ماهنامه علمى يژوهشى



00

مهندسی مکانیک مدر س

mme.modares.ac.ir

ساخت و مجهزسازی ماشین ضربهسقوطی کمسرعت جهت تعیین ظرفیت جذب انرژی در فوم کامپوزیتی با زمینه آلومینیوم

حسین فراهت¹، سید یوسف احمدی بروغنی^{2*}

1 - دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

' بيرجند، صندوق پستى syahmadi@birjand.ac.ir ،97175/615

ت مقاله چکیده	مقاله چکیده	اطلاعات مقا
هشی کامل در مقاله حاضر، ظرفیت جذب انرژی فوم آلومینیوم 09 اردیبهشت 1395 حاصل گردید. ماده فومی با استفاده از روش ذو 28 خرداد 1395 آزمایشگاهی طراحی و ساخته شد. مدار کامل نیروس مایت: 29 تیر 1395	كامل در مقاله حاضر، ظرفیت جذب انرژی فوم آلومینیوم A356 تقویت شده با ذرات SiC تحت بار ضربه ای مورد مط دیپهشت 1395 برداد 1395 از مایشگاهی طراحی و ساخته شد. مدار كامل نیروسنج دینامیكی (لودسل) طراحی و روی آن نصب گردید. آزمایش 1395 تیر 1395	مقاله پژوهشی کاه دریافت: 09 اردیبه پذیرش: 28 خرداد ارائه در سایت: 29
ان: منیم کروی و با سرعت 6.70 m/s، بر روی نمونهها بزیتی A356/SiCp دست آمده از سنسور پیزوالکتریک مقایسه شد ربه سقوطی (حداکثر با % مهمخوانی رفتار ماده با نتایج محققین دیگر نیز، بر ای مهمخوانی رفتار ماده با نتایج محققین دیگر نیز، بر ای ناحیه پلاتو، فوم میتواند تغییرشکلهای پلاستیک بترتیب برابر با AN 1.62 و 2.04 یوده که در م	نیم کروی و با سرعت 6.70 m/s بر روی نمونههای فوم انجام شد. نمودار تغییرات نیرو برحسب زمان بهدست دست آمده از سنسور پیزوالکتریک مقایسه شد که مطابقت خوبی بین آنها وجود دارد. پاسخ ضربه بهدر مقوطی (A356/SiC _p ، یک پاسخ کمنوسان (حداکثر با 5.8% نوسان) و پایدار است که بیانگر طراحی مناسب ماشین و همخوانی رفتار ماده با نتایج محققین دیگر نیز، بر این امر صحه می گذارد. پاسخ مذکور شامل سه ناحیه الاستیک، ناحیه پلاتو، فوم می تواند تغییرشکل های پلاستیک را در یک بار تقریباً ثابت تحمل نماید. پایان ناحیه پلاتو ک لحظهای اتفاق می افتد که نرخ انرژی جذب شده توسط فوم کاهش می یابد. مقدار بار پلاتو و انرژی جذب شده که بترتیب برابر با A162 او 20.04 بوده که در مقایسه با سنسور پیزوالکتریک، دارای خطای نسبی 1.8 و 7.7	کید واژگان: فوم کامپوزیتی مA356/SiC آزمون ضربه سقوطی مدار لودسل جذب انرژی

Design and instrumentation of low velocity drop-weight impact testing machine for estimation of energy absorption capacity in aluminum based composite foam

Hossein Farahat, Seyed Yousef Ahmadi Brooghani^{*}

Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran * P.O.B. 97175/615, Birjand, Iran, syahmadi@birjand.ac.ir

ABSTRACT

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper Received 28 April 2016 Accepted 17 June 2016 Available Online 20 July 2016

Keywords: A356/SiCp composite foam Drop-weight impact test Load-cell circuit Energy absorption

In this paper, the energy absorption capacity of A356 aluminum foam reinforced by SiC particles under impact loading was studied. The foam was manufactured by direct foaming of melts with blowing agent CaCO3. The drop-weight impact testing machine was designed and fabricated. The dynamic load-cell circuit was designed and mounted on the impactor. The impact test was carried out using a hemispherical indenter with a velocity of 6.70 m/s on the foam specimens, and the load-time history data was obtained. The results were compared with the results reported by a piezoelectric force sensor and validated. The obtained impact response of A356/SiCp composite foam is stable, which represents the suitable design of the machine and its reliable output. This is emphasized by comparison of material behavior with the results of other researchers. The response includes three stages: an initial linear behavior, a plateau of load and failure of the foam. In plateau region, the plastic deformations can be tolerated by the foam at nearly constant load. The end of plateau region and beginning of the failure region occur at the moment when the rate of energy absorbed by the foam is decreasing. The values of plateau load and absorbed energy estimated from load-cell are 1.62 kN and 22.04 J respectively, which has a relative error of 1.8% and 7.7% in comparison with piezoelectric sensor. The value and percentage of absorbed energy were obtained as 6.07 J, 6.58 J, 9.39 J and 27.5%, 29.9%, 42.6% for elastic, plateau and failure regions respectively.

مکانیکی مخصوص¹ (خواص مکانیکی بر واحد وزن ماده)، بسیار مهم^تر از خواص مطلق بدون در نظر گرفتن وزن میباشد. بهمنظور کاهش وزن، ایجاد

1- مقدمه

تلاش محققان همواره در جهت کشف و خلق موادی بوده است که علاوه بر داشتن استحکام مناسب، سبکتر باشند. در بسیاری از کاربردها خواص

¹ Specific Mechanical Properties

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

H. Farahat, S. Y. Ahmadi Brooghani, Design and instrumentation of low velocity drop-weight impact testing machine for estimation of energy absorption capacity in aluminum based composite foam, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 7, pp. 219-228, 2016 (in Persian)



حفرههای پر شده از هوا یا گازهای خنثی در داخل ماده زمینه و به عبارتی تولید یک ماده متخلخل¹ تحت عنوان "فوم"، مدنظر بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است [1].

بسياري از فلزات و آلياژها مانند آلومينيوم، فولاد، مس، نيكل، سرب، روی، منیزیم و تیتانیم، قابلیت فومی شدن را با استفاده از فرآیندهای تولیدی مختلف دارند. در این میان استفاده از فلز آلومینیوم بهعنوان ماده زمینه فوم، بهدلیل داشتن وزن سبک و نقطه ذوب پایین (که باعث تسهیل در فرآیند تولید فوم می گردد) و نیز به دلیل دارا بودن سفتی ویژه² بالا، مقاومت خوب در برابر خوردگی، نسبت استحکام به وزن بالا، ظرفیت جذب انرژی عالی، قابلیت بازیافت و همچنین قابلیت تولید ساختارهای سلولی نسبتاً همگن و همسانگرد، توجه زیادی را در سالهای اخیر به خود جلب کرده است. وجود ریزساختار سلولی در فومهای فلزی³ و به ویژه فومهای آلومینیومی، این امکان را برای آنها فراهم می آورد که مقدار زیادی از انرژی جنبشی ناشی از برخورد را قبل از این که موجب تخریب سازه گردد، جذب نمایند و لذا در مواردی که مقاومت در برابر ضربه یا نفوذ نیاز است، این دسته از مواد بهعنوان جاذب انرژی عمل میکنند. دارابودن ویژگیهای مذکور، سبب شده تا فومهای آلومینیوم در کاربردهای متعددی مانند صنایع خودرو، هوافضا و کشتیسازی بهطور گسترده، مورد استفاده قرار گیرند. همچنین از فوم آلومینیوم، به عنوان ماده هسته در ساختارهای ساندویچی تحت شرایط بار گذاری مختلف (از قبیل ضربه ناشی از گلوله یا موج انفجار در کاربردهای حفاظتی) استفاده می شود. در واقع، وجود فوم باعث می شود که بار ضربه ای ماکزیمم زیر حد آستانه ای كه موجب آسيب به جسم محافظت شده مى گردد، نگهداشته شود [2-5]. بنابر توضيحات فوق، بررسی جزئيات رفتار مكانيكی فوم، تحت بار ديناميكی ضروری به نظر میرسد.

