاری

(a) نمونه FML, C پس از بارگذاری

(d) نمونه Al, Al پس از بارگذاری

(c) نمونه Al, F پس از بارگذاری

Fig. 7 Deformed specimen after quasi-static compression test

شکل 7 نحوه تغییر شکل نمونه‌ها پس از آزمایش شبیه استاتیکی

<sup>1</sup> Automatic surface to surface

به‌منظور بررسی قابلیت جذب انرژی هر کدام از کدها، مقدار بیشینه نیرو و همچنین، نیروی متوسط برای هر آزمایش به‌طور جداگانه محاسبه و با یکدیگر مقایسه شده است. نیروی متوسط لهیدگی، از رابطه (1) محاسبه می‌شود [27].

$$F_{mean} = \frac{\int_0^{\delta_{max}} F d\delta}{\delta_{max}} \quad (1)$$

در رابطه اخیر  $F$  مقدار نیروی لهیدگی و  $\delta$  جابجایی متناظر با نیروی اعمالی است. نسبت نیروی متوسط لهیدگی به مقدار نیروی اولیه بیشینه توسط پارامتری به نام  $CFE^1$  یا درصد بازدهی نیروی لهشدهگی تعریف می‌شود. به‌عبارت‌دیگر، هر چه این درصد به 100 نزدیک‌تر باشد نشان از آن دارد که نیروی لهیدگی یکنواخت و نزدیک به نیروی بیشینه است. رابطه (2) درصد بازدهی نیروی لهیدگی را نشان می‌دهد.

کمیت‌هایی مانند نیروی اولیه بیشینه و نیروی متوسط کمیت‌هایی هستند که در طراحی یک جاذب انرژی مکانیکی مهم بوده و میزان کارایی آن را نشان می‌دهند. از سوی دیگر، جرم نمونه نیز یک عامل محدودکننده در طراحی جاذب‌های انرژی است. رابطه مهم دیگری که می‌توان به‌وسیله آن میزان جذب انرژی یک نمونه را با دیگر نمونه‌ها مقایسه نمود، انرژی جذب‌شده بر واحد جرم ( $SEA^2$ ) می‌باشد که نحوه محاسبه آن در رابطه (3) نشان داده‌شده است [28].

$$CFE = \frac{F_{mean}}{F_{max}} \quad (2)$$

$$SEA = \frac{E_a}{m} \quad (3)$$

در روابط فوق  $F_{mean}$ ، نیروی متوسط لهیدگی،  $F_{max}$ ، نیروی لهیدگی بیشینه،  $E_a$ ، سطح زیر منحنی نیرو جابجایی حاصل از آزمایش لهیدگی و  $m$  جرم نمونه می‌باشد. از کمیت‌های مذکور جهت مقایسه عملکرد جاذب ساخته شده در این پژوهش نیز استفاده شده است. به‌منظور مقایسه بهتر عملکرد نمونه‌ها تحت آزمایش فشار شبه استاتیکی، مقادیر  $CFE$  و  $SEA$  برای همگی محاسبه و در شکل 11 نشان داده شده است.

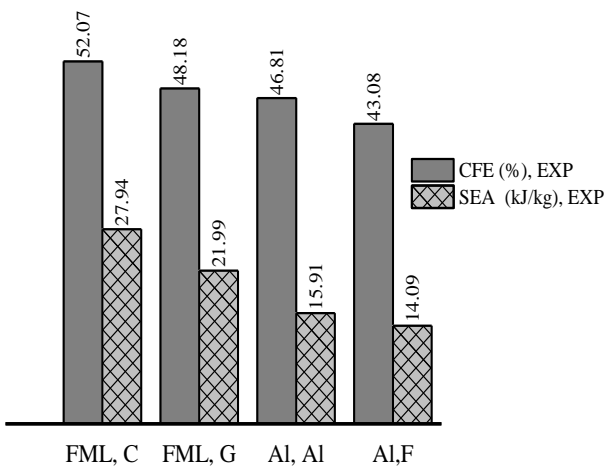


Fig. 11 Bar chart of CFE and SEA for all codes

شکل 11 نمودار درصد بازدهی نیروی لهشدهگی (CFE) و انرژی جذب‌شده بر واحد جرم (SEA)

