

# Design and Implementation of a 3D Photocopier with Photogrammetric Method Using Linear Delta Robot Mechanism

Masoud Rahimi <sup>a</sup>, Afshin Mokhtari <sup>b</sup>, Hasan Moradzadeh <sup>c\*</sup>, Khosro Khandani <sup>d</sup>

<sup>a</sup> Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran

<sup>b</sup> Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran

<sup>c</sup> Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran

<sup>d</sup> Department of Electrical engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran

## Original Article

Use your device to scan  
and read the article online



**Citation:** Rahimi M, Mokhtari A, Moradzadeh H, Khandani K. Design and Implementation of a 3D Photocopier with Photogrammetric Method Using Linear Delta Robot Mechanism. *Mechanics of Advanced and Smart Materials*. 2022; 2: 134-155.

 <https://10.52547/masm.2.2.134>.

## KEYWORDS

3D photocopier,  
3D scanner,  
3D printer,  
Photogrammetry,  
Delta robot.

## ABSTRACT

In the present article, the design and construction of a 3D photocopier is discussed. This device has two main units: 3D scanner unit and 3D printer unit. Today, the need to use 3D scanners in various applications such as quality control, reverse engineering, and computer aided design and production is growing. This machine will be able to take a 3D scan and after processing the scanned image, sends a 3D model of it to the 3D printer unit for printing and makes a copy model of that part. One of the salient advantages of this design is its use in reverse engineering. It can make a copy model with the desired fit of a workpiece without the need for a measurement process to determine the dimensions, followed by the design process, which in many cases due to the apparent complexity of the workpiece is long, difficult and time consuming, in the least make time. After taking the scan, it is possible to repair or change the part, and then send it to the 3D printer unit. Scanning the piece uses the photogrammetric method. 3D printers work with different mechanisms and technologies. Here, the printer movement mechanism is inspired by the delta robot mechanism and printing technology, and extrusion (melting) of raw materials has been selected. The rules and principles of designing and building a 3D printer are explained. It is stated how the observance of these principles and rules will be effective in increasing the accuracy and quality of manufactured parts.

## Extended Abstract

### 1. Introduction

Traditional two dimensional photocopiers have become one of the most widely used devices in human life and are used in almost all areas of human life. The significant role of this device in human life caused the need for this device to be extended in the three-dimensional space, especially in the (modeling) industry [1]. The idea of designing and constructing a three-dimensional photocopy machine with the ability to scan three-dimensional objects was formed. A 3D photocopier creates a three-dimensional model after processing the scanned images in the form of a G-code file. Then the printer which produces the output of the device, must be made in order to have the necessary accuracy and quality [2]. In addition to acceptable accuracy, non-contact 3D scanners can provide us with high speed in taking dimensions of parts with different dimensions [3]. Due to the wide use of 3D scanners in the industry [4], especially in quality control [5], the application of cameras with megapixel accuracy has increased accuracy, but on the other hand there are limitations such as price increase [6]. Finding ways to increase the accuracy of measurement with the help of common and available equipment will definitely lead to extended applications of this device in different industries [7].

\* Corresponding author. Tel.: 08632625628

E-mail address: [h-moradzadeh@araku.ac.ir](mailto:h-moradzadeh@araku.ac.ir)

DOI: <https://10.52547/masm.2.2.134>.

Received: March 18, 2022; Received in revised form: August 14, 2022; Accepted: August 16, 2022.

2022 Published by Arak University Press. All rights reserved.



## 2. Methodology

The 3D-copier proposed in this paper is composed of two main parts, i.e., the photogrammetric scanner and the linear delta robot printer which will be discussed below.

### 2.1. Photogrammetric Scanner

The information obtained from this scanner includes a series of digital photos that are numbered in order. The number of each photo corresponds to the degree of rotation of the object. This means that the workpiece rotates to a certain extent and is photographed by the camera at that angle. These photos are processed in 3DF Zephyr software, then the three-dimensional coordinates of the points on the surface of the desired part are saved in a file. The coordinates of the points appear as a point cloud in the CAD software, and after creating the obj and stl standard files, it can be converted into a mathematical model. This standard format can be transferred as an input to the 3D printer unit, where the scanned model is made. If needed, it is possible to modify the 3D model after extracting it. Figure 1 shows the point cloud built in this method.

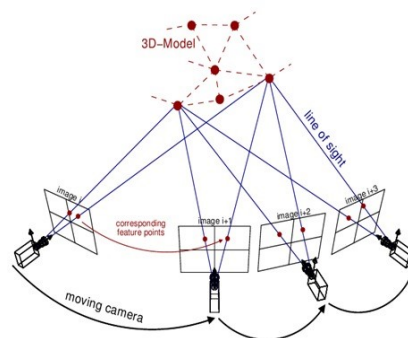


Figure 1. The point cloud produced in the photogrammetry method

### 2.2. The 3D Printer with Linear Delta Robot Mechanism

In the 3D printer with the mechanism of linear delta robot, the linear rail and the belt mechanisms are installed on three sides of the printer. An arm is attached to each belt, which moves along the linear rail. The arms of the three sides meet in the center, which is where the nozzle is located. When one arm moves vertically upwards, the nozzle of the robot moves in the direction of the same rail, and when it moves downwards, the nozzle moves away from it. If the two arms move up, the nozzle moves towards the center between the two rails, and when it moves down, the opposite happens. To create flat layers, all three axes move together. In this printer, a 120-degree arm movement system is used which reduces the vibrations of the device during the 3D printing process. Figure 2 illustrates this mechanism.

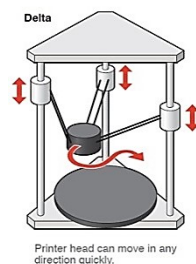


Figure 2. The linear delta robot mechanism employed in the 3D printer

## 3. Construction of the Device

The correct and accurate assembly of the device is very important and has a direct relationship on the accuracy of the device's performance. Mechanical components must follow a coherent integration. The smallest deviation in the columns of the device will have an unfavorable result. The electrical equipment of the device must be placed according to the principles and have proper ventilation because equipment such as power switching and stepper motor drivers and even the presence of a hot plate on the structure of the device generate heat. If the heat is not controlled, it will damage the electrical equipment. Wiring between different components must be done carefully so that while maintaining the appearance, it does not affect the performance of mechanical moving components. Since the nozzle of the robot is heated up to a temperature of nearly 200 degrees Celsius by the heater element, necessary measures must be taken so that this heat does not melt the coating of the wires of the nozzle element. Therefore, in order to deliver the current of electricity to the nozzle, the heater element is made of wire with fireproof coating. A thermal sensor is installed on the nozzle of the printer to report the temperature of the nozzle to the microcontroller. The sensor wire and the current carrying wire are placed inside the appropriate wire collector. Finally,

according to Figure 3 and based on the conceptual design of the device, the device was assembled in the Auto Desk Inventor (Auto CAD) software environment.

#### 4. Conclusion

This paper proposes a method for constructing a 3D copier which consists of a scanner and a printer section. An important problem in 3D copiers is the low speed of printing. In order to alleviate this problem, the delta mechanism was chosen, whose structure increases the printing speed. The accuracy of the method and also its repeatability were shown via printing different workpieces with different lengths, width and heights.



Figure 3. The final constructed 3D copier





## طراحی و ساخت دستگاه فتوکپی سه‌بعدی به روش فتوگرامتری با مکانیزم ربات دلتای خطی

مسعود رحیمی<sup>الف</sup>، افشین مختاری<sup>ب</sup>، حسن مرادزاده<sup>پ\*</sup>، خسرو خاندانی<sup>ت</sup>

<sup>الف</sup> کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران، [m.rahimi@gmail.com](mailto:m.rahimi@gmail.com)

<sup>ب</sup> کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه اراک، اراک، ایران، [afshinmokhtari@yahoo.com](mailto:afshinmokhtari@yahoo.com)

<sup>پ</sup> استادیار، گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران، [h-moradzadeh@araku.ac.ir](mailto:h-moradzadeh@araku.ac.ir)

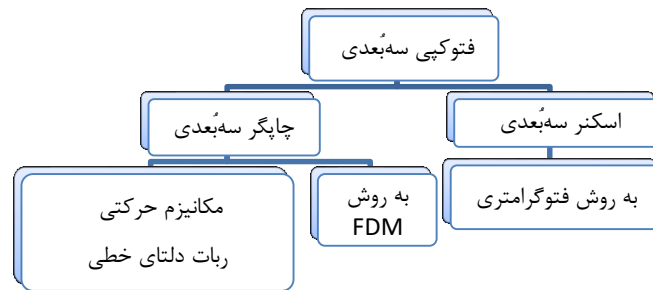
<sup>ت</sup> استادیار، گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران، [k-khandani@araku.ac.ir](mailto:k-khandani@araku.ac.ir)

چکیده	واژگان کلیدی
<p>در مقاله‌ی حاضر به طراحی و ساخت دستگاه فتوکپی سه‌بعدی پرداخته شده است. این دستگاه دارای دو واحد اصلی می‌باشد که عبارت‌اند از: واحد اسکنر سه‌بعدی و واحد چاپگر سه‌بعدی. امروزه نیاز به استفاده از اسکنرهای سه‌بعدی در کاربردهای مختلف نظیر کنترل کیفیت، مهندسی معکوس و طراحی و تولید به کمک کامپیوتر در حال گسترش است. این دستگاه قادر خواهد بود اسکن سه‌بعدی بگیرد و پس از پردازش تصویر اسکن شده، یک مدل سه‌بعدی جهت چاپ به واحد چاپگر سه‌بعدی ارسال کند و یک مدل کپی از آن قطعه بسازد. از مزایای برجسته‌ی این طرح استفاده از آن در مهندسی معکوس می‌باشد که می‌تواند یک مدل کپی با تناسب دلخواه از یک قطعه را بدون نیاز به فرآیند اندازه‌گیری جهت تعیین ابعاد و به دنبال آن فرآیند طراحی که بعضاً در بسیاری از موارد به دلیل پیچیدگی‌های ظاهری قطعه، کاری طولانی، سخت و زمان‌بر است، در کمترین زمان بسازد. این امکان فراهم شده که بعد از گرفتن اسکن از قطعه در صورت نیاز به ترمیم یا تغییر، اصلاح صورت گیرد و بعد به واحد چاپگر سه‌بعدی ارسال شود. اسکن قطعه از روش فتوگرامتری بهره گرفته است. چاپگرهای سه‌بعدی با مکانیزم‌ها و فناوری‌های مختلف کار می‌کنند. مکانیزم حرکتی چاپگر با الهام از مکانیزم ربات دلتا و فناوری چاپ اکسترود (ذوب) مواد اولیه انتخاب شده است. به بیان قواعد و اصول طراحی و ساخت یک چاپگر سه‌بعدی پرداخته می‌شود و بیان می‌شود که چگونه رعایت این اصول و قواعد در افزایش دقت و کیفیت قطعات تولیدی تأثیرگذار خواهند بود.</p>	<p>فتوکپی سه‌بعدی، اسکنر سه‌بعدی، چاپگر سه‌بعدی، فتوگرامتری، ربات دلتا.</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۲۹</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۵/۲۲</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۲۵</p>

