



بررسی تجربی خواص بالستیکی ساختار فوم آلومینیومی

مجتبی ضیاء شمامی^۱، محمد حسین پل^{۲*}، حسین خدارحمی^۳

۱- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران

۲- استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه تفرش، تفرش

۳- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران

* تفرش، کد پستی ۳۹۵۱۸-۷۹۶۱۱، m_h_pol@tafreshu.ac.ir

چکیده- ساختار فوم آلومینیومی به دلیل خاصیت جذب انرژی و سبک بودن، به عنوان هسته در سازه‌های سبک با قابلیت‌های بالستیکی اهمیت ویژه‌ای در صنایع مختلف هوافضا، دریایی و خودروسازی پیدا کرده است. در این تحقیق با ساخت فوم‌های آلومینیومی با چگالی و ضخامت‌های مختلف، یک سری آزمایش‌های بالستیکی به کمک سیستم پرتابگر گازی تعریف شده و اثر چگالی و ضخامت فوم و سرعت پرتابه در میزان انرژی ساختار فوم آلومینیومی برای اولین بار در کشور مطالعه شده است. نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی انجام شده، نشان می‌دهد که میزان جذب انرژی ساختار فوم آلومینیومی با افزایش چگالی و ضخامت فوم و افزایش سرعت برخورد بالا می‌رود.

کلیدواژه‌ها: نفوذ، بالستیک، فوم آلومینیومی، جذب انرژی، پرتابه صلب سرتخت.

Experimental investigation of ballistic properties of Aluminum Foam structure

M. Zia Shamami¹, M. H. Pol^{2*}, H. Khodarahmi³

1- Master science, Mech. Eng., Emam Hossein Univ., Tehran, Iran

2- Assis. Prof., Mech. Eng., Tafresh Univ., Tafresh, Iran

3- Assoc. Prof., Mech. Eng., Emam Hossein Univ., Tehran, Iran

* P. O. B. 39518-79611, Tafresh, Iran. tafreshu.ac.ir@m_h_pol

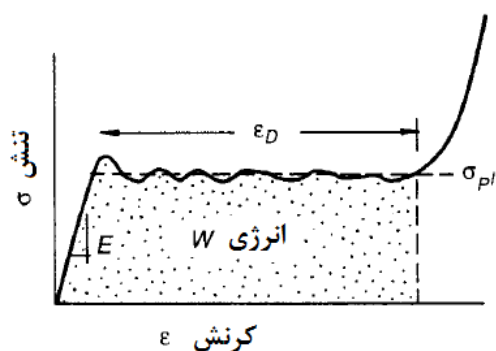
Abstract- Aluminum foam structure gains great importance in aerospace, naval and automotive industries due to its light weight and energy absorption characteristics. In this article several aluminum foam with different densities and thickness were designed and tested using light gas gun device. A series of ballistic test were defined in order to determine the effects of density, foam thickness and projectile velocity on energy absorption of aluminum foam structures. The results of the experimental testes shown that the amount of energy absorbed is increased as density, foam thickness and velocity of the projectile is increased.

Keywords: Perforation, Ballistic Impact, Aluminum Foam, Energy Absorption.

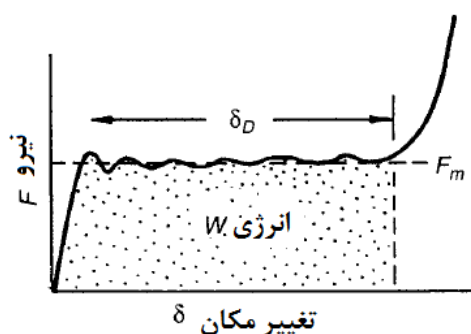
۱- مقدمه

متعددی بر روی تولید فوم‌های فلزی در حال پژوهش و تحقیق بوده و در شرکت‌های مختلفی در سطح بین‌المللی به تولید این خانواده از مواد نو اشتغال دارند. این فوم‌ها عمدتاً از آلیاژهای آلومینیوم تولید می‌شوند. به تدریج با فلزات و آلیاژهای دیگری مانند فولاد، مس، نیکل، روی، منیزیم، تیتانیوم و سایر فلزات و آلیاژهای آنها به لحاظ قابلیت فومی شدن مورد بررسی و