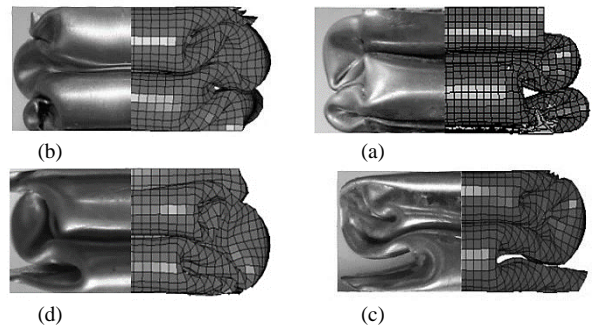


Fig. 9 Compression of FE and experiment (a) FML, C, (b) FML, G, (c) Al, F and (d) Al, Al

شکل 9 مقایسه چین‌خوردگی نمونه‌های آزمایشگاهی و مقایسه آن با مدل اجزاء محدود (a) FML, C (b) FML, G (c) FML, G (d) و Al, F (c) FML, G (b) FML, C (a) محدود

#### 2-4- مقایسه تجربی جذب انرژی کدهای مختلف

یکی از مهم‌ترین شاخصه‌های بررسی عملکرد جاذب انرژی مکانیکی، نمودار نیرو جابجایی حاصل از آزمایش لهیدگی است [25]. شکل 10 نمودار نیروی لهیدگی برحسب جابجایی را برای نمونه‌های آزمایش‌شده در حالت شبه استاتیکی نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، نمودارهای مربوط به هر نمونه تا جابجایی 45 میلی‌متر، قبل از پدیده قفل‌شدگی ادامه داده‌شده است.

شکل 10 نشان می‌دهد که برای تمامی کد نمونه‌ها ابتدا نیرو به‌صورت قابل‌ملاحظه‌ای افزایش یافته سپس، به دلیل به وجود آمدن لولاهای خمیری در آن مقدار نیرو افت می‌کند. درنهایت، برای تولید چین‌های بعدی دوباره مقدار نیرو رو به افزایش می‌گذارد [26,25].

همان‌گونه که در نمودار شکل 10 مشاهده می‌شود، بیشترین نیروی اولیه و همچنین بیشترین نیروی ثانویه لهیدگی مربوط به نمونه تولیدی فلزی الیافی با لایه میانی کربن-پکسی (FML, C) می‌باشد.

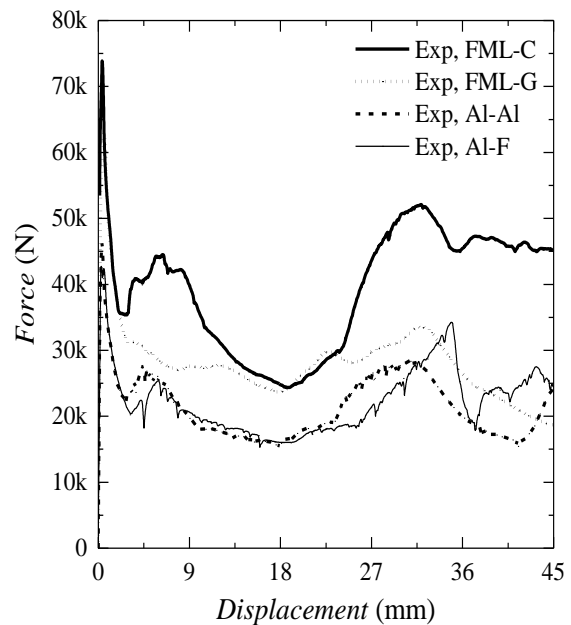


Fig. 10 The experimental force-displacement curve of all codes

شکل 10 نمودار نیروی لهیدگی برحسب جابجایی در آزمایش فشار شبه استاتیکی

<sup>1</sup> Crush Force Efficiency

<sup>2</sup> Specific Energy Absorption

جدول 3 درصد افزایش میزان جذب انرژی بر واحد جرم نمونه نسبت به انرژی جذب شده FML,C و FML,G

Table 3 Increased energy absorption percentage according to FML, C and FML, G.

