

ساخت و مشخصه‌یابی ساختارهای مشبک فلزی به روش تولید افزودنی غیرمستقیم

احمد رضا کشاورز روبهقانی^۱، محمدرضا کارآموزراوری^۲، رضا دهقانی^۳

۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک و مواد، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان
۲ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک و مواد، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، m.karamooz@kgut.ac.ir
۳ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک و مواد، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۰۷

چکیده

علی‌رغم خواص منحصر به فرد مواد سلولی، وجود حفره‌های نامنظم، کنترل خواص این مواد را دشوار و کاربرد آن‌ها را محدود ساخته‌است. هرچند که استفاده از مواد مشبک، این محدودیت را برطرف ساخته، ولی به دلیل هندسه پیچیده، تولید نمونه‌های فلزی از این مواد با روش‌های سنتی امکان‌پذیر نبوده و استفاده از روش‌های تولید افزودنی مستقیم نیز بسیار هزینه‌بر است. در این پژوهش به منظور تولید و مشخصه‌یابی ساختارهای مشبک فلزی ارزان از فرآیند تولید افزودنی غیرمستقیم، متشکل از دو روش تولید افزودنی رسوب مذاب و ریخته‌گری ثقلی، استفاده شده و تاثیر پارامترهای مختلف بر کیفیت نمونه نهایی، از طریق آزمایشات تجربی و شبیه‌سازی عددی، بررسی می‌گردد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی مبین آن است که با کاهش زمان بارریزی و افزایش دمای مذاب، دمای قالب، ارتفاع سیستم راهگاه و قطر پیوندها، درصد پر شدن قالب افزایش می‌یابد. در نمونه‌های ساخته شده، با کاهش قطر پیوند اختلاف بین قطر در الگوهای فداشونده و قطر طراحی، به خصوص برای پیوندهای افقی، به شدت افزایش می‌یابد. در خصوص نمونه‌های فلزی، اختلاف قطر پیوند با قطر طراحی بیشتر ناشی از فرآیند تولید افزودنی بکار رفته بوده و خطای ایجاد شده بواسطه فرآیند ریخته‌گری تنها ۲/۲ درصد می‌باشد. همچنین با استفاده از این فرآیند تولید ساختارهای مشبک فلزی با قطر کمتر از ۳ میلی‌متر ممکن نیست. تصاویر میکروسکوپی تهیه شده حاکی از آنست که عیوب ایجاد شده در نمونه‌ها عمدتاً از نوع عیب نیامد بوده که برای ساختارهای BCC و BCCZ در صفحه فوقانی و برای ساختار SC در پیوندهای افقی اتفاق می‌افتد.

واژگان کلیدی

تولید افزودنی غیرمستقیم، رسوب مذاب، ریخته‌گری ثقلی، نرم‌افزار پروکست، مواد مشبک

۱. مقدمه

مواد سلولوی به دلیل خواص برجسته‌ای همچون وزن اندک، استحکام بالا، سختی زیاد و جذب ضربه و انرژی مناسب به همراه چگالی کم از دیرباز مورد توجه محققان قرار داشته‌اند [۱-۳] و کاربردهای فراوانی در صنایع مختلف از جمله صنایع نظامی، خودروسازی، هوافضا و پزشکی پیدا کرده‌اند [۴]. از جمله این کاربردها می‌توان به استفاده از آن‌ها به عنوان هسته پانل‌های ساندویچی، کنترل جریان سیال، میرا کننده ارتعاشات، تحمل بار زیاد در وزن اندک، محفظه‌های بسته‌بندی قطعات حساس در مقابل ضربه، عایق کاری حرارتی و ایمپلنت‌ها و کاشتنی‌های داخل بدن اشاره نمود [۳]. در حالت کلی خواص این مواد از یک سو به خواص ماده سازنده و از سوی دیگر به ویژگی‌های ریزساختاری آن‌ها شامل چگالی نسبی، عیوب ریزساختاری و شکل حفرات و سلول‌ها بستگی دارد [۵، ۶].

روش‌های تولید مواد سلولوی فلزی را می‌توان به دو دسته روش‌های سنتی و مدرن تقسیم نمود. در روش‌های سنتی با ایجاد گاز در فلز مذاب یا ترکیب پودر فلز با یک عامل تولید کننده گاز و سپس ذوب و فشرده‌سازی آن، قطعات مورد نظر ایجاد می‌شوند [۵]. هر چند مواد سلولوی تولید شده توسط روش‌های سنتی نسبت استحکام به وزن بالایی دارند، ولی عدم کنترل کافی بر هندسه سلول‌ها سبب می‌شود که کنترل خواص مکانیکی آن‌ها مقدور نبوده و محدودیتی برای کاربرد مهندسی این مواد با کارایی بالا به حساب می‌آید. با ظهور روش‌های تولید افزودنی^۱، گروه جدیدی از مواد سلولوی، با هندسه و خواص مکانیکی از پیش تعیین شده و قابل کنترل، توسعه یافتند. در این گروه از مواد سلولوی، که آن‌ها را مواد مشبک^۲ می‌نامیم، ساختار متخلخل مورد نظر از تکرار یک سلول واحد منظم در راستای سه محور مختصات ایجاد می‌شود. با توجه به منظم بودن این ساختارها می‌توان شکل سلول واحد را به گونه‌ای برگزید که خواص مکانیکی مورد نظر حاصل آید. با توجه به هندسه پیچیده و تودرتوی مواد مشبک، ساخت آن‌ها به روش ماشینکاری سنتی غیرممکن بوده و استفاده از این مواد در گذشته، و پیش از ابداع روش‌های تولید افزودنی، چندان مورد استقبال قرار نگرفته است [۷].

در روش‌های تولید افزودنی ابتدا یک مدل سه‌بعدی از قطعه تهیه شده و سپس این مدل به لایه‌هایی در جهت ارتفاع نمونه تقسیم می‌گردد. پس از آن با قرار دادن این لایه‌ها بر روی

یکدیگر، قطعه مورد نظر تولید می‌شود. بسته به نوع ماده سازنده و روش‌های تولید و اتصال لایه‌ها به یکدیگر، روش‌های متفاوتی با استفاده از این تکنولوژی توسعه داده شده‌است [۸]. روش‌های تولید افزودنی جهت تولید ساختارهای مشبک فلزی را می‌توان به دو دسته، مستقیم و غیرمستقیم، تقسیم کرد. در روش‌های مستقیم، تکنولوژی مناسب با توجه به جنس و خواص مورد نیاز انتخاب شده و قطعه مورد نظر خروجی نهایی این روش خواهد بود. به عبارت بهتر، در روش مستقیم یک روش تولید افزودنی فلزی انتخاب شده و نمونه مورد نظر بصورت کامل توسط آن روش تولید می‌شود. به دلایلی از قبیل انتقال حرارت غیریکنواخت، انعکاس و بازتابش نور در بعضی فلزات، ایجاد تنش‌های پسماند و زمان و هزینه بالا این روش‌ها برای تولید بسیاری از قطعات، بخصوص در مقیاس انبوه، نامناسب نیستند [۸-۱۰]. از دیگر معایب فرآیندهای تولید افزودنی مستقیم می‌توان به گستره محدود مواد مصرفی، کیفیت سطح پایین، خواص غیرایزوتروپیک و هزینه بالای پودر فلز اشاره کرد [۱۰]. روش‌های تولید افزودنی غیرمستقیم، روش‌های جایگزینی برای ساخت سازه‌های فلزی مشبک هستند، که تا حد زیادی معایب روش‌های قبل را ندارد. در این روش‌ها، فرآیندهای تولید افزودنی بر مبنای یک ماده پلیمری، موم یا واکس و یک روش ریخته‌گری با هم ترکیب می‌شوند [۱۰]. برای این منظور، الگوها با استفاده از روش تولید افزودنی ایجاد و برای ساخت قالب استفاده می‌شوند. الگوها به روش‌های سوزاندن یا تبخیر از درون قالب حذف و قالب به جا مانده، برای ریخته‌گری قطعات استفاده می‌شود. با استفاده از روش تولید افزودنی غیرمستقیم نه تنها گستره مواد قابل انتخاب گسترش می‌یابد، بلکه ماده سازنده سلول‌ها نیز رفتار یکنواخت‌تری از خود نشان می‌دهد. از دیگر مزایای این روش نسبت به روش‌های تولید افزودنی مستقیم، کیفیت نهایی سطح قطعات تولید شده است [۸، ۱۰]. این روش تا کنون برای تولید قطعات پیچیده زیادی مورد استفاده قرار گرفته‌است [۱۱-۱۳].

