

تعیین سیکل عملیات پیرسازی فوم کامپوزیتی پایه آلومینیم A356+4%wt.Cu و مقایسه آن با

خواص مکانیکی فوم A356

سیدمحمد حسین میرباقری^{۱*}، حسین سلطان^۲ و حامد والی^۳

چکیده

امروزه فوم‌های فلزی بویژه فوم های پایه آلومینیم به عنوان مواد پیشرفته پا به عرصه صنعت گذاشته‌اند و روز به روز فرآورده‌های متنوعی از آنها وارد بازار مصرف می‌شود. لذا، بهبود خواص و دانش فنی این فوم ها به وسیله پژوهشگران در حال توسعه است. از این رو، در این پژوهش سعی شده است؛ ابتدا محصول فوم آلومینیم A356 به روش ذوبی تهیه شود. سپس با آلیاژ سازی آلیاژ A356 به وسیله ۴ درصد وزنی مس خالص، این آلیاژ مستعد به عملیات پیرسازی شود. آنگاه فوم دیگری با این آلیاژ A356+4%wt.Cu ساخته شود. در مرحله دوم با طراحی و انجام آزمون های متفاوت عملیات حرارتی، سیکل بهینه پیرسازی برای آلیاژ اخیر بدست آمد. نتایج نشان می دهند عملیات محلول سازی فوم فلزی یاد شده در دمای ۵۱۰ درجه سلسیوس به مدت زمان ۱۲ ساعت و سپس کوئنچ آن در آب سرد و در پی آن عملیات پیر سازی در دمای ۱۶۰ درجه سلسیوس به مدت ۳ ساعت، بهترین خواص مکانیکی را برای فوم A356+4%wt.Cu فراهم می آورد. در این شرایط استحکام تسلیم فشاری تک محوری فوم پیرسازی شده نسبت به نمونه خام تقریباً از ۱۰ به ۲۷ MPa تغییر یافته است که حدود ۱۷۰ درصد افزایش استحکام تسلیم را نشان می دهد. همچنین، نتایج آزمون جذب انرژی در بارگذاری فشاری تک محوری نشان می‌دهد نمونه پیر شده یاد شده حدود ۱۶۰ درصد نسبت به نمونه خام عملیات حرارتی نشده، افزایش داشته است، اما مدول الاستیک مشخصه فوم یاد شده در مقایسه با سایر سیکل ها که زمان محلول سازی و پیرسازی آن ها کم‌تر بوده، تغییرات قابل ملاحظه ای نداشته و بین ۱۰ تا ۱۱ GPa تقریباً ثابت می ماند. بررسی ساختار سلولی فوم پیش و پس از آزمون فشار نشان می دهد حضور ۴ درصد مس منجر با فاکتور کرویت نزدیک به واحد شده و ساختار سلولی فوم حاصله بسیار همگن تر از نمونه A356 تنها بوده و چروکیدگی سطح داخلی این فوم با افزودن ۴ درصد مس کاملاً از بین می رود.

واژه‌های کلیدی: فوم آلومینیم A356، مس، عملیات حرارتی پیرسازی، خواص مکانیکی، جذب انرژی.

۱- دانشیار دانشکده مهندسی معدن و متالورژی.

۲- کارشناس مهندسی متالورژی- دانشگاه امیرکبیر.

۳- کارشناس مهندسی متالورژی- دانشگاه امیرکبیر.

* - نویسنده مسئول مقاله: smhmirbagheri@aut.ac.ir

پیشگفتار

امروزه فوم های فلزی به عنوان مواد پیشرفته با خواص شکست انگیز خود در زندگی روزمره در حال افزایش هستند. کشورهای مانند آمریکا، آلمان، کره، ژاپن و چین در این زمینه فرآورده های متنوعی را به بازار مصرف ارایه کرده اند. روی هم رفته، فوم های فلزی در دو گروه فوم سلول باز و سلول بسته تولید می شوند. فوم های سلول بسته در صنایع جذب انرژی مکانیکی، صوت، حرارت و ضربه کاربرد ویژه دارند، اما فوم های سلول باز بیش تر در صنایع باتری سازی و فیلتراسیون و مبدل های حرارتی کاربرد تجاری دارند. از بین روش های گوناگون تولید فوم، در این پژوهش روش ذوبی به کمک تزریق عامل حباب زا مد نظر است، لذا پژوهش های انجام شده در این زمینه ارایه می شود. سایر روش های تولید فوم فلزی در منابع [۱-۴] آمده است. روی هم رفته، فوم های تولید شده به روش ذوبی به وسیله عامل حباب زا، موسوم به فوم Alopros هستند. اساس روش تولید این فوم ها همانند زدن پودر لباس شویی به آب است که با همزدن شدید آن کف یا فوم تولید می شود، اما در مذاب آلومینیم عامل کف زا موادی هستند که در اثر حرارت و همزدن به وسیله پروانه های فولادی، گازهای همانند هیدروژن و کربنات تولید می کنند، مانند پودر هیدرید تیتانیوم و کربنات کلسیم [۵-۶]، اما دانش فنی تولید فوم به این روش بسیار پیچیده است و به راحتی با افزودن این مواد به مذاب آلومینیم، فوم همگن و پایداری بدست نمی آید. در منابع گوناگون نکات کلیدی متفاوتی را ارایه می دهند. بعضی ها تنظیم دمای ذوب را عامل اساسی رسیدن به فوم با ساختار همگن می دانند [۷]. برخی دیگر، کنترل دمای پف سازی و مدت زمان پف سازی را عامل اصلی می دانند [۸]، اما گروهی دیگر اضافه کردن موادی به نام ویسکوزساز را برای رسیدن به فوم همگن لازم می دانند [۹]. از جمله این مواد می توان به فلزخالص کلسیم یا پودر کارباید سیلیس یا سیلیس تنها اشاره کرد [۴و۵]. نویسندگان پژوهش دریافتند که ابتدا بایستی فوم مذاب با حباب های بسیار ریز را در یک کوره تهیه کرد. سپس با ریخته گری آن در یک قالب فلزی پیش گرم و انتقال سریع آن به کوره دیگر با دمای معین و کنترل شده به فوم های با دانسیته و

اندازه حباب های دلخواه دست یافت. چیزی شبیه تهیه کیک در فر اجاق گاز [۱۰و۱۱]. پس از تهیه فوم با دانسیته دلخواه آن را سریع منجمد و بسته به نیاز کاربر آزمون های گوناگونی روی آن انجام می گیرد. در فوم های سلول بسته بیش تر آزمون های مکانیکی مد نظر پژوهشگران بوده است و در این زمینه، مقاله های زیادی منحنی های تنش-کرنش فوم ها را مورد بررسی و آنالیز دقیق قرار داده اند و خواص مکانیکی نظیر مدول یانگ، استحکام تسلیم، کرنش چگالش و سطح زیر منحنی تنش-کرنش را به عنوان انرژی جذب تغییر فرم پلاستیک اندازه گیری کرده و برای فوم های متنوع و در شرایط متنوع مورد مقایسه قرار داده اند تا کاربر بر اساس نیاز خود بتواند فوم مورد نظر خود را انتخاب و مصرف کند و یا خواص مورد نظر خود را در این فوم بهینه سازد [۱۲-۱۴]. در این میان، تعدادی از مقاله ها اثر عملیات حرارتی پیرسازی را بر خواص مکانیکی آلیاژهای آلومینیم سری دوهزار یا هفت هزار ارایه داده اند [۱۵-۱۸]. مطالعه این مقاله ها گه گاه نتایج ضد و نقیض با همدیگر داشته و حتی با مقایسه با انجام همین عملیات روی نمونه های متراکم (غیر فومی) بعضاً توافق و همخوانی ندارد [۱۹-۲۱]. لذا، هنوز ساز و کار استحکام بخشی فوم های فلزی به وسیله عملیات حرارتی پیرسازی مشخص نشده و ارزش مطالعه در این زمینه به قوت خود باقی مانده است. نکته قابل تأمل برای کسانی که در زمینه فوم های فلزی پژوهش کرده اند، این است که حوزه صنعتی این فوم ها بیش تر محدود به فوم های آلومینیم خالص (سری ۱۰۰ ریختگی) و یا آلیاژ آلومینیم-سیلیسیم و در حد آزمایشگاهی (سری ۲۰۰ ریختگی) بوده است [۱۹]. اولی اصلاً قابلیت پیرسازی ندارد. دومی نیز آنچنان به پیرسازی در مقیاس صنعتی (تغییر خواص چشمگیر) حساس نیست، اما آلیاژ آلومینیم سری ۲۰۰ ریختگی کاملاً پیرسازی می شود، ولی تولید فوم فلزی این سری صنعتی نشده است [۵]. مقاله هایی که در این زمینه منتشر شده نشان از تعدد داده ها برای زمان و دمای پیرسازی دارد. اگرچه زمان و دمای مرحله تهیه محلول سازی جامدشان نیز یکسان گزارش نشده است [۲۴و۱۵و۲-۱]. از این رو، در این پژوهش سعی شده تا در یک قدم ابتکاری تلفیقی از تقریباً دو آلیاژ سری ۳۰۰ و