مطالعات قبلی انجام گرفته بر روی فومهای آلومینیومی تحت فشار دینامیکی در نرخ کرنش بالا، اساساً بر روی حساسیت پارامترهای مختلف (مانند تنش پلاتو⁴ و مدول⁵) به نرخ کرنش⁶ تمرکز کردهاند [6-9] تا از قابلیت جذب انرژی بالای آنها برای کاربردهای عملی استفاده شود. در این مطالعات، از میله فشاری اسپلیت - هاپکینسون⁷ استفاده شده است. بیشتر این مطالعات، نشان میدهد که میزان حساسیت مذکور، به نوع فوم آلومینیوم بستگی دارد [10]. میزان جذب انرژی فومها با چگالی یکسان، بسته به نرخ کرنش میتواند متفاوت باشد. همچنین مشاهده شده که با کاهش چگالی فوم، اثرات نرخ کرنش افزایش مییابد که این امر به فشار گاز درون سلولها مرتبط است.

برای کاربردهای نرخ کرنش نسبتاً کم (ضربه سرعت پایین)، قابلیت فوم برای تضعیف بار ضربهای و نیز جذب انرژی ضربه، حائز اهمیت است. یک روش کلاسیک، برای بررسی پاسخ دینامیکی مواد مهندسی در نرخ کرنشهای پایین، آزمایش ضربه سقوطی⁸ میباشد. موهان و همکاران [11]، چو و همکاران [12]، کاسترو و همکاران [13]، هان و همکاران [41]، هوسان و ژائونگ [15]، با استفاده از ماشین اینسترون دایناتاپ⁹، آزمایش ضربه سقوطی کم سرعت را بر روی انواع فوم آلومینیوم انجام دادهاند و پاسخ ضربه

اعمالی به ساختار فوم را اندازه گیری کردهاند. نتایج آنها بیانگر مقاومت فوم در برابر بار ضربهای و نیز انرژی جذب شده توسط فوم در طی زمان ضربه میباشد. راماچاندرا و همکاران [16]، رفتار جذب انرژی ضربه توسط فوم آلومینیوم را در سرعت پایین 7 m/s و نیز در سرعتهای بالا (بین 22 تا 30 m/s)، با استفاده از ضربهزن¹⁰ با انتهای تخت و انتهای کروی بررسی کردهاند. نتایج آنها نشان داد که در سرعتهای بالا، نرخ کرنش، اینرسی و موج تنش اعمالی تأثیر بسزایی داشته و مقاومت فوم در برابر نفوذ افزایش می یابد. نتایج پرونی و همکاران [17]، نشان داد که لوله آلومینیومی پرشده با فوم آلومینیوم (یک ساختار کامپوزیتی) می تواند به افزایش بار فروپاشی¹¹ و نیز جذب انرژی بالا، منجر شود.

تعدادی مطالعات تجربی نیز در داخل کشور، بر روی ساختارهای فومی تحت ضربه انجام شده است. ضیاء شمامی و همکاران [18] با استفاده از یک تفنگ گازی، خواص بالستیکی فوم آلومینیوم را مطالعه نمودند. آنها با اندازهگیری سرعت ورودی و سرعت خروجی پرتابه، انرژی جذب شده توسط فوم را محاسبه کردند و تأثیر پارامترهای چگالی فوم، ضخامت فوم و سرعت پرتابه را بر روی میزان جذب انرژی ماده بررسی نمودند. نتایج آنها نشان داد که با افزایش پارامترهای مذکور، میزان جذب انرژی و تغییرشکل لولههای چوبینی و همکاران [19]، به بررسی رفتار جذب انرژی و تغییرشکل لولههای آلومینیومی جدارنازک (توخالی و توپر با فوم پلیاورتان) تحت بار ضربهای عرضی پرداختند و با انجام آزمایش سقوط وزنه بر روی لولهها (با مقاطع دایرهای و مربعی) با انرژیهای مختلف، مقدار شتاب را در طی زمان برخورد اندازهگیری نمودند. نتایج آنها نشان داد که در شرایطی که انرژی وارده بر سازه در اثر تصادف کم باشد، استفاده از لولههای دایرهای مناسبتر است و در شرایط انرژیهای بالاتر برخورد، لولههای مربعی کارایی بیشتری دارند. شرایط انرژیهای بالاتر برخورد، اولههای مربعی کارایی بیشتری دارند.

اگرچه استفاده از فوم آلومینیوم در مواد مرکب¹² (مانند صفحات ساندویچی¹³ با هسته فومی) بسیار رایج است، اما اگر خواص و رفتار مکانیکی هر كدام از مواد به تنهایی بررسی نشود، امكان توسعه مواد مركب با مشكلات عدیدهای مواجه خواهد شد. بنابراین انجام مطالعات پایه بر روی خواص مکانیکی هر ماده (به تنهایی) امری ضروری و بسیار مهم است؛ مطالعاتی که تأمين كننده اطلاعات لازم براى توسعه مواد كامپوزيتي پيشرفته بهشمار می رود. مقاله حاضر، بخشی از یک کار پژوهشی دنباله دار و با رویکرد مذکور مىاشد كه به بررسى رفتار فوم آلومينيوم، تحت ضربه با سرعت پايين می پردازد. ماده خاص (جدید) مورد مطالعه در کار حاضر، فوم آلومینیوم A356 تقويتشده بهوسيله ذرات كاربيد سيليسيم SiC (فوم كامپوزيتى A356/SiC_p) میباشد. روش تولید ماده، روش ذوبی میباشد که در آن از پودر کربنات کلسیم CaCO₃، به عنوان عامل فومساز استفاده شده است. به منظور بررسی تجربی، دستگاه آزمون ضربه سقوطی طراحی و ساخته شده و مدار كامل نيروسنج ديناميكي (لودسل) بر روى آن نصب گرديده است. پس از كاليبرهكردن دستگاه و صحتسنجي آن، آزمايش ضربه بر روى فوم آلومینیوم انجام شده و رفتار مکانیکی ماده در طی زمان ضربه، مورد بحث و بررسی قرار گرفته و میزان جذبانرژی فوم تعیین شده است. با توجه به عدم وجود دادههای آزمایش ضربه بر روی فوم A356/SiCp، ضرورت انجام پژوهش با هدف بررسی پاسخ ضربه ماده مذکور و تفسیر دقیق نتایج بهدست

