

Research Article

Agricultural Engin., 44(1) (2021) 1-19  
DOI: 10.22055/AGEN.2021.34892.1586

ISSN (E): 2588-543X  
ISSN (P): 2588-5979

## Design, manufacture and evaluation of automatic spraying mechanism In order to increase productivity

H. Hejazipoor<sup>1</sup>, J. Massah<sup>2\*</sup>, K. Asefpourvakiliyan<sup>3</sup>, M. Soryani<sup>4</sup> and Gh. Chegini<sup>5</sup>

1. PhD student , Department of Biosystem Mechanical Engineering, College of Abouraihan, University of Tehran, Tehran, Iran.
2. Associate Professor, Department of Biosystem Mechanical Engineering, College of Abouraihan, University of Tehran, Tehran, Iran
3. Assistant Professor, Department of Biosystem Mechanical Engineering, College of Abouraihan, University of Tehran, Tehran, Iran.
4. Associate Professor, Faculty of Computer Engineering, Iran University of science and technology, Tehran, Iran
5. Associate Professor, Department of Biosystem Mechanical Engineering, College of Abouraihan, University of Tehran, Tehran, Iran

Received: 2 October 2020

Accepted: 10 January 2021

### Abstract

**Introduction:**The most important issues in spraying fields and greenhouses are reducing the use of pesticides, reducing the dangerous effects of spraying, protecting the environment, improving the quality of spraying and increasing people's health. For this reason, the adverse effects of poisons on children's health are more important than adults, and the need to reduce the use of poisons and follow the principles of spraying to prevent children from developing cancer is twofold. In this study, the robot sprays to plant by measuring its volume and in order to reduce the consumption of poisons. The robot is mechanically designed to be able to move between rows of plants and open its manipulator step by step and take deep pictures of each plant in front of it, then analyze the image of each section and observe the plant volume. Detect and spray the same section based on the calculated volume. The process of imaging, volume detection and spraying of the solution based on the estimated volume is repeated at each stage of manipulator opening until the height of the plant is completed and at the end, the whole manipulator is retracted.

**Materials and Methods:**The robot acts intelligently in detecting plant height and closes in the last section after imaging and spraying the solution. The manipulator is able to assess and spray plants up to 270 cm in height. The above robot consists of different parts including camera chamber and nozzle, nozzle and Kinect American camera version 1, manipulator and manipulator actuator mechanism, pump and solution tank, processor, Arduino and relay boards, cart and robot actuator system. To design the above robot, first the static forces applied to the manipulators were examined and then the kinematic calculations of the manipulator were performed. The result of the calculations showed the accuracy of the kinematic equations. After performing calculations to design the robot, examining the environmental conditions and considering the construction cost, the three-dimensional model of the robot was designed in Solidworks 2016 software and based on the above model, the construction work was done step by step. The robot is controlled by Matlab 2010 software. The entire robot working algorithm is coded in Matlab software. For this reason, the main part of controlling the robot is the laptop processor. The



laptop controlled by the robot is located in the built-in place behind the robot and transmits all the robot commands to the set of operators through the Arduino board and the relay board. The input information is transmitted to the processor by the Kinect camera, and the processor makes the necessary decisions according to the coded program. Finally, the output commands from the processor are transferred to the Arduino board and the relay board to start the actuators. ADM A10-4655M APU processor was used. Developer Toolkit Browser v1.8.0, KinectExplorer-D2D, and Kinect for Windows Software Development Kit (SDK) were used to connect the Kinect camera to a Windows laptop. Two coefficients  $\alpha$  and  $\beta$  are needed to determine the plant volume in each section.  $\alpha$  is the average plant volume of several plants that have been calculated manually and  $\beta$  is the correction factor multiplied by the amount of plant volume estimated by the robot so that the actual volume of sprayed solution is more in line with the plant needs and the opinion of relevant experts. The volume estimated by the robot in each section is the product of the volume factor multiplied by the average plant volume of the plant ( $\alpha$ ). The volume factor is the average observed plant width ( $M$ ) divided by the distance between two consecutive plants in pixels ( $D$ ). Multiply the volume of the plant observed in the section by multiplying the volume factor by the calculated volume ( $\alpha$ ) using the Scale Invariant method (independent of the distance from the camera to the object).

**Results and Discussion:** To calculate the average plant volume manually, several plants should be selected randomly and the plant volume should be calculated by computational methods or flooding method. Then introduced the average volume of these few plants as  $\alpha$  to the program. Therefore, the more accurately the manual volume is calculated, and the greater the number of selected plants, Finally, the value of  $\alpha$  and the final volume of the plant will be calculated more accurately. The robot should be able to spray the right amount of solution depending on the type of plant and its conditions. Spraying the solution to the plant may not be scientifically justified by experts and specialists according to the type of plant, time of spraying, poison concentration and plant needs. Therefore, the correction factor  $\beta$  should be multiplied by the volume estimated by the robot to the actual volume. Spray the solution to the plant according to the needs of the plant and the opinion of experts. The results of the evaluation show that the robot is able to spray different amounts of solution in the detection of plants with different volumes and the amount of solution sprayed by the robot was proportional to the volume of plants. The average volume of solution sprayed by the robot is 27.1 cc and the average volume of solution sprayed by the worker is 33.1 cc. Also, the standard deviation of the average volume of solution sprayed by the robot and the worker is 2.94 and 3.11, respectively. In other words, the robot is able to spray more accurately and the amount of poison consumption in the robot is estimated less than the worker.

**Conclusion:** It was mentioned that the evaluation of the robot is reported in order to reduce the consumption of acceptable poisons. The feature of being ontime includes collecting plant information and spraying the solution moments after data processing is one of the important features of the above research. Also, the ability of the robot in ontime and scale invariant (independent of the distance from the camera to the object) evaluation of the robot was considered acceptable and useful.

**Key word:** *Sprayer, volume estimated, robotic, image processing.*

## طراحی، ساخت و ارزیابی مکانیزم ربات محلول پاش اتوماتیک به هدف افزایش بهره‌وری

حجت حجازی پور<sup>۱</sup>، جعفر مساح<sup>۲\*</sup>، کیوان آصف پور و کیلیان<sup>۳</sup>، محسن سریانی<sup>۴</sup> و غلامرضا چگینی<sup>۵</sup>

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، پردیس ابرویحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، پردیس ابرویحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳- استادیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، پردیس ابرویحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۴- دانشیار، گروه هوش مصنوعی، دانشکده مهندسی کامپیوتر، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

۵- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، پردیس ابرویحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده	تاریخچه مقاله
<p>از مهمترین مسائل در سمپاشی مزارع و گلخانه‌ها کاهش مصرف سم استفاده شده، کاهش اثرات خطرناک سمپاشی، حفظ محیط زیست، ارتقاء کیفیت پاشش و افزایش سلامت افراد است. در این پژوهش، ربات با اندازه‌گیری حجم توده گیاه اقدام به محلول پاشی می‌کند. ربات بین ردیف بوته‌ها قرار می‌گیرد و سپس شروع به حرکت می‌کند تا محل قرارگیری بوته را تشخیص دهد. با تشخیص بوته و قرارگیری ربات روبروی بوته، حرکت خطی ربات متوقف می‌شود. پس از آن بازوی ربات به صورت مرحله به مرحله باز می‌شود و در هر مرحله اقدام به عکس برداری مقطع به مقطع از بوته مقابل خود می‌کند. سپس به محاسبه حجم توده گیاه در هر مقطع پرداخته و براساس حجم تخمین زده شده، اقدام به محلول پاشی همان مقطع می‌کند. ربات مورد نظر پس از برآورد پارامترهای طراحی در نرم افزار Solidworks 2016 طراحی و سپس ساخته شد. بازو قادر است گیاهان تا ارتفاع ۲۷۰ سانتیمتر را ارزیابی کرده و محلول پاشی کند. نتایج حاصل از ارزیابی نشان می‌دهد که ربات قادر است در تشخیص بوته‌های با حجم‌های گوناگون، مقادیر متفاوتی از محلول را پاشش کند و مقدار محلول پاشش شده توسط ربات متناسب با حجم بوته‌ها بود. میانگین مقدار حجم محلول پاشش شده توسط ربات ۲۷/۱۲۵ میلی لیتر و میانگین مقدار حجم محلول پاشش شده توسط کارگر ۳۳/۱ میلی لیتر شد. نتایج تجزیه واریانس در قالب طرح کاملاً تصادفی نشان دهنده اطمینان از وجود اختلاف معنادار بین پاشش محلول توسط ربات و پاشش محلول توسط کارگر است.</p>	<p>دریافت: ۹۹/۰۷/۱۱ پذیرش نهایی: ۹۹/۱۰/۲۱</p> <p><b>کلمات کلیدی:</b> محلول پاش، تعیین حجم، رباتیک، پردازش تصویر</p> <p>* عهده دار مکاتبات Email: (jmassah@ut.ac.ir)</p>

