

Experimental Research on The Impact of Oxygen Control Zone Thickness on Continuous Layerless Printing of Porous Polymer Parts

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Salehi M¹,
Manizani S M¹,
Shayesteh M¹,
Manzour A¹,
Zamani J^{1*}

How to cite this article

Salehi M, Manizani S M, Shayesteh M, Manzour A, Zamani J. Experimental Research on The Impact of Oxygen Control Zone Thickness on Continuous Layerless Printing of Porous Polymer Parts. Modares Mechanical Engineering. 2023; 23 (03):151-159.

¹ Faulty of Mechanical Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

*Correspondence

Address No. 1346, ValiAsr Street, Mirdamad cross, Faulty of Mechanical Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran
zamani@kntu.ac.ir

Article History

Received: July 30, 2022

Accepted: November 06, 2022

ePublished: March 15, 2023

ABSTRACT

The additive manufacturing system using the continuous liquid interface production (CLIP) method, which was designed and constructed by the researchers of this article, was utilized in this research to examine the impacts of the oxygen control area's thickness on the speed of producing parts. The main goal of this research is to produce porous parts 10 times faster compared to the digital light processing (DLP) method. However, it's crucial to look at the printing height, the part failure rate, as well as the part curing depth in order to achieve this speed increase. One of the most crucial factors affecting the aforementioned circumstances is undoubtedly the oxygen control zone. Therefore, two window-shaped (island and microchannel) special gas-permeable membranes were utilized as the bed of the liquid resin container to generate this zone. Furthermore, employing each of the aforementioned windows, parts with a porous and complex structure were manufactured and evaluated. The usage of an island-like container increased the duration of continuous printing by 107% before the separation force begins, reduced maximum separation force by 4.7 times, and increased the height of the printed component by 30%, according to the study's findings. It also improved the part's visual quality.

Keywords Additive Manufacturing, Photopolymerization, Continuous Liquid Interface Production, Oxygen Control Zone, Continuous Printing, Layerless

CITATION LINKS

1- Effect of constrained surface texturing on separation force in projection stereolithography 2- 3D printed microneedle patches using stereolithography (SLA) for intradermal insulin delivery 3- 3D bioprinting for biomedical devices and tissue engineering 4- inexpensive 3D printing of the brain and skull 5- Novel ex vivo model for hands-on teaching of and training in EUS-guided biliary drainage 6- Design and optimization of a light-emitting diode projection micro-stereolithography three-dimensional manufacturing system 7- A review of vat photopolymerization technology 8- Additive fabrication of 3d structures by holographic lithography 9- A. Study of separation force in constrained surface projection stereolithography 10- Layerless fabrication with continuous liquid interface production 11- High-speed 3D printing of high-performance thermosetting polymers via two-stage curing 12- Reprocessable thermosets for sustainable three-dimensional printing. Nature communications 13- Continuous liquid interface production of 3D objects 14- Constrained window design in projection stereolithography for continuous three-dimensional printing 15- Textured window design for continuous projection stereolithography process. Manufacturing Letters 16- A fast mask projection stereolithography process for fabricating digital models in minutes. Journal of Manufacturing Science and Engineering 17- Sources and measurement of ultraviolet radiation. Methods

بررسی تجربی تأثیر ضخامت ناحیه کنترل اکسیژن در چاپ پیوسته بدون لایه قطعات متخلخل پلیمری

محمد صالحی^۱، سیاوش مؤیدی مانیزانی^۱، محمد شایسته^۱، امیر منظور^۱، جمال زمانی آشنی^{۱*}

^۱ گروه ساخت و تولید - دانشکده مکانیک - دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی - تهران - ایران

چکیده

در این پژوهش به منظور بررسی تأثیر ناحیه کنترل اکسیژن بر سرعت ساخت قطعات، از سامانه ساخت افزایشی به روش تولید پیوسته مایع واسط (CLIP) که توسط محققین همین مقاله طراحی و ساخته شده است، استفاده گردید. هدف اصلی مقاله افزایش سرعت ساخت قطعات متخلخل با ۱۰ برابر سرعت بیشتر نسبت به روش پردازش دیجیتال نوری (DLP) است. اما برای دستیابی به این سرعت، بررسی میزان ارتفاع چاپ، میزان خرابی قطعه، و عمق پخت قطعه بسیار حائز اهمیت است. قطعاً ناحیه کنترل اکسیژن به عنوان یکی از مهم ترین پارامترهای تأثیرگذار بر موارد مذکور خواهد بود. بنابراین به منظور ایجاد و کنترل حجم ناحیه در بردارنده اکسیژن، از غشاهای خاص نفوذپذیر گازها در دو حالت پنجره‌ای شکل (جزیره‌ای و میکرو کانال)، به عنوان بستر ظرف رزین مایع استفاده گردید. سپس قطعاتی با ساختار متخلخل و پیچیده با استفاده از هرکدام از پنجره‌های فوق، با روش تولید پیوسته مایع واسط ساخته و مورد ارزیابی قرار گرفت. بر طبق یافته‌های این پژوهش استفاده از ظرف جزیره‌ای نسبت به ظرف میکرو کانال، علاوه بر بهبود کیفیت ظاهری قطعه، منجر به افزایش ۱۰۷٪ مدت زمان قابلیت چاپ پیوسته پیش از شروع نیروی جدایش، کاهش ۴/۷٪ برابری بیشینه نیروی جدایش و افزایش ۳۰٪ در ارتفاع قطعه چاپ شده گردید.

کلیدواژه‌ها: ساخت افزایشی، فتوپلیمریزاسیون، تولید پیوسته مایع واسط، ناحیه کنترل اکسیژن، چاپ پیوسته، بدون لایه

