



## استفاده از فناوری کنترل عددی در رسم و نقاشی دو بعدی به وسیله نازل رنگ پاش

محمد امیر پرتانیان<sup>۱</sup>، بهنام معتکف ایمانی<sup>۲\*</sup>

۱- فارغ التحصیل کارشناسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران

۲- استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران

\* ایمیل نویسنده مسئول: imani@um.ac.ir

## اطلاعات مقاله

## مقاله پژوهشی

دریافت: ۷ بهمن ۱۴۰۲

پذیرش: ۲۶ بهمن ۱۴۰۲

## کلیدواژگان:

کنترل عددی

تبدیل مختصات

برد آردوینو

نازل رنگ پاش

GRBL

## چکیده

امروزه فناوری کنترل عددی که از فرزکاری دو محوره بال هواپیما در دانشگاه MIT در سال ۱۹۶۸ آغاز گردید، در حوزه‌های گوناگونی به کار گرفته شده است. با توجه به قابلیت‌های چشمگیر این فناوری، کنترل عددی اخیراً در عرصه هنر هم ورود کرده است. معماری داخلی، مجسمه‌سازی، نقاشی و بسیاری موارد دیگر از کاربردهای این موضوع می‌باشد. در پژوهش پیش رو رسم و نقاشی دوبعدی به کمک تلفیق فناوری کنترل عددی و طراحی به کمک کامپیوتر مد نظر قرار گرفته شده است. حرکت دوبعدی قلم به وسیله دو موتورپله‌ای و کنترل هماهنگ زوایای چرخش موتورها انجام می‌شود. پیاده‌سازی الگوریتم کنترل حرکت نیز ابتدا بر روی فضای دکارتی انجام شده و سپس به کمک تبدیل به فضای شبه قطبی منتقل می‌شود. در ادامه این پژوهش به طراحی و راه‌اندازی سیستم کنترل پاشش رنگ به وسیله نازل رنگ‌پاش می‌پردازد. این کار قابلیت رنگ‌آمیزی و طراحی منحنی‌های گسسته و پیوسته را بر روی سطوح مختلف مورد بررسی قرار می‌دهد. در انتها دستورات ایجاد شده متناسب با جایگاه موتورها و مکانیزم کنترل پاشش رنگ توسط برد آردوینو، شیلد سی‌ان‌سی و الگوریتم GRBL به پالس‌های حرکتی تبدیل شده و شکل مورد نظر را با توجه به نوع منحنی به وسیله نازل رنگ پاش رسم می‌کند. قابلیت‌های این رسام سی‌ان‌سی توسط مثال‌های کاربردی نمایش داده شده است.

## Utilizing CNC technology in two-dimensional drawing and painting using a spray paint nozzle

Mohammad Amir Partanian<sup>1</sup>, Behnam Moetakef-Imani<sup>2\*</sup>

1- BSC Graduate, Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University, Mashhad, Iran

2- Professor, Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University, Mashhad, Iran

\* Corresponding Author's Email: imani@um.ac.ir

## Article Information

## Original Research Paper

Received: 27 January 2024

Accepted: 15 February 2024

## Keywords:

Numerical Control  
Coordinate Transformation  
Arduino Board  
Spray Paint Nozzle  
GRBL

## Abstract

Nowadays, numerical control (NC) technology, which began with the two-axis milling of aircraft wings at MIT in 1968, has been employed in various fields. Due to its remarkable capabilities, numerical control has recently entered the realm of art as well. Interior architecture, sculpture, painting, and many other areas have found applications for this technology. In the present study, the combination of numerical control technology and computer-aided design (CAD) is used for two-dimensional drawing and painting. The two-dimensional movement of the pen is achieved using two stepper motors and synchronized control of their rotation angles. The implementation of the motion control algorithm is initially performed in Cartesian space and then transformed to pseudo-polar space. Furthermore, this research investigates the design of a nozzle holder base for paint spraying and the creation of curves using this nozzle and the ability to colorize and draw both discrete and continuous curves on different surfaces is examined. Finally, the commands generated, corresponding to the positions of the motors and the control mechanism of the paint spraying, are converted into motion pulses using an Arduino board, CNC shield, and GRBL (G-code Real-time Boot Loader), enabling the desired shape to be drawn using the paint spraying nozzle. The capabilities of this CNC painter are shown by practical examples.

## Please cite this article using:

Partanian MA, Moetakef-Imani B. Utilizing CNC technology in two-dimensional drawing and painting using a spray paint nozzle. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2023 November 22;10(9):1-10. doi: 10.22034/IJME.2024.436140.1923 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

## ۱- مقدمه

دستگاه کنترل عددی به کمک کامپیوتر یک سیستم کنترل شده توسط کامپیوتر برای ماشینکاری قطعات است. این دستگاه شامل یک کنترلر سخت افزاری و یک نرم افزار کنترل کننده است که به کاربر اجازه می دهد ماشین را به دقت بالا و با سرعت بیشتری از روش های سنتی کنترل کند [۱]. یکی از مهم ترین اجزاء این دستگاه ها سرو موتور و یا موتور پله ای است که مطابق آن موقعیت نوک ابزار بر اساس پالس های ایجاد شده برای حرکت موتور تعیین می شود. در فرآیند راه اندازی موتور پله ای، انتخاب و ایجاد پروفیل حرکت مناسب، اولین مساله مهمی است که باید به آن پرداخته شود. ایجاد پروفیل حرکتی مناسب از لرزش و آسیب به موتور جلوگیری کرده و سبب بهبود عملکرد و دقت می شود [۲].