### مقدمه

هدف از تحقیق در زمینه رباتیک، طراحی و ساخت ماشین‌های خودکاری است که قادرند در کاربردهای خاص یا عمومی کارهای تکراری و یا خطرناک را در زمانی کمتر و یا دقت و ضریب اطمینان بالاتری نسبت به انسان انجام دهند. در این زمینه تحقیقات وسیعی صورت گرفته است (۱۰). بارکس و همکاران<sup>۱</sup> موفق به طراحی و ساخت یک ربات کوچک سمپاش برای کار در گلخانه گردیدند. ربات آنها از منطق فازی برای مسیریابی استفاده می‌نمود. نتایج ارزیابی خطای متوسط را حدود ۱۰ میلی‌متر و حداکثر خطا را حدود ۴۰ میلی‌متر نشان داد (۳). برجه و همکاران<sup>۲</sup> یک ربات مستقل با هدایت GPS<sup>۳</sup> (سیستم موقعیت‌یاب جهانی) برای کنترل علف‌های هرز ارائه کردند. این ربات دارای تکنولوژی ماشین‌بینایی بود و می‌توانست بر مزرعه غلات نظارت کرده و پس از تجزیه و تحلیل علف‌های هرز در همان لحظه اقدام به سمپاشی کند. نتایج نشان داد که مبنای آستانه برای علف هرز گندم باید پایین‌تر از جو باشد (۲). آدامیدس و همکاران<sup>۴</sup> در تحقیق خود از ربات سمپاشی استفاده کردند که از راه دور قابل مشاهده و کنترل بود و اطلاعات خروجی آن بوسیله یک کامپیوتر شخصی و یک صفحه نمایش نصب شده روی هد ربات نمایش و ثبت می‌گردید. ارزیابی ربات شامل هشت ارتباط دو به دو میان عوامل مختلف بود که در مجموع ۸ حالت ارزیابی بوجود آورد. عامل‌ها عبارت بودند از دو نوع وسیله خروجی، دو نوع مکانیزم بینایی محیطی و دو نوع ورودی کنترلی. در نهایت نتایج ارزیابی نشان داد که مهمترین فاکتور، تعامل انسان و ربات، تعداد و قرارگیری نماها بود (۱). در پژوهش کنتلی و همکاران<sup>۵</sup> از ربات سمپاش خودگردان جهت سمپاشی گلخانه‌ها و تاکستان‌ها استفاده گردید. سیستم ناوبری این ربات مجهز به GPS (سیستم موقعیت‌یاب جهانی) بود و ربات در حین حرکت قابل ردیابی بود. سیستم پاشش ربات مجهز به سیستم‌های هیدرولیکی و یونیت

کنترل الکترونیکی بود. در ربات فوق از HMI<sup>۶</sup> جهت ارتباط کاربر با سمپاش استفاده شد. نتایج نشان داد که حداکثر مقدار خطا ۰/۲۳ متر بود و این خطا به دلیل رفتار سیستم بوده است (۴). اوگاوا و همکاران<sup>۷</sup> یک ربات که می‌توانست مواد شیمیایی را در زیر داریست انگور اسپری کند مورد آزمایش قرار دادند. نتایج تجربی نشان داد که سیستم نظارتی ربات قادر است بطور مداوم صدمات حشرات و بیماری‌های محصولات را تشخیص دهد و حداقل سمپاشی لازم انجام گیرد و در مصرف سم صرفه‌جویی شود (۱۲). حجازی پور و همکاران<sup>۸</sup> ربات محلول‌پاش اتوماتیکی طراحی کردند که قادر بود با کمک تکنیک پردازش تصویر، حجم بوته گیاه را برآورد کند. نتایج حاصل از ارزیابی نشان داد که کیفیت پاشش در سطوح بالای گیاه کاهش نیافت و خطای اندازه‌گیری ربات ۱۹٪ برآورد شد (۷). در پژوهشی که توسط گائو و همکاران<sup>۹</sup> صورت گرفت به منظور بهبود میزان استفاده از سموم دفع آفات و کاهش بقایای سموم و آلودگی‌های شیمیایی از فرآیند پاشش متغیر به روش تصمیم‌گیری هوشمند به کمک شبکه عصبی فازی استفاده شد. در این پژوهش به جهت تصمیم‌گیری، از قبل اطلاعات جامعی از بیماری‌های گیاهی، آفات و حشرات تهیه شده بود. نتایج نشان داد که شبکه عصبی فازی قادر است تصمیمات را به صورت واقعی و سریع اتخاذ کند (۵). اوبرت و همکاران<sup>۱۰</sup> از یک ربات برای کنترل بیماری کپک درخت انگور استفاده کردند. این ربات قادر به شناسایی خودکار بیماری و اسپری محلول مناسب در ۸۵٪ تا ۱۰۰٪ منطقه بیمار گیاه بود. با این روش مصرف سم ۶۵٪ تا ۸۵٪ در مقایسه با یک اسپری یکواخت متعارف کاهش پیدا کرد (۱۱). گونزالس دی سوتو و همکاران<sup>۱۱</sup> سیستم پاشش ۲۰ نازله را توسعه و مورد ارزیابی قرار دادند. این سیستم برای استفاده علف‌کش‌ها در محصولات زراعی طراحی شد و قادر بود در انواع ربات‌های خودمختار مورد استفاده قرار گیرد. ربات فوق دارای سنسورهای

6- Human-Machine Interface

7- Ogawa *et al.*

8- Hejazipoor *et al.*

9- Gao *et al.*

10- Oberti *et al.*

11- Gonzal-de-Soto *et al.*

1- Burks *et al.*

2- Berge *et al.*

3- Global Positioning System

4- Adamides *et al.*

5- Cantelli *et al.*

شدند و پارامترهای رشد گیاه از جمله حجم، ارتفاع و سطح برگ‌ها محاسبه شد. نتیجه نشان داد که ارتفاع بوته که توسط Kinect اندازه‌گیری شد رابطه خطی با سطح بوته داشت و مساحت و حجم کل اندازه‌گیری شده نیز هر دو با داده‌های مرجع مطابقت داشتند. بررسی‌ها نشان داد که حجم اندازه‌گیری شده توسط Kinect رابطه خوبی با وزن گیاه تازه دارد. علاوه بر این، عملی بودن سیستم و عملکرد آنالیز فوق تأیید شد (۸). هدف این پژوهش، طراحی، ساخت و ارزیابی مکانیزم ربات محلول‌پاش اتوماتیک بود تا به وسیله آن بتوان برای بوته‌های با حجم‌های متفاوت، مقادیر متفاوتی از محلول را متناسب با حجم بوته موردنظر پاشش کرد. مهم‌تر آنکه با جلوگیری از مصرف بی‌رویه محلول، می‌توان در مصرف محلول صرفه‌جویی کرد تا سلامت سیستم تغذیه انسان و محیط کاشت گیاه تامین گردد و بدین وسیله از بیماری‌های گوناگون ناشی از مواد غذایی آغشته به محلول‌های شیمیایی در امان بود.

### مواد و روش‌ها

ربات حاصل از این پژوهش به لحاظ مکانیکی به گونه‌ای طراحی شده‌است که قادر باشد در میان ردیف محصولات حرکت کرده و بازوی خود را مرحله به مرحله باز کند و در هر مرحله، از بوته روبروی خود تصویربرداری کند، سپس تصویر هر مقطع را تجزیه و تحلیل کرده و حجم بوته مشاهده شده را تشخیص دهد و براساس حجم محاسبه‌شده اقدام به محلول‌پاشی همان مقطع کند. فرآیند تصویربرداری، تشخیص حجم و پاشش محلول بر اساس حجم برآوردشده در هر مرحله از باز شدن بازو تکرار می‌شود تا در نهایت ارتفاع بوته به اتمام برسد و در انتها بازو کامل جمع شود. شکل ۱ شماتیکی از نحوه عملکرد ربات و نحوه تصویربرداری را نشان می‌دهد.

ربات فوق از بخش‌های مختلفی تشکیل شده‌است که عبارتند از: اتاقک دوربین و نازل، نازل و دوربین Kinect، بازو و مکانیزم محرک بازو، پمپ و مخزن محلول، پردازشگر، بردهای آردینو و رله، گاری و سیستم محرک ربات. جهت طراحی ربات، پس از بررسی شرایط محیطی و با در نظر گرفتن هزینه ساخت، مدل سه‌بعدی ربات در نرم افزار Solidworks 2016

گوناگونی بود که می‌توانست داده‌های مربوط به علف‌های هرز را جهت درمان استخراج کند. سیستم ماشین بینایی ربات، علف هرز را مشاهده کرده و پس از تشخیص سنسور به صورت همزمان اقدام به پاشش سم می‌کرد. ربات در درمان بیش از ۹۹/۵٪ از علف‌های هرز شناسایی شده موفق بود و با توجه به توده علف‌های هرز تقریباً ۰/۵٪ از علف‌های هرز قابل تشخیص نبودند و به میزان ۰/۵٪ در مصرف سم صرفه‌جویی شد (۶). اولوفسون و همکاران<sup>۱</sup> با کمک دوربین<sup>۲</sup> TLS (اسکن لیزری زمینی) و اسکنر لیزری به محاسبه حجم درخت و اندازه‌گیری ارتفاع تاج درخت به کمک الگوریتم<sup>۳</sup> RANSAC پرداختند. در نهایت الگوریتم فوق‌نویز را کاهش داد و این امکان را پدید آورد که تخمین‌های واقعی بدست آید (۱۳). لیانگ و همکاران<sup>۴</sup> از روش تکنیک TLS (اسکن لیزری زمینی) برای پی‌بردن به ویژگی‌های جنگل و درختان موجود در آن استفاده کردند. با استفاده از دوربین LiDAR (نوعی دوربین اسکن لیزری) می‌توان به اندازه‌گیری دامنه و اندازه‌گیری زاویه‌ای دقیق اجسام از طریق مکانیزم تخلیه پرتوی نوری پرداخت و نقاط سه‌بعدی اشیاء پیرامون را استخراج کردند. نتایج نشان داد تکنیک TLS (اسکن لیزری زمینی) قادر است جزئیات محیط اطراف را با دقت یک میلی‌متر اندازه‌گیری کند (۹). اولوفسون و هولمگرن از روش TLS (اسکن لیزری زمینی) برای شناسایی ساقه درخت و استخراج مشخصات آن از جمله حجم تاج درخت استفاده کردند. نتایج نشان داد برای بهتر تخمین زدن حجم توده درخت، باید فضای درختان جداسازی شود. این روش به رشد گیاه وابسته بوده و مدل رگرسیونی جهت محاسبه‌ی فضاهای متفاوت مورد نیاز است (۱۴). در پژوهشی که با استفاده از دوربین Kinect (دوربین دید عمق) توسط هو و همکاران<sup>۵</sup> انجام شد، دوربین از زوایای مختلف از بوته گیاه روبروی خود عکس‌برداری کرد و ابر نقاط هر تصویر استخراج شد. سپس تصاویر برداشت شده با الگوریتم مناسب همپوشانی