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۱۵

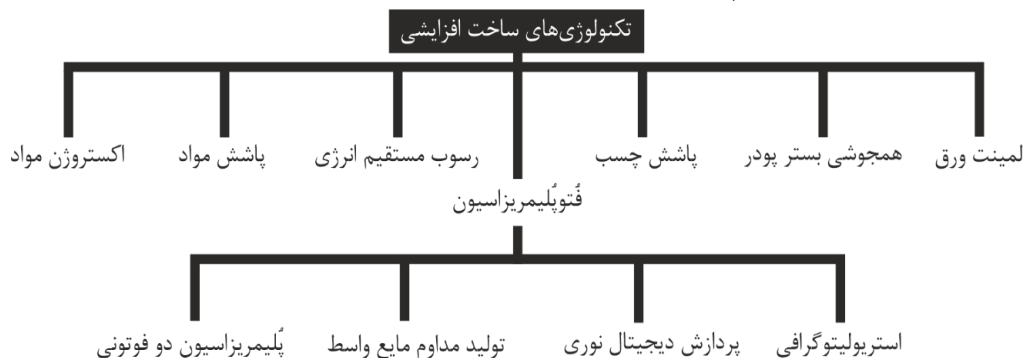
* نویسنده مسئول: zamani@kntu.ac.ir

۱- مقدمه

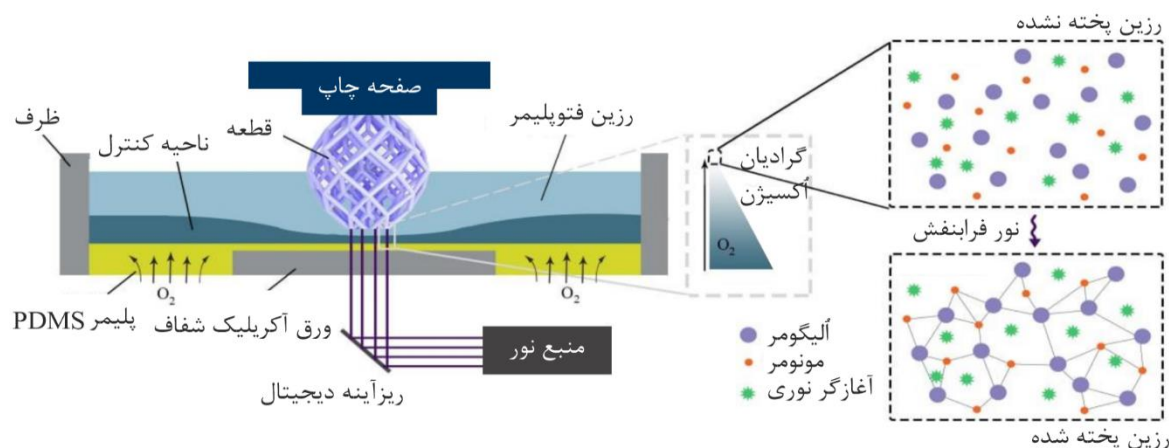
ساخت افزایشی به عنوان یکی از فرایندهای نوین تولید قطعات در سال‌های اخیر پیشرفت شایانی داشته است. یکی از شاخه‌های کاربردی این فرایند، تولید قطعات پلیمری به روش

فتوپلیمریزاسیون (Photopolymerization) است. شاخه فتوپلیمریزاسیون را می‌توان به صورت کلی به دو مکانیسم بالا به پایین و پایین به بالا تقسیم‌بندی نمود. تفاوت دو روش مذکور آن است که در مکانیسم پایین به بالا، ظرف رزین در بالای منبع نوری قرار گرفته و لایه‌های ساخته شده به طرف بالا حرکت می‌نماید و در مکانیسم بالا به پایین منبع نوری در بالای ظرف رزین بوده و لایه‌های ایجاد شده به طرف پایین حرکت می‌نمایند. که روش پایین به بالا دارای مزایایی نظیر صرفه جویی در مواد و کیفیت سطح بالا است.^[1] استریولیتوگرافی (SLA)، پردازش دیجیتال نوری (DLP)، پلیمریزاسیون دوفوتونی (2PP) و تولید پیوسته مایع واسط (CLIP) چهار نوع متفاوت فتوپلیمریزاسیون بشمار می‌روند. از قطعات ساخته شده توسط سامانه‌ای متکی بر به کارگیری فتوپلیمریزاسیون، می‌توان به میکروسوزن‌ها برای تزریق دارو، بافت سلولی، ساخت مدل اولیه از تصویربرداری پزشکی، ساخت حس گرها و میکرو ربات‌ها اشاره داشت.^[2,6]

روش‌های اولیه استریولیتوگرافی و پردازش دیجیتال نوری همواره با نقاط ضعفی روبه‌رو بوده‌اند که از مهم ترین آن‌ها می‌توان به مواردی همچون: سرعت بسیار پایین چاپ در روش نقطه‌ای یا لایه‌ای و ساختارهای غیر همسانگرد قطعات نهایی اشاره نمود.^[8,10] در روش‌های فتوپلیمریزاسیون، پرتو نور فرابنفش با طول موج (۳۵۵-۴۱۰ نانومتر) در واکنش با رزین فتوپلیمر باعث ایجاد پیوند کووالانسی بین مولکول‌های رزین می‌شود. رزین‌های فتوپلیمر با فرمولاسیون‌های آکریلات و به ندرت متاکریلات شامل سه بخش مونومر، الیگومر و آغازگر نوری می‌باشند. پس از برخورد نور فرابنفش به رزین فتوپلیمر، مولکول‌های آغازگر نوری (Photoinitiator) موجود در رزین فعال شده و شرایط برای رشد زنجیره‌ای مونومرها و الیگومرهای رزین فراهم می‌گردد.^[11,12] روش‌های اولیه فتوپلیمریزاسیون دارای سرعت بسیار کمی می‌باشند و این سرعت پایین متأثر از لزوم جدایش لایه ایجاد شده از کف ظرف حاوی رزین است. لذا جهت افزایش سرعت ایجاد لایه‌ها، کاهش نیروی جدایش امر اجتناب‌ناپذیری است.



شکل (۱) چارت کلی فرایندهای ساخت افزایشی و معرفی شاخه فتوپلیمریزاسیون.^[7]



شکل ۲) نمایی از سامانه ساخت افزایشی به روش تولید پیوسته مایع واسط، نحوه توزیع اکسیژن به صورت گرادیان از پایین به بالا و پخت هر لایه توسط فرایند پلیمریزاسیون.

همچنین عبور گاز اکسیژن از یک سوی غشاء به سوی دیگر آن که حاوی رزین است، منجر به ایجاد ناحیه کنترل اکسیژن می‌شود. که این امر البته به علت بهره‌گیری از اکسیژن منجر به بازدارندگی و کاهش فرایند پلیمریزاسیون رزین مایع می‌گردد (شکل ۲).

۲- راه‌حل پیشنهادی این مقاله جهت ایجاد ناحیه کنترل اکسیژن (Dead Zone)

در این مقاله پنجره‌هایی از جنس PDMS با نفوذپذیری (۳۰۰ ~ - باررز) در دو ظرف جزیره‌ای و میکرو کانال پیشنهاد داده شده است^[14,15]. یکی از پارامترهای مؤثر بر روی ضخامت لایه کنترل اکسیژن، طراحی بستر ظرف رزین جهت ریخته‌گری PDMS است. اصطلاحات "جزیره‌ای" و "میکرو کانال" هریک طراحی مخصوصی از این بستر جهت ایجاد فضای عبور اکسیژن می‌باشند. همچنین میزان ضخامت لایه کنترل اکسیژن برای حالتی با بستر نفوذناپذیر از جنس PDMS، مقدار 2/5 میکرون گزارش شده است که با این ضخامت امکان چاپ پیوسته قطعات پلیمری وجود ندارد^[16].