### ۱- مقدمه

دستگاه‌های فتوکپی به یکی از پرکاربردترین دستگاه‌های زندگی بشر تبدیل شده و تقریباً در تمامی حوزه‌های زندگی انسان استفاده می‌شود. نقش پررنگ این دستگاه در زندگی انسان سبب شد نیاز به این دستگاه در فضای سه‌بعدی به‌ویژه در صنعت (مدل‌سازی) احساس شده [۱] و ایده‌ی طراحی و ساخت دستگاه فتوکپی سه‌بعدی شکل گیرد که توانایی اسکن گرفتن از اشیاء

سه‌بعدی را دارد و پس از پردازش تصاویر اسکن شده در قالب یک فایل فرضاً به صورت  $G\_code$ <sup>۱</sup> یک مدل سه‌بعدی می‌سازد. چاپگر که به‌عنوان خروجی دستگاه است، باید طبق اصول و قواعد ساخته شود تا از دقت و کیفیت لازم برخوردار باشد [۲]. اسکنرهای سه‌بعدی غیر تماسی می‌توانند علاوه بر دقت قابل قبول، سرعت بالایی در ابعاد برداری از قطعات با ابعاد مختلف در اختیار ما قرار دهند [۳]. به دلیل کاربرد وسیع اسکنرهای سه‌بعدی [۴] در صنعت خصوصاً در بحث کنترل کیفیت [۵] جهت کنترل ابعادی قطعات، استفاده از دوربین‌هایی با دقت مگاپیکسل باعث افزایش دقت شده، ولی از طرفی محدودیت‌هایی مثل افزایش قیمت وجود دارد [۶]. یافتن راه‌هایی که بتوان با کمک آن به‌وسیله تجهیزات معمولی و در دسترس، دقت اندازه‌گیری را افزایش داد، قطعاً باعث استقبال گسترده‌ی صنایع جهت به‌کارگیری این محصول خواهد شد [۷]. امروزه با کاربری در مهندسی معکوس قطعات [۸]، اسکنرهای سه‌بعدی تبدیل به وسیله‌ای هرچه کاربردی‌تر شده‌اند [۹]. لازمی شناخت محصول و درک عوامل مؤثر در مشخصه‌های آن که اولین پیش‌نیاز بهبود کیفیت و نوآوری است [۱۰]، درک مهندسی مناسب و دقیق از مبانی عملکردی قطعه است و مهندسی معکوس فرآیندی است که دستگاه این امکان را تا حد زیادی فراهم می‌کند [۱۱]. شکل ۱ ساختار کلی دستگاه فتوکپی سه‌بعدی پیاده‌سازی شده را نشان می‌دهد.



شکل ۱ ساختار دستگاه فتوکپی سه‌بعدی

## ۱-۱- اسکن به روش فتوگرامتری<sup>۲</sup>

اسکن به روش فتوگرامتری به دلیل سرعت بالا، دقت زیاد، مستقل بودن از بافت به مقدار زیاد، مستقل بودن از رنگ جسم، حدود تفکیک قابل تنظیم، فراهم نمودن نقاط رنگی سه‌بعدی، ارزان بودن، پیاده‌سازی آسان و غیره [۱۲] در کاربردهای بالا به‌دفعات مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش فتوگرامتری برای اسکن غیر تماسی سطوح بوده و فرآیند اندازه‌گیری مختصات هندسی اجسام [۱۳] از روی تصاویر است. در حقیقت فتوگرامتری [۱۴] تصاویر دوبعدی را به تصاویر واقعی سه‌بعدی تبدیل می‌کند. از آنجاکه با تصویربرداری از یک جسم، برخی از اطلاعات مهم راجع به آن از قبیل ارتفاع نقاط از بین می‌رود، بنابراین با یک عکس نمی‌توان مدل سه‌بعدی دقیق حاصل نمود و حداقل نیاز به دو عکس برای ایجاد مدل سه‌بعدی است. اگر فرآیند به‌صورت دقیق انجام پذیرد با استفاده از دو عکس می‌توان مدل سه‌بعدی دقیق را استخراج نمود. این روش از اصل اساسی  $Triangulation$ <sup>۳</sup> برای به‌دست آوردن مختصات نقاط استفاده می‌کند. در این روش می‌توان در یک لحظه مختصات چندین نقطه را به‌دست آورد.

## ۱-۲- فن آوری چاپ سه‌بعدی به روش FDM و مکانیزم ربات دلتای خطی

چاپگر سه‌بعدی FDM با استفاده فیلامنت (متناظر با کارتریج در چاپگر معمولی) عمل چاپ را انجام می‌دهد. کیفیت فیلامنت در چگونگی شکل نهایی تأثیر دارد. همه‌ی چاپگرهای سه‌بعدی در طراحی مربوط به خود، مجموعه‌ای منحصر به فرد از دما، سرعت و دامن‌های عملکردی دارند که باید هنگام انتخاب فیلامنت آن‌ها را مرور کرده و در نظر گرفته شود. فیلامنت‌ها در رنگ، جنس و ضخامت‌های مختلفی عرضه می‌شوند. این مواد بسته به دمای ذوب خود تغییر حالت داده و چاپگرهای سه‌بعدی از طریق نازل

<sup>۱</sup> نام زبان برنامه‌نویسی اکثر ماشین ابزارهای کنترل عددی (CNC) می‌باشد. این زبان برای اولین بار در آزمایشگاه سرومکانیزم دانشگاه MIT در سال‌های ۱۹۵۰ میلادی تعریف و استفاده گردید.

<sup>۲</sup> Photogrammetry

<sup>۳</sup> یک روش مش‌بندی است که در آن، نقاط به روش مثلثی به هم متصل می‌شوند.

می‌توانند لایه‌ها را روی هم قرار دهند تا قطعه ساخته شود. عمده‌ی مواد اولیه‌ی فیلامنت که هم‌اکنون در بازار جهانی به‌وفور یافت می‌شوند، عبارت‌اند از: <sup>۴</sup>PLA، <sup>۵</sup>ABS، <sup>۶</sup>TPC، <sup>۷</sup>PETG، <sup>۸</sup>PVA و <sup>۹</sup>HIPS که از تمامی این مدل‌ها فیلامنت PLA و بعد از آن ABS بیشترین مصرف را دارا هستند. هم ABS و هم PLA به‌عنوان ترموپلاستیک<sup>۱۰</sup> شناخته می‌شوند. خصوصیات و مزایا و معایب چاپگرهای FDM در جدول ۱ دیده می‌شود.

جدول ۱ خصوصیات چاپگرهای FDM

چاپگر FDM	
مزایا	معایب
<ul style="list-style-type: none"> <li>• چاپگرهای FDM بسیار مقرون‌به‌صرفه هستند، نسبتاً آسان کار می‌کنند و مواد آن‌ها به‌طور گسترده در دسترس است ( این به معنی کاهش هزینه‌ی چاپ سه‌بعدی است).</li> <li>• چاپگر سه‌بعدی FDM به دلیل نداشتن محدودیت در شکل ظاهری جسم برای تولید، کاربردهای متنوع و جالبی دارد و در زمینه‌های متفاوتی، از جمله صنعتی، پزشکی، معماری، مجسمه‌سازی، قالب‌سازی، رباتیک، شیرینی‌پزی و ... استفاده می‌شود.</li> <li>• به کمک این روش می‌توان در کمترین زمان و با دقت مطلوب نمونه‌هایی مشابه با قطعات اصلی تولید کرد (نمونه‌سازی سریع یا Rapid Prototyping).</li> <li>• در این فرآیند، حداقل اتلاف مواد وجود دارد؛ چراکه قطعات توسط اکستروژن<sup>۱۱</sup> مواد نیمه مذاب ساخته می‌شوند؛ بنابراین فقط به میزان مورد نیاز برای ساخت مدل و نگه‌دارنده از ماده‌ی اولیه مصرف می‌شود و دورریز مواد حداقل است.</li> <li>• ساپورت‌ها به‌راحتی از محصول جدا می‌شوند و نیاز به عملیات پرداخت خاصی وجود ندارد.</li> <li>• فیلامنت در چاپگر سه‌بعدی FDM به‌راحتی قابل تعویض است و اگر حین کار تمام شود، به‌راحتی می‌توان فیلامنت جدید را بارگذاری کرد و فرآیند چاپ را ادامه داد.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• خطوط ایجادشده در قطعات ساخته‌شده با چاپگر سه‌بعدی FDM قابل‌مشاهده است. به همین دلیل این قطعات برای رسیدن به کیفیت سطح مطلوب نیاز به پرداخت سطح دارند.</li> <li>• مکانیزم چسبندگی در قطعات ساخته‌شده با چاپگرهای سه‌بعدی FDM باعث می‌شود که این قطعات به‌طور طبیعی دارای ساختار غیرایزوتروپیک باشند.</li> </ul>

<sup>۴</sup> Polylactic Acid<sup>۵</sup> Acrylonitrile Butadiene Styrene<sup>۶</sup> Thermoplastic CoPolyester<sup>۷</sup> Glycol Modified Polyethylene Terephthalate<sup>۸</sup> Polyvinyl Alcohol<sup>۹</sup> High Impact Polystyrene<sup>۱۰</sup> موادی پلاستیکی هستند که در معرض گرما نرم و انعطاف‌پذیر و در هنگام سرما سخت می‌شوند. این فرآیند می‌تواند بارها و بارها برای آن‌ها تکرار شود.<sup>۱۱</sup> extrusion

### ۱-۳- مکانیزم حرکتی چاپگر براساس ربات دلتا

چاپگرهایی که با مکانیزم دلتا کار می‌کنند چاپگرهای ربات دلتا نامیده می‌شوند؛ چون درواقع، نوعی ربات هستند. به دلیل اهمیت و کاربرد بسیار زیاد این ربات، تعداد زیادی از دانشگاه‌های سراسر دنیا پژوهش‌های متعددی در این زمینه انجام داده‌اند. یکی از ویژگی‌های شاخص ربات دلتا، سرعت بسیار بالای آن در جابجایی اجسام به خصوص اجسام سبک می‌باشد [۱۵]. همین ویژگی کافی است تا صنایع با اشتیاق فراوان از این ربات استقبال کرده، پای آن را به خطوط تولید خود باز کنند؛ زیرا زمان پارامتری بسیار پراهمیت است و هزینه کردن برای صرفه‌جویی در آن امری غیرقابل چشم‌پوشی می‌باشد. یکی دیگر از ویژگی‌های بارز این ربات، دقت بالای آن در مکان‌یابی است که باعث می‌شود این ربات از بسیاری مکانیزم‌های دیگر پیشی بگیرد.

