ماهنامه علمى پژوهشى



mme.modares.ac.ir

بررسی تأثیر عملیات حرارتی بر پاسخ ضربه فوم آلومینیوم با رویکرد تحلیل آماری

$^{2^{*}}$ حسين فراهت 1 سيديوسف احمديير وغنى

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

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

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

چکیدہ	طلاعات مقاله
ب م در مقاله حاضر، اثر عملیات حرارتی بر رفتار ضربه فوم آلومینیوم A356 تقویتشده توسط ذرات SiC، مورد مطالعه قرار گرفته و نتایج جدیدی تولید شد. ماده فومی با استفاده از روش ذوبی به کمک عامل فومساز CaCO ساخته شد. بر تعدادی از نمونههای فوم، عملیات حرارتی T6 انجام شد. آزمایش ضربه سقوطی با استفاده از یک ضارب نیم کروی و با سرعت 6.70 m/s، بر پنج نمونه فوم عملیات حرارتی شده و پنج نمونه فوم بدون عملیات حرارتی انجام شد و نمودار تغییرات نیرو برحسب زمان بهدست آمد. پاسخ ضربه بهدستآمده برای فوم کمپوزیتی را A356/SiC _p ، شامل سه ناحیه الاستیک، بار پلاتو و شکست است؛ فوم در ناحیه پلاتو میتواند تغییرشکلهای پلاستیک را در یک بار تقریبا تابت تحمل کند. مقادیر کم انحراف استاندارد و ضریب پراکندگی (برای پارامترهای مختلف) در تحلیل آماری دادهها، دلالت بر قابل اعتماد بودن تابت تعمل کند. مقادیر کم انحراف استاندارد و ضریب پراکندگی (برای پارامترهای مختلف) در تحلیل آماری دادهها، دلالت بر قابل اعتماد بودن تابع بددستآمده از آزمایش و نکیه بر این نتایج جهت تحلیل کمی آنها دارد. نتایج نشان داد که عملیات حرارتی انجام شد. بار پلاتو به میزان 41.1% و نیز افزایش ظرفیت جذب انرژی فوم به میزان 40.0% میشود، همچنین طول ناحیه پلاتو در اثر عملیات حرارتی عملیات حرارتی با توجه به بهبود قابل توجه خواص مکانیکی فوم و افزایش مقاومت به ضربه آن میتواند به عنوان یک اید کاهش می یاید. در ایم معلیات حرارتی با توجه به بهبود قابل توجه خواص مکانیکی فوم و افزایش مقاومت به ضربه آن میتواند به عنوان یک ایده	قاله پژوهشی کامل ریافت: 24 مرداد 1395 نیرش: 30 مرداد 1395 نید <i>واژگان:</i> وم کامپوزیتی A356/SiC _P فتار ضربه ملیات حرارتی حلیل آماری
مناسب در کاربردهای صنعتی فوم آلومینیوم مفید و مؤثر واقع شود.	

Effect of heat treatment on the impact response of aluminum foam with consideration of statistical analysis

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

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper Received 14 August 2016 Accepted 20 August 2016 Available Online 09 October 2016

Keywords: A356/SiCp composite foam Impact behavior Heat treatment Energy absorption Statistical analysis

ABSTRACT

In this paper, the effect of heat treatment on the impact behavior of A356 aluminum alloy foams reinforced by SiC particles was studied and new results were generated. The foam was manufactured by direct foaming of melts with blowing agent CaCO3. A number of foam specimens were processed by T6 aging treatment. The drop-weight impact test with a hemispherical striker tip and velocity of 6.70 m/s was carried out on five untreated foam specimens and five heat-treated foam specimens, and the load versus time history data was obtained. The obtained impact response of A356/SiCp composite foam includes three stages: an elastic region, a plateau of load region and complete failure region. In plateau region, the plastic deformations can be tolerated by the foam at nearly constant load. The small amounts of standard deviation and coefficient of variation (for different parameters) obtained from statistical analysis of experimental data indicates the reliance on the results for quantitative analysis of them. The measurements showed that heat treating of Al foam results in an increase of the plateau load level and energy absorption capacity of the foam with 48.1% and 40.3% increase respectively. The length of plateau region is also decreased due to heat treatment. Regarding the significant improvement of mechanical properties of the foam and increase of its impact strength, the heat treatment after foam casting can be considered as a suitable approach for various industrial applications of aluminum foam.

1- مقدمه

نمایند و به طور گسترده به عنوان جاذب انرژی انتخاب، طراحی و مورد استفاده قرار مه،گیرند. با توجه به کاربرد وسیع فوم آلومینیوم در صنایع مختلف از جمله صنایع خودرو، هوافضا و کشتیسازی، اطلاع از رفتار مکانیکی این مواد به خصوص تحت بار دینامیکی ضروری است. شکل 1 نمونهای از کاربردهای عملي فوم آلومينيوم را نشان مي دهد كه از آن به عنوان ماده هسته براي حفاظ اطراف پل و یا ضربه گیر وسایل نقلیه استفاده می شود [3-1].

اهمیت استفاده از سازههای سبک و در عین حال با استحکام بالا سبب شده تا فومهای فلزی¹ و بهویژه فومهای آلومینیوم مورد توجه خاص بسیاری از محققان قرار گیرد. این مواد سلولی با تغییرشکل پلاستیک بزرگ تحت بارگذاری استاتیکی و یا دینامیکی میتوانند انرژی قابل ملاحظهای را جذب

1 Metal Foams

Please cite this article using: H. Farahat, S. Y. Ahmadi Brooghani, Effect of heat treatment on the impact response of aluminum foam with consideration of statistical analysis, *Modares Mechanical* Engineering, Vol. 16, No. 10, pp. 199-206, 2016 (in Persian)