- 1- Olofsson *et al.*
- 2- Terrestrial laser scanning
- 3- Random sample consensus method
- 4- Liang *et al.*
- 5- Hu *et al.*

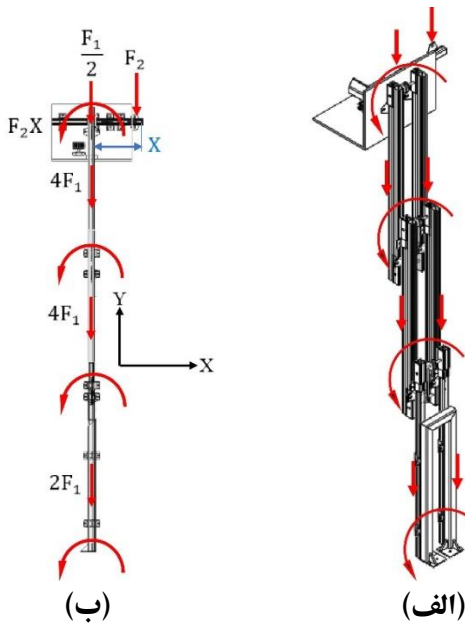
با توجه به اینکه فاصله طولی بین نیروی  $F_2$  و  $\frac{F_1}{2}$  برابر  $X$  است. مقادیر نیرو و گشتاور در پایه‌ی بازو برابر است با:

$${}^0F = \begin{bmatrix} 0 \\ -29.61 \\ 0 \end{bmatrix} (N) \quad (1)$$

علامت منفی نشان دهنده جهت اعمال نیرو است. به علت حرکت کارگیر، نیروی  $F_2$  ممکن است در سمت دیگر بازو قرار گیرد، پس جهت گشتاور  $X F_2$  ممکن است تغییر کند به همین دلیل آن با علامت  $\pm$  آورده شده است.

$${}^0n_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \pm 2.72 \end{bmatrix} (N.m) \quad (2)$$

شکل ۳ ربات حاصل از این پژوهش را در دو مدل طراحی شده و ساخته شده نشان می‌دهد.



شکل (۲) نیروها و گشتاورهای وارد بر بازوهای ربات.

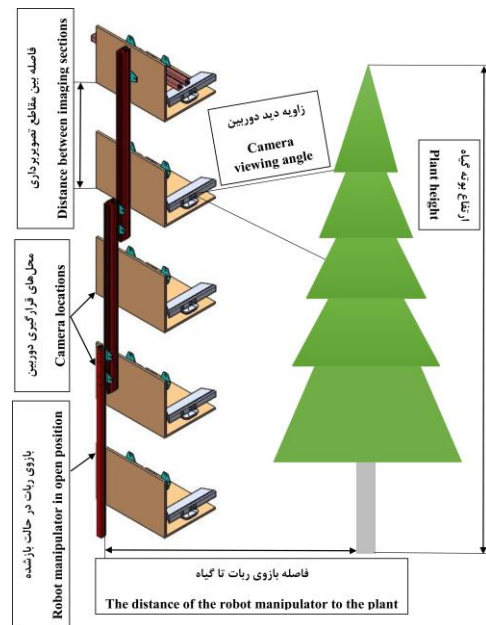
الف) نمایش سه بعدی، ب) نمایش دو بعدی.

Figure (3) Forces and torques on the robot manipulator. A) 3D display, b) 2D display.

طراحی گردید و بر اساس مدل فوق مرحله به مرحله کار ساخت انجام شد.

### نیروهای استاتیکی وارده به بازوها

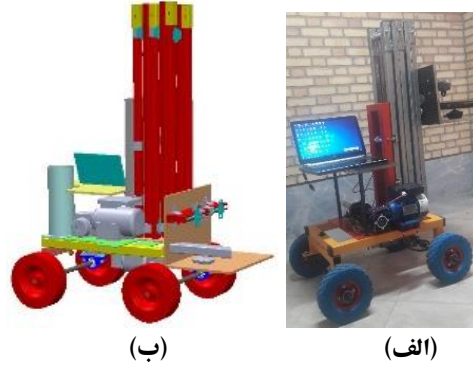
در حالت عادی ربات بوسیله اتاقک نازل و دوربینی که روی رابط آخر نصب شده است و وزن خود ریل‌ها، تحت فشار نیرو و گشتاور قرار می‌گیرد. بنابراین نیروهایی که به بازوی ربات وارد می‌شوند نیروی وزن اتاقک نازل و دوربین، و نیروی وزن ریل‌ها است که در شکل ۲- الف نشان داده شده‌اند. از آنجا که ریل‌های موجود در هر ردیف بطور کامل به همدیگر متصل شده‌اند و فاصله بین ریل‌ها ناچیز است می‌توان برای سادگی محاسبات هر دو ردیف ریل را یکی در نظر گرفت و وزن هر ریل را مجموع وزن تمام ریل‌های همتراز خود در ربات قرار داد. از آنجا که ریل‌ها کاملاً مشابه است، نیروی وزن هر ریل را  $F_1$  در نظر گرفته شده است. و چون طول ریل نازل نصف ریل‌های دیگر است پس نیروی وزن آن نیز نصف می‌شود. در نتیجه وزن ریل تکی ثابت  $2F_1$ ، وزن ریل‌های دوبل  $4F_1$  و نیروی وزن ریل نازل  $\frac{F_1}{2}$  می‌شود. وزن اتاقک نازل و دوربین نیز  $F_2$  در نظر گرفته می‌شود. در شکل ۲- ب نیروهای وارد به بازو نشان داده شده است.



شکل (۱) شماتیکی از نحوه تصویربرداری ربات

Figure (1) Image acquisition method of the robot

$d_1$  است و فاصله مبدا چهارچوب  $\{0\}$  از مبدا چهارچوب  $\{1\}$  در راستای محور  $x$  برابر  $a_0$  است. محور مفصل کشویی چهارچوب  $\{3\}$  نسبت به محور  $z$  چهارچوب  $\{2\}$ ،  $90^\circ$  درجه گردش دارد. فاصله مبدا چهارچوب  $\{1\}$  از چهارچوب  $\{2\}$  در امتداد محور  $x_1$  برابر  $a_1$  و در امتداد محور  $z_2$  برابر  $d_2$  است. شکل ۵ الف و ب چهارچوب‌های مرجع را براساس قانون دناویت- هاتنبرگ نشان داده‌اند. پارامترهای ثابت  $a_0$ ،  $a_1$  و پارامتر متغیر  $d_1$ ،  $d_2$  هستند. بر اساس آنچه ذکر شد پارامترهای مربوط به هر چهارچوب برای بازوی ساخته شده طبق نماد گذاری دناویت- هاتنبرگ در جدول ۱ نشان داده شده‌است.



شکل (۳) الف) ربات طراحی شده در نرم افزار SolidWorks، ب) ربات ساخته شده. Figure (3) A) The robot designed in SolidWorks, B) The constructed robot

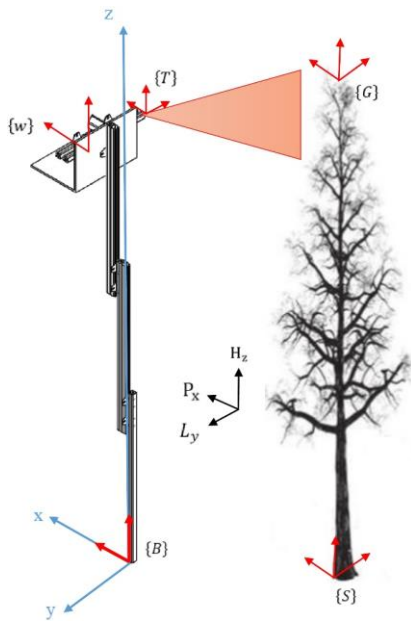
### سینماتیک بازو

جهت بررسی حرکت بازو چهارچوب‌هایی به قسمت های مختلف بازو متصل می‌شود. این چهارچوب‌ها عبارتند از: چهارچوب پایه  $\{B\}$  در محل اتصال بازو به گاری، چهارچوب مچ  $\{W\}$  در بالاترین محل قرارگیری بازو، چهارچوب ابزار  $\{T\}$  محل قرارگیری نازل، چهارچوب ایستگاه  $\{S\}$  نقطه تماس ساقه گیاه با سطح خاک و چهارچوب هدف  $\{G\}$  برگ‌ها و سطوح سبز بالایی گیاه را توصیف می‌کند. ماتریس تبدیل چهارچوب ابزار نسبت به چهارچوب پایه چنین تعریف می‌شود:

$$\frac{B}{T}T = \frac{B}{W}T \frac{W}{T}T \quad (۳)$$

که در آن  $\frac{B}{T}T$  ماتریس تبدیل چهارچوب ابزار نسبت به چهارچوب پایه،  $\frac{B}{W}T$  ماتریس تبدیل چهارچوب مچ نسبت به چهارچوب پایه،  $\frac{W}{T}T$  ماتریس تبدیل چهارچوب ابزار نسبت به چهارچوب مچ می‌باشد. همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده، موقعیت چهارچوب‌های دیگر نسبت به چهارچوب صفر تعریف می‌شود.