مزایای این نوع چاپگر با مکانیزم ربات دلتا عبارت‌اند از:

- به دلیل اینکه استپر موتورها<sup>۱۲</sup> در کنار دستگاه واقع شده و قسمت اکسترودر<sup>۱۳</sup> بسیار سبک می‌شود؛ اینرسی حرکت، کم است و جهت چاپ با سرعت بالا و تغییر جهت ناگهانی عملکرد بی‌نظیری دارد.
- سختی بالا (انحراف نازل کم است چون توسط بازوها استحکام بیشتری پیدا کرده)، که این امر منجر به افزایش دقت ساخت می‌شود.
- توانایی انجام چاپ‌های بلند را دارد.
- دارای عملکرد بسیار بالایی در چاپ قطعات دایره‌ای شکل یا منحنی‌وار می‌باشد.

### ۲- شرح مسئله

در این بخش به نحوه‌ی کارکرد دستگاه و چگونگی انجام اسکن و چاپ قطعه پرداخته می‌شود. برای داشتن عملکرد بهینه‌ی دستگاه، باید عوامل تأثیرگذار روی اسکنر و چاپگر مورد بررسی قرار گیرد:

#### ۱-۲- بررسی تأثیر پس‌زمینه در اسکنر دستگاه

در یک اسکنر سه‌بعدی خوب، مطلوب است فقط نقاط جسم مورد اسکن سنجش شده و در تشکیل ابر نقاط سهیم باشند. این شرط زمانی محقق خواهد شد که هنگام تابش الگوی سفید به محیط جسم، میزان روشن شدن پس‌زمینه خیلی کمتر از جسم باشد تا آن نقطه در مرحله‌ی جمع‌آوری داده به‌عنوان نقطه‌ی دلخواه اسکن تلقی نشود؛ لذا طبیعی است اگر در کنار یا پشت جسم رنگ‌های روشنی نزدیک به رنگ غالب جسم وجود داشته باشد، به‌عنوان نقطه‌ای از جسم، تلقی خواهد شد. برای اسکن سه‌بعدی جسم، بهتر است برای اجسام با رنگ روشن از پس‌زمینه‌ی مشکی و برای رنگ‌های تیره از پس‌زمینه‌ی سفید استفاده شود و در یک حالت کلی از یک پس‌زمینه‌ی سبز برای اسکن اجسام تیره و روشن استفاده شده است.

#### ۲-۲- بررسی تأثیر فاصله‌ی جسم تا اسکنر

فاصله از اسکنر نیز پارامتر مهمی است که اگر رعایت شود می‌توان اجسام را دقیق‌تر اسکن نمود؛ درواقع اگر جسم فاصله‌ی کمتری از دوربین داشته باشد، جزئیات قابل تشخیص بیشتری دارد و نقاط بیشتری از جسم پوشش داده شده و دقت اسکن بالاتر خواهد رفت و اگر این فاصله زیاد شود، دقت اسکن کاهش پیدا خواهد کرد. پیدا کردن فاصله‌ی بهینه به روش‌های مختلف همواره چالش محققان نیز بوده است.

#### ۳-۲- بررسی تأثیر نور محیط در اسکنر

نور محیط نیز به‌نوبه‌ی خود می‌تواند در دقت و تفکیک‌پذیری اسکن اجسام تأثیر قابل‌توجهی داشته باشد. اگر نور محیط زیاد

<sup>12</sup> Stepper Motor

<sup>13</sup> Extruder

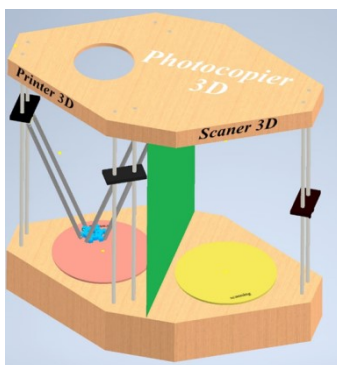
باشد پستی‌های جسم تأثیر چندانی بر روی اسکن آن نخواهد داشت و اگر تاریک باشد نقاط زائد زیادی به وجود آمده و کل عملکرد اسکنر تا حد قابل توجهی زیر سؤال خواهد رفت؛ لذا لازم است نور محیط در سطح کاملاً استاندارد نگه داشته شود. برای بررسی تأثیر این موضوع در ادامه، جسم یک‌بار در محیط تاریک و یک‌بار در محیط روشن مورد اسکن قرار گرفته تا بهترین مقدار تابش نور مشخص شود.

## ۲-۴- بررسی تأثیر رنگ جسم مورد اسکن

تنوع رنگ‌ها در یک جسم می‌تواند اسکن آن را کمی دشوارتر سازد؛ زیرا اسکنرها در یک تنظیم معمولاً یا برای اسکن اجسام با رنگ روشن یا تیره به کار می‌روند. هنگامی که جسم مورد اسکن هم نقاط تیره و هم نقاط روشن داشته باشد، به راحتی نمی‌توان مدل دقیقی از جسم در کامپیوتر تولید کرد. به عنوان مثال اگر رنگ غالب یک جسم سفید (روشن) باشد و مثلاً قسمت‌های تیره نیز داشته باشد برای اسکن آن یک پس‌زمینه سفید قرار می‌دهیم و سپس جسم را اسکن می‌کنیم، اما متأسفانه نقاط سیاه موجود بر روی جسم به عنوان نقاط جسم شناخته نشده و عمق‌سنجی نمی‌شوند. این مسئله برای یک جسم که رنگ‌های مختلف را دارد و قسمت‌های تیره نیز بر روی آن وجود دارد، آزمایش شده و نتیجه در ادامه نشان داده می‌شود. برای اسکن این‌گونه اجسام توصیه می‌گردد از روش‌های تغییر رنگ موقت جسم استفاده شود و پس از اسکن به کمک الگوریتم‌های انطباق تصاویر اثر آن جبران گردد یا از روش‌های بهتری برای تعیین آستانه‌ی روشنایی استفاده شود.

## ۳- روش حل مسئله

باتوجه به نتایج پژوهش‌های انجام شده و اصول و قواعد موجود در زمینه‌ی اسکنر و چاپگر که در ادامه به آن‌ها اشاره می‌شود یک طرح مفهومی در نرم‌افزار <sup>۱۴</sup> Autodesk Inventor ایجاد شد که ابعاد و نحوه‌ی قرار گرفتن اسکنر و چاپگر دستگاه را کنار هم نشان می‌دهد. شکل ۲ طرح مفهومی دستگاه را به نمایش گذاشته است.



شکل ۲ طرح مفهومی دستگاه فتوکپی سه‌بعدی

## ۳-۱- ساخت دستگاه

فتوکپی سه‌بعدی به دو بخش اصلی تقسیم می‌شود:

- سخت‌افزار
  - تجهیزات مکانیکی
  - تجهیزات الکتریکی

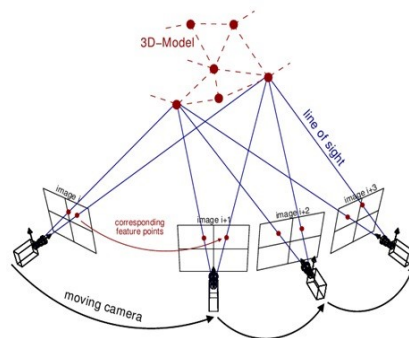
<sup>۱۴</sup> Autodesk Inventor توسط شرکت Autodesk ارائه شده است و جزء نرم‌افزارهای قدرتمند طراحی و مدل‌سازی است.

## • نرم‌افزار

- کد نویسی (Arduino IDE<sup>۱۵</sup>)
- نرم‌افزار اسلایسر slicer جهت تولید جی‌کد Cura<sup>۱۶</sup>
- نرم‌افزار فتوگرامتری با تکنیک پردازش تصویر 3DF Zephyr<sup>۱۷</sup>

## ۳-۲- ساختار و عملکرد اسکنر سه‌بعدی دستگاه

اطلاعات حاصل از این اسکنر شامل یک سری عکس‌های دیجیتال است که به ترتیب شماره‌گذاری شده است. شماره‌ی هر عکس متناسب با میزان چرخش جسم است. بدین معنا که قطعه به میزان مشخصی دوران می‌کند و در هر زاویه توسط دوربین از آن عکس گرفته می‌شود. این عکس‌ها در نرم‌افزار 3DF Zephyr مورد پردازش قرار گرفته، سپس مختصات سه‌بعدی نقاط روی سطح قطعه‌ی مورد نظر در یک فایل ذخیره می‌شود. مختصات نقاط در نرم‌افزار CAD به صورت ابر نقاط ظاهر می‌گردد و پس از ایجاد فایل استاندارد obj و stl می‌توان آن را به یک مدل ریاضی تبدیل نمود. این فرمت استاندارد می‌تواند به‌عنوان ورودی به واحد چاپگر سه‌بعدی منتقل و در آنجا مدل اسکن شده، ساخته شود. در صورت نیاز، این قابلیت وجود دارد که پس از استخراج مدل سه‌بعدی، ترمیم یا اصلاح بر روی آن اعمال شود. شکل ۳ مفهوم ابر نقاط و شیوه‌ی استخراج آن در روش فتوگرامتری را نشان می‌دهد.