فولادی به وسیله جوش تیگ، جوش خورده بود، بر اساس شکل ۱ قرار داده شد و با انتقال به داخل یک کوره برقی المنتی با قابلیت کنترل دما با دقت مثبت و منفی ۵ درجه، در دمای 640°C ذوب شد. سپس $53/8$ گرم سیم مسی، معادل 4% وزنی، به آن اضافه شد و به مدت ۲ دقیقه و 35 ثانیه به وسیله هم زن دستی با سرعت 1400 دور بر دقیقه هم زده شد تا کاملاً در داخل مذاب حل شود. طراحی این پروانه در کیفیت فوم تولیدی بسیار با اهمیت است و باید بین قطر خارجی پروانه همزن و قطر داخلی بوته فولادی نسبت $0/6$ رعایت شود. لذا، پروانه یاد شده با اتصال چهار تسمه فولادی با ضخامت ۲ و ابعاد $20 * 55$ میلی متر به یک میله فولادی به طول 350 میلی متر به وسیله جوشکاری و سپس خم نمودن تسمه ها بر اساس شکل ۲ ساخته شد. در مرحله بعد دمای مذاب به 640°C رسانده شد. سپس $26/92$ گرم فلز کلسیم $99/9\%$ خالص، معادل 2% وزنی، به صورت تکه های کوچک از داخل نفت خارج و به تدریج در مدت زمان ۷ دقیقه به مذاب در حال هم زدن افزوده شد. سپس به مدت ۲ دقیقه برای محلول سازی ترکیب و دمای مذاب، هم زدن ادامه یافت. در این مرحله، ترکیب شیمیایی مذاب موردنظر، بر اساس جدول ۳ تنظیم و آلیاژسازی شد. در مرحله بعد، باید این مذاب آلیاژی سریع به فوم مذاب تبدیل شود. بدین منظور، در این مرحله $13/46$ گرم پودر TiH_2 عملیات حرارتی شده $[10]$ ، معادل 1% وزنی، به مذاب در دمای 640°C اضافه و به مدت ۱ دقیقه و 42 ثانیه با سرعت 2800 دور بر دقیقه در داخل کوره هم زده شد. سپس مذاب به داخل قالب فولادی گرمکار شکل ۳ با

200 ریختگی را در کنار هم برای تهیه فوم آلومینیمی فراهم آورد. به این منظور، به آلیاژ A356 مقدار مناسبی فلز مس اضافه شده که قابلیت پیرسازی آن را به شدت افزایش دهد. سپس فناوری تولید فوم در مقیاس نیمه صنعتی بر اساس تجربه ۷ ساله گروه فوم سازی دانشگاه امیرکبیر ارایه می شود و سپس سیکل عملیات حرارتی محلول سازی و پیرسازی بهینه (برای رسیدن به بیشترین استحکام تسلیم فشاری) آن ارایه شده و در نهایت، شرایط نیمه صنعتی تولید این فوم جدید ارایه می شود.

مواد و روش ها

در این پژوهش از آلیاژ پایه آلومینیم A356، بر اساس استاندارد ASTM آمریکا استفاده شده است. ترکیب شیمیایی آن در جدول ۱ آمده است. همچنین، در آلیاژ سازی ثانویه پیش از فوم سازی از فلز کلسیم برای افزایش ویسکوزیته مذاب بمنظور پایداری حباب در مذاب و همچنین، افزودن فلز مس برای ایجاد قابلیت پیرسازی استفاده شده است. برای فوم سازی از پودر TiH_2 به عنوان حباب زا استفاده شده است که مشخصات دقیق آن در جدول ۲ آمده است. طراحی ترکیب شیمیایی و مقدار مواد افزودنی به مذاب آلومینیمی برای تولید فوم فلزی با قابلیت پیرسازی بر اساس مقاله های موجود و محدوده خمیری دیگرام فازی آن ها و تجربه پیشین نویسندگان در تولید نیم صنعتی فوم های آلومینیمی، بر اساس جدول ۳ انتخاب شد.

عملیات ساخت فوم

برای آلیاژسازی ابتدا شمش آلیاژ آلومینیم A356 به وزن $1345/8$ گرم داخل بوته فولادی روی یک صفحه

جدول ۱- ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینوم-سیلیسیوم A356 مصرفی.

Al	Zn	Fe	Cu	Ti	Mn	Mg	Si	ترکیب
مابقی	۰/۰۵	۰/۱۲	۰/۱	۰/۲	۰/۵	۰/۳-۰/۴	۶/۵-۷/۵	درصد وزنی

جدول ۲- مشخصات پودر حباب زا TiH_2 مصرفی.

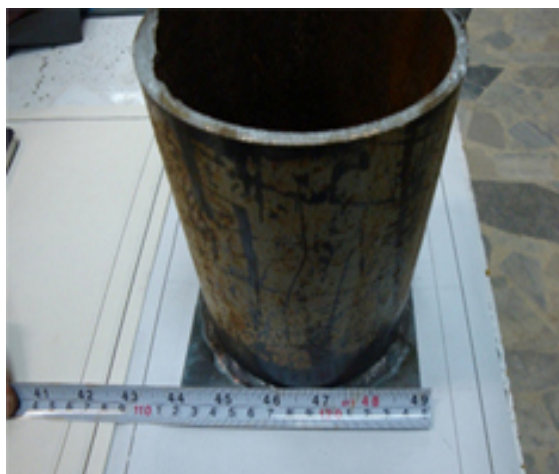
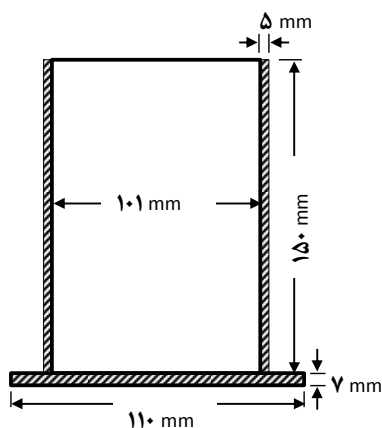
درصد خلوص	مش	کشور سازنده	شرکت سازنده	ترکیب شیمیایی
۹۸	-۳۲۵	آلمان	SIGMA - ALDRICH	TiH_2

از کوره خارج و سریع سرد شد این کار با دمش فن هوای مرطوب (۰.۴۶٪) انجام گرفت. سپس بمنظور انجام عملیات حرارتی و آزمون فشار، فوم جامد شده از قالب خارج و فرایند برشکاری به وسیله اره مویی، به همراه آب صابون برای آماده سازی نمونه ها روی آنها انجام گرفت.

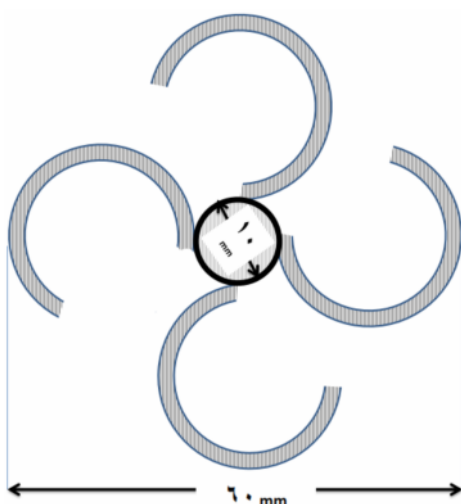
ابعاد $19 \times 13 \times 10$ cm و ضخامت ۵ میلی متر که پیشتر در کوره دیگری تا دمای 680°C درجه پیش گرم شده بود، ریخته شد و قالب به همراه مذاب آن، به داخل کوره با دمای 680°C منتقل و به مدت زمان ۸۰ ثانیه نگهداری شد تا مذاب پف کند. در مرحله آخر، قالب پر از فوم مذاب

جدول ۳- مشخصات مواد مصرفی در تهیه مذاب فوم.

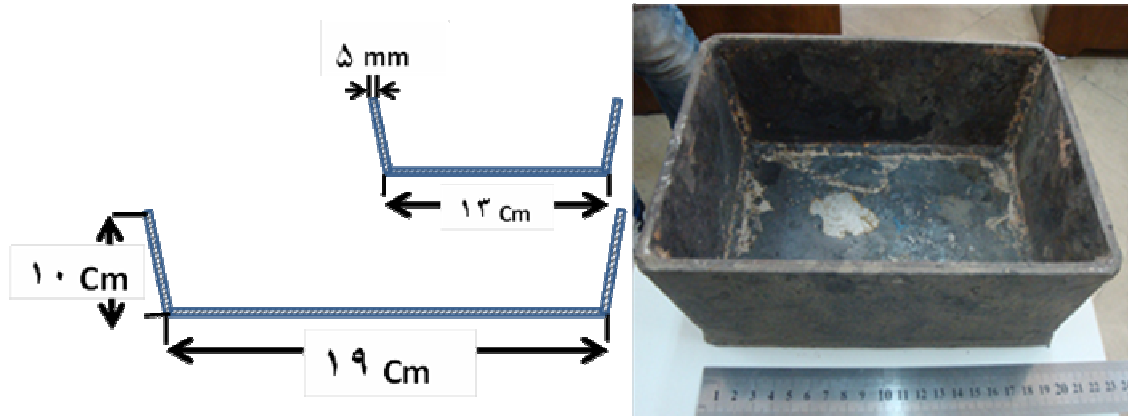
ترکیب	Al-A356	Cu	TiH ₂	Ca
وزن (گرم)	۱۳۴۵/۸	۵۳/۸	۱۳/۴۶	۲۶/۹۲
درصد وزنی	۹۳	۴	۱	۲



شکل ۱- مشخصات فنی و بوته فولادی ساخته شده.