در انتخاب پروفیل حرکت پارامترهای تعیین جهت، سرعت و شتاب مورد بررسی قرار می گیرند. جهت حرکت موتور پله ای باتوجه به مثبت یا منفی بودن پالس ارسالی در حالت ساعتگرد یا پادساعتگرد قرار می گیرد [۳]. تعیین سرعت با تغییر در اختلاف زمانی موجود بین پالس های ارسالی به وجود می آید، بنابراین با ایجاد تغییر در فاصله زمانی، سرعت حرکت کنترل می شود. در این نوع حرکت که پروفیل دوزنقه ای<sup>۱</sup> یا شتاب ثابت نامگذاری می شود [۴]، به علت اینکه شتاب در نقاط توقف یا تغییر جهت موتور صفر نیست، جرک<sup>۲</sup> ایجاد می شود که در سرعت های بالا موجب آسیب به موتور، ارتعاشات و کاهش دقت خواهد شد. به کارگیری پارامتر شتاب در حرکت ابزار، یک راه حل مناسب برای کنترل جرک است در این حالت اختلاف زمانی بین پالس ها، متناسب با فرمان دریافتی تغییر می کند. بنابراین در نقاط گوشه، یا هنگام تغییر جهت موتور با اعمال حرکت جرک محدود<sup>۳</sup>، سرعت حرکت به آهستگی کم و زیاد می شود که پروفیل S-شکل<sup>۴</sup> نامیده می شود [۵].

به طور معمول در موتورهای پله ای با هر پالس ارسالی موقعیت شفت<sup>۵</sup> به اندازه  $1/8$  درجه تغییر می کند که گام حرکتی<sup>۶</sup> موتور پله ای نامیده می شود. به طور معمول برای رسیدن به دقت های بالاتر از یک گام واحد، از روش های مکانیکی و الکتریکی استفاده می شود. جعبه دنده یک سیستم مکانیکی است که نسبت سرعت و نیرو را تغییر می دهد. با تغییر این نسبت به کمک جعبه دنده مناسب میزان جابه جایی هرگام ریزتر می شود. در روش الکتریکی یا میکرواستپینگ<sup>۷</sup>، جریان به صورت پالسی تغییر می کند. این تغییرات جریان باعث تولید گام های کوچکتر در موتور می شود و در نتیجه موتور با گام های ریز تری در مکان مورد نظر حرکت می کند [۶].

ماشین های کنترل عددی به کمک رایانه بلوک های دستوری را مطابق با پروفیل حرکتی و تنظیمات تعیین شده در حرکت موتور پله ای دریافت میکنند که شامل انواع میانمایی است، خروجی این بلوک ها شامل یک رشته دستور هستند که با نظم خاصی پشت سر هم قرار گرفته و دستگاه در هر مرحله یکی از آنها را اجرا می کند [۷]. این رشته دستور که به واسطه جی کد<sup>۸</sup> تعیین می شود که غالباً در سیستم حرکت محور ها و روش جابجایی آن کاربرد دارد [۸]. در کنار فرایند میانمایی مسیر حرکت، ام کد<sup>۹</sup> به تعیین وضعیت قلم ابزار می پردازند [۹].

یکی از الگوریتم های کنترل حرکت قابل نصب بر کنترلر آردوینو GRBL<sup>۱۰</sup> است. این الگوریتم به دو صورت مسیر تقسیم مستطیلی و خطی کار می کند. الگوریتم تقسیم مربعی و مستطیلی به شکل مربع یا مستطیل بزرگ تری که مسیر حرکت دستگاه کنترل عددی در آن جا قرار دارد، تقسیم می شوند [۱۰]. هر بخش به صورت جداگانه اجرا شده و پیاده سازی مسیر حرکت توسط موتورها در هر قسمت باتوجه به دقت تعیین شده انجام می شود. در الگوریتم خطی نیز، مسیر حرکت به شکل خط مستقیم تقسیم شده و هر بخش به صورت جداگانه اجرا می شود. که در هر صورت مکانیزم آن به این صورت است که از ارسال کننده جی کد را دریافت کرده و متناسب با آن الگوریتم حرکت را استخراج می کند.

