



دانشگاه صنعتی سهند

DOR:

20.1001.1.23223146.1401.9.1.2.8

نشریه علمی-فنی در مهندسی برق

دوره ۹ - شماره ۱

بهار و تابستان ۱۴۰۱

صفحات ۲۲ الی ۴۳

ISSN: 2322-3146

<http://journals.sut.ac.ir/jnsee>

# طراحی و ساخت دستگاه نمونه اندازه گیری گام‌های مارپیچ با استفاده از تکنیک پردازش تصویر

صادق کلانتری<sup>۱</sup>، سیدمحسن رضوی<sup>۲</sup>، هادی مرادی<sup>۳</sup> و عماد حمیدی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری - دانشکده مهندسی برق - گروه کنترل - دانشگاه تفرش - تفرش - ایران

Sadeghkalantari@tafreshu.ac.ir

<sup>۲</sup> دانشجوی دکتری - دانشکده مهندسی برق مخابرات - دانشگاه صنعتی مالک اشتر - تهران - ایران

S.Mohsen.Razavi@iran.ir

<sup>۳</sup> محقق - دانشکده مهندسی برق مخابرات - دانشگاه صنعتی مالک اشتر - تهران - ایران

Hadi\_Mf@yahoo.com

<sup>۴</sup> نویسنده مسئول - استادیار - دانشکده مهندسی برق مخابرات - دانشگاه صنعتی مالک اشتر - تهران - ایران

Ehamidi@mut.ac.ir

## چکیده

### واژه‌های کلیدی

اندازه گیری گام‌های مارپیچ،  
دستگاه اندازه گیری گام مارپیچ،  
پردازش تصویر،  
پردازش سیگنال.

یکسان بودن اندازه گام‌های مارپیچ در یک لامپ موج رونده با بازدهی سیستم رابطه مستقیم دارد. در این مقاله هدف ساخت دستگاهی است که با بکارگیری پردازش تصویر گام‌های مارپیچ را به صورت اتوماتیک و با دقت مناسب اندازه گیری نماید. به همین منظور الگوریتم پیشنهادی همراه با نوآوری‌هایی در زمینه‌های رفع نویز و تعیین آستانه در جهت اندازه گیری اتوماتیک گام‌های مارپیچ ارائه گردید و نمونه اولیه دستگاه ساخته شد. این دستگاه قابلیت کار در دو مُد اندازه گیری دستی و اتوماتیک را داراست و مشابه داخلی نداشته و از نظر قیمت تمام شده و کاربرد در اندازه گیری گام‌های مارپیچ نسبت به نمونه خارجی بسیار کم هزینه تر می‌باشد. این دستگاه در مُد اتوماتیک قادر است کلیه گام‌های مارپیچ را به یکباره اندازه گیری نماید. در صورتی که در دستگاه مشابه خارجی گام‌ها باید به صورت دستی و جداگانه اندازه گیری گردند. انتخاب نقاط ابتدا و انتهای گام‌ها در این دستگاه به صورت تطبیقی انجام می‌شود که سبب افزایش سرعت اندازه گیری و افزایش تکرارپذیری در اندازه گیری گام‌ها می‌گردد. در صورتی که در دستگاه نمونه خارجی انتخاب نقاط شروع و پایان گام‌ها توسط کاربر انجام می‌شود که خود تکرارپذیری اندازه گیری را کاهش می‌دهد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که دقت اندازه گیری دستگاه ساخته شده در مقایسه با دستگاه نمونه خارجی قابل قبول می‌باشد.



Sahand University  
of Technology

DOR:

[20.1001.1.23223146.1401.9.1.2.8](https://doi.org/10.1001.1.23223146.1401.9.1.2.8)

Journal of Nonlinear  
Systems in Electrical  
Engineering

Vol.9, No.1

Spring and Summer 2022

ISSN: 2322 – 3146

<http://journals.sut.ac.ir/jnsee>

# Design and Construction of a Sample Device for Measuring Helix Steps Using Image Processing Technique

Sadegh Kalantari<sup>1</sup>, Seyed Mohsen Razavi<sup>2</sup>, Hadi Moradi<sup>3</sup> and Emad Hamidi<sup>4</sup>

<sup>1</sup>PhD Candidate, Department of Electrical Engineering, Control Group, Tafresh University, Tafresh, Iran, [Sadeghkalantari@tafreshu.ac.ir](mailto:Sadeghkalantari@tafreshu.ac.ir)

<sup>2</sup>PhD Candidate, Department of Telecommunication Engineering, Malek Ashtar University, Tehran, Iran, [S.Mohsen.Razavi@iran.ir](mailto:S.Mohsen.Razavi@iran.ir)

<sup>3</sup>Researcher, Department of Telecommunication Engineering, Malek Ashtar University, Tehran, Iran, [Hadi\\_Mf@yahoo.com](mailto:Hadi_Mf@yahoo.com)

<sup>4</sup>**Corresponding Author**, Assistant Professor, Department of Telecommunication Engineering, Malek Ashtar University, Tehran, Iran, [Ehamidi@mut.ac.ir](mailto:Ehamidi@mut.ac.ir)

## ABSTRACT

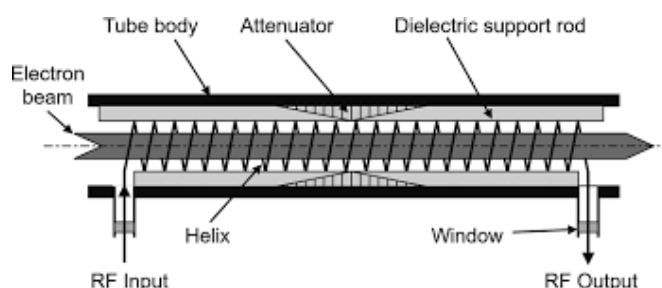
The same size of the helix steps in a traveling wave tube has a direct relationship with the efficiency of the system. In this article, the goal is to construct a device that measures helix steps automatically and with proper accuracy by using image processing. For this purpose, the proposed algorithm was presented along with the innovations in the fields of noise removal and the threshold determination for the automatic measurement of helix steps, and the prototype of the device was made. This device has the ability to work in two modes of manual and automatic measurement, and it has no domestic equivalent, and it is much cheaper in terms of cost and use in measuring helix steps than the sample made abroad. In the automatic mode, this device is able to measure all helix steps at once. In the case of a similar sample made abroad the steps must be measured manually and separately. The selection of the beginning and end points of steps in this device is done adaptively, which increases the speed of measurement and increases the repeatability in measuring steps. In the sample made abroad, the selection of the start and end points of the steps is done by the user, which reduces the repeatability of the measurement. The obtained results show that the measurement accuracy of the manufactured device is acceptable compared to the sample made abroad.

## Keywords

Helix Steps Measurement,  
Helix Steps Measuring  
Device,  
Image Processing,  
Signal Processing.

## ۱- مقدمه

یکی از روش‌های تقویت سیگنال‌های میکروویو پهن باند استفاده از لامپ موج رونده<sup>۱</sup> می‌باشد. یک لامپ موج رونده از یک تفنگ الکترونی، یک ساختار متمرکز برای قرار دادن الکترون در یک مسیر خطی، یک مدار موج رادیویی<sup>۲</sup> (که سبب می‌شود میدان‌های موج رادیویی با پرتو الکترونی اثر متقابل داشته باشند) و یک کلکتور تشکیل می‌شود. انواع مختلفی از لامپ‌های موج رونده وجود دارند که از نظر ساختار موج رادیویی با یکدیگر متفاوت هستند. لامپ موج رونده ماریپچ<sup>۳</sup> یکی از آنهاست که به دلیل عدم استفاده از حفره‌های موج رادیویی<sup>۴</sup> دارای محدودیت پهنای باند نمی‌باشد. ساختار لامپ موج رونده ماریپچ به صورت شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. شماتیک لامپ موج رونده ماریپچ

همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌گردد، تفنگ الکترونی شامل یک کاتد است که با انتشار الکترون‌ها سبب تشکیل یک پرتو در داخل ماریپچ می‌شود. یکی از مهم‌ترین قطعات تشکیل دهنده لامپ موج رونده، قطعه ماریپچ می‌باشد. از مسائل مهم مربوط به این قطعه وجود تلورانس در طول گام‌های آن است. تلورانس موجود می‌تواند به صورت یکسان برای همه قسمت‌ها (خطای سیستماتیک) و یا به صورت رندوم برای هر بخش متفاوت باشد. تاثیر تلورانس گام‌های ماریپچ که در فرآیند ساخت آن بوجود می‌آید می‌تواند سبب کاهش قابل توجهی در بهره سیگنال کوچک و به دنبال آن کاهش بازدهی تقویت کننده شود. تاکنون روش‌هایی برای جبران تاثیر خطای گام ماریپچ پیشنهاد شده است که روش تنظیم ولتاژ کاتد یکی از این روش‌هاست [۱]. با توجه به ارتباط بین ولتاژ کاتد و سرعت پرتو الکترون [۲]، با تغییرات ۲٪ در ولتاژ کاتد انتظار می‌رود که ۱٪ از خطای گام ماریپچ جبران شود. بنابراین هر ماریپچ مانند قلب یک فرستنده می‌باشد و اگر گام‌های ماریپچ دارای تلورانس زیادی باشند، بازدهی تقویت کننده کاهش خواهد یافت.

فناوری ساخت ماریپچ یک فناوری بسیار پیشرفته می‌باشد و دستگاهی که منجر به ساخت ماریپچ می‌شود را دستگاه پیچش ماریپچ می‌نامند. به دلیل دشواریهایی که در ساخت این قطعه وجود دارد، این قطعه وارداتی است. با واردات هر ماریپچ حدود ۱۰۰۰ دلار ارز از کشور خارج می‌شود. با توجه به کاربرد آن در صنایع نظامی و غیر نظامی، سالانه به تعداد قابل توجهی از این قطعه در کشور نیاز می‌باشد. یکی از چالش‌های مهمی که در زمینه ساخت ماریپچ وجود دارد اندازه‌گیری گام‌ها به نحو موثر به منظور تشخیص

<sup>۱</sup> TWT: Traveling Wave Tube

<sup>۲</sup> RF

<sup>۳</sup> Helix TWT

<sup>۴</sup> RF Cavities

ماریچ سالم از خراب می‌باشد. در ساخت ماریچ‌های بسیار کوچک فاصله این گام‌ها بسیار کم (در حد چند دهم میلی‌متر) است و به دلیل خطای چشم، مغایرت در طول گام‌ها به صورت بصری قابل تشخیص نمی‌باشد. بنابراین برای اندازه‌گیری گام‌ها باید از روش‌های دیگری استفاده کرد.