برای بررسی رفتار دینامیکی فوم آلومینیوم روشهای آزمایش میله فشاری اسپلیت- هاپکینسون¹ و آزمایش ضربه سقوطی² استفاده میشود. در مطالعات پیشین با استفاده از آزمون اسپلیت- هاپکینسون، فومهای آلومینیومی تحت فشار دینامیکی با نرخ کرنش بالا آزمایش شده و اساسا 5 حساسیت یارامترهای مختلف (مانند تنش یلاتو 8 و مدول 4) به نرخ کرنش بررسی شده است [7-4] تا از قابلیت جذب انرژی بالای آنها برای کاربردهای عملی استفاده شود. موکائی و همکاران [7,4]، به مطالعه آزمایشگاهی یاسخ فشاری و نیز جذب انرژی فوم آلومینیوم سلول بسته آلیوراس⁶ تحت بارگذاری در نرخ کرنش ¹-2500s یرداختند و مشاهده کردند که کرنش سختی⁷ در طی فشار ديناميكي اتفاق مي افتد. آنها نتايج بهدست آمده را با خواص مكانيكي فوم در نرخ کرنش شبهاستاتیکی⁸ (s⁻¹0.001) مقایسه کرده و وابستگی قابل ملاحظه تنش تسلیم ماده به نرخ کرنش اعمالی را نشان دادند. ایشان گزارش کردند که جذب انرژی فوم در نرخ کرنش ¹-2500s به میزان %50 بیشتر از نرخ كرنش ¹-0.001s است. دشيند و فلك [5] با انجام آزمون ضربه اسپليت-هاپکینسون، رفتار فشاری دو نوع فوم آلومینیوم (آلولایت⁹و دوسل¹⁰) را در نرخ کرنشهای مختلف بررسی کردند و دریافتند که تنش پلاتو و کرنش فشردگی¹¹ تقریبا به نرخ کرنش حساس نیست¹²؛ اما به چگالی فوم وابسته است. دلیل اختلاف نتایج موکائی و همکاران با نتایج دشیند و فلک با توجه به گزارش دنمن و لنكفورد [6] مربوط به تفاوتهای ماده و فرآیند تولید آن (ریختگی¹³ و متالورژی پودر¹⁴) است، همچنین اثرات نرخ کرنش به جریان سیال (هوا) از طریق دیوارههای سلول گسیخته شده ارتباط دارد و می تواند توسط عواملى مانند شكل سلول، اندازه و توزيع سلولها، نسبت ابعاد ديواره سلول¹⁵ و یکنواختی پروفیل مقطع دیواره سلول¹⁶ کنترل شود.

آزمون ضربه سقوطى يک روش کلاسيک براى بررسى رفتار ديناميکى مواد در نرخ کرنش های به نسبت پایین (ε < 1000 s⁻¹) است. برخی از محققان رفتار فوم آلومينيوم تحت ضربه سرعت يايين را با استفاده از اين



Fig. 1 Example of practical applications of aluminum foam [3] شكل 1 مثال از كاربردهاي عملي فوم آلومينيوم [3]

- Strain Rate Sensitivity
- Alporas
- Strain Hardening
- Quasi-static Strain Rate
- 9 Alulight 10 Duocel
- 11 Densification Strain
- ² Insensitive 13 Casting
- ¹⁴ Powder Metallurgical
- ¹⁵ Cell Wall Aspect Ratio
 ¹⁶ Uniformity of Wall Section Profile

روش بررسى كردهاند [11-8,3]. آن ها براى انجام آزمون ضربه از ماشين اینسترون دایناتاپ¹⁷ استفاده کردهاند. نتایج آنها بیانگر مقاومت فوم در برابر بار ضربهای و نیز انرژی جذب شده توسط فوم در طی زمان ضربه است. موهان و همكاران [8]، رفتار ضربه ساختارهای ساندویچی با هسته فوم آلومینیوم¹⁸ و یوشش یک ورقه¹⁹ را بررسی کردند. آنها برای ماده ورقه (یوسته)، سه جنس مختلف را انتخاب کردند: کامپوزیت پلیمری تقویتشده با فیبر کربن²⁰، آلیاژ آلومینیوم و فولاد. نتایج آنها نشان داد که جنس ورقه بر جذب انرژی و حالت شکست ماده تأثیر می گذارد. نمونه با ورقه فولادی تقریبا تمام انرژی ضربه را جذب میکند و در مقایسه با نمونههای دیگر بهترین انتخاب برای جاذب انرژی است. مقاومت ماده فومی در برابر ضربه، ناشی از خمش و فروپاشی دیوارههای سلول فوم، لهیدگی سلولها در زیر نوک چکش ضارب و نیز پارگی سلول های پیرامون ضربه زننده است. چو و همکاران [9] به مطالعه و بررسی رفتار آسیب، تاریخچه بار ضربهای و انرژی تلفشده هنگام نفوذ²¹ در فوم آلومينيوم تحت ضربه سقوطى كمسرعت پرداختند (ماده فومى با اتلاف انرژی جنبشی ضربهزن بهعنوان جاذب انرژی عمل میکند). نتایج آنها نشان داد که در شرایط انرژی ضربه یکسان مقدار انرژی جنبشی تلفشده توسط فوم به ازاء جرم ضربهزن²² بزرگتر و سرعت ضربه کوچکتر، بیشتر است. آنها پیشنهاد دادند که انجام آزمون ضربه با جرم کمتر و سرعت بیشتر جهت برآورد حداقل میزان جذب انرژی فوم به دلیل اجتناب از حالت تغییر شکل خمشی²³ مناسبتر است. کاسترو و همکاران [10]، رفتار ضربه سرعت پایین فوم آلومینیوم را مطالعه کردند. آنها تأثیر پارامترهای جنس ماده زمینه فوم (آلياژ آلومينيوم 1100 و 6061)، اندازه سلول²⁴ (mm 4.45 mm) و نیز اثر افزودن ورقه فلزی²⁵ به فوم را بررسی کردند. نتایج بررسی آنها نشان داد که فوم آلومینیوم 1100 نسبت به فوم آلومینیوم 6061 در برابر ضربه مقاومتر است، همچنین اندازه سلول فوم بر میزان جذب انرژی ماده تأثیر جندانی ندارد. استفاده از یوشش ورقه فلزی نیز به طور قابل ملاحظهای ظرفیت جذب انرژی فوم را افزایش میدهد. هان و همکاران [11] مشخصات ضربه²⁶ پنلهای ساندویچی با هسته فوم آلومینیوم را تحت انرژیهای ضربه مختلف (J 50 J 50 و J 100) به صورت آزمایشگاهی مطالعه کردند. نتایج آنها نشان داد که بار حداکثر²⁷ در تمام آزمایشها موقعی اتفاق میافتد که ضربهزننده به ورقه بالایی²⁸ نفوذ می *ک*ند. با افزایش انرژی ضربه زمانی که در آن بار حداکثر اتفاق می افتد کوتاهتر می شود. هوسانگ و ژائونگ [3] رفتار نفوذ و آسیب فوم آلومینیوم را در انرژیهای مختلف ضربه بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که انرژی جذب شده با عمق نفوذ چکش ضارب به درون فوم متناسب است و میزان جذب انرژی فوم با افزایش انرژی ضربه اعمال شده بیشتر می شود.