در این چهارچوب محور  $z_0$  در امتداد ریل کشویی عمودی است و راستای  $x$  در امتداد خط عمود بین محورهای  $Z$  دو چهارچوب  $\{0\}$  و  $\{1\}$  است. فاصله بین دو چهارچوب  $\{0\}$  و  $\{1\}$  در راستای محور  $z$  برابر



شکل (۴) نمایش چهارچوب‌های استاندارد. Figure (4) Display of standard frameworks.

جدول (۱) پارامترهای رابط ربات محلول پاش Table(1) Sprayer robot interface parameters

$i$	$\alpha_{i-1}$	$a_{i-1}$	$d_i$	$\theta_i$
1	0	$l_1$	$d_1$	0
2	90	$l_2$	$d_2$	0

است. با مشخص شدن ماتریس‌های تبدیل  $B_{zT}$  و  $G^T$  می‌توان موقعیت هر نقطه گیاه را نسبت به چهارچوب پایه بیان کرد.

برای محاسبه تبدیل چهارچوب  $\{4\}$  به چهارچوب  $\{0\}$ ، ابتدا باید تبدیل هر چهارچوب  $\{i\}$  را نسبت به چهارچوب قبلی خود  $\{i-1\}$ ، طبق معادله (۵) تعریف نمود، که در آن  $C$  مخفف  $\cos$  و  $S$  مخفف  $\sin$  می‌باشد.

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} C\theta_i & -S\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ S\theta_i C\alpha_{i-1} & C\theta_i C\alpha_{i-1} & -S\alpha_{i-1} & -S\alpha_{i-1}d_i \\ S\theta_i S\alpha_{i-1} & C\theta_i S\alpha_{i-1} & C\alpha_{i-1} & C\alpha_{i-1}d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

با جایگزین کردن پارامترهای مربوط به هر چهارچوب بازو طبق قانون دناویت-هاتنبرگ در معادله ۵، ماتریس تبدیل هر چهارچوب  $\{i\}$  نسبت به چهارچوب قبلی خود  $\{i-1\}$  بدست می‌آید.

با توجه به رابطه (۶) می‌توان ماتریس تبدیل کلی چهارچوب  $\{3\}$  را به چهارچوب  $\{0\}$  بدست آورد.

$${}^0T_3 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 \quad (6)$$

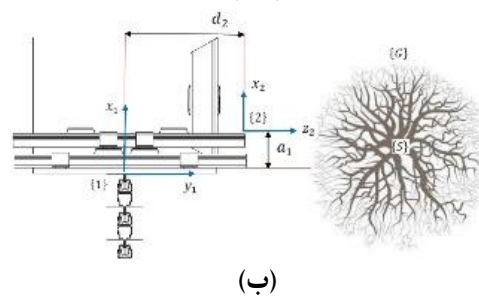
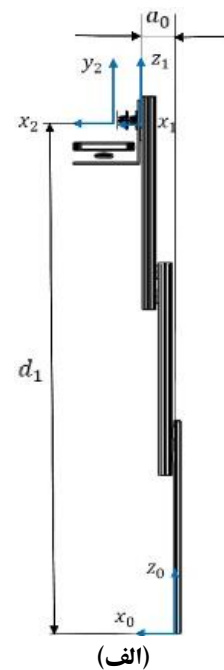
ماتریس تبدیل کلی طبق رابطه‌ی (۷) بدست می‌آید:

$${}^0T_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_1 + l_2 \\ 0 & 0 & -1 & -d_2 \\ 0 & 1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

با مساوی قرار دادن این معادله و معادله سینماتیکی تبدیل  $B_{zT}$ ، معادله (۸) بدست می‌آیند:

$$B_{zT} = {}^0T_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & P_{xT} \\ 0 & 1 & 0 & L_{yT} \\ 0 & 0 & 1 & H_{zT} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_1 + l_2 \\ 0 & 0 & -1 & -d_2 \\ 0 & 1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

با توجه به اینکه مقادیر  $d_1$ ،  $d_2$ ،  $l_1$ ،  $l_2$  و  $d_1$  عددی هستند پس مقادیر  $P_{xT}$ ،  $L_{yT}$  و  $H_{zT}$  براحتی با مساوی قرار دادن اجزای ماتریس قابل محاسبه هستند. باید به این نکته توجه کرد که برخی از پارامترها ثابت هستند و بسته به طراحی مکانیکی و نوع قطعات بکار رفته در ساخت



شکل (۵) تعیین چهارچوب‌های مرجع براساس قانون دناویت-هاتنبرگ. الف) نمای روبرو، ب) نمای بالا.

Figure (5) Determining the reference frameworks based on the Denavit—Hartenberg law. (a) Front view (b) Top view

با توجه به شکل ۵ و جایگذاری مقادیر پارامتری

مربوط به بازو ماتریس تبدیل  $B_{zT}$ ، این چنین می‌شود:

$$B_{zT} = {}^0T_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & P_{xT} \\ 0 & 1 & 0 & L_{yT} \\ 0 & 0 & 1 & H_{zT} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

که در این ماتریس فاصله چهارچوب ابزار از چهارچوب پایه در امتداد محور طول  $P_{xT}$ ، فاصله چهارچوب ابزار از چهارچوب پایه در امتداد محور عرض  $L_{yT}$ ، فاصله چهارچوب ابزار از چهارچوب پایه در امتداد محور ارتفاع



پس از حرکت اتاقک ریل‌ها پشت سر هم و به نوبت باز می‌شوند تا بازوی ربات به حداکثر ارتفاع بازشدگی خود برسد. بدین منظور از سیم بکسل روکش دار با قطر ۲/۵ mm استفاده شد.

جهت ساخت شاسی ربات از پروفیل‌های فلزی به ضخامت ۲ mm و ابعاد ۴۰×۴۰ mm استفاده شد. الکتروموتور محرک شاسی از نوع 220 VAC/0.2 kW/1400 rpm انتخاب شد. پمپ محلول‌پاش، پمپ چینی با فشار ۲/۵ بار استفاده شد.

حسگر ربات، دوربین Kinect ورژن یک ساخت آمریکا می‌باشد. از لپ‌تاپ و پردازشگر مدل-AMD A10 4655M APU، برد ایتالیایی آردوینو، برد رله و نرم افزار Matlab 2010 جهت کنترل ربات استفاده شده است. از نرم‌افزارهای Kinect for Windows Software و Development Kit (SDK) جهت اتصال دوربین به لپ‌تاپ و از نرم‌افزارهای Developer Toolkit Browser v1.8.0 و KinectExplorer-D2D جهت کنترل دوربین استفاده شد. وزن نهایی ربات پس از ساخت ۷۸/۵ کیلوگرم برآورد گردید.

### سامانه پردازش تصویر

تصویر برداشت شده در هر مقطع باید مورد پردازش قرار بگیرد. نتیجه پردازش انجام شده محاسبه حجم بوته‌ی دیده شده است. الگوریتم تعریف شده در شکل ۷، پس از کدنویسی در نرم افزار Matlab 2010 بارگذاری شد. با توجه به الگوریتم ارائه شده ربات آنقدر حرکت طولی می‌کند تا دو شرط مشاهده دو بوته متوالی در تصویر و قرارگیری شاخه اصلی گیاه در وسط تصویر برآورده شود. برای رسیدن به این مقصود ربات ده سانتیمتر حرکت می‌کند و سپس متوقف می‌شود. با هر بار توقف دوربین از بوته روبرویی تصویربرداری کرده و تصویر را تحلیل می‌کند تا هر دو شرط ذکر شده برقرار گردد. از آنجا که فاصله بین بوته‌ها روی ردیف کشت مساوی است و ربات نیز در ابتدای ردیف به گونه‌ای مستقر شده است که فاصله

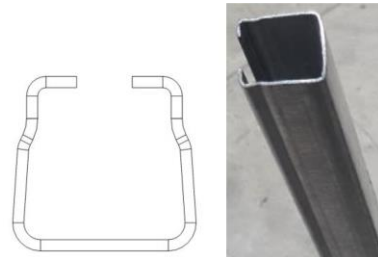
ربات، مقادیر ثابتی دارند اما برخی دیگر از پارامترها متغیراند و بستگی به این دارند که نقطه هدف در کجای بوته گیاه قرار بگیرد.

### مشخصات ساخت ربات

جهت طراحی و ساخت ربات از پارامترهای محیطی گلخانه شامل فاصله بین ردیف‌های کشت، ارتفاع بوته و فاصله بوته‌ها روی خط کاشت استفاده شد. بر اساس مشاهدات ربات با عرض ۶۰ cm، طول ۸۵ cm، ارتفاع بازو در حالت بسته ۱۰۰ cm و در حالت تمام باز ۲۷۰ cm ساخته شد.

جهت باز و بسته شدن بازوی ربات از الکتروموتور با مشخصات 220 VAC/0.2 kW/1400 rpm و گیربکس کوپل شده با الکتروموتور با نسبت دور 1/100 استفاده شده است. از آنجا که دور الکتروموتور ثابت است با راه اندازی الکتروموتور بر حسب زمان می‌توان مقدار بازشدگی بازو را کنترل کرد. بازو از سه ریل گالوانیزه پی در پی دوپل تشکیل شده است که قادرند یکی پس از دیگری به صورت کشویی در همدیگر باز شوند و اتاقک دوربین و نازل را تا ارتفاع ۲۷۰ cm بالا ببرند. مقطع و ظاهر ریل در شکل ۶ نشان داده شده است.

مکانیزم محرک بازو سیم بکسل است. سیم بکسل از یک طرف به اتاقک دوربین و نازل و از طرف دیگر پس از عبور از قرقه‌های ریل‌ها به شافت خروجی گیربکس متصل شده است. با چرخش الکتروموتور و شافت خروجی گیربکس سیم بکسل تحت کشش قرار گرفته و اتاقک دوربین و نازل را روی اولین ریل به سمت بالا هدایت می‌کند.



