



تولید فوم آلومینیوم با یک روش جدید و بررسی رفتار فشاری آن

ابوالفضل خلیلی جم¹، مجتبی یزدانی^{2*}، توحید سعید³

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

3- دانشیار، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

* تبریز، صندوق پستی 51335/1996، m.yazdani@sut.ac.ir

چکیده

خواص منحصربه‌فرد فوم‌های فلزی از جمله وزن کم، جذب انرژی زیاد، هدایت حرارتی کم و بازیافت پذیری موجب شده است، محققان در پی یافتن روش‌های جدیدی با هدف دستیابی به این مواد با رابطه خوب بین خواص و هزینه‌های تولید باشند. روش‌های مختلف تولید بر اساس حالت اولیه فلز به دو گروه حالت مایع و روش پودری تقسیم‌بندی می‌شوند. هدف از این مطالعه ارائه روش جدیدی برای تولید فوم آلومینیوم سلول باز با فضا ساز سدیم کلرید است. برای تولید فوم با این روش از دو نوع آلیاژ آلومینیوم با گرانشی متفاوت استفاده شد. برای نشان دادن رفتار فشاری فوم‌های آلومینیوم آزمون‌های فشار انجام شد. نتایج نشان داد رفتار فوم‌های تولید شده با این روش با رفتار فوم در مقادیر دیگر یکسان است. در چگالی‌های مختلف برای فوم نرم رفتار یکسان بود ولی مقدار تنش در جابجایی یکسان برای چگالی‌های بالاتر، بیشتر بود. در چگالی یکسان برای دو آلیاژ مختلف استحکام فشاری فوم تولید شده از آلیاژ A332 بیشتر بود ولی در مقابل فوم تولید شده از آلیاژ 1067 جذب انرژی خوبی است. مدول یانگ برای دو نوع آلیاژ با چگالی‌های یکسان، برای آلیاژ A332 مقدار 1.45GPa و برای آلیاژ 1067 مقدار 1.11GPa به دست آمد. با چگال تر شدن فوم، مقدار راندمان انرژی کاهش یافت.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 24 بهمن 1396

پذیرش: 08 اردیبهشت 1397

ارائه در سایت: 10 خرداد 1397

کلید واژگان:

فوم آلومینیومی

رفتار فشاری

حالت مذاب

The production of aluminum foam with a new method and the study of its compressive behavior

Abolfazl Khalili Jam¹, Mojtaba Yazdani^{2*}, Tohid Saeid³

1- Department of Mechanical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Sahand University, Tabriz, Iran

3- Department of Material Engineering, Sahand University, Tabriz, Iran

* P.O.B. 51335/1996 Tabriz, Iran, m.yazdani@sut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 13 February 2018
Accepted 28 April 2018
Available Online 31 May 2018

Keywords:

Aluminum Foam
Compressive Behavior
liquid state

ABSTRACT

The unique properties of metal foams, including light weight, energy absorption, low thermal conductivity and recyclability, have led researchers to explore new ways to achieve these materials with a good relationship between properties and production costs. Different production methods are divided into two groups of liquid state and powder method based on the initial state of the metal. The aim of this study is to provide a new method for the production of open cell aluminum foam with Sodium Chloride spacer. Two different types of aluminum alloy with different fluidity were used to produce foam with this method. Pressure tests were performed to show the compressive behavior of aluminum foams. The results showed that the behavior of foams produced by this method is the same as the outcomes of other papers. In different densities, the behavior of the soft foam was the same, but the stress was higher in the same displacement for higher densities. In the same density for the two different alloys, the axial strength of the A332 alloy was higher, but in contrast the soft foam is a good energy absorber. Young's modulus for two types of alloys with identical densities was 1.45 GPa for the A332 alloy and 1.11 GPa for the 1067 alloy. The amount of energy efficiency decreased by densifying the foam.

بالا، لحیم‌کاری، جوش برنجی و روش‌های جوشکاری پیشرفته [1] در صنعت خودروسازی (ساختارهای سبک‌وزن، جاذب انرژی در هنگام تصادف، کنترل صدا)، در هوافضا، کشتی‌سازی، قطار، ساختمان‌سازی، مبدل حرارتی، خفه‌کن‌ها و تصفیه آب کاربردهای زیادی دارند [2,3]. معمولاً فوم‌های سلول باز را می‌توان با استفاده از مواد قابل شستشو همراه با فلز به دست آورد. اگر این اصل را مبنای قرار داده شود، دو روش

1- مقدمه

فوم‌های فلزی به دلیل داشتن خصوصیات یکتایی که از ساختار سلولی و رفتار فلزی آن‌ها نتیجه می‌شود، به عنوان کلاس جدیدی از مواد شناخته شده هستند. این مواد به دلیل داشتن خصوصیتی از جمله وزن سبک، نسبت مقاومت و سختی به وزن بالا، چگالی پایین، درجه بالای همگنی، ضربه‌گیری مکانیکی خوب، کاهنده خوب هدایت الکتریکی و حرارتی، قابلیت ماشین‌کاری

جدول 1 نتایج کوانتومتری

Table 1 Spectrometry results

نوع آلیاژ آلومینیوم	1067	A332
%Al	99.675	83.5
%Si	0.069	12
%Cu	0.017	1.0
%Fe	0.17	0
%Ni	0.005	2.5
%Mg	0.002	1.0
%Mn	0.013	0
%Zn	0.016	0
%Ti	0.005	0
%CR	0.003	0
%Pb	0.004	0
%V	0.010	0
%Ga	0.011	0

نمک سدیم کلرید به عنوان فضا ساز مورد استفاده قرار گرفت. دانه های نمک با استفاده از الک های استاندارد درجه بندی شد. اندازه سلول های فوم تولید شده برابر با اندازه های نمک مورد استفاده به عنوان فضا ساز است. مراحل ساخت فوم به صورت خلاصه در ادامه شرح داده شده است.

1-2- آماده سازی مذاب

تکه های آلیاژ آلومینیوم در داخل بوته و در کوره با دمای 750 درجه سانتی گراد به تدریج ذوب شد. دمای ذوب شدن آلومینیوم 660.3 درجه سانتی گراد است اما چون عملیات ریخته گری و ساخت فوم در دمای محیط انجام می شود، بنابراین به دمای بیشتری نیاز هست تا در مدت زمانی که طول می کشد تا مراحل ساخت فوم به پایان برسد، مذاب منجمد نشود. برای افزایش مدت زمان ماندگاری حالت مذاب آلومینیوم، دمای مذاب روی 750 درجه سانتی گراد تنظیم شد.