به منظور افزایش ضخامت لایه مهار اکسیژن و کنترل این ناحیه پارامترهایی همچون ضریب جذب، شدت روشنایی و غلظت پخت رزین از اهمیت بالایی برخوردار هستند. به واسطه تغییر ضخامت ناحیه کنترل اکسیژن، میزان ارتفاع چاپ متغیر است^[13]. بر این اساس در یک رزین معین با شدت روشنایی ثابت و تغییر زمان تابش، میزان عمق پخت متفاوت است. بنابراین نمودار عمق پخت بر حسب شدت روشنایی و انرژی تولید شده واحد نوری، با توجه به فرمول (۱) که در آن T زمان تابش، I شدت نور فرابنفش و E میزان انرژی بر واحد سطح است، محاسبه می‌گردد^[17].

$$T = \frac{E}{I} \quad (1)$$

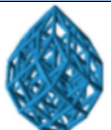
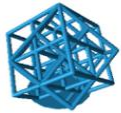
افزایش میزان انرژی نور فرابنفش، باعث افزایش غیرخطی میزان ضخامت پخت هر لایه در رزین می‌شود. بنابراین میزان سرعت چاپ در هر رزین مایع، از طریق بررسی نمودار عمق پخت رزین

یکی از روش‌های پیشنهادی کاهش نیروی چسبندگی بین لایه ایجاد شده و کف ظرف، وجود یک لایه واسط با ضخامت بسیار نازک از سیال رزینی است که به نور فرابنفش حساس نبوده و در طول فرایند ساخت قطعه به صورت سیال باقی بماند (شکل ۲). با ترکیب اکسیژن و آغازگر نوری فعال در رزین، لایه نازک خنثی‌ای به صورت سیال باقی می‌ماند که باعث از بین رفتن نیروی چسبندگی بین دو سطح می‌شود. بنابراین اکسیژن به عنوان یک عنصر بازدارنده پلیمریزاسیون شناخته می‌شود، به طوری که در روش تولید پیوسته مایع واسط، با بهره‌گیری از پنجره نفوذپذیر گاز اکسیژن باعث ایجاد لایه‌ای نازک تحت عنوان "ناحیه کنترل اکسیژن" (Deadzone) می‌شود^[13].

در این ناحیه مطابق شکل ۲، اکسیژن به صورت گرادیان باعث ایجاد ناحیه بازدارنده حداکثری در قسمت پایین گردیده که با فاصله گرفتن از پنجره نفوذپذیر مقدار بازدارندگی کاهش می‌یابد. به همین دلیل مکانیسم حرکتی رفت و برگشتی، تبدیل به حرکت پیوسته در راستای محور عمودی گردیده که سرعت بالاتر با ساختار بدون لایه را به همراه دارد. یکی از مهم‌ترین قسمت‌های این سامانه، پنجره نفوذپذیر گاز اکسیژن است. پنجره نفوذپذیر گاز اکسیژن در بستر ظرف، متشکل از پلیمر شفاف با قابلیت عبور گاز اکسیژن است. که وظیفه این بستر پلیمری عبور گاز اکسیژن و جلوگیری از انجام فرایند پلیمریزاسیون است. تفلون AF2400 به عنوان یکی از بهترین غشاءهای نفوذپذیر اکسیژن به دلیل نفوذپذیری بالا (۱۰۰۰ باررز) شناخته شده است^[13] اما به دلیل انحصار تولید، هزینه بالا و دسترسی دشوار، امکان استفاده از این غشاء مقدور نیست.

حال برای ساخت قطعات به صورت یکپارچه، باید از تماس بخش پلیمریزه شده با بستر ظرف جلوگیری کرد. بنابراین، ایجاد یک فناوری متشکل از یک نوع غشاء خاص از جنس پلی‌دی‌متیل-سیلوکسان (PDMS) که در انتهای محفظه رزین قرار دارد و

جدول ۱) کدگذاری قطعات طراحی شده در نرم افزار مدل سازی جهت چاپ

قطعه	تصاویر قطعات	ارتفاع قطعه (mm)	مساحت سطح مقطع (mm ²)
U1		۳۰	متغیر
U2		۴۰	متغیر

۴-۱- ظرف و رزین

در این پژوهش از دو نوع ظرف نفوذپذیر گاز اکسیژن جزیره‌ای و میکرو کانال و یک ظرف غیرقابل نفوذ استفاده شده است. ظروف پیشنهادی متشکل از ورق آکرلیک (PMMA) و ریخته‌گری PDMS بوده که ورق آکرلیک با میکروماشینکاری توسط لیزر ساخته می‌شود. میزان ضخامت پیشنهادی ورق آکرلیک برای ظرف جزیره‌ای و میکرو کانال به ترتیب ۵ و ۱ میلی‌متر است. جهت پوشش دهی PDMS بر روی ورق آکرلیک نسبت ترکیب ماده پایه و عامل پخت با نسبت وزنی ۱۰:۱ است. در پایان جهت کاهش حباب و حفره‌های موجود در سیلیکون PDMS حباب زدایی انجام می‌پذیرد. ضخامت PDMS پوشش دهی شده بر روی ورق در هر دو نوع ظرف ۱/۵ تا ۱ میلی‌متر طراحی و ساخته شد. در شکل ۳ ابعاد ظرف جزیره‌ای و میکرو کانال پیشنهاد داده شده قابل مشاهده است. برای ایجاد ناحیه کنترل، گرادیان اکسیژن مورد نیاز توسط مولکول‌های اکسیژن موجود در هوای زیر ظرف، تغذیه می‌گردد. به منظور بررسی ضخامت ناحیه کنترل اکسیژن به وجود آمده توسط هر یک از این ظروف، از روش تفاضلی (Differential) استفاده شده است. در این پژوهش از یک ورق آلومینیومی نعلی شکل به ضخامت ۱۵۰ میکرون جهت ایجاد یک فاصله معین و اندازه‌گیری ضخامت ناحیه کنترل اکسیژن از تفاضل اندازه لایه پخته شده و ضخامت ورق بهره گرفته شده است. بر اساس روش تفاضلی، ضخامت ناحیه کنترل اکسیژن برای ظرف میکرو کانال (< ۷۵ میکرون) و برای ظرف جزیره‌ای (< ۲۰۰ میکرون) برآورد شده است. رزین ترموست اینکیوبیک خاکستری به عنوان رزین حساس به نور با طول موج پخت ۴۰۵ نانومتر، ویسکوزیته ۵۵۲ مگاپاسکال ثانیه، چگالی ۱/۱ در حالت مایع و ۱/۱۸۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب در حالت جامد، استحکام کششی ۲۳/۴ مگاپاسکال و با درازش ۱۴٪ در نقطه شکست استفاده گردیده است.