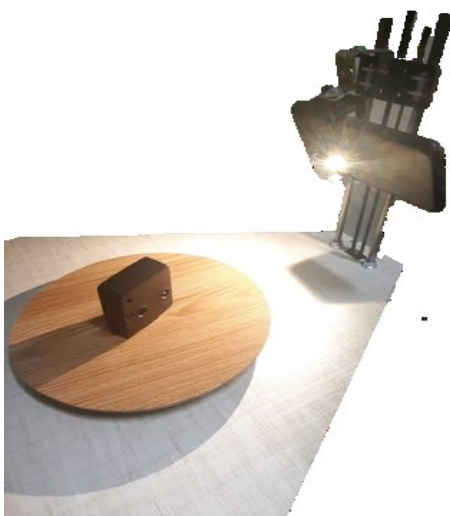
شکل ۳ نحوه‌ی استخراج ابر نقاط در روش فتوگرامتری

در این دستگاه عمل فتوگرامتری بدین صورت انجام می‌شود که دوربین بر روی یک پایه ثابت شده و جسم مورد اسکن روی یک صفحه‌ی گردان قرار می‌گیرد که قابلیت دوران در زوایای مختلف را دارد. این دوران توسط یک موتور پله‌ای و با کمک یک برد کنترلی حاصل می‌شود. به‌طور مثال صفحه به میزان ۱۰ درجه دوران می‌یابد و برای مدتی در این زاویه ثابت می‌ماند که در این زمان توقف، فرمان عکس‌برداری توسط برد کنترلی صادر می‌شود. از جسم یک عکس گرفته شده و مجدداً ۱۰ درجه‌ی دیگر دوران می‌کند و عمل عکس‌برداری صورت می‌پذیرد. این عمل ادامه می‌یابد تا زمانی که جسم یک دور کامل دوران پیدا کند. بدین ترتیب تعداد ۳۶ عکس در دسترس می‌باشد که از زوایای مختلف جسم گرفته شده است. سپس پردازش تصویر با تکنیک فتوگرامتری بر روی آن تصاویر انجام شده و در نتیجه مدل سه‌بعدی جسم استخراج می‌گردد. برای اسکنر دستگاه این قابلیت تعریف شده که می‌توان زوایای دوران را با توجه به کیفیت درخواستی تغییر داد. هرچه قدر تعداد عکس‌ها بیشتر باشد یعنی صفحه در زوایای کوچک‌تری دوران کند و عکس‌برداری شود کیفیت اسکن افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که افزایش تعداد عکس‌ها منجر به افزایش زمان پردازش می‌شود. در این پژوهش برای رسیدن به کیفیت مطلوب به‌گونه‌ای که پردازش تصاویر نیز در کمترین زمان صورت گیرد زاویه‌ی دوران روی ۱۰ درجه تنظیم شده است. شکل ۴ نشان‌دهنده‌ی سیستم دورانی جهت اسکن اشیاء می‌باشد.

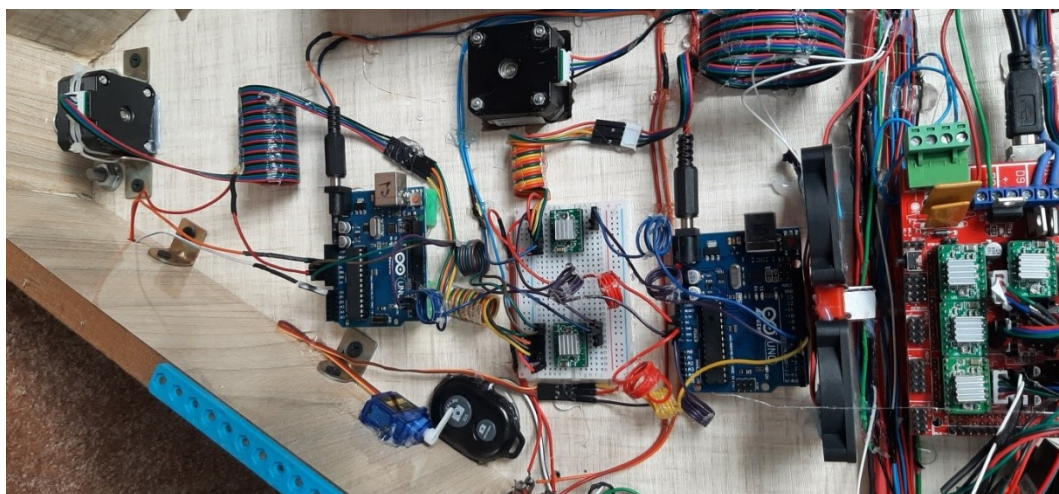
<sup>۱۵</sup> یک پلتفرم سخت‌افزاری و نرم‌افزاری متن‌باز است.

<sup>۱۶</sup> نرم‌افزار Cura یکی از قدرتمندترین و محبوب‌ترین نرم‌افزارهای اسلایسر دنیا است که توسط شرکت Ultimaker آمریکا عرضه شده و توسعه داده می‌شود.

<sup>۱۷</sup> نرم‌افزاری که به کاربر امکان بازسازی مدل‌های بعدی از عکس‌ها را به‌طور خودکار می‌دهد.



شکل ۴ نحوه ی اسکن کردن دستگاه



شکل ۵ سیم کشی بردهای کنترلی دستگاه

در شکل ۵ سیم کشی و نحوه ی اتصال مدار کنترل به موتور پله ای نشان داده شده است. برد کنترلی اسکنر وظیفه ی کنترل موقعیت دوربین را بر عهده دارد. برای پیدا کردن موقعیت بهینه ابتدا جسم مورد اسکن در صفحه ی گردان قرار داده شده، سپس دوربین در ارتفاع مطلوب نسبت به جسم قرار می گیرد. این ارتفاع بهینه ارتفاعی است که بیشترین مساحت از جسم را پوشش دهد. لازم به ذکر است که در این دستگاه از دوربین گوشی همراه هوشمند استفاده شده و فرمان عکس برداری توسط یک ماژول بلوتوث از سمت برد کنترل صادر می شود. برد کنترلی همچنین وظیفه ی کنترل دوران صفحه ی چرخان اسکنر را بر عهده دارد. برنامه ی این قسمت طوری نوشته شده که تعداد گام های دوران صفحه قابل تنظیم باشد یعنی در مواردی که نیاز به دقت اسکن بالا باشد می توان تعداد گام ها را افزایش داد. استپر موتور استفاده شده برای دوران صفحه دارای زاویه ی گام  $1/8$  درجه بوده، تعداد گام های آن در یک دور کامل برابر ۲۰۰ است. دستگاه طوری برنامه نویسی شده که بین هر گام، زمانی که صفحه کاملاً متوقف است یک عکس می گیرد و آن عکس در حافظه ی گوشی موبایل ذخیره می شود. علاوه بر تعداد گام، زاویه و موقعیت دوربین (ارتفاع دوربین) نیز قابلیت تنظیم دارد. دوربین توسط یک موتور پله ای به وسیله ی تسمه ی دندانه دار در جهت ارتفاع می تواند حرکت کند. عوامل منجر به افزایش کیفیت تصاویر که افزایش کیفیت مدل سه بعدی را به همراه دارد، رنگ، مقدار و جهت نور

تابیده‌شده به جسم مورد اسکن و همچنین رنگ پس‌زمینه می‌باشد. از یک منبع نور سفید گسترده توسط LED که در سقف دستگاه قرار دارد استفاده شده است؛ البته از فلاش دوربین گوشی همراه نیز می‌توان بهره برد. رنگ پس‌زمینه سبز انتخاب شده زیرا خروجی بهتری به ارمغان می‌آورد. شکل ۶ تصاویر ثبت‌شده در نرم‌افزار 3DF Zephyr را نشان می‌دهد. ابر نقاط تشکیل شده به‌خوبی مشاهده می‌شود و با اتصال این نقاط به یکدیگر مدل سه‌بعدی استخراج می‌گردد.



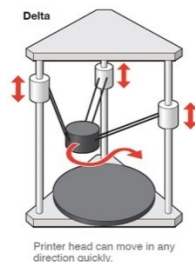
شکل ۶ محیط نرم‌افزار 3DF Zephyr جهت تشکیل ابر نقاط

### ۳-۳- ساختار و عملکرد چاپگر سه‌بعدی دستگاه

چاپگر دستگاه بر مبنای مکانیزم حرکتی ربات دلتا عمل می‌کند که در ادامه به تشریح آن پرداخته می‌شود.

#### ۳-۳-۱- تشریح مکانیزم ربات دلتا

مکانیزم ریل خطی و تسمه‌ای در سه طرف چاپگر نصب می‌شوند. به هر تسمه یک بازو متصل است که در امتداد ریل خطی جابجا می‌شود. بازوهای سه طرف در مرکز به هم می‌رسند، یعنی جایی که نازل قرار گرفته است. هنگامی که یک بازو به‌صورت عمودی به سمت بالا حرکت می‌کند، نازل ربات در جهت همان ریل به حرکت درمی‌آید و وقتی به سمت پایین حرکت می‌کند، نازل از آن دور می‌شود. اگر دو بازو به سمت بالا حرکت کنند، نازل به سمت مرکز بین دو ریل حرکت می‌کند و هنگام حرکت به سمت پایین، عکس این امر اتفاق می‌افتد. برای ایجاد لایه‌های مسطح هر سه محور به‌صورت منطبق و مشترک حرکت می‌کنند. در این چاپگر از سیستم حرکتی بازوهای ۱۲۰ درجه‌ای استفاده شده که باعث کاهش ارتعاش‌های دستگاه حین پروسه‌ی چاپ سه‌بعدی می‌شود [۱۶]؛ به این صورت که برای حرکت در راستاهای  $x, y, z$  هر سه موتور با هم و به‌طور هم‌زمان کار می‌کنند. به‌عنوان مثال، برای حرکت در راستای مثبت محور  $x$  یکی از موتورها به سمت بالا حرکت کرده، دو موتور دیگر به سمت پایین حرکت می‌کنند. چاپگرهای سه‌بعدی با سیستم حرکتی دلتا معمولاً جهت چاپ سه‌بعدی مدل‌های بلند مناسب هستند و به همین دلیل محدودیت در اندازه‌ی سطح چاپ دارند. علاوه بر آن، پروسه‌ی کالیبراسیون و ایرادیابی این نوع چاپگرهای سه‌بعدی با توجه به پیچیده بودن سیستم حرکتی آن‌ها کمی سخت و زمان‌بر است. بخشی از هندسه از اصل پانتوگراف<sup>۱۸</sup> پیروی می‌کند. مقایسه‌ی نمونه‌های چاپگر سه‌بعدی با مکانیزم دلتا و کارترین با آزمایش تحت فشار صورت گرفت. در این آزمایش، قطعات تولیدی را تحت تست فشار دستگاه پرس قرار دادند و کمترین و بیشترین نیروهایی که به نمونه‌ها وارد شد تا نمونه‌ها متلاشی شوند ثبت گردید. نمونه‌های ساخته‌شده با چاپگر دلتا عملکرد بهتری از خود نشان دادند [۱۷].



شکل ۷ ربات خطی دلتا

<sup>18</sup> Principle of pantograph

## ۳-۳-۲- پارامترهای طراحی ربات دلتا، زاویه‌ی بازوی ربات

زاویه‌ی بازوی ربات زاویه‌ای است که بازوهای ربات زمانی که نازل در مرکز قرار گرفته با محور افق می‌سازند. این زاویه رابطه‌ای مستقیم با طول بازو دارد. به علت نصب تجهیزات مثل فن خنک‌کننده، این زاویه معمولاً به ۹۰ درجه نمی‌رسد. برای رسیدن به دقت و کیفیت مطلوب برای ساخت قطعه، زاویه‌ی بازو همواره در شعاع قابل دسترس باید بین ۲۰ الی ۶۰ درجه قرار گیرد. یکی از پارامترهای اساسی طراحی ربات دلتا همین زاویه‌ی بازو است زیرا تأثیر بسیار زیادی بر روی پایداری و سرعت نازل دارد.