شکل (۶) نمایی از ریل استفاده شده و مقطع آن  
Figure (6) view of used rail and its profile

حجم بوته چند گیاه است که به روش دستی (غرقابی) محاسبه شده است. این ضریب باید در برنامه ربات وارد شود تا ربات از آن به عنوان مبنا در تخمین حجم هر مقطع استفاده کند. بنابراین هر چه حجم تعداد بیشتری از بوته‌ها برآورد گردد و در نهایت میانگین گیری شود این عدد دقیق‌تر محاسبه شده و تخمین حجم بوته توسط ربات نیز دقیق‌تر خواهد بود. در عمل با میانگین گیری از حجم سه بوته عدد ۶۷۰ میلی‌لیتر به برنامه ربات داده شد.

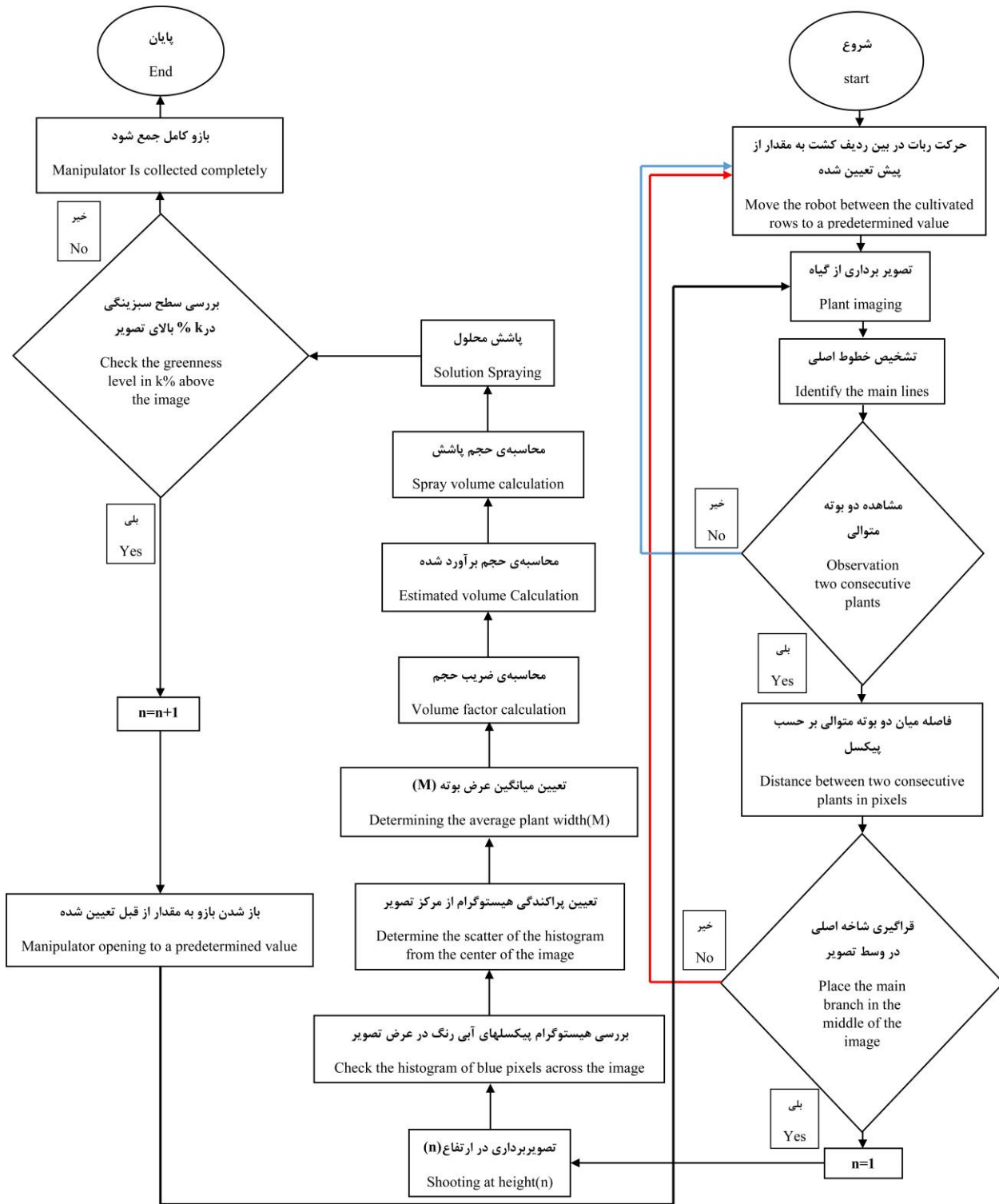
تغییر در فاصله قرارگیری دوربین از بوته هم روی کیفیت تصویر برداشت شده موثر است و هم در تخمین حجم مقطع مشاهده شده. در تصویر عمق برداشت شده توسط دوربین Kinect اجسام پیرامون با توجه به فاصله شان از لنز دوربین در ۴ سطح رنگی متفاوت نمایش داده می‌شوند و در این الگوریتم فقط از پیکسل‌های آبی رنگ (پیکسل‌های فاصله نزدیک) جهت تخمین حجم استفاده شده است. بنابراین با تغییر فاصله دوربین از بوته تعداد پیکسل‌های آبی رنگ به شدت تغییر می‌کند و مقدار حجم برآورد شده نیز بسیار متغیر و دور از واقعیت خواهد شد. برای رفع این مشکل باید پردازش انجام شده را مجهز به تکنیک Scale Invariant (مستقل از فاصله دوربین تا شی) کرد. با استفاده از این تکنیک دیگر فاصله دوربین از بوته در تعداد پیکسل‌های آبی رنگ تاثیری نخواهد داشت و تغییر در جابجایی دوربین فقط به هدف برداشت تصویر با کیفیت‌تر و با دقت‌تر انجام خواهد شد. چنانچه میانگین عرض بوته (M) مشاهده شده بر فاصله میان دو بوته متوالی بر حسب پیکسل (D) تقسیم شود عددی بدست می‌آید که ضریب حجم نامیده می‌شود. طبق رابطه ۹ ضریب حجم برابر است با:

$$(9) \quad \text{ضریب حجم} = \frac{M}{D}$$

با ضرب ضریب حجم در حجم دستی محاسبه شده ( $\alpha$ ) حجم بوته مشاهده شده در مقطع به روش Scale Invariant (مستقل از فاصله دوربین تا شی) برآورد می‌شود.

اتاقک دوربین از بوته اول ضریب صحیحی از ده سانتیمتر باشد. بنابراین دو شرط ذکر شده به راحتی تامین می‌شود و ربات محل استقرار خود را می‌یابد. در حین انجام فرآیند ذکر شده، اتاقک دوربین و نازل در پایین‌ترین سطح ممکن قرار دارد و قادر است ساقه اصلی گیاه را تشخیص دهد. در این حالت حرکت طولی ربات خاتمه یافته و بازو مقطع به مقطع باز می‌شود و در هر مقطع تصویر عمق از بوته روبرویی برداشت می‌شود و پس از محاسبه حجم بوته دیده شده در همان مقطع، محلول‌پاشی انجام می‌شود. در هر مقطع، پس از اتمام محلول‌پاشی، بازو مجدداً باز شده و عملیات مطابق آنچه ذکر شد برای مقطع بعد تکرار می‌شود. این روال آنقدر ادامه پیدا می‌کند تا کل ارتفاع بوته مورد دید دوربین قرار بگیرد و محلول‌پاشی شود.

از آنجا که دور الکتروموتور محرک بازو و الکتروموتور محرک ربات هر دو ثابت است پس با راه ندازی الکتروموتورها بر حسب زمان، می‌توان روی حرکت خطی ربات و حرکت عمودی بازو کنترل داشت. با توجه به آنچه ذکر شد و فاصله دوربین از بوته و میدان دید دوربین می‌توان گام باز شدن بازو را تعیین کرد. زمان کاری الکتروموتور محرک بازو به گونه‌ای تعیین می‌شود که دوربین، پایین تصویر مقطع بالایی را بالای تصویر مقطع پایینی منطبق کند. البته همپوشانی ۱ سانتیمتری بین دو تصویر متوالی در نظر گرفته شده است. هر چه ارتفاع گیاه بلندتر باشد تعداد مقاطع توقف بازو، تعداد تصاویر برداشت شده و حجم محلول پاشش شده بیشتر خواهد بود. با توجه به الگوریتم کاری ربات، پاشش محلول در هر مقطع درست لحظاتی پس از تخمین حجم بوته صورت می‌گیرد بنابراین عملکرد ربات برخط بوده و از این بابت ارزشمند است. فاصله زمانی بین تخمین حجم و پاشش محلول در هر مقطع حدود ۳ تا ۵ ثانیه است. تغییر در محدوده فوق به دلیل تامین فشار محلول توسط پمپ نازل در ارتفاع‌های متفاوت است. با توجه به الگوریتم نشان داده شده در شکل ۷ جهت تعیین حجم بوته در هر مقطع به سه ضریب  $\alpha$ ،  $\beta$  و ضریب حجم نیاز است.  $\alpha$  میانگین