۴-۲- آپتیک و نوری

تصاویر دوبعدی از یک منبع نور پروژکتور اصلاح شده با تفکیک پذیری ۸۶۷ × ۱۰۲۴ پخش می‌شود. با برخورد نور از منبع لامپ متال هالید به میکرو آینه‌های دیجیتالی، تصاویر هر برش نرم افزار با تعدادی پیکسل مشاهده می‌گردد. میکرو آینه‌های دیجیتالی بر

تعیین می‌گردد. به طوری که با افزایش ضخامت عمق پخت هر لایه، سرعت چاپ در میزان انرژی بر واحد سطح ثابت، افزایش می‌یابد. بر این اساس، طبق رابطه‌های میزان ضخامت پخت هر لایه و میزان ضخامت ناحیه کنترل اکسیژن^[۱۳] پارامترهایی همچون ضریب جذب آغازگر نوری، میزان شدت نور، غلظت پخت رزین در سرعت چاپ مؤثر هستند. بنابراین در روش تولید پیوسته مایع واسط میزان سرعت چاپ از پارامترهای رزین قابل محاسبه است.

$$(۲) \quad \text{سرعت} \propto \frac{I \alpha_{PI}}{D_{C0}}$$

در رابطه فوق I شدت نور فرابنفش، α_{PI} ضریب جذب آغازگر نوری و D_{C0} غلظت انعقاد رزین بی‌رنگ هستند^[۱۳] به منظور بررسی تأثیر میزان ضخامت ناحیه کنترل اکسیژن بر ارتفاع چاپ و سرعت چاپ، آزمایش‌هایی توسط سامانه طراحی و ساخته شده محققین این مقاله صورت گرفته است.

۳- معرفی سامانه طراحی و ساخته شده

سامانه مورد استفاده در این آزمایش، سامانه چاپ سه‌بعدی به روش تولید پیوسته مایع واسط است که از این پس به نام سامانه آلترا نامیده می‌شود، ساخته شده در آزمایشگاه این دانشگاه است. این سامانه ساخت افزایشی با فناوری فتوپلیمریزاسیون قابلیت چاپ قطعات پلیمری با حداکثر ابعاد ۸۰ × ۶۵ × ۴۵ میلی‌متر مکعب را دارا است. از بخش‌های اصلی فرآیند فتوپلیمریزاسیون در روش تولید پیوسته واسط می‌توان به منبع نور فرابنفش، رزین فتوپلیمر، سیستم کنترل، ظرف رزین و پنجره نفوذپذیر اشاره نمود. در روش‌های ساخت افزایشی بدون لایه همچون روش تولید پیوسته مایع واسط برای حرکت صفحه چاپ، سیستم کنترلی و یکنواختی استفاده شده است. که با استفاده از نرم افزارهای برشگر (Slicer) مدل‌های طراحی شده در نرم افزارهای CAD با فرمت STL به صورت تصاویر دوبعدی با جی‌کد به بخش نوری سیستم انتقال داده شده و این تصاویر به صورت نور فرابنفش با طول موج ۳۶۵-۴۳۵ نانومتر، پس از تماس با رزین حساس به نور، باعث ایجاد پیوند شیمیایی بین مونومرهای رزین و پخت در فاصله بین صفحه چاپ و بستر ظرف می‌شود. تصاویر دوبعدی ساخته شده توسط نرم افزار برشگر به صورت پیوسته به رزین تابیده شده که سرعت چاپ سیستم و کیفیت سطح قطعات به این تعداد تصاویر دوبعدی گرفته شده، بستگی دارد.

۴- معرفی مواد و تجهیزات بکار گرفته شده

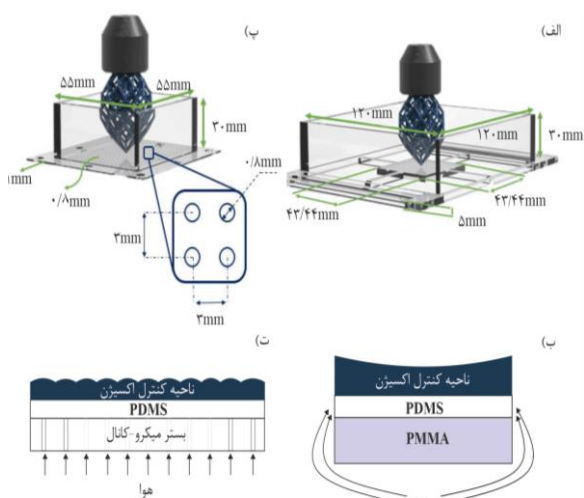
در این پژوهش از دو قطعه پیچیده متخلخل جهت استفاده در آزمایش‌های بخش ۵ استفاده می‌گردد. بر طبق جدول، ارتفاع مطلوب چاپ ۳۰ میلی‌متر برای قطعه U1 و ۴۰ میلی‌متر برای قطعه U2 توسط نرم افزار مدل سازی CAD طراحی شده است.

بسترهای نفوذناپذیر، میکرو کانال و جزیره‌ای مطالعه گردید. همچنین مقادیر سرعت چاپ و ضخامت ناحیه کنترل اکسیژن برای دو پنجره میکرو کانال و جزیره‌ای مطابق **Error! Reference source not found.** در نتیجه، از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر ضخامت ناحیه کنترل می‌توان به مواردی همچون شدت نور فرابنفش، قابلیت نفوذ ظرف و ضریب جذب آغازگر نوری اشاره نمود.

جدول (۳) پارامترهای چاپ در پنجره‌های بکار برده شده

نوع پنجره	ضخامت PDMS (mm)	ضخامت ناحیه کنترل اکسیژن (μm)	سرعت چاپ پیوسته (mm/h)
پنجره نفوذناپذیر	۲	۲/۵	-
پنجره میکرو کانال	۱/۵ - ۱/۲	۷۵	۱۰۰
پنجره جزیره‌ای	۱/۵ - ۱/۲	۳۵۰	۱۰۰

در شکل ۳-الف، پنجره نفوذپذیر جزیره‌ای به ابعاد چاپ ۴۴/۴۳ میلی‌متر مربع و در شکل ۳-ب، پنجره میکرو کانال که از تعداد زیادی میکرو سوراخ با قطر ۰/۸ میلی‌متر و فاصله ۳ میلی‌متر از هم تشکیل شده‌اند، قابل مشاهده است. بر طبق شکل ۳-ب و شکل ۳-ت، نحوه توزیع و عبور گاز اکسیژن در دو پنجره میکرو کانال و جزیره‌ای از یکدیگر متفاوت است. به طوریکه در پنجره میکرو کانال ضخامت ناحیه کنترل اکسیژن در نواحی نزدیک به دیواره‌های میکرو کانال کاهش می‌یابد. همین کاهش ضخامت ناحیه کنترل اکسیژن در پنجره جزیره‌ای، در وسط پنجره (جزیره) قابل مشاهده است. بنابراین، ساختار هندسی بستر پنجره نفوذپذیر، تأثیر مستقیمی بر میزان توزیع ضخامت ناحیه کنترل اکسیژن نیز دارد. در صورت کاهش ضخامت ناحیه کنترل در این نواحی، چسبندگی مشاهده خواهد شد.



شکل (۳) نمایی گرافیکی از دو طرف استفاده‌شده و شمای ناحیه کنترل اکسیژن هر یک. الف و ب: طرف جزیره‌ای، پ و ت: طرف میکرو کانال.