طبق پژوهش‌های قبلی انجام شده، روش‌های اندازه‌گیری قطعات به دو نوع تماسی و غیر تماسی تقسیم می‌شوند. روش‌های تماسی همچون دستگاه<sup>۱</sup> CMM مبتنی بر لمس اشیاء و غیر تماسی‌ها همچون دستگاه<sup>۲</sup> VMM مبتنی بر پردازش تصویر هستند. روش‌هایی که با قطعه تماس پیدا می‌کنند در صورت کوچک بودن ابعاد قطعه احتمال جابه‌جا نمودن آن در اثر تماس وجود دارد که این امر باعث اختلال در اندازه‌گیری می‌شود. به علاوه نرم یا صلب بودن قطعه ممکن است بر نتیجه اندازه‌گیری تاثیر بگذارد [۳]. به همین دلیل روش‌های تماسی برای اندازه‌گیری گام‌های ماریچ مناسب نمی‌باشند. از مزیت روش‌های مبتنی بر تصویر، اندازه‌گیری بدون تماس با جسم است. همچنین این روش‌ها بسیار سریع‌تر هستند و می‌توان از آنها در خط تولید نیز استفاده نمود.

تاکنون چندین روش برای اندازه‌گیری غیرتماسی از طریق تصویر پیشنهاد شده است. برای مثال در مرجع [۳] یک روش مبتنی بر پردازش تصویر برای اندازه‌گیری طول لوله در خط تولید یک کارخانه ارائه شده است. در این روش طول لوله پس از محاسبه لبه‌های کناری بر حسب پیکسل محاسبه شده و با توجه به کالیبراسیون انجام شده بر حسب متر بیان می‌گردد. در این روش از تکنیک لبه‌یابی سوبل<sup>۳</sup> برای استخراج لبه‌های تصویر و تکنیک سایش<sup>۴</sup> و باد کردن<sup>۵</sup> برای جدا کردن قطعه از پس زمینه تصویر استفاده شده است. در صورتیکه بخواهیم ویژگی‌های سه بعدی قطعه مورد نظر را استخراج کنیم باید حداقل از دو دوربین استفاده نماییم. اما برای قطعات مسطح یا قطعاتی که مرز بیرونی آنها مورد نظر است اندازه‌گیری با یک دوربین نیز قابل انجام است.

در مقاله‌ای دیگر روشی با هدف اندازه‌گیری اندازه قطعات مسطح با استفاده از تصویربرداری از قطعه مورد نظر ارائه شده است [۴]. در این روش با استخراج اسکلت تصویر و لبه‌یابی اندازه‌گیری قطعه انجام می‌گردد. با توجه به کالیبراسیون دایروی انجام شده در این مقاله دقت اندازه‌گیری نسبت به روش‌های مقایسه شده دو برابر شده است. در مرجع [۵] نیز یک دستگاه اندازه‌گیری قطعات ریز بر مبنای بینایی ماشین طراحی و ساخته شده است. در طراحی الگوریتم این دستگاه از روش ماتری<sup>۶</sup> و لبه‌یابی کنی<sup>۷</sup> استفاده شده است. در ساخت این دستگاه از میکروکنترلر Atmega328 و ماژول بیسیم دوربین استفاده شده است. نکته حائز اهمیت در عملکرد اندازه‌گیری این دستگاه تعیین نقاط ابتدا و انتهای جسم به صورت دستی توسط کاربر می‌باشد که این امر در اندازه‌گیری‌های حساس سبب بروز خطا می‌گردد. برای مثال در اندازه‌گیری گام‌های یک ماریچ کاربر می‌تواند نقاط شروع و پایان گام را یک یا چند پیکسل آن طرف تر انتخاب نماید. به همین دلیل این روش نیز برای هدف این مقاله مناسب نمی‌باشد.

با توجه به کارهای مشابه، راهکاری که در این مقاله برای حل مسئله اندازه‌گیری اتوماتیک گام‌های ماریچ پیشنهاد شده است، استفاده از تکنیک پردازش تصویر می‌باشد. می‌توان با قرار دادن یک دوربین صنعتی مناسب و تصویربرداری از ماریچ و محاسبه طول گام‌ها به صحت و درستی قطعه پی برد. بنابراین روش پیشنهادی ما در گروه روش‌های غیرتماسی است. برای

<sup>1</sup> Coordinate Measuring Machine

<sup>2</sup> Vision Measuring Machine

<sup>3</sup> Sobel

<sup>4</sup> Erosion

<sup>5</sup> Dilatation

<sup>6</sup> Blurring

<sup>7</sup> Canny Edge Detection

تصویربرداری از ماریپچ نیاز به یک دوربین زوم می‌باشد که به منظور ضبط تصاویر با بزرگ‌نمایی‌های مختلف و یا گرفتن تصویر از اجسام با ابعاد مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. برخورداری از فاصله کانونی متغیر و همچنین سنسورهای فوق‌العاده حساس این سری از دوربین‌ها را برای کاربرد در این دستگاه مناسب کرده است. فاکتور مهم دیگر در انتخاب دوربین، سنسور به کار رفته در آن می‌باشد. دوربین‌های موجود در بازار معمولاً به دو نوع سنسور CCD یا CMOS تجهیز شده‌اند. بزرگی سنسور نیز در انتخاب دوربین نقش مهمی ایفا می‌کند. یک سنسور بزرگتر نور بیشتری نسبت به یک سنسور کوچک ثبت می‌کند. نور بیشتر در نهایت منجر به خلق تصاویر با کیفیت‌تر می‌شود. علاوه بر مطالب فوق، استفاده از لنزهای مناسب با بزرگ‌نمایی کافی همچون لنزهای تلسکوپیک<sup>۱</sup> برای حذف اعوجاج و زاویه دید و کنترل ابعاد مورد استفاده قرار می‌گیرند.

به منظور ساخت دستگاه اندازه‌گیری اتوماتیک گام‌های ماریپچ، پس از ضبط تصویر باید ابتدا فرآیند پیش پردازش بر روی تصویر خام انجام شده و با توجه به عوامل محیطی غیر قابل کنترل در این مرحله باید تصویر بهبود یابد. از جمله فرآیندهای این مرحله رفع نویز و یا اعمال تبدیل‌های اصلاحی بر روی تصویر می‌باشد. اگر نویز ضربه در تصویر مشاهده شود با استفاده از روش‌هایی همچون فیلتر تطبیقی وزن‌دار میانه، و یا در حضور نویز گوسی باید از روش‌های حوزه فرکانس همچون تجزیه مقادیر تکین تقطیع شده استفاده نمود [۸-۶]. همچنین در صورت نیاز به اصلاحات خاص در تصویر (کالیبراسیون) تبدیل‌های مختلفی همچون تصویری، آفین و یا تبدیلاتی همچون تغییر کجی به تصویر اعمال می‌گردد [۹]. پس از مرحله پیش‌پردازش باید جزئیات اضافی تصویر دور ریخته شود و تنها قسمت‌های اصلی تصویر (بدنه اصلی ماریپچ) که در پروسه پردازش مفید هستند، باقی بمانند [۱۰]. برای این منظور باید از روش‌های پایه‌ای همچون سایش، باد کردن و روش‌های آستانه‌گذاری به منظور تبدیل تصویر به یک تصویر دودویی استفاده نمود.

در مرحله بعد باید نقاط ویژگی متناسب با نقطه شروع و پایان گام‌های ماریپچ به نحوی در تصویر مشخص شوند. از راهکارهای پیشنهادی این مقاله می‌توان به استفاده از شدت نور بازتاب شده از سطح ماریپچ به منظور محاسبه نقاط کاندید (نقاطی که نشان‌دهنده شروع و پایان گام هستند) و روش‌های دیگری همچون لبه‌یابی کنی به منظور تشخیص مرزهای مجاور هر نقطه کاندید اشاره نمود. به همین منظور در ساخت دستگاه، فرآیند تنظیم نور باید به گونه‌ای انجام شود که در نقاط شروع و پایان گام بیشترین بازتاب را از سطح قطعه داشته باشیم. برای این هدف در ساخت این دستگاه از یک رینگ‌لایت استفاده شد. پس از مشخص شدن نقاط کاندید باید فاصله آنها از یکدیگر محاسبه شود. برای فواصل مستقیم این هدف با استفاده از فاصله‌های اقلیدسی، مَنهتن<sup>۲</sup> و ترکیبی انجام می‌شود و در صورت استفاده از فاصله‌های خمیده می‌توان از فاصله ژئودزیکی<sup>۳</sup> که فاصله خمیده بین دو نقطه را با استفاده از گرادیان جهتی بدست می‌آورد، استفاده نمود [۱۱]. نکته مهم در محاسبه فاصله، داشتن اطلاعات کامل دوربین در هنگام تصویربرداری می‌باشد. با توجه به خصوصیات سنسور و لنز دوربین باید اندازه هر پیکسل تصویر محاسبه گردد تا بتوان فاصله بین گام‌های ماریپچ را بر حسب میلی‌متر بیان نمود.

<sup>۱</sup> Telecentric

<sup>۲</sup> Manhattan Distance

<sup>۳</sup> Geodesic Distance

با توجه به بررسی‌های انجام شده، تا کنون دستگاهی مخصوص اندازه گیری گام ماریپج مبتنی بر پردازش تصویر در داخل و خارج کشور ساخته نشده است. در داخل کشور برای صحت‌سنجی گام‌های ماریپج معمولاً از دستگاه VMM استفاده می‌شود. این دستگاه‌ها برای اندازه گیری ابعاد اجسام مختلف در صنعت استفاده می‌شوند. با توجه به فناوری در مرز دانش این دستگاه و قیمت نسبتاً زیاد آن تاکنون جزئیات الگوریتم استفاده شده در ساخت آن توسط سازندگان ارائه نشده است. در این دستگاه کاربر باید نقاط ابتدایی و انتهایی که قصد اندازه گیری آن را دارد، به صورت دستی مشخص نماید. دستگاه VMM از نظر استفاده از دوربین و پردازش تصویر برای محاسبه فواصل با روش پیشنهادی این مقاله اشتراک دارد. با توجه به اینکه یک ماریپج به طور معمول دارای حداقل ۵۰ الی ۱۰۰ گام می‌باشد، اندازه گیری همه این گام‌ها با دستگاه‌های فوق کار بسیار زمان‌بر و به دلیل انتخاب نقاط توسط کاربر می‌تواند با خطا همراه باشد. به همین دلیل وجود دستگاهی مخصوص این کار که بتواند به صورت خودکار گام‌ها را شناسایی کرده و فاصله هر یک را به کاربر اعلام نماید می‌تواند قابل توجه باشد. دستگاه ساخته شده در این مقاله توانایی لازم برای اعلام خودکار اندازه گام‌ها بدون نیاز به انتخاب نقاط توسط کاربر را دارد و به همین جهت دارای سرعت بالاتری در اندازه گیری می‌باشد.

با استفاده از روش پیشنهادی مقاله پس از تصویر برداری از ماریپج، طول گام‌ها بطور اتوماتیک یا دستی به کاربر اعلام می‌شود و می‌توان به سرعت به صحت‌سنجی گام‌های ماریپج پرداخت. ماریپج‌هایی که دارای تلورانس زیادی در گام‌ها می‌باشند خراب تشخیص داده شده و از فرآیند ساخت تقویت کننده کنار گذاشته می‌شوند. با توجه به اینکه دستگاه نمونه داخلی ندارد استفاده از پردازش تصویر از نظر کاهش هزینه و سادگی کار توجیه بسیار دارد. دستگاه نمونه ساخته شده با دوربین زوم ساده حدود ۱۰۰۰ دلار هزینه در برداشته است که در صورت اضافه کردن دوربین صنعتی با کیفیت این هزینه حدود ۳۵۰۰ دلار خواهد شد. این در حالی است که دستگاه مشابه خارجی برای این کار بیش از ۳۰۰۰۰ دلار هزینه خواهد داشت که نشان دهنده صرفه‌جویی قابل توجهی در هزینه‌ها است.