2-2- آماده سازی قالب

قالب متشکل از یک محفظه فولادی بیرونی، یک غلاف فولادی درونی، یک ورق فولادی و ماسه بادی است. مراحل آماده سازی قالب بدین شکل است که ابتدا مقداری ماسه بادی مرطوب در ته محفظه فولادی ریخته می شود و ورق فولادی در داخل آن و روی ماسه بادی قرار می گیرد. مقدار رطوبت 2% درصد جرمی است. باید دقت شود تا در حد امکان ورق به صورت افقی قرار بگیرد. بعد با فشار دست، ورق در ته محفظه ثابت می شود. بعد از این مرحله یک سمت بازغلاف فولادی بر روی ورق فولادی گذاشته شده و اطراف غلاف در چند مرحله با ریختن ماسه بادی مرطوب و اعمال فشار دست پر شده و غلاف در جای خود کاملاً ثابت می شود. مقدار نیرویی که برای تثبیت غلاف در داخل محفظه فولادی بر ماسه بادی وارد شد، در محدوده 142.3N - 127.5 است. ابعاد محفظه فولادی و قالب در جدول 2 ذکر شده است.

جدول 2 مشخصات محفظه فولادی و غلاف

Table 2 steel box and casing specifications

مشخصات	اندازه (mm)
قطر خارجی غلاف	60
ضخامت غلاف	1
ارتفاع غلاف	15
قطر خارجی محفظه	175
ضخامت محفظه	5
ارتفاع محفظه	20

مختلف با توجه به حالت اولیه فلز، برای تولید فوم وجود دارد؛ حالت مذاب و حالت پودر.

حالت اول روش ریپلیکیشن¹ نام دارد که شامل سه مرحله اصلی است؛ اول محلول نمک در داخل قالب ریخته می شود تا الگوی قالب با سلول های باز را به خود بگیرد در مرحله بعد مذاب فلز در مجاری این الگو ریخته گری می شود و در ادامه پس از انجماد فلز، نمک با انحلال در یک محلول مناسب (معمولاً آب) خارج می شود تا یک فوم با ساختار سلول باز تولید شود. اندازه درصد تخلخل در این فوم ها را می توان با انتخاب چگالی قالب نمکی اولیه تغییر داد. این روش برای اولین بار در 1966 ثبت شد [4].

و در سال های اخیر روش مشابهی توسعه یافت [5 - 7].

ایده آل ترین حالت از این روش زمانی هست که الگوی نمک در داخل قالب تحت خلأ قرار می گیرد و هم زمان یک بلوک آلومینیومی در بالای الگوی نمک در حال ذوب شدن است. بعد از اینکه بلوک آلومینیوم ذوب شد، با استفاده از فشار گاز آرگون مذاب آلومینیوم در تمامی مجاری الگوی نمکی نفوذ می کند و فومی تقریباً همگن به دست می آید [8,9].

حالت دوم که به عنوان فرآیند سینتر و حل شدن² (SDP) شناخته شده است. این فرآیند به وسیله مخلوط کردن پودرهای آلومینیوم و نمک در یک نسبت حجمی از پیش تعیین شده آغاز شده و بعد از آن مخلوط تحت یک فشار مناسب به پیش شکل حاصل در دمایی حدود نقطه ذوب آلومینیوم سینتر شده و ساختاری شبکه مانند شکل می گیرد. در نهایت فوم آلومینیوم با سلول های باز به وسیله حل شدن نمک در آب به دست می آید [10].

در این حالت اگر میزان فلز به اندازه کافی کم باشد ممکن است که تقریباً تمام مواد فضا ساز در مرحله حل شدن از بین بروند. به این دلیل که شبکه از مواد پرکننده ای که به هم مرتبط اند تشکیل می شود یا عملیات فشرده شدن و سینتر در دمای کم تر از نقطه ذوب آلومینیوم صورت گرفته است. در این حالت به ترتیب برای متراکم کردن بیشتر شبکه فلزی متخلخل و یا اتصال کامل دیواره سلول ها به هم می توان مرحله توف جوشی را اعمال کرد [3].

در کشور عزیزمان ایران، مطالعات زیادی در مورد فوم های فلزی و ساندویچ پنل های با هسته فوم آلومینیومی صورت گرفته است [11-14].

در تحقیق حاضر، روش تازه ای از حالت مذاب برای ساخت فوم های سلول باز ارائه شده است. در طرح حاضر یک همزن بسیار ساده و در برخی مواقع تنها یک سیخ فولادی و یک پیستون، به ترتیب جایگزین پمپ خلأ و گاز آرگون در حالت ریپلیکیشن شده است؛ و ماسه بادی مورد استفاده برای تثبیت غلاف در داخل محفظه فولادی مشکل درزبندی را به سادگی حل کرده است و لازم به کاربرد واشر و تجهیزات پیچیده دیگر نیست. از آنجایی که مشخصات مکانیکی، استحکام محوری و جاذب انرژی بودن این مواد تحت فشار معلوم می شود، آزمون های فشار برای چگالی های مختلف و چگالی یکسان و برای دو آلیاژ مختلف آلومینیوم انجام و مدول یانگ برای هر دو نوع فوم محاسبه شد.

2- مراحل ساخت

برای ساخت فوم از دو آلیاژ آلومینیوم با مشخصات کوانتومتری که در جدول 1 آمده است، استفاده شد. برای نشان دادن کاربردی بودن روش برای فوم آلومینیوم در گرانروی های متفاوت از دو آلیاژ با گرانروی کم (1067) و گرانروی زیاد (A332) استفاده شد [15,16].

¹ Replication

² Sintering and dissolution process

ضربه، کامپوزیت نمک و آلومینیوم تولیدشده از داخل غلاف خارج شد. طرح‌واره‌ای از مراحل تولید فوم در شکل 15 نشان داده شده است. نمونه‌های با اندازه‌های استاندارد از کامپوزیت آلومینیوم و نمک توسط اره نواری بریده شد و بعد در داخل حمام آب گرم به مدت 3 ساعت نمک شویی شدند. نمونه‌هایی از کامپوزیت و فوم‌های تولیدشده به این روش در شکل 2 نشان داده شده است.

3- آزمون فشار

ابعاد نمونه‌های مورد نیاز برای آزمون فشار و بارگذاری و باربرداری با رعایت استاندارد ASTM C365 - 03 آماده شد. برای حذف تمرکز تنش در سطوح درگیر با دستگاه آزمون فشار، طبق این استاندارد ناحیه‌های مدنظر با رزین اپوکسی پوشش داده شد. در شکل 3 نمونه‌ای از فوم پوشش داده شده با



a



b

Fig. 2 Composite and foam produced by this method; a) composite, b) foam

شکل 2 کامپوزیت و فوم تولید شده با این روش؛ (a) کامپوزیت، (b) فوم



a



b

Fig. 3 Epoxy resin coating; a) before, b) after coating

شکل 3 پوشش رزین اپوکسی؛ (a) قبل، (b) بعد از پوشش

در قدم بعد محفظه فولادی در داخل کوره به مدت یک ساعت در دمای 750 درجه سانتی‌گراد پیش گرم می‌شود. ضخامت ماسه‌بادی در اطراف غلاف 6 سانتی‌متر است که علاوه بر ثابت کردن غلاف در جای خود، با ذخیره کردن گرما و آزاد کردن این حرارت در طول ساخت فوم، باعث افزایش مدت‌زمان ماندگاری حالت مذاب آلومینیوم خواهد بود. تصویر نهایی قالب در شکل 1 نشان داده شده است.