Porous Material Specific Stiffness

Metal Foams

Plateau Stress Modulus

⁶ Strain Rate Sensitivity

⁷ Split-Hopkinson Pressure Bar

⁸ Drop-Weight Impact Experiment

⁹ Instron Dynatup

¹⁰ Impactor

¹¹ Collapse Load ¹² Composite Materials

¹³ Sandwich Panels

آمده، حائز اهمیت می باشد. در مقاله حاضر، با دقت به این موضوع پرداخته شده است. همچنین لازم به ذکر است که در مقاله حاضر، برای اولین بار در كشور، كليه مراحل طراحي و ساخت ماشين آزمون ضربه سقوطي سرعت پايين و نحوه مجهزسازی آن به حسگرهای الکترونیکی، برای استفاده سایر محققین با دقت و به تفصیل بیان شده است. استفاده از سنسورهای مختلف در ثبت دادهها و مقايسه نتايج آنها با يكديگر، بهعنوان نقطه قوت مقاله حاضر میباشد. نحوه کالیبراسیون دستگاه و به کار بردن سنسورهای نیروسنج مختلف و نیز بیان جزئیات مربوط به مشخصات سنسورهای استفاده شده (شتابسنج، لودسل و نیروسنج تجاری پیزوالکتریک)، از موارد دیگر نوآوری تحقیق می باشد. استانداردهای مربوط به طراحی دستگاه و مشکلات موجود در روند تکاملی ساخت دستگاه نیز، در متن مقاله توضیح داده شده است.

2- مواد و روش توليد

روشهای تولید فومهای فلزی، در خلال سالهای متمادی تنوع گستردهای یافته است. در این میان، روشهای ذوبی اهمیت بیشتری پیدا کردهاند. در تحقیق حاضر برای تولید نمونههای فوم آلومینیومی، از روش ذوبی با عامل فومساز (فومسازی مستقیم از مذاب)¹ استفاده شده است. محصول این روش، یک فوم با قابلیت چکشخواری² و دارای ساختار سلول بسته³ بوده که برای کاربردهای جذب انرژی ضربه، بسیار مناسب میباشد. همچنین در مقایسه با سایر روشهای تولیدی، اندازه سلولها و توزیع چگالی موضعی در فوم همگن تر می باشد [3].

در این پژوهش، آلیاژ آلومینیوم ریختگی A356 با ترکیب شیمیایی جدول 1، بهعنوان فلز پایه انتخاب گردید. از ذرات تقویت کننده کاربید سیلیسیم SiC، با خلوص %98 وزنی و اندازه متوسط ذرات برابر با 10 میکرومتر، برای پایدارسازی مذاب (ویسکوزکننده مذاب) در فرآیند تولید فوم، استفاده شد. بهمنظور حذف گازهای جذب شده سطحی و در نتیجه، بهبود ترشوندگی ذرات SiC توسط مذاب آلومینیوم، این ذرات تحت فرآیند آمادهسازی حرارتی قرار گرفت. این فرآیند، شامل حرارتدادن به مدت یک ساعت در دمای C ژ950 و خنک کردن در داخل کوره و مجدداً حرارت دادن به مدت 2 ساعت در دمای $^\circ\mathrm{C}$ و خنک کردن در دمای محیط میباشد. يودر كربنات كلسيم CaCO₃، با خلوص %99.5 وزنى و اندازه متوسط 5 میکرومتر، به عنوان عامل فومساز استفاده شد. به منظور افزایش قدرت تجزیه ذرات CaCO₃ و توزیع مناسب آن در داخل مذاب، این ذرات تحت فرآیند آمادهسازی حرارتی و خشک کردن قرار گرفت. حرارتدادن به مدت 2 ساعت در دمای C[°]C و سرمایش در دمای محیط صورت گرفت. انجام عملیات مذکور، باعث تشکیل یک لایه اکسیدی در مقیاس نانومتری، بر روی سطح ماده فومساز گردیده و این امر سبب می گردد که با همزدن آن در داخل مذاب آلومینیوم، سریعاً و در مدت زمانی کوتاه فوم تولید شود.

برای تولید محصول فومی، ابتدا مذاب آلیاژ آلومینیوم در دمای 650-680°C آماده و توسط سيستم همزن با سرعت تقريبي 900 دور بر دقيقه، هم زده شد. سپس ذرات SiC (به مقدار 10% حجمی)، طی مدت زمان 20 دقيقه و به تدريج وارد مذاب در حال اغتشاش شد (ريخته گرى گردابی4). پس از آن مذاب کامپوزیتی، به داخل قالبهای شمش تخلیه و منجمد گردید. "شکل 1"، مراحل تولید شمش کامپوزیتی را نشان میدهد.





Fig. 1 The production of composite ingot **شكل 1** مراحل توليد شمش كامپوزيتي

در مرحله بعد ذوب مجدد شمش کامیوزیتی A356/SiC_p، در محدوده دمایی ن 670-700 و در داخل قالب فلزی صورت گرفت. مذاب با سرعت 1400 دور m Cبر دقيقه و مداوماً هم زده شد تا حداكثر يكنواختي⁵ حاصل شود. در اين وضعیت پودر کربنات کلسیم CaCO₃ (به مقدار 3 درصد وزنی)، بهعنوان عامل فومساز و در داخل فویلهای آلومینیومی طی مدت زمان کوتاه (حدود یک دقیقه) وارد مذاب در حال همزدن گردید. بلافاصله عمل فوم شدن شروع و با خروج همزن از داخل قالب، تکمیل شد. قالب از داخل کوره خارج و محصول متخلخل داخل آن، در دمای محیط سرد و منجمد شد [20]. "شکل 2"، مراحل توليد فوم كامپوزيتي با زمينه آلومنيوم را نشان ميدهد. محصول فوم متخلخل توليد شده، يک فوم همگن و با ساختار سلول بسته مىباشد. "شكل 3"، تصویری از فوم ساخته شده را نشان میدهد. اندازه سلولها (مقدار متوسط) برابر با 3 mm، دانسیته نهایی فوم برابر با ³ gr/cm و درصد $1 - \rho_{\rm f}$ رابر با 6 برابر با 81 مہ
،باشد (درصد تخلخل فوم برابر است با 6 که $ho_{
m f}$ و $ho_{
m Al}$ به ترتیب چگالی فوم و چگالی آلومینیوم یعنی ماده زمینه فوم است). محصول فومي، به نمونه هايي به ابعاد mm×100 mm×20 mm برش داده شد و جهت آزمایش ضربه آماده گردید.

3- طراحي و ساخت دستگاه ضربه

براساس طرح ماشین آزمون ضربه اینسترون دایناتاپ و نیز استاندارد ASTM [21] D 3763 ازمون ضربه سقوطی در مقیاس آزمایشگاهی طراحی و ساخته شد. "شکل 4"، نمای شماتیکی از دستگاه آزمایش را نشان میدهد.

روش آزمایش ضربه بهصورت زیر است: نمونه فوم آلومینیوم، بین دو صفحه مربعی (دو صفحه صلب موازی) قرار می گیرد و بهطور ثابت⁷ بسته می شود، به گونه ای که نقطه ضربه، در وسط نمونه می باشد. هر یک از این دو صفحه (صفحات گیره⁸)، دارای سوراخ دایرهای مرکزی به قطر 76 mm می،باشد. چکش مورد استفاده، فولادی و با انتهای نیم کروی به قطر 13 mm میباشد. ضربهزن یا کوبه سقوط کننده⁹ (شامل چکش ضارب و متعلقات آن) به جرم 4.7 kg، توسط مكانيزم چفتى كردن و نقاله¹⁰ تا يك ارتفاع مشخص بالا برده می شود. سپس از آن ارتفاع، در امتداد دو ریل راهنما رها شده و روی

8 Clamp Plates

DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.7.11.6

Direct Foaming Route of Melt using foaming agent

Ductile Closed-cell

⁴ Stir Casting

⁵ Homogenization 6 Porosity

Fixed

 ⁹ Falling Ram (Crosshead)
 ¹⁰ Latching and Hoist Mechanisms

نمونه فومی میافتد. به وسیله سرعتسنج نصبشده بر روی دستگاه، سرعت ضربه در لحظه اصابت چکش با نمونه تعیین میشود (برابر 6.70 m/s). آزمایش ضربه، برای پنج نمونه تکرار شده است.