توجه به ساختارهای چند فازی از سال ۱۹۵۰ میلادی شروع شد؛ زمانی که اسمیت در دانشگاه ام‌آی‌تی پژوهش در زمینه سیستم‌های دو فازی مایع-گاز و به عبارت دیگر فوم را آغاز کرد. به تدریج توجه پژوهشگران و دانشمندان دیگری نیز به این موضوع جلب شد، به نحوی که در حال حاضر کشورهای



(الف)



(ب)

شکل ۱ منحنی الف- تنش- کرنش و ب- نیرو- جابجایی فوم فلزی

برای فوم آلومینیومی نرخ کرنش تأثیر کمتری دارد. رید و همکارانش [۹، ۸]، مکانیسم فشرده شدن و مقاومت فوم را در مقابل نفوذ مورد بررسی کرده و نشان دادند که در سرعت زیر بحرانی، تنش پلاستیک لازم برای له شدگی فوم آلومینیومی متأثر از اندازه و مقاومت فوم بوده و بیان کردند که این یک عیب و نقص برای فوم می باشد. هنگامی که سرعت فوق بحرانی باشد کمتر تحت تأثیر تنش قرار می گیرد و همچنین تغییر شکل ناحیه له شدگی بیشتر تحت تأثیر اینرسی سازه قرار می گیرد. توضیحات بالا نشان می دهد که برای فوم آلومینیوم تحت نفوذ، منطقه له شده زیر پرتابه باید بسیار مورد توجه قرار گیرد و مقاومت بیشتر در این ناحیه در فوم آلومینیومی را باید به روشنی متأثر از اینرسی دانست.

علاوه بر بررسی های تجربی، چندین مدل برای بررسی رفتار فوم های فلزی ارائه شده است [۱۰]. همچنین ریس و همکارانش [۱۱]، نشان دادند که معیار شکست می تواند بر اساس مدل ماکروسکوپی بیان شود.

تحقیق حاضر بخشی از یک کار تحقیقی دنباله دار در خصوص بررسی میزان جذب انرژی ساختار فوم آلومینیومی

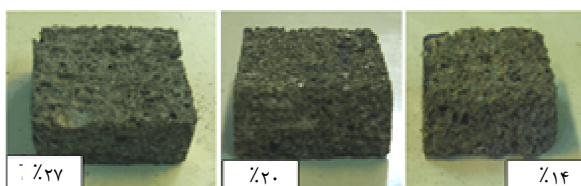
مطالعه قرار گرفته و محدوده ای وسیع از کاربردهای مختلف را مطرح کرده است. امروزه استفاده از فوم آلومینیوم به دلیل سبکی وزن، جذب انرژی خوب، ویژگی های حرارتی و صوتی، بازیافت راحت و شناور بودن بر روی آب، افزایش چشمگیری داشته است [۱].

فوم های فلزی خواص بسیار متنوع و گوناگونی دارند که از آن جمله، وزن کم فوم های فلزی باعث شده که این مواد مورد توجه بسیاری قرار گیرند. چگالی نسبی یک فوم فلزی، به طور معمول، کمتر از ۱۵ درصد چگالی فلز پایه و غیرمتخلخل است. نسبت استحکام (سفتی) به وزن یک عامل مهم در طراحی های مهندسی است که این نسبت در فوم فلزی بالا است. مثلاً سفتی یک پنل بستگی به ضخامت آن دارد؛ بنابراین اگر یک پنل فلزی توسط یک پنل فومی جایگزین شود که همان وزن پنل فلزی را دارد، ولی ضخامت آن ۵ برابر بیشتر است، سفتی آن نیز ۵ برابر بیشتر خواهد شد [۲].

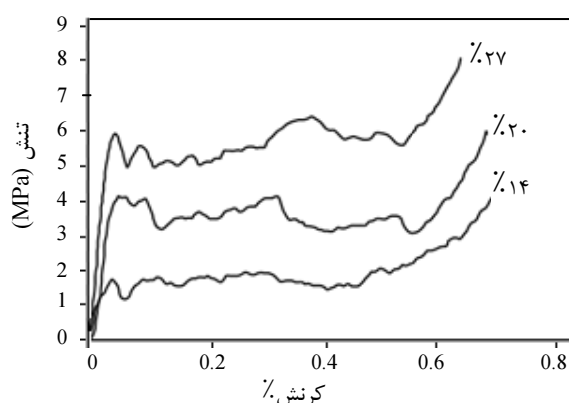
مواد و سازه هایی که به عنوان جاذب های انرژی به کار می روند، عموماً دارای منحنی های تنش-کرنش کشیده و یکنواخت هستند. این جاذب ها در تنشی که به تنش پایا^۱ (σ_{pl}) معروف است، دچار تغییر شکل پلاستیک شده و انرژی زیادی را جذب می کنند. یک قطعه یا سازه هنگامی به عنوان جاذب انرژی محسوب می شود که علاوه بر داشتن تنش پایای بالا، سطح زیر منحنی تنش-کرنش بالایی داشته باشد. بنابراین همان طور که در شکل ۱ می توان دید، موادی که منحنی های کشیده تری داشته باشند، مقدار انرژی بیشتری را نیز می توانند جذب کنند [۱].