مقدار رطوبت در ماسه‌بادی موجود در ته ظرف و بالاترین قسمت کاملاً متفاوت است و مقدار رطوبت در ماسه‌بادی موجود در ته ظرف خیلی کم بوده و به اندازه‌ای است که وقتی آن را در مشت فشار دهیم، شکل بگیرد و با افتادن در زمین کاملاً از هم بپاشد.

3-2- آماده‌سازی دانه‌های نمک و پیش گرم کردن نمک، پیستون و همزن

به منظور حذف کامل رطوبت موجود در دانه‌های نمک و جلوگیری از ایجاد ترک و خورد شدن آن‌ها، ذرات نمک به مدت یک ساعت در داخل آن در دمای 100 درجه سانتی‌گراد و به مدت نیم ساعت در دمای 400 درجه سانتی‌گراد خشک شد [17]؛ و قبل از اضافه کردن این دانه‌ها در داخل مذاب، به مدت نیم ساعت در داخل کوره با دمای 750 درجه سانتی‌گراد پیش گرم شد. در حین پیش گرم کردن نمک‌ها، پیستون و همزن با حرارت مشعل تا جایی که کاملاً سرخ شود پیش‌گرم شدند، پیش‌گرم کردن با یک مشعل حدود 15 تا 20 دقیقه طول می‌کشد.

4-2- مرحله ریخته‌گری

بعد از ذوب شدن آلومینیوم و رسیدن به دمای 750 درجه سانتی‌گراد و همچنین اتمام زمان پیش گرم شدن قالب، قالب از داخل کوره بیرون آورده شده و روی آجر نسوز قرار داده شد. در مرحله بعد مذاب (متناسب با ابعاد فومی که تولید خواهد شد) در داخل غلاف فولادی ریخته‌گری شد. در قدم بعدی مقداری از نمک پیش گرم شده در داخل غلاف بر روی مذاب ریخته شده و با استفاده از همزن، دانه‌های نمک در داخل مذاب پخش شدند و بعد از این مرحله مخلوط با پیستون پیش گرم شده فشرده شد تا توده نمک همراه با مذاب در قسمت تحتانی غلاف ثابت شود. مرحله ریختن نمک، هم زدن و اعمال فشار تا پر شدن غلاف تکرار شد. در ادامه محفظه در دمای محیط به مدت یک ساعت خنک شد. با خارج کردن غلاف فولادی از داخل محفظه و خنک شدن کامل غلاف، چون آلومینیوم به فولاد نمی‌چسبد و کاهش حجم جزئی در آلومینیوم بعد سرد شدن وجود دارد، با اعمال چند



Fig. 1 The mold final shape

شکل 1 شکل نهایی قالب

دارد، نشان دهنده خرد شدن فوم است. با ادامه بارگذاری بقیه فوم خرد شده و ناحیه سفت شدگی تقریباً وجود ندارد. این مواد رفتار ترد دارند اما استحکام فشاری آن‌ها بالا بوده و برای ساختارهایی که نیاز به وزن سبک و استحکام فشاری بالا باشند، بهترین گزینه هستند.

البته ناگفته نماند که فوم‌های این آلیاژ هم مثل فوم آلومینیوم خالص در دمای محیط و به آرامی خنک شده است. مطمئناً سرعت سرد شدن تأثیر قابل توجهی در استحکام فشاری این آلیاژ دارد [16]. در شکل 6 نمونه‌ای از فوم‌های نرم و فوم ترد در حین بارگذاری شبه‌استاتیکی نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص هست در حین بارگذاری فوم نرم کاملاً مچاله شده و تغییر شکل پلاستیک دارد. این رفتار مختص جاذب‌های انرژی هست چون با تغییر شکل پلاستیک خود انرژی وارد شده را جذب می‌کنند. در شکل 6، a اوایل بارگذاری برای فوم نرم را نشان می‌دهد که با ادامه بارگذاری به صورت c تغییر شکل یافته است. در مقابل فوم ترد در بارگذاری شبه استاتیکی مقاومت زیادی داشته و در یک تنش بحرانی کاملاً خرد می‌شود. برای فوم ترد تغییر شکل یک‌دفعه بوده و در یک مقدار بار مشخص فوم مطابق قسمت b در شکل 6 خرد می‌شود. قسمت d در شکل 6 تصویر وجه خرد شده فوم ترد را نشان می‌دهد.

آزمون‌های فشار برای فوم با چگالی تقریباً برابر نیز انجام شد. تغییرات چگالی در فوم متأثر از تغییرات ابعاد دانه‌های نمک است. همان‌طور که در شکل 7 آمده است نمودارهای حاصل، تقریباً روی هم افتاده‌اند و این نشان‌دهنده پخش شدن همگن دانه‌های نمک در داخل آلومینیوم و در نهایت تولید فوم‌های همگن هست.

4- چگالی، چگالی نسبی و تخلخل

چگالی فوم‌های فلزی ρ با تقسیم کردن مقدار جرم فوم m بر حجم فوم V حاصل شد.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

چگالی نسبی فوم‌ها از نسبت چگالی فوم به چگالی فلزی که فوم از آن ساخته می‌شود به دست آمد. اگر چگالی فوم ρ باشد و چگالی فلز پایه ρ^* باشد، در این صورت چگالی نسبی ρR از فرمول زیر به دست می‌آید:

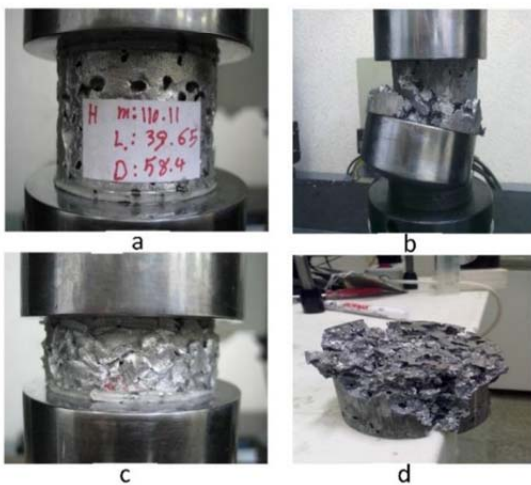


Fig. 6 Soft and brittle foam behavior under quasi - static loading; a), c) soft and b), d) brittle foam