کارائی فوم آلومینیوم میتواند با دو ایده مختلف بهبود یابد: 1- تغییر در مورفولوژی فوم²⁹ (شکل و اندازه سلولها)، 2- تغییر در حالت متالورژیکی فلز زمینه³⁰ به کمک عملیات حرارتی [12]. مطالعات بسیار محدودی در مورد اثر

- ²⁰ Carbon Fiber Reinforced Polymer Composite
- ²¹ Dissipated Energy for Penetration ²² The Total Mass of the Impactor
- 23 Bending Deformation Mode
- 24 Cell Size
- ²⁵ Adding the Face Sheet
- 26 Impact Characteristics 27 Maximum Load
- 28 Upper Face Sheet
- ²⁹ Foam Morphology
- 30 Matrix Metal

Split-Hopkinson Pressure Bar

Drop Weight Impact Experiment Plateau Stress

Modulus

 ¹⁷ Instron Dynatup
 ¹⁸ Aluminum Foam Core Sandwich Structures

¹⁹ Face Sheet

2.6×10³ s⁻¹

10

1.2

0.8 .oad (kN

0.4

0

1x10³s⁻¹

1.5 x 10³ s⁻¹

2.6 x 10³ s⁻¹

20

30

Strain (%)

0 mm

20

Displacement (mm)

10

(A)

20

15

10

5

0

stress (MPa)



(استحکام دینامیکی و جذب انرژی ماده) در اثر عملیات حرارتی است. مقاله حاضر تأثير عمليات حرارتي بر پاسخ ضربه سرعت پايين فوم آلومینیوم را گزارش می کند. ماده خاص (جدید) مورد مطالعه فوم کامیوزیتی آلومينيوم A356 تقويتشده توسط ذرات كاربيد سيليسيم SiC (A356/SiC_p) است. روش تولید ماده روش ذوبی است که در آن از پودر كربنات كلسيم CaCO₃ بهعنوان عامل فومساز استفاده شده است. عمليات حرارتی استاندارد T6 بر تعدادی از نمونههای فوم انجام گرفته است. رفتار نفوذ⁸ نمونههای فوم عملیات حرارتی شده و نمونههای فوم بدون عملیات حرارتی با انجام آزمایش بررسی و تغییرات نیروی ضربه برحسب زمان و نیز ظرفیت جذب انرژی آنها با یکدیگر مقایسه شده است. بر خلاف کارهای محققان پیشین، در مقاله حاضر نتایج آزمایش ضربه برای همه نمونههای فوم گزارش شده و به تحلیل آماری دادههای آزمایش پرداخته شده است. تاکنون نتایج گزارش شدهای در مورد بررسی تأثیر عملیات حرارتی بر رفتار نفوذ فوم آلومینیوم منتشر نشده است. محققین پیشین تأثیر عملیات حرارتی را بر رفتار لهیدگی فوم آلومینیوم مطالعه کردهاند. رفتار نفوذ و لهیدگی فوم تحت بارگذاری ضربهای در شکل 2 مقایسه شده است. شکل الف، نمودار تنش-كرنش فوم تحت فشار ديناميكي را نشان ميدهد. ملاحظه مي شود كه از کرنش بیش از 40% به دلیل فشردگی سلولهای فوم مقدار تنش به شدت افزایش می یابد. در شکل ب نمودار نیرو- تغییر مکان (نیرو برحسب عمق نفوذ چکش ضارب) برای فوم تحت ضربه سقوطی نشان داده شده است. پس از مرحله تغییرشکل پلاستیک فوم (که توسط ضربهزن ایجاد می شود) با پیشروی بیشتر ضارب به درون فوم، مقاومت ماده در برابر نفوذ كاهش يافته و نيرو به سرعت کاهش می یابد تا به صفر برسد.

1	Oper	ı	Cel	1	
2				_	

- Crushing Behavior Aging Treatment (Age Hardening)
- Solution
- Dynamic Test at High Strain Rates
- Heat-treated Untreated
- 8 Penetration Behavior



1×10³ s⁻¹

40

1.5×103 s-1

50

20 mm

30 mm

40 mm

40

40 mm

30

30 mm

60

Fig. 2 Comparison of impact response of aluminum foam: (A) crushing behavior of the foam with different strain rates [13], (B) penetration behavior of the foam with different thicknesses [8] شکل 2 مقایسه پاسخ ضربه فوم آلومینیوم: الف- رفتار لهیدگی فوم با نرخ کرنشهای

(B)

در پژوهش حاضر برای تولید فوم آلومینیوم از روش ذوبی به کمک عامل فومساز⁹ استفاده شد که در آن اندازه سلولها و توزیع چگالی موضعی فوم در مقایسه با سایر روشهای تولید همگن تر¹⁰ است. از آلیاژ آلومینیوم ریختگی A356 با تركيب شيميايي جدول 1 بهعنوان فلز پايه¹¹ استفاده شد. ذرات کاربید سیلیسیم SiC (به مقدار 5% وزنی) به منظور تقویت ماده زمینه فوم به درون مذاب آلومینیوم در دمای °680 اضافه و همزده شد. در مرحله بعد درصد وزنى پودر كربناتكلسيم CaCO₃ بهعنوان عامل فومساز به مذاب كامپوزيتى Al/SiCp افزوده شد. بلافاصله، عمل فومشدن آغاز و با خروج همزن از داخل قالب تكميل شد. شكل 3 تصوير ميكروسكوپ الكتروني روبشی ذرات SiC و CaCO₃ را نشان میدهد.

شكل 4 تصوير SEM از نمونه فوم توليدشده با چگالى نسبى 0.185 را

A356	الومينيوم	يى الياژ	شيميا	کيب	ا تر	ول
magnition o	f 1256	1				

Al Mn Zn	Ti	Cu	Fe	Mg	Si	0.0
D 0.01 0.02						عنصر
Rem. 0.01 0.02	0.07	0.09	0.19	0.35	6.81	درصد وزنی

⁹ Direct Foaming Route of Melt using foaming agent

¹⁰ Homogeneous ¹¹ Matrix Metal

²⁰¹

(a) الف





Fig. 3 SEM micrograph of (a) SiC particles and (b) CaCO₃ powder شكل 3 تصاوير SEM از الف- ذرات SiC، ب- پودر SiC3

نشان میدهد (منظور از چگالی نسبی¹، نسبت چگالی فوم به چگالی فلز پایه آلومینیوم است). جزئیات بیشتر در مورد مواد استفادهشده، روش تولید فوم کامپوزیتی A356/SiC_pو شرایط ریخته گری گردابی² در مرجع [16] توسط نویسندگان توضیح داده شده است.

در شکل 5 تصویری از فوم ساخته شده نشان داده شده است. محصول فوم متخلخل بەدستآمدە، یک فوم نسبتا همگن، دارای ساختار سلول بسته³ و با قابلیت چکشخواری⁴ بوده که انتخاب مناسبی بهعنوان جاذب انرژی ضربه است. اندازه سلولها (مقدار متوسط) برابر با 3 mm، دانسیته نهایی فوم برابر با $9.5~{
m gr/cm^3}$ و درصد تخلخل 5 برابر با 81% است (درصد تخلخل فوم برابر است با $\rho_{\rm f}/\rho_{\rm Al}$ و $\rho_{\rm Al}$ به ترتیب چگالی فوم و چگالی برابر است با آلومينيوم يعنى ماده زمينه فوم است). محصول فومى به نمونههايى به ابعاد 100 mm×100 mm×20 mm برش داده شد و جهت انجام عمليات حرارتي و آزمایش ضربه آماده شد.