Fig. 2 The stages of foam production

شكل 2 مراحل توليد فوم



شکل 3 تصویری از محصول فومی ساخته شده



Fig. 4 Schematic view of the impact testing machine used in this work شکل 4 نمای شماتیکی از دستگاه آزمایش ضربه ساختهشده در تحقیق حاضر

"شکل 5"، تصویری از دستگاه آزمایش را نشان میدهد. با اضافه کردن جرم موردنیاز و یا تغییر ارتفاع رها شدن ضربهزن، امکان اعمال انرژی ضربه با مقادیر مختلف وجود دارد. در "شکل 6"، نمونه فوم بعد از انجام آزمایش و نیز پلاگ جدا شده از آن (از دو نمای مختلف) نشان داده شده است. انرژی ضربه اعمالی برابر I 105 بوده و نمونه در اثر نفوذ کامل چکش، سوراخ شده است (حالت شکست ماده، به صورت پلاگ برشی¹ مشاهده شد). بهمنظور ثبت دادههای مربوط به رفتار ضربه فوم، از شتاب سنج، لودسل و سنسور پیزوالکتریک استفاده شده که جزئیات آن در بخشهای I-3 تا I-3 ارائه شده است.

1-3 - نصب شتاب سنج بر روی چکش

سیستم اکتساب دادهها²، شامل شتابسنج، اسیلوسکوپ و منبع تغذیه میباشد که مشخصات آن مطابق جدول 2 میباشد. تجهیزات مذکور، متعلق به آزمایشگاه ضربه دانشگاه بیرجند میباشد که از آنها در کار حاضر استفاده شده است. سنسور شتاب (که تصویر آن در "شکل 7" مشاهده میشود)، بر روی چکش نصب شد و آزمایش ضربه بر روی تعدادی نمونه فوم انجام گردید. به محض اصابت چکش به نمونه، مقدار ولتاژ برحسب زمان گزارش شده و



Fig. 5 A picture of the drop-weight impact testing machine شکل 5 تصویر دستگاه آزمایش ضربه سقوطی



شکل 6 نمونه فوم کاملاً سوراخشده و پلاک جدا شده از آن (از دو نمای مختلف)

¹ Shear-Plugging Fracture Mode ² Data Acquisition System

DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.7.11.6



Fig. 9 The details of dynamic load-cell circuit

شكل 9 جزئيات مدار نيروسنج ديناميكي



Fig. 10 Arrangement of the strain gages on the compression bar and in the Wheatstone bridge circuit [22]

شكل 10 نحوه چيدمان كرنشسنجها روى ميله تحت فشار،در مدار پل وتستون [22]



Fig. 11 The strain gages mounted on the impactor **شکل 11** نصب کرنشسنج بر روی چکش ضارب

سمت دیگر چکش (شمارههای 3 و 4) نشان داده شدهاند که نحوه شماره گذاری آن ها، همانند "شکل 10" مے باشد.

هنگام انجام آزمایش ضربه، به محض این که چکش به نمونه فوم اصابت مى كند، سيگنال ارسالى از سوى سنسور (كه همان ولتاژ خروجى پل Vo مى باشد) توسط سيستم اكتساب دادهها جمع آورى شده و تغييرات ولتاژ برحسب زمان ضربه، در کامپیوتر ذخیره می گردد. با استفاده از روابط حاکم بر پل وتستونی که در هر چهار بازوی آن از کرنشسنج استفاده شده (مدار پل کامل) و کرنشهای جانبی نیز به حساب میآیند، میتوان تغییرات كرنش-زمان و نهايتاً تغييرات نيرو-زمان را بهدست آورد [22]. با انتگرال گیری عددی از تاریخچه شتاب (که با داشتن نیرو و جرم ضربهزن بهدست می آید)، مقادیر سینماتیکی مربوطه مانند سرعت و تغییرمکان محاسبه شده و بنابراین انرژی جذب شده توسط فوم، با توجه به سطح زیر نمودار نيرو-تغييرمكان تعيين ميشود. توسط کامپیوتر ذخیره می گردد. "شکل 8" نمونهای از نتایج آزمایش را نشان میدهد. ملاحظه می شود که سیگنال مربوط به سنسور شتاب، بسیار نویزی می باشد به گونه ای که ابتدای ضربه، انتهای ضربه و مقدار بار حداکثر مشخص نیست. بنابراین بهجای شتابسنج، از لودسل استفاده شد.

2-3- طراحي و نصب مدار لودسل

مطابق "شکلهای 9، 10 و 11"، طراحی و نصب مدار کامل نیروسنج² دینامیکی جهت دستگاه آزمون ضربه سقوطی انجام گرفت. این مدار، شامل کرنش سنج (نصب شده بر روی چکش)، تقویت کننده ولتاژ³ (شکل 9) و اسیلوسکوپ (تکترونیکس⁴ TDS 1012B) میباشد که بهمنظور اندازه گیری نیروی ضربه برحسب زمان، استفاده می گردد. طراحی مدار، با استفاده از پل وتستون⁵ انجام شده و چهار کرنشسنج HBM (از نوع 13/350 LY11) بر روى چكش چسبانده شدهاند [22]. "شكل 10"، نحوه آرايش كرنشسنجها روی میله تحت فشار، در مدار پل وتستون را نشان میدهد. پس از چسباندن کرنش سنجها و نیز ترمینال های مربوطه، لحیم کاری سیم های رابط انجام گرفته است. "شکل 11"، جزئیات نصب کرنش سنجها را نشان میدهد. همانطور که در این شکل مشاهده می شود، در هر سمت چکش دو کرنش سنج 350 اهمی ، یکی در جهت محوری و دیگری در جهت عمود بر محور اصلی قرار می گیرند. در شکل سمت راست، کرنش سنجها برای یک سمت چکش (شمارههای 1 و 2) و در شکل سمت چپ، کرنش سنجها برای

جدول 2 مشخصات سيستم اكتساب داده

Table 2 The data acquisition system characteristics	
مدل	نام
كيستلر 8742A10 با حساسيت 0.5 mV/g	سنسور شتاب
تکترونیکس TDS 1012B	اسيلوسكوپ
كوپلر كيستلر نوع 5114	منبع تغذيه



Fig. 7 The accelerometer used in this work

شکل 7 سنسور شتاب مورد استفاده



شکل 8 دادههای شتاب برحسب زمان

Peak Load

Load-cell Amplifier

Tektronix

⁵ Wheatstone Bridge

Fig. 13 The foam specimen under impact (front and back view) شكل 13 نمونه فوم تحت ضربه (جلو و پشت نمونه)

$$\int F \, dt = m \, \nu_{1} \tag{1}$$

با توجه به این که یک رابطه خطی بین نیروی F و ولتاژ V وجود دارد [22]، بنابراين:

$$\beta \int V \, dt = m \, v_{1} \tag{2}$$

(eta) و در نتيجه با توجه به تساوى بالا، ضريب تبديل ولتاژ به نيرو بهدست میآید. لازم به ذکر است که سمت چپ رابطه فوق، با استفاده از انتگرال گیری عددی از دادههای ولتاژ خروجی مدار لودسل، محاسبه شده است