شکل (۷) الگوریتم کاری ربات  
Figure (7)- Robot algorithm

پاشش شده توسط هر کارگر با ظروف مدرج اندازه‌گیری و در نهایت میانگین‌گیری شد. برای راه‌اندازی ربات ابتدا حجم چند بوته به روش دستی محاسبه و میانگین حجم‌های بدست آمده به جای ضریب  $\alpha$  در برنامه ربات جایگذاری شد. مطابق آنچه ذکر شد حجم سه بوته به روش غرقایی اندازه گرفته شد و میانگین حجم‌های بدست آورده ۶۷۰ میلی‌لیتر بدست آمد که به جای پارامتر  $\alpha$  در برنامه ربات جایگذاری شد. بر اساس شرایط گیاه و با مشورت با کارشناس مقدار ضریب تصحیح  $\beta$  نیز برابر ۰/۰۵ محاسبه و در نظر گرفته شد و عدد فوق نیز به صورت دستی به برنامه ربات داده شد. میزان محلول مصرفی توصیه شده توسط کارشناس ۲۰۰ میلی‌لیتر سم در ۲۰۰ لیتر آب برای یک هکتار محصول کشت شده بود که با توجه به تعداد بوته در هکتار به هر بوته ۳۵ میلی‌لیتر محلول می‌رسید. پس از وارد کردن دو ضریب  $\alpha$  و  $\beta$  ربات راه‌اندازی شد و اقدام به محلول‌پاشی ۱۰ بوته کرد. مقدار حجم برآورد شده توسط ربات (بدون اعمال ضریب تصحیح  $\beta$ ) روی هر بوته و مقدار محلول پاشش شده (با اعمال ضریب تصحیح  $\beta$ ) برای هر ۱۰ بوته به تفکیک تعیین گردید. مقادیر حجم برآورد شده توسط ربات روی ۱۰ بوته در شکل ۹ نشان داده شده است. متفاوت بودن مقادیر فوق نشان‌دهنده هوشمندی ربات در تشخیص حجم بوته‌های مختلف است. میانگین مقدار حجم ۱۰ بوته نشان داده شده در شکل ۹ معادل ۵۴۲/۵ میلی‌لیتر برآورد شد.

پاشش محلول توسط ربات با اعمال ضریب تصحیح  $\beta$  صورت گرفت. همانطور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، میانگین حجم محلول پاشش شده به ۱۰ بوته توسط ربات ۲۷/۱ میلی‌لیتر و میانگین مقدار حجم محلول پاشش شده توسط کارگر ۳۳/۱ میلی‌لیتر است.

همانطور که مشخص است اعمال ضریب  $\beta$  توانسته است حجم محلول پاشش شده را نسبت به حجم بوته برآورد شده کاهش دهد. به عبارتی اعمال ضریب  $\beta$  هم عامل افزایش بهره‌وری و هم ضریب ارتباطی بین حجم برآورد شده بوته و حجم محلول پاشش شده است. به منظور بررسی عملکرد

(۱۰)  $\alpha \times \text{حجم} = \text{حجم برآورد شده}$   
از نظر کارشناسان باغبانی و متخصصان اهل فن، هر گیاهی بسته به این که در چه مرحله‌ای از دوره رشد باشد و با توجه به شرایطی که گیاه در آن قرار گرفته است و همچنین نیاز گیاه، به حجم و غلظت مناسبی از سم (میزان مصرفی) نیازمند است. چنانچه حجم برآورد شده.

در ضریب تصحیح  $\beta$  ضرب شود مقدار محلول پاشش شده به مقطع روبروی مطابق نیاز گیاه و نظر کارشناسان مربوطه خواهد بود. مطابق آنچه شرح داده شد:

$$(۱۱) \beta \times \text{حجم برآورد شده} = \text{حجم پاشش محلول}$$

جهت تعیین ارتفاع بوته گیاه و اتمام محلول‌پاشی، از دوربین Kinect نصب شده درون اتاقک همانند چشم استفاده شده است. پردازشگر در هر مقطع با پردازش تصویر و بررسی اینکه آیا سطح سبزی‌نگی در ۱۰ درصد بالای تصویر وجود دارد یا خیر تشخیص می‌دهد که بازو جهت تصویربرداری مجدداً باید باز شود و سراغ مقطع بعدی برود یا اینکه ارتفاع گیاه تمام شده و بازو باید کاملاً بسته شود و ربات جهت محلول‌پاشی به روبروی بوته بعدی جابجا شود. الگوریتم ارائه شده در شکل ۷ تمامی مراحل کاری ربات را به تفکیک نشان داده است.

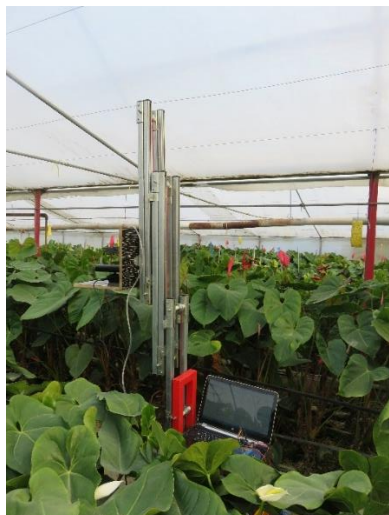
### ارزیابی ربات

شکل ۸ نمایی از ارزیابی ربات در محیط گلخانه را نشان می‌دهد.

ارزیابی میدانی در گلخانه گل آنتوریوم شهرستان پاکدشت استان تهران انجام شد. دمای گلخانه ۲۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت محیط ۷۲ درصد بود. در ارزیابی صورت گرفته مقدار محلول مصرفی توسط ربات و کارگر ماهر در پاشش به ۱۰ بوته مورد بررسی قرار گرفت.

### مقایسه‌ی ارزیابی مقدار محلول مصرفی

برای مقایسه‌ی میزان محلول مصرفی کارگر و ربات روی بوته‌های مشترک از ۳ کارگر ماهر خواسته شد که بر اساس برآورد و مهارت خویش از حجم بوته گیاه اقدام به محلول‌پاشی بوته مورد نظر کنند. برای هر بوته مقدار محلول

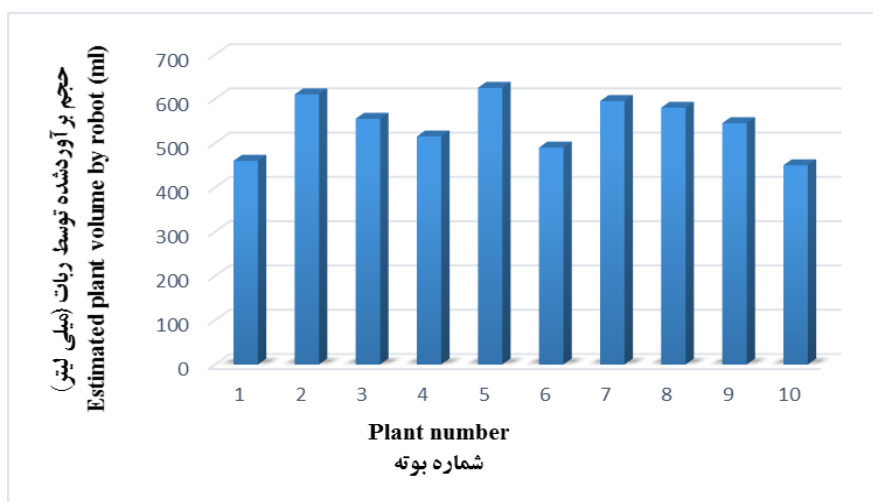


شکل (۸) ارزیابی ربات در فضای گلخانه  
Figure (8) Evaluating of the robot in the greenhouse environment

سامانه از طرح کاملاً تصادفی در قالب دو تیمار (محلول پاشی توسط کارگر و محلول پاشی توسط ربات) بهره گرفته شد. هر تیمار مشتمل بر ۱۰ تکرار در نظر گرفته شد. جدول شماره ۲ نتایج مربوط به تجزیه واریانس بر مبنای طرح کاملاً تصادفی را ارائه می‌دهد. مقدار محاسبه شده برای P برابر ۰/۰۰۱ گردید که نشان دهنده اطمینان از وجود اختلاف معنادار بین پاشش محلول توسط ربات و پاشش محلول توسط کارگر است.

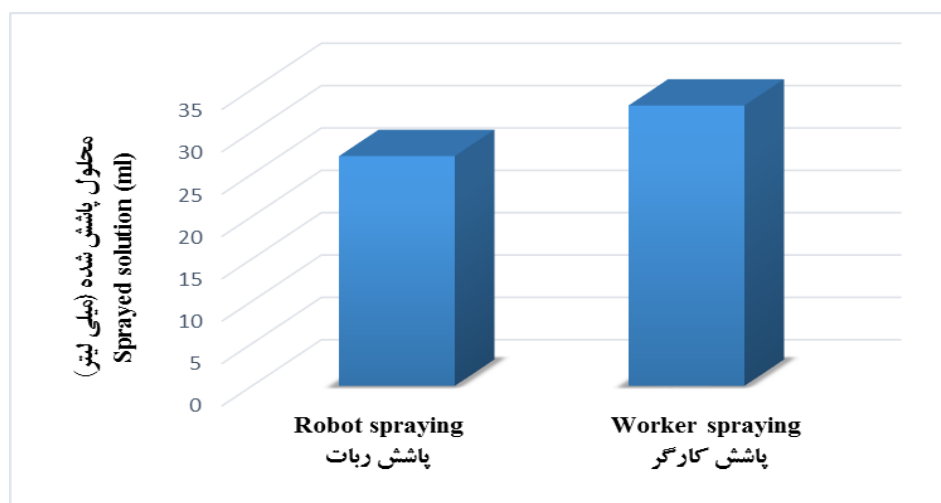
با توجه به معنی داری اختلاف بین تیمارها، جهت مقایسه میانگین‌ها، از آزمون حداقل اختلاف معنی دار LSD استفاده شد. همانطور که در جدول ۳ نشان داده شده است، آزمون تیمارها را در دو گروه متمایز دسته‌بندی نمود که حاکی اختلاف معنی دار بین دو روش محلول پاشی است. همانطور که مشخص است، مقدار پاشش محلول توسط ربات از مقدار پاشش محلول توسط کارگر کمتر شده است که این مطلب در استفاده بهینه از محلول، افزایش بهره‌وری، حفظ سلامتی گیاه و محیط زیست با اهمیت است.