قسمت‌های مختلف مقاله به صورت زیر سازمان‌دهی شده است. در قسمت ۲ ابتدا ساختار سخت افزاری و سپس بخش نرم‌افزاری دستگاه توضیح داده خواهد شد. در این بخش الگوریتم پیشنهادی مقاله و نوآوری‌های آن در زمینه رفع نویز و تعیین میزان آستانه توضیح داده خواهد شد و در قسمت ۳ نتایج حاصل از اندازه گیری با دستگاه ساخته شده ارائه می‌گردد. در قسمت ۴ نیز نتیجه گیری انجام می‌شود.

## ۲- ساختار سیستم دستگاه ساخته شده

ساختار سیستم را می‌توان از دو دیدگاه سخت افزار و نرم افزار مورد توجه قرار داد. در شکل ۲ تصاویر دستگاه ساخته شده نشان داده شده است. ساختار سخت افزاری سیستم از قسمت‌های زیر تشکیل شده است.

الف) دوربین دیجیتال زوم: این دوربین در بازار با عنوان میکروسکوپ دیجیتال شناخته می‌شود که می‌تواند از طریق USB به کامپیوتر متصل شود. حسگر این دوربین از نوع CMOS و دارای زوم اپتیکال حدود 5X می‌باشد.

ب) سیستم نورپردازی با استفاده از رینگ لایت و دیوهای نوری اطراف دوربین: به منظور افزایش نور سطح زیر دوربین و کاهش تاثیرات مخرب حاصل از نور محیط، یک رینگ لایت دایره‌ای شکل با استفاده از تفلون به صورت دقیق اطراف دوربین قرار داده شده است. با توجه به اینکه در این مقاله می‌خواهیم اندازه گیری اتوماتیک گام‌ها را نیز داشته باشیم باید بازتاب نور از سطح قطعه

بسیار مناسب باشد و نور حاصل از محیط سبب بروز اختلال در اندازه‌گیری نگردد. به همین دلیل دوربین و رینگ لایت باید تا حد امکان به قطعه نزدیک شوند.

پ) پایه نگهدارنده دوربین و تغییر محور در جهت Z: برای تنظیم فاصله (تغییر در جهت محور Z) دوربین نسبت به قطعه به منظور رسیدن به فوکوس مناسب یک پایه با قابلیت تنظیم ارتفاع و گیره نگهدارنده دوربین در بدنه اصلی دستگاه نصب شده است. این کار سبب می‌شود که تصاویر دریافتی تیزتر گردد. برای تصاویر با کیفیت بالاتر بهتر است دوربین در بالاترین زوم اپتیکال و نزدیک به قطعه قرار داشته باشد.



شکل ۲. نمونه اولیه از دستگاه ساخته شده برای اندازه‌گیری گام‌های ماریپچ

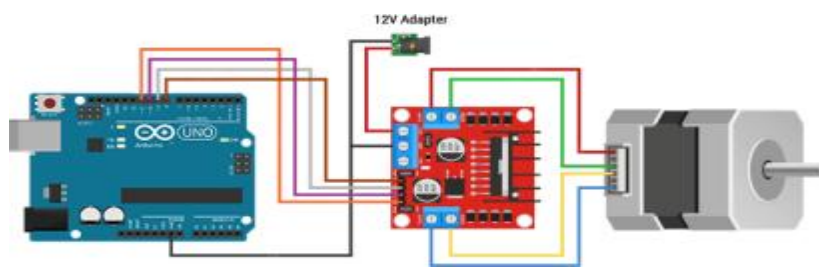
ت) بدنه دستگاه، اهرم‌های جابجایی دوربین و گنج‌های متحرک در دو جهت  $x$  و  $y$ : برای این قسمت از بدنه یک ماشین تراش کوچک قدیمی استفاده شده است و قطعات مختلف ساخت دستگاه بر روی آن جایابی شده است. اهرم‌های جابجایی به کار برده شده و گنج‌های متحرک در دو جهت  $x$  و  $y$  این امکان را می‌دهند که با جابه‌جایی در گستره  $x$  و  $y$  از کل ماریپچ تصویربرداری کرده و بتوانیم طول کلیه گام‌ها را به صورت یکجا به کاربر اعلام نماییم. در این دستگاه جابجایی در طول قطعه به صورت الکترونیکی (با استفاده از دو کلید چرخش در جهت عقربه‌های ساعت و خلاف عقربه ساعت) و با استفاده از یک موتور پله‌ای انجام می‌شود و جابجایی عرضی توسط اهرم موجود انجام می‌گردد.

ث) صفحه پلکسی نگه‌دارنده ماریپچ: در زیر دوربین و روی گنج حرکت‌کننده عرضی یک صفحه پلکسی سفید رنگ قرار داده شده است. بر روی این صفحه شیارهای دقیقی با عمق‌های مختلف به منظور قرار دادن ماریپچ در آن با استفاده از فناوری لیزر ایجاد شده است. این شیارها سبب می‌شوند که در هنگام جابجایی ماریپچ در راستای محور  $x$  و  $y$  بدون حرکت باقی بماند. کارکرد دیگر این صفحه در همتراز کردن شاخص کالیبراسیون با ماکزیمم ارتفاع ماریپچ می‌باشد که سبب می‌شود هر دو در یک سطح قرار گیرند و اندازه‌های بدست آمده دارای دقت قابل قبولی باشند.



**ج) موتور پله‌ای، درایور و گیرکس:** به منظور کنترل دقیق موقعیت برای حرکت دوربین در تصویر برداری از مارپیچ، از یک موتور پله‌ای ۱٫۸ درجه ۱٫۵ آمپر دوقطبی و یک گیرکس حلزونی ۱ به ۱۵ استفاده شد. به منظور کنترل دقیق‌تر و افزایش جریان خروجی از درایور موتور پله‌ای L298 استفاده گردید. با این کار توانستیم به صورت اتوماتیک بر روی حرکت دوربین در بالای مارپیچ کنترل دقیق داشته باشیم. این مدار با استفاده از برد آردوینو و توسط نرم‌افزار متلب به صورت همزمان کنترل می‌گردد و کاربر می‌تواند به صورت گرافیکی به تصویربرداری و مشاهده نتایج خروجی بپردازد.

**چ) برد آردوینو UNO:** در ساخت این دستگاه از این برد به عنوان کنترل کننده موتور پله‌ای استفاده شد. در شکل زیر نحوه سیم‌بندی آردوینو، درایور و موتور پله‌ای نشان داده شده است.



راه اندازی با درایور L298

### شکل ۳. نحوه سیم‌بندی آردوینو، درایور و موتور پله‌ای در درایور استفاده شده در دستگاه

**ح) کامپیوتر:** به منظور اجرای نرم‌افزار نوشته شده در متلب برای اندازه گیری گام‌های مارپیچ نیاز است که پردازش‌های مناسبی بر روی تصویر اخذ شده در کامپیوتر انجام شود. با توجه به اعلام طول گام‌ها به صورت خودکار در برنامه، هرچقدر کامپیوتر از نظر سخت افزاری پیشرفته‌تر باشد سرعت اجرای نرم‌افزار و پاسخ‌دهی به کاربر بیشتر خواهد بود.

## ۱-۲- کالیبراسیون دوربین در دو بعد

کالیبراسیون به معنی بدست آوردن رابطه (نگاشت) ابعاد یا فواصل در صفحه مختصات قطعه با ابعاد و یا فواصل در صفحه مختصات تصویر می‌باشد. مساله‌ی کالیبراسیون دوربین در حالت کلی مسئله‌ی پیچیده‌ای است و برای مشاهده روابط آن به مرجع [۱۲] مراجعه شود. مساله کالیبراسیون به دو نوع کالیبراسیون پارامترهای داخلی و خارجی دوربین تقسیم می‌شود. در هنگام استفاده از هر نوع دوربین و لنزی، به خاطر ساختمان درونی آن‌ها، انحرافات در تصویر بدست آمده ایجاد می‌شود که یکی از مهم‌ترین آن‌ها انحراف دایره‌ای می‌باشد که باعث خمیده شدن خطوط صاف در تصویر می‌باشد. انحراف دیگر که باید کالیبره گردد، کشیدگی تصویر در قسمت‌های دور از مرکز تصویر می‌باشد. این انحرافات بسته به تکنیک مورد استفاده در غالب ۵ تا ۹ پارامتر تعریف می‌شوند و قابل کالیبره شدن هستند. در عمل برای کالیبره‌سازی پارامترهای داخلی دوربین معمولاً از لنزهای تلسنتریک استفاده می‌کنند تا تصویر اخذ شده واقعی‌تر باشد. پارامترهای خارجی دوربین شامل تمامی پارامترهایی است که از موقعیت دوربین نسبت به جسم ناشی می‌شود. به زبان ساده‌تر، تبدیل اندازه‌های بدست آمده از تصویر با واحد پیکسل به واحدهای دنیای واقعی مانند میلی‌متر نیازمند کالیبره پارامترهای خارجی دوربین می‌باشد. در این مقاله دو پیش فرض را در نظر می‌گیریم تا مساله کالیبراسیون ساده‌تر گردد.

الف) عدم اعوجاج لنز دوربین (استفاده از لنز تلسنتریک): به این علت در ساخت دستگاه پیشنهادی اولویت با استفاده از لنز تلسنتریک می‌باشد تا از هر گونه اعوجاج جلوگیری گردد و با این روش پارامترهای داخلی دوربین کالیبره می‌گردد. برای کاهش اثر لنز بر



تصاویر سعی کرده‌ایم تا کمترین تعداد گام ماریپچ در هر تصویر مشاهده شود تا اثرات اعوجاج حاصل از پارامترهای داخلی دوربین به حداقل برسد (یک یا دو گام).

ب) محدود کردن مسئله به اندازه‌گیری‌های دوبعدی: فرض بر آن است که جسم اندازه‌گیری شده مسطح است. البته با توجه به کاربرد دستگاه ساخته شده در این مقاله برای اندازه‌گیری اتوماتیک گام‌های ماریپچ، این فرض کاملاً معتبر می‌باشد. زیرا در اندازه‌گیری گام‌های ماریپچ فقط با سطح روی ماریپچ مواجه هستیم (فقط نور بازتاب شده از سطح ماریپچ برای ما مهم است) و عمق آن برای ما اهمیتی ندارد. به همین علت برای انجام کالیبراسیون از یک الگوی کالیبره کننده استفاده می‌شود. این الگو در ارتفاعی برابر با قطعه قرار می‌گیرد و ابعاد آن کاملاً با دقت قابل قبول مشخص می‌باشد. به عبارت دیگر برای هر بار اندازه‌گیری گام‌های ماریپچ یکبار کالیبره‌سازی انجام می‌شود. بدین صورت که مرحله اول اندازه‌گیری هر ماریپچ در این دستگاه ابتدا کالیبره‌سازی با شاخص کالیبراسیون و بدست آوردن طول هر پیکسل از تصویر بر حسب میکرون می‌باشد. همچنین با توجه به مشخصات دوربین فرض بر آن است که شکل تمام پیکسل‌های سنسور دوربین مربعی می‌باشد. با این روش پارامترهای خارجی دوربین کالیبره می‌گردد.