2-2- عمليات حرارتي فوم

در مورد شرایط عملیات حرارتی فوم آلومینیوم میتوان از مراجع استاندارد موجود براي آلياژ آلومينيوم غيرمتخلخل⁶ با همان تركيب شيميايي استفاده كرد [18,17]. در كار حاضر از هندبوك ASM [20,19] استفاده شد و پارامترهای عملیات حرارتی ⁷T6 برای آلیاژ آلومینیوم ریختگی ⁸A356 استخراج شده و برای فوم آلومینیوم A356 به شرح ذیل اجرا شد: ابتدا بر

نمونههای فوم، عملیات انحلال 9 در دمای 2 540 به مدت 12 ساعت انجام شد و سپس نمونهها در آب کونچ¹⁰ شدند. در مرحله بعد نمونهها تحت عملیات ییرسازی 11 در دمای 3 155 به مدت 5 ساعت قرار گرفتند.

3-2- آزمايش ضربه

براساس استاندارد ASTM D 3763 [21]، آزمون ضربه سقوطى كمسرعت بر نمونههای فوم آلومینیوم A356/SiCp انجام شد. جزئیات مربوط به طراحی، ساخت، کالیبراسیون و صحتسنجی ماشین آزمایش ضربه و نحوه مجهزسازی آن به حسگرهای الکترونیکی در مرجع [16] توسط نویسندگان توضيح داده شده است. آزمايش ضربه براى پنج نمونه فوم با عمليات حرارتي و پنج نمونه فوم بدون عمليات حرارتي تكرار شده است. نمونه بين صفحات گیره¹² بسته می شود. چکش ضارب (با انتهای نیم کروی به قطر 13 mm) و متعلقات آن¹³ مجموعا به جرم kg 4.7 از یک ارتفاع مشخص و در امتداد دو ريل راهنما رها شده و به نمونه اصابت مي كند. مقدار سرعت ضربه برابر 6.70 m/s است که از روی صفحه سرعتسنج قرائت می شود. شکل 6 تصویر دستگاه آزمایش و سیستم اکتساب دادهها¹⁴ را نشان میدهد. شکل 7 نشاندهنده نمونه فوم پس از انجام آزمایش است.

مدار لودسل¹⁵ دینامیکی شامل کرنش سنج HBM با مقاومت 350 اهم (که بر چکش چسبانده شده)، آمپلیفایر و اسیلوسکوپ(تکترونیکس¹⁶ TDS1012B) است که توسط آن تغییرات نیرو برحسب زمان گزارش



Fig. 4 SEM micrograph of A356/SiC_p composite foam شكل 4 تصوير SEM از فوم كامپوزيتي A356/SiC_p



Fig. 5 A picture of foam product with dimensions of 57 cm×57 cm شكل 5 تصويري از محصول فومي به ابعاد 57 cm×57 cm 57

9 Solution Treatment 10 Water Quenching

- ¹¹ Aging ¹² Clamp Plates
- 13 Crosshead
- 14 Data Acquisition System Load-cell

Relative Density

Stir Casting Closed Cell

Ductile

Porosity

Bulk (Solid and Non-Porous) Aluminum Alloy

 ⁷ T6-strengthening
 ⁸ Heat Treating A356 Aluminum Sand Castings

¹⁶ Tektronix

می شود. جزئیات طراحی و نصب مدار لودسل بر دستگاه آزمون ضربه سقوطی در مرجع [16] ارائه شده است. با انتگرال گیری عددی از دادههای شتاب نمودار نیرو- تغییرمکان بهدست می آید و انرژی جذب شده توسط فوم با توجه به سطح زیر نمودار محاسبه می شود.

3- تحليل آماري

به منظور تحلیل آماری دادههای تجربی و نحوه گزارشدهی آن، عینا از \overline{x} استاندارد 3763 ASTM D [21] استفاده شده است. مقدار متوسط \overline{x} انحراف استاندارد S^2 و ضریب پراکندگی CV^3 برای پارامترهای مختلف به صورت روابط (1-3) محاسبه می شود.

$$\bar{x} = \left(\sum_{i=1}^{n} x_i\right) / n \tag{1}$$

$$S = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{n} x_i^2 - n\bar{x}^2\right)/(n-1)}$$
 (2)

$$CV = 100 \times S/\bar{x} \tag{3}$$

در روابط بالا *n* تعداد نمونهها و *x_i پ*ارامتر اندازهگیری شده برای یک نمونه است. ضریب پراکندگی *CV* برحسب درصد بیان میشود.



Fig. 6 A picture of the drop-weight impact testing machine and the data acquisition system (the experimental set up)

شکل 6 تصویری از دستگاه آزمون ضربه سقوطی و سیستم اکتساب دادهها (ستآپ آزمایشگاهی)



Fig. 7 Perfectly penetrated foam specimen

شکل 7 نمونه فوم کاملا سوراخشده

³ Coefficient of Variation

4- نتايج و بحث

1-4- بررسی نتایج از دیدگاه آماری

بررسی دادههای آزمایش از جنبه آماری⁴ بسیار حائز اهمیت است. اگر نتایج فقط براساس یک نمونه گزارش شود صرفا میتوان به توصیف کیفی نتایج پرداخت. برای نمونه فقط میتوان بیان کرد که روند تغییرات کم یا زیاد می شود. اگر چه این نوع بررسی مهم و مورد نیاز است، اما قطعا کافی نیست و لازم است که علاوهبر آن با عدد و رقم و درصد روی نتایج بحث شود. برای اطمینان از صحت مقادیر کمی گزارش شده باید آزمایش برای تعدادی نمونه تکرار شود. بررسی تکرارپذیری⁶ به خصوص برای ماده کامپوزیت و متخلخل مطالعه شده در تحقیق حاضر مهم و قابل توجه است. چرا که توزیع ناهمگن سلولها⁶ در فوم کامپوزیتی مA356/SiC، تا اندازهای سبب پراکندگی نتایج⁷ می شود. اگر چه روش تولید فوم به کار رفته در کار حاضر منتج به تولید محصولی به نسبت همگن در مقایسه با روشهای دیگر می شود، اما نمی توان ماهیت متخلخل ماده و عدم امکان کنترل برخی از عوامل تولید را نادیده كرفت. طبق استاندارد ASTM D 3763 [21] تعداد پنج نمونه فوم آلومينيوم در هر كدام از شرایط (با و بدون عملیات حرارتی) جهت انجام آزمایش انتخاب شد. طراحی و ساخت ماشین ضربه سقوطی و نیز انجام آزمایش ضربه بر فوم مطابق همین استاندارد بوده است [16]. تمام نمونههای فوم از یک دسته تولیدی⁸ به منظور حصول کمترین پراکندگی در نتایج انتخاب شد.