درصد افزایش انرژی جذب شده به FML,G بر واحد جرم		درصد افزایش انرژی جذب شده به FML,C بر واحد جرم			کد نمونه مقادیر محاسبه شده
Al, F	Al, Al	Al, F	Al, Al	FML, G	
35.93	27.65	49.57	43.06	21.30	

جدول 3 نشان می‌دهد که جذب انرژی نمونه با لایه میانی کربن-اپکسی بیش از 21 درصد بهتر از نمونه با لایه میانی شیشه-اپکسی می‌باشد. بیشترین اختلاف کد FML, C مربوط به نمونه با لایه میانی فوم (AL, F) که مقدار آن کمتر از 50 درصد به دست آمده است. همچنین نمونه FML, G نسبت به نمونه Al, F افزایش 36 درصدی را نشان می‌دهد.

#### 3-4- بررسی عددی ضخامت لایه میانی بر جذب انرژی

پس از اعتبار سنجی مدل اجزاء محدود، برای بهینه‌سازی ضخامت لایه میانی نمونه‌هایی با ضخامت‌های متفاوت برای لایه میانی شیشه‌سازی شده است. بدین منظور، سه ضخامت 0.6، 0.8 و 1 میلی‌متر برای لایه میانی در نظر گرفته شد. نمودارهای مربوط به هر کدام از شبیه‌سازی‌ها در ادامه نشان داده شده است. دلیل انتخاب ضخامت‌های ذکر شده، انتخاب ضخامت 0.8 میلی‌متر به‌عنوان مرجع و تغییرات 25% کاهش و افزایش آن است.

در شکل 13 تا 16 مشاهده می‌شود که تمامی نمودارها در ابتدا با شیب قابل توجهی افزایش یافته و بعد از رسیدن به نیروی بیشینه، کاهش می‌یابند. دلیل این کاهش به وجود آمدن لولای خمیری در نمونه بوده که منجر به کاهش نیرو خواهد شد [26]. همچنین، مشاهده می‌شود که FML, G و FML, C نسبت به تغییرات ضخامت لایه میانی حساسیت بالاتری نسبت به Al, Al دارند.

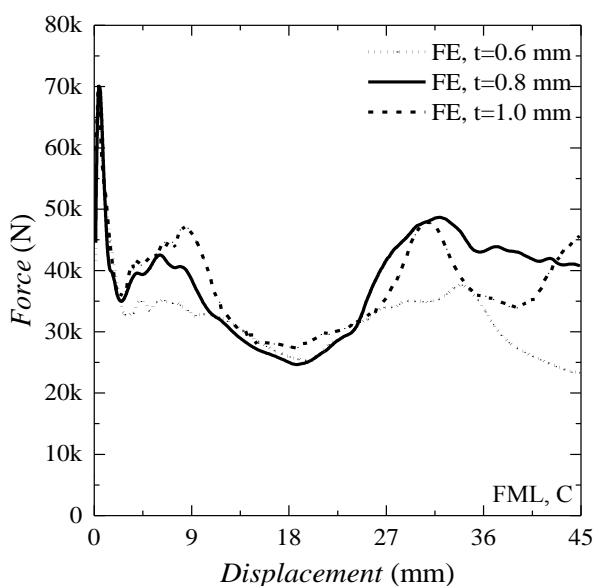


Fig. 13 FE force-displacement curves of FML, C for different middle layer thickness

شکل 13 نمودار نیروی لهیدگی مستخرج از شبیه‌سازی عددی برای نمونه FML, C و ضخامت‌های مختلف لایه میانی

همان‌گونه که شکل نشان می‌دهد، بیشترین درصد CFE مربوط به نمونه فلزی الیافی با لایه میانی کربن-اپکسی با مقدار 52.07 kJ/kg است. درصد بازدهی نیروی لهیدگی برای نمونه فلزی الیافی با لایه میانی شیشه-اپکسی و همچنین نمونه با لایه میانی آلومینیوم مقادیر مشابهی را نشان می‌دهد. در صورتی که برای نمونه با لایه میانی فوم درصد بازدهی نیروی لهیدگی با تفاوت معناداری نسبت به نمونه‌های دیگر در جایگاه چهارم در بین نمونه‌ها قرار می‌گیرد. به عبارت دیگر FML,C در شرایط برابر بیش از 17% افزایش CFE را نسبت به Al, F نشان می‌دهد.