جهت مقایسه دو روش محلول پاشی با حجم برآورد شده بوته، از آزمون میزان همبستگی نشان داده شده در جدول ۴ استفاده شده است. همانطور که از جدول توزیع همبستگی مشخص است میزان همبستگی بین حجم بوته برآورد شده و محلول پاشی با ربات صددرصد است.



شکل (۹) تخمین حجم ۱۰ بوته توسط ربات به تفکیک.  
Figure (9) Estimated plant volume by robot for 10 plants separately.

حجازی پور و همکاران: طراحی، ساخت و ارزیابی مکانیزم...



شکل (۱۰) مقایسه میانگین مقدار محلول پاشش شده به ۱۰ بوته توسط ربات و کارگر

Figure (10) Comparison of the average of the sprayed solution amount to 10 plants by the robot and the worker.

جدول (۲) جدول تجزیه واریانس طرح کاملاً تصادفی مربوط به پاشش محلول بر مبنای حجم با استفاده از روش مدل خطی عمومی

Table (2) Analysis table of variance of completely randomized design related to volume-based solution spraying using general linear model method

P-Value	F-Value	MS واریانس Variance	SS مجموع مربعات Sum of squares	DF درجه آزادی Degrees of freedom	منبع تغییرات Source of variance
0.001	17.53*	178.50	178.5	1	شماره بوته Plant number
-	-	10.18	183.3	18	خطا Error

جدول (۳) مقایسه میانگین های پاشش توسط ربات و پاشش توسط کارگر با آزمون LSD

Table 3- Comparison of robot spraying and worker spraying means with LSD test

دسته بندی Classification	میانگین Average	تعداد Number	شماره بوته Plant number
A	33.100	10	پاشش توسط کارگر Worker spraying
B	27.125	10	پاشش توسط ربات Robot Spraying

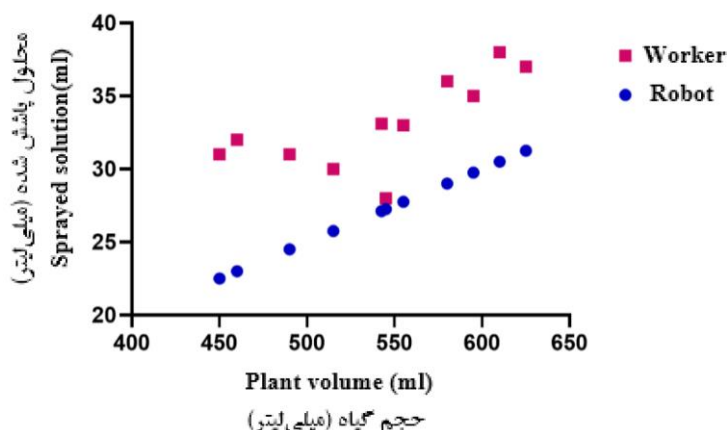
جدول (۴) جدول همبستگی بین ویژگیهای اندازه گیری شده  
 Table (4) Correlation between measured properties

پاشش توسط کارگر Worker spraying	برآورد حجم از بوته Estimate the plant volume	نحوه پاشش Spraying method
-	1.000 ***	پاشش توسط ربات Robot spraying
0.725*	0.725 *	پاشش توسط کارگر Worker spraying

در مجموع از مزایای پاشش ربات نسبت به پاشش کارگر می‌توان به دقت عملکرد ربات در نحوه تشخیص حجم بوته‌های مختلف، تعیین الگوی پاشش منظم و دقیق، مصرف محلول کمتر، آلودگی کمتر محیط کاشت و بستر گیاه، دقت پاشش بالاتر، قابلیت برنامه‌ریزی محلول‌پاشی گیاه با توجه به نظر کارشناسان و متخصصان با اهداف گوناگون تحقیقاتی، اجرایی و نیاز روز کشاورزی دقیق اشاره کرد. از تفاوت‌های پژوهش فوق با دیگر پژوهش‌های پیشین در نحوه تشخیص حجم بوته و نحوه استفاده از تکنیک بینایی ماشین است. در تحقیقات پیشین از تکنیک TLS، اسکن لیزری، تکنیک ALS و روشهای ترکیبی استفاده شده است. در صورتی که در پژوهش حاضر جهت تخمین حجم از دوربین Kinect ورژن ۱ استفاده شده که در مقایسه با دوربین TLS بسیار کم هزینه‌تر است و سرعت پردازش اطلاعات آن زمانبر نبوده و پردازشگر لپ‌تاپ نیز قادر است اطلاعات دریافتی از Kinect را با سرعت مناسب پردازش کند. از طرفی استحکام دوربین Kinect بالا بوده و آسیب‌پذیری آن کمتر است. با توجه به محیط مرطوب گلخانه استفاده از دوربین Kinect جهت نصب روی ربات توجه منطقی‌تری دارد. با این حال ربات پژوهش فوق این قابلیت را دارد با تغییر در الگوریتم کاری خود جهت تشخیص حجم بوته گیاه از دوربین TLS و یا دو دوربین عمود بر هم به روش استریو استفاده کند.

یعنی ربات به خوبی قادر است به بوته‌های با حجم‌های گوناگون مقادیر متفاوتی از محلول را بر مبنای حجم بوته برآوردشده پاشش کنند و میزان موفقیت ربات در ارتباط برقرار کردن بین حجم برآوردشده بوته و حجم محلول پاشش شده حداکثر مقدار ممکن است. این مطلب ناشی از اعمال خلاقانه و ابتکاری ضریب تصحیح  $\beta$  است و نشان دهنده این است که ضریب فوق به خوبی توانسته است هدف پژوهش را برآورده کند. میزان همبستگی بین پاشش محلول توسط کارگر و حجم برآوردشده از بوته نیز حاکی از آن دارد که کارگر ماهر و با تجربه بوده و قادر بوده است درک صحیحی از حجم بوته‌های مختلف داشته باشد و به بوته‌های با حجم‌های گوناگون مقادیر متفاوتی از محلول را پاشش کند. همچنین پاشش محلول توسط کارگر متناسب با حجم بوته بوده است. در مقایسه‌ی پاشش محلول توسط ربات و کارگر، عملکرد ربات موفقیت‌آمیزتر و ایده‌آل‌تر است.

در نهایت برای مشاهده عملکرد ربات برای هر بوته، مقادیر محلول پاشش شده هم برای ربات و هم برای کارگر با توجه به مقادیر حجم بوته از نمودار رگرسیون خطی نمایش داده شده در شکل ۱۱ استفاده شده است. همانطور که از نمودار مشاهده می‌شود مقادیر پاشش محلول توسط ربات منظم بوده و متناسب با حجم بوته است. اما در مقابل مقدار محلول تخمینی توسط کارگر به صورت نامنظمی متغیر بوده است. همچنین مشاهده می‌شود که برای تمام بوته‌ها، همواره ربات مقدار کمتری محلول استفاده نموده است.



شکل (۱۱) مقایسه مقدار محلول پاشش شده توسط ربات و کارگر به ازای حجم بوته

Figure (11) Comparison of the average of the sprayed solution by the robot and the worker regarding each plant volume.

صنعتی ربات زمان نسبتاً زیادی است. در پژوهش رفیق و همکاران<sup>۱</sup> زمان مورد نیاز سمپاشی ۱۰ متر از یک ردیف کشت، توسط ربات آنها ۲۲/۶۶ ثانیه، با سمپاش پستی ۶۸/۲۶ ثانیه و با سمپاش فرقونی ۴۹/۴۶ ثانیه گزارش گردیده است (۱۵). هر چند در هیچ یک از این پاشش‌ها حجم بوته اهمیت نداشته اما مقایسه‌ی زمان‌های سمپاشی با زمان محلول‌پاشی برآوردشده در این پژوهش نشان دهنده آن است که عملکرد ربات محلول‌پاش مبتنی بر حجم باید چندین برابر سریعتر باشد تا توجیه منطقی پیدا کند. همانطور که در جدول ۵ نشان داده شده است میانگین مجموع زمان تصویربرداری و پردازش اطلاعات برابر ۱۶ ثانیه برآورد گردیده که باید حتی المقدور زمان فوق را کاهش داد. بدیهی است با استفاده از پردازشگر قوی‌تر و ترکیب چند نازل می‌توان زمان فوق را کاهش داد.

ربات حاصل از این پژوهش در مرحله تحقیقاتی است و برای ورود به فاز صنعتی باید با بهینه‌سازی ربات، عملکرد زمانی آن را افزایش داد. همچنین از ربات فوق با این نحوه عملکرد می‌توان جهت تعریف الگوی پاشش استفاده کرد.

دو ویژگی برخط بودن (Ontime) شامل برداشت اطلاعات گیاه و پاشش محلول لحظاتی پس از پردازش اطلاعات و مستقل بودن کیفیت و دقت تصویر از فاصله دوربین تا شی (Scale invariant) از خصوصیات مهم پژوهش فوق می‌باشد در صورتی که در تحقیقات قبلی برداشت و پردازش اطلاعات با انجام عملیات مورد نظر فاصله زمانی زیادی دارد. حتی در موارد بسیاری پردازش اطلاعات زمان زیادی برده و نیاز به محیط آزمایشگاهی و امکانات خاص دارد. مانند پژوهشی که بر روی رشد غیرمتعارف اتوماتیک برگ سبزیجات توسط هو و همکاران (Hu and et al.2018) انجام گرفت.

