

بررسی عوامل موثر بر ساخت قطعات خام کلسیم فسفاتی به روش چاپ سه بعدی

نوع مقاله: علمی پژوهشی

فهیمه دینی^{*}، جعفر جواد پور، سید امیر غفاری، حمیدرضا رضایی

دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران

F_dini95@metaleng.iust.ac.ir

چکیده:

سرامیک‌های کلسیم فسفاتی دسته‌ای از مواد زیست فعال هستند که به دلیل شباهت شیمیایی به ترکیب مینرالی استخوان، به صورت گستردگی در مهندسی بافت مورد استفاده قرار می‌گیرند. فناوری ساخت افزایشی به دلیل توانایی تولید مدل‌های سه بعدی با ساختار کنترل شده مناسب با بدن بیمار، روشی کارآمد در تولید داریست‌های استخوانی است. فرآیند بایندر جت یکی از روش‌های ساخت افزایشی است که در آن قطعه از طریق واکنش بین بایندر اسپری شده در مناطق انتخابی یک بستر پودر ایجاد می‌شود. هدف از این پژوهش، درک ارتباط بین ویژگی‌های پودر شامل جریان‌یابی، اندازه و توزیع اندازه ذرات و کیفیت محصول نهایی است. بستر پودر اولیه در این تحقیق شامل هیدروکسی آپاتیت و کربوکسی متیل کیتوسان به ترتیب به عنوان جزء معدنی و آلی داریست است، بدین منظور کربوکسی متیل کیتوسان که یکی از مشتقات کیتوسان و در آب محلول است، سنتز شد. پودر هیدروکسی آپاتیت با کربوکسی متیل کیتوسان با نسبت ۴۰ به ۳۰ ترکیب شده و جریان‌یابی پودر برای رسیدن به یک پودر قابل پرینت، بهینه سازی شد.

اطلاعات مقاله:

دريافت: ۱۳۹۷ آذر ۳۰
پذيرش: ۱۳۹۸ اردیبهشت ۲۳

كلید واژه:

کلسیم فسفات؛ ساخت افزایشی؛
بايندر جت؛ بهينه سازی پودر

۱- مقدمه

محیط فیزیولوژیکی و سازگاری با پلیمرهای سنتزی و طبیعی، به صورت گستردگی در مهندسی بافت مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳]. کربوکسی متیل کیتوسان یکی از مشتقات کیتوسان و محلول در آب است. با نشاندن گروههای کوچک کربوکسی متیل در ساختار کیتوسان بدون تغییر خواص آن، حلالیتش در محیط قلیایی و خنثی افزایش می‌یابد. به دلیل بهبود زیست سازگاری، توانایی بالای جذب آب و ویسکوزیته‌ی بیشتر کربوکسی متیل کیتوسان نسبت به

برای درمان نقاچی استخوانی معمولاً از روش پیوند استخوان استفاده می‌شود اما به دلیل محدودیت‌های ناشی از این پیوندها همچون ایجاد جراحت، حساسیت و سلطان، استفاده از استخوان‌های سنتزی مصنوعی یا همان داریست‌ها روش جایگزین مؤثرتری به شمار می‌رود [۲۱]. سرامیک‌های کلسیم فسفاتی از جمله هیدروکسی آپاتیت به دلیل مشابه شیمیایی به ترکیب مینرالی استخوان، زیست سازگاری بالا در



جریان‌یابی پودر در این روش بسیار مهم است. جریان‌یابی مناسب باعث ایجاد لایه‌های با دقت بالا شده و از طرفی اگر جریان‌یابی مناسب نباشد غلتک توزیع پودر نمی‌تواند ذرات پودر را به حرکت درآورده و در این صورت ساخت لایه‌ها امکان پذیر نخواهد بود [۶]. در مقایسه با پودرهای ریز با یک اندازه‌ی منفرد، استفاده از پودری مشکل از چند اندازه متفاوت باعث بهبود تراکم پودر تا ۸/۲٪ جریان‌یابی تا ۱۰/۵٪ و افزایش دانسیتی‌پس از زینتر تا ۴٪ و کاهش انقباض پس از زینتر تا ۶/۴٪ می‌شود [۸]. پژوهش‌های انجام گرفته در حوزه مهندسی بافت با استفاده از روش بایندر جت تاکنون، عمدتاً با استفاده از بستر پودری از جنس تری کلسیم فسفات (TCP) و یا هیدروکسی آپاتیت (HA) و یک محلول بایندر پلیمری بوده است (جدول ۱) [۹].