در شکل 12 نیروی بیشینه و متوسط لهیدگی با توجه به مقادیر نیرو جابجایی آزمایشگاهی و مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط شبیه‌سازی عددی برای نمونه‌های مختلف ارائه شده است. همان‌گونه که در نمودار شکل 12 مشاهده می‌شود، تمامی مقادیر تجربی به دست آمده برای نیروی بیشینه و نیروی متوسط کمتر از مقدار پیش‌بینی‌شده عددی است. بیشترین مقدار خطا مربوط به نیروی متوسط Al, F به مقدار 35% است. در حالی که کمترین مقدار خطا مربوط به نیروی بیشینه و کمتر از 1.5% به دست آمده است. میانگین خطا در پیش‌بینی عددی کمتر از 15% است که با توجه به شرایط آزمایش و مدل‌سازی قابل قبول است.

دلیل خطا را می‌توان به اثر درز جوش در نمونه‌های آزمایشگاهی معطوف دانست که باعث شده است در حین آزمایش فشار، مقاومت ماده در آن نواحی کمتر شود. این موضوع می‌تواند انرژی جذب شده در نمونه را کاهش دهد. از سوی دیگر، در شبیه‌سازی عددی، مدل کاملاً عاری از هر نوع عیب و ایده‌آل در نظر گرفته می‌شود. وجود هرگونه عیب ساختاری در فلزات و همچنین، در لایه میانی به کاررفته برای هر کدام از نمونه‌ها می‌تواند منجر به کاهش انرژی جذب شده گردد. به منظور مقایسه بهتر نتایج، درصد افزایش میزان جذب انرژی بر واحد جرم نمونه‌ها نسبت به انرژی جذب شده FML, C و FML, G در جدول 3 آمده است.

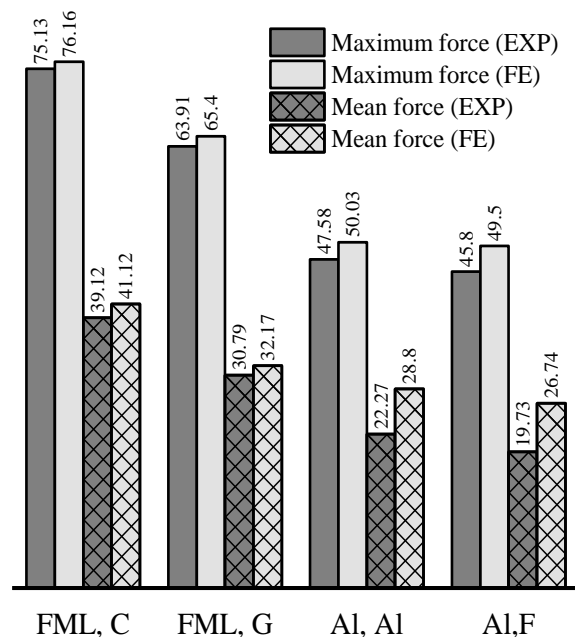


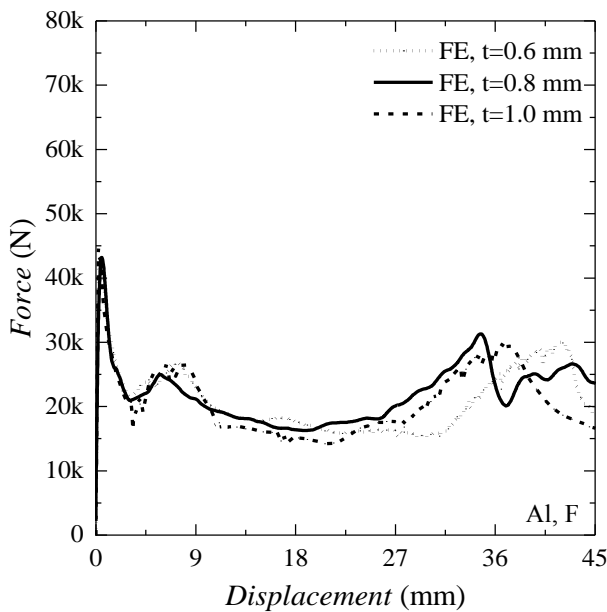
Fig. 12 Comparison of experimental and FE results of Maximum force and mean force of each code (All forces are in kN)