شکل 6 رفتار فوم‌های نرم و ترد تحت بارگذاری شبه استاتیکی؛ c، a) فوم نرم و b، d) فوم ترد

رزین نشان داده شده است. در فوم‌های با دانه‌بندی ریز ضخامت دو سلول و در فوم‌های با سلول‌های درشت‌تر یک سلول با رزین اپوکسی پوشش داده شد. طبق استاندارد سرعت بارگذاری برای آزمون فشار $0.5 \frac{mm}{min}$ تعیین شد. همان‌طور که در شکل 4 واضح هست، رفتار فوم‌ها در چگالی‌های نسبی مختلف یکسان است؛ اما با افزایش چگالی نسبی نمودار تنش - کرنش نیز در سطح بالاتری در محورهای مختصات تنش - کرنش قرار می‌گیرد. نمودار حاصل از رفتار فوم در مقابل بارگذاری فشاری متشکل از سه ناحیه است. ناحیه الاستیک که برای فوم آلومینیوم خالص تقریباً منحنی هست، ناحیه دوم که به آن منطقه سیلان شدن تنش یا پلاتو گفته می‌شود که تا آغاز ناحیه سوم، سفت شدگی ادامه دارد. ناحیه پلاتو با افزایش تدریجی شیب نمودار تنش - کرنش همراه هست و با کاهش چگالی نسبی مقدار شیب و مقدار نمودار در این ناحیه کمتر می‌شود. فوم‌های با آلیاژ A332 همان‌طور که در شکل 5 نشان داده شده است دارای ناحیه الاستیک کاملاً خطی هستند. ناحیه پلاتو با رفتار نوسانی که

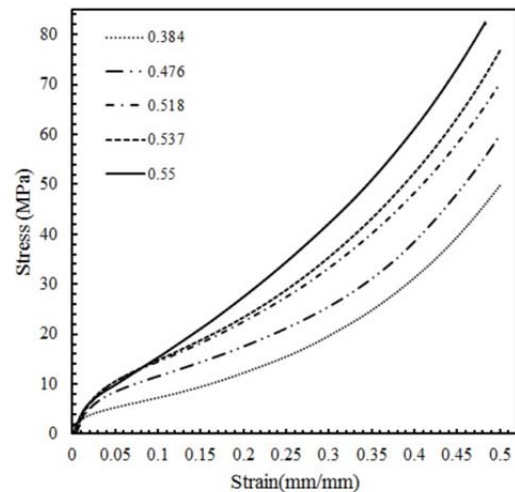


Fig. 4 Soft foam (1067) stress - strain graphs for different relative densities

شکل 4 نمودار تنش - کرنش فوم نرم (1067) برای چگالی‌های نسبی متفاوت

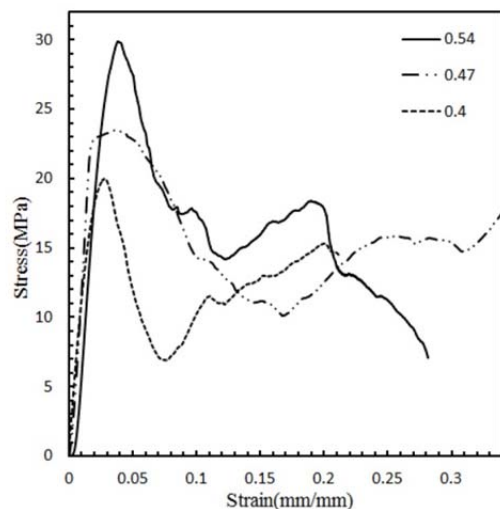


Fig. 5 Brittle foam (A332) stress - strain graphs for different relative densities

شکل 5 نمودار تنش - کرنش فوم ترد (A332) برای چگالی‌های نسبی متفاوت

در محاسبه مدول یانگ فوم‌های نرم از آنجایی که ابتدای نمودار تنش - کرنش منحنی است و ناحیه خطی وجود ندارد، از نمودار بارگذاری - باربرداری که در شکل 9 نمونه‌ای از نمودار بارگذاری - باربرداری فوم نشان داده شده، استفاده شد [18]. برای محاسبه مدول یانگ، اشیبی پیشنهاد کرده‌اند که از قسمت باربرداری این نمودارها استفاده شود ولی همان‌طور که در شکل 10 مشخص هست با اینکه در حالت عادی قسمت‌های بارگذاری و باربرداری روی هم افتاده و خطی دیده می‌شوند (شکل 9) ولی بعد از اینکه نمودار بزرگ‌نمایی شد، تا قسمت‌های بارگذاری و باربرداری از هم تفکیک شوند، مشخص شد که قسمت باربرداری اصلاً خطی نیست و چون مدول یانگ از روی شیب قسمت خطی نمودار تنش - کرنش محاسبه می‌شود، پس این نظریه برای محاسبه مدول یانگ فوم حاصل از آلیاژ 1067 جواب نداد.

پس مدول یانگ بدین صورت محاسبه شد که ابتدا در نرم‌افزار اکسل ضخامت نمودار بارگذاری و باربرداری به 0.5 کاهش داده شد¹ با این کار قسمت‌های خطی نمودار بارگذاری - باربرداری کاملاً مشخص شد و همان‌طور که در شکل 11 مشخص هست، خطی مستقیم با ضخامت 1 بر روی ناحیه خطی بارگذاری - باربرداری برآزش شد.

بعد از این مرحله خود نمودار حذف شده و با انتخاب دو نقطه روی این خط‌ها مقدار مدول یانگ محاسبه شد [19] (شکل 12). محاسبه مدول یانگ در قسمت‌های دیگر نمودار بارگذاری - باربرداری و مقایسه درصد خطاهای به‌دست‌آمده با درصد خطاهایی که اشیبی در نتیجه تحقیقات به دست آورده‌اند، درستی مقادیر به‌دست‌آمده برای مدول یانگ را تأیید کرد.

مقدار مدول یانگ برای خط‌های نشان داده شده در شکل 12 محاسبه شد. مقادیر به دست آمده در جدول 2 نشان داده شده است. اختلاف مقادیر به دست آمده 9% - 12% به دست آمد. این مقدار در بازه خطایی که از تحقیقات اشیبی و همکاران به دست آمده (5% - 15%)، قرار دارد و طبق نتیجه‌گیری‌های حاصل از تحقیق‌های اشیبی این مقدار خطا برای مدول یانگ در فوم به دلیل افزایش تدریجی سخت‌شوندگی ماده و در نتیجه افزایش مقدار مدول یانگ، معقول هست [18].