جدول ۱- مروری بر مطالعات انجام شده [۹].

محققین	بایندر	پودر	فسفریک اسید
Castiho et al	تری کلسیم فسفات	هیدروکسی آپاتیت/تری کلسیم فسفات	-----
Detsch et al	تترا کلسیم فسفات	سیتریک اسید	دکسترن
Rath et al	+ تری کلسیم فسفات هیدروکسی آپاتیت	+ تری کلسیم فسفات، هیدروکسی آپاتیت	بایندر پلیمری
Warnke et al	+ کلسیم فسفات سیلیکا	+ بایندر پایه شکری	بایندر پایه آبی
El-Ghannam et al	+ تری کلسیم فسفات	+ دکسترن	+ هیدروکسی آپاتیت
Strobel et al	+ هیدروکسی آپاتیت	+ دکسترن	

کیتوسان، استفاده از آن در تولید داربست‌های استخوانی گسترش یافته است [۴]. استفاده از کیتوسان در مهندسی بافت و تولید داربست، منجر به واکنش پذیری شیمیایی بالا و توانایی بالای آن در ایجاد پیوندهای یونی و هیدروژنی می‌شود [۳]. کامپوزیت‌های مشکل از پلیمرهای طبیعی نظیر کیتوسان و مشتقات آن به همراه یک سرامیک زیست فعال همچون هیدروکسی آپاتیت منجر به درمان اختلالات استخوانی می‌شود. در این کامپوزیت‌ها کیتوسان معمولاً به عنوان یک عامل اتصال دهنده و یا عامل برقراری ارتباط با مولکول زیستی عمل می‌کند [۳]. روش‌های رایج برای ساخت داربست دارای محدودیت‌هایی از جمله کنترل اندازه حفرات و ایجاد حفرات به هم مرتبط است اما روش ساخت افزایشی به دلیل توانایی در کنترل دقیق ریزساختار داربست بر این محدودیت‌ها غلبه کرده است [۱]. فرآیند بایندر جت در ساخت افزایشی، روشی بسیار کارآمد برای تولید داربست استخوانی و مشکل از یک بستر پودر و یک بایندر برای اتصال ذرات پودر به یکدیگر است [۵]. با توجه به اهمیت خواص پودر و تاثیر آن بر کیفیت قطعه نهایی، اطلاعات کمی در این زمینه وجود دارد [۶].

در یک بستر پودر، ذرات ریز جریان‌یابی کمتری دارند و نمی‌توانند به راحتی حرکت کنند تا با قرار گرفتن بین ذرات درشت‌تر، دانسیتی تراکمی پودر را بالا ببرند و از طرفی استحکام خام شدیداً با افزایش اندازه‌ی ذرات کاهش می‌یابد و این نتیجه درست برعکس تراکم پودر به دست آمده که برای ذرات بزرگ‌تر مقدار بزرگ‌تر را نشان می‌دهد، است. در واقع تراکم پودر بیشتر، استحکام خام کمتری ایجاد می‌کند که با مطالعاتی که تا کنون انجام شده متفاوت است [۷].



منظور دستیابی به یک صافی سطح و تراکم مناسب و همچنین دقیق قطعه پرینت شده بسیار مهم است، در این تحقیق از رابطه دینگر فانک^۱ برای بهینه سازی دانه بندی ذرات پودر نهایی استفاده شد.

۴-۲- پرینت قطعه

برای پرینت قطعه از یک مدل سه بعدی شش ضلعی در یک دستگاه بایندر جت ساخت ایران استفاده شد. حلال مورد استفاده در دستگاه نیز یک حلال پایه آبی بوده که از طریق نازل دستگاه بر روی بستر پودر به منظور ساخت لایه ها استفاده شد. از آنجایی که روش پرینت این قطعه به نفع حضور پلیمرها در قطعه نهایی، روش دما پایین [۲] بود نیاز به عملیات پخت وجود نداشت.