شکل 12 نیروی متوسط لهیدگی و بیشینه نیروی اولیه برای نمونه‌های آزمایش شده (نیروها به کیلو نیوتن)

مقادیر پیش‌بینی شده CFE برای تمامی نمونه‌ها با ضخامت لایه میانی متفاوت در شکل 17 نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود، برای FML, C بهترین عملکرد مربوط به ضخامت 0.8 میلی‌متر است که به ترتیب 6.9% و 1.7% از ضخامت‌های 0.6 و 1 میلی‌متر بهتر است. برای FML, G مقدار بهبود برای ضخامت 0.8 میلی‌متر به ترتیب 6.15% و 0.7% بیش از ضخامت‌های 0.6 و 1 میلی‌متر است. Al, Al با ضخامت 0.8 میلی‌متر به ترتیب 7.7% و 0.6% عملکرد بهتری را نسبت به ضخامت‌های 0.6 و 1 میلی‌متر نشان می‌دهد. در نهایت برای Al, F با اختلاف 10.81% و 1.5% نسبت به ضخامت 0.6 و 1 میلی‌متر، نمونه با ضخامت لایه میانی 0.8 عملکرد مطلوب‌تری را نشان می‌دهد.

به‌منظور حذف اثر جرم در تحلیل مقادیر انرژی‌های جذب‌شده، مقادیر SEA برای نمونه‌های مختلف با ضخامت‌های لایه میانی 0.6، 0.8 و 1 میلی‌متر در شکل 18 نشان داده شده است. همان‌گونه که شکل نشان می‌دهد برای تمامی نمونه‌ها عملکرد جذب انرژی با سه لایه با ضخامت یکسان از دیگر حالات بهتر است.

سرانجام، با توجه به شکل 17 و شکل 18 و نمودارهای به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی‌ها، می‌توان نتیجه گرفت که اگر ضخامت هر سه لایه تشکیل‌دهنده نمونه یکسان باشد، بیشترین نیروی متوسط لهیدگی و نیرو بیشینه در این حالت به دست خواهد آمد. به‌عبارت‌دیگر، در صورتی که ضخامت لایه میانی با لایه‌های بیرونی و درونی متفاوت باشد عملکرد جذب انرژی بهینه نخواهد بود.

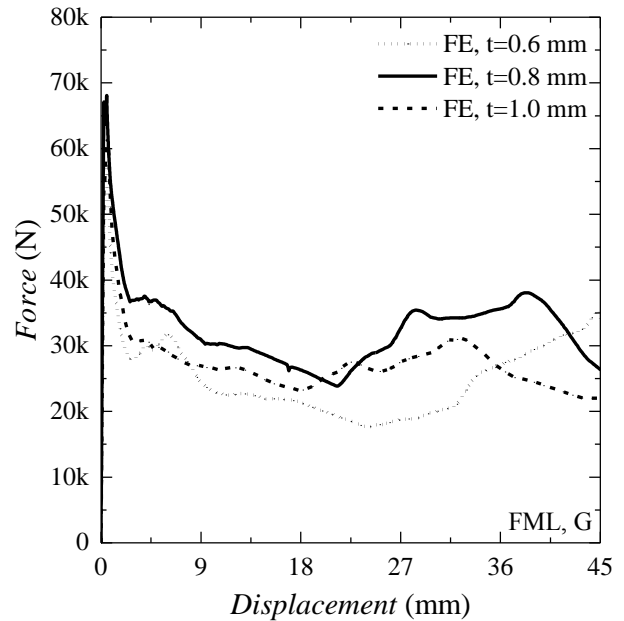


**Fig. 16** FE force-displacement curves of Al, F for different middle layer thickness

شکل 16 نمودار نیروی لهیدگی مستخرج از شبیه‌سازی عددی برای نمونه Al, F و ضخامت‌های مختلف لایه میانی