بیشتر کارهای انجام شده بر فوم های فلزی از جنس فوم های آلومینیومی است که از میان آنها می توان به مطالعه نفوذ پرتابه با سرعت های پایین و بالا توسط آلورین و همکاران [۳]، اندروز و همکاران [۴]، کادر و همکاران [۵]، اشاره کرد. آنها نشان دادند که تغییر شکل پلاستیک فوم های فلزی فقط در منطقه زیر پرتابه در حین نفوذ رخ می دهد. رامچاندرا و همکاران [۶]، لی و همکاران [۷]، نیز نفوذ در فوم فلزی را مورد مطالعه قرار داده و نشان دادند که با افزایش سرعت به بیش از ۱۰ m/s، مقاومت به نفوذ افزایش می یابد. در مورد بارهای دینامیکی، نرخ کرنش، اینرسی و موج تنش تأثیر زیادی دارند.

1. Plateau Stress



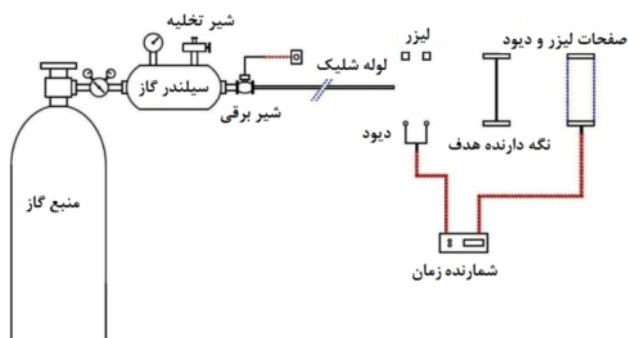
شکل ۲ نمونه‌های تهیه شده برای انجام آزمایش فشار تک‌محوری



شکل ۳ نمودار تنش-کرنش فوم آلومینیومی حاصل از اعمال بار فشاری تک محوره در آزمایش شبه استاتیکی

۲-۳- آزمایش بالستیک

آزمایش‌های بالستیک در دانشگاه تربیت مدرس با استفاده از یک تفنگ گازی که طرح‌واره آن در شکل ۴ نشان داده شده است، انجام گرفت. هنگام آزمایش هر یک از صفحات هدف، درون یک نگه‌دارنده به ابعاد $100 \times 100 \text{ mm}^2$ به‌طور ثابت قرار گرفت. پرتابه یک استوانه فولادی سرنخت به طول ۲۰ mm، قطر ۱۰ mm و جرم ۱۲/۲ gr در آزمایش‌ها استفاده شد. برخورد در دو سرعت مختلف برخورد ۷۰ m/s و ۱۴۹ m/s بوده و هر دو سرعت‌های اولیه و باقی‌مانده اندازه‌گیری شد. حداقل تعداد تکرار هر آزمایش ۳ عدد در نظر گرفته شد.



شکل ۴ طرح‌واره تفنگ گازی

تحت بارگذاری پانچ، برخورد سرعت پایین و برخورد سرعت بالا با پوسته فلزی (ساندویچ پنل) و بدون پوسته فلزی به‌طور تجربی و عددی است که بخشی از نتایج آن در خصوص بررسی خواص بالستیکی ساندویچ پنل‌های فوم‌های آلومینیومی با پوسته فلزی در مقاله‌ای از همین نویسندگان ارائه شده است [۱۲]. در این مقاله برای اولین بار در کشور، نفوذ پرتابه سرنخت صلب در ساختار فوم آلومینیومی تهیه شده از روش آلپوراس، به‌طور تجربی بررسی خواهد شد.