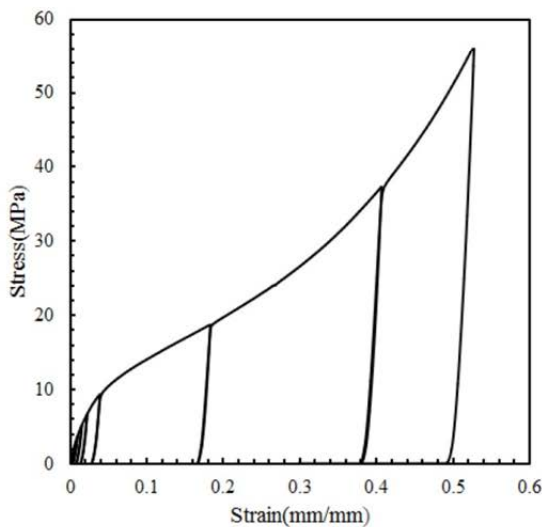


Fig. 9 loading - unloading curve (1067)

شکل 9 نمودار بارگذاری - باربرداری (1067)

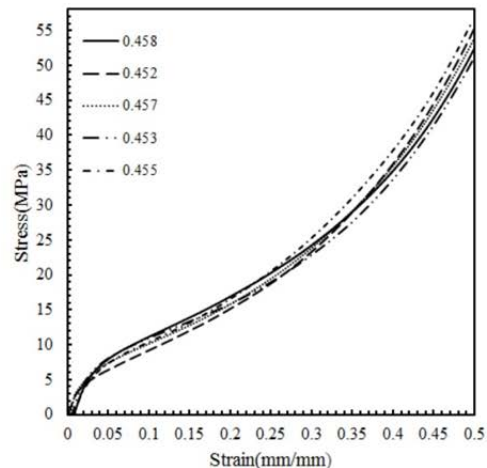


Fig. 7 The stress - strain curve for soft foam (1067) with approximately equal relative densities

شکل 7 نمودار تنش - کرنش فوم نرم (1067) برای چگالی‌های نسبی تقریباً برابر

$$\rho_R = \frac{\rho}{\rho^*} \quad (2)$$

همان‌طور که در شکل 3 سطح مقطع نمونه‌ای از فوم‌های تولیدشده مشخص هست، پراکندگی سلول‌ها در تمام سطح مقطع تقریباً یا می‌شود گفت دقیقاً یکسان هست. این پراکندگی یکسان سلول‌ها نتیجه به‌کارگیری همزن در این سیستم هست. تخلخل یکسان در کل فوم نیز نتیجه پراکندگی یکسان سلول‌ها در تمام فوم هست. وجوه فوم‌های نشان داده شده در شکل 2-b که نشان دهنده پخش یکنواخت سلول‌ها در فوم هست، از نمونه‌های بزرگ‌تر فوم تولید شده به این روش، برش داده شده‌اند.

5- مدول یانگ

مطابق شکل 8 فوم‌های ترد، چون استحکام محوری بالایی دارند و نمودار تنش - کرنش در بارگذاری‌های پایین‌تر کاملاً خطی است با انتخاب دو نقطه روی این خط مقدار شیب نمودار و از روی آن مقدار مدول یانگ به دست می‌آید.

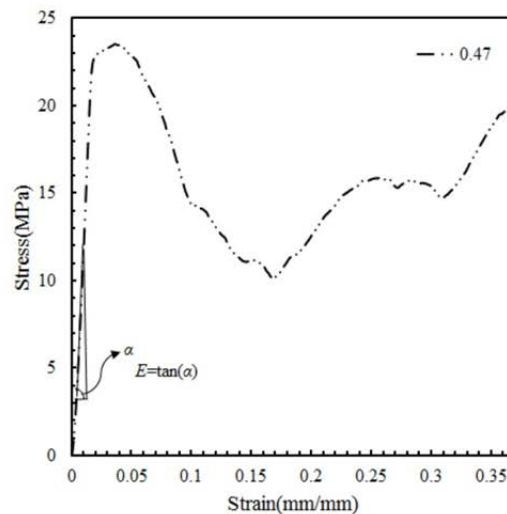


Fig. 8 Brittle foam (A332) Young's modulus

شکل 8 مدول یانگ فوم ترد (A332)

¹ Width in chart options

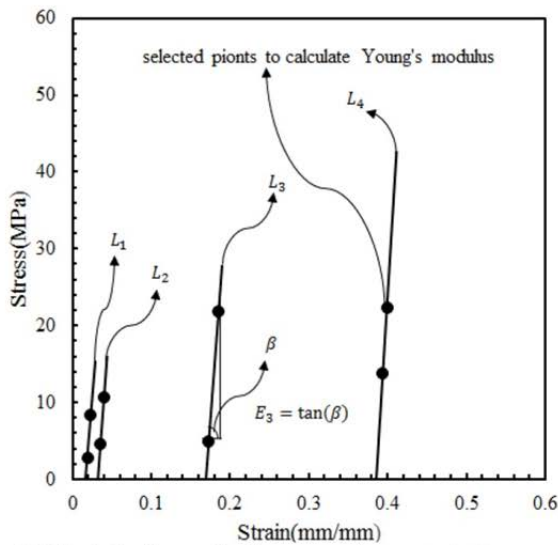


Fig. 12 Hide the loading - unloading curve and compute the Young modulus from fitted lines

شکل 12 حذف نمودار بارگذاری - باربرداری و محاسبه مدول یانگ از روی خطوط برازش شده

انرژی، برای اینکه بهترین و مناسبترین کاربرد را داشته باشند و بتوانند به خوبی از اجسام و قطعات محافظت کنند، باید در تنش‌هایی در محدوده تنش پایا خود تحت بارگذاری قرار گیرند. فوم‌های فلزی به علت ناحیه هموار وسیعی که در منحنی تنش - کرنش آن‌ها تحت فشار مشاهده می‌شود، قابلیت و راندمان جذب انرژی خوبی دارند. هنگام وارد شدن ضربه، نیروها با سطح تنشی کنترل می‌شوند که در آن میزان تنش، انرژی جنبشی جذب می‌شود.

انرژی جذب شده در واحد حجم E_V در یک کرنش معین $[\epsilon_1, \epsilon_2]$ معادل سطح زیر منحنی تنش - کرنش است و از طریق فرمول 3 قابل محاسبه است:

$$E_V = \int_{\epsilon_1}^{\epsilon_2} \sigma(\epsilon) d\epsilon \quad (3)$$

راندمان جذب انرژی η ، نسبت بین انرژی جذب شده توسط ماده و انرژی جذب شده توسط یک جذب کننده انرژی ایده‌آل که یک ماده پلاستیک ایده‌آل است، می‌باشد و از طریق فرمول 4 به دست می‌آید:

$$\eta = \frac{\int_{\epsilon_1}^{\epsilon_2} \sigma(\epsilon) d\epsilon}{\sigma_0(\epsilon_2 - \epsilon_1)} \quad (4)$$

بیشتر فوم‌های فلزی یک ناحیه مسطح تقریباً هموار دارند و بنابراین راندمان جذب انرژی بالایی دارند که به میزان کرنش اعمال شده بستگی دارد [20].