3-3- استفاده از یک نیروسنج پیزوالکتریک

پس از جستجوهای مکرر، یک نیروسنج استاندارد (مدل YMC511F03) از خارج از کشور، تهیه و خریداری گردید ("شکل 14"، تصویر سمت چپ). این سنسور، از نوع پیزوالکتریک³ بوده که در اثر شوک ناشی از ضربه، ولتاژ آزاد می کند و جهت اندازه گیری نیروی فشاری به صورت دینامیکی (با ظرفیت 5 كيلونيوتن) مورد استفاده قرار مى گيرد. لازم به ذكر است كه سنسور نيرو، مستقيماً به اسيلوسكوپ متصل نمىشود و معمولاً از شارژ آمپلىفاير و يا سیگنالکاندیشنر ⁴، بهعنوان یک واسطه در مدار استفاده میگردد. تصویر سمت راست در "شکل 14"، سیگنال کاندیشنر مورد استفاده (مدل YMC 8201**)** را نشان میدهد.

"شكل 15"، تصوير دستگاه آزمون ضربه سقوطى و سيستم اكتساب دادهها را نشان میدهد. شمارههای مشخص شده در شکل، عبارتند از: 1: مكانيزم نقاله، 2: مكانيزم چفتىكردن، 3: محل اضافه كردن وزنه، 4: زائدهی نصب شده روی ضربهزن (که از جلوی سنسور عبور کرده و سرعت ضربه در لحظه اصابت چکش به نمونه ثبت می شود)، 5: ضربهزن، 6: چکش، 7: خطكش، 8: ريلهاى راهنما، 9: موتور بالابر، 10: سرعتسنج (سنسور)، 11: صفحات كلمب (گيره)، 12: نمونه فوم، 13: ضربه گير، 14: نمايش گر سرعت ضربه، 15: اتصال بدنه دستگاه به چاه ارت، 16: آمپلیفایر، 17: سيگنال كانديشنر، 18: اسيلوسكوپ، 19: كامپيوتر.

"شكل 16"، محل نصب سنسور پيزوالكتريك و كرنش سنجها و نيز نحوه اتصال چکش به ضربهزن را نشان میدهد. شمارههای مشخص شده در شکل، عبارتند از: 1: ضربهزن (كوبه سقوط كننده)، 2: سنسور نيرو (سنسور پیزوالکتریک)، 3: تبدیل واسط⁵ (فیکسچر) جهت قرارگیری سنسور نیرو در فاصله بین چکش و کوبه، 4: محل چسباندن کرنش سنجها روی بدنه چکش، 5: فرورونده، 6: نوک نیم کروی شکل (ملحق شده به انتهای چکش).

لازم به ذکر است که در زیر کوبه سقوط کننده، یک زائده تعبیه شده است. قسمت پایین این زائده، درون سنسور نیرو قرار می گیرد و قسمت بالای آزمایش ضربه سقوطی در دفعات بسیار متعدد انجام گرفت. مشاهده شد که مدار لودسل برای آلومینیوم تودهای¹ (و مواد دیگر)، سیگنال خروجی دارد ولى براى فوم آلومينيوم خروجى ندارد. حتى با تغيير مقدار گين² به 100 كه دامنه سیگنال خروجی پل صد برابر میشود، نیز سیگنالی بر روی صفحه اسیلوسکوپ مشاهده نشد.

چکش اولیه، از جنس فولاد و دارای مقطع توپر بود که در اثر نیروی ضربه وارده بر فوم تحریک نمیشد و کرنش بسیار کوچکی در کرنشسنجها ایجاد می شد که توسط سیستم اکتساب دادهها قابل اندازه گیری نبود. بنابراین یک چکش جدید از جنس آلومینیوم و با مقطع توخالی طراحی گردید و مجدداً كرنشسنجها بر روى آن چسبانده شد. مشكل رفع، و آزمايش با موفقيت انجام شد.

"شکل 12"، نمونهای از نتایج حاصل از آزمایش ضربه بر روی فوم توسط چکش جدید را نشان میدهد که این نتایج، توسط مدار لودسل و نیز شتابسنج گزارش شده است (تنظیمات محور عمودی، برای دو سنسور متفاوت می باشد). ملاحظه می شود که خروجی گزارش شده توسط شتابسنج بسیار نویزی میباشد، در حالی که خروجی گزارش شده توسط مدار لودسل یک نمودار صاف و مناسب است که رفتار ضربه را به خوبی نشان مىدھد.

بهمنظور كاليبرهكردن دستگاه و تعيين ضريب تبديل ولتاژ به نيرو، مطابق "شكل 13" آزمايش ضربه سقوطى بر روى يك نمونه فوم انجام شد، که در آن چکش ضارب به طور کامل به درون نمونه نفوذ نکرده و متوقف شده است. با داشتن جرم ضربهزن m و نیز سرعت ضربه در لحظه اصابت چکش به نمونه v_1 (که از روی صفحه سرعتسنج خوانده می شود)، مقدار تغییر تکانه خطی یا مومنتم اعمال شده از رابطه یmv₁ معلوم می شود. سرعت نهایی چکش برابر صفر فرض می شود و لذا مقدار تغییرات سرعت، با مقدار سرعت ضربه در زمان t=0 برابر است.

از سوی دیگر، همان طور که در "شکل 13" مشاهده می شود، نمونه فوم سوراخ نشده است. بنابراین تمام انرژی ضربه و اندازه حرکت، توسط فوم جذب شده است. حال كافي است سطح زير نمودار نيرو- زمان (از زمان شروع ضربه تا زمان پایان ضربه) محاسبه شده و مساوی با تغییرات تکانه اعمالی قرار داده شود، یعنی:



Fig. 12 The output signals reported by load-cell circuit and accelerometer for aluminum foam

شكل 12 خروجى گزارششده توسط مدار لودسل براى فوم آلومينيوم، با استفاده از چکش جدید

224

³ Piezoe lectric Signal Conditioner

Interface

⁶ Indenter

¹ Bulk Aluminum Alloy 2 Gain



Fig. 14 A piezoelectric dynamic force sensor (left) and signal conditioner (right)

شکل 14 نیروسنج پیزوالکتریک (تصویر سمت چپ) و سیگنال کاندیشنر (تصویر سمت _راست)



Fig. 15 A picture of the drop-weight impact testing machine and the data acquisition system (the experimental set up) شکل 15 تصویر دستگاه آزمون ضربه سقوطی و سیستم اکتساب دادهها



Fig. 16 Force sensor and strain gages mounted on the striker شکل 16 سنسور نیرو و کرنش سنجها بر روی چکش جدید (آلومینیومی)

آن که مخروطی شکل است، بر روی سطح بالایی سنسور مینشیند. بنابراین در طی ضربه، سنسور نیرو از هر دو سمت (هم از قسمتی که به کوبه یا ضربهزن متصل است و هم از قسمتی که به چکش متصل است) تحت فشار قرار می گیرد.