کُیوا و همکارانش [۶]، با فرآیند تولید افزودنی غیرمستقیم، ساختارهای مشبک فلزی از جنس AlSi1 تولید کردند. آن‌ها دریافتند که در گوشه دیوارهای بسته و پیوندهایی که در یک سطح افقی قرار دارند منجمد شدن مواد، بیشتر اتفاق می‌افتد و امکان به وجود آمدن انقباض در نزدیکی گره‌های ساختار مشبک

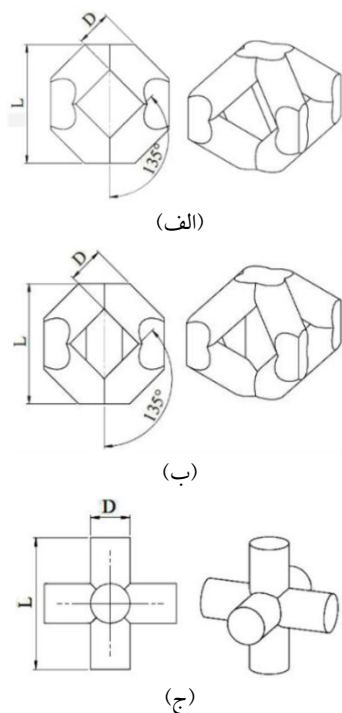
فرآیند ریخته‌گری بیان می‌شود. سپس نتایج بدست آمده از تحلیل‌های عددی و مشاهدات آزمایشگاهی بیان شده و در خصوص دلایل این مشاهدات بحث می‌شود.

۲. مواد و روش‌ها

در این بخش ابتدا فرآیند مدلسازی قطعات ارائه گشته و سپس داده‌های مربوط به طراحی آزمایش انجام شده ارائه می‌گردد. در ادامه نحوه ساخت ساختارهای فلزی به تفصیل بیان گشته و در پایان شبیه‌سازی عددی فرآیند ریخته‌گری ارائه می‌شود.

۱-۲. مدل‌سازی قطعات

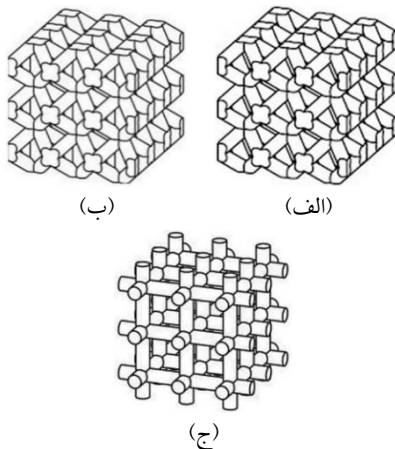
در این تحقیق سه ساختار BCC، BCCZ و SC طراحی و ساخته می‌شود. دلیل این انتخاب وجود پیوندهایی با زاویه‌های متفاوت نسبت به صفحه ساخت است که امکان بررسی تاثیر زاویه پیوند را فراهم می‌آورد. شکل ۱ سلول واحد متناظر با هر یک از این ساختارها را به همراه پارامترهای هندسی آن‌ها نمایش می‌دهد. در این تصویر D ، قطر پیوند و L ، طول هر سلول واحد است. در این پژوهش چهار مقدار ۱، ۱/۵، ۲ و ۳ میلی‌متر به قطر و مقدار ۱۰ میلی‌متر به پارامتر L اختصاص داده می‌شود.



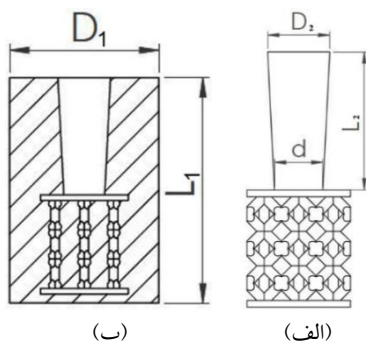
شکل ۱. سلول واحد و پارامترهای هندسی مربوط به ساختار الف) BCC، ب) BCCZ و ج) SC.

وجود دارد. میسل و همکارانش [۴] برای تولید ساختارهای مشبک فلزی از جنس آلیاژ A356، روش تولید افزودنی غیرمستقیم را به کار گرفتند. آن‌ها از روش تولید افزودنی برای تولید قالب‌های ماسه‌ای بهره جسته و از این طریق هزینه‌های تولید الگوهای فداشونده را کاملاً حذف کردند. نتایج به دست آمده از این تحقیق نشان می‌دهد که میانگین قطر پیوندهای تولید شده ۲۷ درصد کوچک‌تر از اندازه طراحی شده است. مون و همکارانش [۹]، با استفاده از ترکیب روش تولید افزودنی مستقیم و ریخته‌گری گریز از مرکز، ساختارهای مشبک فلزی از جنس Be-Cu تولید کردند. آن‌ها همچنین فرآیند ریخته‌گری را شبیه‌سازی کرده و دریافتند که در شبیه‌سازی با جریان آرام، عیوب بیشتری از قبیل نیامد^۲ در ساختار سلولی دیده می‌شود. در مطالعه‌ای دیگر [۱۰] آن‌ها از روش تولید افزودنی مستقیم به همراه ریخته‌گری ثقلی در محفظه خلاء جهت تولید ساختارهای مشبک فلزی از جنس AC4C استفاده نمودند. آن‌ها همچنین با توسعه یک مدل عددی دریافتند که برای حصول نتایج دقیق، خواص ماده باید بصورت تابعی از دما اعمال گشته و اختلافی ۲۰ درصدی بین حالات خواص ثابت و متغیر گزارش نمودند. ناپلوجا و همکارانش [۱۴] قالب‌هایی از جنس سرامیک با استفاده از روش تولید افزودنی تولید کرده و از آن‌ها برای تولید ساختارهای لانه زنبوری از جنس آلومینیوم AC 44200 بهره بردند. وانگ و همکارانش [۱۵] با استفاده از فرآیند تفجوشی انتخابی لیزر^۴ و ماسه‌های آغشته به رزین، قالب‌هایی ماسه‌ای برای ریخته‌گری ساختارهای مشبک تولید کرده و از آن‌ها برای ریخته‌گری آلومینیوم استفاده نمودند. در مطالعه‌ای دیگر [۱۶] آن‌ها تاثیر پارامترهای مختلف را بر رفتار فشاری و خاصیت جذب ضربه ساختارهای تولید شده مورد ارزیابی قرار دادند.

هدف از این پژوهش تولید ساختارهای مشبک فلزی به روش تولید افزودنی غیر مستقیم، مشخصه‌یابی آن‌ها و ارزیابی تاثیر پارامترهای مختلف بر کیفیت نمونه نهایی است. برای تحقق این امر سه ساختار مشبک BCC^۵، BCCZ^۶ و SC^۷ از جنس آلیاژ آلومینیوم A356 طراحی و تولید شده و کیفیت نمونه تولید شده و تناظر ابعاد آن با نمونه طراحی شده مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. همچنین فرآیند ریخته‌گری ثقلی مورد استفاده نیز بصورت عددی شبیه‌سازی شده و تاثیر پارامترهای مختلف بر میزان پر شدن قالب مورد بررسی قرار می‌گیرد. در پژوهش حاضر ابتدا نحوه مدل‌سازی قطعات، طراحی آزمایش، ساخت مواد مشبک فلزی و شبیه‌سازی



شکل ۲. مدل سه‌بعدی ایجاد شده با تکرار سه سلول واحد در هر جهت برای ساختار (الف) BCC، (ب) BCCZ و (ج) SC.



شکل ۳. الف) ساختار مشبک به همراه سیستم‌راهگاه و صفحات اضافه شده (ب) مدل سه‌بعدی قالب به همراه پارامترهای هندسی آن

جدول ۱. آزمایش‌های مختلف بدست آمده از طراحی آزمایش تاگوچی

ردیف	دمای مذاب	دمای قالب	زمان بارریزی	قطر لیگامان	ارتفاع راهگاه
	°C	°C	s	mm	mm
۱	۶۶۰	۲۵	۲	۱	۱۰
۲	۶۶۰	۵۰	۳/۵	۱/۵	۲۰
۳	۶۶۰	۱۰۰	۵	۲	۳۰
۴	۶۶۰	۱۵۰	۶/۵	۳	۴۰
۵	۷۲۵	۲۵	۳/۵	۲	۴۰
۶	۷۲۵	۵۰	۲	۳	۳۰
۷	۷۲۵	۱۰۰	۶/۵	۱	۲۰
۸	۷۲۵	۱۵۰	۵	۱/۵	۱۰
۹	۸۰۰	۲۵	۵	۳	۲۰
۱۰	۸۰۰	۵۰	۶/۵	۲	۱۰
۱۱	۸۰۰	۱۰۰	۲	۱/۵	۳۰
۱۲	۸۰۰	۱۵۰	۳/۵	۱	۳۰
۱۳	۸۲۵	۲۵	۶/۵	۱/۵	۳۰
۱۴	۸۲۵	۵۰	۵	۱	۴۰
۱۵	۸۲۵	۱۰۰	۳/۵	۳	۱۰
۱۶	۸۲۵	۱۵۰	۲	۲	۲۰

برای تولید مدل سه‌بعدی یک ماده مشبک، به دلیل پیچیده بودن هندسه و دشوار بودن مدل‌سازی، ابتدا یک برنامه به زبان پایتون به عنوان ورودی نرم افزار آباکوس^۹ نوشته می‌شود. این برنامه این امکان را فراهم می‌کند که بتوان هر ماده مشبکی را تنها با وارد کردن رئوس پیوندها و نحوه اتصال آن‌ها به یکدیگر تولید نمود. شکل ۲ شمای سه‌بعدی نمونه‌هایی از ساختارهای تولید شده، شامل سه سلول واحد در هر جهت، را نشان می‌دهد. پس از آن با استفاده از نرم‌افزار سالیدورکس^{۱۰} سیستم راهگاه قالب مورد نیاز طراحی شده و به مجموعه اضافه می‌گردد. در طرح حاضر، با توجه به محدودیت‌های ریخته‌گری و کوره پیش‌گرم موجود برای پیش گرمایش اولیه قالب، قطر بزرگ سیستم راهگاه ۱۸ میلی‌متر و قطر کوچک آن ۱۶ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود. علاوه بر سیستم راهگاه، یک صفحه به ضخامت ۲ میلی‌متر در دو طرف ساختار طراحی شده تا از پخش شدن کامل مذاب در تمام پیوندها اطمینان حاصل شود. شکل ۳ (الف) مدل سه‌بعدی الگوی فدا شونده به همراه سیستم راهگاه آن و شکل ۳ (ب) قالب تولید شده برای مقاصد شبیه‌سازی عددی را نمایش می‌دهد.