مقدار انرژی جذب شده و راندمان جذب انرژی، برای فوم‌ها با چگالی‌های متفاوت، از روی نمودار تنش - کرنش نشان داده شده در شکل 5، به دست

جدول 4 مقادیر انرژی و راندمان انرژی برای چگالی‌های نسبی متفاوت

Table 4 Energy and energy efficiency values for different relative densities

چگالی نسبی	انرژی جذب شده توسط فوم	راندمان انرژی
0.382	9.194	0.384
0.413	12.42	0.476
0.443	15.5	0.518
0.429	15.7	0.537
0.445	17.16	0.550

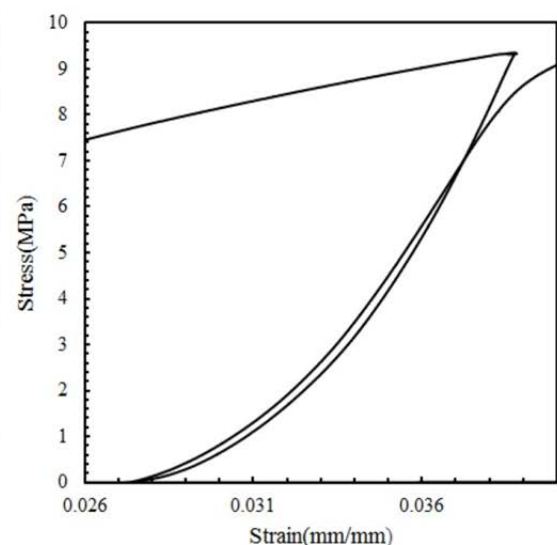


Fig. 10 determine loading and unloading parts

شکل 10 مشخص‌سازی قسمت بارگذاری و قسمت باربرداری

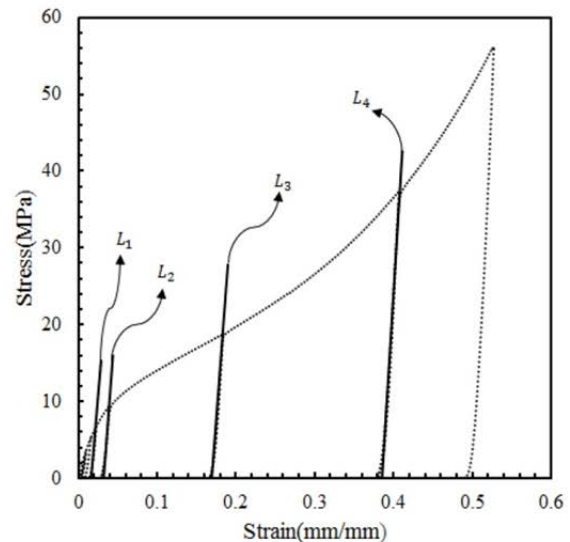


Fig. 11 fit the lines on loading - unloading parts

شکل 11 برازش کردن خطوط روی قسمت‌های بارگذاری و باربرداری

جدول 3 مقادیر مدول یانگ

Table 3 Young modulus amounts

خط	یمدول یانگ (GPa)
L_1	1.08
L_2	1.08
L_3	1.19
L_4	1.22

6- انرژی جذب شده

جذب‌کننده‌های انرژی خوب، باید میزان کرنش زیادی را در تنش ثابت نسبتاً کم تحمل کنند. در حقیقت مواد و سازه‌هایی که به عنوان جذب انرژی به کار می‌روند، از اجسام و قطعات در برابر وارد شدن ضربه محافظت می‌کنند.

منحنی‌های تنش - کرنش جاذب‌های انرژی عموماً دارای ناحیه‌ای هموار و وسیع می‌باشند؛ که به تنش در این ناحیه تنش پایا گفته می‌شود. این مواد در تنش‌های بالاتر از این تنش، دچار تغییر فرم پلاستیک می‌شوند و خاصیت خود برای جذب انرژی را از دست می‌دهند. به این دلیل جاذب‌های

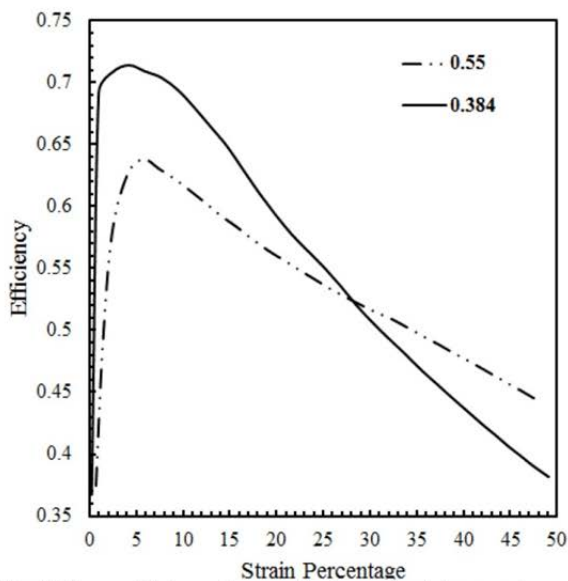


Fig. 14 Energy efficiency change with changes in strain percentage
 شکل 14 تغییر راندمان انرژی با تغییرات درصد کرنش

به مراتب بیشتر از شمش آلومینیوم هست و فوم‌های تولید شده به روش ریپلیکیشن کیفیت بالایی دارد و این از مزیت‌های روش ریپلیکیشن هست. برای تولید یک نمونه فوم با قطر 60mm با روش موجود در این تحقیق و روش پیچیده ریپلیکیشن می‌توان به این نتیجه رسید که روش مورد استفاده در این تحقیق، هزینه به مراتب کم‌تری لازم دارد و روش استفاده شده در این تحقیق بسیار ساده است [9].

حالا اگر قرار باشد که نمونه‌های تولید شده ابعاد بزرگ‌تری داشته باشد، آیا می‌شود درزبندی در روش ریپلیکیشن را که فقط در حد آزمایشگاهی استفاده شده است، به صورت کامل انجام داد؟ یا اینکه آیا تولید پودر آلومینیوم به این مقدار در روش پودری صرفه اقتصادی خواهد داشت؟ با روش توضیح داده شده در این تحقیق نمونه‌های بزرگ‌تری می‌توان با کمترین تغییرات، تولید کرد. از مزیت‌های روش استفاده شده در این تحقیق علاوه بر تولید فوم باکیفیت، سیستم ساده‌ای داشته و هزینه تولید فوم نسبت به روش‌های دیگر به مراتب کم‌تر هست.

8- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، روش جدیدی برای تولید فوم معرفی شد، با این روش فوم با هر اندازه سلول قابل تولید است. در کشورهای در حال توسعه مثل کشور خودمان ایران نیازمند طرح‌ها و روش‌های تولید با هزینه کم‌تر و کیفیت خوب هستیم. نتایج حاصل از مشاهدات بصری از فوم‌های تولید شده و نتایج نمودارهای تنش - کرنش کیفیت فوم از لحاظ یکنواخت پخش شدن سلول‌ها و برابر بودن چگالی در سلول بندی‌های برابر را نشان می‌دهد. فوم‌های حاصل از آلیاژ A332 که گرانیوز مذاب با وجود سیلیسیوم در آن بهبود یافته است، دارای استحکام محوری بالایی بوده و برای ساختارهایی که نیاز به استحکام محوری بالایی هستند، مناسب می‌باشند. فوم‌های حاصل از آلیاژ 1067 چون دارای ماکزیمم تغییر شکل پلاستیک در بارگذاری فشاری هست، مناسب برای ساختارهایی است که به شدت نیازمند جذب انرژی هستند.

آمد. نتایج حاصل از محاسبات در جدول 3 نشان داده شده است.

برای داشتن دید روشن‌تر نسبت به تغییرات انرژی و راندمان انرژی، انرژی جذب شده توسط جاذب انرژی ایده‌آل در کرنش 50% محاسبه و این مقادیر با انرژی و راندمان انرژی بر حسب تغییرات چگالی نسبی، در شکل 13، مقایسه شد. مشاهده می‌شود که مقادیر انرژی جذب شده توسط فوم، انرژی جذب شده توسط جاذب ایده‌آل و راندمان انرژی با افزایش چگالی نسبی، افزایش یافته است.

در بارگذاری‌های با سرعت‌های خیلی کم، (شبه استاتیکی) با افزایش چگالی نسبی فوم به اندازه‌ی 30% مقدار انرژی جذب شده به مقدار 47% و مقدار راندمان انرژی به مقدار 14% افزایش یافته است.

سوال مهم این است که در یک فوم با افزایش درصد کرنش، تغییری در راندمان انرژی ایجاد می‌شود؟ برای رسیدن به جواب این سؤال، مقادیر راندمان انرژی در درصدهای مختلف کرنش محاسبه شد. همان‌طور که در شکل 14 نشان داده شده است، نمودار راندمان بر حسب درصد کرنش در ابتدا به صورت صعودی بوده و مقدار پیک نمودار با کاهش چگالی نسبی زودتر اتفاق افتاده است. با افزایش درصد کرنش و در نتیجه چگال‌تر شدن فوم در اثر بارگذاری فشاری، مقدار راندمان انرژی کاهش یافته است.

7- مقایسه با روش‌های دیگر

این مورد بسیار بدیهی است که آلیاژ خاصی از آلومینیوم به هر روشی که تولید شود، در آزمون کشش یا فشار رفتار یکسان و برابری نشان خواهد داد و تنها تفاوت در این پروسه روش تولید هست. روش‌های تولید می‌توانند پیچیده یا ساده، ارزان یا پرهزینه باشند. در مورد تولید فوم نیز این‌طور هست. فوم تولید شده با آلیاژ مثلاً A332 به هر روشی که تولید شود اگر هم‌زمان چگالی و اندازه سلول برابر داشته باشند و در شرایط یکسانی خنک‌کاری شوند، رفتار یکسان و برابری خواهند داشت و تنها تفاوت در روش تولید (ساده یا پیچیده بودن سیستم تولید) و هزینه تولید هست. روش ذکر شده در این تحقیق در گروه روش ذوبی قرار دارد. تفاوت روش ذوبی و روش پودری در حالت اولیه فلز مورد استفاده برای تولید فوم هست. هزینه پودر آلومینیوم

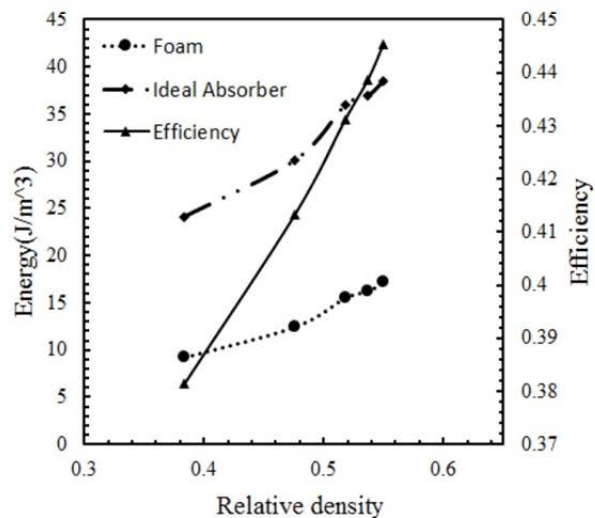


Fig. 13 Changes in energy and energy efficiency by changing relative densities (1067)

شکل 13 تغییرات در انرژی و راندمان انرژی با تغییر چگالی نسبی (1067)