شکل ۲- مشخصات فنی پروانه هم زن فولادی ساخته شده.



شکل ۳- قالب فولادی گرمکار برای فوم سازی و مشخصات نقشه فنی آن.

نمونه‌ها برای مشخص شدن بهترین سیکل عملیات حرارتی پیرسازی که بالاترین استحکام فشاری را داشته باشد، استفاده شد.

عملیات حرارتی

با توجه به وجود ۴٪ وزنی مس حل شده به صورت اضافه در ترکیب فوم آلیاژ A356، این آلیاژ جدید قابلیت پیرسازی را دارا است. لذا، عملیات حرارتی T6 می‌تواند برای این آلیاژ جدید قابل انجام باشد. با رجوع به منابع، مراجع و مقالات متعدد [۲۲-۲۴] و مطالعه شکل‌های سه تایی Al-Si-Cu و نیز شکل‌های دوتایی Al-xSi و Cu [۲۵]، دمای ۵۱۰ °C برای عملیات محلول سازی نمونه انتخاب شد. همچنین، با استفاده از رابطه (۱)، حداکثر زمان مناسب برای این عملیات روی فوم‌های تهیه شده، حدود ۱۲ ساعت برآورد شد [۲۶].

آماده سازی نمونه‌ها

در این مرحله، فوم آلومینیم بدست آمده برش خورده و دو سری نمونه از آن تهیه شد؛ یک سری برای انجام آزمایش‌های مکانیکی (تست فشار تک‌محوره) و متالوگرافی و سری دوم برای پیدا کردن سیکل عملیات حرارتی مناسب برای پیر سازی فوم آلومینیمی. نمونه فوم آلومینیمی ریخته گری شده، به ۶ نمونه مکعبی با ابعاد تقریبی ۱۵*۱۵*۲۰ میلی‌متر برش خورد و ابعاد دقیق و وزن آن‌ها اندازه گیری و ثبت شد. سپس نامگذاری نمونه‌ها بر اساس جدول ۴ کدگذاری شدند. در این کدگذاری: حرف نخست مشخص کننده فوم F= است. دو عدد بعدی دمای محلول سازی تقسیم بر ۱۰ است و دو رقم پس از آن دمای پیرسازی تقسیم بر ۱۰ است و رقم بعدی نشانگر مدت زمان محلول سازی به ساعت و رقم آخر نیز مدت زمان پیرسازی به ساعت است. چگالی این نمونه‌ها نیز با تقسیم کردن وزن آن‌ها بر حجم شان‌ها محاسبه شد. از این

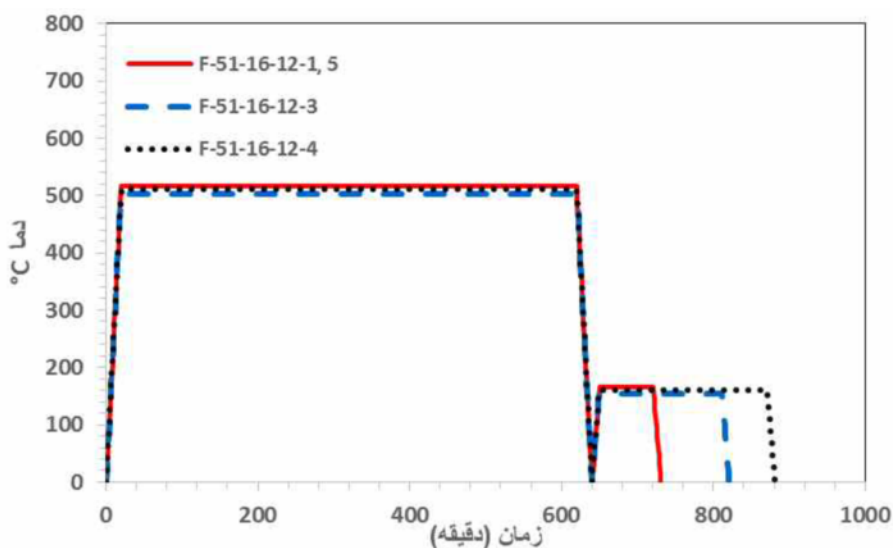
جدول ۴- مشخصات کدگذاری نمونه فوم‌های طراحی شده.

	ارتفاع h (cm)	طول a (cm)	عرض b (cm)	وزن W (g)	سطح مقطع A (cm ²)	حجم V (cm ³)	چگالی ρ (g cm ⁻³)
F-۵۱-۱۶-۸-۱/۵	۲/۲۰۶	۱/۶۴۸	۱/۵۱۲	۳/۳۰۰	۲/۴۹۲	۵/۴۹۷	۰/۶۰۰
F-۵۱-۱۶-۸-۳	۲/۲۲۰	۱/۴۸۵	۱/۶۵۲	۲/۷۰۰	۲/۴۰۹	۵/۳۴۷	۰/۵۰۵
F-۵۱-۱۶-۱۲-۳	۲/۲۴۲	۱/۵۵۵	۱/۴۳۷	۳/۶۰۰	۲/۲۳۴	۵/۰۱۰	۰/۷۱۹
F-۵۱-۱۶-۱۲-۱/۵	۲/۲۳۷	۱/۵۴۷	۱/۵۶۸	۲/۹۰۰	۲/۴۲۶	۵/۴۲۶	۰/۵۳۴
F-۵۱-۱۶-۱۲-۴	۲/۲۳۷	۱/۶۴۸	۱/۵۹۹	۴/۶۰۰	۲/۵۶۹	۵/۷۴۷	۰/۸۰۰
F-۵۱-۱۶-۰-۰	۲/۰۹۳	۱/۵۱۶	۱/۵۱۷	۲/۹۰۰	۲/۳۰۰	۴/۸۱۳	۰/۶۰۲

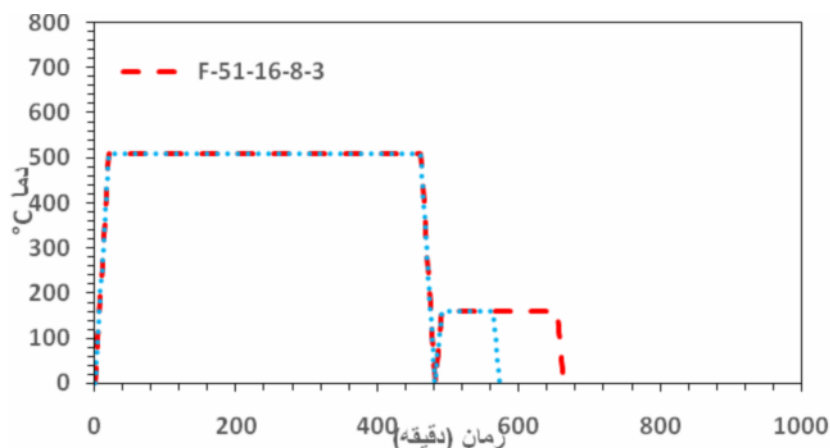
فرآیند [۲۷-۲۸]، مقایسه و صحت گذاری شد. با طی شدن زمان محلول سازی نمونه ها بایستی از کوره خارج و بلافاصله داخل ظرف حاوی آب و یخ کونج شوند و به وسیله دمش هوای سرد خشک شوند. بنابراین، با توجه به گردآوری داده ها و محاسبات داده های بالا، طراحی سیکل های عملیات حرارتی محتمل برای رسیدن به دماها و زمان های مشخص با بیشترین استحکام فشاری بر اساس شکل های ۴ و ۵ طراحی شدند.

$$C = C_0 \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad (1)$$

که در آن x نصف میانگین ضخامت دیواره سلولی فوم، C غلظت مس در ۵۱۰ درجه برای نخستین لایه ای که منجمد شده است، C_0 غلظت اولیه مذاب مس که در این جا ۴ درصد وزنی است، D ضریب نفوذ مس در آلومینیم و t زمان مورد نیاز برای محلول سازی است. با این حال، این زمان تقریبی عملیات پیرسازی با رجوع به مقاله های متعدد [۲۲ و ۲۳] و نیز دیاگرام TTT مربوط به این



شکل ۴- سیکل های عملیات حرارتی انحلال در دمای ۵۱۰°C به مدت ۱۲ ساعت و زمان های متفاوت پیرسازی در دمای ۱۶۰°C.



شکل ۵- سیکل های عملیات حرارتی انحلال در دمای ۵۱۰°C به مدت ۸ ساعت و زمان های متفاوت پیرسازی در دمای ۱۶۰°C.

آزمون مکانیکی

در این پژوهش آزمون فشار تک محوری به وسیله دستگاه "Instron 8502" ۲۵ تنی و با نرخ کرنش 10^{-3} واحد بر ثانیه برای نمونه های کوچک و 10^{-4} واحد بر ثانیه برای نمونه های بزرگ انجام شد. در این آزمون با رعایت نسبت ارتفاع به قطر ۱/۵، از نمونه ها مکعبی با ابعاد تقریبی 15×15 میلی متر و ارتفاع ۲۲ میلی متر استفاده شده است.