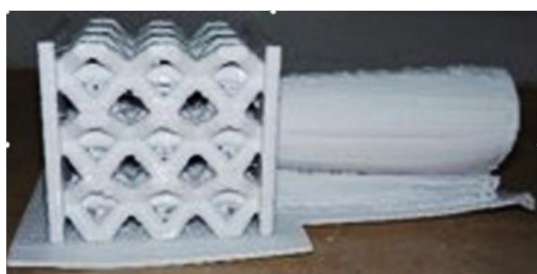
۲-۲. طراحی آزمایش

از آنجا که تعداد پارامترهای کنترلی فرآیند ریخته‌گری زیاد است، بررسی تاثیر این پارامترها نیازمند طراحی آزمایش خواهد بود. برای این منظور ابتدا پارامترهای مهم در فرآیند ریخته‌گری ثقلی تعیین شده و سپس، با استفاده از روش تاگوچی و نرم‌افزار مینی‌تب^{۱۱}، طراحی آزمایش انجام می‌شود.

طراحی آزمایش انجام شده، دمای قالب، دمای مذاب، دبی بارریزی مذاب (که بر اساس زمان پر شدن قالب اندازه‌گیری می‌شود)، قطر پیوندها و ارتفاع سیستم‌راهگاه بعنوان پارامترهای موثر بر فرآیند ریخته‌گری در نظر گرفته می‌شوند. مقادیر مورد استفاده برای هر کدام از این پارامترها در طراحی آزمایش عبارتند از: دمای مذاب ۶۶۰، ۷۲۵، ۸۰۰ و ۸۲۵ درجه سانتی‌گراد، دمای قالب ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد، دبی ورودی مذاب ۲، ۳/۵، ۵ و ۶/۵ ثانیه. همچنین قطر پیوندها ۱، ۱/۵، ۲ و ۳ میلی‌متر و ارتفاع سیستم راهگاه ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شوند. انجام طراحی آزمایش با استفاده از داده‌های فوق به ۱۶ آزمایش ارائه شده در جدول ۱ منجر می‌شود.

۲-۳. ساخت ساختارهای مشبک فلزی

ساخت قطعه، فرآیندهای بعدی برای حذف پشتیبان‌ها از داخل نمونه نیز مورد نیاز باشد که علاوه بر زمان بر بودن باعث هدر رفتن مواد اولیه نیز می‌شود. از این رو در طراحی برای تولید افزودنی، یافتن جهت تولید مناسب همواره یکی از مهمترین گام‌های طراحی به شمار می‌رود [۸، ۱۷، ۱۸]. نکته دیگری که در اینجا باید ذکر شود اینست که با توجه به اینکه تنها جداره‌های بیرونی الگوی فدا شونده از اهمیت برخوردار هستند، مقدار پر شدن بخش‌های داخلی نمونه به مقدار ۴۰ درصد تنظیم می‌شود تا ماده مصرفی تا حد امکان کاهش یابد.



شکل ۴. الگو فداشونده تولید شده با استفاده از فرآیند رسوب مذاب

قطعات تولید شده با استفاده از فرآیند رسوب مذاب به عنوان الگو برای تولید قالب ساختارهای فلزی استفاده می‌شوند. برای تولید قالب، از گچ ریخته‌گری سوپر ۱۰۰۰۰، شرکت زرگون گچ با خواص ارائه شده در جدول ۲، استفاده می‌شود. برای تولید دوغاب مورد نیاز از این گچ لازم است که به ازاء هر ۱۰۰ گرم گچ، ۳۶ تا ۴۰ میلی‌لیتر آب مورد استفاده قرار گیرد. پس از اندازه‌گیری نسبت مذکور، گچ به مدت دو دقیقه داخل آب خیس خورده و سپس با هم مخلوط می‌شوند [۹].

جدول ۲. خواص گچ مورد استفاده برای ساخت قالب [۹].

ویژگی	چگالی در دمای محیط	ضریب هدایت حرارتی در دمای محیط	گرمای ویژه	اندازه دانه	ضریب انبساط حرارتی	ضریب انتشار گرما
	Kg/m ³	W/(mK)	J/(KgK)	m	1/°C	MJ2/(m4K2s)
مقدار	۶۵۰	۰/۴۷	۱	۲/۵×۶-۱۰	۱۶/۴×۶-۱۰	۳/۲

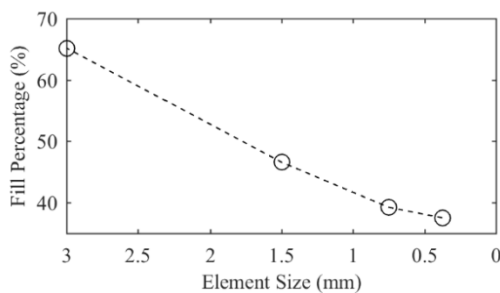
تهیه می‌شود مرتعش می‌گردد. هنگامی که الگو بطور کامل در دوغاب غوطه‌ور گردید، به مدت ۲ ساعت به آن اجازه داده می‌شود تا کاملاً سخت شود (شکل ۵-ب). پس از آن ظرفی که قالب در آن ساخته شده‌است را از بین برده و قالب گچ تولید شده را در هوای محیط به مدت ۶ ساعت قرار داده تا خشک شود. بعد از

در این پژوهش، برای تولید ساختارهای مشبک فلزی، از روش تولید افزودنی رسوب مذاب^{۱۲} به همراه فرآیند ریخته‌گری ثقلی استفاده می‌شود. برای این منظور لازم است که ابتدا الگوهای فداشونده‌ای از ساختار مورد نظر تولید گردد. تولید این الگوها با استفاده از دستگاه Quantum 2025، که توسط شرکت پرینتر سه‌بعدی پرشیا تولید گردیده است، انجام می‌شود. ماده مورد استفاده برای ساخت الگوهای فداشونده پلیمر (PLA) Polylactic acid، که توسط شرکت شژن اسون^{۱۳} تولید شده‌است، می‌باشد. علاوه بر این از نرم‌افزار Cura 15.04 که یک نرم‌افزار Z Printing است برای تولید فایل‌های G-Code برای ارسال به دستگاه استفاده می‌شود. با استفاده از دستورالعمل‌های ارائه شده در منابع موجود و انجام سعی و خطا، پارامترهای ورودی دستگاه برای دستیابی به بهترین نتیجه به صورت، دمای نازل ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد، دمای بستر ساخت ۷۰ درجه سانتی‌گراد، ضخامت لایه‌ها ۰/۲ میلی‌متر و سرعت حرکت نازل ۳۵ میلی‌متر بر ثانیه به دست می‌آیند. شکل ۴ نمونه‌ای از یک الگو فداشونده، که توسط این روش تولید شده‌است، را نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل مشاهده می‌شود، لایه‌گذاری و تولید قطعه در امتداد راستای عرضی آن انجام شده‌است. دلیل این انتخاب آنست که از یک سو هرچه ابعاد قطعه در راستای محور Z بیشتر باشد، زمان ساخت آن افزایش می‌یابد. از سوی دیگر چنانچه قالب در امتداد محور سیستم راهگاه تولید شود، وجود صفحه بالایی، مخصوصاً زمانی که قطر پیوندها اندک است، نیاز به ایجاد پشتیبان^{۱۴} را ضروری می‌کند. این امر سبب می‌شود که علاوه بر افزایش زمان

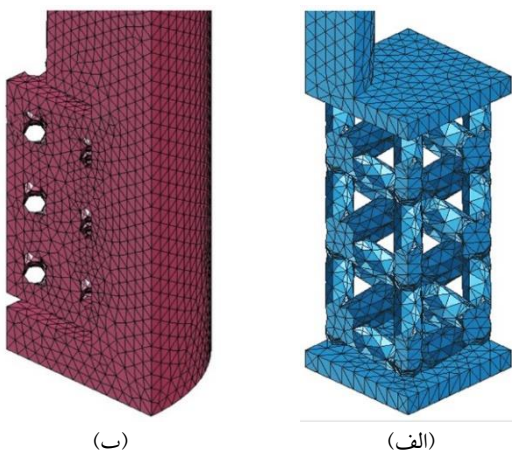
برای تولید قالب ابتدا باید الگوی فداشونده ثابت شده (شکل ۵-الف) و سپس دوغاب گچ از قبل آماده شده بر روی الگو فداشونده ریخته شود. برای آنکه سطوح قالب به طور کامل با دوغاب پوشش داده شوند و حباب‌های هوا در مرز مشترک آن‌ها کاهش یابد، همزمان با ریختن دوغاب، ظرفی که قالب در آن