۵-۲- میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

برای مشاهده ریزساختار قطعه کلسیم فسفاتی پرینت شده، از میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل TESCAN استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

در شکل ۱ نمودار FTIR مربوط به سنتز کربوکسی متیل کیتوسان نشان داده شده است. یک ظاهر شده در عدد موجی 1612 cm^{-1} متعلق به تغییر شکل متقارن گروه کربوکسیلیک اسید (-COO-) بوده و دلیل ایجاد آن تبدیل گروه COOH - به نمک کربوکسیلیک اسید (-COONa) در نتیجه تغییر مکان پیک است. علت ظهور پیک موجود

۲- فعالیت های تجربی

۱-۲- مواد اولیه و آماده سازی بستر پودر

پودر هیدروکسی آپاتیت با فرمول $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ و میانگین اندازه ذرات $20-2\text{ }\mu\text{m}$ از شرکت Merck کیتوسان با وزن مولکولی متوسط از شرکت Sigma Aldrich، پلی وینیل پیرولیدون (PVP) از شرکت ره آورد تامین و دکسترن نیز از شرکت کیمیا بن فوزان خریداری شد. کربوکسی متیل کیتوسان طبق روش ارائه شده توسط Lu et al سنتز شد [۱۰]. پودر هیدروکسی آپاتیت به میزان ۶۰ درصد وزنی و بایندر مورد استفاده ترکیبی از کربوکسی متیل کیتوسان، دکسترن و پلی وینیل پیرولیدون به میزان ۴۰ درصد وزنی استفاده شد و از روش پوشش دهی ذرات پودر هیدروکسی آپاتیت توسط بایندر [۱۱] به منظور افزایش استحکام اتصال بهره گرفته شد. بدین صورت که ابتدا ترکیب سه جزئی از پلیمرها در آب مقطر حل و پودر هیدروکسی آپاتیت به آن اضافه شد و یک دوغاب حاصل شد. سپس این دوغاب خشک شد و در نهایت جامد حاصل از آن توسط آسیاب، خرد و دانه بندی شد.

۲-۲- آزمون طیف سنجی مادون قرمز (FTIR)

به منظور اطمینان از سنتز کامل کربوکسی متیل کیتوسان از دستگاه آنالیز طیف سنجی مادون قرمز مدل S ۸۴۰۰ استفاده شد.

۳-۲- مشخصه یابی پودر

برای ارزیابی جریان یابی پودر حاصل، از فاکتور Hausner استفاده شد [۸]. از آنجایی که توزیع اندازه ذرات پودر به