## ۲-۲- بخش نرم‌افزاری سیستم

در این بخش برای کنترل موتور پله‌ای یک برنامه جداگانه تحت کنترل آردوینو نوشته شده است. سیستم معرفی شده از نظر نرم‌افزاری در دو فاز جداگانه شامل فاز اندازه‌گیری دستی و فاز اندازه‌گیری اتوماتیک گام‌ها کار می‌کند. در هر دو فاز قبل از شروع اندازه‌گیری باید فاصله دوربین از قطعه و میزان فوکوس آن تنظیم شود. سپس فرآیند کالیبراسیون با استفاده از یک شاخص مدرج در کنار قطعه انجام می‌گردد تا طول هر پیکسل تصویر بر حسب میکرومتر مشخص شود. سپس می‌توان به اندازه‌گیری گام‌ها به صورت دستی یا اتوماتیک با انتخاب در نرم‌افزار پرداخت. برنامه نوشته شده این دستگاه در نرم‌افزار متلب پیاده‌سازی شده است. در نوشتن این برنامه از مفاهیم مهمی در پردازش تصاویر دیجیتال همچون تبدیل هاف<sup>۱</sup>، لبه‌یابی<sup>۲</sup>، رفع نویز، آستانه‌گذاری، عملیات مورفولوژی<sup>۳</sup> و ... استفاده شده است. در برخی از قسمت‌های اشاره شده به جای استفاده از روش‌های مرسوم از روش‌های ابتکاری و نوآوری‌های نویسندگان مقاله استفاده شده است که به توضیح آنها می‌پردازیم و سپس الگوریتم اصلی ارائه خواهد شد.

## ۲-۲-۱- مروری بر روش رفع نویز پیشنهادی مقاله

در بسیاری از مواقع به دلیل مشکلات نورپردازی و برخی عوامل ناخواسته همچون نویز موجود در کانال ارتباطی بین دوربین و کامپیوتر برخی نویزهای مخرب همچون نمک و فلفل<sup>۴</sup> و نویز گوسی در تصویر ایجاد می‌گردد. این نوع از نویزها سبب از بین رفتن اطلاعاتی از تصویر می‌گردند که بعضاً می‌تواند مربوط به لبه‌ها یا قسمت‌های حساس آن باشد. با توجه به آزمایش‌های انجام شده اغلب نویز نمک و فلفل در دستگاه ساخته شده این مقاله می‌تواند سبب بروز مشکل گردد. به همین علت قبل از فرآیند لبه‌یابی پیش‌پردازش حذف نویز روی تصویر انجام می‌گردد. به این مرحله اعمال فیلتر رفع نویز گویند. از جمله مزایای یک روش قابل قبول در حذف نویز، کیفیت تصویر خروجی به لحاظ تیزی، کیفیت کمی از لحاظ PSNR و سادگی و سرعت قابل قبول الگوریتم می‌باشد. در این قسمت روش جدیدی برای حذف نویز نمک و فلفل توسط نویسندگان این مقاله ارائه می‌شود تا علاوه بر کیفیت کمی و بصری مناسب دارای سرعت قابل قبول نیز باشد. در این مقاله، از ایده‌های وزن‌دار کردن مقدار هر پیکسل در محاسبه مقدار

<sup>1</sup> Hough Transform

<sup>2</sup> Edge Detection

<sup>3</sup> Morphology Operations

<sup>4</sup> Salt and Pepper

پیکسل مرکزی (با استفاده از فاصله منتهن)، تطبیقی ساختن میزان بزرگی پنجره با توجه به اطلاعات موجود در هر قسمت از تصویر) به منظور افزایش کیفیت تصویر خروجی حتی در چگالی نویزهای بیشتر از ۹۰ درصد، استفاده از مقدار میانگین کمینه‌ها به منظور شناسایی پیکسل‌های نویزی از غیر نویزی، استفاده از متوسط مقدار میانه و میانگین پیکسل‌های غیر نویزی پنجره (به منظور استفاده از اطلاعات توامی که میانه و میانگین در اختیار دارند) و اعمال پنجره‌های رفع نویز تنها بر روی پیکسل‌های نویزی (به منظور افزایش سرعت الگوریتم) استفاده خواهیم کرد. روش پیشنهادی رفع نویز این مقاله از دو مرحله شناسایی پیکسل‌های نویزی یا طبقه بندی پیکسل‌های تصویر و مرحله بازیابی پیکسل‌های نویزی تشکیل شده است. هنگامی که تصویر  $I$  (با اندازه  $N \times M$ ) آغشته به نویز نمک و فلفل می‌گردد، پیکسل‌های تخریب شده، مقادیر  $g_{\min}$  (کمینه سطح خاکستری) یا  $g_{\max}$  (بیشینه سطح خاکستری) را می‌پذیرند. پیکسل  $I_{i,j}$  در تصویر نویزی  $I$  به صورت رابطه (۱) خواهد بود که در آن  $r = 1 - p - q$  می‌باشد.

$$y_{i,j} = \begin{cases} g_{\min} & \text{with probability } p \\ g_{\max} & \text{with probability } q \\ I_{i,j} & \text{with probability } r \end{cases} \quad (1)$$

در مرحله اول به منظور شناسایی پیکسل‌های نویزی تصویر با الهام از ایده مرجع [۱۳] پارامتر مقدار میانگین کمینه‌ها با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می‌گردد. در این رابطه  $d_{(i,j)}^n$  بیانگر فرم برداری شده پنجره با تعداد  $n$  پیکسل است و  $N$  نشان‌دهنده تعداد کمینه‌های مورد استفاده در محاسبه پارامتر  $MMV$  می‌باشد. برای تشخیص پیکسل‌های نویزی برای هر تصویر نویزی یک آستانه  $TH$  انتخاب می‌گردد. پس از محاسبه پارامتر  $MMV$  برای هر پیکسل از تصویر نویزی، اگر پارامتر  $MMV > TH$  بود آن پیکسل نویزی است و در غیر این صورت پیکسل سالم خواهد بود. لازم به ذکر است که مقدار پارامترهای  $N$  و  $TH$  به صورت تجربی بر حسب نوع تصویر تعیین می‌گردد. بنابراین مرحله شناسایی پیکسل‌های نویزی طبق الگوریتم جدول ۱ انجام می‌شود. لازم به ذکر است که در الگوریتم طبقه بندی پیشنهادی  $W$  به اندازه پنجره مورد استفاده اشاره می‌کند.

$$MMV = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \min(d_{(i,j)}^n) \quad (2)$$

بسیاری از روش‌ها همچون روش‌های فیلتر میانه، فیلتر میانگین و خانواده‌های آنها در محاسبه پیکسل مرکزی پنجره در حال چرخش در تصویر کلیه پیکسل‌های داخل پنجره را در نظر می‌گیرند. برای مثال فیلتر میانه برای تخمین پیکسل مرکزی پنجره‌ای با اعداد  $\{0, 30, 0, 0, 255, 0, 0, 20\}$  عدد ۰ که میانه اعداد فوق می‌باشد را در مرکز پنجره قرار می‌دهد. اگر فرض کنیم که عدد ۰ و ۲۵۵ خود بیانگر نویز می‌باشند، این فیلتر در تعیین تخمین مناسب برای این پنجره شکست خورده و نتیجه بدست آمده قابل اعتماد نمی‌باشد. حال اگر در تعیین میانه اعداد داخل پنجره فقط میانگین پیکسل‌های غیر نویزی یعنی میانه ۲۰ و ۳۰ محاسبه گردد، عدد ۲۵ بدست می‌آید که بنظر می‌رسد با توجه به مقدار سطح خاکستری همسایه‌ها مقدار قابل قبولی باشد. همچنین روش‌های فوق‌الذکر بر روی تمامی پیکسل‌های نویزی و غیر نویزی تصویر تاثیر گذاشته و مقدار آنها را تغییر می‌دهند. برای مثال فیلتر میانه حتی مقدار پیکسل‌هایی که سالم هستند و نویز روی آنها اثری نگذاشته است را نیز با میانه پنجره به مرکزیت آن پیکسل تعویض می‌کند. این کار سبب می‌گردد تا خطای روش پیشنهادی بیشتر شود و مقدار داده‌های سالم نیز دستخوش تغییر گردند. به همین دلیل در مرحله دوم روش پیشنهادی تنها پیکسل‌هایی که در مرحله اول نویزی تشخیص داده شده‌اند، دستخوش تغییر می‌گردند. یکی از ایده‌های مهم این مقاله وزن دار کردن پیکسل‌های غیر نویزی در محاسبه مقدار پیکسل مرکزی با استفاده از فاصله منتهن هر پیکسل غیرنویزی تا پیکسل مرکزی می‌باشد [۱۴]. فاصله منتهن فاصله دو نقطه است که مجموع قدرمطلق تفاضل طول و عرض آن دو نقطه می‌باشد که

با نرم  $l_1$  نیز بیان می‌گردد. فاصله منتهن دو پیکسل  $f, q$  از تصویر با استفاده از رابطه (۳) محاسبه می‌گردد. در رابطه فوق  $m$  بیانگر بُعد نقاط می‌باشد که با توجه به اینکه در این مقاله تمرکز ما بر روی تصاویر دو بعدی است،  $m = 2$  در نظر گرفته می‌شود. نحوه محاسبه فاصله منتهن برای یک پنجره  $3 \times 3$  در شکل ۴ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، پیکسل‌هایی که همسایه‌های افقی و عمودی پیکسل مرکزی هستند وزن بیشتر و بقیه پیکسل‌ها وزن کمتری می‌گیرند. از نظر این نوع فاصله، پیکسل‌های همسایه در راستای عمودی و افقی ارزش بیشتری دارند و پیکسل مرکزی باید به آنها نزدیکتر باشد. دلیل بکارگیری این ایده این است که وقتی اندازه پنجره به صورت تطبیقی انتخاب می‌شود به دلیل افزایش اندازه پنجره (مخصوصاً در چگالی نویزهای بالا) ممکن است برخی از پیکسل‌های اطراف که مربوط به اشیاء دیگر تصویر می‌باشند در محاسبه مقدار پیکسل مرکزی سهم شونند و باعث ایجاد خطا شوند. با وزن‌دار کردن مقدار پیکسل‌های غیرنویزی، به الگوریتم اجازه خواهیم داد که هر پیکسلی که به مرکز پنجره نزدیک‌تر است سهم بیشتری در محاسبه مقدار پیکسل مرکزی داشته باشد و از اطلاعات ناحیه‌های دور که سبب خطا می‌گردند جلوگیری شود. بنابراین پس از تعیین اندازه پنجره مناسب (به صورت تطبیقی)، طبق روابط (۳) و (۴) فاصله هر پیکسل غیرنویزی از پیکسل مرکزی و به مراتب وزن متناظر آن پیکسل محاسبه می‌گردد و طبق رابطه (۵) مقدار پیکسل مرکزی با متوسط مقدار میانه و میانگین وزن‌دار جایگزین می‌شود. دلیل استفاده از متوسط مقدار میانه و میانگین، استفاده از اطلاعات توامی است که میانه و میانگین به عنوان نماینده داده‌ها در اختیار دارند. زیرا میانه یا میانگین چند عدد، به تنهایی نماینده قابل قبولی برای آنها نمی‌باشند و متوسط هر دو می‌تواند نماینده بهتری باشد [۱۵].