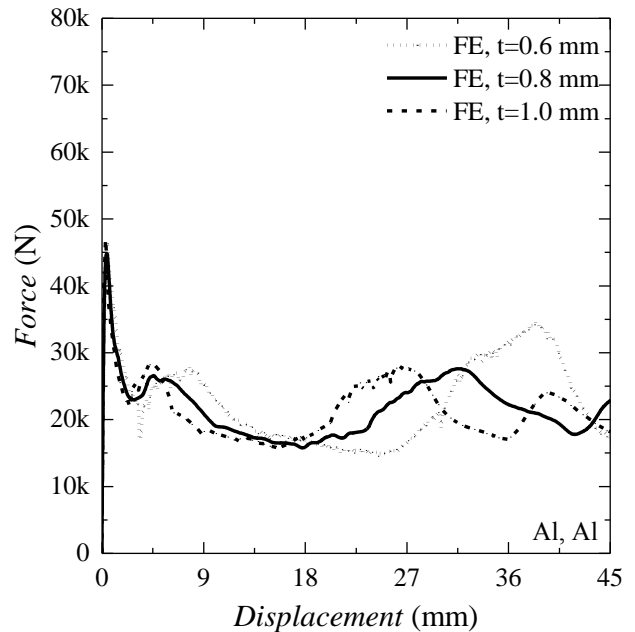
##### 5- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، جذب انرژی نمونه‌های جدار نازک با مقطع مربعی ساخته شده از ورق‌های فلزی الیافی تحت بارگذاری فشاری محوری، مطالعه شده است.



**Fig. 14** FE force-displacement curves of FML, G for different middle layer thickness

شکل 14 نمودار نیروی لهیدگی مستخرج از شبیه‌سازی عددی برای نمونه FML, G و ضخامت‌های مختلف لایه میانی



**Fig. 15** FE force-displacement curves of Al, Al for different middle layer thickness

شکل 15 نمودار نیروی لهیدگی مستخرج از شبیه‌سازی عددی برای نمونه Al, Al و ضخامت‌های مختلف لایه میانی

با افزایش جایجایی فک‌ها بعد از چین‌خوردگی اول، بار دیگر نیرو افزایش‌یافته تا به مقدار بیشینه دوم برسد. نیروی بیشینه دوم شروع چین‌خوردگی بعدی در نمونه را نشان می‌دهد. مقدار بیشینه در نمودارهای فوق با یکدیگر قابل‌مقایسه بوده اما بهترین عملکرد مربوط به نمونه‌هایی است که به ترتیب SEA و CFE بیشتری را دارا می‌باشند [29].

- نمونه با لایه میانی شیشه-اپکسی به میزان 28 و 35 درصد به ترتیب نسبت به آلومینیوم و فوم افزایش جذب انرژی بر واحد جرم را نشان می‌دهد.
- بیشینه مقدار نیرو اولیه و همچنین، نیروی متوسط بیشینه در حالتی رخ خواهد داد که ضخامت هر سه لایه به صورت یکسان در نظر گرفته شود. این موضوع همچنین باعث شده که چین‌خوردگی‌ها در نمونه به صورت یکنواخت‌تری صورت پذیرفته و قابلیت جذب انرژی در آن افزایش یابد.