¹ Dinger Funk

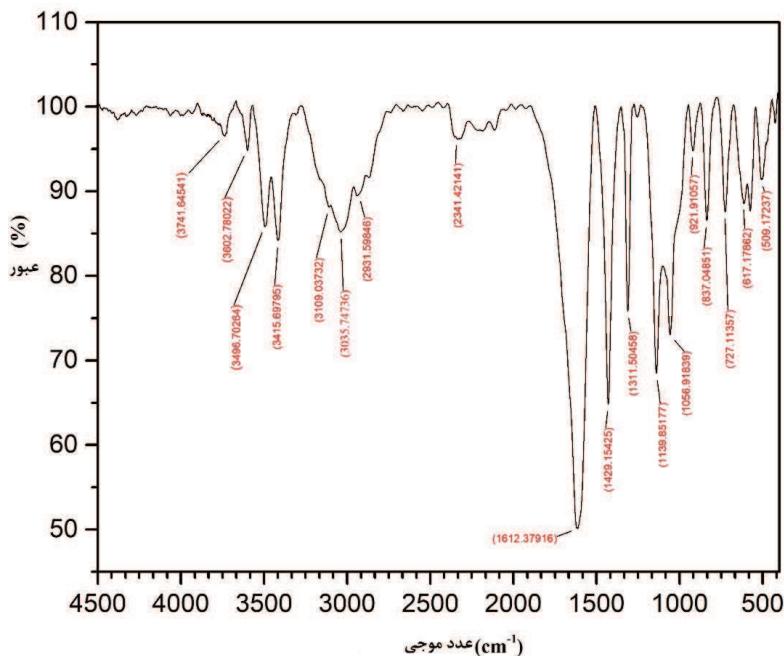


پودر اول به دلیل بزرگتر بودن اندازه ذرات و همچنین عدم وجود توزیع در اندازه ذرات، نسبت به پودر دوم دارای کمترین نرخ هاسنر و در نتیجه بیشترین جریان-یابی است. با کاهش در اندازه ذرات، امکان آگلومره شدن ذرات به دلیل نیروی واندروالس بین آن‌ها وجود داشته و در نتیجه همانطور که در پودر نهایی قابل مشاهده است، نرخ هاسنر افزایش یافته و جریان‌یابی کاهش می‌یابد. در واقع پودرهای با جریان‌یابی بالا، دانسیته ظاهری بیشتری داشته و افزایش در دانسیته آن‌ها پس از tapping، داشته و افزایش در دانسیته آن‌ها پس از tapping، نسبت به پودرهای با جریان‌یابی کمتر، کمتر خواهد بود.

[۱۳]

در عدد موجی 1429 cm^{-1} نیز تغییر شکل نامتناصرن - COO- است.

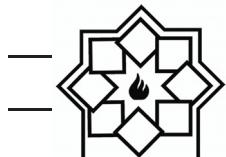
برای ارزیابی جریان‌یابی ذرات پودر در بسته پودر دستگاه از فاکتور نرخ هاسنر استفاده شد. این فاکتور حاصل تقسیم دانسیته ضربه‌ای (Tapping) به دانسیته ظاهری (Apparent) است. افزایش نرخ HR به معنی افزایش نیروی چسبندگی بین ذرات پودر و در نهایت کاهش جریان‌یابی است. بیشترین جریان‌یابی برای نرخ هاسنری معادل با $1/21$ حاصل می‌گردد [۱۲]. جدول ۲ به مقایسه جریان‌یابی و چگالی دو بج پودری اولیه و نهایی که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است، می‌پردازد.



شکل ۱- نمودار FTIR کربوکسی متیل کیتوسان

جدول ۲- مقایسه جریان‌یابی دو بج پودری

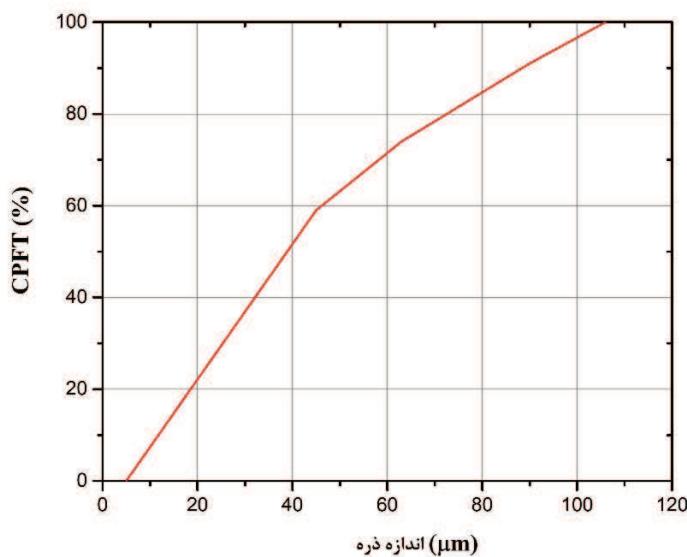
اندازه ذرات	دانسیته ظاهری gr/cm^3	دانسیته ضربه‌ای gr/cm^3	نرخ هاسنر	پودر
$149\text{ }\mu\text{m}$	0.817	0.999	$1/22$	P_1
$106.5\text{ }\mu\text{m}$	0.816	1.191	$1/45$	P_2



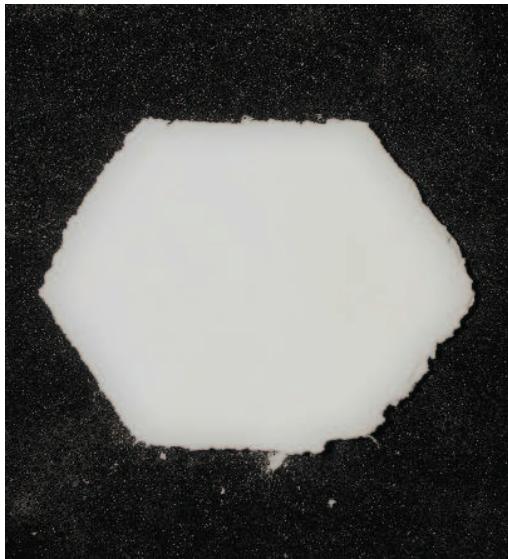
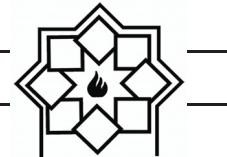
دوم نشان داده شده است. بر اساس این منحنی، ۱۰۰٪ ذرات دارای اندازه‌ی زیر $106 \mu\text{m}$ بوده و هیچ ذره‌ای زیر $5 \mu\text{m}$ وجود ندارد.