روی سیستم تعلیق میکروسکوپی قرار دارند که با تغییر زاویه هر میکرو آینه، تصاویر متفاوتی پخش می‌شود. در این پژوهش منبع نور پروژکتور به صورت مستقیم به بستر ظرف تابیده شده است. میزان شدت نور فرابنفش در این سامانه در بازه ۸-۰/۱۵ میلی وات بر سانتی‌متر مربع قابل کنترل است. به همین منظور از جاذب‌های نور فرابنفش برای کنترل ناحیه پخت و افزایش دقت قطعات استفاده شده است. این جاذب‌ها هم توسط همین گروه تحقیقاتی از جنس فیلم‌های پلی‌استری طراحی و ساخته شده است.

۵- روش انجام آزمایش و نتایج

۵-۱- آزمایش مرتبط با عمق پخت رزین

رزین حساس به نور یکی از پارامترهای تأثیرگذار در فرایند تولید پیوسته مایع واسط است. با توجه به اینکه نوع رزین بر سرعت چاپ تأثیر مستقیم دارد، در این پژوهش، عمق پخت رزین بر حسب انرژی و مدت زمان تابش نور برای رزین ذکر شده مطابق جدول بدست آمده است.

به منظور تهیه نمودار عمق پخت رزین، مقطعی دایروی به قطر ۲۰ میلی‌متر توسط واحد نوری در توالی‌های مختلف زمانی (زمان تابش) به زیر ظرف تابیده شده و ضخامت قطعات منعقد شده پیش از نابودی ناحیه کنترل اکسیژن اندازه‌گیری می‌شود. جدول نشان‌دهنده ضخامت قطعات در زمان‌های تابش متفاوت، برای شدت نور ۰/۹۸ میلی وات بر سانتی‌متر مربع و با استفاده از رزین اینکیوبیک خاکستری در دمای اتاق است

جدول (۲) جدول عمق پخت رزین، بر حسب انرژی و زمان تابش

عمق پخت (mm)	زمان تابش (s)	انرژی (mJ/cm ²)
۰/۵۴	۲۵	۲۴/۵
۰/۴۷	۲۰	۱۹/۶
۰/۴۰	۱۵	۱۴/۷
۰/۳۱	۱۰	۹/۸
۰/۲۷	۸	۷/۸۴
۰/۲۳	۶	۵/۸۸
۰/۱۷	۴	۳/۹۲
۰/۱۰	۲	۱/۹۶
۰/۰۵	۰/۹	۰/۸۸

۵-۲- آزمایش مرتبط با ضخامت ناحیه کنترل اکسیژن بر روی سرعت چاپ پیوسته

همان‌گونه که اشاره گردید، ضخامت ناحیه کنترل اکسیژن از مهم‌ترین پارامترهای ساخت قطعات در روش تولید پیوسته مایع واسط است. در بین گازهای موجود در هوا، اکسیژن عامل اصلی در تشکیل ناحیه کنترل اکسیژن بشمار می‌رود. قابلیت نفوذ اکسیژن در پنجره‌های از جنس PDMS صرفاً به ساختار هندسی بستر پنجره نفوذپذیر و ضخامت PDMS پوشش‌دهی شده بستگی دارد^[۱۴] بنابراین، به منظور بررسی تأثیر این میزان نفوذ، سه پنجره با

۵-۳- آزمایش مرتبط با ضخامت ناحیه کنترل اکسیژن و میزان ارتفاع چاپ

همان‌طور که اشاره شد، ضخامت ناحیه کنترل اکسیژن مهم‌ترین عامل در چاپ به روش تولید پیوسته مایع واسط است. بهره‌گیری از پنجره نفوذپذیر گاز اکسیژن، سرعت چاپ و شدت نور مناسب منجر به کنترل اکسیژن و ایجاد توازن در ساخت قطعات بدون لایه و با ارتفاع مطلوب می‌گردد. به منظور بررسی تأثیر ناحیه کنترل اکسیژن متأثر از ظروف ذکر شده، قطعه U1 (جدول) در یک رزین ثابت، در دمای اتاق و با سرعت ۱۰۰ میلی‌متر بر ساعت چاپ گردید. طبق داده‌های Error! Reference source not found.، برای یک ق طعه ثابت، پنجره جزیره‌ای قابلیت چاپ تا ارتفاع بیشتری را نشان داده است. میزان ارتفاع چاپ برای قطعه U1 در ظرف میکرو کانال ۲۳ میلی‌متر و در ظرف جزیره‌ای ۳۰ میلی‌متر بدست آمده است. (جدول ۴) ارتفاع چاپ قطعه U1 در پنجره‌های بکار برده شده.

نوع پنجره	ضخامت ناحیه کنترل اکسیژن (μm)	ارتفاع چاپ (mm)
پنجره نفوذناپذیر	۲/۵	-
پنجره میکرو کانال	۷۵	۲۳
پنجره جزیره‌ای	۳۵۰	۳۰

۴-۵- آزمایش مرتبط با نیروی جدایش برخط در قطعه U1

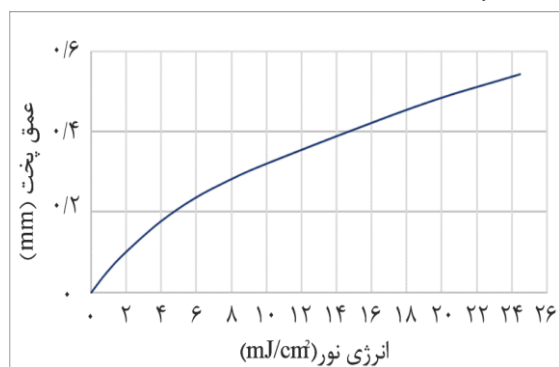
نمودار نیروی جدایش به عنوان تصویر رفتار سیستم در هنگام چاپ هر قطعه در فرایند چاپ پیوسته مایع واسط بسیار حائز اهمیت است. به منظور بررسی این مهم، داده‌های نیروسنج به کاررفته نظیر: زمان شروع نیروی جدایش، بیشینه نیروی جدایش و زمان انجام فرایند به صورت برخط جمع‌آوری گردیده است. مطابق Error! Reference source not found. داده‌های نیروی جدایش ب رای دو ظرف جزیره‌ای و میکرو کانال قابل مشاهده است. بیشینه نیروی جدایش برای پنجره میکرو کانال زمانی که ۱۲ دقیقه و ۸ ثانیه از زمان چاپ گذشته باشد، ۳/۴۵ نیوتون است. این در صورتی است که برای پنجره جزیره‌ای پس از گذشت ۱۸ دقیقه و ۴ ثانیه از چاپ قطعه بیشینه نیروی جدایش ۰/۷۲ نیوتون است.

جدول ۵) نیروی جدایش در پنجره‌های به کاربرده شده.