$$d_{f,q} = \|f - q\|_1 = \sum_{t=1}^m |f_t - q_t|, \quad m = 2 \quad (3)$$

$$w_i = \frac{1}{d_i} \quad (4)$$

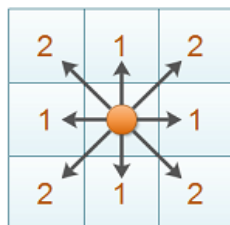
$$q = 0.5 * \left( \frac{\sum_{i=1}^p w_i p_i}{n} + \text{median}(w_i p_i) \right) \quad (5)$$

در روابط فوق  $p$  بیانگر تعداد پیکسل‌های غیرنویزی داخل پنجره است و مشخص است که پیکسل‌های غیرنویزی که به مرکز نزدیک‌ترند وزن بیشتر و در نهایت تاثیر بیشتری در محاسبه مقدار پیکسل مرکزی پنجره خواهند داشت. با استفاده از ایده فوق انتظار داریم تا در چگالی نویزهای بالا تقریب بهتر و به تبع آن خطای کمتری داشته باشیم. در مرحله دوم پس از انتخاب اندازه اولیه پنجره مقدار کمینه، بیشینه و میانه پیکسل‌های پنجره محاسبه می‌گردد. اگر شرط  $s_{i,j}^{\min,w} < s_{i,j}^{\text{med},w} < s_{i,j}^{\max,w}$  برقرار باشد و مقدار پیکسل برابر با بیشینه یا کمینه سطح خاکستری باشد، اندازه پنجره مناسب درست انتخاب شده است، در غیر این صورت اندازه پنجره بزرگتر می‌گردد تا شرط فوق برآورده گردد.

#### جدول ۱. مرحله شناسایی پیکسل‌های نویزی (طبقه بندی پیکسل‌ها) تصویر

پارامترهای $TH$ ، $W$ و $N$ را تنظیم کنید.
برای تمامی پیکسل‌های تصویر نویزی مراحل زیر را انجام دهید.
۱- یک پنجره با اندازه $W$ به مرکزیت پیکسل مورد بررسی در نظر بگیرید و پارامتر $MMV$ را طبق رابطه (۲) محاسبه نمایید.
۲- اگر $MMV > TH$ و $I(i, j) = 255$    $I(i, j) = 0$ نتیجه می‌شود که پیکسل مورد بررسی نویزی است، در غیر این صورت آن پیکسل غیر نویزی خواهد بود.

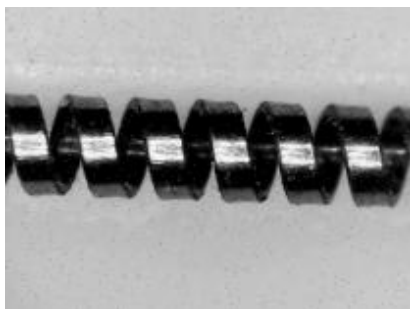
پس از انتخاب اندازه مناسب پنجره، پیکسل نویزی با متوسط میانه و میانگین وزن دار پیکسل‌های غیرنویزی پنجره تغییر می‌یابد. این مراحل برای کلیه پیکسل‌های نویزی تصویر انجام می‌شود تا تصویر رفع نویز شده حاصل گردد. الگوریتم بازیابی پیشنهادی در جدول ۲ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که  $W$  به اندازه پنجره و  $w$  به وزن متناظر هر پیکسل غیر نویزی اشاره می‌کند.



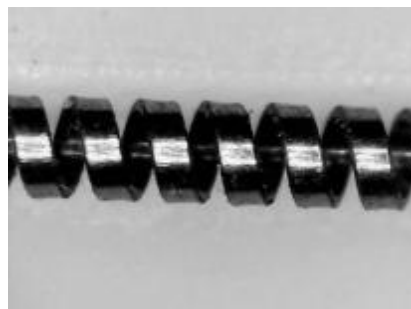
$$|x_1 - x_2| + |y_1 - y_2|$$

شکل ۴. نحوه محاسبه فاصله مَنهتن برای یک پنجره ۳×۳

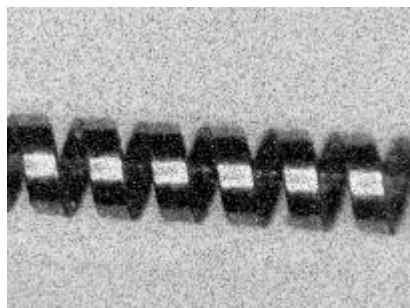
از روش پیشنهادی حذف نویز این مقاله در فرآیند پیش پردازش دستگاه ساخته شده، استفاده شده است. در شکل ۵ نمونه‌ای از نتیجه حذف نویز نمک و فلفل از تصویر گرفته شده توسط دستگاه ساخته شده نشان داده شده است. همانطور که مشخص است تمامی نویزها به طور کامل برطرف شده است و تصویر خروجی الگوریتم دارای تیزی مناسبی می‌باشد. طبق آزمایش‌های انجام شده، روش پیشنهادی توانایی رفع نویز در درصدهای بالای نویز نمک و فلفل را نیز دارا می‌باشد. نمونه‌ای از نتایج فیلتر پیشنهادی این مقاله در چگالی نویزهای بالاتر و مقایسه با برخی از روش‌های رایج حذف نویز نیز در جدول ۲ ارائه شده است. برای جزئیات بیشتر روش‌های مقایسه شده می‌توان به مرجع [۱۵] مراجعه کرد. اگرچه در ساخت این دستگاه هیچگاه با چگالی نویزهای بالا مواجه نخواهیم بود، اما الگوریتم ارائه شده برای رفع نویز نمک و فلفل در این مقاله به عنوان یک نوآوری می‌تواند در کاربردهای رفع نویز چگالی بالا هم مورد استفاده قرار گیرد و طبق نتایج بدست آمده نشان از برتری نسبت به روش‌های رایج موجود دارد.



تصویر ورودی نویزی با چگالی نویز ۵۰ درصد



تصویر رفع نویز شده با روش پیشنهادی برای چگالی نویز ۵۰ درصد



تصویر ورودی با چگالی نویز ۱۵ درصد



تصویر رفع نویز شده با روش پیشنهادی برای چگالی نویز ۱۵ درصد

شکل ۵. تصویر نویزی و رفع نویز شده توسط روش پیشنهادی

## ۲-۲-۲- آستانه‌گذاری تصویر با روش پیشنهادی مقاله

در این مقاله یک روش آستانه‌گذاری جدیدی با توجه به نیاز به اتوماتیک کردن فرآیند تشخیص گام‌های ماریپچ مبتنی بر هیستوگرام تصویر اخذ شده پیشنهاد شده است. همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است، هیستوگرام تصویر خروجی الگوریتم دارای دو قله و یک دره در بین آنها می‌باشد. بسیاری از روش‌ها با فرض اینکه مقادیر شدت روشنایی در بازه ۰ تا ۱ هستند از عدد ۰٫۵ به عنوان آستانه استفاده می‌کنند. با توجه به اینکه بیشتر تصویر اخذ شده از ماریپچ سفید رنگ است عدد ۰٫۵ در این روش آستانه مناسبی نمی‌باشد. طبق روش پیشنهادی، بهترین نقطه آستانه، عمیق‌ترین دره مابین دو قله در هیستوگرام می‌باشد. برای رسیدن به یک آستانه مناسب، ابتدا هیستوگرام تصویر خروجی الگوریتم با یک پنجره همینگ ۵۱ نقطه‌ای فیلتر می‌شود و سپس عمیق‌ترین نقطه بین دو قله به عنوان آستانه مناسب انتخاب می‌گردد. یک پنجره همینگ  $N$  نقطه‌ای با استفاده از رابطه ۶ بدست می‌آید.

$$h[n] = 0.54 - 0.46 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right), \text{ for } n = 0, 1, 2, \dots, n-1 \quad (6)$$

این پنجره یک فیلتر پایین‌گذر می‌باشد که برای حذف تغییرات نویزی و نرم کردن سیگنال مناسب است. همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، روش پیشنهادی به جهت کاربرد در فرآیند تشخیص اتوماتیک گام‌ها و از نظر جدا بودن مناطق سفید رنگ (گام‌های ماریپچ) و عدم وجود تکه‌های ریز و نویزی سفید رنگ مابین گام‌ها که سبب بروز اشتباه در پردازش می‌شود، در شناسایی گام‌ها نسبت به روش آستانه‌گذاری با ۰٫۵ و OTSU عملکرد بهتری داشته است.

## ۲-۳- الگوریتم روش پیشنهادی برای محاسبه گام ماریپچ

الگوریتم پیشنهادی این مقاله شامل ۱۱ مرحله می‌باشد که در جدول ۳ بیان شده است. برای مراحل آستانه‌گذاری و رفع نویز از روش‌های ابتکاری بیان شده در قسمت قبل استفاده شده است و برای مراحل دیگر همچون تبدیل هاف، لبه‌یابی کنی، برجسب گذاری و عملیات مورفولوژی از الگوریتم‌های پیش فرض این روش‌ها استفاده شده است. برای اندازه‌گیری گام‌های ماریپچ در عمل باید ابتدا شاخص کالیبراسیون در ارتفاعی برابر با ماریپچ قرار گیرد و سپس تصویر کالیبراسیون اخذ گردد. این کار با استفاده از صفحه پلکسی کالیبراسیون که دارای شیارهایی با عمق‌های متفاوت است، انجام می‌شود. سپس فرآیند تصویربرداری از کل گام‌های ماریپچ با حرکت دادن قطعه در جهت طولی (x) زیر دوربین توسط برد کنترلی، موتور پله‌ای و گیربکس انجام می‌شود. لازم به ذکر است که در این مرحله به منظور گرفتن لقی کار و افزایش دقت، ابتدا قطعه برای چند ثانیه ثابت می‌گردد و سپس فرآیند تصویربرداری از سطح آن انجام می‌گردد. بعد از تصویربرداری از کل گام‌ها، تصاویر اخذ شده از سطح ماریپچ در اختیار نرم‌افزار قرار می‌گیرد و با توجه به مراحل ۱۱ گانه الگوریتم پیشنهادی، کلیه گام‌ها به صورت اتوماتیک اندازه‌گیری می‌شوند و به کاربر اعلام می‌گردند. به منظور درک بهتر قسمت‌های به کار برده شده در الگوریتم، نمونه‌ای از مراحل انجام شده مطابق با روش پیشنهادی این پروژه بر روی یکی از تصاویر اخذ شده از ماریپچ در شکل ۷ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که برای تست تبدیل هاف و اثر آن در برنامه نوشته شده تصویر ورودی انتخاب شده است که با افق زاویه دارد (کج می‌باشد). همانگونه که شکل ۷ نشان می‌دهد، تصویر کج ورودی ابتدا به تصویر سطح خاکستری تبدیل شده است و سپس فرآیند پیش‌پردازش رفع نویز بر روی آن اعمال شده است. سپس لبه‌های تصویر به منظور تشخیص خطوط قوی تصویر استخراج شده است و تصویر لبه به فرآیند تبدیل هاف اعمال شده است. در این قسمت زاویه خطوط اصلی تصویر با محور افق محاسبه شده است و پس از اعمال عکس‌زوایای فوق به تصویر، ماریپچ به صورت

کاملاً افقی در تصویر قرار گرفته است. در مرحله بعد فرآیند تبدیل تصویر به یک تصویر باینری با استفاده از روش تعیین آستانه پیشنهادی مقاله انجام شده است. سپس عملیات مورفولوژی به منظور جبران برخی از اطلاعات از دست رفته تصویر در هنگام تبدیل تصویر به باینری به کار گرفته شده است. در این قسمت برخی از نقاط نویزی و ناقص تصویر اصلاح می‌شوند و در قسمت بعد عملیات برچسب گذاری تصویر به منظور جداسازی اجزای مختلف علی‌الخصوص قسمت‌های بازتاب شده از سطح ماریچ به منظور محاسبه طول گام انجام می‌شود. بعد از این مرحله قسمت‌های بازتاب شده از سطح ماریچ تشکیل یک موج مربعی را می‌دهند که با محاسبه دوره تناوب آن در زمان‌های مختلف طول هر گام بر حسب میکرون و پیکسل بدست می‌آید.