نتایج و بحث

شکل ۶ تصاویر ظاهری و ساختار حباب های فوم های تولیدی و نامگذاری شده در جدول ۴ را پیش و پس از آزمون فشار نشان می دهد. نمودارهای تنش-کرنش هر شش نمونه مشخص شده در جدول ۴، در شکل ۷ بر حسب کدگذاری نام آنها نیز ارائه شده است. خواص مکانیکی از نمودارهای شکل ۷ استخراج و در جدول ۵ آورده شده تا مقایسه بین آنها از لحاظ کمی بهتر انجام گیرد. برای نمونه های فومی F-51-16-8-1.5 و F-51-16-12-1.5 ارتفاع نمونه طی آزمون فشار از ۲۲

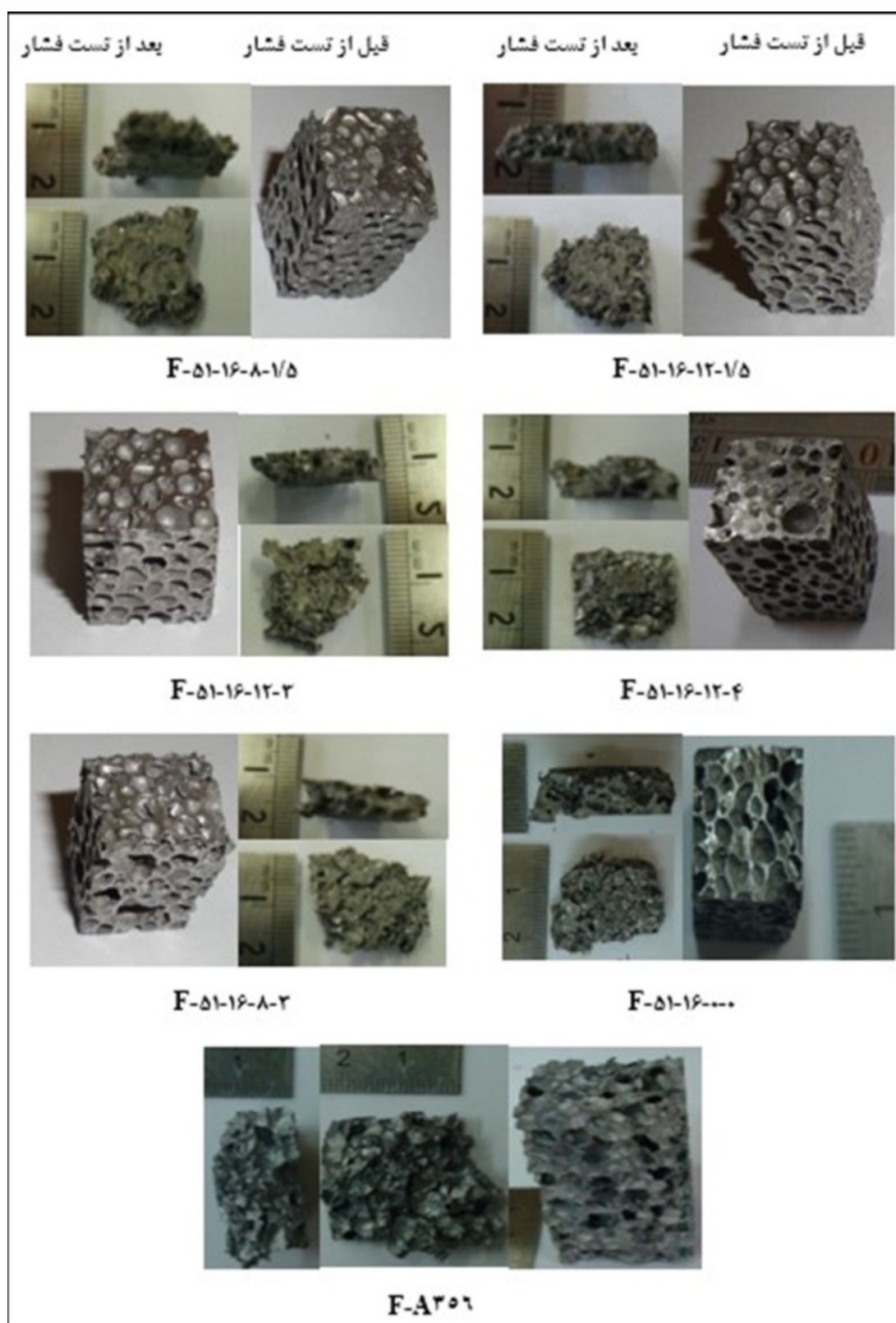
میلی متر به مقدار ۵ میلی متر و ۴ میلی متر به ترتیب کاهش یافته است، ولی طی آزمون فشار نمونه F-51-16-12-1.5 همراه با خرد شدن و ریزش مقدار اندکی از جرم فوم بود که نشان از تردی این فوم دارد. نمونه های F-51-16-12-3 و F-51-16-12-4 طی آزمون فشار، ارتفاع نمونه ها از ۲۲ میلی متر به مقدار ۵ و ۷ میلی متر به ترتیب کاهش می یابد. نمونه F-51-16-8-3 از ارتفاع ۲۲ میلی متر به مقدار ۵ میلی متر کاهش یافته است. همچنین، خرد شدن و ریزش مقدار کمی از نمونه طی آزمون فشار رخ داد. نمونه F-51-16-8-3 هم استحکام بالاتری دارد و هم سطح زیر منحنی نمونه بیش تری از نمونه F-51-16-8-1.5 دارد. برای نمونه های F-51-16-12-3 و F-51-16-0-0، ارتفاع اولیه نمونه ها از ۲۲ میلی متر به ترتیب به مقدار ۵ و ۸ میلی متر کاهش داشت. همچنین، مقایسه میزان ریزش جرم نمونه ها طی آزمون فشار نشان داد، نمونه F-51-16-12-3 می تواند تردتر باشد. استحکام، مدول الاستیک و سطح زیر منحنی نمونه F-51-16-12-3 به مقدار قابل توجهی باید بالاتر باشد.

جدول ۴- مشخصات کدگذاری نمونه فوم های طراحی شده.

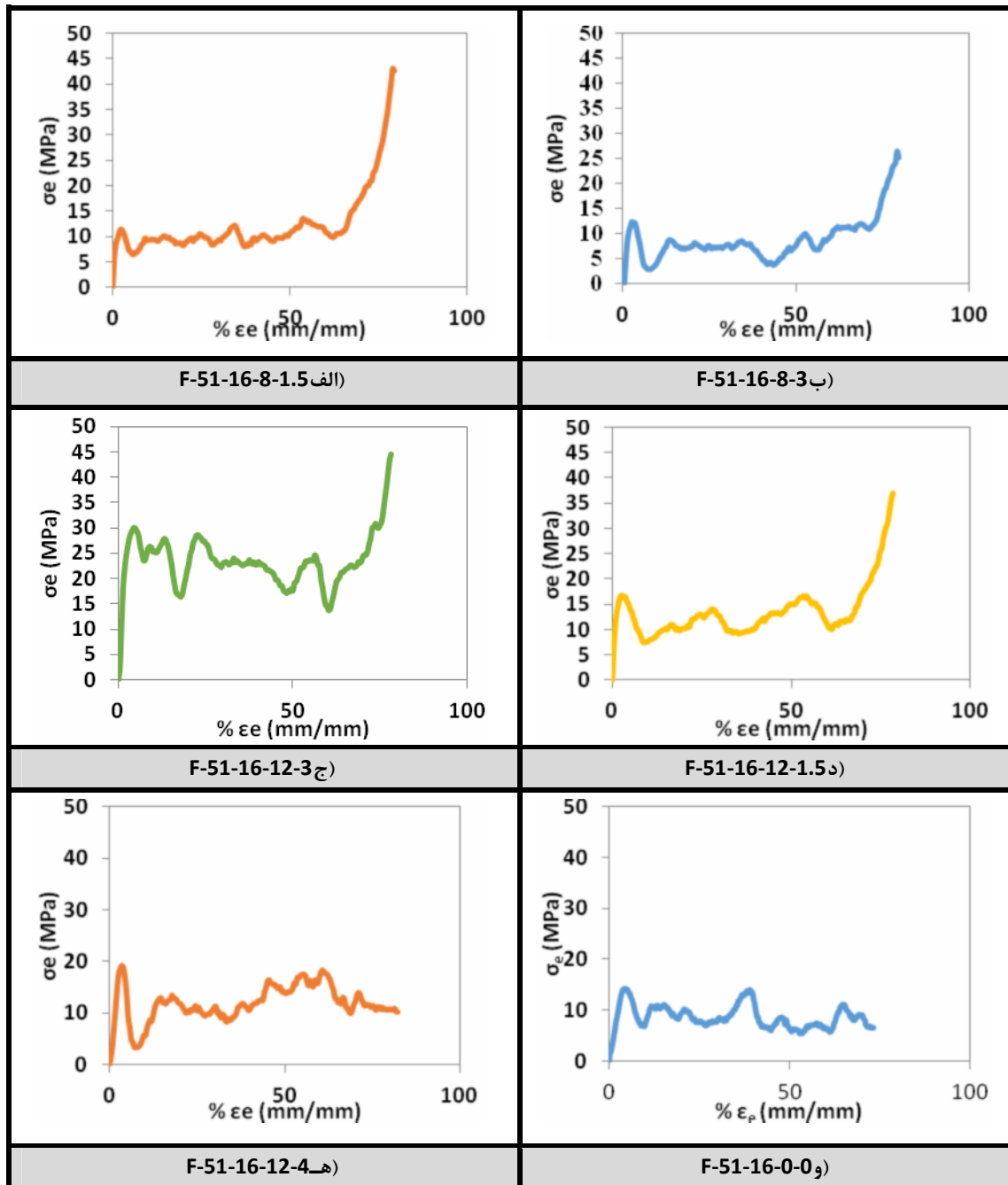
چگالی ρ ($g\ cm^{-3}$)	حجم V (cm^3)	سطح مقطع A (cm^2)	وزن W (g)	عرض b (cm)	طول a (cm)	ارتفاع h (cm)
۰/۶۰۰	۵/۴۹۷	۲/۴۹۲	۳/۳۰۰	۱/۵۱۲	۱/۶۴۸	۲/۲۰۶
۰/۵۰۵	۵/۳۴۷	۲/۴۰۹	۲/۷۰۰	۱/۶۵۲	۱/۴۸۵	۲/۲۲۰
۰/۷۱۹	۵/۰۱۰	۲/۲۳۴	۳/۶۰۰	۱/۴۳۷	۱/۵۵۵	۲/۲۴۲
۰/۵۳۴	۵/۴۲۶	۲/۴۲۶	۲/۹۰۰	۱/۵۶۸	۱/۵۴۷	۲/۲۳۷
۰/۸۰۰	۵/۷۴۷	۲/۵۶۹	۴/۶۰۰	۱/۵۹۹	۱/۶۴۸	۲/۲۳۷
۰/۶۰۲	۴/۸۱۳	۲/۳۰۰	۲/۹۰۰	۱/۵۱۷	۱/۵۱۶	۲/۰۹۳