4- نتايج و بحث

"شکل 17"، نتایج آزمایشگاهی تغییرات بار (نیروی ضربه) برحسب زمان برای فوم کامپوزیتی A356/SiC_p را نشان میدهد. نتایج نشان داده شده در شکل، نتایج گزارش شده توسط هر دو سنسور (یعنی لودسل طراحی شده براساس پل وتستون و نیروسنج تجاری پیزوالکتریک) میباشد. ضربه به مدت 4.45

میلی ثانیه به طول انجامیده است و در لحظه ms #4.45 ms مقدار نیرو به صغر رسیده است. دادههای پس از آن، زائد بوده و در نتایج بعدی حذف شده است. همان طور که در شکل مشاهده می شود، نتایج دو سنسور (روند تغییرات و نیروی ماکزیمم) با یکدیگر مطابقت دارد. این نشان می دهد که کالیبره کردن کرنش سنجها در مدار لودسل، به درستی انجام شده است. نکته لازم به ذکر در "شکل 17"، نوسانی بودن پاسخ به دست آمده از سنسور پیزوالکتریک می باشد، که علت آن احتمالاً مربوط به وجود ار تعاش در پایه اتصال سنسور به چکش و بدنه می باشد. این اتصال مطابق "شکل 16"، توسط یک ورق ارتجاعی انجام شده که تا حدی باعث ار تعاش شده و نیاز به اصلاح محل اتصال خواهد داشت.

"شكلهاى 18 و 19"، نتايج تغييرات بار (نيروى ضربه) برحسب زمان و بار برحسب تغييرمكان را نشان مىدهند. تغييرمكان جابجا شده توسط نمونه فوم، معادل عمق نفوذ چكش (ضارب) مىباشد. پاسخ ضربه سرعت پايين فوم آلومينيومى م356/SiC_P، مىتواند به سه ناحيه تقسيم شود: 1- ناحيه الاستيک، 2- ناحيه بار پلاتو و 3- ناحيه شكست كامل. در ابتدا نيرو، بهطور اين امر، مقاومت سلولهاى فوم در برابر نفوذ را نشان مىدهد. سپس ناحيه بار پلاتو² مشاهده مىشود. در حقيقت، ساختار سلولى ماده سبب مىشود كه فوم بيتواند قبل از شكست، تغييرشكلهاى پلاستيک را در يک بار تقريباً ثابت (بار پلاتو² مشاهده مىشود. در حقيقت، ساختار سلولى ماده سبب مىشود كه فوم بيتواند قبل از شكست، تغييرشكلهاى پلاستيک را در يک بار تقريباً ثابت (بار پلاتو) تحمل كند و لذا بخش قابل توجهى از انرژى ضربه جذب شده، مربوط به ناحيه پلاتو مىباشد. نهايتاً، نيرو با زمان كاهش يافته و هنگام نفوذ كامل چكش به داخل نمونه فوم، به صفر مىرسد. مقدار بار پلاتو (متوسط مقادير نيرو در ناحيه پلاتو)، برابر با 20 ماد 20 مودسان و برابر با 20 مادى سنسور پيزوالكتريك مىباشد كه 1.8 درصد اختلاف را نشان مىده.

در "شکل 20"، نمودار تغییرات انرژی جذب شده توسط فوم برحسب زمان ضربه نشان داده شده است. با گذشت زمان، انرژی ضربه جذب شده به تدریچ افزایش می یابد، تا این که به یک مقدار حداکثر می رسد. این مقدار حداکثر به عنوان انرژی جذب شده کل توسط فوم آلومینیوم، تلقی می شود و مقدار آن برابر با J 2.044 برای لودسل می باشد؛ این مقدار برای سنسور پیزوالکتریک، برابر J 20.45 است. بنابراین ظرفیت جذب انرژی بر آورد شده توسط دو سنسور، به میزان 7.7 درصد اختلاف دارد. شکستگی منحنی جذب انرژی در مورد سنسور پیزوالکتریک، مربوط به ار تعاشات پایه اتصال سنسور



Fig. 17 The load as a function of time for A356/SiC $_{\rm p}$ composite foam reported by two different sensors

شکل 17 تغییرات نیرو (بار) برحسب زمان برای فوم کامپوزیتی مA356/SiC_p، گزارششده توسط دو سنسور مختلف

225

¹ Initial Peak Load ² Plateau of Load Region



Fig. 18 The load-time history data obtained from the experiment (loadcell and piezoelectric force sensor)

شکل 18 دادههای تجربی نیرو (بار) برحسب زمان مربوط به مدار لودسل و سنسور پیزوالکتریک



Fig. 19 The load versus displacement (impactor penetration depth) شكل 19 تغييرات نيرو برحسب تغييرمكان (عمق نفوذ ضارب)



Fig. 20 The absorbed energy versus time history for aluminum foam شكل 20 نمودار انرژی جذبشده برحسب زمان برای فوم آلومينيوم

می،اشد. حالتهای مختلف تغییرشکل فوم که باعث جذب انرژی در طی ضربه میگردد، شامل خمش و فروپاشی دیوارههای سلول فوم، لهیدگی سلولهای فوم در زیر نوک چکش و نیز پارگی سلولهای پیرامون ضارب می،اشد [11].

همانطور که قبلاً ذکر شد، چکش ضارب بهطور کامل به درون نمونه فوم نفوذ کرده، نمونه سوراخ شده و پلاک برشی نیز مشاهده میشود (شکل 6). بنابراین انرژی جذب شده توسط فوم از انرژی ضربه اعمالی (105 ژول) کمتر است. در حقیقت انرژی ضربه اضافی که توسط فوم جذب نمیشود، در ضربهزن باقی میماند، همچنان که چکش نفوذکننده بعد از صفحه فومی

جابجا میشود¹.

گفته شد که پاسخ ضربه فوم A356 دارای سه مرحله است (شکل 18). در منحنی "شکل 20" ملاحظه می شود که نرخ انرژی جذب شده² توسط فوم، در مرحله اول (ناحیه الاستیک) افزایش می یابد، در مرحله دوم (ناحیه پلاتو) ثابت است و در مرحله سوم (شکست فوم) کاهش می یابد.

در جدول 3 اطلاعات بهدست آمده از اندازه گیریهای آزمایشگاهی (مربوط به مدار لودسل)، شامل زمان، تغییر مکان چکش، نیروی ضربه و انرژی جذب شده در نقاط خاصی از نمودار نیرو - زمان ارائه شده است. این نقاط عبارتند از: 1- نقطه پایان ناحیه الاستیک و شروع ناحیه پلاتو، 2- نقطه پایان ناحیه پلاتو و شروع ناحیه شکست، 3- نقطه پایان آزمایش که در آن، ضربه به اتمام رسیده و نیرو برابر با صفر میشود. مرحله اول یعنی ناحیه الاستیک، طی مدت 1.36 میلی ثانیه طول می کشد. بار پیک اولیه که در زمان پلاتو) که در آن، چکش ضارب در فوم تغییرشکل ایجاد می کند در زمان پلاتو) که در آن، چکش ضارب در فوم تغییرشکل ایجاد می کند در زمان میل ثانیه به طول می انجامد. در لحظهای که مرحله سوم آغاز می شود (in altic sec)، نرخ انرژی جذب شده شروع به کاهش یافتن می کند. این، یعنی آن که مقاومت سلولهای فوم در برابر نفوذ، روبه زوال می ود و در نتیجه، مقدار نیرو کاهش یافته تا در نهایت به صغر برسد.