شکل ۳ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مقطع قطعه پرینت شده با پودر نهایی را نشان می‌دهد. با توجه به عدم پخت نمونه‌ها به منظور ایجاد یک کامپوزیت سرامیکی-پلیمری، اتصال بین ذرات هیدروکسی آپاتیت پوشش داده شده با ترکیب پلیمری که توسط حلال پایه آبی توزیع شده از نازل دستگاه ایجاد شده است، به خوبی قابل مشاهده است. شکل ۴ تصویر قطعه پرینت شده را نشان می‌دهد. با توجه به این تصویر قطعه از دقت ابعادی مناسبی برخوردار است.

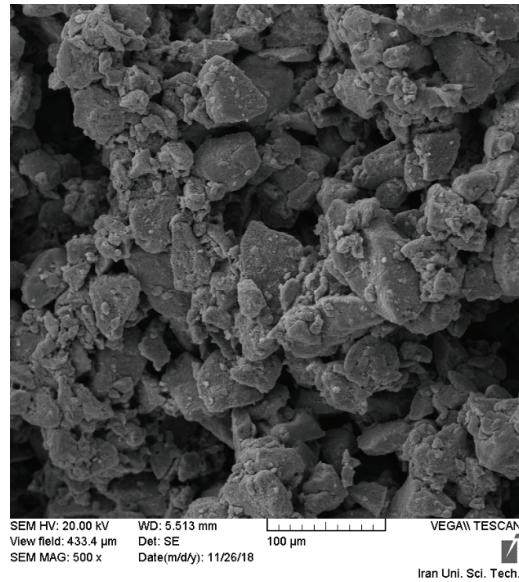
در پودر اول علی رغم جریان یابی بالا، به دلیل عدم توزیع در اندازه ذرات، این پودر قابلیت پرینت پذیری را ندارد. بنابراین برای رسیدن به بیشترین تراکم برای پودر و با استفاده از رابطه دینگر-فانک از توزیع اندازه ذرات به منظور ایجاد یک پودر قابل پرینت بهره گرفته شد [۱۴]. با استفاده از توزیع اندازه ذرات پهن و بهینه شده، ذرات ریزتر در فضای خالی بین ذرات درشت‌تر قرار گرفته و بدین ترتیب دانسیته لایه‌های پودری به هنگام پرینت افزایش یافته و جریان یابی در مقایسه با ذرات بزرگ‌تر کاهش می‌یابد [۱۵]. در شکل ۲ منحنی درصد تجمعی ذرات ریزتر از بزرگ‌ترین اندازه ذره (CPFT)، بر اساس رابطه‌ی دینگر-فانک برای پودر



شکل ۲- منحنی CPFT برای پودر دارای توزیع اندازه ذرات



شکل ۴- تصویر قطعه پرینت شده با فرآیند بایندر جت



شکل ۳- تصویر SEM از سطح مقطع قطعه پرینت شده

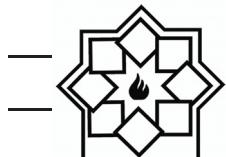
پودر، کاهش می‌یابد. بهینه سازی هر دو پارامتر جریان‌یابی و تراکم لایه‌ی پودری و ایجاد یک تعادل بین آن‌ها در این فرآیند، از اهداف این پژوهش بوده است.