<sup>1</sup> Trapezoidal Profile

<sup>2</sup> Jerk

<sup>3</sup> Jerk-Limited Motion

<sup>4</sup> S-Shape

<sup>5</sup> Shaft

<sup>6</sup> Step

<sup>7</sup> Micro Stepping

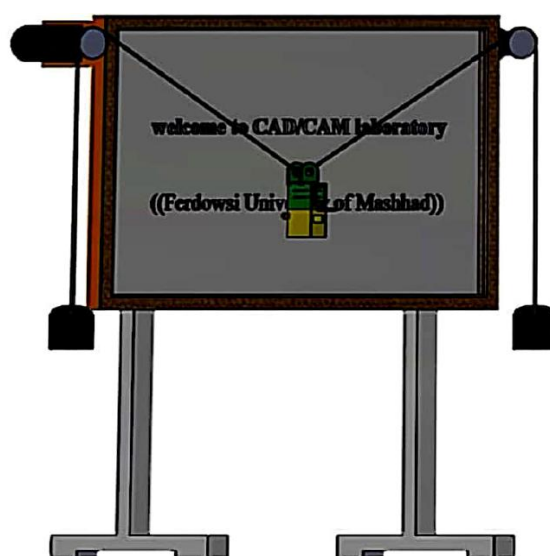
<sup>8</sup> G-Cods

<sup>9</sup> M-Cods

<sup>10</sup> G-Code Real-Time Boot Loader

دستگاه پیشنهاد شده یک نوع دستگاه کنترل عددی به کمک کامپیوتر است که از مختصات شبه قطبی برای موقعیت یابی استفاده می‌کند. در این تعریف، مطابق شکل ۱ موتورهای پله‌ای در بالای میز کار قرار می‌گیرند و فضای بین آنها محل حرکت ابزار است. هدف این دستگاه رسم منحنی‌های گسسته و پیوسته دو بعدی با شکل آزاد است و برای این منظور از ابزار نازل رنگ پاش<sup>۱</sup> استفاده می‌شود. این نوآوری باعث ساده‌تر شدن فرایند رنگ آمیزی و افزایش تنوع رنگ می‌شود. با توجه به قرارگیری موتورهای پله‌ای، امکان تغییر ابعاد صفحه کار، رسم انواع منحنی‌ها در مقیاس‌های متفاوت، با هزینه کم و سرعت بالا فراهم می‌شود.

در مکانیزم حرکت، موتورهای پله‌ای به جعبه دنده متصل شده و از طریق زنجیر غلتکی به پایه نگهدارنده متصل می‌شوند. محل قرارگیری سلونوئید فشاری نیز بر اساس جایگاه طراحی شده در پایه نگهدارنده نازل رنگ پاش تعیین می‌شود. در انتها، با استفاده از سلونوئید فشاری و کلید رله، نازل رنگ پاش وصل یا قطع می‌شود.



شکل ۱ طراحی دستگاه تحت مطالعه

## ۲- روش تحقیق

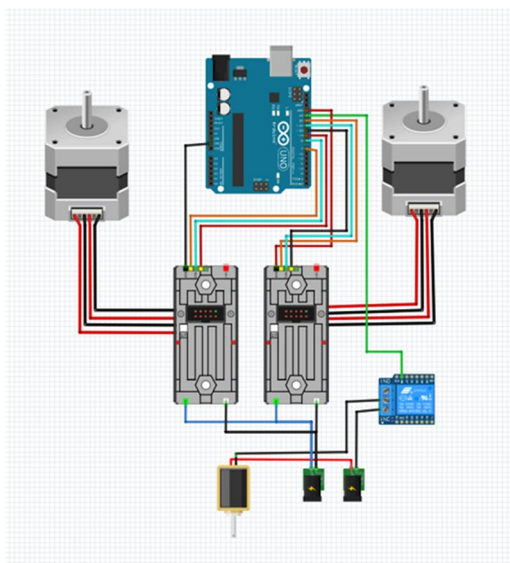
### ۲-۱- بستر آزمایش

جهت انجام آزمایشات عملی، یک مجموعه از تجهیزات و ابزارها طراحی و تهیه شده است. در این آزمایشات، از یک بستر آزمایشی استفاده شده که جزئیات آن در جدول ۱ و نحوه اتصال قطعات الکتریکی در شکل ۲ قرار گرفته است.

جدول ۱ قطعات استفاده شده در ساخت دستگاه

اردوئینو Uno	کنترلر
CNC shield v3	شلید کنترلر
ML34HD3L6500	موتور پله ای
Q2HB88	درایور
SHIH1411	سلونوئید فشاری
EAST TPG60-L1-5	جعبه دنده خورشیدی
S-128	نازل رنگ پاش