همچنین با توجه به جدول 3، ناحیه بار پلاتو در تغییرمکان 8.81 mm شروع و در تغییرمکان 12.87 mm بایان مییابد. بنابراین یک ناحیه پلاتو با 4.06 mm ناحیه الاستیک برابر با 5.07 (%27.5)، در ناحیه پلاتو برابر با 6.58 J ناحیه الاستیک برابر با 5.07 (%27.5)، در ناحیه پلاتو برابر با 29.9% (%29.9) و در ناحیه شکست برابر با 5.99 (%42.6) می،اشد که در مجموع، 22.04 ژول انرژی توسط ماده جذب شده است.

در "شکل 21"، نتایج کار حاضر با نتایج تجربی گزارش شده توسط موهان و همکاران [11] مقایسه شده است. در این شکل، نمودار تغییرات نیرو برحسب زمان و انرژی جذب شده برحسب زمان، برای فوم آلومینیوم با ضخامت های مختلف 20 mm 30 و mm 40 تحت ضربه سقوطی نشان داده شده است. ضخامت فوم در کار حاضر، برابر با 20 mm 20 می باشد. مقیلس محورها طوری در نظر گرفته شده که مقایسه دو نمودار، بهتر صورت گیرد. ملاحظه می شود که زمان ضربه، تقریباً در هر دو نمودار یکسان می باشد. نکته حائز اهمیت در "شکل 21"، هم خوانی رفتار ماده در دو نمودار (کار حاضر و کار موهان) می باشد. همچنین پاسخ به دست آمده برای ماده فوم مطالعه شده در کار حاضر، یک پاسخ پایدار³ و کمنوسان (حداکثر با %5.8 نوسان)

A356/SiC_p حدول 3 اطلاعات بهدست آمده از آزمایش ضربه برای فوم کامپوزیتی A356/SiC_p Composite foam Table 3 The impact test data for A356/SiC_p composite foam

	در نقطه پایان	در نقطه پایان ناحیه	د. بابان
كميت	ناحيه الاستيك و	پلاتو و شروع ناحيه	کر پیں
	شروع ناحيه پلاتو	شكست	صربه
زمان (ms)	1.36	2.01	4.45
تغييرمكان (mm)	8.81	12.87	27.5
نيرو (kN)	1.56	1.56	0
انرژی (J)	6.07	12.65	22.04

¹ Moves Past the Foam Plate

² The Rate of Energy Absorbed by the foam

³ Stable Response



Fig. 21 Comparison of absorbed energy and load versus time for aluminum foam under impact loading: (A) results reported by Mohan et al. [11], (B) results of this work

شکل 21 مقایسه انرژی جذبشده و نیرو برحسب زمان برای فوم آلومینیوم تحت بار ضربهای: (الف) نتایج گزارش شده توسط موهان و همکاران [11]، (ب) نتایج کار حاضر

میباشد. موارد ذکرشده، بر قابل اطمینان بودن خروجی ماشین ضربه دلالت دارد.

ماده بررسی شده در کار موهان و همکاران [11]، یک فوم آلومینیوم معمولی و فاقد ذرات SiC میباشد؛ اما ماده بررسی شده در تحقیق حاضر، فوم آلومینیوم A356 تقویت شده با ذرات SiC (فوم کامپوزیتی (A356/SiC_p) میباشد. بنابراین با توجه به "شکل 21"، مقدار بار پلاتو و نیز نظرفیت جذب انرژی در ماده بررسی شده در کار حاضر بیشتر است (به دلیل وجود ذرات SiC در ماده). لی و همکاران [23]، نیز خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم A356 تقویت شده توسط ذرات SiC را در شرایط بارگذاری استاتیکی مطالعه نمودند. نتایج آنها نشان داد که افزودن ذرات SiC بهطور قابل ملاحظهای باعث افزایش استحکام تسلیم¹ ماده (با %00 افزایش) میگردد. مقایسه نمودارهای نیرو- زمان در فوم آلومینیوم بدون SiC (کار موهان) و فوم آلومینیوم با SiC (کار حاضر) در "شکل 21"، نشان میدهد که برای ماده مطالعه شده در کار حاضر) در "شکل 21"، نشان میدهد

5- نتیجه گیری

در کار حاضر، نمونههای فوم کامپوزیتی آلومینیوم A356/SiC_P، با استفاده از روش ذوبی به کمک عامل فومساز تولید شد. دستگاه آزمون ضربه سقوطی، براساس استانداردهای موجود طراحی، ساخته و کالیبره شد. سپس رفتار

1 Yield Strength

نمونههای فومی تحت ضربه سقوطی با سرعت پایین، به طور تجربی بررسی شد.

کالیبره کردن دستگاه آزمایش ضربه اولاً بر روی همان ماده مورد مطالعه (فوم کامپوزیتی مA356/SiC) اجرا شده و ثانیاً مطابق با شرایط آزمایش ضربه که بر روی نمونههای اصلی انجام گرفته، می باشد. با توجه به این که در کار حاضر، رفتار دینامیکی ماده فوم بررسی گردیده است، لذا انجام کالیبراسیون به صورت دینامیکی و مطابق شرایط ذکرشده در فوق، اکیداً توصیه می شود.

به منظور ثبت دادههای نیرو در طی زمان ضربه، از سه سنسور مختلف (شتاب سنج، لودسل و سنسور پیزوالکتریک) استفاده شد. به دلیل نویزی بودن سیگنال گزارش شده توسط شتاب سنج، مدار لودسل جهت دستگاه ضربه طراحی و نصب گردید. با توجه به عدم گزارش ولتاژ توسط مدار لودسل (برای آزمایش ضربه بر روی فوم)، جنس و مقطع چکش اصلاح گردید و مجدداً کرنش سنجها بر روی چکش جدید چسبانده شد. مشکل رفع، و آزمایش با موفقیت انجام شد.

نتایج حاصل از لودسل طراحی شده براساس پل وتستون، با نتایج بهدست آمده از سنسور تجاری پیزوالکتریک (نیروسنج دینامیکی) مقایسه و صحتسنجی شد. مقدار بار پلاتو (متوسط مقادیر نیرو در ناحیه پلاتو) و انرژی جذب شده توسط فوم، به ترتیب برابر با 1.62 kN و 22.04 توسط لودسل و برابر با 1.65 kN و 20.45 توسط سنسور پیزوالکتریک برآورد شده است که در مقایسه با یکدیگر، 1.8 و 7.7 درصد اختلاف را نشان می دهد.

بهدست آوردن یک پاسخ ضربه کمنوسان (حداکثر با %5.8 نوسان) و پایدار برای ماده فوم و نیز همخوانی رفتار ماده با نتایج مقالات دیگر، دلالت بر طراحی مناسب ماشین و خروجی قابل اعتماد آن دارد. مقایسه با نتایج محققان دیگر، نشان داد که بهدلیل وجود ذرات سرامیکی تقویت کننده SiC (کاربید سیلیسیم) در ماده زمینه فوم، مقدار استحکام پلاتو و نیز ظرفیت جذب انرژی ماده (در کار حاضر) بیشتر است. بنابراین افزودن ذرات SiC میتواند به عنوان یک رویکرد مناسب و با هدف بهبود خواص مکانیکی فوم و افزایش مقاومت به ضربه آن، مورد بررسی قرار گیرد. این رویکرد، به خصوص زمانی اهمیت دارد که از فوم آلومینیوم، در کاربردهای جذب انرژی استفاده شود.