۲-۴. شبیه‌سازی عددی

به منظور ارزیابی تاثیر پارامترهای مختلف بر میزان پر شدن قالب حین فرآیند ریخته‌گری، این فرایند با استفاده از نرم‌افزار پروکست^{۱۶} شبیه‌سازی می‌گردد. برای این منظور، مدل ایجاد شده در مراحل قبل، وارد نرم‌افزار شده و با استفاده از المان‌های چهاروجهی^{۱۷} مش‌بندی می‌شود. انتخاب اندازه مش با استفاده از قطر پیوندها به عنوان مبنا انجام می‌گردد و سپس طی آنالیز حساسیت به مش اندازه مناسب تعیین می‌شود. برای آنالیز حساسیت به مش، اندازه مش در هر مرحله نصف اندازه آن در مرحله قبلی در نظر گرفته می‌شود تا جایی که حداکثر اختلاف بین نتایج بدست آمده از دو اندازه مش متوالی کمتر از ۱۰ درصد شود. نمونه‌ای از آنالیز حساسیت به مش برای ساختار SC با قطر ۳ میلی‌متر در شکل ۶ نمایش داده شده‌است. شکل ۷ مش ایجاد شده برای ساختار مشبک و قالب آن را برای ساختار مذکور نمایش می‌دهد. لازم به ذکر است که با توجه به تقارن‌های موجود در مدل و به منظور کاهش حجم محاسبات تنها یک‌چهارم از قطعه در کنار شرایط مرزی مناسب مدل‌سازی شده‌است.



شکل ۶. آنالیز حساسیت به مس برای ساختار SC با قطر سه میلی‌متر



(ب)

(الف)

شکل ۷. مش ایجاد شده بر اساس آنالیز حساسیت به مش برای الف) ساختار مشبک ب) قالب ریخته‌گری

تولید قالب‌های گچی، الگوهای فداشونده که داخل قالب‌ها قرار دارند حذف می‌شوند. برای انجام این کار، قالب به همراه الگو فداشونده در کوره القایی، ساخت شرکت آبتین^{۱۵}، قرار داده شده و تا دمای ۶۲۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۳۰ دقیقه حرارت داده می‌شود. این کار علاوه بر حذف کامل الگوهای فداشونده از داخل قالب سبب می‌شود که رطوبت باقیمانده در قالب نیز تبخیر شده و از ترک خوردن قالب و پاشش مذاب حین فرآیند ریخته‌گری جلوگیری شود.



(ب)

(الف)

شکل ۸. نحوه ساخت قالب با استفاده از الگو فداشونده، الف) ثابت کردن الگو فداشونده، ب) غوطه‌ور سازی قالب در دوغاب گچ

در مواردی که دبی بارریزی زیاد است امکان ترک خوردن قالب حین فرآیند وجود دارد. برای رفع این مشکل از یک ظرف فلزی برای تولید قالب استفاده شده و این ظرف تا پایان عملیات ریخته‌گری حذف نخواهد شد. در این حالت پس از خشک شدن قالب در هوای محیط، مجموعه قالب، الگوی فداشونده و ظرف به مدت ۲ ساعت در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد رطوبت زدایی می‌شوند تا هنگام حذف الگو ترکی در قالب ایجاد نشود. پس از آن فرآیند حذف الگوی فداشونده مانند قبل انجام می‌گردد. ذوب آلیاژ آلومینیوم A356 در بوتله‌ای از جنس سیلیکون کارباید، که با نام تجاری A2 سالمونده و با گنجایش یک کیلوگرم مذاب آلومینیوم در بازار موجود است، انجام می‌گیرد. برای ذوب فلز از کوره عملیات حرارتی آبتین، استفاده شده است. حداکثر دمای قابل دستیابی توسط این کوره ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. لازم به ذکر است که در تمامی حالات ذکر شده در طراحی آزمایش، دمای مذاب به اندازه ۲۰ درجه سانتی‌گراد بالاتر برده می‌شود تا افت دمای ایجاد شده حین سرپاره‌گیری جبران گردد.

خنک‌کاری از طریق تماس مستقیم با هوای محیط (دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد) و با استفاده از ضریب ۰/۱ تعریف می‌شود. در این حالت فرض می‌شود که تمامی سطوح قالب در معرض هوا قرار گیرند.

۲-۵. مشخصه‌یابی

به منظور اندازه‌گیری دمای مذاب و قالب از دستگاه تصویرگر حرارتی^{۱۸}، مدل Testo 875i-1، استفاده می‌شود. همچنین عکس‌برداری از قطعات پلیمری و فلزی تولید شده، جهت ارزیابی کیفیت پیوندهای تولید شده، توسط میکروسکوپ-Stemi 2000 C، با حداکثر بزرگ‌نمایی ۵ برابر، انجام می‌گیرد. پس از آن تصاویر تهیه شده در نرم‌افزار سالیدورکس به مقیاس واقعی تبدیل، و ابعاد مورد نیاز از آن‌ها استخراج می‌شوند.

برای محاسبه میزان تخلخل ساختارهای تولید شده از آزمایش ارشمیدس استفاده می‌شود. برای این منظور، ابتدا یک اشل مدرج را به مقدار ۲۰۰ سی‌سی از آب پر کرده و سپس قطعه تولید شده را داخل اشل قرار داده، سطح آب داخل اشل به اندازه حجم قطعه تولید شده افزایش می‌یابد. مقدار آب اضافه شده را داخل استوانه مدرج ریخته و حجم پر شدن قالب در زمان تولید قطعات به دست می‌آید. برای این که حجم دقیق قطعات به دست آید یک مرحله پولیش قبل از انجام آزمایش انجام شده است، که در آن محل اتصال سیستم راهگاه و منبع‌تغذیه با استفاده از سنباده ۱۲۰ پولیش شده تا زمانی که کاملاً صاف و یک دست شوند. پس از محاسبه حجم نمونه مشبک، درصد تخلخل با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

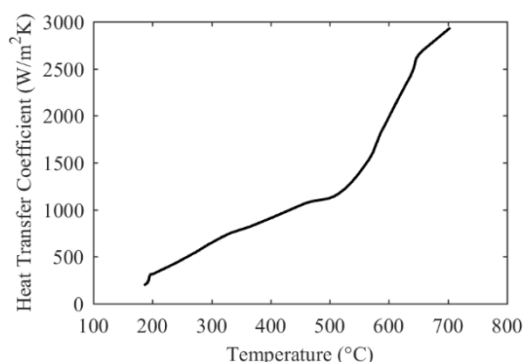
$$p = \left(1 - \frac{V_C}{V_S}\right) * 100 \quad (3)$$

در این رابطه p درصد تخلخل، V_C حجم ساختار مشبک و V_S حجم مکعب مستطیل محیطی آن است. لازم به ذکر است که تخلخل طراحی نمونه نیز با استفاده از رابطه (۳) قابل محاسبه است، با این تفاوت که بجای حجم ساختار مشبک تولید شده از حجم نمونه طراحی شده در محیط CAD استفاده می‌شود.

۳. نتایج

نتایج به دست آمده از این تحقیق به دو بخش شامل نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی فرآیند ریخته‌گری و نتایج حاصل از ساخت قطعات به روش فرآیند تولید افزودنی غیرمستقیم تقسیم

پس از ایجاد هندسه مورد نظر در نرم‌افزار، لازم است که خواص مادی مورد نیاز به آن نسبت داده شود. مطالعات انجام شده نشان می‌دهند که برای کاهش خطای مربوط به نتایج شبیه‌سازی فرآیند ریخته‌گری باید خواص مادی بصورت تابعی از دما مورد استفاده قرار گیرند [۱۰]. این آلیاژ و خواص وابسته به دمای آن در کتابخانه نرم‌افزار پروکست موجود بوده و لذا برای اختصار از ارائه منحنی‌های مربوط به این خواص خودداری می‌شود. علاوه بر مشخصات ماده مورد استفاده، لازم است که ضریب انتقال حرارت بین مذاب و قالب نیز بصورت تابعی از دما معرفی گردد. شکل ۸ این تابعیت را برای آلیاژ مورد استفاده نمایش می‌دهد.



شکل ۸ ضریب انتقال حرارت آلیاژ A356 بر حسب دما [۱۹]

برای محاسبه دبی بارریزی مذاب، \dot{m} با فرض اینکه جرمی از مذابی به میزان m در مدت زمان t در قالب بارریزی می‌شود آنگاه:

$$\dot{m} = m/t \quad (1)$$

اگر حجم فضای داخلی قالب، V ، چگالی آلیاژ مورد استفاده، ρ ، و درصد پر شدن قالب، F_L ، باشد، جرم مذاب مورد استفاده عبارت است از:

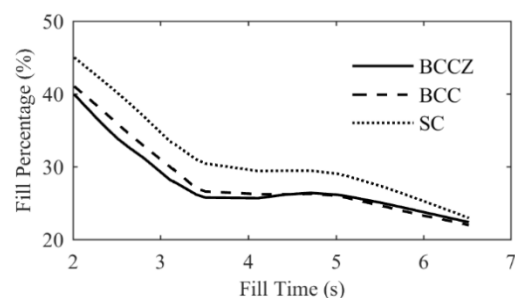
$$m = \rho V \frac{F_L}{100} \quad (2)$$

بر اساس نوع ساختار، قطر پیوندها و ارتفاع سیستم راهگاه، جرم مذاب متفاوت بوده و چون زمان‌های مختلفی در طراحی آزمایش نیز وجود دارد دبی بارریزی مذاب برای هر آزمایش متفاوت خواهد بود. برای به دست آوردن یک وجه مشترک در دبی بارریزی، این کمیت برای ساختار BCCZ و برای تمام ۱۶ حالت طراحی آزمایش محاسبه شده و همین مقادیر برای ساختارهای BCC و SC نیز استفاده می‌گردند. در پایان شرایط خنک‌کاری قالب بعد از انجام فرآیند ریخته‌گری، با فرض

می‌شوند. در بخش اول تاثیر ارتفاع سیستم راهگام، دمای مذاب، دمای قالب، دبی بارریزی مذاب و قطر پیوندها بر میزان پر شدن قالب ارائه می‌گردد. در بخش دوم نتایج به دست آمده از مشخصه‌یابی قطعات تولید شده با استفاده از فرآیند رسوب مذاب و قطعات تولید شده با استفاده از فرآیند ریخته‌گری ثقلی ارائه شده و در خصوص دلایل آن‌ها بحث می‌شود.