نوع پنجره	زمان شروع نیروی جدایش (s)	میزان نیروی جدایش اولیه (N)	بیشینه نیروی جدایش (N)	زمان چاپ (s)
پنجره میکرو کانال	۳۲۵	۰/۱۶	۳/۴۵	۷۲۸
پنجره جزیره‌ای	۶۷۲	۰/۱۰	۰/۷۲	۱۰۸۴

۶-۱- بررسی نمودار عمق پخت برحسب انرژی نوری

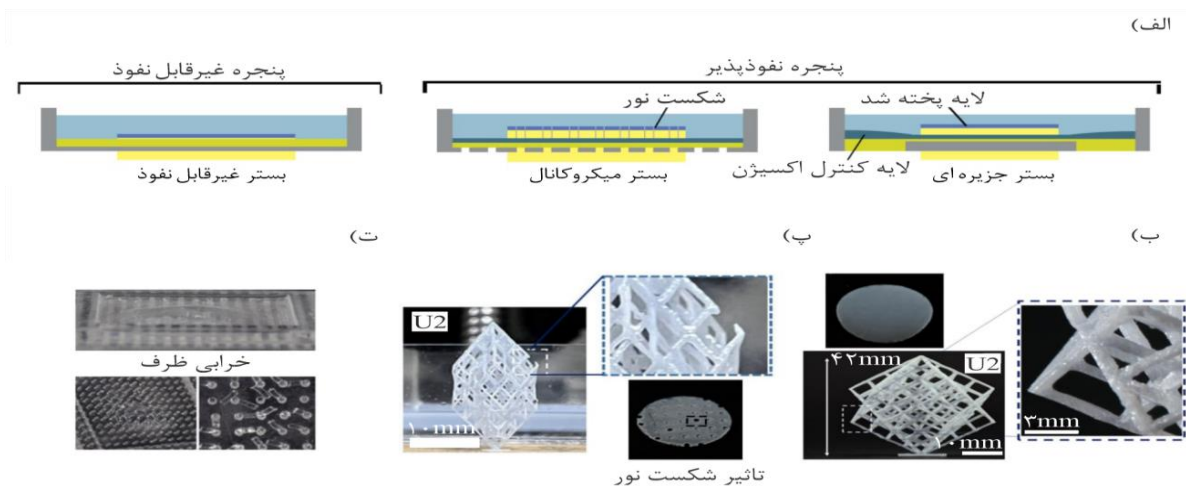
شدت نور و سرعت چاپ دو پارامتر وابسته هستند که با توجه به قابلیت پنجره نفوذپذیر و نوع رزین انتخاب می‌گردد. بر طبق فرمول شماره (۱) سرعت چاپ در روش تولید پیوسته مایع واسط با استفاده از انرژی نور فرابنفش و میزان عمق پخت رزین قابل محاسبه است. بنابراین با توجه به نمودار عمق پخت رزین اینکیوبیک (شکل ۴)، سرعت چاپ قطعات با شدت نورهای دیگر نیز قابل ارزیابی است. بر طبق این نمودار با افزایش انرژی نور، میزان ضخامت پخت لایه تا ارتفاع معینی افزایش یافته است. بر این اساس سرعت چاپ با افزایش انرژی نور، کاهش می‌یابد. بنا بر آزمایش‌های تجربی انجام شده در ساخت قطعات با سامانه آلترا، معلوم گردید که با افزایش شدت نور فرابنفش، فرآیند پلیمریزاسیون در مولکول‌های رزین افزایش یافته و تعداد رادیکال‌های آزاد در ناحیه زیاد می‌شود. بنابراین در ناحیه کنترل اکسیژن با افزایش رادیکال‌های آزاد، از تعداد مولکول‌های اکسیژن این ناحیه کاسته شده که در نتیجه ضخامت این ناحیه کاهش می‌یابد. بنابراین رابطه بسیار نزدیکی بین میزان شدت نور و ضخامت لایه کنترل اکسیژن وجود دارد. از الزامات ساخت قطعه بدون عیب، کنترل بر روی میزان نور ساطع شده در محدوده است. بر طبق نمودار عمق پخت، میزان سرعت چاپ در رزین اینکیوبیک برای شدت نور ۰/۹۸ میلی وات بر سانتی‌متر مربع، حدود ۱۰۰ میلی‌متر بر ساعت محاسبه گردید.



شکل ۴) نمودار عمق پخت رزین اینکیوبیک برحسب انرژی نور.

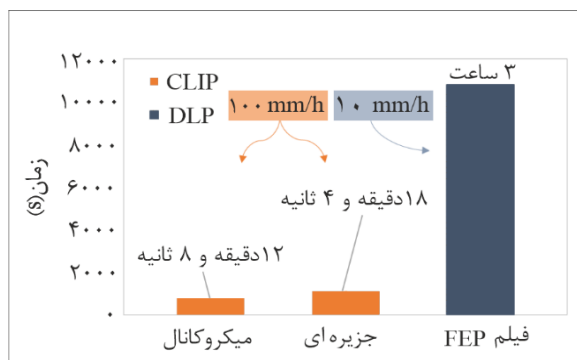
۶-۲- آزمایش مرتبط با خرابی چاپ

با توجه به شکل ۵-الف و ت، به دلیل وجود ضخامت ناحیه کنترل اکسیژن در ظرف نفوذناپذیر، نیروی چسبندگی شدیدی در بستر ظرف ایجاد شده که باعث جدایش لایه PDMS از روی ظرف آکرلیک شده است. در صورتی که این خرابی برای دو ظرف نفوذپذیر به دلیل وجود ناحیه کنترل اکسیژن مطلوب و نیروی چسبندگی ناچیز، به حداقل رسیده است و منجر به ساخت قطعات U2 و U3 می‌گردد. همچنین کیفیت ظاهری بستر دو ظرف میکرو کانال و جزیره‌ای تأثیر مستقیمی بر روی قطعات چاپ شده دارد.



شکل ۵) نمایی از پنجره‌های بررسی‌شده در این پژوهش به همراه تأثیر شکست نور بر روی قطعه تشکیل‌شده در این پنجره‌ها، الف: نمای گرافیکی از سه پنجره استفاده‌شده، ب: قطعه U2 چاپ‌شده در ظرف جزیره‌ای و تأثیر عدم شکست نور بر کیفیت قطعه چاپ‌شده و لایه، پ: قطعه U3 چاپ‌شده توسط پنجره میکرو کانال و تأثیر بستر پنجره میکرو کانال بر خرابی قطعه و لایه، ت: نمایی از خرابی ظرف نفوذناپذیر.