جدول ۵- خواص مکانیکی استخراج شده از نمودارهای تنش-کرنش شکل ۷.

نام نمونه	تنش تسلیم σ_y (MPa)	مدول الاستیک E (MPa)	چقرمگی در کرنش ۶۵٪ (MPa)
F-۵۱-۱۶-۸-۱/۵	۱۰/۷۰۰	۳/۳۴۰	۶۲۴/۳۲
F-۵۱-۱۶-۱۲-۱/۵	۱۵/۱	۵/۹۱۰	۷۷۳/۶۴
F-۵۱-۱۶-۱۲-۳	۲۷/۲۵	۷/۸۸۰	۱۴۵۸/۹۲
F-۵۱-۱۶-۱۲-۴	۱۷/۵	۷/۵۳۰	۷۸۵/۴۸
F-۵۱-۱۶-۸-۳	۱۱/۴۰۰	۵/۵۹۰	۴۸۴/۹۸
F-۵۱-۱۶-۰-۰	۱۰/۲۰۰	۳/۹۷۰	۵۶۲/۰۶



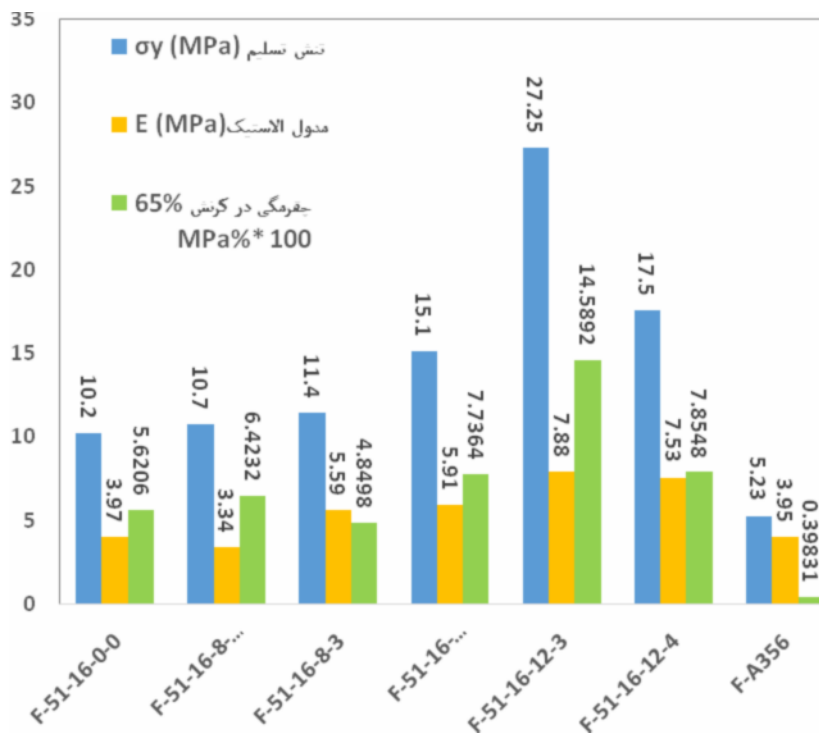
شکل ۶- تصاویر ظاهری فوم‌های آلومینیمی تهیه شده با نامگذاری؛ بر اساس جدول ۴ به ترتیب سمت راست نمونه پیش از آزمون فشار تک محوره و سمت چپ پس از آزمون فشار.



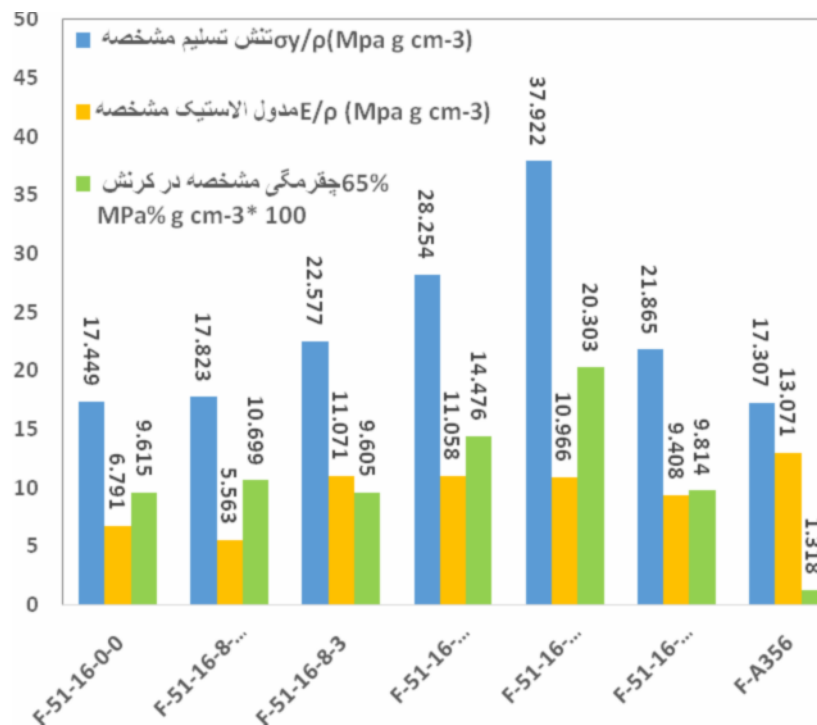
شکل ۷- نمودارهای تنش- کرنش تست فشار نمونه‌ها کد گذاری شده بر اساس جدول ۴.

(F-51-16-0-0) و نمونه ای که پس از عملیات حرارتی بیشترین استحکام را بدست آورده (F-51-16-12-3)، به گونه یکجا در یک نمودار در شکل ۱۰ رسم شده است تا اثر سیکل پیرسازی بر افزایش قابل ملاحظه این فوم به گونه ملموسی مشخص شود و موفقیت آمیز بودن آن سیکل را نشان دهد.