۳-۱. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی فرآیند ریخته‌گری

شکل ۹ میزان پر شدن قالب را بر حسب مدت زمان بارریزی مذاب به تصویر می‌کشد. همانگونه که مشاهده می‌شود با افزایش زمان بارریزی مذاب (کاهش دبی ورودی مذاب) درصد پر شدن قالب در هر سه ساختار BCC، BCCZ و SC کاهش پیدا می‌کند. درصد پر شدن قالب در زمان ۲ ثانیه برای ساختار BCC، ۴۱ درصد، ساختار BCCZ، ۴۰ درصد و ساختار SC ۴۵ درصد است. همچنین با افزایش زمان بارریزی به ۶/۵ ثانیه، درصد پر شدن برای ساختار BCC، ۲۲ درصد، ساختار BCCZ، ۲۲/۳۲ درصد و ساختار SC ۲۳ درصد کاهش پیدا می‌کند. دلیل این رفتار را می‌توان به کاهش اغتشاش جریان سیال با افزایش زمان بارریزی نسبت داد. این مشاهده با نتایج گزارش شده توسط مون و همکارانش [۹] همخوانی کاملی دارد.

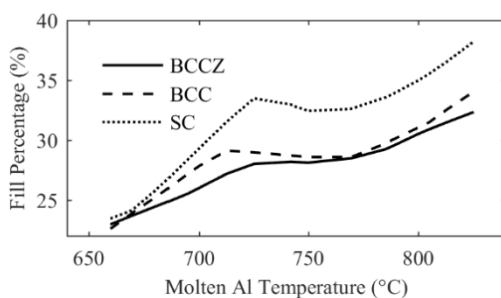


شکل ۹. تاثیر مدت زمان بارریزی مذاب بر درصد پر شدن قالب.

از نتایج ارائه شده در شکل ۹ همچنین می‌توان دریافت که رفتار پر شدن قالب برای دو ساختار BCC و BCCZ تقریباً یکسان است. بنظر می‌آید که این تشابه رفتار به وجود پیوندهای مورب در این دو ساختار مربوط باشد. همچنین می‌توان دید که، در زمان بارریزی کوتاه (اغتشاش جریان بالا)، میزان پر شدن قالب برای ساختار BCC از ساختار BCCZ به میزان جزئی بیشتر است. چرا که در یک مقدار قطر مشخص حجم ساختار BCCZ بیشتر بوده و از آنجا که این حجم ملاک محاسبه مقدار دبی ورودی

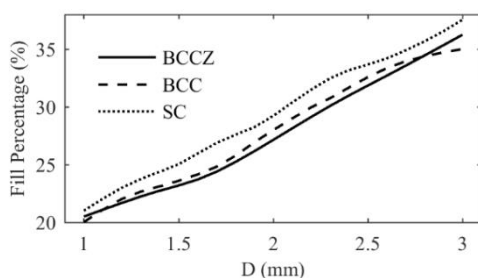
برای تمامی ساختارها است، میزان دبی ورودی و اغتشاش جریان برای ساختارهای BCC و SC بیشتر خواهد بود. با افزایش زمان بارریزی، میزان اغتشاش جریان کاهش یافته و درصد پر شدن قالب برای هر سه ساختار بهم نزدیک می‌شود، بطوریکه برای دو ساختار BCC و BCCZ تفاوت چندانی را نمی‌توان ملاحظه نمود.

شکل ۱۰ میزان پر شدن قالب بر حسب دمای مذاب ورودی به قالب را نمایش می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود، با افزایش این دما میزان پر شدن قالب نیز افزایش می‌یابد. با این حال در محدوده دمایی بین ۷۳۰ تا ۷۹۰ درجه سانتی‌گراد، برای دو ساختار SC و BCC، روندی نسبتاً کاهشی و برای ساختار BCCZ روندی تقریباً ثابت را شاهد هستیم. دلیل این مشاهده را می‌توان در رفتار غیرخطی خواص ماده مذاب بر حسب دما جستجو نمود. درصد پر شدن قالب در دمای ۶۶۰ درجه سانتی‌گراد برای ساختار BCC، ۲۲/۷ درصد، ساختار BCCZ، ۲۳ درصد و ساختار SC ۲۳/۵ درصد می‌باشد. با افزایش دمای مذاب به ۸۲۵ درجه سانتی‌گراد، درصد پر شدن برای ساختار BCC، ۳۴ درصد، ساختار BCCZ، ۳۲/۳ درصد و ساختار SC، ۳۸/۲ درصد افزایش پیدا کرده است. همانگونه که دیده می‌شود، در دماهای پایین میزان پر شدن قالب برای هر سه ساختار تقریباً یکسان است آنکه با افزایش دمای مذاب میزان پر شدن قالب برای ساختار SC با شدت بیشتری نسبت به دو ساختار دیگر رشد می‌کند. با توجه به خواص ماده مذاب بر حسب دما، می‌توان این مشاهده را چنین توجیه کرد که در دماهای پایین میزان ویسکوزیته مذاب پایین بوده و جریان تقریباً آرامی را ایجاد می‌نماید، حال آنکه با افزایش دما مقدار ویسکوزیته کاهش یافته و جریان اغتشاش بیشتری پیدا می‌کند. از آنجا که دبی ورودی برای ساختار SC بیشتر است سرعت سیال نیز در این حالت افزایش یافته و جریان ورودی برای این ساختار اغتشاش بیشتری خواهد داشت.

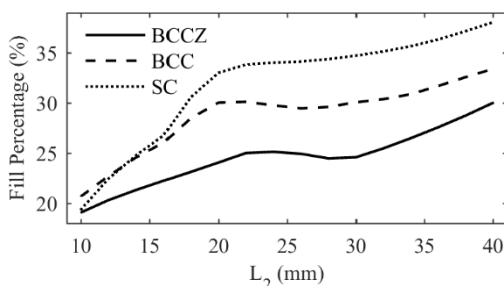


شکل ۱۰. تاثیر دمای مذاب آلومینیوم بر درصد پر شدن قالب.

در شکل ۱۳ درصد پر شدن قالب بر حسب ارتفاع سیستم راهگاه به تصویر کشیده شده‌است. با افزایش ارتفاع سیستم راهگاه میزان پر شدن قالب افزایش می‌یابد. این افزایش تا ارتفاع ۲۰ میلی‌متر شیب تندی داشته و از آن به بعد شیب ملایم‌تری بخود می‌گیرد. شاید بتوان این تغییر رفتار را در گذار از ناحیه جریان آرام به جریان مغشوش و نیز رفتار مادی غیرخطی برای مذاب ارتباط داد. درصد پر شدن قالب در ارتفاع سیستم‌راهگاه ۱۰ میلی‌متر برای ساختار BCC، ۲۰/۵ درصد، ساختار BCCZ، ۱۹ درصد و ساختار SC، ۱۹/۲ درصد بوده است. با افزایش ارتفاع سیستم-راهگاه به ۴۰ میلی‌متر درصد پر شدن برای ساختار BCC، به ۳۳/۴ درصد، ساختار BCCZ، به ۳۰ درصد و ساختار SC، به ۳۸ درصد افزایش پیدا کرده است. مشابه آنچه که پیشتر بیان شد، افزایش اغتشاش جریان تاثیر بیشتری بر میزان پر شدن ساختار SC در مقایسه با دو ساختار دیگر دارد.



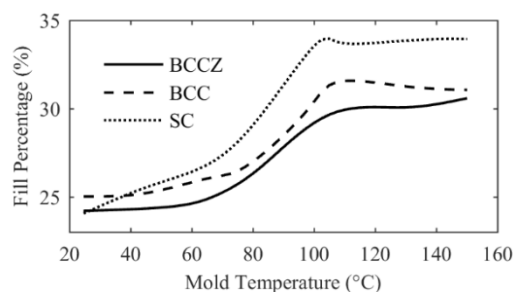
شکل ۱۲. تاثیر قطر پیوند بر درصد پر شدن قالب



شکل ۱۳. تاثیر ارتفاع سیستم‌راهگاه بر درصد پر شدن قالب.