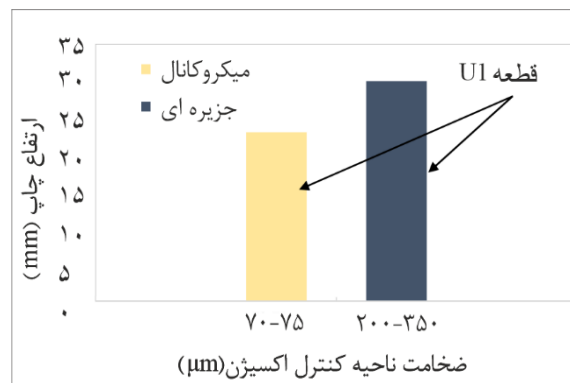
۴-۶- بررسی سرعت چاپ پیوسته با توجه به ناحیه کنترل اکسیژن
یکی از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر ضخامت ناحیه کنترل اکسیژن، ضخامت PDMS و نوع ظرف رزین است. افزایش میزان ضخامت PDMS با کاهش میزان ضخامت ناحیه کنترل و میزان اکسیژن عبوری رابطه مستقیم دارد. بنابراین با کاهش میزان اکسیژن، فرآیند خنثی‌سازی رادیکال‌های آزاد در ارتفاع کمتری صورت گرفته و برای جلوگیری از چسبندگی قطعه با بستر ظرف نیاز به سرعت بالاتر است. همان‌طور که اشاره شد، در فرمول (۲) سرعت چاپ سیستم به پارامترهای متعددی وابسته است. در نتیجه، علاوه بر نوع رزین پارامتری همچون ضخامت ناحیه کنترل اکسیژن به‌صورت غیرمستقیم بر سرعت چاپ مؤثر است. طبق شکل ۷ برای دو ظرف میکرو کانال و ظرف جزیره‌ای با ضخامت ناحیه کنترل متفاوت برای یک رزین مشخص، سرعت چاپ ۱۰۰ میلی‌متر بر ساعت بوده که نسبت به روش DLP افزایش سرعت ۱۰ چسبندگی قطعه با بستر ظرف کمتر، به دلیل کانال به دلیل ضخامت ناحیه کنترل اکسیژن کمتر، به دلیل چسبندگی قطعه با بستر ظرف قطعه به‌صورت ناتمام باقی ماند.



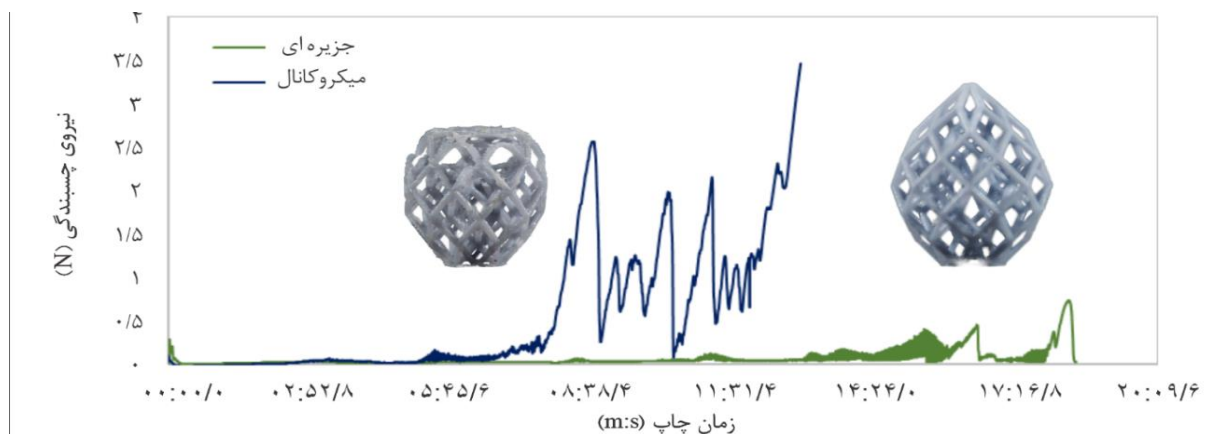
شکل ۷) مقایسه سرعت و زمان چاپ دو روش تولید پیوسته مایع واسط (CLIP) و پردازش دیجیتال نوری (DLP).

طبق شکل ۵-پ، در ظرف میکرو کانال به دلیل شکست نوری که به سبب کانال‌ها ایجاد می‌شود پخت کامل صورت نگرفته و این امر سبب استمرار خرابی در لایه‌های بعدی می‌گردد (تأثیر شکست نور حاصل از کانال‌های بستر پنجره در قطعه دایروی شکل ۳-ب مشهود است). در صورتی‌که برای پنجره جزیره‌ای نور با حداقل شکست، به‌خوبی باعث پخت مقاطع موردنظر می‌شود (شکل ۵-ب).

۳-۶- بررسی میزان ارتفاع چاپ با توجه به ناحیه کنترل اکسیژن
با توجه به ضخامت کم ناحیه کنترل اکسیژن در پنجره نفوذناپذیر، چاپ پیوسته امکان‌پذیر نیست. زیرا حداقل ضخامت ناحیه مورد- نیاز برای جلوگیری از چسبندگی قطعه با بستر ظرف بین ۲۰ الی ۳۰ میکرون است. بر طبق نمودار شکل ۶ با چهار برابر شدن ناحیه کنترل اکسیژن در ظرف جزیره‌ای ارتفاع چاپ تا ۳۰٪ افزایش پیدا کرده است. بنابراین انتخاب پنجره‌ای با قابلیت عبور بالای گاز اکسیژن باعث افزایش ارتفاع چاپ قطعات می‌شود.



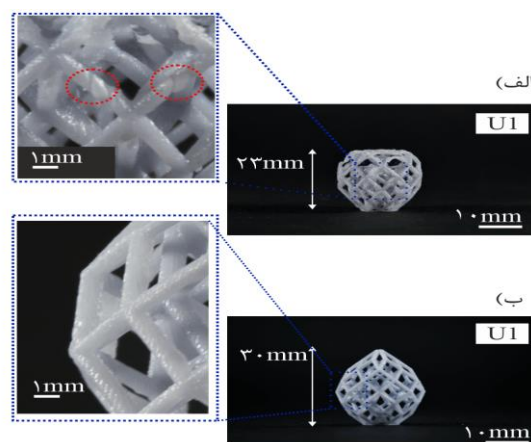
شکل ۶) بررسی میزان ارتفاع چاپ قطعه U1 در دو ظرف میکرو کانال و جزیره‌ای با ضخامت ناحیه کنترل اکسیژن متفاوت.



شکل ۸) بررسی میزان نیروی چسبندگی برحسب مدت زمان چاپ برای قطعه U1.

۵-۶- بررسی برخط تأثیر نیروی جدایش

به منظور بررسی دقیق رفتار سامانه در دو ظرف میکرو کانال و جزیره ای، نمودارهای نیروی جدایش برحسب زمان چاپ برای هر دو پنجره به صورت برخط آورده شده است (شکل ۸). نیروی جدایش کمتر در ظرف جزیره ای، خود گواه وجود ناحیه کنترل اکسیژن با ضخامت بیشتر است. علاوه بر این مشاهده گردید که نیروی جدایش پنجره جزیره ای در این قطعه خاص دارای ثبات بیشتری نسبت به پنجره میکرو کانال به دلیل یکنواختی ناحیه کنترل اکسیژن است. همچنین مدت زمان قابلیت چاپ پیوسته تا پیش از شروع (جهش) نیروی جدایش در این ظرف ۱۰۷٪ افزایش را نشان می دهد که به نسبت کاهش ۳۸۰٪ نیروی بیشینه جدایش، گواه از عملکرد بهتر این ظرف در فرایند چاپ پیوسته است. در شکل ۹ تصویر قطعه U1 چاپ شده توسط سامانه آلترا به روش تولید پیوسته مایع واسط در دو پنجره میکرو کانال و جزیره ای از نظر کیفیت ظاهری و همچنین ارتفاع چاپ قابل مشاهده است. پنجره جزیره ای از نظر میزان ارتفاع چاپ و کیفیت ظاهری از پنجره میکرو کانال عملکرد بهتری دارد.