### برآورد زمان محلول‌پاشی ربات

در ارزیابی ربات حاصل از این پژوهش، میانگین زمان محلول‌پاشی بوته گیاه شامل شروع حرکت ربات، یافتن محل استقرار، بازشدن بازو، تصویربرداری، محاسبه‌ی حجم و پاشش محلول در هر مقطع و در نهایت بسته‌شدن بازو و اتمام کامل مراحل محلول‌پاشی ۵۶ ثانیه برآورد گردید. در جدول ۵ مقادیر زمان به تفکیک نشان داده شده است. میانگین حجم برآوردشده برای ۱۰ بوته ۵۴۲/۵ میلی‌لیتر گزارش گردید. یعنی کل زمان مطابق آنچه شرح داده شد به بوته‌ای با حجم ۵۴۲/۵ میلی‌لیتر ۵۶ ثانیه است. بنابراین ربات قادر است در ۱ ساعت کاری حدود ۶۴ بوته را محلول‌پاشی کند. این زمان به لحاظ عملکرد



جدول (۵) زمان عملکرد ربات به تفکیک مراحل مختلف  
 Table (5) Robot operation time in different stages

زمان (ثانیه) Second	عملکرد ربات Robot performance
14 (s)	میانگین مجموع حرکت تا یافتن محل استقرار Average total movement to find location
8 (s)	میانگین مجموع زمان باز شدن بازو در تمام مقاطع Average total manipulator opening time in all sections
16 (s)	میانگین مجموع زمان تصویربرداری و پردازش اطلاعات Average total shooting time and information processing
12 (s)	میانگین مجموع مدت زمان پاشش محلول در تمام مقاطع Average total duration of solution spraying in all sections
6 (s)	میانگین مجموع زمان جمع شدن بازو Average total arm gathering time
56 (s)	میانگین مجموع کل عملکرد ربات Average total robot performance

مقدار محلول ایده آل مورد نیاز گیاه است. استفاده از ضریب حجم نیز تغییر در تعداد پیکسل‌های فاصله نزدیک آبی رنگ تصویر عمیق را که بر اثر تغییر در فاصله دوربین از بوته وجود می‌آید را بی‌تاثیر کرد و ویژگی Scale invariant را از ویژگی‌های منحصر بفرد ربات حاصل از پژوهش کرد. در نهایت ربات فوق در تشخیص حجم، تشخیص ارتفاع گیاه، افزایش بهره‌وری با کاهش مصرف محلول و حفظ محیط زیست، قابلیت محلول‌پاشی دقیق و منظم همراه با برنامه پیشنهادی متخصصین اهل فن و توانایی ربات در عملکرد On-time و Scale invariant (مستقل از فاصله دوربین تا شی) ارزیابی ربات قابل قبول و مفید تشخیص داده شد.

### آینده پژوهش

پژوهش حاضر به هدف ارائه نحوه طراحی و ساخت ربات محلول‌پاشی انجام گرفت که قادر است بر اساس حجم بوته گیاه اقدام به محلول‌پاشی کند. هدف از ارزیابی ارائه شده نشان دادن عملکرد ربات در تخمین حجم بوته و پاشش محلول بر اساس حجم بوته و مقایسه‌ی کیفیت محلول‌پاشی ربات با کارگر ماهر بوده است. در تحقیقات آینده می‌توان ارزیابی ربات را بسیار

### نتیجه‌گیری

ربات حاصل از پژوهش فوق قادر است در تشخیص بوته‌های با حجم‌های گوناگون، مقادیر متفاوتی از محلول را پاشش کند و مقدار محلول پاشش شده توسط ربات متناسب با حجم بوته‌ها بود. به عبارتی ارزیابی ربات از بوته‌های با حجم‌های متفاوت، مختلف بود. میانگین مقدار حجم محلول پاشش شده توسط ربات و توسط کارگر به ترتیب ۲۷/۱ و ۳۳/۱ میلی‌لیتر می‌باشد. عملکرد ربات در نحوه تشخیص حجم بوته‌های مختلف، تعیین الگوی پاشش منظم و دقیق، مصرف محلول کمتر، دقت پاشش بالاتر، نسبت به کارگر قابل قبول‌تر ارزیابی شد.

ربات قادر است با دقت بالاتری محلول‌پاشی کند و میزان مصرف محلول در ربات کمتر از کارگر برآورد گردید. ربات قادر بود بوته با بوته‌ای به حجم ۵۴۲/۵ میلی‌لیتر را در ۵۶ ثانیه برآورد حجم کند و بدان محلول‌پاشی کند. تعریف ضریب تصحیح  $\beta$  این امکان را فراهم می‌سازد تا محلول‌پاشی بوته گیاه با توجه به نظر کارشناسان و متخصصین و براساس نیاز گیاه صورت پذیرد. به عبارتی ضریب تصحیح  $\beta$  رابط بین حجم بوته و

مصرفی به هدف نحوه مقایسه عملکرد ربات و ارزیابی دقت محلول پاشی لازم و ضروری به نظر می‌رسد.

### سپاس‌گزاری

از مسئول کارگاه ماشینکاری گروه مکانیک بیوسیستم پردیس ابوریحان آقای مهندس سهرابی، کارشناس محترم کارگاه رباتیک خانم مهندس ترکی، آقای بنایی و خانم مهندس رفیعی بدلیل همکاری در ارزیابی گلخانه‌ای ربات، کمال تشکر و قدردانی را داریم.

کامل‌تر انجام داد. قطعاً مقایسه عملکرد ربات با چند سمپاش دیگر، روی چند محصول متفاوت و با تکرارهای متعدد و استفاده از طرح‌های آماری نتایج ارزیابی را بسیار کامل‌تر خواهد کرد. در این بین استفاده از کاغذهای حساس به سم جهت اندازه‌گیری ضریب کیفیت پاشش، توانمندی ربات در تشخیص بوته‌های با ارتفاع‌های مختلف، اندازه‌گیری زمان محلول‌پاشی، اندازه‌گیری میزان ریزش محلول روی خاک و میزان جذب محلول توسط گیاه، اندازه‌گیری مقدار محلول

### References

- Adamides, G., Katsanos, C., Parmet, Y., Christou, G., Xenos, M., Hadzilacos, T., and Edan, Y. 2017. HRI usability evaluation of interaction modes for a teleoperated agricultural robotic sprayer. *Journal of Applied Ergonomics*, 62: 237-246.
- Berge, T., Goldberg, S., Kaspersen, K., and Netland, J. 2012. Towards machine vision based site-specific weed management in cereals. *Journal of Computers and Electronics in Agriculture*, 81: 79-86.
- Burks, T. F., Subramanian, V., and Singh, S. 2005. Autonomous dreenhouse sprayer vehicle using machine vision and ladar for steering control. *Journal of Automation Technology for Off-Road Equipment*. 79-90.
- Cantelli, L., Bonaccorso, F., Longo, D., Melita, C. D., Schillaci, G., and Muscato, G. 2019. A Small Versatile Electrical Robot for Autonomous Spraying in Agriculture. *Journal of Agricultural Engineering*, 1(3): 391-402.
- Gao, Z., Zhang, J., Geng, C., and Li, W. 2010. Control system of target spraying robot in greenhouse. *Journal of Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 26(1): 228-233.
- Gonzal-de-Soto, M., Emmi, L., Perez-Ruiz, M., Aguera, J., and Gonzal-de-Satos, P. 2016. Autonomous systems for precise spraying e Evaluation of a robotised patch sprayer. *Journal of Biosystems Engineering*, 146: 165-182.
- Hejazipoor, H., Massah, J., Soryani, M., Asefpour Vakiliana, K., and Cheginia, GH. 2021. An intelligent spraying robot based on plant bulk volume. *Journal of Computers and Electronics in Agriculture*, Vol 180.
- Hu, Y., Wang, L., Xiang, L., Wu, Q., and Jiang, H. 2018. Automatic Non-Destructive Growth Measurement of Leafy Vegetables Based on Kinect. *Journal of Sensors*. 18: 806.
- Liang, X., Kankare, V., Hyyppä, J., Wang, Y., Kukko, A., Haggrén, H., Yu, X., Kaartinen, H., Jaakkola, A., Guan, F., Holopainen, M., and Vastaranta, M. 2016. Terrestrial laser scanning in forest inventories. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115: 63-77.
- Massah, J., and Ghazavi, M.R. 2009. Effect of force control system on power and time consumption of tree pruning machine. *Cercetari Agronomice in Moldova*, ISSN: 0379-5837, XLII, No.4 (140): pp 5-15.
- Oberti, O., Marchi, M., Tirelli, P., Calcante, A., Iriti, M., Tona, E., Hoceva, M., Baur, J., Pfaff, J., Schutz, C., and Ulbrich, H. 2016. Selective spraying of grapevines for disease control using a modular agricultural robot. *Journal of Biosystems Engineering*, 146: 203 – 215.

12. Ogawa, Y., Kondo, N., Monta, M., and Shibusawa, S. 2006. Spraying Robot for Grape Production. *Journal of Field and Service Robotics*, 24: 539-548.
13. Olofsson, K., Holmgren, J., and Olsson, H. 2014. Tree Stem and Height Measurements using Terrestrial Laser Scanning and the RANSAC Algorithm. *Journal of Remote Sensing*, 6: 4323-4344.
14. Olofsson, K., and Holmgren, J. 2017. Tree Stem and Canopy Biomass Estimates From Terrestrial Laser Scanning Data. *Journal of Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42: 157-160.
15. Rafigh, A., Mashadi Meighani, H., Kalantari, D., and Mosavi Khorasani, M. 2013. Greenhouse Spraying Automation Using Mobile Robots. *Journal of Mechanical Sciences in agricultural machinery*, Vol 1, No 1. (in Persian with English abstract).