۲-۳. نتایج به دست آمده از تولید قطعات با استفاده از فرآیند رسوب مذاب
در فرآیند رسوب مذاب برای هر کدام از سه ساختار BCC، BCCZ و SC، ۹ قطعه، شامل سه ساختار با قطر پیوند ۳ میلی‌متر، سه ساختار با قطر پیوند ۲ میلی‌متر و سه ساختار با قطر پیوند ۱/۵ میلی‌متر، تولید می‌شود. برای هر کدام از ساختارهای

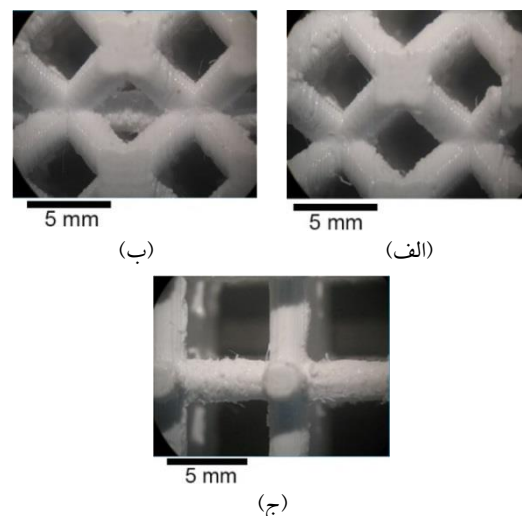
تاثیر دمای قالب بر میزان پر شدن آن در شکل ۱۱ نمایش داده شده‌است. درصد پر شدن قالب در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد برای ساختار BCC، ۲۵ درصد، ساختار BCCZ، ۲۴/۱۵ درصد و ساختار SC، ۲۴ درصد است. با افزایش دمای قالب به ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد درصد پر شدن برای ساختار BCC، ۳۱ درصد، ساختار BCCZ، ۳۰/۵ درصد و ساختار SC، ۳۳/۹ درصد افزایش پیدا کرده‌است. با توجه به این شکل، افزایش دمای قالب در محدوده‌های ۲۰ تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد و ۱۰۰ تا ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد تاثیر چندانی بر پر شدن قالب ندارد. این در حالیست که در بازه دمایی ۶۰ تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد میزان پر شدن قالب به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. می‌توان این پدیده را با توجه به تابعیت انقباض^{۱۹} به دمای قالب مرتبط دانست. لی و همکارانش [۲۰] عنوان کردند که در ریخته‌گری ثقیلی آلیاژ A357 در یک محدوده دمایی مشخص برای قالب هیچ انقباض قابل توجهی مشاهده نمی‌شود حال آنکه در دماهای بالاتر و پایین‌تر از این محدوده، انقباض بصورت قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد.



شکل ۱۱. تاثیر دمای قالب بر درصد پر شدن آن

شکل ۱۲ میزان پر شدن قالب بر حسب قطر پیوندها را نمایش می‌دهد. همانگونه که دیده می‌شود با افزایش قطر پیوندها درصد پر شدن قالب نیز بصورت تقریباً خطی افزایش می‌یابد؛ چرا که با افزایش قطر پیوند، نسبت نیروی وزن به فشار لاپلاسی، که خود تابعی از کشش سطحی و شکل سطح مذاب است، بیشتر شده و جریان سیال بهتر در داخل پیوند برقرار می‌گردد [۲۱]. درصد پر شدن قالب در قطر پیوند ۱ میلی‌متر برای ساختار BCC، ۲۰ درصد، ساختار BCCZ، ۲۰/۵ درصد و ساختار SC، ۲۱ درصد می‌باشد. با افزایش قطر پیوندها به ۳ میلی‌متر درصد پر شدن برای ساختار BCC، ۳۵ درصد، ساختار BCCZ، ۳۶/۱۴ درصد و ساختار SC، ۳۷/۵ درصد افزایش پیدا می‌کند.

تولید شده، با استفاده از تصاویر میکروسکوپی، که نمونه‌ای از آن در شکل ۱۴ نشان داده شده‌است، قطر پیوندها در امتداد طول آن‌ها، در ۱۶۶ نقطه برای قطر پیوند ۳ میلی‌متر، در ۱۸۲ نقطه برای قطر پیوند ۲ میلی‌متر و در ۱۵۴ نقطه برای قطر پیوند ۱/۵ میلی‌متر اندازه‌گیری می‌گردد. داده‌های بدست آمده از این اندازه‌گیری‌ها برای تحلیل‌های آماری مورد استفاده قرار می‌گیرند. لازم به ذکر است که به دلیل عدم امکان حذف پشتیبان‌ها و کوچک بودن پیوندها، ساخت نمونه‌ها با قطر ۱ میلی‌متر امکان‌پذیر نمی‌باشد. با توجه به اینکه هر ساختار شامل سه سلول در هر راستا است، ابعاد کلی این ساختارها $30 \times 30 \times 30$ میلی‌متر بدست می‌آید.



شکل ۱۴. نمونه‌هایی از عکس‌های میکروسکوپی ریزساختار الگو فداشونده ساختار (الف) BCC، (ب) BCCZ و (ج) SC.

ساختارهای با قطر اسمی ۳ میلی‌متر برای ساختار BCC، $11/24$ درصد، برای ساختار BCCZ، $13/63$ درصد و برای ساختار SC، $14/67$ درصد به دست می‌آید. مقادیر این خطا برای قطر اسمی ۲ میلی‌متر به ترتیب $16/93$ ، $23/70$ و $23/97$ درصد و برای قطر اسمی $1/5$ میلی‌متر به ترتیب $58/31$ ، $61/33$ و $63/35$ درصد محاسبه می‌شود. نتایج حاکی از آن است که در تمامی قطر پیوندهای مورد مطالعه، میزان خطا در ساختار SC بیشترین مقدار و در ساختار BCC کمترین مقدار را دارد. با توجه به محدودیت‌های روش تولید افزودنی در تولید پیوندهای افقی و نیاز به استفاده از پشتیبان، به نظر می‌آید که میزان خطا با افزایش سهم پیوندهای افقی در ساختار مشبک افزایش می‌یابد.

جدول ۳. داده‌های توصیفی مربوط به اندازه قطر الگوهای فداشونده

قطر اسمی	بیشترین قطر	کمترین قطر	قطر میانگین
mm	mm	mm	mm
۳	۲/۸۹	۲/۴۰	۲/۶۱
۲	۱/۸۹	۱/۳۵	۱/۵۹
۱/۵	۱/۰۱	۰/۴۷	۰/۵۹

۳-۳. نتایج حاصل از تولید قطعات فلزی با فرآیند ریخته‌گری

به استناد نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی‌ها و به منظور دستیابی به بیشترین میزان پر شدن قالب، فرآیند ریخته‌گری تنها برای ارتفاع سیستم راهگام بیشتر از ۴۰ میلی‌متر، دمای مذاب بالاتر از ۶۶۰ درجه سانتی‌گراد و دمای قالب ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد انجام می‌شود. مقدار تخلخل به دست آمده با استفاده از شبیه‌سازی فرآیند ریخته‌گری و آزمایش‌های تجربی با مقدار تخلخل طراحی برای هر سه ساختار با قطر پیوند ۳ میلی‌متر، ارتفاع راه‌گام ۴۰ میلی‌متر، دمای مذاب ۶۶۰ درجه سانتی‌گراد و دمای قالب ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد در جدول ۴ مورد مقایسه قرار گرفته‌است. همانگونه که مشاهده می‌شود، برای تمامی ساختارها مقدار تخلخل شبیه‌سازی بیشتر از تخلخل طراحی است که دلیل آن عدم پر شدن کامل قالب در فرآیند شبیه‌سازی و وجود فضای خالی زیاد در ساختار است. با این حال مقدار تخلخل بدست آمده از آزمایش همخوانی بهتری با تخلخل طراحی دارد چرا که هرچند در برخی نقاط پر نشدن قالب باعث افزایش تخلخل شده‌است، وجود حباب‌های موجود در قالب و تجمع بیش از حد مذاب در یک نقطه باعث

در جدول ۳ داده‌های توصیفی که شامل بیشترین، کمترین و میانگین قطرهای خوانده شده هستند، ارائه شده است. بر اساس چارک سوم ۷۵ درصد داده‌های استخراج شده در قطر ۳ میلی‌متر کمتر از $2/692$ میلی‌متر، در قطر ۲ میلی‌متر کمتر از $1/68$ میلی‌متر و در قطر $1/5$ میلی‌متر کمتر از $0/63$ میلی‌متر هستند. این مشاهده نشان می‌دهد که با کاهش قطر پیوندها، امکان تولید آن‌ها کاهش یافته و مقدار قطر از مقدار طراحی شده برای آن فاصله می‌گیرد. دلیل این اتفاق آنست که در فرآیند رسوب مذاب کوچکترین بعدی که قابل تولید است توسط قطر خروجی نازل محدود می‌شود [۸]. برای بررسی دقیق‌تر این موضوع درصد خطا برای هر ساختار و در هر قطر اسمی به صورت جداگانه ارائه می‌شود. خطای محاسبه شده بین مقدار میانگین و قطر اسمی، در