در شکلهای 8-10 به ترتیب نمودار تغییرات نیرو-زمان، نیرو-تغییر مکان و انرژی جذبشده-زمان برای پنج نمونه فوم کامپوزیتی A356/SiCp فاقد عملیات حرارتی (نمونههای ریختگی⁹) نشان داده شده است. پاسخ ضربه¹⁰ فوم آلومینیومی همانطور که در شکلهای 8 و 9 ملاحظه میشود شامل سه ناحیه زیر است. 1- ناحیه الاستیک¹¹، 2- ناحیه بار پلاتو¹² و 3- ناحیه شکست کامل¹³. این نواحی در شکلهای 8 و 9 با شماره مختص داخل پرانتز مشخص شده است.

در ابتدا نیرو به طور تقریبا خطی افزایش مییابد تا این که به یک مقدار بیشینه اولیه¹⁴ میرسد. این امر مقاومت سلولهای فوم در برابر نفوذ را نشان میدهد. سپس ناحیه بار پلاتو مشاهده میشود. در حقیقت، ساختار سلولی ماده سبب میشود که فوم بتواند پیش از شکست، تغییر شکلهای پلاستیک را در یک بار تقریبا ثابت (بار پلاتو¹⁵) تحمل کند و بنابراین بخش قابل توجهی از انرژی ضربه جذب شده مربوط به ناحیه پلاتو است.

در نهایت نیرو با زمان کاهش یافته و هنگام نفوذ کامل چکش به داخل نمونه فوم به صفر میرسد. مطابق شکل 10 رفتار جذب انرژی فوم نشان میدهد که به تدریج و با گذشت زمان مقدار انرژی ضربه جذبشده افزایش یافته تا این که به یک مقدار بیشینه برسد. این مقدار حداکثر بهعنوان انرژی جذبشده کل توسط فوم تلقی میشود.

نتایج آماری مربوط به آزمایش ضربه بر پنج نمونه فوم بدون عملیات حرارتی (نمونههای ریختگی) در جدول 2 ارائه شده است. در این جدول مقدار متوسط، انحراف استاندارد و ضریب پراکندگی (درصد) برای پارامترهای

- 8 Batch
- 9 As Cast
- ¹⁰ Impact Response
- ¹¹ Elastic Region ¹² Plateau of Load Region
- ¹³ Complete Failure Region
- 14 Initial Peak Load
- 15 Plateau Load

¹ Average Value

² Standard Deviation

⁴ Statistics ⁵ Repeatability

⁶ Inhomogeneous Cell Distribution

⁷ Scattered Results



Fig. 8 The changes in impact load with time for five untreated A356/SiC_p composite foam specimens $(S_1, S_2, S_3, S_4, S_5)$

شکل 8 تغییرات نیروی ضربه برحسب زمان برای پنج نمونه فوم کامپوزیتی A356/SiC_p عملیات حرارتینشده (S₁ S₂ S₃ S₂ S₁) و S₅)



Fig. 9 The changes in impact load versus displacement for five untreated A356/SiC_p composite foam specimens (S₁, S₂, S₃, S₄, S₅) شکل 9 تغییرات نیروی ضربه برحسب تغییر مکان برای پنج نمونه فوم کامپوزیتی A356/SiC_p or $S_4 \otimes S_2 \otimes S_4$



Fig. 10 The changes in absorbed energy versus time for five untreated A356/SiC_p composite foam specimens

شکل 10 تغییرات انرژی جذبشده برحسب زمان برای پنج نمونه فوم کامپوزیتی A356/SiCp عملیات حرارتینشده

زیر گزارش شده است. 1- مقدار بار پلاتو که برابر با متوسط مقادیر نیرو در ناحیه پلاتو است، 2- مقدار تغییرمکان چکش در نقطه شروع ناحیه پلاتو، 3- مقدار تغییرمکان چکش در نقطه پایان ناحیه پلاتو، 4- زمان ضربه¹ و

5- انرژی جذبشده کل توسط فوم. همچنین مقادیر این پارامترها برای هر کدام از نمونههای فوم نیز گزارش شده است. هر یک از پارامترهای بالا در جدول 2 با شماره مختص داخل پرانتز مشخص شده است.

شکلهای 11-13 نتایج تجربی رفتار ضربه و جذب انرژی مربوط به فوم کامپوزیتی A356/SiC_p عملیات حرارتی شده را نشان میدهند. تحلیل آماری نتایج نیز در جدول 3 ارائه شده است که در آن هر پارامتر با شماره مختص خود مشخص شده است. نماد H در شکلهای 11-13 و جدول 3 بیانگر نمونه عملیات حرارتی شده² است.

نتایج تحلیل آماری مربوط به نمونههای ریختگی (نمونههای فوم عملیات حرارتی نشده) در جدول 2 نشان میدهد که مقدار انحراف استاندارد (و ضریب پراکندگی) برای پارامترهای بار پلاتو، تغییرمکان در نقطه آغاز ناحیه پلاتو، تغییر مکان در نقطه پایان ناحیه پلاتو، زمان ضربه و انرژی جذب شده فوم به ترتیب برابر با ۸۲ ۸۵ (% 1.45)، mm 0.97 (% 10.36)، 650 mm (% 4.22)، ms 0.07 (% 1.50) و J 90.0 (% 4.49) است. همچنین با توجه به جدول 3، این مقادیر برای فوم عملیات حرارتی شده به ترتیب برابر با 0.08 (% 1.50) (% 1.50) است. مقادیر کم انحراف استادارد و شریب پراکندگی برای پارامترهای مختلف بیان شده در بالا (با توجه به جداول 2 و 3)، دلالت بر قابل اعتماد بودن نتایج به دستآمده از آزمایش و تکیه بر

جدول 2 نتایج بهدست آمده از تحلیل آماری دادههای آزمایش ضربه برای پنج نمونه فوم کامپوزیتی A356/SiC_p عملیات حرارتی نشده (نمونههای ریختگی) Table 2 The results obtained from statistical analysis of impact test data for five untreated (as cast) A356/SiC_p composite foam specimens