جدول ۲ تأثیر زاویه‌ی بردار بر روی حرکت نازل

زاویه بازو	ضریب سرعت
۲۲/۵°	۲/۴۱
۲۰°	۲/۷۵
۱۷/۵°	۳/۱۷
۱۵°	۳/۷۳
۱۲/۵°	۴/۵۱

همان‌طور که در جدول ۲ دیده می‌شود اگر بازوهای ربات به‌اندازه‌ی کافی بلند انتخاب نشوند، سبب می‌شود زاویه‌ی بازو مقدار کمی داشته باشد. کم بودن مقدار زاویه‌ی بازو سبب افزایش ضریب سرعت می‌شود. ضریب سرعت، نسبت بین سرعت حرکت افقی نازل با سرعت عمودی واگن بر روی ریل را نشان می‌دهد. به‌عبارت‌دیگر اگر حامل بازو روی ریل به مقدار خیلی کم جابجا شود، جابجایی نازل با مقدار بزرگ‌تری صورت می‌گیرد و این امر باعث می‌شود کیفیت و دقت قطعه‌ی طراحی شده کاهش پیدا کند. در این شرایط کنترل حرکت موتورها بسیار دشوار می‌شود.

## ۳-۳-۳- بررسی پایداری نازل

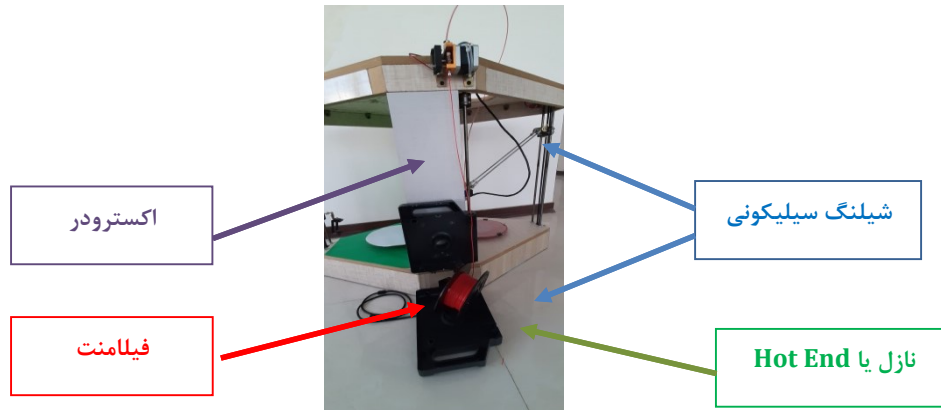
با توجه به اینکه پلیت<sup>۱۹</sup> مرکزی با شش بازو متصل شده‌اند و این بازوها بر روی آن نیرو وارد می‌کنند و با ایجاد گشتاور سعی بر تغییر شکل آن دارند، پس پلیت مرکزی باید اولاً در برابر این گشتاورها مقاومت خوبی از خود نشان دهد؛ همچنین نازل که به‌اندازه‌ی ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد گرم شده و پلیت مرکزی را تحت تنش حرارتی قرار می‌دهد، این گرم شدن پلیت نباید به حدی باشد که مقاومت در برابر گشتاور را کاهش دهد. در حالت کلی، عوامل زیر بیشترین تأثیر را بر ناپایداری نازل دارند:

- هندسه‌ی دستگاه نقش بسیار پررنگی دارد. عدم تقارن در دستگاه (ستون‌ها باید با زاویه‌ی ۱۲۰ درجه نسبت به هم تعبیه شده باشند).
- هم‌اندازه نبودن طول بازوها
- سازه‌ی ضعیف که سبب شود فاصله‌های بین ستون‌ها تغییر کند.
- عمود نبودن ستون‌ها
- تقارن نداشتن پلیت مرکزی
- مفصل‌های متصل به پلیت مرکزی نباید در برابر تغییر زاویه‌ی بازو از خود مقاومت نشان دهد. درواقع مقاومت آن در برابر گشتاور ناچیز باشد و به‌عبارت‌دیگر، اصطکاک در مفصل کروی باید ناچیز باشد.

<sup>19</sup> Plate

### ۳-۳-۴- فن آوری FDM دستگاه جهت چاپ قطعات

فیلامنت یا همان ماده‌ی مصرفی به‌وسیله‌ی یک موتور پله‌ای به سمت نازل هدایت می‌شود. برای اینکه وزن نازل کمتر شود موتور بر روی بدنه ثابت شده است و فیلامنت از طریق یک شیلینگ سیلیکونی نسوز به سمت نازل هدایت می‌شود. این امر باعث کاهش اینرسی نازل می‌شود و در نتیجه نازل در تغییر جهت‌های ناگهانی عکس‌العمل بهتری از خود نشان می‌دهد. در شکل ۸ سیستم تغذیه‌ی چاپگر دستگاه نشان داده شده است.



شکل ۸: سیستم تغذیه‌ی چاپگر

### ۳-۳-۵- صفحه‌ی داغ

صفحه‌ی داغ مدل PCB که سطح کار است و قطعه بر روی آن ساخته می‌شود باید مجهز به یک حسگر حرارتی شود تا دمای صفحه‌ی داغ را به‌صورت فیدبک به برد Ramps منتقل کند. حسگر حرارتی زیر این صفحه توسط چسب نواری نسوز به‌طور صحیح نصب می‌شود. زمانی که لایه‌ی اول قطعه‌ی کار در حال چاپ هست، هرچقدر دمای صفحه‌ی داغ بالاتر باشد، چسبندگی بهتری خواهد داشت. لایه‌ی اول نقش بسیار مهمی در استحکام قطعه دارد. اگر این لایه به‌خوبی به صفحه نچسبد مابقی لایه‌ها با مشکل مواجه می‌شوند و قطعه‌ی مناسبی چاپ نخواهد شد.

### ۳-۳-۶- فیلامنت یا ماده‌ی مصرفی دستگاه

ABS به‌دلیل خواص منحصربه‌فردی همچون مقاومت بالا در برابر حرارت (تا ۲۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد)، ضد آب بودن، انعطاف و ضربه‌پذیری نسبی و نیز قیمت مناسب‌تر نسبت به سایر مواد اولیه‌ی مورد استفاده در صنعت چاپ سه‌بعدی، توجه بسیاری از کاربران را به‌سمت خود معطوف ساخته است. در تولید ABS سعی شده تا خواص مطلوب فیزیکی (از جمله چسبندگی بین لایه‌ها) افزایش و نیز مشکلات کاربری پیش رو (مانند انتشار بوی بد مواد هنگام انجام چاپ) کاهش یابد. بنابراین اگر نیاز به ساخت قطعاتی با ماندگاری بالا و مقاومت بیشتر نسبت به عوامل محیطی (نور آفتاب، رطوبت و ...) و همچنین قابلیت پرداخت آسان قطعه (مانند سمباده‌خوری) پس از پایان فرآیند چاپ هست، ABS انتخابی عالی برای چاپگر سه‌بعدی می‌باشد. لازم به‌ذکر است که این فیلامنت، بر روی چاپگرهایی که صفحه داغ آن‌ها مجهز به گرم‌کننده (تا دمای ۱۰۰-۸۵ درجه سانتی‌گراد) است، بهترین نتیجه را به‌همراه دارد.

### ۳-۴-۴- برد کنترل‌ی دستگاه

برای کنترل چاپگر از برد آردوینو MEGA 2560 R3 و برد توسعه‌ای RAMPS 1.4 که مخصوص چاپگر سه‌بعدی است استفاده شده است. همچنین از برد آردوینو UNO برای اسکنر دستگاه استفاده می‌شود که توسط این برد، عمل عکس‌برداری از زوایای مختلف جسم و کنترل موقعیت دوربین انجام می‌شود.

## ۳-۵-۱- نرم افزار

## ۳-۵-۱- Firmware (سیستم عامل یا سفت افزار)

یک چاپگر سه‌بعدی سازه‌ای بی‌جان از فلز و موتورهای پله‌ای و تجهیزات الکتریکی است. این Firmware یا همان سفت‌افزار است که به این مکانیک بی‌جان، زندگی می‌بخشد (در کنار مغز دستگاه یا مادربرد). سفت‌افزار، فایل جی‌کد را می‌خواند و پیام‌های الکتریکی مورد نیاز برای کنترل چاپگر و ایجاد اشیاء اکستروود شده با جزئیات قابل توجه را تولید می‌کند. فرآیند کنترل چاپگر سه‌بعدی، بسیار فراتر از چیزی است که به چشم می‌آید. در پشت‌صحنه، میلیون‌ها محاسبه برای کنترل موتورهای پله‌ای، فن‌ها و گرم‌کننده‌ها لازم است. چاپ سریع و با جزئیات بالا، بار زیادی را بر دوش سفت‌افزار می‌گذارد که برنامه‌های کامپیوتری است که روی سخت‌افزار میکروکنترلر چاپگر سه‌بعدی اجرا می‌شود. هدف آن، ترجمه‌ی محتوای فایل‌های جی‌کد به سیگنال‌های الکتریکی است که این سیگنال‌ها اجزای چاپگر سه‌بعدی را فعال یا غیرفعال می‌کنند. فایل جی‌کد (G-code) فهرستی از دستورها و مختصات است که مدل سه‌بعدی را برای فرآیند چاپ توصیف می‌کند. جی‌کد بر مبنای مدل مورد نظر از طریق برنامه‌های کامپیوتری موسوم به نرم‌افزار اسلایسر تولید می‌شود. میکروکنترلر برای حرکت دادن موتورها، پالس‌های پله‌ای را به درایورها ارسال می‌کند. برای این‌که میکروکنترلر به‌درستی حامل‌ها را به مختصات جدید منتقل کند، باید دقیقاً بداند که با ارسال هر پالس، هر یک از حامل‌های چاپگر سه‌بعدی چقدر حرکت می‌کنند. این تبدیل پالس پله‌ای به فاصله‌ی خطی، به شیوه‌ی نصب و تنظیم بخش انتقال نیرو بستگی دارد.