۲- روش تجربی

۲-۱- مواد

نمونه فوم‌های به کارگرفته شده در آزمایش‌های این تحقیق با روش تولید ریخته‌گری آلپوراس از جنس $\text{Al}(\text{A356}/\text{SiCp})$ در ابعاد $130 \times 130 \times 30$ و $130 \times 130 \times 20$ میلی‌متر با چگالی‌های متفاوت در محدوده ۳۰۰ تا ۸۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب با مشخصات مکانیکی ارائه شده در جدول ۱، تولید شده توسط مرکز جهاد دانشگاهی مشهد می‌باشد.

۲-۲- آزمایش فشار

آزمایش فشار تک‌محوری نمونه فوم‌های آلومینیومی (شکل ۲) به کمک دستگاه MTS با سرعت فک بالایی ۱/۲ mm/min انجام شده است. از این آزمایش‌ها منحنی تنش-کرنش و همچنین منحنی نیرو-جابجایی ثبت شده است.

شکل ۳ منحنی تنش-کرنش برای سه نوع فوم آلومینیومی با چگالی‌های مختلف، تحت نیروی فشاری تک محوره را نشان می‌دهد. همانطور که از این منحنی‌ها پیداست، بعد از نقطه تسلیم در پیک اولیه، منحنی از شیب همواری برخوردار بوده که نشان‌دهنده خاصیت جذب انرژی فوم‌های آلومینیومی است.

جدول ۱ خصوصیات مکانیکی فوم‌های آلومینیومی

مشخصات	نوع اول	نوع دوم	نوع سوم
نسبت چگالی	۱۴٪	۲۰٪	۲۷٪
مدول الاستیک (MPa)	۱۱۰۰	۱۵۰۰	۱۸۰۰
تنش تسلیم (MPa)	۱	۳/۶	۵/۲
تنش پایا (MPa)	۱/۵	۳/۸	۵/۵
نسبت تراکم	۰/۴۵	۰/۵	۰/۵۲
نسبت پواسون	۰/۳	۰/۳	۰/۳

۴- نتایج و بحث

در این قسمت تأثیر عوامل مختلف از جمله، تغییر چگالی فوم آلومینیومی و تغییر ضخامت فوم در میزان جذب انرژی ساختار فوم آلومینیومی بدست آمده از آزمایشهای تجربی مورد بررسی قرار گرفته است.

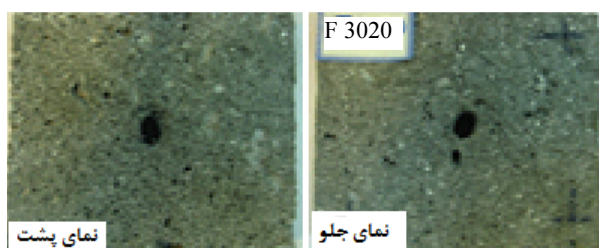
آزمایشهای تجربی نفوذ در ساختار فوم آلومینیومی، در سه نسبت چگالی و دو ضخامت متفاوت برای فوم آلومینیومی و در سرعتهای متفاوت انجام شده است.

شکل ۵ دو نمای جلویی و پشتی هدف ساخته شده از فوم آلومینیومی را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود در ساختار فوم آلومینیومی یک حفره با تغییر شکل موضعی دیده می‌شود، به طوری که مسیر حرکت پرتابه در طول ضخامت ساختار فوم آلومینیومی مانند یک تونل به نظر می‌رسد و در قسمت‌های دیگر ساختار، هیچ‌گونه تغییر شکلی دیده نمی‌شود.

۴-۱- تأثیر سرعت پرتابه

برای بررسی تأثیر سرعت پرتابه بر میزان جذب انرژی، ساختار فوم آلومینیومی با نسبت چگالی ۲۰٪ و ضخامت ۲۰mm مطالعه شده است.

همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود با افزایش سرعت برخورد پرتابه، میزان جذب انرژی افزایش می‌یابد، به طوری که با افزایش سرعت پرتابه از ۷۰m/s به ۱۴۹m/s، میزان جذب انرژی ۹۶٪ افزایش یافته است. این افزایش را می‌توان ناشی از افزایش مقاومت فوم در نرخ کرنش‌های بالاتر دانست. دلیل این عامل را می‌توان ناشی از افزایش تنش تسلیم دانست. در واقع با افزایش نرخ کرنش با توجه به ماهیت رفتار دینامیکی مواد، سرعت بارگذاری زودتر از عکس‌العمل رفتاری مواد رخ می‌دهد در نتیجه تنش تسلیم به تأخیر می‌افتد. هرچه سرعت بارگذاری افزایش یابد، تنش تسلیم نیز بیشتر می‌شود.