(5)	(4)	(3)	(2)	(1)	شماره پارامتر
22.04 J	4.45 ms	12.87 mm	8.81 mm	1.62 kN	نمونه 1
20.83 J	4.50 ms	12.67 mm	10.54 mm	1.70 kN	نمونه 2
20.40 J	4.46 ms	13.82 mm	8.31 mm	1.59 kN	نمونه 3
22.66 J	4.58 ms	13.87 mm	8.81 mm	1.71 kN	نمونه 4
20.79 J	4.40 ms	13.00 mm	10.16 mm	1.54 kN	نمونه 5
21.34 J	4.48 ms	13.25 mm	9.33 mm	1.63 kN	مقدار متوسط
0.96 J	0.07 ms	0.56 mm	0.97 mm	0.07 kN	انحراف استاندارد
4.49 %	1.50 %	4.22 %	10.36 %	4.45 %	ضريب پراکندگي



Fig. 11 The changes in impact load with time for five heat-treated A356/SiC_p composite foam specimens (S_{1-H}, S_{2-H}, S_{3-H}, S_{4-H}, S_{5-H}) شکل 11 تغییرات نیروی ضربه برحسب زمان برای پنج نمونه فوم کامپوزیتی (S_{5-H} S_{2-H} S_{2-H} S_{2-H} S_{1-H}) عملیات حرارتی شده (S_{5-H})

¹ Impact Time (Contact Duration)

² Heat-treated Sample



Fig. 12 The changes in impact load versus displacement for five heattreated A356/SiC_p composite foam specimens (S_{1-H}, S_{2-H}, S_{3-H}, S_{4-H}, S_{5-H}) شکل 12 تغییرات نیروی ضربه برحسب تغییرمکان برای پنج نمونه فوم کامپوزیتی (S_{5-H} S_{2-H} S_{2-H} S_{1-H}) شکل A356/SiC_p



Fig. 13 The changes in absorbed energy versus time for five heat-treated A356/SiC_p composite foam specimens

شکل 13 تغییرات انرژی جذبشده برحسب زمان برای پنج نمونه فوم کامپوزیتی A356/SiC_P عملیات حرارتی شده

این نتایج جهت تحلیل کمی آنها دارد. پارامترهای گزارششده در جداول 2 و 3 براساس استاندارد مرجع [21] است.

2-4- بررسی تأثیر عملیات حرارتی

پس از بحث و بررسی آماری نتایج بر پنج نمونه شاهد (در هر دو شرایط بدون عملیات حرارتی و با عملیات حرارتی¹) و اطمینان از اطلاعات کمی بهدستآمده از آزمون ضربه اکنون میتوان به مطالعه کیفی و کمی تأثیر عملیات حرارتی T6 بر پاسخ ضربه فوم A356/SiC_p که هدف اصلی مقاله حاضر است پرداخت.

در نمودار شکل 14 رفتار ضربه دو نمونه فوم، یکی فاقد عملیات حرارتی (نمونه ریختگی) و دیگری عملیات حرارتی شده مقایسه شده است. این دو نمونه با توجه به متوسط اطلاعات به دست آمده از آزمایش ها دارای اختلاف کمتری نسبت به سایر نمونه هاست و بنابراین انتخاب مناسبی برای تفسیر و تحلیل نتایج (از نظر کیفی و کمی) و استناد به مقادیر اندازه گیری شده توسط سنسور نیروسنج دینامیکی به شمار می آیند.

شکلهای 14-16 به ترتیب نمودارهای نیرو-زمان، نیرو- تغییر مکان و انرژی جذبشده فوم برحسب زمان را برای فوم کامپوزیتی با زمینه آلومینیوم در شرایط بدون عملیات حرارتی و با عملیات حرارتی نشان میدهند. تأثیر

جدول 3 نتایج بهدستآمده از تحلیل آماری دادههای آزمایش ضربه برای پنج نمونه فوم کامپوزیتی A356/SiC_P عملیات حرارتیشده

Table 3 The results obtained from statistical analysis of impact test data for five heat-treated A356/SiC_p composite foam specimens

(5)	(4)	(3)	(2)	(1)	شماره پارامتر
30.92 J	4.98 ms	11.89 mm	9.60 mm	2.40 kN	نمونه H -1
30.68 J	4.90 ms	13.38 mm	9.83 mm	2.18 kN	نمونه H -2
29.85 J	4.80 ms	11.34 mm	8.35 mm	2.26 kN	نمونه H -3
32.70 J	4.93 ms	11.81 mm	9.54 mm	2.48 kN	نمونه H -4
33.49 J	4.99 ms	11.73 mm	9.15 mm	2.33 kN	نمونه H -5
31.53 J	4.92 ms	12.03 mm	9.29 mm	2.33 kN	مقدار متوسط
1.51 J	0.08 ms	0.78 mm	0.58 mm	0.12 kN	انحراف استاندارد
4.79 %	1.55 %	6.51 %	6.26 %	5.02 %	ضریب پراکندگی

عملیات حرارتی T6 بر پاسخ ضربه فوم با توجه به شکل های 14 و 15 کاملا مشهود است. زمان ضربه از مقدار 4.45 ms به مقدار 4.98 ms افزایش می یابد. مقدار بار پلاتو (متوسط دادههای نیرو در ناحیه پلاتو) برابر با 1.62 kN برای فوم عملیات حرارتی نشده و 2.40 kN برای فوم عملیات حرارتی شده است که %48.1 افزایش را نشان میدهد. درخصوص دلیل تأثیر عملیات حرارتی T6 بر بهبود خواص مکانیکی فوم و افزایش استحکام پلاتو² مىتوان به گزارش مراجع [15,12] استناد كرد. هدف از عمليات حرارتى تولید یک توزیع یکنواخت از رسوبات در ساختار ماده است. ساختارهای تعادلی (با تعادل بیشتر³) منظم و سازگار با شبکه زمینه⁴، هنگام عملیات حرارتی و فرآیند رسوب گذاری شکل می گیرد و سبب تغییر قابل ملاحظه خواص ماده می شود. عملیات حرارتی T6 انجام شده بر فوم شامل سه مرحله انحلال، کونچ و پیرسازی است: 1- یک محلول جامد از عناصر آلیاژی⁶ در طی عمليات انحلال تشكيل مي شود؛ 2- انجام كونچ اجازه مي دهد تا اين حالت در دمای محیط ثبات⁶ داشته باشد (یایدار بماند) و منجر به یک محلول جامد فوقاشباع⁷ میشود، 3- عملیات پیرسازی سبب تشکیل رسوبات ریز⁸ در نواحي فوق اشباع مي شود



Fig. 14 The load as a function of time for as-received and heat-treated A356/SiC $_{\rm p}$ composite foams

شکل 14 نمودار نیرو برحسب تابعی از زمان برای فوم کامپوزیتی A356/SiC_p عملیات حرارتی شده و عملیات حرارتی نشده (ریختگی)

¹ As-received and Heat-treated Situations

² Plateau Strength

³ Larger Equilibrium Structures

⁴ Coherence with the Matrix Lattice

⁵ Solid Solution of the Alloying Elements

⁵ Stabilizing

⁷ Super-saturated Solid Solution

⁸ Fine Precipitates



Fig. 15 The load-displacement plot for untreated and heat-treated conditions



Fig. 16 The absorbed energy versus time for untreated and heat-treated foams, and also three stages of the impact response of the foam شكل 16 انرژى جذبشده برحسب زمان براى فوم عمليات حرارتىشده و عمليات حرارتی نشده و نیز سه مرحله پاسخ ضربه فوم

این رسوبات (تولیدشده در ساختار فوم) با نابهجاییها¹ فعل و انفعال انجام داده و در برابر حرکت نابهجاییها مقاومت میکنند و بنابراین منجر به کرنش سختی و افزایش استحکام ماده فومی می شوند؛ بنابراین در اثر این عملیات رسوب سختى²، مقاومت به ضربه فوم افزايش مى يابد.