## ۳-۵-۲- سیستم عامل‌های رایج چاپگر سه‌بعدی

سه سیستم‌عامل Marlin – Smoothie – RepRap Firmware در اینجا مدنظر است و هرکدام از آن‌ها دارای خصوصیتی منحصربه‌فرد است که باید با توجه به مورد دستگاه از آن‌ها استفاده کرد (مثل سیستم‌عامل ویندوز و لینوکس برای کامپیوتر). سیستم‌عامل مارلین به‌صورت Open Source موجود است که باید شخصی‌سازی صورت گیرد یعنی با توجه به مشخصات فنی موتورها، درایورها، دندانه‌های تسمه و پولی، نوع حسگرها و... شخصی‌سازی شود. خصوصیت مارلین در این است که ارزان‌قیمت و در دسترس بوده، توانایی شخصی‌سازی را دارد و هماهنگی خوبی با چاپگرهای FDM و دلتا دارد.

## ۳-۵-۳- نرم‌افزار تولید G-code

در این بخش به نرم‌افزارهایی که مدل سه‌بعدی را به G-code تبدیل می‌کنند اشاره می‌شود. برخی از تنظیمات اساسی و مهم نیز بیان می‌شود. در جدول ۳ نرم‌افزارهای تولیدکننده‌ی G-code آمده است.

جدول ۳ نرم‌افزارهای تولیدکننده‌ی G-Code

نرم افزار	قیمت	سایت	کارترین/دلتا
Repetier-Host	پولی و دارای نسخه‌ی رایگان	www.repetier.com	کارترین و دلتا
Cura	رایگان	www.ultimaker.com	کارترین و دلتا
Mattercontrol	رایگان به‌همراه ماژول‌های پولی	www.mattercontrol.com	کارترین
Slice3r	رایگان	www.slice3r.com	دلتا

## ۳-۵-۴- نرم‌افزار Ultimaker Cura

نرم‌افزار قدرتمندی است که مدل سه‌بعدی را برای چاپ آماده می‌کند. این نرم‌افزار توسط شرکت Ultimaker برای چاپگرهای مختلف ارائه شده و دارای قابلیت‌های پیش‌نمایش مدل سه‌بعدی، Slicer، تولید G-Code و ارسال‌کننده‌ی G-Code به چاپگر هست. Ultimaker Cura با بیش از ۲۰۰ گزینه برای اعمال تنظیمات مختلف، فرآیند چاپ سه‌بعدی را ساده‌تر نموده است. در این نرم‌افزار بعد از فراخوانی مدل سه‌بعدی، کاربر می‌تواند تنظیمات چاپ از قبیل تعیین ضخامت لایه‌ها، میزان تراکم قطعه، تعیین تعداد دیواره‌های عمودی قطعه، سرعت چاپ، تنظیم حرارت نازل و صفحه‌ی داغ، ساپورت‌گذاری و غیره را انجام دهد.

سپس نرم‌افزار مدل را همراه با تنظیمات کاربر تبدیل به G-Code می‌نماید. در واقع فایلی که حاصل پردازش تصاویر واحد اسکنر است ابتدا فایل STL آن استخراج شده، سپس این فایل STL در برنامه‌ی اسلایسر CURA تبدیل به G-Code شده و تنظیمات چاپ را می‌توان در قالب G-Code به چاپگر ارسال نمود.

### ۳-۵-۵- مونتاژ نهایی دستگاه فتوکپی سه‌بعدی

مونتاژ صحیح و دقیق دستگاه امری بسیار با اهمیت است و همان‌طور که اشاره شد رابطه‌ی مستقیم بر روی دقت عملکرد دستگاه دارد. اجزای مکانیک باید از یکپارچگی منسجمی تبعیت کنند. کوچک‌ترین انحراف در ستون‌های دستگاه، نتیجه‌ای نامطلوب به همراه خواهد داشت. تجهیزات الکتریکی دستگاه هم باید طبق اصول جانمایی شوند و از تهویه‌ی مناسب برخوردار باشند زیرا تجهیزاتی از قبیل پاور سوئیچینگ<sup>۲۰</sup> و درایورهای موتورهای پله‌ای و حتی وجود صفحه‌ی داغ بر روی سازه‌ی دستگاه ایجاد حرارت می‌کنند که اگر این حرارت کنترل نشود باعث آسیب زدن به این تجهیزات الکتریکی می‌شود. سیم‌کشی بین اجزای مختلف باید با دقت صورت گیرد تا ضمن حفظ زیبایی ظاهری، بر روی عملکرد اجزای متحرک مکانیکی تأثیرگذار نباشد. از آنجاکه نازل ربات به وسیله‌ی المنت تا دمای نزدیک به ۲۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد داغ می‌شود باید تدابیر لازم اندیشیده شود تا این حرارت باعث ذوب شدن روکش سیم‌های المنت نازل نشود، از این‌رو برای رساندن جریان الکتریسیته به المنت نازل از سیم با روکش نسوز استفاده شده است. بر روی نازل چاپگر یک حسگر حرارتی تعبیه شده تا دمای نازل را به میکروکنترلر گزارش دهد. سیم حسگر و سیم حامل جریان الکتریسیته داخل سیم‌جمع‌کن مناسب قرار گرفته‌اند. سرانجام مطابق با شکل ۹ و بر اساس طرح مفهومی دستگاه در محیط نرم‌افزار Auto Desk Inventor (Auto CAD) مونتاژ دستگاه انجام شد.



شکل ۹ دستگاه فتوکپی سه‌بعدی

### ۴- نتیجه و عملکرد دستگاه فتوکپی

برای نمونه از یک مجسمه اسکن گرفته و پس از تولید مدل سه‌بعدی آن، توسط چاپگر دستگاه نمونه‌ی ثانویه‌ی آن با دقت مطلوبی ساخته شد (شکل ۱۰).

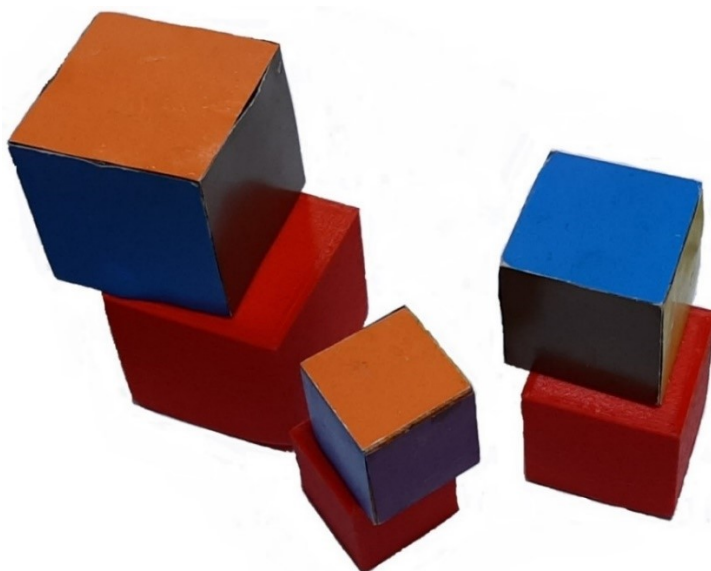
### ۵- بررسی دقیق ابعادی برای حصول دقت و تکرار پذیری

برای رسیدن به دقت دستگاه ابتدا سه نمونه مکعبی با ابعاد (۳۰\*۳۰\*۳۰)، (۴۰\*۴۰\*۴۰) و (۵۰\*۵۰\*۵۰) میلی‌متر مطابق شکل ۱۱ ساخته شد. برای ایجاد تمایز بین وجه‌های مکعب، هر وجه از مکعب‌ها با رنگ‌های متمایز رنگ‌آمیزی گردید و بعد از انجام عملیات اسکن توسط قسمت اسکنر و ساخت مدل سه‌بعدی از آن‌ها، مشابه سه‌بعدی قطعات توسط پرینتر سه‌بعدی ساخته شد. قطعات ساخته‌شده با کولیس با دقت ۰/۰۵ میلی‌متر اندازه‌گیری شده و نتایج حاصله در جداول ۴ و ۵ آمده است.

<sup>20</sup> power switching



شکل ۱۰ نمونه‌ی اولیه و مشابه کپی شده توسط دستگاه کپی سه‌بعدی



شکل ۱۱ مدل‌های ساخته‌شده و پرینت آن‌ها

جدول ۴ اندازه‌های مربوط به مکعب‌های نمونه و ساخته شده

ارتفاع (mm)	طول (mm)	عرض (mm)	نمونه‌های مورد آزمایش	
۳۱/۲۵	۳۲	۳۱/۶	نمونه مورد اسکن	نمونه ۳
۳۰	۳۰/۸	۳۰/۳۵	مدل چاپ شده	
۴۰/۱	۴۱	۴۰/۷	نمونه مورد اسکن	نمونه ۴
۴۰/۳	۴۱/۱	۴۰/۶۵	مدل چاپ شده	
۵۰/۱	۵۰/۵	۵۰/۴	نمونه مورد اسکن	نمونه ۵
۵۰	۵۱	۵۰/۹۵	مدل چاپ شده	

جدول ۵ محاسبه دقت دستگاه

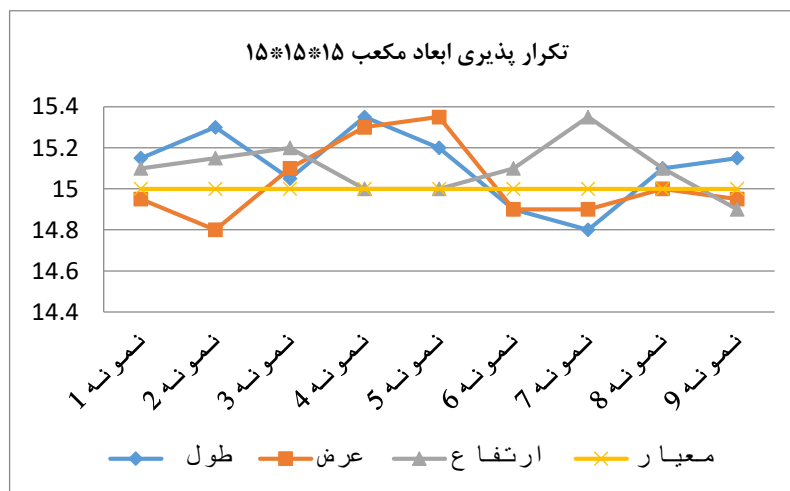
دقت در عرض	دقت در طول	دقت در ارتفاع	دقت در حجم	حجم (میلیمتر مکعب)	نمونه های مورد آزمایش
۰/۶۲	۰/۵	۰/۲۴	۰/۱۲	۶۶۹۱۴/۸۷ ۶۷۳۲۹/۸۱	نمونه مورد اسکن مدل چاپ شده
۰/۱۱	۴	۳/۷	۳/۹	۳۱۶۰۰ ۲۸۰۴۳/۴	نمونه مورد اسکن مدل چاپ شده
۱/۸	۰/۲	۱	۱/۰۹	۱۲۷۵۱۴/۵۲ ۱۲۹۹۲۲/۵	نمونه مورد اسکن مدل چاپ شده

علت اختلاف‌ها بین مدل ساخته‌شده و نمونه، الگوی شروع و دمای نامناسب صفحه‌ی گرم پرینتر بود که در مراحل بعد پس از آزمون و خطای متعدد تنظیم گردید. برای محاسبه‌ی تکرارپذیری از مدل‌های کوچک‌تر برای صرفه‌جویی در مصرف فیلامنت استفاده شد.