شکل ۹) الف: تصویر قطعه ساخته شده با بهره گیری از پنجره جزیره ای و نمای نزدیک از کیفیت ظاهری قطعه، ب: تصویر قطعه ساخته شده در پنجره میکرو کانال و تصویر بزرگ شده از خرابی در این قطعه به دلیل شکست نور بواسطه میکرو کانال ها.

۷- نتیجه گیری

در این پژوهش با استفاده از سامانه طراحی و ساخته شده در آزمایشگاه ساخت افزایشی دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی تهران، تحت عنوان سامانه تولید پیوسته مایع واسط (CLIP)، بررسی و تحلیل برخی از پارامترهای تأثیرگذار در مرحله چاپ قطعه در دستور کار قرار گرفت. سامانه CLIP ساخته شده توانایی چاپ قطعات پیچیده و متخلخل تا ده برابر سرعت روش پردازش دیجیتال نوری را دارا است. بارزترین تفاوت CLIP با DLP نفوذ دهی گاز اکسیژن از یک نوع غشاء خاص (PDMS) به منظور ایجاد ناحیه کنترل اکسیژن بین رزین و کف محفظه نگه دارنده رزین است. ناحیه کنترل اکسیژن در دو ظرف جزیره ای و میکرو کانال معرفی شده بررسی شد. بر طبق نتایج بدست آمده، قطعه U1 با سرعت ۱۰۰ میلی متر بر ساعت در ظرف جزیره ای چاپ گردید. همان طور که مشاهده گردید، قطعه ی متخلخل U1 در ظرف جزیره ای به دلیل ایجاد ناحیه کنترل اکسیژنی با ضخامت بیشتر به صورت کامل (۳۰٪ ارتفاع چاپ بیشتر)، با نیروی جدایش بیشینه ۴/۷ برابر کمتر و با کیفیت ظاهری بهتری نسبت به قطعه چاپ شده در ظرف میکرو کانال، به صورت بدون لایه ساخته شد. همچنین مشاهده گردید که افزایش این ناحیه با ارتفاع چاپ رابطه مستقیمی داشته و با افزایش ضخامت ناحیه کنترل اکسیژن، می توان مدت زمان بیشتری (۱۰۷٪ بیشتر از ظرف میکرو کانال) به چاپ پیوسته پرداخت.

تأییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان بوده و صحت نتایج آن نیز بر عهده ایشان است.

تعارض منافع: مقاله حاضر با هیچ شخص یا سازمانی تعارض منافع ندارد.

منابع مالی: تمامی منابع مالی این پژوهش توسط نویسندگان تأمین شده است.

- 14- Jiang Y, Wang Y, He H, Feinerman A, Pan Y. Constrained window design in projection stereolithography for continuous three-dimensional printing. *3D Printing and Additive Manufacturing*. 2020;7(4):163-9.
- 15- Jiang Y, Wang Y, Lichade K, He H, Feinerman A, Pan Y. Textured window design for continuous projection stereolithography process. *Manufacturing Letters*. 2020;24:87-91.
- 16- Pan Y, Zhou C, Chen Y. A fast mask projection stereolithography process for fabricating digital models in minutes. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2012;134(5).
- 17- Diffey BL. Sources and measurement of ultraviolet radiation. *Methods*. 2002;28(1):4-13.
- 1- He H, Xu J, Yu X, Pan Y. Effect of constrained surface texturing on separation force in projection stereolithography. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2018;140(9).
- 2- Economidou SN, Pere CP, Reid A, Uddin MJ, Windmill JF, Lamprou DA, Douroumis D. 3D printed microneedle patches using stereolithography (SLA) for intradermal insulin delivery. *Materials Science and Engineering: C*. 2019;102:743-55.
- 3- Derakhshanfar S, Mbeleck R, Xu K, Zhang X, Zhong W, Xing M. 3D bioprinting for biomedical devices and tissue engineering: A review of recent trends and advances. *Bioactive materials*. 2018;3(2):144-56.
- 4- Naftulin JS, Kimchi EY, Cash SS. Streamlined, inexpensive 3D printing of the brain and skull. *PloS one*. 2015;10(8):e0136198.
- 5- Dhir V, Itoi T, Fockens P, Perez-Miranda M, Khashab MA, Seo DW, Yang AM, Lawrence KY, Maydeo A. Novel ex vivo model for hands-on teaching of and training in EUS-guided biliary drainage: creation of "Mumbai EUS" stereolithography/3D printing bile duct prototype (with videos). *Gastrointestinal endoscopy*. 2015; 81(2):440-6.
- 6- Zheng X, Deotte J, Alonso MP, Farquar GR, Weisgraber TH, Gemberling S, Lee H, Fang N, Spadaccini CM. Design and optimization of a light-emitting diode projection micro-stereolithography three-dimensional manufacturing system. *Review of Scientific Instruments*. 2012;83(12):125001.
- 7- Pagac M, Hajnys J, Ma Q-P, Jancar L, Jansa J, Stefek P, et al. A review of vat photopolymerization technology: Materials, applications, challenges, and future trends of 3d printing. *Polymers*. 2021;13(4):598.
- 8- Shusteff M, Panas RM, Henriksson J, Kelly BE, Browar AE. Additive fabrication of 3d structures by holographic lithography. In 2016 International Solid Freeform Fabrication Symposium 2016. University of Texas at Austin.
- 9- Pan Y, He H, Xu J, Feinerman A. Study of separation force in constrained surface projection stereolithography. *Rapid Prototyping Journal*. 2017; 23(2):353-61.
- 10- Januszewicz R, Tumbleston JR, Quintanilla AL, Mecham SJ, DeSimone JM. Layerless fabrication with continuous liquid interface production. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2016; 113(42): 11703-8.
- 11- Kuang X, Zhao Z, Chen K, Fang D, Kang G, Qi HJ. High-speed 3D printing of high-performance thermosetting polymers via two-stage curing. *Macromolecular rapid communications*. 2018; 39(7):1700809.
- 12- Zhang B, Kowsari K, Serjouei A, Dunn ML, Ge Q. Reprocessable thermosets for sustainable three-dimensional printing. *Nature communications*. 2018; 9(1):1831.
- 13- Tumbleston JR, Shirvanyants D, Ermoshkin N, Januszewicz R, Johnson AR, Kelly D, Chen K, Pinschmidt R, Rolland JP, Ermoshkin A, Samulski ET. Continuous liquid interface production of 3D objects. *Science*. 2015;347(6228):1349-52.