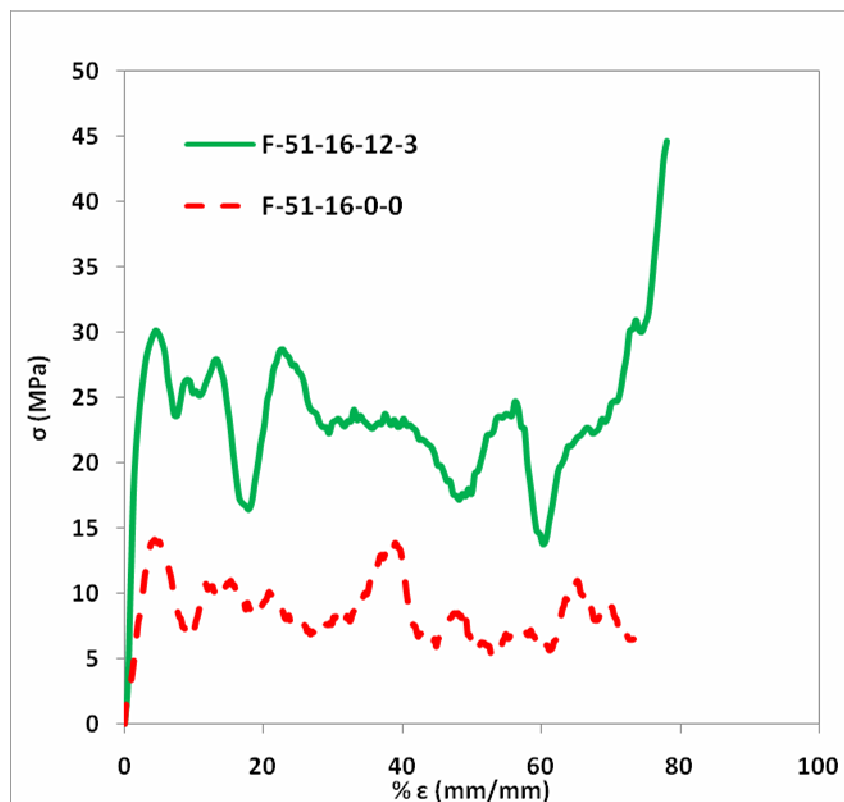
در ادامه برای مقایسه بهتر، خواص مکانیکی این نمونه‌ها نمودار ستونی آن‌ها برای حالت معمولی و نرماله شده نسبت به چگالی هر فوم (که معروف به خواص مشخصه یا خواص ویژه است) به ترتیب در شکل های ۸ و ۹ خواص مکانیکی آلیاژ Al-A356+4%wt.Cu ریخته گری شده و سپس پیرشده در زمان‌های متفاوت آورده شده است. از بین شش نمونه موجود، نمونه خام



شکل ۸- خواص مکانیکی فوم آلیاژ Al-A356 حاوی 4% مس ریخته شده و پیر شده در زمان های متفاوت.



شکل ۹- خواص مکانیکی مشخصه (ویژگی تقسیم بر دانسیته فوم) فوم آلیاژ Al-A356 حاوی 4% مس ریخته شده و پیر شده در زمان های متفاوت.



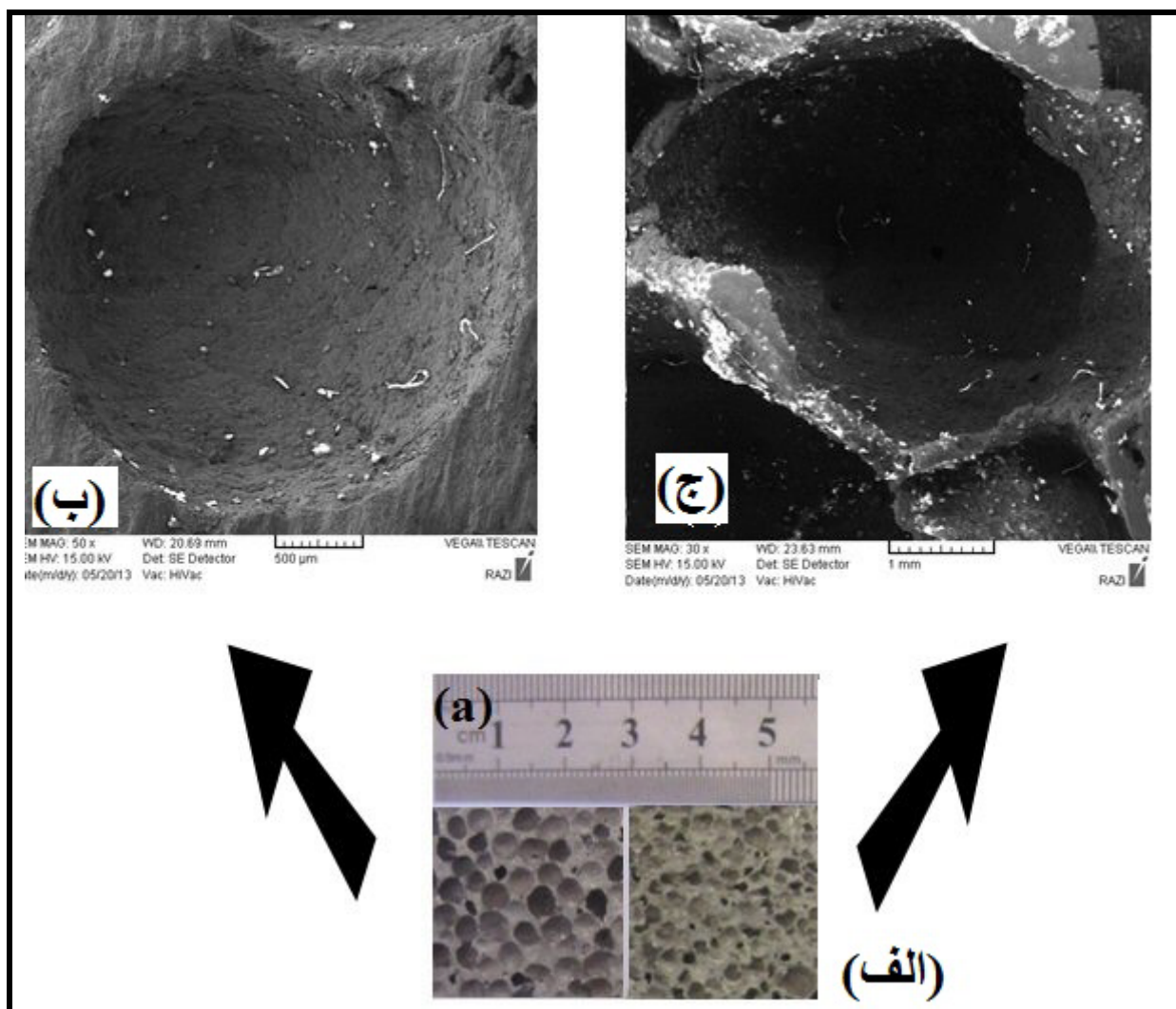
شکل ۱۰- شکل تست فشار برای نمونه های F-51-16-0-0 و F-51-16-12-3 (ریختگری بدون عملیات حرارتی)

استاندارد برای تمامی نمونه های حاوی ۴ درصد مس؛ بین ۳۲-۳۷ PPI و نسبت کرویت متوسط ۰/۷۳ بوده در صورتی که در نمونه A356 بین ۲۹-۳۴ PPI و نسبت میانگین کرویت ۰/۴۵ بوده است. لذا، با مقایسه فاکتور کرویت که اگر همه حفره ها کروی باشد، مقدار آن واحد است و با خروج از حالت کروی این عدد کوچکتر از یک خواهد بود. پس می توان گفت از لحاظ کمی نیز نمونه خام که مس ندارند، دارای حفره های کشیده و چروکیده تری هستند. علت این عامل را همان گونه که در پیشگفتار بیان شد، می توان به دلیل افزایش ویسکوزیته مذاب در اثر افزودن مس دانست [۲] زیرا ۴ درصد وزنی افزایش مس؛ باعث افزایش دامنه انجمادی در حدود ۴۸-۵۰ درجه سلیسیوس بین خطوط لیکوئیدوس و سالییدوس خواهد داشت. نکته مهم تر این که: این مطلب در حضور وجود ۶ درصد وزنی سلیسیم در آلیاژ A356 در دیاگرام فازی ستایی Al-Si-Cu باعث بیش تر شدن دامنه انجماد تا حدود ۶۰ درجه سلیسیوس می شود [۲۵ و ۲۳ و ۱]. لذا، وجود ذرات بسیار ریز سلیسیس به همراه ویسکوزیته بالاتر مذاب سه تایی Al-Si-Cu، باعث می شود پدیده کشیده

آنالیز ساختاری حفره ها: با توجه به سطح ظاهری نمونه ها در شکل ۶ و شکل ۱۱ مشاهده می شود، ساختار سلولی حباب ها در تمامی نمونه ها نسبت به نمونه F-A356، دارای حباب های همگن و دایره تا بیضی شکل هستند و چروکیدگی سطح داخلی حباب ها در نمونه های حاوی ۴ درصد مس حداقل یا بعضا حذف شده است. برخلاف نمونه F-A356 که حفره های چروکیده و نامتقارن دارد. دو تصویر سمت چپ و راست شکل ۱۱-الف که به ترتیب نماینده ریز ساختار فوم حفره های آن ها به ترتیب در تصاویر ۱۱-ب و ۱۱-ج در بزرگنمایی بالاتر نشان داده شده است. دقت در این دو تصویر بخوبی نشان می دهد سلول فوم A356 برخلاف نمونه آلیاژ شده با ۰/۴ مس که تقریباً کروی است، چروکیده و دفرمه است. لذا، در یک نتیجه گیری اولیه از مشاهده ساختار حباب ها می توان متوجه شده که تمام نمونه های حاوی ۴ درصد مس توانسته اند ساختار همگن تری را داشته باشند. نتایج شمارش حباب ها به وسیله نرم افزار آنالیز تصویر کلیمکس در واحد اینچ مربع بر اساس