مربوط دانست، که امکان تغذیه ساختار را به راحتی فراهم می‌کنند. اختلاف به وجود آمده در میزان تخلخل طراحی و تجربی را می‌توان به عواملی همچون عیب نیامد، تله هوا، انقباض و وجود حباب‌های هوا در گچ قالب نسبت داد. با توجه به شکل ۱۶ برای ساختارهای BCC و BCCZ پر نشدن کامل قالب به دلیل ایجاد تله هوا در ناحیه فوقانی (عمدتاً صفحه بالای قطعه) و برای ساختار SC به دلیل ایجاد تله هوا در پیوندهای افقی اتفاق می‌افتد. در تحقیقی که توسط کلوا و همکارانش [۶] انجام شد وجود عیب نیامد در پیوندهای افقی مشاهده گردید. آن‌ها دلیل ایجاد اید عیب در فرآیند ریخته‌گری را به انجماد زود هنگام مذاب نسبت دادند. شکل ۱۷ نمونه‌های تولید شده در حالات ۱۶ تا ۱۸ را به تصویر می‌کشد. همانگونه که دیده می‌شود ساختار مشبک با استفاده از این پارامترها کاملاً پر شده و وجود حفره تنها در صفحه بالایی نمونه مشاهده می‌شود. مون و همکارانش [۱۰] نیز وجود حفراتی را در محل ورود مذاب به قالب گزارش نمودند و دلیل آن را تغییر جهت ناگهانی جریان مذاب در این ناحیه و ایجاد جریان آشفته محلی بیان نمودند. نکته دیگری که لازم است به آن توجه شود این است که وجود حباب‌های محبوس شده در دوغاب قالب باعث افزایش ابعاد در محل وجود این حباب‌ها در داخل نمونه می‌گردد. شکل ۱۷-الف نمونه‌ای از این افزایش ابعاد را نمایش می‌دهد. به منظور بررسی قطر نمونه‌های فلزی تولید شده، با استفاده از تصاویر میکروسکوپی تهیه شده (شکل ۱۸)، قطر پیوند برای ساختارهای با قطر ۳ میلی‌متر در ۱۴۰ نقطه اندازه‌گیری می‌شود. میانگین قطرهای اندازه‌گیری شده ۲/۶۶۸ میلی‌متر و بیشترین و کمترین مقدار اندازه‌گیری شده به ترتیب ۲/۸۸ و ۲/۵ میلی‌متر می‌باشند. خطای محاسبه شده بین مقدار میانگین و قطر اسمی، ۱۱/۰۶ درصد بوده و اختلاف بین مقدار میانگین قطر و قطر الگوهای فدا شونده ۲/۲ درصد می‌باشد. این مشاهده مبین آنست که خطای ایجاد شده در قطر نمونه‌های فلزی تولید شده بیشتر تحت تاثیر خطاهای ناشی از فرآیند تولید افزودنی است تا فرآیند ریخته‌گری. با این حال، وجود خطاهایی از جمله عیب نیامد، عیوب انقباضی، تخلخل‌های گازی، پلیسه و پر نشدن قالب در فرآیند ریخته‌گری نیز می‌تواند کیفیت قطعه نهایی را تحت تاثیر قرار دهد. میسل و همکارانش [۴] مقدار قطر پیوند نمونه‌های ساخته شده توسط فرآیند تولید افزودنی غیرمستقیم را ۲۷ درصد کمتر از مقدار طراحی شده گزارش کردند.

کاهش تخلخل می‌گردد. مشاهدات انجام شده توسط وانگ و همکارانش [۱۵] نیز نشان می‌دهد که مقدار تخلخل به دست آمده از نمونه‌های ساخته شده همواره بیشتر از تخلخلی است که در طراحی در نظر گرفته شده‌است. آن‌ها این مشاهده را به تغییر ابعاد قالب ماسه‌ای نسبت به طرح اولیه نسبت داده‌اند.

جدول ۴. مقایسه مقدار تخلخل به دست آمده با استفاده شبیه‌سازی فرآیند

ریخته‌گری و آزمایش‌های تجربی با تخلخل طراحی

ساختار	تخلخل طراحی	تخلخل تجربی	تخلخل شبیه‌سازی	خطا
	%	%	%	%
BCC	۵۶/۶۹	۶۴/۰۵	۷۵/۶۴	۱۸/۱۰
BCCZ	۵۳/۴۸	۵۰/۹۸	۶۴/۴۱	۲۶/۳۴
SC	۷۲/۸۹	۷۰/۵۸	۸۴/۴۰	۱۹/۵۸

جدول ۵ کلیه حالات مورد مطالعه را به همراه میزان تخلخل طراحی، میزان تخلخل به دست آمده از آزمایش ارسیمیدس و خطای بین این دو مقدار نمایش می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود، در تمامی حالات مورد بررسی تنها ساختارهای مشبک با قطر ۳ میلی‌متر قابلیت تولید دارند؛ چرا که، همانگونه که پیش‌تر نیز بیان شد، با کاهش مقدار قطر، فشار لاپلاسی بواسطه افزایش کشش سطحی مذاب افزایش یافته و پر شدن قالب را ناممکن می‌سازد. اثرات این مقدار نیروی کشش سطحی به اندازه‌ای است که کاهش مقدار ویسکوزیته ناشی از افزایش دما نیز توان جبران آن را ندارد. این مشاهده با آنچه که در شبیه‌سازی‌های عددی گزارش شده‌است همخوانی مطلوبی دارد. همانگونه که در شکل ۱۵ نمایش داده شده‌است، در این حالات تنها ناحیه بالایی قالب از مذاب پر شده و قبل از آنکه مذاب به ناحیه‌های پایینی برسد، در اثر انجماد به دام می‌افتد. در این شرایط ایجاد حفراتی برای خروج هوا نیز چاره‌ساز نیست.

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۵ می‌توان دریافت که با افزایش ارتفاع سیستم راهگامی و دمای مذاب اختلاف مقدار تخلخل محاسبه شده در آزمایش ارسیمیدس با تخلخل طراحی برای هر سه ساختار کاهش می‌یابد. این کاهش برای ساختار BCC بیشترین مقدار را دارد و برای دو ساختار دیگر تاثیر چندانی در مقدار تخلخل بدست آمده مشاهده نمی‌شود. این مشاهده را می‌توان به وجود پیوندهای عمودی در دو ساختار SC و BCCZ

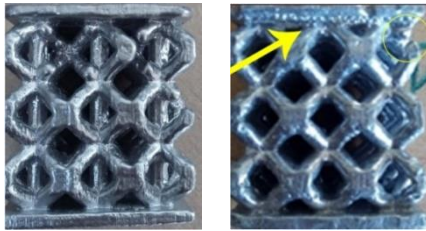
جدول ۵. حالت‌های مورد مطالعه و مقدار تخلخل محاسبه شده با استفاده از روش ارشمیدس

ردیف	نوع ساختار	قطر اسمی mm	ارتفاع راهگاه mm	دمای مذاب °C	دمای قالب °C	تخلخل طراحی %	تخلخل تجربی %	میزان خطا %
۱	BCC	۳	۴۰	۶۶۰	۱۵۰	۵۶/۶۹	۶۴/۰۵	۱۳/۰۰
۲	BCCZ	۳	۴۰	۶۶۰	۱۵۰	۵۳/۴۸	۵۰/۹۸	۴/۶۷
۳	SC	۳	۴۰	۶۶۰	۱۵۰	۷۲/۸۹	۷۰/۵۸	۳/۱۷
۴	BCC	۲	۴۰	۷۵۰	۱۵۰	تولید ناموفق	تولید ناموفق	تولید ناموفق
۵	BCCZ	۲	۴۰	۷۵۰	۱۵۰	تولید ناموفق	تولید ناموفق	تولید ناموفق
۶	SC	۲	۴۰	۷۵۰	۱۵۰	تولید ناموفق	تولید ناموفق	تولید ناموفق
۷	BCC	۱/۵	۴۰	۸۰۰	۱۵۰	تولید ناموفق	تولید ناموفق	تولید ناموفق
۸	BCCZ	۱/۵	۴۰	۸۰۰	۱۵۰	تولید ناموفق	تولید ناموفق	تولید ناموفق
۹	SC	۱/۵	۴۰	۸۰۰	۱۵۰	تولید ناموفق	تولید ناموفق	تولید ناموفق
۱۰	BCC	۳	۷۵	۸۵۰	۱۵۰	۵۶/۶۹	۵۸/۵۱	۳/۲۱
۱۱	BCCZ	۳	۷۵	۸۵۰	۱۵۰	۵۳/۴۸	۵۶/۰۵	۴/۸۱
۱۲	SC	۳	۷۵	۸۵۰	۱۵۰	۷۲/۸۹	۷۰/۹۰	۲/۷۳
۱۳	BCC	۲	۷۵	۸۵۰	۱۵۰	تولید ناموفق	تولید ناموفق	تولید ناموفق
۱۴	BCCZ	۲	۷۵	۸۵۰	۱۵۰	تولید ناموفق	تولید ناموفق	تولید ناموفق
۱۵	SC	۲	۷۵	۸۵۰	۱۵۰	تولید ناموفق	تولید ناموفق	تولید ناموفق
۱۶	BCC	۱/۵	۷۵	۸۵۰	۱۵۰	تولید ناموفق	تولید ناموفق	تولید ناموفق
۱۷	BCCZ	۱/۵	۷۵	۸۵۰	۱۵۰	تولید ناموفق	تولید ناموفق	تولید ناموفق
۱۸	SC	۱/۵	۷۵	۸۵۰	۱۵۰	تولید ناموفق	تولید ناموفق	تولید ناموفق

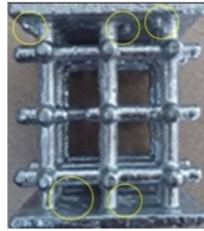
۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش تولید ساختارهای مشبک BCC، BCCZ و SC با استفاده از روش تولید افزودنی غیر مستقیم و با بهره‌گیری از تحلیل‌های عددی و روش‌های تجربی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج تحلیل‌های عددی نشان می‌دهد که کاهش زمان بارریزی و افزایش قطر پیوندها، ارتفاع سیستم راهگاه، دمای مذاب و دمای قالب میزان پر شدن قالب را افزایش می‌دهد. داده‌های تجربی نشان می‌دهند که در قطرهای کمتر از ۳ میلی‌متر امکان تولید ساختار مشبک وجود ندارد. نتایج بدست آمده برای ساختارهای تولید شده با قطر ۳ میلی‌متر حاکی از آن است که افزایش ارتفاع سیستم راهگاه و دمای مذاب میزان پر شدن قالب را بهبود می‌بخشد.