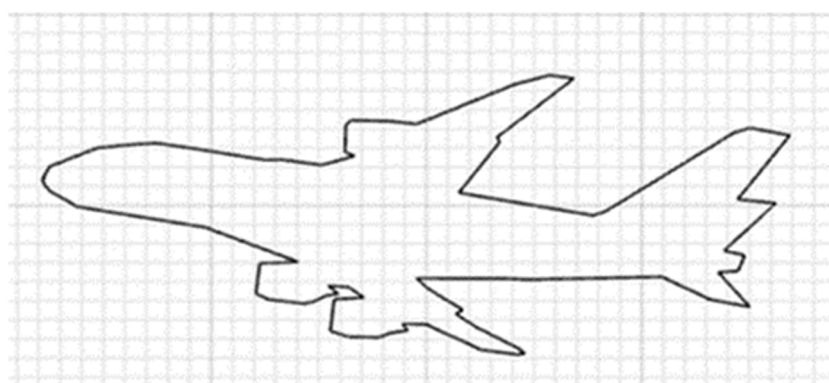
<sup>1</sup> Airbrush



شکل ۲ شبیه سازی اتصالات بستر آزمایش

## ۲-۲- راه اندازی و کنترل

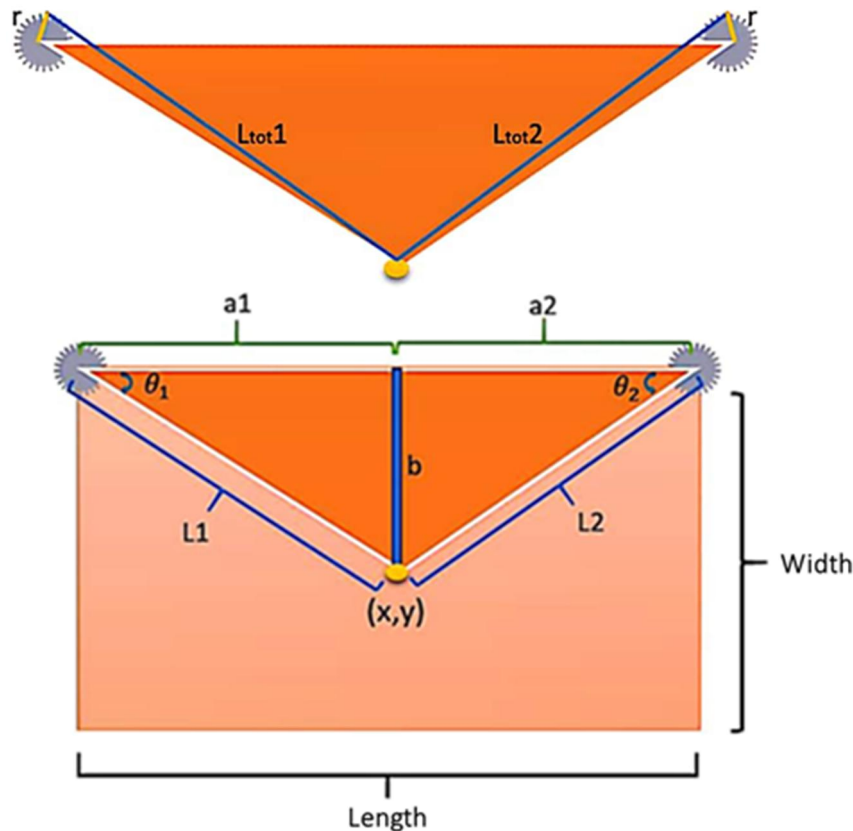
به دست آوردن مدل هندسی دقیق یک جسم یا صحنه، همواره در زمینه‌های مختلفی مانند صنایع فیلم و بازی، حفظ میراث فرهنگی، کنترل کیفیت، مهندسی پزشکی، اندازه‌گیری و مهندسی معکوس مورد توجه قرار گرفته است [۱۱]. در شکل ۳ ساده سازی تصویر هواپیما به کمک پردازش تصویر<sup>۱</sup> و تبدیل آن به یک منحنی دو بعدی انجام شده است.



شکل ۳ استخراج مختصاب لبه تصویر پردازش شده

با استخراج نقاط هندسه مورد نظر که برحسب مختصات دکارتی است، مختصات بدست آمده به مختصات موقعیت موتورها تبدیل می‌شود.

<sup>۱</sup> Image Processing



شکل ۴ تعیین مختصات ابزار با توجه به نقطه مرجع

مطابق شکل ۴، با جابه‌جایی ابزار در مختصات دکارتی، طول زنجیرها متغیر است. بنابراین با توجه به ابعاد دستگاه و مختصات نقاط، تغییرات فاصله مرکز ابزار نسبت به مرکز چرخنده‌ها در هر نقطه بدست می‌آید.