## 6-مراجع

- [1] Alghamdi, A. A. A., "Collapsible Impact Energy Absorbers: An Overview" *Thin-Walled Structures*, Vol. 39, No. 2, pp. 189-213, 2001.
- [2] Saathoff, D. G., "Energy Absorbing Vehicle Doors", to Google Patents, 1994.
- [3] Tavassoli, N. Darvizeh, A. Darvizeh, M. and Sabet, S. A. R., "Analytical and Experimental Investigation into the Crushing Behavior of Hat Shaped Composite Energy Absorber" *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 14, 2015. (In Persian)
- [4] Ahmad, Z. Abdullah, M. R. and Tamin, M. N., "Experimental and Numerical Studies of Fiber Metal Laminate (Fml) Thin-Walled Tubes under Impact Loading" *Mechanical and Materials Engineering of Modern Structure and Component Design*, Vol. 70, pp. 433-443, 2015.
- [5] Zhen, C., "Review on the Dynamic Impact Characteristics of Fiber Metal Laminates", *Journal of Advanced Review on Scientific Research*, Vol. 16, No. 1, pp. 1-11, 2015.
- [6] Olabi, A. G. Morris, E. and Hashmi, M., "Metallic Tube Type Energy Absorbers: A Synopsis", *Thin-Walled Structures*, Vol. 45, No. 7, pp. 706-726, 2007.
- [7] Mamalis, A. G. Robinson, M., Manolakos, D. E. Demosthenous, G. A. Ioannidis, M. B. and Carruthers, J., "Crashworthy Capability of Composite Material Structures" *Composite Structures*, Vol. 37, No. 2, pp. 109-134, 1997.
- [8] Abramowicz, W., "Thin-Walled Structures as Impact Energy Absorbers", *Thin-Walled Structures*, Vol. 41, No. 2-3, pp. 91-107, 2003.
- [9] Reid, S. R., "Plastic Deformation Mechanisms in Axially Compressed Metal Tubes Used as Impact Energy Absorbers" *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 35, No. 12, pp. 1035-1052, 1993.
- [10] Ghamarian, A. Zarei, H. R. and Abadi, M. T., "Experimental and Numerical Crashworthiness Investigation of Empty and Foam-Filled End-Capped Conical Tubes", *Thin-Walled Structures*, Vol. 49, No. 10, pp. 1312-1319, 2011.
- [11] Song, J. Chen, Y. and Lu, G., "Light-Weight Thin-Walled Structures with Patterned Windows under Axial Crushing", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 66, pp. 239-248, 2013.
- [12] Tajdari, M. Azimi, M. Khorram, M. and Jam, J. E., "Numerical and Experimental Investigations on Buckling of Steel Cylindrical Shells with Triangular Cutout Subject to Axial Compression" *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 1, pp. 24-37, 2013. (In Persian)
- [13] Pirmohammad, S. Nikkha, H. and Sobhan, E., "Experimental and Numerical Study on the Collapse Behavior of Double Walled Tubes Reinforced with inside Ribs under Dynamic Axial Loading" *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 9, pp. 347-358, 2016. (In Persian)
- [14] Damghani, N. M. Hatami, H. and Ghodsbin, J. A., "Experimental Investigation of Expanded Metal Tube Absorber under Axial Impact Loading" *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 371-378, 2015. (In Persian)
- [15] Azarafza, R. Davar, A. and Mahmoodi, A., "Three-Point Bending Test of Metal and Composite Sandwich Panels with Grid Stiffened Core", 2017.
- [16] Khosravi, H. and Eslami-Farsani, R., "An Experimental Investigation into the Effect of Surface-Modified Silica Nanoparticles on the Mechanical Behavior of E-Glass/Epoxy Grid

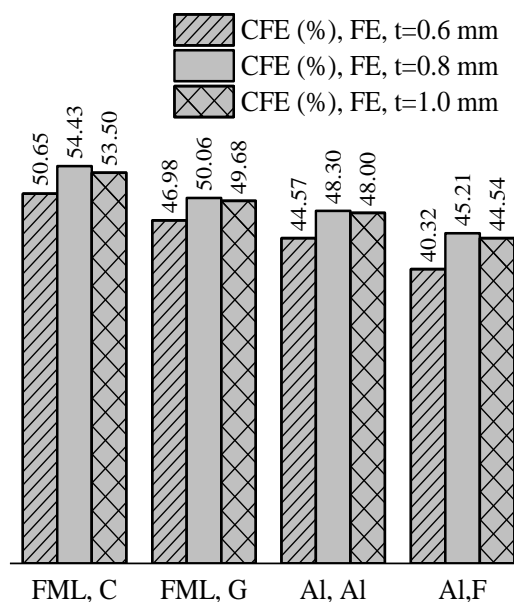


Fig. 17 CFE compression of all specimen for middle layer thickness of 0.6, 0.8 and 1.0 mm

شکل 17 نمودار درصد بازدهی نیروی له‌شدگی (CFE) برای نمونه‌های مختلف با ضخامت لایه میانی 0.6، 0.8 و 1 میلی‌متر

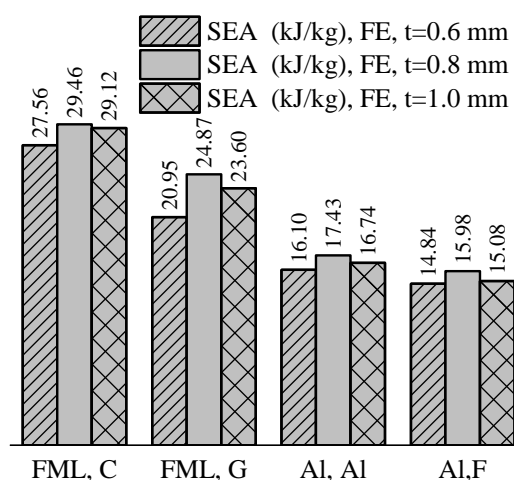


Fig. 18 SEA compression of all specimen for middle layer thickness of 0.6, 0.8 and 1.0 mm