آنالیز خواص مکانیکی: با توجه به این که ساختار همگن حباب ها باعث می شود تک تک دیواری های نسبتاً کروی حباب ها مقاومت بیشتری در برابر کمناش پلاستیک پیشرونده در هنگام بارگذاری تک محوری فشاری از خود نشان دهند که این مقاومت عموماً به وسیله رسم منحنی نیرو-جابجایی بررسی و آنالیز می شود [۲]. این مطلب را می توان تا حدودی از مقایسه ظاهری نمونه های له شده در بارگذاری محوری فشاری در شکل ۶ نیز مشاهده کرد. نمونه F-A356 پس از له شدن ضخامت کمتری داشته و میزان تلاشی ساختار ظاهری آن ها بیشتر است، اما در نمونه های فومی حاوی ۴ درصد وزنی مس سیکل عملیات حرارتی طراحی شده در شکل های ۵ نشان می دهد

شدن حباب ها و نازک شدن دیواره های سلولی و در پی آن پارگی حباب ها به تعویق بیفتد و فوم فلزی می تواند با پف کردن بیشتر، با دانسیته های پایین تر منجمد شود. لذا، مهندسانی که فوم فلزی تهیه می کنند به تجربه دریافته اند هر چه دامنه انجماد آلیاژ بیشتر و طول منطقه مخلوط جامد-مذاب طی انجماد وسیع تر باشد، عموماً ساختار سلولی فوم های فلزی، همگن تر و پایدارتر خواهند بود [۴]. این پروژه نیز این مطلب را تایید کرده است. لذا، می توان ادعا کرد در مرحله فوم سازی در مذاب فوم، افزودن ۴ درصد وزنی مس به آلیاژ A356 منجر به ساختار حبابی همگن تر با فاکتور کرویت نزدیک به یک می شود.



شکل ۱۱. الف - سمت چپ ساختار فوم 4%wt.Cu+A356 و سمت راست ساختار فوم A356 و تصاویر ب و ج به ترتیب بزرگ شده یک حفره کوچک از آن ها.

F-16-12-3 دارای افزایش ۸۰ درصدی نسبت به نمونه F-16-12-1.5 و افزایش ۱۶۷ درصدی نسبت به نمونه خام داشته است که از لحاظ صنعتی بسیار مناسب است. رفتار منحنی تنش- کرنش بین نمونه خام F-51-16-0-0 و نمونه عملیات حرارتی شده F-51-16-12-3 که در شکل ۱۰ نشان داده شده است. به خوبی مشخص می‌کند که سیکل عملیات حرارتی به مدت ۱۲ ساعت در ۵۱۰ درجه برای انحلال سازی و سپس کوئنچ در آب سرد و به دنبال آن پیرسازی به مدت ۳ ساعت در دمای ۱۶۰ درجه بهترین گزینه از لحاظ خواص مکانیکی است زیرا تنش تسلیم نسبت به نمونه خام ۱۶۷ درصد و چقرمگی له شدن به میزان ۱۶۰ درصد (از ۵۶۲ به ۱۴۵۹ MPa بر واحد حجم) توامان با هم افزایش یافته است. مقایسه خواص مکانیکی مستخرج از نمودارهای تنش-کرنش شکل ۷ در نمودارهای شکل ۸ و ۹ به ترتیب به ازای واحد حجم و به صورت نرماله شده بر حسب چگالی فوم به گونه بارزی نشان می‌دهد که فوم F-51-16-12-3 نسبت به تمامی نمونه های فومی خواص مکانیکی بالاتر به لحاظ تحمل بارگذاری فشاری تک محوره دارد. نکته قابل تامل دیگر در تغییرات مدول الاستیک طی عملیات پیرسازی است. در نمونه‌های دنس عموماً تغییرات مدول الاستیک ناچیز است به گونه ای که در طراحی ها برخلاف تنش تسلیم، تفاوتی بین مدول الاستیک نمونه عملیات حرارتی شده و نشده قابل نیستند، اما به نظر می رسد در مورد فوم فلزی نمی توان به این راحتی تصمیم گرفت. در شکل ۱۰ ملاحظه می‌شود مدول الاستیک شیب منحنی تنش-کرنش نمونه پیر سازی شده F-51-16-12-3 از نمونه خام F-51-16-0-0 بیش تر است. در جدول ۵ این تغییر از ۳/۹ به ۷/۸ GPa بوده است که حدود دو برابر شده است یا می توان گفت ۱۰۰ درصد افزایش داشته است، اما در شکل های ۸ و ۹ مقایسه مقادیر مدوال الاستیک و مدول الاستیک مشخصه (تقسیم بر چگالی) در نمونه F-51-16-12-3 رفتار افزایشی نسبت به نمونه های F-51-16-8-3 نشان نداده است و شاید بتوان گفت در نمونه های ۸ ساعت انحلالی و ۱۲ ساعت انحلالی و بدنبال آن زمان های پیرسازی ۱/۵، ۳ و ۴ ساعت، تقریباً مدول الاستیک مشخصه این نمونه‌ها، ثابت و حدود $10/5 \pm 1$ GPa است. لذا، مقایسه مدول

که زمان پیر سازی در فوم های فلزی همانند فلزات معمولی بسیار مهم و عامل کنترل کننده است. منتهی در فوم فلزی به علت نازک بودن دیواره های سلولی بنظر می رسد زمان پیرسازی بایستی کم تر باشد، اما نتایج نشان می دهد سیکل حرارتی پیرسازی در دمای ۱۶۰ درجه سلسیوس به مدت ۳ ساعت از لحاظ ایجاد استحکام تسلیم بالاتر توام با چقرمگی شکست بالاتر در فوم یاد شده، مطلوب تر است. برای اثبات این مدعا یکی از راههای موجود تهیه نمونه های آزمون فشار تک محوری بر اساس استاندارد است [۵]. نتایج این آزمون برای تمام نمونه ها در شکل ۷ ارایه شده است. مقایسه نشان می‌دهد نمونه های که به مدت ۸ ساعت عملیات انحلالی در دمای ۵۱۰ درجه سلسیوس روی آن‌ها انجام گرفته، مانند F-51-16-8-3 و F-51-16-8-1/5 نتوانسته اند استحکام تسلیم را زیاد افزایش دهند و به ترتیب از ۱۰/۷ به ۱۱/۴ MPa بر اساس داده های جدول ۵ افزایش یافته اند. اگرچه فوم ۳ ساعت پیر شده، نسبت نمونه فومی ۱/۵ ساعت پیر شده استحکام بالاتری داشته است، اما در عمل این افزایش ۱۰ درصدی در استحکام تسلیم همراه با کاهش چقرمگی از ۶۴۲ به ۴۸۴ (جدول ۵) در صنعت قابل قبول نیست و نمی‌تواند هزینه عملیات حرارتی را توجیه کند. لذا، در گام بعدی زمان عملیات انحلالی افزایش و مطابق سیکل ارایه شده در شکل ۴ به ۱۲ ساعت در دمای ۵۱۰ درجه افزایش داده شد. مقایسه نتایج استحکام تسلیم این نمونه‌ها، یعنی نمونه های F-51-16-12-1.5 و F-51-16-12-3 و F-51-16-12-4 به ترتیب با زمان های پیر سازی ۱/۵، ۳ و ۴ ساعت در دمای ۱۶۰ درجه مطابق جدول ۵ تقریباً برابر است با ۱۵، ۲۷ و ۱۷ MPa است، اما انرژی جذب آن‌ها به ترتیب برابر ۷۷۳، ۱۴۵۹ و ۷۸۵ MPa درحجم تقریباً ثابت است. لذا، مشاهده می شود زمان انحلال سازی ۱۲ ساعت به همراه زمان پیرسازی ۳ ساعته بالاترین استحکام تسلیم توام با بالاترین چقرمگی یا سطح زیر منحنی تنش-کرنش (جذب انرژی) را داشته است. نکته قابل ملاحظه این‌که زمان ۱/۵ ساعت پیرسازی کم و زمان ۴ ساعت پیرسازی زیاد بوده است و هر دو کاهش خواص را به همراه داشته است. بنابراین، به گونه مشخص زمان های حدود ۳ ساعت بایستی بهترین انتخاب در صنعت باشد. لذا، نمونه F-51-

۲/۱۰ MPa، ۳/۹۷ MPa و ۵۶۲ MPa به مقادیر ۲۷/۲ MPa و ۷/۸۸ MPa تغییر دهد. این تغییرات به ترتیب نشان از افزایش ۱۶۷٪، ۹۸٪ و ۱۵۸٪ درصدی در خواص مذکور می باشد.

- انرژی مشخصه آلیاژ فوم ۳۵۶-۴۵wt.%Cu در سیکل بالا برابر ۲۰۳۰ MPa است که افزایش قابل قبولی با توجه به مراجع داشته است.

- مدول الاستیک ویژه فوم یاد شده نسبت زمان پیر سازی و انحلالی تغییرات چندانی نداشته و تقریباً بین ۱۰ تا ۱۲ GPa می باشد.

- ساختار حفره های نمونه فومی ۳۵۶-۴wt.%Cu دارای فاکتور کرویت نزدیک تر به واحد بوده و از همگنی توزیع و میانگین قطر یکسان تری نسبت به نمونه فوم ۳۵۶ برخوردارند. به گونه ای که افزودن چهار درصد مس به گونه چشمگیری از چروکیدگی سطح داخلی حفره های فوم می کاهد. این مطلب مقاومت به تحمل بارگذاری فشاری تک محوری فوم را نیز بالاتر برده و بنظر می رسد این پایداری ساختار سلولی فوم حاوی ۴ درصد وزنی مس، مدیون افزایش دامنه انجماد تقریباً ۶۰ درجه ای بین خطوط لیکوئیدوس و سالیدوس در دیاگرام سه تایی Al-Si-Cu و حضور ذرات شناور سیلیس می باشد.