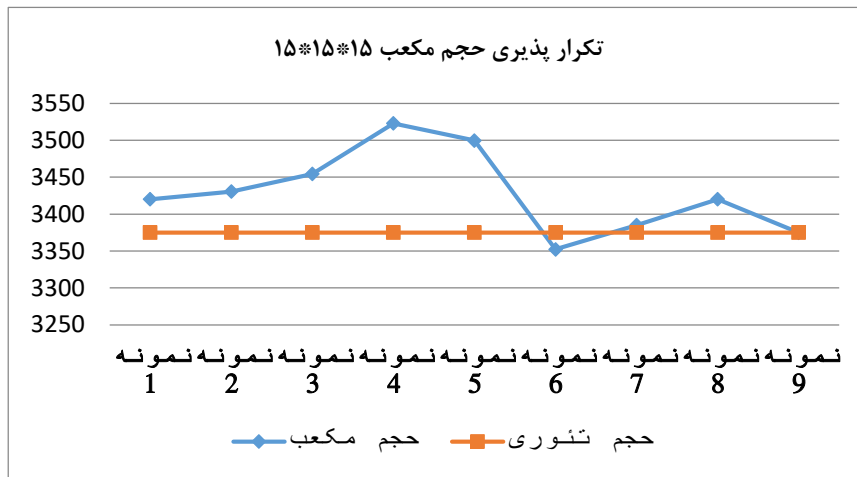
مدل‌های بعدی مطابق شکل ۱۲ شامل یک واشر با ابعاد mm ((ضخامت)۳\*(قطر داخلی)۱۵\*(قطر خارجی)۲۴) و یک رینگ با ابعاد mm ((۶\*۱۵\*۳۰) و یک مکعب به ابعاد mm ((۱,۵\*۱,۵\*۱,۵) است که پس از اسکن و ساخت مدل سه‌بعدی از آن‌ها در کامپیوتر، مدل آن‌ها توسط پرینتر ساخته و ابعاد برداری شد. گزارش‌های این ابعاد برداری که با کولیس با دقت ۰/۰۵ انجام شده، به تفصیل در نمودارهای ۱ تا ۱۰ آمده است.



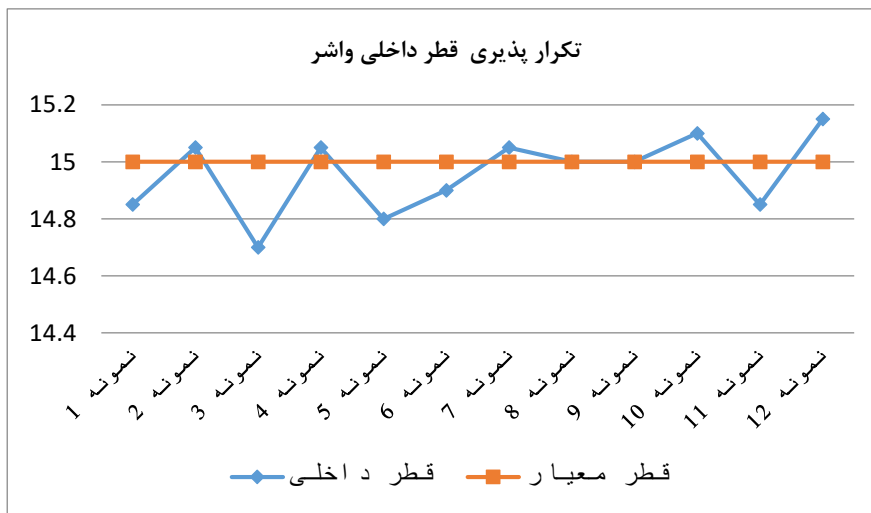
شکل ۱۲ نمونه‌های ساخته‌شده برای محاسبه تکرارپذیری



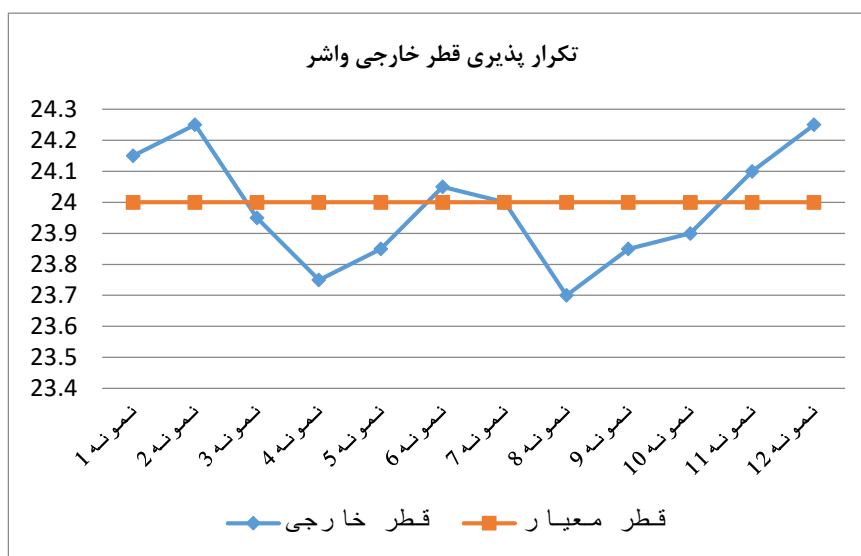
نمودار ۱ تکرارپذیری ابعاد مکعب ۱۵\*۱۵\*۱۵



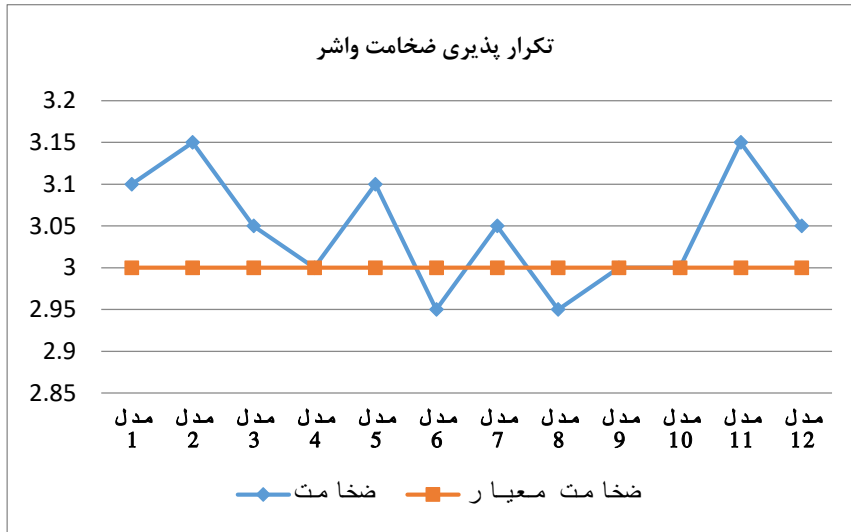
نمودار ۲ تکرار پذیری حجم مکعب ۱۵\*۱۵\*۱۵