جدول ۲. نتایج PSNR روش‌های مختلف برای تصاویر LENA، MANDRILL و CAMERAMAN بر حسب dB.

تصویر	روش	۲۰٪	۵۰٪	۸۰٪	۹۰٪	۹۴٪	۹۹٪
LENA	MDF	۳۷/۳۲	۳۳/۴۵	۲۹/۱۸	۲۸/۰۳	۲۷/۶۲	۲۷/۱۱
	AMF	۴۲/۵۸	۳۸/۲۴	۳۵/۰۲	۳۳/۶۳	۳۲/۸۱	۳۰/۷۶
	DBA	۴۳/۰۲	۳۷/۵۸	۳۳/۷۳	۳۱/۸۲	۳۱/۰۳	۲۸/۸۹
	NAFSMF	۴۲/۱۵	۳۷/۹۰	۳۵/۲۰	۳۴/۰۳	۳۲/۹۶	۲۸/۷۲
	AWMF	۴۲/۸۵	۳۹/۱۰	۳۵/۷۷	۳۴/۲۶	۳۳/۷۰	۳۱/۴۳
	[16]	۳۵/۴۰	۳۵/۰۷	۳۴/۰۰	۳۳/۱۱	۳۲/۳۳	۲۹/۶۲
	[17]	۳۹/۷۶	۳۸/۲۵	۳۵/۹۷	۳۴/۵۴	۳۳/۶۳	۳۱/۶۶
	روش پیشنهادی	۴۳/۶۰	۳۹/۰۱	۳۵/۷۴	۳۴/۳۳	۳۳/۶۳	۳۱/۴۷
MANDRILL	MDF	۳۱/۲۴	۳۰/۱۰	۲۸/۲۴	۲۷/۶۳	۲۷/۴۲	۲۷/۰۹
	AMF	۳۷/۰۸	۳۳/۰۷	۳۰/۷۰	۲۹/۹۸	۲۹/۶۴	۲۸/۷۷
	DBA	۳۷/۲۴	۳۲/۹۶	۳۰/۳۱	۲۹/۴۶	۲۸/۹۶	۲۸/۱۷
	NAFSMF	۳۶/۹۳	۳۲/۹۶	۳۰/۷۵	۳۰/۰۶	۲۹/۵۹	۲۷/۹۶
	AWMF	۳۱/۲۶	۳۰/۱۰	۲۸/۳۰	۲۷/۶۵	۲۷/۳۵	۲۷/۱۲
	[16]	۲۹/۹۴	۲۹/۹۳	۲۹/۸۲	۲۹/۶۱	۲۹/۴۷	۲۸/۶۱
	[17]	۳۴/۹۱	۳۲/۸۴	۳۱/۳۲	۲۲/۳۰	۲۹/۶۱	۲۸/۸۴
	روش پیشنهادی	۳۷/۴۹	۳۳/۳۴	۳۰/۹۳	۳۰/۰۶	۲۹/۷۶	۲۸/۹۱
CAMERAMAN	MDF	۳۵/۱۳	۳۲/۷۳	۲۹/۲۲	۲۸/۱۸	۲۷/۸۷	۲۷/۴۳
	AMF	۴۱/۲۰	۳۶/۲۰	۳۳/۷۹	۳۲/۷۳	۳۲/۰۴	۳۰/۸۹
	DBA	۴۱/۱۵	۳۶/۷۰	۳۳/۶۶	۳۲/۴۷۳	۳۱/۹۲	۳۰/۴۸
	NAFSMF	۴۰/۱۰	۳۶/۳۶	۳۳/۹۹	۳۳/۲۶	۳۲/۵۵	۲۸/۵۷
	AWMF	۳۵/۱۱	۳۲/۶۷	۲۹/۲۱	۲۸/۲۱	۲۷/۸۵	۲۷/۴۲
	[16]	۳۲/۲۸	۳۲/۲۵	۳۲/۰۹	۳۱/۶۷	۳۱/۲۳	۲۸/۳۱
	[17]	۳۸/۵۵	۳۶/۴۴	۳۴/۱۹	۳۳/۲۴	۳۲/۶۷	۳۰/۹۳
	روش پیشنهادی	۴۰/۹۹	۳۶/۹۵	۳۴/۴۳	۳۳/۷۰	۳۲/۹۲	۳۱/۷۴

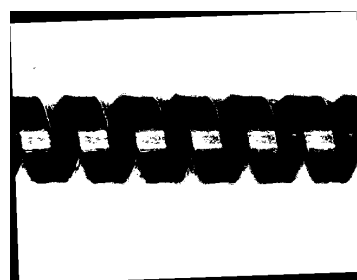
### ۳- نتایج بدست آمده در اندازه گیری گام‌های ماریچ

همانطور که در مقدمه بیان شد، نتایج اندازه گیری گام‌های ماریچ ساخته شده می‌تواند با دو دستگاه CMM و VMM مقایسه گردد. طبق توضیحات قبلی، دستگاه CMM بر اساس تماس پروب‌ها با سطح قطعه کار می‌کند که با توجه به ابعاد بسیار کوچک ماریچ و اندازه گام‌ها سبب جابجا شدن قطعه و خطا در اندازه گیری می‌شود. به همین دلیل استفاده از آن در این کاربرد قابل توجهی نمی‌باشد. بنابراین تنها دستگاه در دسترس و قابل اعتمادی که از لحاظ کارکرد مبتنی بر پردازش تصویر است و ساختار آن به ساختار دستگاه مقاله نزدیک است دستگاه VMM می‌باشد. متأسفانه با وجود تلاش‌ها و جستجوهای بسیار برای یافتن الگوریتم دقیق دستگاه

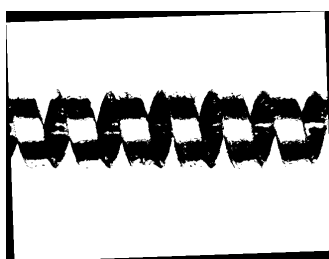
VMM به منظور ارائه در مقاله نتیجه‌ای حاصل نگردید. علت آن این است که دستگاه VMM یک دستگاه بسیار پیشرفته، با فناوری بالا و قیمت بسیار زیاد می‌باشد. در حال حاضر نمونه‌های مورد نیاز برای اندازه‌گیری گام‌های ماریپچ با دقت مورد نظر (با قابلیت حرکت در سه بعد و یک محور موتوری) قیمتی بیشتر از ۳۰۰۰۰ دلار دارند و به همین علت سازندگان این دستگاه الگوریتم آن را به صورت عمومی منتشر نکرده‌اند. لازم به ذکر است با توجه به امکانات استفاده شده در دستگاه VMM همچون استفاده از دوربین‌های CCD با رزولوشن بسیار بالا و همچنین استفاده از لنزهای تلستریک با زاویه دید زیاد، نتایج اندازه‌گیری آن‌ها بسیار قابل اعتماد می‌باشد. در این مقاله هدف این است که دستگاهی که ساخته می‌شود علاوه بر اندازه‌گیری اتوماتیک گام‌های ماریپچ، دارای نتایج نزدیکی با دستگاه VMM باشد. بنابراین نتایج بدست آمده با دستگاه ساخته شده هرچقدر به نتایج VMM نزدیکتر باشد نشان از موفقیت اندازه‌گیری دستگاه دارد.



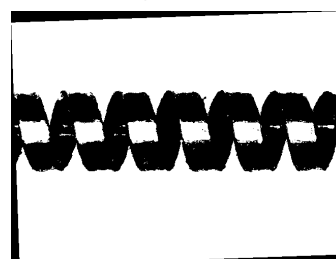
تصویر اصلی



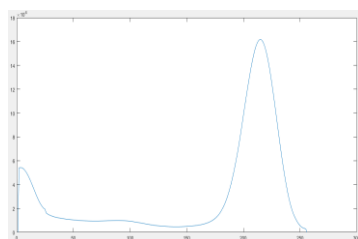
باینری شده با روش OTSU



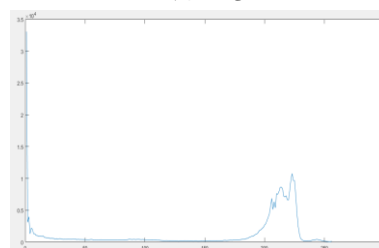
خروجی روش آستانه ۰,۵



خروجی روش پیشنهادی



هیستوگرام فیلتر شده با همینگ



هیستوگرام تصویر اصلی

شکل ۶. مقایسه نتایج آستانه‌گذاری با روش پیشنهادی و آستانه ۰,۵

در این قسمت به اندازه‌گیری گام‌های یک ماریپچ با استفاده از دستگاه ساخته شده و مقایسه آن با دستگاه VMM خواهیم پرداخت. لازم به ذکر است که گام تئوری ماریپچ تست در حدود ۷۰۰ میکرون بوده است. یکی از ویژگی‌های مهم دستگاه ساخته شده در مُد اتوماتیک قدرت تکرار پذیری نسبتاً مناسب آن می‌باشد. اگر گام‌ها توسط یک دستگاه VMM اندازه‌گیری شوند، در هر بار اندازه‌گیری کاربر باید نقاط ابتدا و انتهای گام را مشخص نماید. بنابراین انتخاب نقاط ابتدایی و انتهایی توسط کاربر صورت می‌گیرد و سبب بروز خطا و عدم اطمینان از اندازه بدست آمده خواهد شد. زیرا کاربر می‌تواند نقاط شروع و پایان گام را اشتباهاً یک یا چند پیکسل جابجا انتخاب نماید. این کار سبب می‌شود تا تکرار پذیری اندازه‌گیری تا حد زیادی کاهش یابد. در مُد اتوماتیک دستگاه



ساخته شده با توجه به اینکه نقاط ابتدایی و انتهایی گام‌ها به صورت تطبیقی و اتوماتیک و بر اثر شدت نور بازتاب شده از لبه‌ها در هنگام تصویربرداری انتخاب می‌گردد، تکرارپذیری اندازه‌گیری تا حد بسیار زیادی بالا خواهد رفت. به منظور بررسی تکرارپذیری در اندازه‌گیری‌های دستگاه نمونه ساخته شده، به تعداد ۱۰ بار فرآیند اندازه‌گیری اتوماتیک بر روی ماریچ انجام شده است. نمودار میانگین ۱۰ بار تست به همراه دو تست اول در شکل ۸ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد نمودار میانگین ۱۰ بار اندازه‌گیری تقریباً بر روی نمودارهای دو تست اول منطبق می‌باشد. بر اساس شکل ۸ تنها قسمتی که گام‌ها با یکدیگر دارای اختلاف نسبتاً زیادی می‌باشند گام ۱۳ام ماریچ می‌باشد.