پیشتر یاد شد که پاسخ ضربه فوم دارای سه مرحله (سه ناحیه) است. در منحنی شکل 16 ملاحظه می شود که نرخ انرژی جذب شده توسط فوم در مرحله اول (ناحیه الاستیک) افزایش مییابد، در مرحله دوم (ناحیه پلاتو) ثابت است و در مرحله سوم (شکست فوم) آغاز به کاهشیافتن میکند. در این شکل سه مرحله یادشده بر منحنی جذب انرژی فوم نشان داده شده و ناحیه بار پلاتو با خط توپر مشخص شده است.

اندازه گیری های آزمایشگاهی مطابق شکل 14 نشان میدهد که مرحله اول يعنى ناحيه الاستيک طي مدت 1.36 ميليثانيه براي شرايط بدون عمليات حرارتي و 1.44 ميلي ثانيه براي شرايط با عمليات حرارتي طول می کشد. بار پیک اولیه³ که در زمان های *t*=1.36 ms و *t*=1.44 ms اتفاق میافتد، به ترتیب برابر با 1.56 kN و 2.36 kN است که بیانگر افزایش حد الاستیک⁴ به میزان 51.3 درصد است. این به معنای آن است که مقاومت ماده فومی در برابر نفوذ ضربهزننده⁵ در اثر عملیات حرارتی افزایش یافته

است. مرحله دوم (ناحیه پلاتو) که در آن چکش ضارب در فوم تغییر شکل ایجاد میکند، در زمان *t=2.01* ms برای شرایط بدون عملیات حرارتی و در زمان *t*=1.80 ms برای شرایط با عملیات حرارتی پایان مییابد و برای شرایط يادشده ناحيه بار يلاتو به ترتيب طي مدت 0.65 و 0.36 ميلى ثانيه به طول میانجامد. در لحظهای که مرحله سوم آغاز می شود (*t*=2.01 ms و t= ms) نرخ انرژی جذبشده⁶ شروع به کاهشیافتن میکند. یعنی آنکه مقاومت سلولهای فوم در برابر نفوذ روبه زوال میرود و در نتیجه مقدار نیرو کاهش یافته تا در نهایت به صفر برسد.

همان طور که در بالا بحث شد پاسخ ضربه فوم عملیات حرارتی شده حد الاستیک بالاتر و مقدار بار پلاتو بیشتری را در مقایسه با فوم فاقد عملیات حرارتی نشان میدهد. این امر سبب میشود که سطح زیر نمودار نیرو- تغییر مکان افزایش یابد و در نتیجه مطابق شکل 16 مقدار انرژی ضربه جذب شده از 22.04 ژول در شرایط بدون عملیات حرارتی به 30.92 ژول در شرایط با عملیات حرارتی تغییر میکند؛ بنابراین در اثر عملیات حرارتی انجامشده بر فوم ظرفيت جذب انرژى ماده به ميزان 40.3 درصد افزايش مىيابد.

با توجه به شکل 15 ملاحظه می شود که برای شرایط بدون عملیات حرارتی ناحیه بار پلاتو در تغییرمکان 8.81 mm شروع و در تغییر مکان 12.87 mm پایان می یابد و برای شرایط با عملیات حرارتی ناحیه بار پلاتو در تغییر مکان mm 9.60 mm شروع و در تغییر مکان 11.89 mm پایان می یابد. در نتيجه براى دو شرايط يادشده به ترتيب يك ناحيه پلاتو با 4.06 mm و 2.29 mm تغییر مکان مشاهده می شود. این نشان می دهد که در اثر عملیات حرارتی انجامشده بر فوم طول ناحیه پلاتو⁷ کاهش مییابد. دقیقا همین مشاهده آزمایشگاهی توسط کائو و همکاران [14] گزارش شده است. آنها با ستفاده از آزمون اسپلیت- هاپکینسون تأثیر دو نوع عملیات حرارتی مختلف، بکی عملیات T6 (شامل انحلال، کونچ در آب و پیرسختی) و دیگری فقط عملیات پیرسختی را بر خواص فشاری دینامیکی⁸ فوم آلومینیوم بررسی کردند. شکل 17 نمودار تنش-کرنش فوم تحت بارگذاری فشاری در نرخ کرنش بالا را نشان میدهد که توسط کائو و همکاران گزارش شده است.

آنها نتیجه گرفتند که انجام هر دو عملیات حرارتی بر فوم سبب کاهش طول ناحیه پلاتو می شود. نمودار نیرو- زمان فوم آلومینیوم در کار حاضر (شکل 14) نیز این موضوع را به درستی نشان میدهد و صحت انجام آزمایش در كار حاضر را تأييد مىكند. وجه تفاوت كار حاضر با كار كائو علاوهبر ماده



Fig. 17 Compressive stress-strain responses of untreated and heattreated aluminum foam specimens under high strain rate [14] شکل 17 پاسخ تنش- کرنش فشاری نمونههای فوم آلومینیوم عملیات حرارتی شده و عمليات حرارتي نشده تحت نرخ كرنش بالا [14]

Dislocations Precipitation Hardening

Initial Peak Load

Elastic Limit

⁵ Striker Penetration

⁶ The Rate of Energy Absorbed by the foam

 ⁷ The Length of Plateau Region
 ⁸ Dynamic Compressive Properties

خاص مطالعهشده (فوم کامپوزیتی تقویتشده) در این است که در کار حاضر رفتار نفوذ فوم مورد بررسی قرار گرفته، اما در کار کائو رفتار لهیدگی فوم بررسی شده است که توضیح و مقایسه این دو رفتار پیشتر بیان شد.

براساس نتایجی که توسط کائو و همکاران [14] و نیز وانگ و همکاران [15] گزارش شده برای دو عملیات حرارتی T6 و پیرسختی¹ میزان افزایش استحکام فشاری دینامیکی² و ظرفیت جذب انرژی فوم برای شرایط T6 بارزتر و بنابراین در کار حاضر از عملیات حرارتی T6 استفاده شده است.