شکل ۵ نمایی از قسمت‌های جلویی و پشتی نمونه ساختار فوم آلومینیومی بعد از انجام تست نفوذ پرتابه سرتخت

به منظور اندازه‌گیری سرعت اولیه در جلوی لوله تفنگ گازی از یک جفت منبع نور لیزر و دیود حساس نوری که متصل به یک شمارنده زمان هستند، استفاده می‌شود. به دلیل این که پس از نفوذ، پرتابه از مسیر خود منحرف می‌شود، امکان اندازه‌گیری سرعت باقی‌مانده پرتابه با روش اندازه‌گیری سرعت ورودی وجود ندارد. به همین دلیل از دو پرده دو بعدی موازی، که هر یک شامل ۸۰ عدد منبع نور لیزر و دیود حساس به نور در دو راستای افقی و عمودی می‌باشند، برای تعیین موقعیت محل عبور پرتابه استفاده می‌شود. این دیودهای حساس به نور هریک به‌طور جداگانه به شمارنده زمان متصل می‌باشند.

۳- روابط اساسی

در بررسی نفوذ پرتابه در ساختار فوم آلومینیومی، دو کمیت حد بالستیک، V_b و میزان انرژی جذب شده توسط ساختار فوم آلومینیومی اهمیت بالایی دارد.

سرعت حد بالستیک حداقل سرعتی است که پرتابه می‌تواند صفحه هدف را سوراخ کند و با سرعت صفر از آن خارج شود. بالاتر بودن سرعت حد بالستیک بیانگر مقاوم بودن ساختار فوم آلومینیومی نسبت به پدیده نفوذ پرتابه است. به‌علاوه میزان انرژی جذب شده توسط ساختار فوم آلومینیومی، برای مقایسه عملکرد ساختار می‌تواند استفاده شود. اگر جرم ذرات جدا شده از پرتابه در حین فرایند نفوذ ناچیز فرض شود، انرژی جنبشی آنها نیز قابل صرف‌نظر کردن است. بنابراین تغییرات انرژی جنبشی پرتابه، E_p قبل و بعد از برخورد را می‌توان معادل انرژی جذب شده در حین سوراخ شدن ساختار فوم آلومینیومی در نظر گرفت:

$$E_p = \frac{1}{2} m_p V_i^2 - \frac{1}{2} m_p V_r^2 \quad (1)$$

که V_i ، V_r و m_p به ترتیب سرعت برخورد، سرعت باقیمانده پرتابه و جرم پرتابه می‌باشند. چنان‌چه سرعت باقی‌مانده پرتابه V_r برابر صفر باشد، با فرض این که میزان جذب انرژی تفاوت چندانی نداشته باشد، سرعت برخورد، همان حد بالستیک (V_b) خواهد شد:

$$E_p = \frac{1}{2} m_p V_b^2 \quad (2)$$

از رابطه (۲) می‌توان حد بالستیک پرتابه را بدست آورد. البته این رابطه به دلیل ثابت نبودن انرژی جذب شده در سرعت‌های برخورد مختلف، فقط در محدوده حد بالستیک قابل استفاده است.

همچنان از این رو چگالی فوم‌های فلزی بر قابلیت جذب انرژی آنها مؤثر است. تنش پایای فوم آلومینیومی تولید شده با روش ریخته‌گری آلپوراس همراه با افزایش چگالی فوم افزایش می‌یابد. اما آنچه که بر قابلیت جذب انرژی مؤثر است، سطح زیر منحنی نیرو-جابجایی و یا تنش-کرنش است. با افزایش چگالی فوم آلومینیومی، میزان تنش پایا افزایش یافته و سطح زیر منحنی نیز ابتدا افزایش می‌یابد، اما با افزایش بیشتر چگالی سطح زیر منحنی کاهش یافته و به این ترتیب قابلیت جذب انرژی در فوم کاهش پیدا می‌کند دلیل این عامل را می‌توان ناشی از سوق پیدا کردن رفتار آن به سمت رفتار مواد صلب دانست [۱۳].