مراجع

- [1] TURNBULL, G., CLARKE, J., PICARD, F., RICHES, P., JIA, L., HAN, F., LI, B. & SHU, W. J. B. M. 2017. 3D bioactive composite scaffolds for bone tissue engineering.
- [2] INZANA, J. A., OLVERA, D., FULLER, S. M., KELLY, J. P., GRAEVE, O. A., SCHWARZ, E. M., KATES, S. L. & AWAD, H. A. J. B. 2014. 3D printing of composite calcium phosphate and collagen scaffolds for bone regeneration. *35*, 4026-4034.
- [3] PIGHINELLI, L. & KUCHARSKA, M. J. C. P. 2013. Chitosan-hydroxyapatite composites. *93*, 256-262.
- [4] UPADHYAYA, L., SINGH, J., AGARWAL, V., TEWARI, R. P. J. C. P. 2013. Biomedical applications of

۴- نتیجه‌گیری

در فرآیند بایندر جت، به منظور دست‌یابی به یک پودر قابل پرینت، اندازه ذرات از پارامترهای بسیار مهم است. جریان‌یابی با افزایش اندازه ذرات، افزایش و با کاهش اندازه ذرات، کاهش می‌یابد. به دلیل توزیع پودر توسط غلتک در این فرآیند، جریان‌یابی مناسب ذرات از اهمیت زیادی برخوردار است. با افزایش جریان‌یابی، نرخ هاسنر کاهش می‌یابد. در این پژوهش برای پرینت یک قطعه هیدروکسی‌آپاتیتی با فرآیند بایندر جت، پلیمر مورد استفاده به عنوان بایندر، روی ذرات پودر هیدروکسی‌آپاتیت پوشش داده شد و از پودری با توزیع اندازه ذرات پهن استفاده و مقدار بهینه برای اندازه‌ی ذرات به دست آمد. با استفاده از توزیع اندازه ذرات در مقایسه با ذراتی با اندازه منفرد، چگالی ضربه‌ای افزایش و در نهایت نرخ هاسنر افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر در این شرایط، جریان‌یابی به نفع افزایش تراکم ذرات



2013. A comparative analysis of the flow properties between two alumina-based dry powders. 2013.
- [12] ZOCCA, A., GOMES, C. M., MÜHLER, T. & GÜNSTER, J. J. A. I. M. E. 2014. Powder-bed stabilization for powder-based additive manufacturing. 6, 491581.
- [13] BREWE, J. E. PARTICLE SIZE OPTIMIZATION FOR REDUCED CEMENT HIGH STRENGTH CONCRETE.
- [14] SILVA, A. P., PINTO, D. G., SEGADÃES, A. M. & DEVEZAS, T. C. J. J. O. T. E. C. S. 2010. Designing particle sizing and packing for flowability and sintered mechanical strength. 30, 2955-2962.
- [5] FARZADI, A., WARAN, V., SOLATI-HASHJIN, M., RAHMAN, Z. A. A., ASADI, M. & OSMAN, N. A. A. J. C. I. 2015. Effect of layer printing delay on mechanical properties and dimensional accuracy of 3D printed porous prototypes in bone tissue engineering. 41, 8320-8330.
- [6] BUTSCHER, A., BOHNER, M., ROTH, C., ERNSTBERGER, A., HEUBERGER, R., DOEBELIN, N., VON ROHR, P. R. & MÜLLER, R. J. A. B. 2012. Printability of calcium phosphate powders for three-dimensional printing of tissue engineering scaffolds. 8, 373-385.
- [7] LU, K., HISER, M. & WU, W. J. P. T. 2009. Effect of particle size on three dimensional printed mesh structures. 192, 178-183.
- [8] BAI, Y., WAGNER, G., WILLIAMS, C. B. J. J. O. M. S. & ENGINEERING 2017. Effect of particle size distribution on powder packing and sintering in binder jetting additive manufacturing of metals. 139, 081019.
- [9] TROMBETTA, R., INZANA, J. A., SCHWARZ, E. M., KATES, S. L. & AWAD, H. A. J. A. O. B. E. 2017. 3D printing of calcium phosphate ceramics for bone tissue engineering and drug delivery. 45, 23-44.
- [10] LUO, Y., TENG, Z., WANG, X. & WANG, Q. J. F. H. 2013. Development of carboxymethyl chitosan hydrogel beads in alcohol-aqueous binary solvent for nutrient delivery applications. 31, 332-339.
- [11] DU, W., REN, X., MA, C. & PEI, Z. Binder Jetting Additive Manufacturing of Ceramics: A Literature Review. ASME 2017 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2017. American Society of Mechanical Engineers, V014T07A006-V014T07A006.
- [11] DE CAMPOS, M. M., FERREIRA, M. D. C. J. A. I. M. S. & ENGINEERING