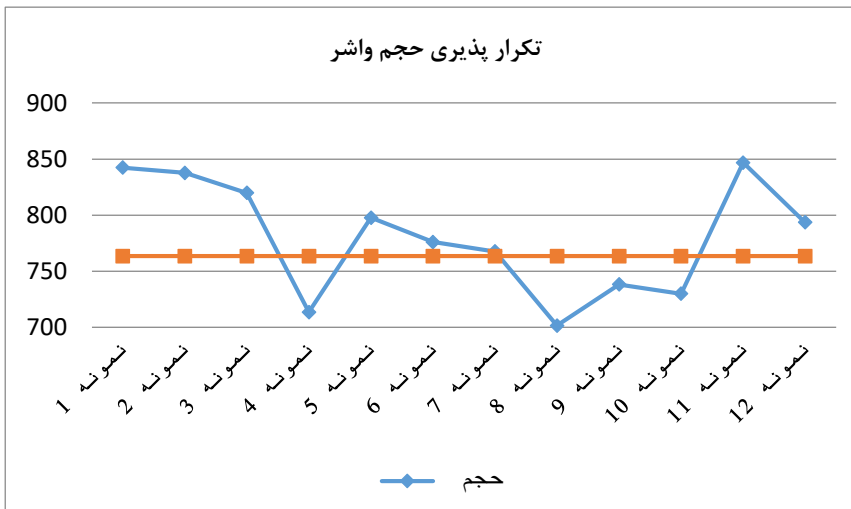
نمودار ۳ تکرار پذیری قطر داخلی و اشرف



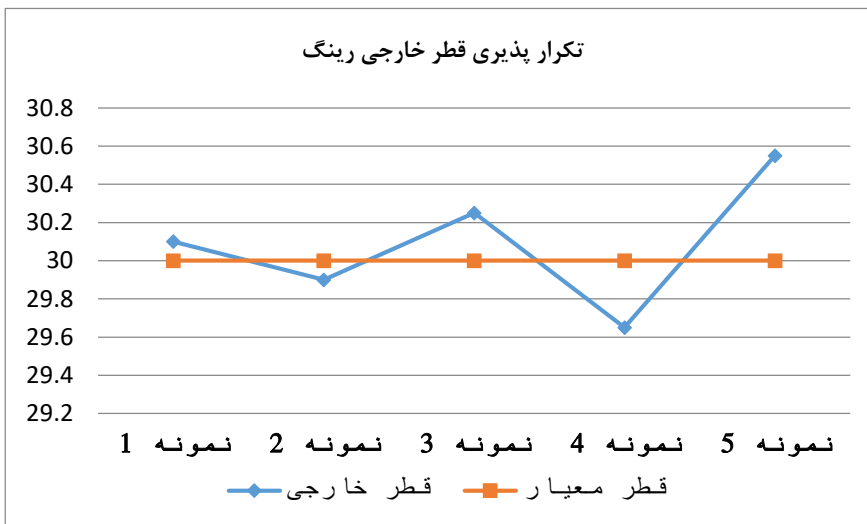
نمودار ۴ تکرار پذیری قطر خارجی و اشرف



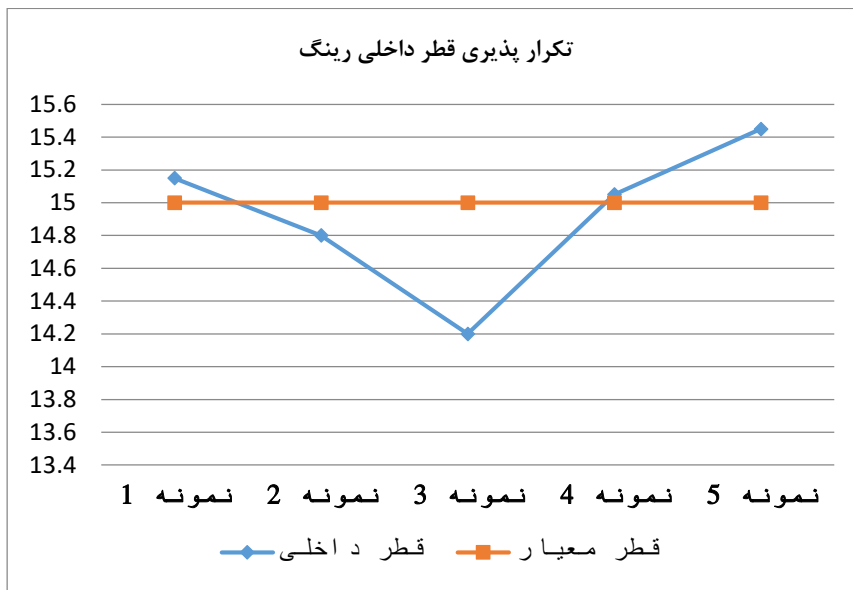
نمودار ۵ تکرار پذیری ضخامت واشر



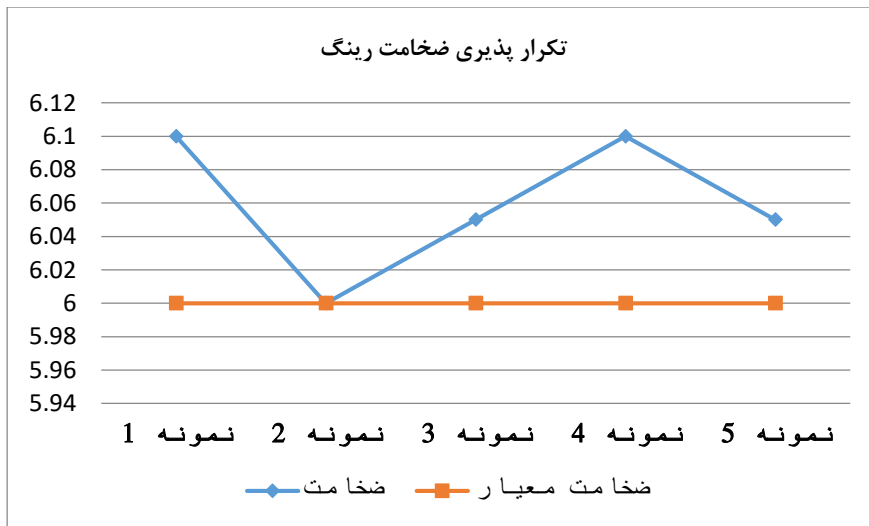
نمودار ۶ تکرار پذیری حجم واشر



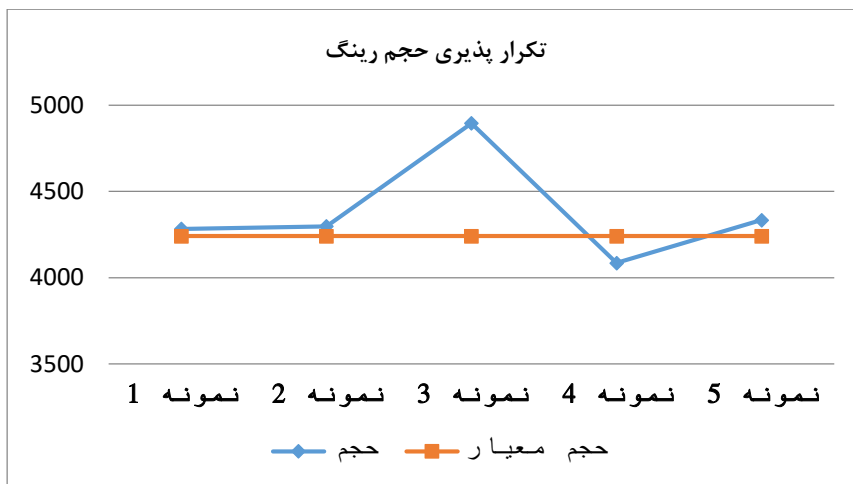
نمودار ۷ تکرار پذیری قطر خارجی رینگ



نمودار ۸ تکرار پذیری قطر داخلی رینگ



نمودار ۹ تکرار پذیری ضخامت رینگ



نمودار ۱۰ تکرار پذیری حجم رینگ

\*واحد تمام طولها میلی متر و واحد تمام حجمها میلی متر مکعب می باشد.

با توجه به ابعاد هندسی- فیزیکی دستگاه و تجهیزات الکتریکی استفاده‌شده در آن، جدول ۶ مشخصات عملکردی دستگاه را نشان می‌دهد.

جدول ۶ مشخصات استخراجی از دستگاه	
موضوع	مقدار
دقت ثبت مختصات نقاط در فضای سه بعدی	+۰/۳ mm
فاصله‌ی مجاز برای سوژه‌ی اسکن	۲۰-۴۰ cm
سیستم حرکت میز گردان	Nema stepper motor – 1.7 A 1.8 deg/step
دوربین	۲۵ مگاپیکسل (لنز واید ۲۶ میلی‌متری، فوکوس خودکار)
فرمت‌های خروجی	STL, OBJ, DAE, PLY, g TF2
دقت (در فاصله 20 سانتی‌متر)	۰/۵ mm
بیشینه‌ی ابعاد قابل اسکن	H=۴۰ cm & D=۲۰ cm
بیشینه‌ی وزن قابل تحمل (برای پایه‌ی چرخان)	۴ Kg

## ۶- جمع‌بندی

دستگاه کپی سه‌بعدی از دو بخش عمده‌ی سخت‌افزار و نرم‌افزار تشکیل شده است. قسمت سخت‌افزار آن نیز به دو بخش تجهیزات مکانیکی و الکتریکی تقسیم می‌شود. برای داشتن یک سیستم کارآمد باید اطلاعات جامع نسبت به بخش‌هایی که ذکر شد حاصل شود. ضعف در هر یک از بخش‌ها باعث می‌شود که عملکرد کل دستگاه تحت تأثیر قرار گیرد. اگر دستگاه دارای نرم‌افزار قوی و بدون عیب و نقص باشد درحالی‌که سخت‌افزار آن با نقص مواجه است (یا بالعکس)، نتیجه‌ی مطلوبی حاصل نخواهد شد. رابطه‌ی مستقیم بین سخت‌افزار و نرم‌افزار دستگاه وجود دارد و هرچقدر سخت‌افزار و نرم‌افزار دستگاه با دقت بیشتر طراحی شوند خروجی دستگاه با کیفیت و دقت بیشتری همراه خواهد بود. مشکل مهمی که این روش ساخت قطعه دارد، سرعت پایین آن می‌باشد. در راستای کاهش این مشکل، مکانیزم دلتا انتخاب شد که ساختارش سبب می‌شود سرعت چاپ افزایش یابد. از فناوری FDM نیز به دلیل سهولت کار با آن و در دسترس و ارزان بودن تجهیزاتش کمک گرفته شد. جداول ۴ و ۵ نشان‌دهنده‌ی میزان دقت دستگاه و نمودارهای ۱ تا ۱۰ بیانگر میزان تکرارپذیری دستگاه هستند. جدول ۶ نیز مشخصات دستگاه نهایی پیاده‌سازی شده را نشان می‌دهد.

## ۷- مراجع

- [1] Shahrubudin N, Lee T C, Ramlan R. An overview on 3D printing technology: Technological, materials, and applications. *Procedia Manufacturing*. 2019;35:1286-1296.
- [2] Tomasini A, León-Santiesteban H H. *Fungal Bioremediation*. CRC Press Boca Raton, FL, USA.: 2019.
- [3] Lanman D, Taubin G. Build your own 3D scanner: 3D photography for beginners. *ACM siggraph 2009 courses2009*. 1-94.
- [4] Son S, Park H, Lee K H. Automated laser scanning system for reverse engineering and inspection. *International Journal of machine tools and manufacture*. 2002;42:889-897.
- [5] Panayiotou S, Soper A. Artificially intelligent 3D industrial inspection system for metal inspection. 130-135.
- [6] Hyun K, Gerhardt L A. The use of laser structured light for 3D surface measurement and inspection. 215-221.

- [7] Schick A, Kedziora M. Inspection and process evaluation for flip chip bumping and CSP by scanning 3D confocal microscopy.116-119.
- [8] Champ P. Reverse engineering in industrial applications using laser stripe triangulation.4-1.
- [9] Ali N S. Reverse engineering of automotive parts applying laser scanning and structured light techniques. MA Sc Thesis, The University of Tennessee, Knoxville, USA. 2005.
- [10] Burston M T, Sabatini R, Clothier R, Gardi A, Ramasamy S. Reverse engineering of a fixed wing unmanned aircraft 6-DoF model for navigation and guidance applications.629;164-169.
- [11] Kumar L, Shuaib M, Tanveer Q, Kumar V, Javaid M, Haleem A. 3D scanner integration with product development. Int J Eng Technol. 2018;7:220-225.
- [12] Baltsavias E P. A comparison between photogrammetry and laser scanning. ISPRS Journal of photogrammetry and Remote Sensing. 1999;54:83-94.
- [13] Yastikli N. Documentation of cultural heritage using digital photogrammetry and laser scanning. Journal of Cultural heritage. 2007;8:423-427.
- [14] Remondino F. Heritage recording and 3D modeling with photogrammetry and 3D scanning. Remote sensing. 2011;3:1104-1138.
- [15] Rozsos R S, Buna Z L, Ștefan B, Comes R, Tompa V. Design and development of a linear DELTA 3D printer. ACTA TECHNICA NAPOCENSIS-Series: APPLIED MATHEMATICS, MECHANICS, and ENGINEERING. 2020;63.
- [16] Simons A, Avegnon K L M, Addy C. Design and development of a delta 3D printer using salvaged e-waste materials. Journal of Engineering. 2019;2019.
- [17] Ratiu M, Prichici M A, Anton D M, Negrau D C. Compression testing of samples printed on Delta and Cartesian 3D printer.1169;012008.