$$b = \text{Width} - y \quad (1)$$

$$a_1 = x \quad (2)$$

$$a_2 = \text{Length} - a_1 \quad (3)$$

$$L_1 = \sqrt{b^2 + a_1^2} \quad (4)$$

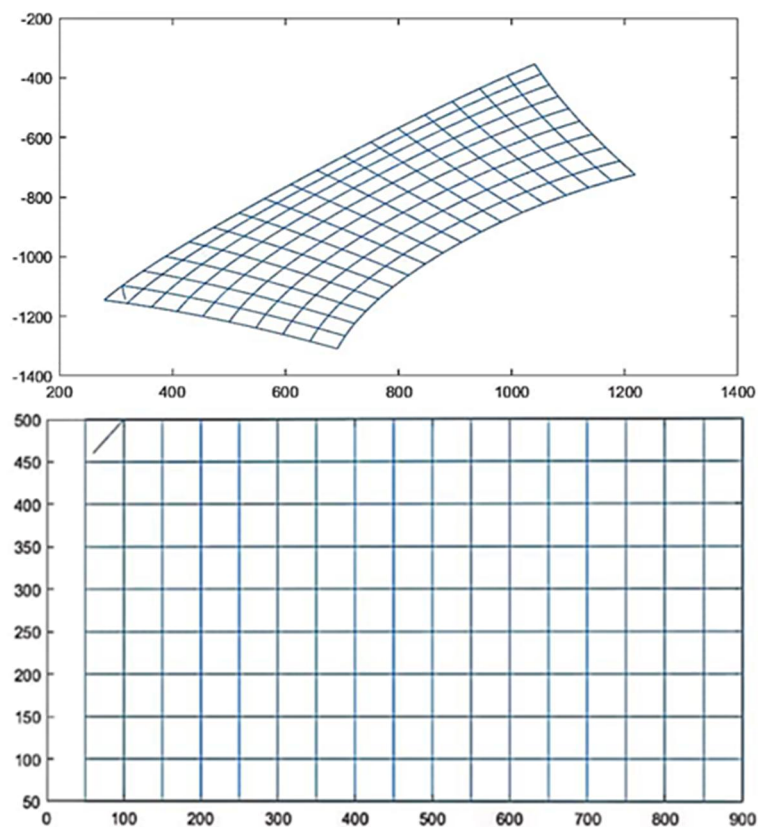
$$L_2 = \sqrt{b^2 + a_2^2} \quad (5)$$

با توجه به اینکه طول زنجیرها در نقطه مماس چرخنده محاسبه می‌شود برای محاسبه طول زنجیر، طول مماسی به عنوان متغیر نهایی محاسبه می‌شود. در نهایت با توجه به شکل ۵ این تبدیلات برای یک صفحه شطرنجی بررسی و ایجاد شده است.  $r = 45 \text{ mm}$

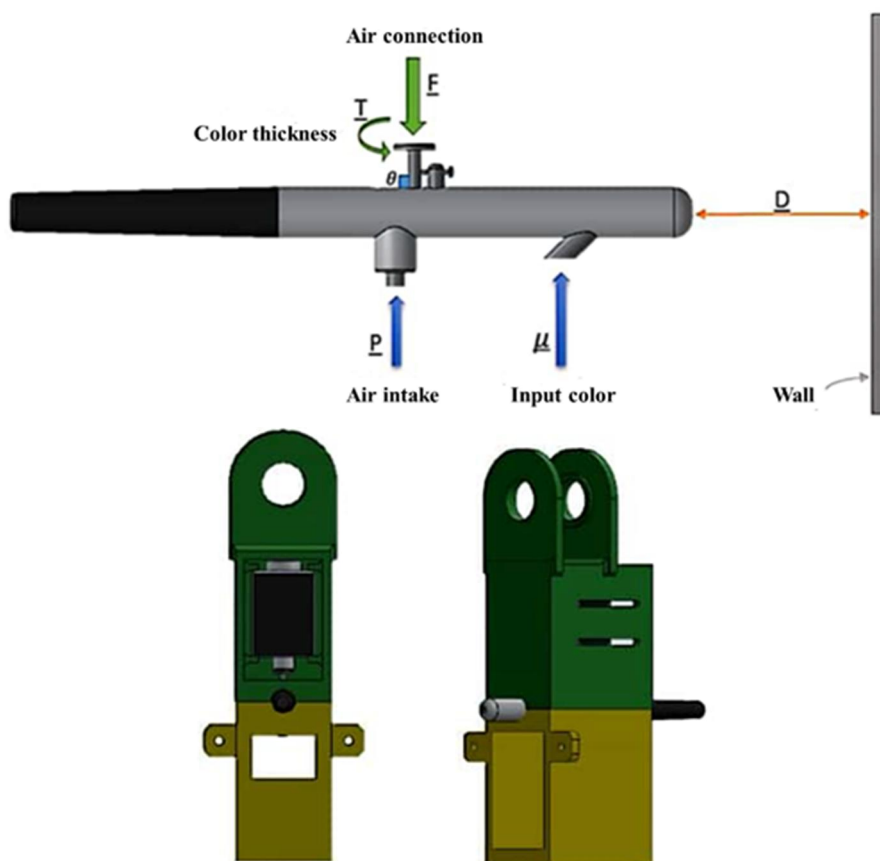
$$L_{tot1} = \sqrt{L_1^2 + r^2} \quad (6)$$

$$L_{tot2} = \sqrt{L_2^2 + r^2} \quad (7)$$

نازل رنگ‌پاش از طریق یک کمپرسور، فشار هوا را به شلنگ منتقل می‌کند که منجر به پاشیدن رنگ بر روی سطوح مورد نظر می‌شود. برای کنترل پاشش نازل رنگ‌پاش و قطع پاشش در نقاط مورد نیاز، از یک کلید الکترونیکی، رله و سلونوئید فشاری استفاده می‌شود. این اجزا الکترونیکی به منظور کنترل جریان هوا و رنگ به نازل رنگ‌پاش به کار می‌روند. برای این مکانیزم، مطابق با شکل ۶، یک پایه نگهدارنده نازل رنگ‌پاش طراحی و تولید شده است. این پایه نگهدارنده وظیفه نگهداری نازل رنگ‌پاش را بر عهده دارد تا نازل را در موقعیت صحیح و ثابت نگه دارد.