References

- ۱- حسین سلطانی، پایانامه کارشناسی، "بررسی عملیات پیرسازی فوم آلیاژ ۳۵۶ حاوی عنصر مس بر خواص مکانیکی و جذب انرژی آن"، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، گروه مهندسی متالورژی، فروردین ۱۳۹۳.
- ۲- حامد والی، پایانامه کارشناسی، "بررسی اثر مس بر ساختار سلولی و خواص مکانیکی فوم آلیاژ ۳۵۶"، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، گروه مهندسی متالورژی، فروردین ۱۳۹۳.
- ۳- میلاد دانشمند، "ساخت هسته فوم آلومینیمی و مدلسازی تغییر فرم لوله های پر شده توسط هسته فومی" دانشگاه صنعتی امیرکبیر، گروه مهندسی متالورژی، بهمن ۱۳۸۹.

الاستیک مشخصه نمونه های فومی می تواند دقیق تر و کاربردی تر باشد. در این صورت رفتار مدول مشخصه فوم، همان رفتار نمونه های دنس را دارد. از این رو، مقایسه تمام خواص مکانیکی فوم ها به صورت مشخصه می تواند دقیق تر باشد، چراکه در طراحی اندیس ماده همواره دانسیته در مخرج کسر است و کوچک شدن آن کاهش جرم را به همراه خواهد داشت، چیزی که در مهندسی به واسطه سبکی و ارزانی قیمت نرماله شده، مطلوب طراح است. از این رو می توان گفت سیکل عملیات حرارتی نمونه F-51-16-12-3 دوباره از لحاظ ویژگی های مشخصه مکانیکی از نمونه خام و سایر نمونه های عملیات حرارتی شده، به گونه شایان توجهی مطلوب تر بوده و برای طراحان و مصرف کنندگان جذاب تر خواهد بود.

نتیجه گیری

- سیکل عملیات حرارتی فوم آلیاژی ۳۵۶-۴wt.%Cu، با انحلال در دمای ۵۱۰°C و مدت زمان ۱۲ ساعت و پیرسازی در دمای ۱۶۰°C و مدت زمان ۳ ساعت، بالاترین استحکام σ_y ، E و جذب انرژی به ازای واحد حجم را نشان داد. همچنین، خواص مشخصه مذکور نیز مناسب ترین مقادیر را در حوزه کاربردی و صنعتی نشان می دهند. - نتایج نشان می دهد که سیکل یاد شده می تواند خواص σ_y ، E و جذب انرژی فوم ۳۵۶-۴wt.%Cu را به ترتیب از

۴- سید یوسف طباطبائی، پایان نامه کارشناسی ارشد "بررسی ساختار سلولی فوم های فلزی و مدلسازی آن" دانشگاه صنعتی امیرکبیر، گروه مهندسی متالورژی، ۱۳۸۷.

5-Michael F. Ashby, Tony Evans, N.A. Fleck, J.W. Hutchinson, H. N. G. Wadley and L.J. Gibson, (book) "Metal Foams: A Design Guide", publisher, Butterworth-Heinemann, 2000.

6-B. Matijasevic-Lux, J. Banhart, S. Fiechter, O. Gorke and N. Wanderka, Modification of titanium hydride for improved aluminium foam manufacture, Acta Materialia, 54, 1887-1900, 2006.

7-M. Farkašová, E. Tillová and M. Chalupová, "Modification of Al-Si-Cu cast alloy," Faculty

- of Mechanical Engineering, England, vol. 41, pp. 210-215, 2013.
- 8-A. Bhakta and E. Ruckenstein., "Decay of standing foams: drainage, coalescence and collapse", *Advances in Colloid and Interface Science*, 70: 1-124, 1997.
- 9- N. Movahedi, S. M. H. Mirbagheri, and S. R. Hoseini, "Effect of Foaming Temperature on the Mechanical Properties of Produced Closed-Cell A356 Aluminum Foams with Melting Method" *Met. Mater. Int.*, Vol. 20, No. 4, pp. 757-763, 2014.
- ۱۰- نیما موحدی، محمد حسین میرباقری و سیدرضا حسینی، " اثر عوامل ریخته گری در تولید فوم آلومینیمی A356 بر رفتار تغییر شکل پلاستیک طی آزمون فشار تک محوری "، ریخته گری، شماره ۱۰۱، سال ۳۲، صفحه ۳۴، بهار ۱۳۹۲.
- ۱۱- محمد حسین میرباقری و یوسف طباطبایی مجد، " اثر عوامل فرآیندی بر ساختار سلولی کف- جامد آلومینیمی A356-SiC ریختگی و کمی سازی تخلخل آن "، ریخته گری، شماره ۱۰۱، سال ۳۲، صفحه ۵۶، بهار ۱۳۹۲.
- ۱۲- محمد حسین میرباقری و رضا پورغلام، " ریخته گری فوم آلومینیم A356 سلول بسته به کمک مخلوط مذاب و سیلیکون-دولومیت گرانوله و بررسی رفتار فشاری آن "، ریخته گری، شماره ۱۰۳، سال ۳۲، صفحه ۳۸، پاییز و زمستان ۱۳۹۲.
- 13- L.J. Vendra and A. Rabiei, " A comparison of composite metal foam's properties and other comparable metal foams". *Materials Letters*, Vol: 63, P: 533-536, 2009
- 14- T. Miyoshi, M. Itoh, S. Akiyama, and A. Kitahara. "ALPORAS aluminum foam: production process, properties, and applications", *Advanced Engineering Materials*, 2: 179-183, 2000.
- 15- N. Bekheet, R. Gadelrab, M. Salah and A. A. El-Azim, "The effects of aging on the hardness and fatigue behavior of 2024 Al alloy/SiC composites," *Materials and Design*, vol. 23, pp. 153-159, 2002.
- 16- D. Mandal and S. Viswanathan, "Effect of heat treatment on microstructure and interface of SiC particle reinforced 2124 Al matrix composite," *Materials Characterization*, vol. 85, pp. 73-81, 2013.
- 17-R. K. Bhushan, S. Kumar and S. Das, "Fabrication and characterization of 7075 Al alloy reinforced with SiC particulates," *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 65, pp. 611-624, 2013.
- 18-F. Campana and D. Pilone, "Effect of heat treatments on the mechanical behaviour of aluminium alloy foams," *Scripta Materialia*, vol. 60, p. 679-682, 2009.
- 19- S. Sajjadi, H. Ezatpour and M. T. Parizi, "Comparison of microstructure and mechanical properties of A356 aluminum alloy/Al₂O₃ composites fabricated by stir and compo-casting processes," *Materials and Design*, vol. 34, pp. 106-111, 2012.]
- 20-S. Pal, R. Mitra and V. Bhanuprasad, "Aging behaviour of Al-Cu-Mg alloy-SiC composites," *Materials Science and Engineering A*, vol. 480, pp. 496-505, 2008.
- 21- M. Wang, D. Chen, Z. Chen, Y. Wu, F. Wang, N. Ma and H. Wang, "Mechanical properties of in-situ TiB₂/A356 composites," *Materials Science & Engineering A*, vol. 590, pp. 246-254, 2014.
- 22-N. Ponweiser and K. W. Richter, "New investigation of phase equilibria in the system Al-Cu-Si," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 512, p. 252-263, 2012.
- 23- R. Daniel A. Cluff, and S. Esmaeili, "Prediction of the Effect of Artificial Aging Heat Treatment on the Yield Strength of an Open-Cell Aluminum Foam", *Journal of Materials Science*, Vol.43 (3), pp 1121-1127, 2008.
- ۲۴- زهره وند، حمید، پایان نامه کارشناسی ارشد، " بررسی تاثیر عملیات حرارتی بر فوم آلیاژ آلومینیم A356 و خواص مکانیکی آن "، دانشگاه آزاد اسلامی ساوه، استاد راهنما دکتر میرباقری، ۱۳۹۲.
- 25-V. Raghavan, "Al-Cu-Si (Aluminum-Copper-Silicon)," *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*, vol. 28, pp. 180-182, 2007.
- 26-D. A. Porter and K. E. Easterling, *Phase Transformations in Metals and Alloys*, London, Weinheim, New York, Tokyo, Melbourne, Madras: Chapan And Hall, 1981, 1992.
- ۲۷- ح. قربانیان و ح. سراجیان، آلومینیم و آلیاژهای آن، انتشارات امیرکبیر تهران، ۱۳۸۷

۲۸-اکرم صالحی؛ سید مجتبی زبرجد؛ ابوالفضل باباخانی؛
محمدصادق ابروی، "بررسی ریزساختاری فوم
نانوکامپوزیتی آلومینیوم تقویت شده با نانوذرات اکسید

سیلیسیم تولید شده با استفاده از امواج مافوق صوت" مجله
مواد نوین، دوره ۴، شماره ۱۶، صفحه ۹۸-۱، تابستان
۱۳۹۳.