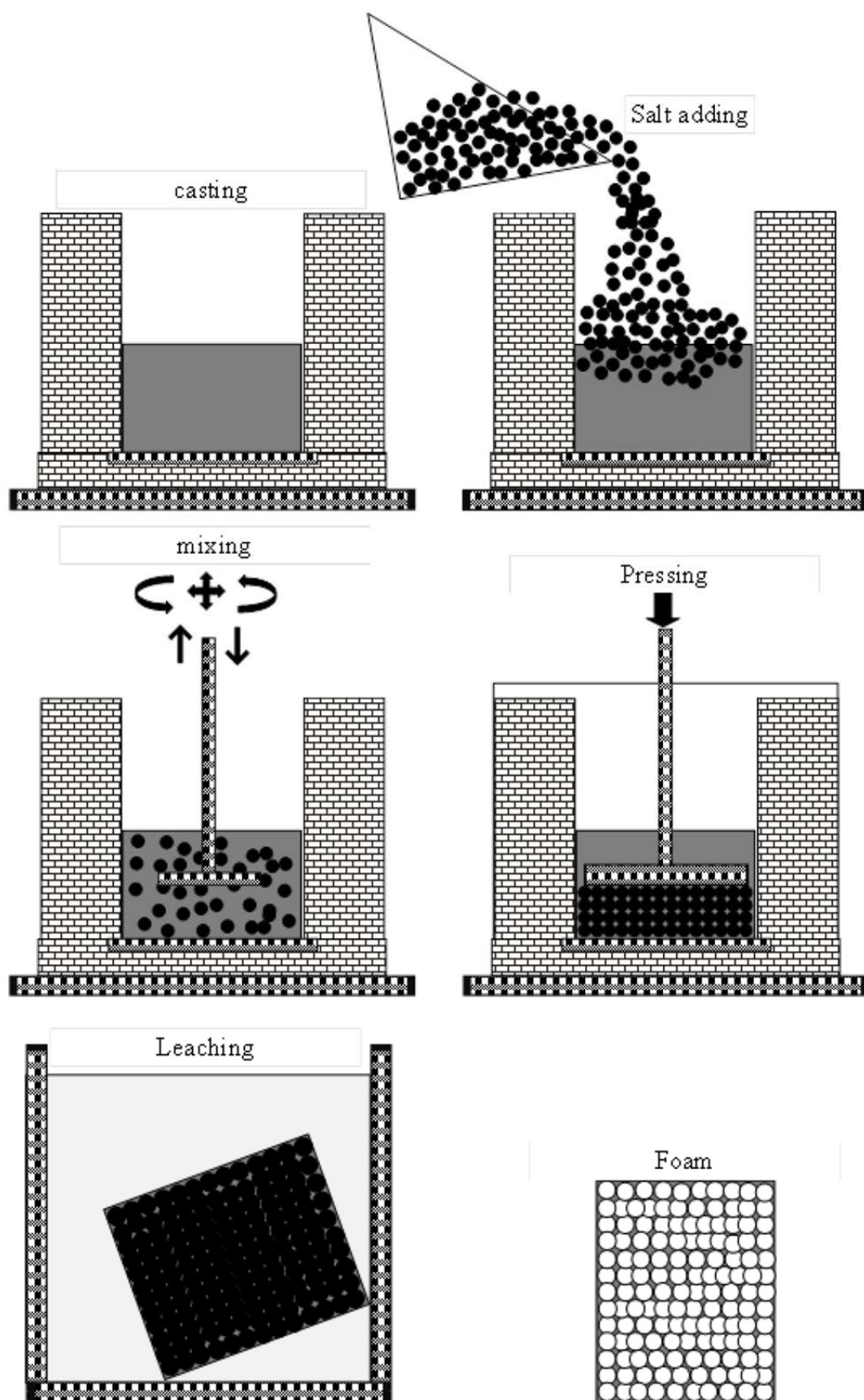


Fig. 15 Foam production scheme

شکل 15 طرحواره‌ی مراحل تولید فوم

[7] C. Gaillard, J. Despois, A. Mortensen, Processing of NaCl powders of controlled size and shape for the microstructural tailoring of aluminum foams, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 374, No. 1 -2, pp. 250 - 262, 2004.

[8] L. Wang, H. Li, F. Wang, J. Ren, Preparation of open -cell metal foams by investment cast, *China Foundry*, Vol. 2, No. 1, pp. 56 -59, 2005.

[9] E. M. E. Luna, F. Barari, R. Woolley, R. Goodall, Casting protocols for the production of open cell aluminum foams by the replication technique and the effect on porosity, *Journal of Visualized Experiments: JoVE*, No. 94, 2014.

[10] X. Ma, A. Peyton, Y. Zhao, Measurement of the electrical conductivity of open -celled aluminium foam using non -contact eddy current techniques, *Independent Nondestructive Testing and Evaluation*, Vol. 38, No. 5, pp. 359 - 367, 2005.

[11] Experimental and numerical investigation of a blunt rigid projectile penetrating into a sandwich panel having aluminum foam core, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 5, pp. 1-13, 2013. (in Persian فارسی)

[12] 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 فارسی)

[13] E. Zamani, G. Liaghat, M. H. Pol, Modeling and analytical study of progressive collapse of aluminum foam, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 9, pp. 99-106, 2014. (in Persian فارسی)

[14] S. S. jafari, Analytical investigation of perforation of aluminum-foam sandwich panels under ballistic impact, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 6, pp. 52-59, 2013. (in Persian فارسی)

[15] L. F. Mondolfo, *Aluminum Alloys: Structure and Properties*, pp. 368-372, London; Boston: Butterworths, 1976.

[16] J. G. Kaufman, E. L. Rooy, *Aluminum Alloy Castings: Properties, Processes, and Applications*, First Printing, USA: ASM International, 2004.

[17] D. Sun, Y. Zhao, Phase changes in sintering of Al/Mg/NaCl compacts for manufacturing Al foams by the sintering and dissolution process, *Materials Letters*, Vol. 59, No. 1, pp. 6 -10, 2005.

[18] M. F. Ashby, T. Evans, N. A. Fleck, J. Hutchinson, H. Wadley, L. Gibson, *Metal Foams: A Design Guide*, USA: Butterworth Heinemann, 2000.

[19] A. W. Rohatgi, URL <http://arohatgi.info>, *WebPlotDigitizer/app*, Vol. 512, 2011.

[20] F. Simancik, H. Degischer, C. Körner, R. Singer, et al, *Handbook of Cellular Metals: Production, Processing, Applications*, pp. 190-191, the University of Michigan: Wiley-VCH, 2002.

9- فهرست علائم

جرم فوم (kg)	m
حجم فوم (m^3)	V
خطوط برآزش شده	$L_i, i = 1,2,3,4$
انرژی جذب شده (Jm^{-3})	E_V
مدول یانگ (GPa)	E
علائم یونانی	
چگالی نسبی (kgm^{-3})	ρ_R
راندمان جذب انرژی	η
چگالی فوم (kgm^{-3})	ρ
چگالی فلز پایه (kgm^{-3})	ρ^*
زیر نویس ها	
نسبی	R

10- مراجع

[1] J. Zhou, C. Mercer, W. Soboyejo, An investigation of the microstructure and strength of open -cell 6101 aluminum foams, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 33, No. 5, pp. 1413 -1427, 2002.

[2] H. Zhu, A. Windle, Effects of cell irregularity on the high strain compression of open -cell foams, *Acta Materialia*, Vol. 50, No. 5, pp. 1041 -1052, 2002.

[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] H. A. Kuchek, *Method of Making Porous Metallic Article*, Google Patents, 1966; <https://patents.google.com/patent/US3236706A/en>.

[5] C. San Marchi, A. Mortensen, Deformation of open -cell aluminum foam, *Acta Materialia*, Vol. 49, No. 19, pp. 3959 -3969, 2001.

[6] J. Li, H. Cheng, J. Yu, F. Han, Effect of dual -size cell mix on the stiffness and strength of open -cell aluminum foams, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 362, No. 1 -2, pp. 240 -248, 2003.