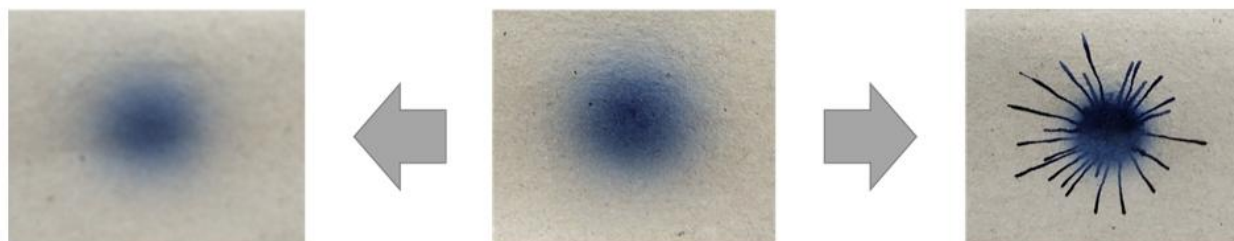


شکل ۵ تبدیل مختصات صفحه شطرنجی در نرم افزار متلب



شکل ۶ طراحی و ساخت پایه نگهدارنده نازل رنگ پاش

از جمله چالش‌های رسم به وسیله نازل رنگ پاش، تنظیم دقیق متغیرهای وابسته به کیفیت رنگ است زیرا در صورت عدم تنظیم مناسب، مطابق شکل ۷ کیفیت طرح و رنگ آمیزی تحت تاثیر قرار می‌گیرد. با فرض سرعت ثابت ۴/۱ میلی متر بر ثانیه و عدم وجود شتاب، سه عامل فاصله نازل از صفحه، فشار هوای نازل و زاویه اهرم در تعیین کیفیت و ضخامت رنگ خروجی تاثیر مستقیم دارد. بنابراین داده‌های تجربی باهدف تنظیم ضخامت ۰/۸ برای نازل رنگ پاش مطابق جداول شماره ۲، ۳ و ۴ بدست آمده است.



شکل ۷ تنظیم کیفیت رنگ

جدول ۲ زاویه اهرم مناسب برای رسم در ضخامت کم با فاصله از صفحه ۳ میلی متر و فشار ۱ بار

ضخامت (میلی متر)	زاویه اهرم (درجه)
رنگ نامطلوب	۸۴
۰/۸۴	۸۳
۱/۷	۸۲
۲/۵	۸۱
رنگ نامطلوب	۸۰

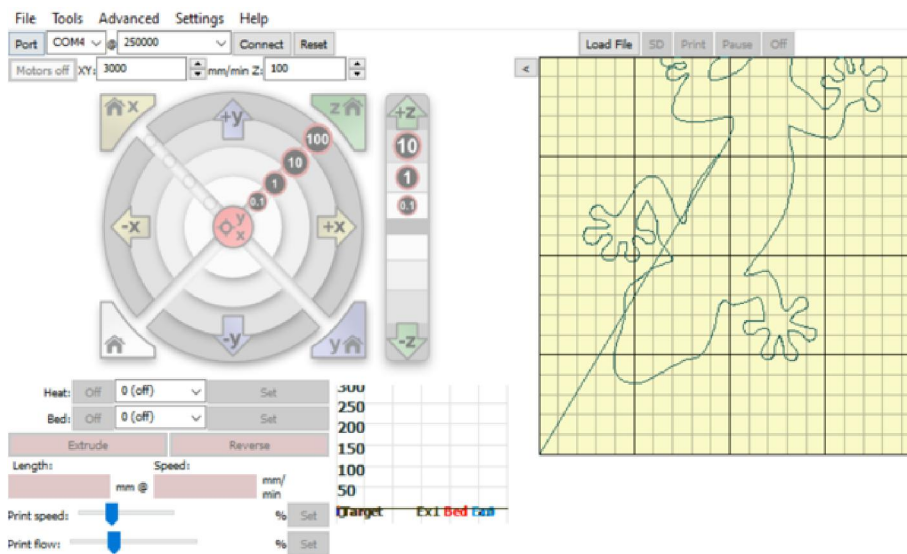
جدول ۳ فاصله مناسب برای رسم در ضخامت کم در زاویه اهرم ۸۳ درجه و فشار ۱/۲ بار

ضخامت (میلی متر)	فاصله از صفحه
رنگ نامطلوب	۱/۹
۰/۸۵	۲/۹
۱/۲	۳/۹
۱/۴	۴/۹
رنگ نامطلوب	۵/۹