### جدول ۳. الگوریتم پیشنهادی مقاله برای یافتن اندازه گام‌های ماریچ به صورت اتوماتیک

پس از مرحله کالیبراسیون (محاسبه طول هر پیکسل بر حسب میکرون با استفاده از تصویر گرفته شده از ماریچ در کنار شاخص کالیبراسیون تراز شده با آن) مراحل زیر برای هر یک از تصاویر اخذ شده از ماریچ انجام می‌شود.
۱. تبدیل تصویر به سطح خاکستری
۲. حذف نویز با استفاده از روش پیشنهادی (فیلتر تطبیقی میانگین و میانه وزن دار)
۳. محاسبه لبه‌های تصویر با روش Canny Edge Detection
۴. اعمال تبدیل هاف بر روی تصویر لبه به منظور تشخیص خطوط اصلی موجود در تصویر و محاسبه زاویه آنها با افق
۵. اعمال چرخش اصلاحی به تصویر و صاف کردن ماریچ در جهت افقی در صورت نیاز
۶. تعیین آستانه مناسب با استفاده از روش پیشنهادی و تبدیل تصویر سطح خاکستری به باینری
۷. اعمال عملیات فرسایش، افزایش، بستن و باز کردن بر روی تصویر باینری شده به منظور حذف نقاط تک پیکسل و صاف کردن لبه‌ها
۸. فرآیند برجسب گذاری اشیاء تصویر و تشخیص گام‌ها
۹. بدست آوردن یک سیگنال پالسی
۱۰. محاسبه دوره‌های تناوب پالس مربعی ایجاد شده
۱۱. اعلام اندازه گام‌ها بر حسب پیکسل و میکرون به کاربر و نمایش گام‌ها بر روی تصویر ماریچ

در این گام وجود آلودگی در سطح ماریچ و عدم بازتاب مناسب نور از سطح آن، سبب ایجاد خطا در اندازه‌گیری شده است که خود عاملی برای کاهش تکرارپذیری در اندازه‌گیری می‌باشد. طبق محاسبات انجام شده در این مرحله، ماکزیمم خطای تکرارپذیری که در محاسبه اندازه گام ۱۳ام بدست آمده است، حدود ۲۲ میکرون می‌باشد که به علت وجود آلودگی در سطح ماریچ رخ داده است. راه حل حذف یا کاهش این نوع خطاها تمیز کردن ماریچ قبل از اندازه‌گیری و انجام فرآیند اندازه‌گیری در اتاق تمیز<sup>۱</sup> می‌باشد. همچنین مقدار انحراف استاندارد میانگین ده بار تست حدود ۱۴ میکرون می‌باشد که نشان‌دهنده این است اندازه گام‌ها با دقت نسبتاً خوبی به یکدیگر نزدیک می‌باشند. لازم به ذکر است که فرآیند اندازه‌گیری گام‌های ماریچ با استفاده از دستگاه VMM همیشه در اتاق تمیز انجام می‌گردد و ایده آل این است که اندازه‌گیری‌های دستگاه نمونه ساخته شده نیز در اتاق تمیز انجام شود. نمایی از نتایج اندازه‌گیری ماریچ توسط دستگاه ساخته شده در شکل ۹ نشان داده شده است.

در آزمایشی دیگر به منظور مقایسه دقت اندازه‌گیری دستگاه ساخته شده، یک ماریچ دارای سُنْبه<sup>۲</sup> با دستگاه VMM و دستگاه ساخته شده اندازه‌گیری شد و نتایج آن در جدول ۴ و شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. لازم به ذکر است برای اندازه‌گیری این ماریچ از مُد دستی دستگاه استفاده شد و اندازه‌گیری برای ۳۰ گام اول ماریچ انجام شده است. قطر مفتول اندازه‌گیری شده توسط دستگاه نمونه ساخته شده ۸۰۴ میکرون و توسط VMM حدود ۸۰۲ میکرون می‌باشد. با توجه به نتایج بدست آمده در این قست، طول اندازه‌گیری شده در هر دو روش بسیار به هم نزدیک است و میانگین آن‌ها نیز حدود ۴ میکرون با یکدیگر اختلاف دارد. با

<sup>۱</sup> Clean Room

<sup>۲</sup> Mandrel

فرض دقیق بودن اندازه گیری با VMM دستگاه ساخته شده با دوربین حاضر گام‌ها را با ۰,۵۵ درصد خطا اندازه گیری کرده است که نشان از عملکرد قابل قبول دستگاه در اندازه گیری دارد.



(۲) تبدیل تصویر رنگی به سطح خاکستری (نویزی)



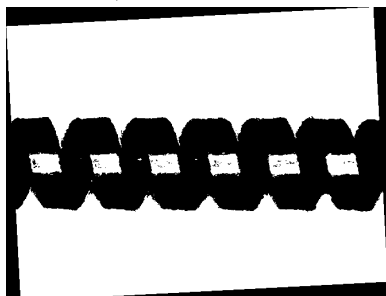
(۱) تصویر ورودی (رنگی و نویزی)



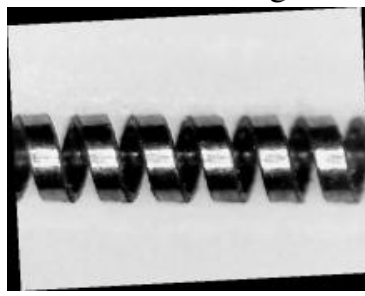
(۴) لبه یابی با استفاده از الگوریتم Canny



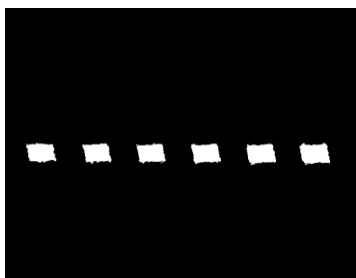
(۳) تصویر رفع نویز شده توسط روش پیشنهادی



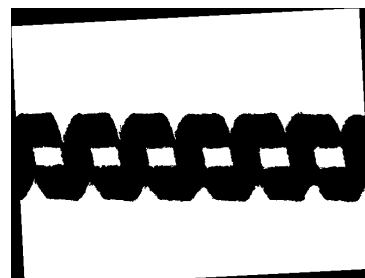
(۶) باینری کردن تصویر با روش پیشنهادی



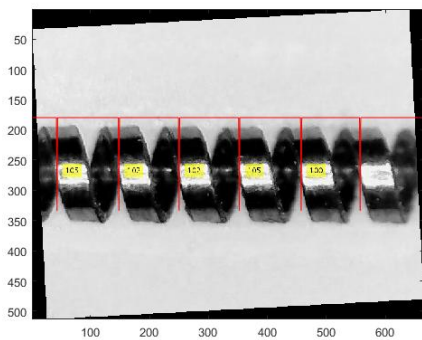
(۵) تصحیح زاویه تصویر با تبدیل هاف



(۸) یافتن قسمت‌های مهم گام مارپیچ با استفاده از برجسب گذاری



(۷) اعمال اپراتورهای مورفولوژی بر روی تصویر باینری



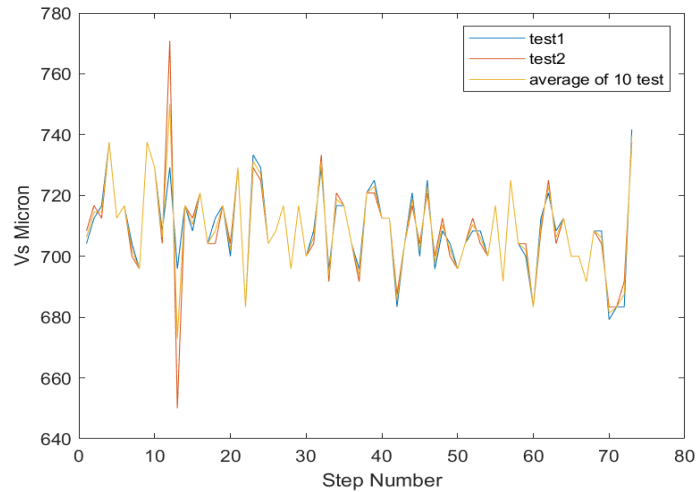
GAMS VS Microns = 734 713 713 734 699

(۱۰) محاسبه طول گام (پریود پالس) بر حسب میکرون

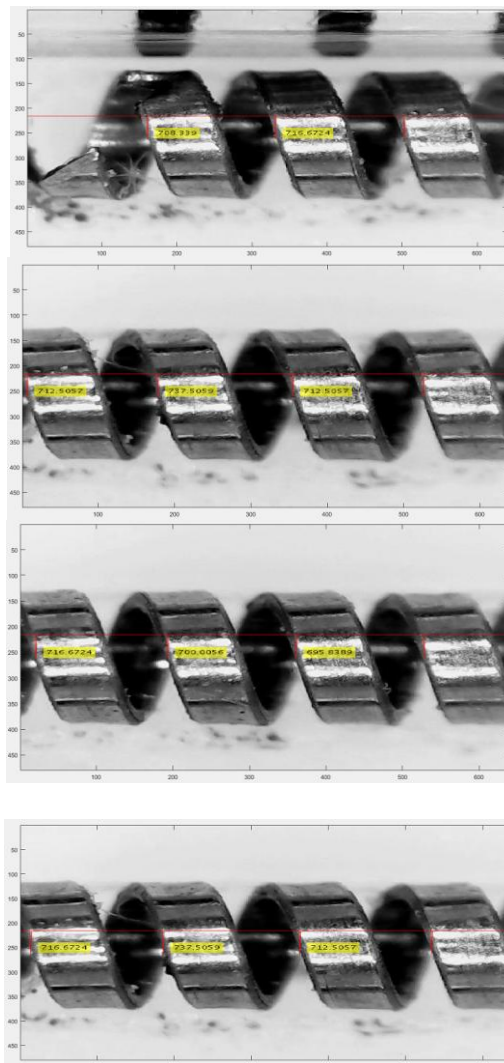


(۹) تبدیل شکل مرحله قبل به یک پالس مربعی

شکل ۷. مراحل الگوریتم پیشنهادی مقاله برای اندازه گیری گام‌های مارپیچ



شکل ۸. مقایسه نتایج اندازه‌گیری گام‌های مارپیچ در دوزمان مختلف با میانگین ده بار اندازه‌گیری