شکل 18 نمودار انرژی جذب‌شده بر واحد جرم (SEA) برای نمونه‌های مختلف با ضخامت لایه میانی 0.6، 0.8 و 1 میلی‌متر

اثر ضخامت لایه میانی با تغییر آن از ماده مرکب شیشه-اپکسی، کربن-اپکسی، فوم پولی‌یورتان و آلومینیوم 2024 به صورت تجربی و عددی بررسی و مطالعه شده است. نتایج پژوهش را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

- در حالت شبه استاتیکی نمونه فلزی الیافی با لایه میانی کربن-اپکسی بیشترین نیروی متوسط لهیدگی (39.12 کیلو نیوتن) و بیشترین مقدار جذب انرژی بر واحد جرم (27.94 ژول بر کیلوگرم) نسبت به بقیه نمونه‌ها دارا می‌باشد.
- نمونه با لایه میانی کربن-اپکسی به میزان 50، 43 و 21 درصد به ترتیب نسبت به فوم، آلومینیوم و شیشه-اپکسی افزایش جذب انرژی بر واحد جرم را نشان می‌دهد.



- Composite Panels under Transverse Loading“, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 3, No. 1, pp. 11-20, 2016.
- [17] Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, Annual Book of ASTM Standard, 2001.
- [18] “The Official Site of the European New Car Assessment Programme“, Accessed; <http://www.euroncap.com/en>.
- [19] Mallick, P. K., “Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design“, CRC press, 2007.
- [20] Abrate, S., “Impact Engineering of Composite Structures“, Springer Science & Business Media, 2011.
- [21] Murugan, R. Ramesh, R. and Padmanabhan, K., “Investigation on Static and Dynamic Mechanical Properties of Epoxy Based Woven Fabric Glass/Carbon Hybrid Composite Laminates“, Procedia Engineering, Vol. 97, pp. 459-468, 2014.
- [22] Duleba, B. and Greskovic, F., “Simulation of Loading the Polymer/Carbon Fiber Composites and Prediction of Safety Factors“ International Journal of Engineering and Innovative Technology, Vol. 2, No. 8, pp. 2277-3754, 2013.
- [23] Pederson, J., “Finite Element Analysis of Carbon Fiber Composite Ripping Using Abaqus“ Master of Science Thesis, Clemson University, 2006.
- [24] Kashfi, M. Majzoobi, G. Bonora, N. Iannitti, G. Ruggiero, A. and Khademi, E., “A Study on Fiber Metal Laminates by Using a New Damage Model for Composite Layer“, International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 131, pp. 75-80, 2017.
- [25] Nikkhah, H. Guo, F. Chew, Y. Bai, J. Song, J. and Wang, P., “The Effect of Different Shapes of Holes on the Crushing Characteristics of Aluminum Square Windowed Tubes under Dynamic Axial Loading“ Thin-Walled Structures, Vol. 119, pp. 412-420, 2017.
- [26] Zhang, X. Leng, K. and Zhang, H., “Axial Crushing of Embedded Multi-Cell Tubes“, International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 131-132, pp. 459-470, 2017.
- [27] Chahardoli, S. and Alavi Nia, A., “Experimental and Numerical Investigations on Collapse Properties of Capped-End Frusta Tubes with Circular Triggers under Axial Quasi-Static Loading“ International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 134, pp. 545-561, 2017.
- [28] Graciano, C. Martínez, G. and Smith, D., “Experimental Investigation on the Axial Collapse of Expanded Metal Tubes“ Thin-Walled Structures, Vol. 47, No. 8, pp. 953-961, 2009.
- [29] Alavi Nia, A. and Akhavan Attar, A., “The Effect of Different Layouts in Internal and External Stiffeners on the Energy Absorption of Thin-Walled Structures with Square Sections“ Archives of Civil and Mechanical Engineering, Vol. 17, No. 4, pp. 997-1010, 2017.