۴-۳- تأثیر ضخامت فوم آلومینیومی

برای بررسی تأثیر ضخامت ساختار فوم آلومینیومی از نمونه‌هایی با نسبت چگالی ۲۰٪ تحت برخورد در سرعت برخورد حدود ۱۴۹ m/s استفاده شد. نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی در جدول ۳ نشان داده شده است.

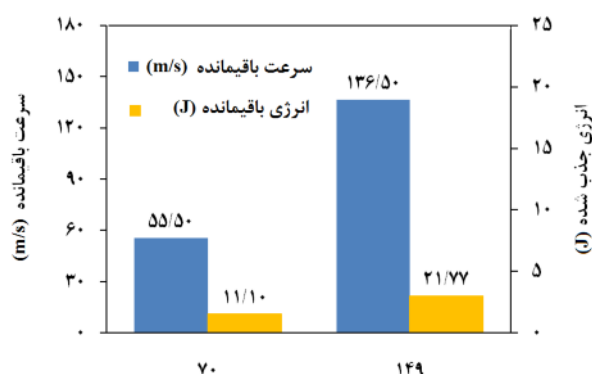
همچنان که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، با افزایش ضخامت ساختار فوم آلومینیومی به میزان ۵۰٪، مقدار جذب انرژی ۳۷٪ افزایش می‌یابد. این نتایج نشان می‌دهد برای اینکه ساختار فوم آلومینیومی بتواند بیشترین بازده جذب انرژی را داشته باشد، باید از یک حداقل ضخامتی برخوردار باشد تا مکانیزم ساختاری فوم بتواند بیشتر فشرده شده و کار پلاستیک لازم برای له‌شدگی فوم آلومینیومی را که متأثر از اندازه و مقاومت فوم بوده، از انرژی حاصل از برخورد پرتابه به فوم تامین شود.

جدول ۳ مقایسه نتایج آزمایش‌های تجربی بالستیک در ضخامت‌های

مختلف فوم آلومینیومی		
ضخامت (mm)	۲۰	۳۰
کد مشخصه	F2020	F3020
سرعت ورودی (m/s)	۱۴۹	۱۵۰
سرعت خروجی (m/s)	۱۳۶/۵	۱۲۹/۵
جذب انرژی (J)	۲۱/۷۶	۳۴/۹۵

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله پس از تعیین خواص مکانیکی پرتابه و فوم آلومینیومی با تعریف یک سری آزمایش‌های بالستیکی بر روی



شکل ۶ سرعت باقیمانده و انرژی جذب شده در سرعت‌های برخورد مختلف

۴-۲- تأثیر چگالی فوم آلومینیومی

برای بررسی تأثیر چگالی بر میزان جذب انرژی ساختار فوم آلومینیومی در فرایند نفوذ پرتابه صلب سر تخت، از فوم‌های آلومینیومی با ضخامت ۲۰ mm تحت برخورد با سرعت اولیه حدود ۱۴۹ m/s استفاده شده است. نتایج این آزمایش‌های تجربی در جدول ۲ نشان داده شده است.

که در جدول ۲ دیده می‌شود با افزایش چگالی فوم آلومینیومی انرژی جذب شده افزایش می‌یابد، به طوری که با افزایش نسبت چگالی از ۱۴٪ به ۲۰٪، میزان جذب انرژی ۳۵٪ و با تغییر چگالی از ۱۴٪ به ۲۷٪، میزان جذب انرژی ۵۱٪ افزایش یافته است. علت افزایش خواص بالستیکی به این علت است که با کاهش چگالی فوم، میزان تخلخل آن افزایش می‌یابد. از سوی دیگر با افزایش میزان تخلخل در فوم‌های فلزی، استحکام کششی و فشاری آنها کاهش پیدا می‌کند. بر اساس نتیجه آزمایش، استحکام کششی و فشاری فوم آلومینیومی با میزان تخلخل آن نسبت عکس دارد، به طوری که در تخلخل‌های بالای ۷۰٪، به دلیل تشکیل حباب‌های کروی شکل به صورت چندوجهی و در نتیجه ایجاد تمرکز تنش در عیوب موجود در دیواره سلول‌ها، کاهش قابل توجه در استحکام مشاهده می‌شود.

