



انجمن مهندسان
مکانیک ایران

نشریه علمی

ماشین های کشاورزی



شماره ۲

جلد ۱۳

سال ۱۴۰۲

(شماره پایانی: ۲۸)

شاپا: ۶۸۲۹-۲۲۲۸

عنوان مقالات

مقالات پژوهشی

- تحلیل فضای کاری و سینماتیک بازوی روبات جابه جاکنده محصولات در مزرعه ۱۰۳
سید ایمان شریعتی، محمدحسین آق خانی، محمودرضا گلزاریان، علی اکبر اکبری
- طراحی و ساخت سامانه ولتاژ بالا برای نابودی علف های هرز با سازوکار بازخوردی ۱۱۹
بهرام بشارتی، علی جعفری، حسین موسی زاده، حسین نوید
- تحلیل حرارتی و مکانیکی کوره دوار رآکتور تولید کربن فعال ۱۳۷
سجاد نادری پاریزی، رضا علیمردانی، منصوره سلیمانی، حسین موسی زاده
- تحلیل حرارتی و اکسرژی متمرکزکننده فرنل خطی به منظور امکان سنجی استفاده در سامانه گرمایش گلخانه ۱۴۹
سعید نوروزی، علی ملکی، شاهین بشارتی
- تشخیص درصدهای مختلف پالم در روغن ذرت به کمک بینی الکتریکی (تشخیص تقلب) ۱۷۱
زهرا زنگنه وندی، حسین جوادی کیا، ناهید عقیلی ناطق، لیلا ندرلو
- تشخیص و شمارش خودکار کاکل های ذرت با استفاده از آشکارساز مبتنی بر یادگیری عمیق ۱۸۳
شهرزاد فلاحت نژاد ماهانی، اعظم کریمی
- تشخیص کرم ساقه خوار برنج (*Chilo suppressalis*) با کمک تصاویر تلفن هوشمند و یادگیری عمیق ۲۰۳
محمد فلاح، عبادت قنبری پرمهر
- ارزیابی اثرات نور مصنوعی بر برخی شاخص های گیاه در طراحی و ساخت یک کارخانه گیاهی مقیاس کوچک ۲۲۱
پوریا شمسی رودبارسرا، سیدرضا موسوی سیدی، داوود کلاتری، کامران قاسمی
- پیش بینی ارتعاش تمام بدن بر اساس مدل های رگرسیونی تک متغیره و تعیین مدت زمان مجاز مواجهه کاربر تراکتور ۲۳۴
علی محمدی، کامران خیرعلی پور، بهرام قمری، احمد جهانبخشی، رضا شهیدی
- ارزیابی فنی سه روش برداشت دستی، نیمه مکانیزه و مکانیزه ی بادام زمینی در مغان ۲۴۶
جبرائیل تقی نژاد، صفت اله رحمانی

نشریه ماشین های کشاورزی

با شماره پروانه ۸۹/۱۲۶۳۹ و درجه علمی - پژوهشی شماره ۳/۱۱/۳۷۸۱ از وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
۸۹/۶/۱۳ ۸۹/۳/۱۷

"بر اساس مصوبه وزارت عتف از سال ۱۳۹۸، کلیه نشریات دارای درجه "علمی-پژوهشی" به نشریه "علمی" تغییر نام یافتند."

تابستان ۱۴۰۲

جلد ۱۳ شماره ۲

صاحب امتیاز: دانشگاه فردوسی مشهد

مدیر مسئول: سید محمدرضا مدرس رضوی

سر دبیر: محمدحسین عباسپور فرد

استاد- گروه مهندسی مکانیک دانشکده مهندسی (دانشگاه فردوسی مشهد)

استاد- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم (دانشگاه فردوسی مشهد)

اعضای هیئت تحریریه:

استاد- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم (دانشگاه فردوسی مشهد)	آق خانی، محمدحسین
دانشیار- گروه فنی کشاورزی، پردیس ابوریحان (دانشگاه تهران)	ابونجمی، محمد
گروه مهندسی بیولوژیک و کشاورزی (دانشگاه کالیفرنیا، دیویس، آمریکا)	پوررضا، علیرضا
استاد- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم (دانشگاه تربیت مدرس)	خوش تقاضا، محمدهادی
استاد- گروه مهندسی کشاورزی و محیط زیست، دانشکده فنی (دانشگاه ایبادان، نیجریه)	راجی، عبدالغنی
دانشیار- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم (دانشگاه فردوسی مشهد)	روحانی، عباس
دانشیار- مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی	سعیدی راد، محمدحسین
استادیار- دانشکده کشاورزی (دانشگاه کاستسارت، تایلند)	سوپاکیت، سایاسونترن
استاد- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم (دانشگاه فردوسی مشهد)	عباسپور فرد، محمدحسین
استاد- گروه ماشین های کشاورزی (دانشگاه تهران- پردیس کرج)	علیمردانی، رضا
استاد مدعو- گروه مهندسی شیمی و بیولوژیک (دانشگاه ساسکاچوان، ساسکاتون، کانادا)	عمادی، باقر
استاد- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم (دانشگاه شهید باهنر کرمان)	غضنفری مقدم، احمد
استاد- گروه مکانیک دانشکده مهندسی (دانشگاه فردوسی مشهد)	کدخدایان، مهران
استاد- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم (دانشگاه شیراز)	لغوی، محمد
استاد- گروه ماشین های کشاورزی (دانشگاه تهران)	محتسبی، سید سعید
استاد- گروه مکانیک دانشکده مهندسی (دانشگاه فردوسی مشهد)	مدرس رضوی، محمدرضا
گروه مهندسی کشاورزی (دانشگاه کاسل آلمان)	نصیراحمدی، ابودر

ناشر: دانشگاه فردوسی مشهد

مقالات این نشریه در پایگاه های زیر نمایه می شود:

Internet Archive، Google scholar، EBSCO، DOAJ، CABI، AGRIS، پایگاه استنادی جهان اسلام (ISC)، سامانه نشریات علمی ایران، پایگاه اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی (SID)، بانک اطلاعات نشریات کشور (MAGIRAN)، مرجع دانش (CIVILICA)

پست الکترونیک: jame@um.ac.ir

مقالات این شماره در سایت <http://jame.um.ac.ir> به صورت مقاله کامل نمایه شده است.

این نشریه به تعداد ۴ شماره در سال و به صورت آنلاین منتشر می شود.

مندرجات

مقالات پژوهشی

- ۱۰۳ تحلیل فضای کاری و سینماتیک بازوی روبات جابه‌جاکننده محصولات در مزرعه
سید ایمان شریعتی، محمدحسین آق‌خانی، محمودرضا گلزاریان، علی‌اکبر اکبری
- ۱۱۹ طراحی و ساخت سامانه ولتاژ بالا برای نابودی علف‌های هرز با سازوکار بازخوردی
بهرام بشارتی، علی جعفری، حسین موسی‌زاده، حسین نوید
- ۱۳۷ تحلیل حرارتی و مکانیکی کوره دوار رآکتور تولید کربن فعال
سجاد نادری پاریزی، رضا علیمردانی، منصوره سلیمانی، حسین موسی‌زاده
- ۱۴۹ تحلیل حرارتی و اکسرژی متمرکزکننده فرنل خطی به منظور امکان‌سنجی استفاده در سامانه گرمایش گلخانه
سعید نوروزی، علی ملکی، شاهین بشارتی
- ۱۷۱ تشخیص درصدهای مختلف پالم در روغن ذرت به کمک بینی الکتریکی (تشخیص تقلب)
زهرا زنگنه‌وندی، حسین جوادی کیا، ناهید عقیلی ناطق، لیلا ندرلو
- ۱۸۳ تشخیص و شمارش خودکار کاکل‌های ذرت با استفاده از آشکارساز مبتنی بر یادگیری عمیق
شهرزاد فلاح نژاد ماهانی، اعظم کرمی
- ۲۰۳ تشخیص کرم ساقه‌خوار برنج (*Chilo suppressalis*) با کمک تصاویر تلفن هوشمند و یادگیری عمیق
محمد فلاح، عبادت قنبری پرمهر
- ۲۲۱ ارزیابی اثرات نور مصنوعی بر برخی شاخص‌های گیاه در طراحی و ساخت یک کارخانه گیاهی مقیاس کوچک
پوریا شمسی رودبارسرا، سیدرضا موسوی سیدی، داوود کلانتری، کامران قاسمی
- ۲۳۴ پیش‌بینی ارتعاش تمام بدن بر اساس مدل‌های رگرسیونی تک‌متغیره و تعیین مدت زمان مجاز مواجهه کاربر تراکتور
علی محمدی، کامران خیرعلی‌پور، بهرام قمری، احمد جهانبخشی، رضا شهیدی
- ۲۴۶ ارزیابی فنی سه روش برداشت دستی، نیمه‌مکانیزه و مکانیزه‌ی بادام‌زمینی در مغان
جبرائیل تقی نژاد، صفت اله رحمانی