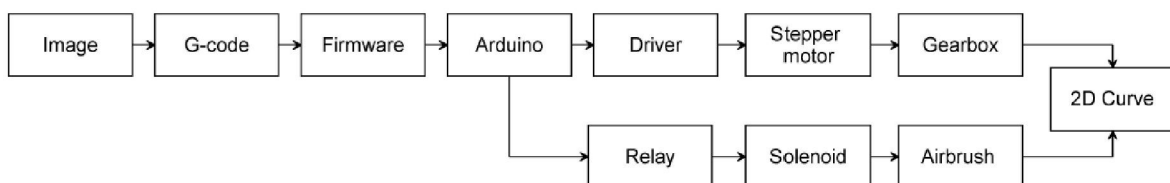
جدول ۴ فشار مناسب برای رسم با ضخامت کم در زاویه اهرم ۸۳ درجه و فاصله از صفحه ۲/۸۶ میلی متر

ضخامت (میلی متر)	فاصله از صفحه
رنگ نامطلوب	۰/۵
۰/۸۲	۱
۰/۹	۱/۵
۱/۱	۲
رنگ نامطلوب	۲/۵

پس از انتخاب کنترلر و تطبیق موقعیت و ضخامت رنگ، به برنامه دهی سیستم پرداخته می‌شود. هدف هماهنگ سازی و کنترل جهت، سرعت و تعیین زمان روشن یا خاموش بودن نازل رنگ پاش متناسب با الگوریتم انتخابی است. بنابراین بعد از طراحی هندسه و استخراج مختصات تبدیل شده مسیر، کدهای ماشین کاری ایجاد می‌شود. میانمایی حرکت موتور پله‌ای از الگوریتم نقطه به نقطه استفاده شده است. پس از تولید جی‌کد، برای تطبیق کدهای ارسالی به کمک ارسال کننده جی کد<sup>۱</sup> و تبدیل کدهای ارسال شده به قطار پالس، از سیستم عامل آردوینو GRBL استفاده گردید. بنابراین مسیر حرکت نازل رنگ پاش در ارسال کننده جی کد مطابق با شکل ۸ تنظیم و به برد آردوینو ارسال می‌شود. در شکل ۹، مراحل رسم منحنی دو بعدی با استفاده از شکل آزاد نشان داده شده است. در نهایت، با لبه‌یابی تصویر و تبدیل مختصات مطابق با ابعاد صفحه کاری، شکل ۱۰ نمایی از دستگاه و نمونه‌های از منحنی‌های تولید شده توسط این دستگاه ایجاد می‌شود.



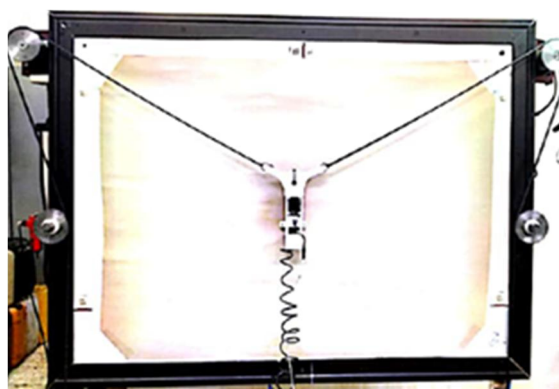
شکل ۸ شبیه سازی مسیر حرکت در ارسال کننده جی کد



شکل ۹ مراحل رسم منحنی دو بعدی با شکل آزاد



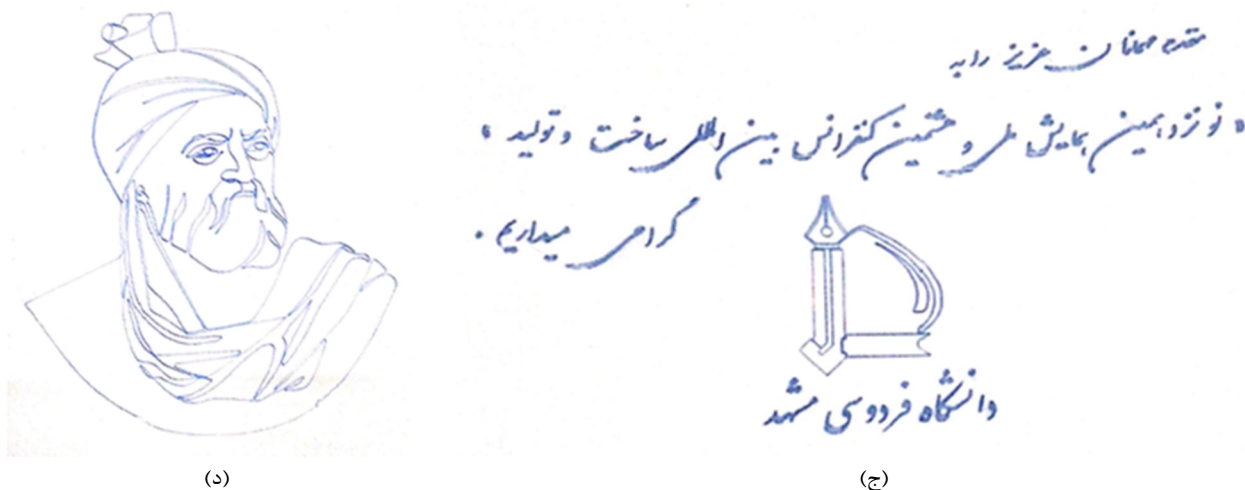
(ب)