جدول ۲ مقایسه نتایج آزمایش‌های تجربی بالستیک در چگالی‌های

مختلف فوم آلومینیومی			
نسبت چگالی	٪۲۷	٪۲۰	٪۱۴
کد مشخصه	F2027	F2020	F2014
سرعت ورودی (m/s)	۱۴۸	۱۴۹	۱۴۸
سرعت خروجی (m/s)	۱۳۱	۱۳۶/۵	۱۴۰
جذب انرژی (J)	۲۸/۹۳	۲۱/۷۶	۱۴/۰۵

- [7] Li Q.M., Maharaj R.N., Reid S.R., "Penetration Resistance of Aluminium Foam", *International Journal of Vehicle Design*, Vol. 37, No. 2, 2005, pp. 175-183.
- [8] Tan P.J., Reid S.R., Harrigan J.J., Zou Z., Li S., "Dynamic Compressive Strength Properties of Aluminum Foams Part I-Experimental Data and Observations", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 53, No. 2, 2005, pp. 174-205.
- [9] Tan P.J., Reid S.R., Harrigan J.J., Zou Z., Li S., "Dynamic Compressive Strength Properties of Aluminum Foams Part II-'Shock' Theory and Comparison with Experimental Data and Numerical Models", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 53, No. 2, 2005, pp. 206-230.
- [10] Hanssen A.G., Hopperstad O.S., Langseth M., Ilstad H., "Validation of Constitutive Models Applicable to Aluminium Foams", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 44, No. 2, 2002, pp. 359-406.
- [11] Reyes A., Hopperstad O.S., Berstad T., Hanssen A.G., Langseth M., "Constitutive Modeling of Aluminum Foam Including Fracture and Statistical Variation of Density", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 22, No. 6, 2003, pp. 815-835.
- [۱۲] ضیاء شمایی مجتبی، خدارحمی حسین، واحدی خداداد، پل محمد حسین، "بررسی تجربی و عددی نفوذ پرتابه صلب سرتخت در سازه ساندویچی با هسته فوم آلومینیوم"، فصلنامه علمی پژوهشی فنی و مهندسی مدرس مکانیک، در دست چاپ، ۱۳۹۲.
- [13] Ashby M.F., Evans A.G., Fleck N.A., Gibson L.J., Hutchinson J.W., Wadley H.N.G., "Metal Foams: a Design Guide", New York: Cambridge University Press, 2000, pp. 140-154.

ساختار فوم آلومینیومی، مطالعاتی بر روی اثر چگالی و ضخامت فوم و سرعت برخورد عمودی پرتابه صلب استوانه‌ای سرتخت بر میزان جذب انرژی ساختار فوم آلومینیومی انجام شد. آزمایش‌های بالستیکی انجام شده بر روی ساختار فوم آلومینیومی با نسبت چگالی‌های ۱۴٪ و ۲۰٪ نشان می‌دهد که میزان جذب انرژی در حدود ۳۵٪ افزایش می‌یابد. همچنین با تغییر ضخامت فوم آلومینیومی از ۲۰ به ۳۰ میلی‌متر، جذب انرژی در حدود ۳۷٪ افزایش داده شده است. به‌علاوه افزایش سرعت برخورد از ۷۰ m/s به ۱۴۹ m/s، جذب انرژی را در حدود ۴۸٪ افزایش می‌دهد.

۶- مراجع

- [1] Ashby M.F., Evans A.G., Fleck N.A., Gibson L.J., Hutchinson J.W., Wadley H.N.G., "Metal Foams: a Design Guide", New York: Cambridge University Press, 2000, pp. 150-169.
- [۲] دیواندری مهدی، وحید گلپایگانی علیرضا و شاهوردی حمیدرضا، "فوم‌های فلزی"، انتشارات دانشگاه علم و صنعت، تهران، ۱۳۸۹.
- [3] Olurin O.B., Fleck F.A., Ashby M.F., "Indentation Resistance of an Aluminium Foam", *Scripta Materialia*, Vol. 43, No. 11, 2000, pp. 983-989.
- [4] Andrews E.W., Gioux G., Onck P., Gibson L.J., "Size Effects in Ductile Cellular Solids Part II: Experimental Results", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 43, 2001, pp. 701-713.
- [5] Kadar C., Maire E., Borbely A., Peix G., Lendvai J., Rajkovits Z., "X-Ray Tomography and Finite Element Simulation of the Indentation Behavior of Metal Foams", *Materials Science and Engineering*, 2004; pp. 321-325.
- [6] Ramachandra S., Sudheer P., Ramamurty U., "Impact Energy Absorption in an Al Foam at Low Velocities", *Scripta Materialia*, Vol. 49, No. 8, 2003, pp. 741-745.