Analysis of Workspace and Kinematics of Robot Manipulator for Product Handling in Agricultural Farm

S. I. Shariati¹, M. H. Aghkhani^{2*}, M. R. Golzarian³, A. A. Akbari⁴

1- Ph.D. Candidate of Biosystem Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

2- Professor of Biosystem Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

3- Associate Professor of Biosystem Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

4- Associate Professor of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

(*- Corresponding Author Email: aghkhani@um.ac.ir)

<https://doi.org/10.22067/jam.2020.39236>

Received: 21 April 2020
Revised: 06 September 2020
Accepted: 02 December 2020
Available Online: 02 December 2020

How to cite this article:

Shariati, S. I., Aghkhani, M. H., Golzarian, M. R., & Akbari, A. A. (2023). Analysis of Workspace and Kinematics of Robot Manipulator for Product Handling in Agricultural Farm. *Journal of Agricultural Machinery*, 13(2), 101-115. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jam.2020.39236>

Introduction

Robots have been used for material handling for many years, and their applications have greatly expanded with the integration of intelligent technologies. While numerous researchers have proposed various robots for this field, it is crucial to design customized configurations that are suitable for agricultural farms. However, research in our country has been limited to a few mobile agricultural robots. The main focus of this paper is to design and model workspaces and analyze the kinematics of manipulators in agricultural settings.

Materials and Methods

This article investigates the workspace and kinematics of a robot manipulator to design and manufacture a four-DOF manipulator for farming. This manipulator will be capable of performing a variety of tasks, but the goal of this project is to enable it to load and unload materials and products on the farm as an auxiliary force for the farmer.

When designing and analyzing a manipulator, the first step is to determine the specific task that the robotic arm will perform. For example, consider a scenario where the task involves loading or unloading forage packages from a trailer at a designated location. This task specification forms the basis for further design and analysis, ensuring that the manipulator is appropriately designed to meet the requirements of the task.

An intelligent robotic arm that is attached to a tractor can perform this operation in the shortest possible time without the intervention of human workers. Otherwise, a large number of laborers would be required to move boxes weighing 10 kg over distances of 3 to 4 meters and heights of 1 to 2 meters, which would require a great deal of torque.

At this stage, the design of the arm kinematics model, direct kinematic equations, velocity kinematics, and Jacobian matrix solving were performed. The calculations were carried out using two methods: manual calculation and kinematic modeling in MATLAB software for three arm configurations in two simulation tests. The results of both methods were compared.

The workspace analysis of the selected manipulator configurations, as well as the use of arm kinematic performance evaluation indices, were illustrated in graphs.

Results and Discussion

The issue of moving forage packages on the farm is described below. If a farmer were to move 48 packages of fodder weighing about 10 kg manually (using human workers) in the workspace modeled in Figure 10, each package would take an average of 30 seconds to be moved reciprocally along an unobstructed path. Hence, it would take approximately 24 minutes to move all the packages. However, the linear speed of the final operator of the robot arm during the first test was found to be 1 meter per second, which is 3.7 times faster than the

manual work scenario, and the total movement of the packages can be completed in about 6.5 minutes.

Upon analyzing the velocity diagrams of the final performer in both tests, it becomes evident that there is not much variation in speed and acceleration due to the change in configurations. The evaluation of robot workspace indicators was conducted using two methods: workspace index and structural length index. These indicators were calculated for all three configurations, and the results indicated that Configuration Type 1 was the most suitable option. Furthermore, the manipulability index of the robot arm was assessed based on the obtained diagrams for all three configurations in the two tests. It was observed that Configuration Type 1 outperformed the other two types in terms of score, indicating its superior performance. This aligns with the suggestion made by Yoshigawa for the first three joints of the Puma robot.

Overall, the results suggest that Configuration Type 1 is one of the most favorable options, ensuring better performance for the final performer.

Conclusion

One of the main considerations when using robots in agriculture is the appropriate kinematic design of joints and links for work operations. Using the example of robots assisting with moving products on the ground, it can be seen that using robots significantly reduces the time required compared to manual labor. Furthermore, in terms of energy consumption and cost within a certain period, the use of robots has economic justification.

Based on the studies conducted, Configuration Type 1 passed the kinematic path in both tests with a higher manipulability index and a more suitable workspace index based on both calculated criteria. Therefore, this configuration is recommended for the design of robots for the operation of moving products on the ground.