(الف)

<sup>۱</sup>G-code Sender





شکل ۱۰ نمای سی ان سی رسام و منحنی های رسم شده توسط دستگاه (الف) دستگاه رسام، (ب) نازل رنگ پاش، (ج) رسم منحنی گسسته، (د) رسم منحنی پیوسته

### ۳- نتیجه گیری

دستگاه سی ان سی رسام به علت جایگاه موتورها و نحوه تعیین مختصات نازل رنگ پاش، در رسم هندسه با ابعاد مختلف نسبت به سایر دستگاه های کنترل عددی منعطف تر و ارزان تر است. از طرفی به علت حمل و نصب آسان و عدم نیاز به ریل های عمودی و افقی، قابلیت رنگ دیوارهای معابر، بدنه کشتی ها، ساختمان های مرتفع و سایر سطوح را آسان تر و کاربردی تر می کند. استفاده از نازل رنگ پاش کمک می کند تا بر روی هر سطحی نازل متناسب با نوع رنگ تنظیم و تطبیق گردد. مشخص بودن ضخامت رنگ یکی از پارامترهای مهم در محاسبات و تعیین مسیر حرکت این دستگاه است. در این سی ان سی ضخامت خروجی نازل رنگ پاش به صورت مستقیم به سه عامل فاصله از صفحه، فشار هوا و زاویه اهرم وابسته است. با توجه به اینکه از سلونوئید فشاری برای کنترل نازل استفاده شده، رسم منحنی های گسسته برای این نوع از دستگاه های شبه قطبی امکان پذیر شده است. از جمله چالش های موجود در این مکانیزم، به محدودیت سرعت و الزام وجود کنترل شتاب در سرعت های بالا اشاره می شود و دلیل آن آزاد بودن انتهای ابزار و ایجاد گشتاور و لرزش در هنگام تغییر جهت یا توقف موتور است که موجب کاهش دقت دستگاه در رسم منحنی های مورد نظر می شود.

### References

- [1] Sadeghieh M, Mofidi SMR, Motakef Imani B. Utilizing Two-Dimensional Polar CNC Technology in Painting and Coloring Art. 13th Iranian Conference on Manufacturing and Production Engineering. 2017;1:1-4. [In Persian]
- [2] Altintas Y, Erkorkmaz K. High speed CNC system design. Part I: jerk limited trajectory generation and quintic spline interpolation. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2001 July;41(9):1323-45. doi: 10.1016/S0890-6955(01)00002-5
- [3] Astarloa A, Bidarte U, Zuloaga A, Alegria I. Reconfigurable microstepping control of stepper motors using fpga embedded ram. 29th Annual Conference of the IEEE of the Industrial Electronics Society. 2003;2221-26. doi: 10.1109/IECON.2003.1280588
- [4] Ghosh G, Basu AK. Novel Electronic Gear for Maintaining A Fixed Speed Ratio Between Two Motors-An Industrial Application. 4th International Conference on Electronics, Materials Engineering & Nano-Technology. 2020 November 30;1:1-4. doi: 10.1109/IEMENTech51367.2020.9270093
- [5] Zeng M, Hu CZ, Hu PF. Control Algorithm of Acceleration Curve for Stepper Motor. Control and Systems Engineering. 2016 May 5;4(1):32-9. doi: 10.18005/JCSE0401004
- [6] Baluta G. Micro stepping Mode for Stepper Motor Control. International Symposium on Signals, Circuits and Systems: IEEE. 2007 August 20;1:1-4. doi: 10.3390/pr11020329
- [7] Minhat M, Vyatkin V, Xu X, Wong S, Al-Bayaa Z. A novel open CNC architecture based on STEP-NC data model and IEC 61499 function blocks. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2009 June;25(3):560-9. doi: 10.1016/j.rcim.2008.03.021

- [8] Latif K, Adam A, Yusof Y, Abdul Kadir AZ. A review of G code, STEP, STEP-NC, and open architecture control technologies based embedded CNC systems. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2021 April 17;114:2549-66. doi: [10.1007/s00170-021-06741-z](https://doi.org/10.1007/s00170-021-06741-z)
- [9] Tseng AA, Kolluri SP, Radhakrishnan P. A CNC machining system for education. Manufacturing Systems. 1989;8(3):207-14. doi: [10.1016/0278-6125\(89\)90042-3](https://doi.org/10.1016/0278-6125(89)90042-3)
- [10] Wang FL, Zhang FM, Ge L, Ma H. Velocity Connection Algorithm of Arbitrary Multi-Axis Linkage. Advanced Engineering Forum. 2017 October 11;24:12-23. doi: [10.4028/www.scientific.net/AEF.24.12](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AEF.24.12)
- [11] Ansari M, Amirian G, Imam SM, Hemati SJ. Design and fabrication of an active stereo scanner and metrological validation of results. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2019 June 22;6(2):29-43. [In Persian]