نتایج آزمایش نشان داد که پاسخ ضربه فوم آلومینیومی (نمودار تغییرات نیرو برحسب زمان)، شامل سه مرحله است: رفتار خطی یا الاستیک، محدوده بار پلاتو و ناحیه شکست فوم. در نمودار جذب انرژی فوم نیز، این سه مرحله مشاهده میشود که در آن نرخ انرژی جذب شده، به ترتیب افزایش می یابد، ثابت است و کاهش می یابد. این رفتار ماده دلالت بر آن دارد که در مرحله اول فوم در مقابل ضربه مقاومت می کند، در مرحله دوم در فوم تغییرشکل پلاستیک ایجاد می شود و در مرحله سوم مقاومت فوم در برابر ضربه کاهش یافته تا اینکه نهایتاً شکست ماده اتفاق می افتد. بنابراین می توان گفت که رفتار جذب انرژی فوم نسبت به زمان، به صورت تجمعی می باشد. به بیان دیگر، در هر مرحله و به تدریج، میزان جذب انرژی با زمان افزایش یافته تا اینکه به حداکثر مقدار خود برسد.

رفتار مکانیکی فوم مA356/SiC_p تحت ضربه نشان داد که این ماده سلولی، انتخاب مناسبی در طراحی جاذبهای انرژی میباشد. در ناحیه پلاتو، فوم میتواند تغییرشکلهای پلاستیک را در یک بار تقریباً ثابت تحمل نماید. برای فوم با ضخامت 20 mm که در پژوهش حاضر بررسی شده است، 30 درصد از کل انرژی جذب شده مربوط به ناحیه پلاتو میباشد. مسلماً استفاده response of a closed-cell aluminum foam at high strain rate, *Scripta Materialia*, Vol. 54, No. 4, pp. 533-537, 2006.

- [10] J. Gassan, W. Harwick, D. Girlich, Behavior of aluminum foams under quasi-static and crash loadings, *Journal of Materials Science Letters*, Vol. 20, No. 11, pp. 1047-1048, 2001.
- [11] K. Mohan, T. H. Yip, S. Idapalapati, Z. Chen, Impact response of aluminum foam core sandwich structures, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 529, pp. 94-101, 2011.
- [12] J. U. Cho, S. J. Hong, S. K. Lee, C. Cho, Impact fracture behavior at the material of aluminum foam, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 539, pp. 250-258, 2012.
- [13] G. Castro, S. R. Nutt, X. Wenchen, Compression and low-velocity impact behavior of aluminum syntactic foam, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 578, pp. 222-229, 2013.
- [14] M. S. Han, S. O. Bang, J. U. Cho, S. Lee, C. Cho, Experimental study on the impact characteristics of a sandwich composite with an aluminum foam core, *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 14, No. 1, pp. 61-66, 2013.
- [15] C. Hosun, C. Jaeung, Damage and penetration behavior of aluminum foam at various impacts, *Journal of Central South University*, Vol. 21, No. 9, pp. 3442-3448, 2014.
- [16] S. Ramachandra, P. Sudheer Kumar, U. Ramamurty, Impact energy absorption in an Al foam at low velocities, *Scripta Materialia*, Vol. 49, No. 8, pp. 741-745, 2003.
- [17] L. Peroni, M. Avalle, M. Peroni, The mechanical behaviour of aluminium foam structures in different loading conditions, *International Journal of Inpact Engineering*, Vol. 35, No. 7, pp. 644-658, 2008.
- [18] M. Zia Shamami, M. H. Pol, H. Khodarahmi, Experimental investigation of ballistic properties of aluminum foam structure, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 3, pp. 22-27, 2013. (in Persian) (فارسی)
- [19] M. Choubini, Gh. H. Liaghat, M. H. Pol, Investigation of energy absorption and deformation of thin walled tubes with circle and square section geometries under transverse impact loading, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 75-83, 2015. (in Persian (فارسی)
- [20] M. Malekjafarian, S. K. Sadrnezhaad, Closed-cell Al alloy composite foams: Production and characterization, *Materials & Design*, Vol. 42, pp. 8-12, 2012.
- [21] American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for High Speed Puncture Properties of Plastics Using Load and Displacement Sensors, ASTM D 3763, 2002.
- [22] K. Hoffmann, An Introduction to Stress Analysis and Transducer Design using Strain Gauges, The definitive work on strain gauge measurement, pp. 126-209, HBM, 2011.
- [23] X. Li, Y. Yang, D. Weiss, Ultrasonic cavitation based dispersion of nanoparticles in aluminum melts for solidification processing of bulk aluminum matrix Nano-composite: Theoretical study, Fabrication and characterization, *American Foundry Society Transactions*, Vol. 133, No. 2, pp. 1-12, 2007.

از فوم با ضخامتهای بیشتر، منجر به بروز ناحیه پلاتو طولانیتر و افزایش ظرفیت جذب انرژی ماده خواهد شد.

با توجه به عدم وجود دادههای آزمایش ضربه بر روی فوم A356/SiC_p، از نتایج این پژوهش میتوان جهت توسعه مواد کامپوزیتی پیشرفته در کاربردهای صنعتی استفاده کرد.

6- تقدير و تشكر

نویسندگان این مقاله، مراتب سپاس و قدردانی خود را از آقای دکتر سید حجت هاشمی، بابت در اختیار قراردادن تجهیزات آزمایشگاه ضربه و نیز همکاری بیدریغ ایشان در انجام آزمایشها ابراز میدارند.

7- مراجع

- H. Ahmadi, Gh. H. Liaghat, M. M. shokrieh, Experimental investigation of fabrication parameters' effects on the mechanical properties of epoxy/ceramic microballoon syntactic foams, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 2, pp. 47-54, 2014. (in Persian (فارسی))
- [2] M. F. Ashby, A. G. Evans, N. A. Fleck, L. J. Gibson, J. W. Hutchinson, H. N. G. Wadley, *Metal Foams: a Design Guide*, Boston, Butterworth: Heinemann, 2000.
- [3] J. Banhart, Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams, *Progress in Materials Science*, Vol. 46, No. 6, pp. 559-632, 2001.
- [4] N. Michailidis, F. Stergioudi, A. Tsouknidas, Deformation and energy absorption properties of powder-metallurgy produced Al foams, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 528, No. 24, pp. 7222-7227, 2011.
- M. Alizadeh, M. Mirzaei-Aliabadi, Compressive properties and energy absorption behavior of Al-Al₂O₃ composite foam synthesized by spaceholder technique, *Materials & Design*, Vol. 35, pp. 419-424, 2012.
 T. Mukai, H. Kanahashi, T. Miyoshi, M. Mabuchi, T. G. Nieh, K. Higashi,
- [6] T. Mukai, H. Kanahashi, T. Miyoshi, M. Mabuchi, T. G. Nieh, K. Higashi, Experimental study of energy absorption in a close-celled aluminum foam under dynamic loading, *Scripta Materialia*, Vol. 40, No. 8, pp. 921-927, 1999.
- [7] V. S. Deshpande, N. A. Fleck, High strain rate compressive behaviour of aluminium alloy foams, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 24, No. 3, pp. 277-298, 2000.
- [8] K. A. Dannemann, J. Lankford Jr, High strain rate compression of closed-cell aluminium foams, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 293, No. 1-2, pp. 157-164, 2000.
- [9] T. Mukai, T. Miyoshi, S. Nakano, H. Somekawa, K. Higashi, Compressive