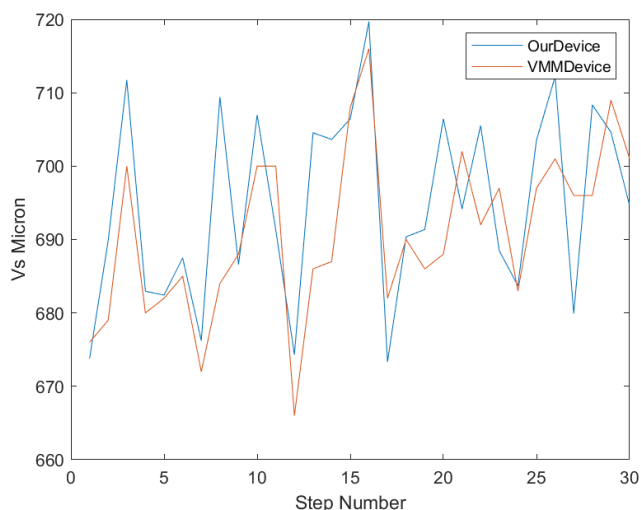
شکل ۹. تعدادی از تصاویر بدست آمده از اندازه‌گیری گام مارپیچ

با توجه به نتایج بدست آمده از جمله مزایای دستگاه ساخته شده نسبت به دستگاه VMM قیمت و سرعت مناسب آن می‌باشد. دستگاه نمونه ساخته شده در مُد اتوماتیک مارپیچ تست دارای ۱۰۰ گام را در ۱۷ دقیقه اندازه‌گیری کرده است. در صورتی که

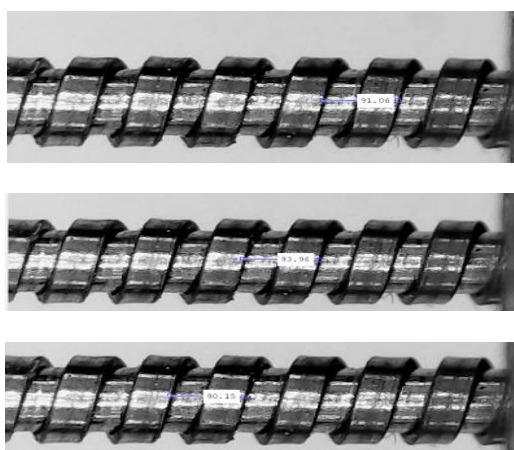
دستگاه VMM فرآیند اندازه گیری را در بیشتر از ۱۰۰ دقیقه انجام داده است. نکته دیگر متناسب بودن دستگاه ساخته شده با نیاز صنعت می‌باشد. در مُد اتوماتیک با یک بار تصویربرداری از کل مارپیچ می‌توانیم با سرعت بسیار بالا به اندازه هر گام پی ببریم که از ویژگی‌های منحصر به فرد این دستگاه می‌باشد و سبب افزایش سرعت در اندازه گیری گام‌ها می‌گردد. نکته دیگر سادگی کار با دستگاه و خاصیت مرجع باز بودن برنامه دستگاه است که متناسب با نیاز می‌توان آن را به آسانی تغییر داد. لازم به ذکر است این دستگاه قابلیت ارتقاء و بکار رفتن در اندازه گیری‌های دوبعدی دیگر را تنها با تغییر برنامه نوشته شده دارا می‌باشد. از جمله کاربردهای دیگر این دستگاه می‌توان به اندازه گیری گام‌ها در کارخانه فرسایش صنایع مختلف، کمک فرسایشی، کارخانه ساخت دمپر و هرگونه اندازه گیری دوبعدی اجسام اشاره کرد.

#### جدول ۴. نتایج اندازه گیری گام‌های مارپیچ دارای سُنجه بر حسب میکرون

اندازه گیری گام‌ها با دستگاه نمونه	اندازه گیری گام‌ها با VMM
۶۷۳/۷۸۷۹	۶۷۶
۶۸۹,۸۴۸۵	۶۷۹
۷۱۱,۷۴۲۴	۷۰۰
۶۸۲/۹۵۴۵	۶۸۰
۶۸۲,۴۲۴۲	۶۸۲
۶۸۷,۵۰۰۰	۶۸۵
۶۷۶,۲۱۲۱	۶۷۲
۷۰۹,۳۹۳۹	۶۸۴
۶۸۶,۵۹۵۹	۶۸۸
۷۰۶,۹۶۹۷	۷۰۰
۶۹۱/۲۸۷۹	۷۰۰
۶۷۴/۳۱۸۲	۶۶۶
۷۰۴/۵۴۵۵	۶۸۶
۷۰۳,۶۳۶۴	۶۸۷
۷۰۶/۴۳۹۴	۷۰۸
۷۱۹/۶۹۷۰	۷۱۶
۶۷۳/۳۳۳۳	۶۸۲
۶۹۰/۳۷۷۸	۶۹۰
۶۹۱/۳۶۳۶	۶۸۶
۷۰۶/۴۳۹۴	۶۸۸
۶۹۴/۱۶۶۷	۷۰۲
۷۰۵/۵۳۰۳	۶۹۲
۶۸۸/۴۸۴۸	۶۹۷
۶۸۳/۷۱۲۱	۶۸۳
۷۰۳/۵۴۵۵	۶۹۷
۷۱۲/۱۹۱۷	۷۰۱
۶۷۹/۹۲۴۹	۶۹۶
۷۰۸/۳۳۳۳	۶۹۶
۷۰۴,۶۲۱۲	۷۰۹
۶۹۴/۶۲۱۲	۷۰۱
میانگین ۶۹۴,۷۹	میانگین ۶۹۰,۹۶



شکل ۱۰. نمودار مقایسه‌ای اندازه‌گیری گام‌ها با دستگاه ساخته شده و دستگاه VMM



شکل ۱۱. نتایج اندازه‌گیری چند گام ماریچ دارای سنبه

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش نوین برای اندازه‌گیری گام‌های ماریچ با استفاده از پردازش تصویر ارائه گردید و دستگاه نمونه نیز ساخته شد. روش پیشنهادی مقاله علاوه بر ارائه روشی برای اندازه‌گیری گام‌های ماریچ، با نوآوری‌هایی در زمینه ارائه الگوریتم جدیدی برای حذف نویز ضربه در چگالی نویزهای بالا و ارائه یک روش جدید آستانه‌گذاری برای تبدیل تصاویر سطح خاکستری به دودویی همراه بود. با توجه به دوربین به کار رفته در دستگاه ساخته شده که جزء ارزان قیمت‌ترین دوربین‌های بازار است، کمی خطا در اندازه‌گیری دور از انتظار نمی‌باشد. برای بهبود عملکرد اندازه‌گیری می‌توان از دوربین‌های صنعتی زوم با لنز تلسنتریک و با رزولوشن بالا همچون ACA4112-30UM شرکت باسلر استفاده گردد تا علاوه بر کاهش اعوجاج‌های تصویر خطای حاصل از اندازه‌گیری نیز کاهش پیدا کند. استفاده از دوربین‌های پیشرفته‌تر می‌تواند فرآیند ارتباط با نرم‌افزارهای دیگری همچون OpenCV را آسان گرداند و نرم‌افزار دستگاه نیز با کیفیت بهتری پیاده‌سازی شود. دستگاه ساخته شده با توجه به قیمت تمام شده آن بسیار مقرون به صرفه می‌باشد و می‌تواند در صنایع مختلف نظامی و غیر نظامی برای کاربردهای مختلفی استفاده گردد. خطای دستگاه

ساخته شده در صورتی که مبنا VMM باشد حدود ۵۵,۰ درصد می‌باشد. در صورتی که نقاط ابتدایی و انتهایی گام‌ها به صورت کاملاً موثر انتخاب گردند در بهترین حالت می‌توان به دقت یک پیکسل که در دستگاه ساخته شده حدود ۵ میکرون می‌باشد، رسید. با توجه به آزمایش‌های انجام شده و نتایج بدست آمده عملکرد دستگاه نمونه ساخته شده در برابر نمونه خارجی آن قابل قبول می‌باشد.

## مراجع

- [1] D'Agostino, S., and C. Paoloni, "Cathode voltage adjustment to compensate helix pitch tolerance in TWTs", *Electronics Letters*, vol.40, no.1, pp. 36-38, 2004.
- [2] Pierce, J. R, "Traveling-Wave Tubes " , New York ,1950.
- [۳] مژده اصغرپور زاده و ماشالله عباسی دزفولی، " ارائه روشی جدید برای اندازه‌گیری طول لوله در خط تولید با استفاده از تکنیک‌های پردازش تصویر"، سومین کنفرانس ملی مهندسی کامپیوتر، فناوری اطلاعات و پردازش داده‌ها، ۱۳۹۷.
- [۴] سید علیرضا سیدین، حسین رضائی و محمدجواد برکچی، " اندازه‌گیری بدون تماس از قطعات صنعتی مسطح با استفاده از تکنیک‌های پردازش تصویر دیجیتال"، ششمین کنفرانس مهندسی ساخت و تولید ایران، ۱۳۸۲.
- [5] Ashish Karigar, " Computer Vision based Measuring Machine", *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, vol.08, 2021.
- [6] Lyakhov, Pavel A., et al, "A New Method for Adaptive Median Filtering of Images", *IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconrus)*, 2019.
- [7] Goyal, Bhawna, et al, "Image denoising review: From classical to state-of-the-art approaches", *Information Fusion*, vol.55, pp. 220-244 , 2020.
- [8] Guo, Qiang, et al, "An efficient SVD-based method for image denoising", *IEEE transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol.26. no.5, pp. 868-880 , 2015.
- [9] Bhabatosh, Chanda, "Digital image processing and analysis", PHI Learning Pvt. Ltd, 2011.
- [10] Wang, Yukang, et al, "Deepflux for skeletons in the wild" ,*Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2019.
- [11] Ruder, Sebastian, "An overview of gradient descent optimization algorithms", *arXiv preprint arXiv:1609.04747*, 2016.
- [12] Qi, Wang, Fu Li, and Liu Zhenzhong, "Review on camera calibration", *Chinese Control and Decision Conference*, pp. 3354-3358, 2010.
- [13] Roy, Amarjit, Lalit Manam, and Rabul Hussain Laskar, "Region Adaptive Fuzzy Filter: An Approach for Removal of Random-Valued Impulse Noise", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol.65, no.9 , pp. 7268-7278, 2018.
- [14] DULONG, Carol, " Apparatus and method for determining the Manhattan distance between two points", *U.S. Patent*, vol.5, pp. 722-735, 1995.
- [۱۵] صادق کلانتری و علی محمد فتوحی، "حذف نویز ضربه از تصاویر دیجیتال در محدوده وسیعی از چگالی نویز مبتنی بر فیلتر میانگین و میانه تطبیقی"، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۷، شماره ۲، ۱۳۹۶.

- 
- [16] ZHANG, Jian, et al, "Image restoration using joint statistical modeling in a space-transform domain", IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, vol.24, no.6, pp.915-928, 2014.
- [17] Jiang, Jieli, Lei Zhang, and Jian Yang, "Mixed noise removal by weighted encoding with sparse nonlocal regularization", IEEE transactions on image processing, vol.23, no.6, pp. 2651-2662, 2014.