5- نتیجه گیری

در مقاله حاضر رفتار نمونههای فوم سلول بسته کامپوزیتی A356/SiC_p (فوم آلومینیوم A356 تقویتشده توسط ذرات SiC) تحت ضربه سقوطی کم سرعت بررسی شد. عملیات حرارتی استاندارد T6 بر تعدادی از نمونههای فوم انجام شد. این عملیات شامل انحلال، کونچ و پیر سختی بوده و بر اساس هندبوک ASM اجرا شده است. آزمایش ضربه بر نمونههای عملیات حرارتی شده و نمونههای بدون عملیات حرارتی (نمونههای ریختگی) انجام شد. تأثیر عملیات حرارتی بر پاسخ ضربه و میزان جذب انرژی فوم پس از مطالعه دادههای آزمایش به لحاظ آماری و بررسی تکرارپذیری نتایچ بررسی شد.

تحلیل آماری دادهها و گزارش آن عینا مطابق استاندارد ASTM انجام شده است. مقدار ضریب پراکندگی برای پارامترهای بار پلاتو، تغییرمکان در نقطه شروع ناحیه پلاتو، تغییرمکان در نقطه پایان ناحیه پلاتو، زمان ضربه و انرژی جذبشده فوم به ترتیب برابر با % 4.45، % 10.36، % 22.4 % 1.50 و % 4.49 برای شرایط بدون عملیات حرارتی و نیز برابر با % 5.02 % 62.6، % 15.5، % 1.55 و % 4.79 برای شرایط با عملیات حرارتی است. با توجه به پراکندگی کم نتایج آزمایش صحت اطلاعات کمی بهدستآمده (برای ماده مورد مطالعه) مورد تأیید است.

پاسخ ضربه فوم آلومینیوم شامل مرحله است: یک رفتار خطی اولیه، یک محدوده بار پلاتو که در آن نیرو تقریبا ثابت است و در نهایت شکست فوم. در اثر عملیات حرارتی، طول ناحیه پلاتو کاهش مییابد. مقایسه با نتایج محققان دیگر نیز بر این امر صحه می گذارد.

اندازه گیری های آزمایشگاهی نشان داد که ماده فوم آلومینیوم به خوبی قابلیت تضعیف بار ضربهای را دارد. این امر در شرایطی که بر فوم عملیات حرارتی انجام گیرد بسیار مشهودتر است. عملیات حرارتی T6 سبب افزایش استحکام پلاتو به میزان 48.1 درصد می شود، همچنین ظرفیت جذب انرژی فوم به میزان %40.3 در اثر عملیات حرارتی افزایش می یابد. این نتیجه به خصوص زمانی حائز اهمیت است که فوم کامپوزیتی A356/SiC_p بهعنوان یک ماده جاذب انرژی انتخاب و طراحی شود.

با توجه به نتایج بهدستآمده از آزمایش میتوان استنباط کرد که انجام عملیات حرارتی بر فوم آلومینیوم در بهبود خواص مکانیکی آن بسیار مؤثر است؛ همچنین امکان کنترل بیشتر بر پاسخ دینامیکی فوم وجود دارد؛ بنابراین استفاده از عملیات حرارتی بهعنوان یک ایده مفید و مناسب برای انجام مطالعات در زمینه ساخت قطعات فومی و با هدف کارآئی بیشتر آن در صنعت پیشنهاد میشود.

6- تقدير و تشكر

نویسندگان تشکر و قدردانی ویژه خود را از آقای دکتر سید حجت هاشمی جهت در اختیار قراردادن تجهیزات آزمایشگاه ضربه و نیز همکاری بیدریغ ایشان در انجام آزمونهای تجربی اعلام میدارند.

7- مراجع

- M. F. Ashby, A. G. Evans, N. A. Fleck, L. J. Gibson, J. W. Hutchinson, H.N.G. Wadley, *Metal Foams: A Design Guide*, pp. 150-154, Woburn, Butterworth-Heinemann, 2000.
- [2] J. Banhart, Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams, *Progress in Materials Science*, Vol. 46, No. 6, pp. 559-632, 2001.
- [3] C. Hosun, C. Jaeung, Damage and penetration behavior of aluminum foam at various impacts, *Central South University*, Vol. 21, No. 9, pp. 3442-3448, 2014.
- [4] 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.
- [5] V. S. Deshpande, N. A. Fleck, High strain rate compressive behaviour of aluminium alloy foams, *Impact Engineering*, Vol. 24, No. 3, pp. 277-298, 2000.
- [6] 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.
- [7] T. Mukai, T. Miyoshi, S. Nakano, H. Somekawa, K. Higashi, Compressive response of a closed-cell aluminum foam at high strain rate, *Scripta Materialia*, Vol. 54, No. 4, pp. 533-537, 2006.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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, *Automotive Technology*, Vol. 14, No. 1, pp. 61-66, 2013.
- [12] D. Lehmhus, J. Banhart, Properties of heat-treated aluminium foams, Materials Science and Engineering: A, Vol. 349, No. 1–2, pp. 98-110, 2003.
- [13] Y. Feng, N. Tao, Z. Zhu, S. Hu, Y. Pan, Effect of aging treatment on the quasi-static and dynamic compressive properties of aluminum alloy foams, *Materials Letters*, Vol. 57, No. 24–25, pp. 4058-4063, 2003.
- [14] X.-q. Cao, Z.-h. Wang, H.-w. Ma, L.-m. Zhao, G.-t. Yang, Effects of heat treatment on dynamic compressive properties and energy absorption characteristics of open-cell aluminum alloy foams, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 16, No. 1, pp. 159-163, 2006.
- [15] Z. Wang, Z. Li, J. Ning, L. Zhao, Effect of heat treatments on the crushing behaviour and energy absorbing performance of aluminium alloy foams, *Materials & Design*, Vol. 30, No. 4, pp. 977-982, 2009.
- [16] 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, *July 2016*)
- [17] F. Campana, D. Pilone, Effect of heat treatments on the mechanical behaviour of aluminium alloy foams, *Scripta Materialia*, Vol. 60, No. 8, pp. 679-682, 2009.
- [18] Private communication with Dr. Dirk Lehmhus, the author of the paper: "Properties of heat-treated aluminum foams" (reference [12] of this paper), September 2, 2014.
- [19] ASM Handbook, Vol. 4, *Heat treating*, Heat Treating of Aluminum Alloys, 1991.
- [20] ASM Handbook, Vol. 2, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, Properties of Cast Aluminum Alloys, 1990.
- [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.

¹ Age Hardening

² Dynamic Compressive Strength