بررسی قطر الگوهای فداشونده تولید شده نشان می‌دهد که با کاهش قطر پیوند اختلاف بین قطر بدست آمده و قطر طراحی به شدت افزایش می‌یابد. این اختلاف در مواردی که ساختار دارای پیوندهای افقی است، به دلیل محدودیت‌های دستگاه‌های تولید افزودنی و نیاز به پشتیبان، بیشتر است. در خصوص نمونه‌های فلزی ساخته شده، اختلاف قطر پیوند با قطر طراحی بیشتر ناشی از فرآیند تولید افزودنی بکار رفته بوده و خطای ایجاد شده بواسطه فرآیند ریخته‌گری تنها ۲/۲ درصد می‌باشد. بنابراین چنانچه بتوان دقت روش تولید افزودنی مورد استفاده را افزایش داد می‌توان خطای ایجاد شده در نمونه نهایی را تا حد زیادی کاهش داد. این امر را می‌توان از طریق بهینه‌سازی پارامترهای ساخت در فرآیند تولید افزودنی مذاب محقق نمود.



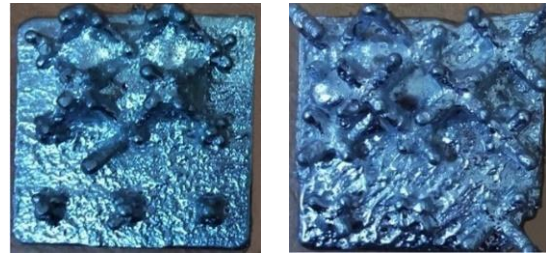
(الف) (ب)



(ج)

شکل ۱۷. نمونه مشبک تولید شده در حالت الف (۱۶، ب (۱۷، ج) ۱۸

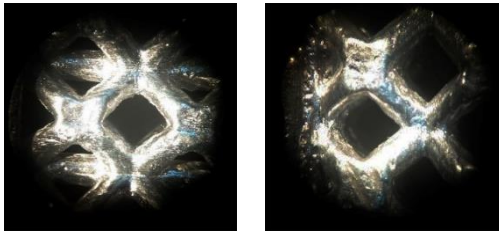
تصاویر تهیه شده از نمونه‌های فلزی ریخته‌گری شده از وجود عیب نیامد حکایت می‌کند. این عیب بواسطه حبس هوا در داخل ساختار بوجود می‌آید و عمدتاً برای ساختارهای BCC و BCCZ در صفحه فوقانی و برای ساختار SC در پیوندهای افقی اتفاق می‌افتد.



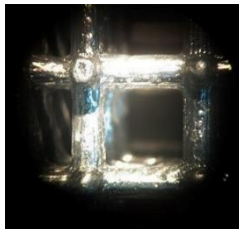
(الف) (ب)

شکل ۱۵. نمونه‌هایی از پر نشدن قالب در قطرهای اندک متناظر با حالت

الف (۴ ب) ۵



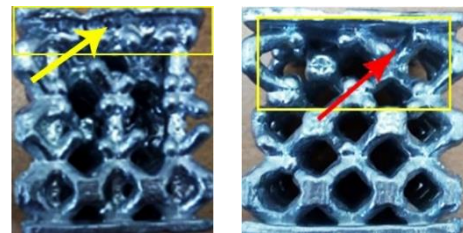
(الف) (ب)



(ج)

شکل ۱۸. نمونه‌هایی از عکس‌های میکروسکوپی ریزساختار برای ساختار

فلزی الف (BCC، ب (BCCZ و ج) SC.



(الف) (ب)



(ج)

شکل ۱۶. وجود عیب نیامد در حالت‌های الف (۱، ب (۲، ج) ۳

۵. مآخذ

- [1] J. Banhart, Manufacturing routes for metallic foams. The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society, 2000. 52(12): pp. 22-27.
- [2] J. Banhart and Weaire D., On the road again: metal foams find favor. Physics Today, 2002. 55(7): pp. 37-42.
- [3] L. J. Gibson and Ashby M. F., Cellular solids: structure and properties. 1999: Cambridge university press.
- [4] N. A. Meisel, Williams C. B., and Druschitz A. Lightweight metal cellular structures via indirect 3D printing and casting. in Proceedings of the

- international solid freeform fabrication symposium. 2012.
- [5] M. F. Ashby, Evans T., Fleck N. A., Hutchinson J., Wadley H., and Gibson L., Metal foams: a design guide. 2000: Elsevier.
- [6] M. Cholewa, Szuter T., Wróbel T., and Kondracki M., The skeleton castings as a new type of cast lattice structures. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 2012. 54(2): pp. 250-259.
- [7] N. Jin, Wang F., Wang Y., Zhang B., Cheng H., and Zhang H., Failure and energy absorption characteristics of four lattice structures under

- dynamic loading. *Materials & Design*, 2019. 169: pp. 107655.
- [8] I. Gibson, Rosen D. W., and Stucker B., *Additive manufacturing technologies*. Vol. 17. 2014: Springer.
- [9] J. Mun, Ju J., and Thurman J. Indirect additive manufacturing of a cubic lattice structure with a copper alloy. in *Proceedings of the 25th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, SFFS2014-55*, Austin, TX. 2014.
- [10] J. Mun, Yun B.-G., Ju J., and Chang B.-M., Indirect additive manufacturing based casting of a periodic 3D cellular metal–flow simulation of molten aluminum alloy. *Journal of Manufacturing Processes*, 2015. 17: pp. 28-40.
- [11] T. A. Le Néel, Mognol P., and Hascoët J.-Y., A review on additive manufacturing of sand molds by binder jetting and selective laser sintering. *Rapid Prototyping Journal*, 2018. 24(8): pp. 1325-1336.
- [12] S. R. Sama, Wang J., and Manogharan G., Non-conventional mold design for metal casting using 3D sand-printing. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018. 34: pp. 765-775.
- [13] J. Montero, Vitale P., Weber S., Bleckmann M., and Paetzold K., Indirect Additive Manufacturing of resin components using polyvinyl alcohol sacrificial moulds. *Procedia CIRP*, 2020. 91: pp. 388-395.
- [14] K. Naplocha, Dmitruk A., Mayer P., and Kaczmar J., *Design of Honeycomb Structures Produced by Investment Casting*. *Archives of Foundry Engineering*, 2019.
- [15] H. Wang, Fu Y., Su M., and Hao H., A novel method of indirect rapid prototyping to fabricate the ordered porous aluminum with controllable dimension variation and their properties. *Journal of Materials Processing Technology*, 2019. 266: pp. 373-380.
- [16] H. Wang, Fu Y., Su M., and Hao H., Effect of structure design on compressive properties and energy absorption behavior of ordered porous aluminum prepared by rapid casting. *Materials & Design*, 2019. 167: pp. 107631.
- [17] M. Brandt, *Laser Additive Manufacturing: Materials, Design, Technologies, and Applications*. 2016: Elsevier Science.
- [18] S. W. Killi, *Additive Manufacturing: Design, Methods, and Processes*. 2017: CRC Press.
- [19] L. Moraru, The heat transfer coefficient during the solidification of aluminum. *Czechoslovak Journal of Physics*, 2002. 52(3): pp. 387-393.
- [20] L. Li, Li D., Gao J., Zhang Y., and Kang Y. *Influence of Mold Temperature on Microstructure and Shrinkage Porosity of the A357 Alloys in Gravity Die Casting*. 2018. Singapore: Springer Singapore.
- [21] C. Extrand, Drainage of liquid from a small circular hole in a vertical wall. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2018. 32(10): pp. 1142-1149.

پی‌نوشت

-
1. Additive Manufacturing
 2. Cellular Lattice Structures
 3. Misrun
 4. Selective laser sintering
 5. Body-centered cubic
 6. Body-centered cubic with Z-struts
 7. Simple cubic
 8. Ligament
 9. Abaqus
 10. Solidworks
 11. Minitab Software
 12. Fused Deposition Modeling
 13. Shenzhen Esun Industrial Co.
 14. Support
 15. ATBIN
 16. Procast
 17. Tetrahedral elements
 18. Thermal imager
 19. Shrinkage