Keywords: Agricultural robot manipulator, Kinematics and workspace analysis, Manipulability measures

مقاله پژوهشی

جلد ۱۳، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۲، ص ۱۱۵-۱۰۱

تحلیل فضای کاری و سینماتیک بازوی روبات جابه‌جاکننده محصولات در مزرعه

سید ایمان شریعتی^۱، محمدحسین آق خانی^{۲*}، محمودرضا گلزاریان^۳، علی اکبر اکبری^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۱۲

چکیده

علی‌رغم توسعه روزافزون استفاده از روبات‌ها در فرآیندهای مختلف، استفاده از بازوهای مکانیکی ماهر در عملیات زراعی بسیار محدود می‌باشد. در این مقاله تحلیل فضای کاری و سینماتیک یک روبات ۴ درجه آزادی با سه پیکربندی متفاوت برای انجام یک عملیات زراعی در محیط مزرعه مورد بررسی واقع شده است. محاسبات اولیه براساس روش‌های تحلیلی (هندسی) برای طراحی بازو انجام شده و سینماتیک آن در فضای نرم‌افزارهای Solidworks و Matlab با سه پیکربندی متفاوت در قالب دو آزمون شبیه‌سازی شده‌است. تعریف مسیر حرکت در فضای مفصلی براساس نقاط ابتدا و انتهای مسیر و یک چندجمله‌ای درجه ۵ انجام پذیرفت. با مقایسه شاخص‌هایی مانند تحلیل سرعت مجری نهایی، شاخص فضای کاری و معیار چالاکی پیکربندی مناسب از میان ۳ نوع پیکربندی مورد بررسی، انتخاب گردید. این انتخاب با نتیجه تحقیقاتی که محققین روی بهترین ساختار سه مفصل اول روبات مشهور پیوما انجام داده‌اند، سازگار بود.

واژه‌های کلیدی: بازوی روبات در کشاورزی، تحلیل سینماتیکی، شاخص فضای کاری و چالاکی

مقدمه

روبات‌ها برای جابه‌جایی مواد مختلف در بخش‌های صنعتی مدت‌ها است استفاده می‌شوند اما طی سال‌های اخیر رشد فناوری‌های روبات‌ها به خصوص سطح هوشمندی آن‌ها ارتقای قابل‌ملاحظه‌ای یافته است. در این راستا استفاده از ظرفیت روبات‌ها در بخش کشاورزی برای افزایش کارایی و اثربخشی روبه‌روز در حال افزایش است. در این ارتباط دانشمندان و محققان زیادی نمونه‌های مختلفی از روبات‌ها را پیشنهاد داده‌اند و از آن‌جا که روبات‌ها در بخش کشاورزی با متغیرهای متعدد محیطی مواجه می‌باشند لزوم مناسب‌سازی

پیکربندی‌های بازوهای مکانیکی برای انجام عملیات کشاورزی از موضوعات دارای اولویت است. بر اساس دسته‌بندی‌های انجام شده در منابع روباتیک، دو گروه اصلی در ارتباط با فعالیت‌های کشاورزی تعریف شده‌اند که عبارتند از بازوهای مکانیکی ماهر^۵ و روبات‌های سیار چرخ‌دار^۶. تجربیات پژوهشی محدودی در این بخش در داخل کشور موجود است که عمده آن‌ها نیز در ارتباط با روبات‌های سیار چرخ‌دار انجام شده و عملاً ظرفیت استفاده از بازوهای مکانیکی ماهر همچنان اندک‌شمار است. البته استفاده از سیستم‌های پردازش تصویر در روبات‌ها، دارای نمونه کارهای پژوهشی در داخل کشور می‌باشد که از آن جمله می‌توان الگوریتم‌های بینایی ماشین برای برداشت محصولاتی مانند فلفل دلمه‌ای اشاره کرد (Moghimi, Aghkhani, & Golzarian, 2015)؛ اما تجربیات محققین در زمینه طراحی و ساخت روبات‌های کشاورزی از دهه ۸۰ میلادی آغاز شده است. نمونه این تجربیات روباتی است که محققین ژاپنی برای حمل و نقل و جابه‌جایی محصولات و مواد سنگین در مزرعه مانند هندوانه، طالبی، کلم و غیره انجام داده‌اند. از آن‌جا که برداشت این محصولات

- ۱- دانشجوی دکترای مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
- ۲- استاد گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
- ۳- دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
- ۴- دانشیار گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

(Email: aghkhani@um.ac.ir)

<https://doi.org/10.22067/jam.2020.39236>

*)

5- Manipulator robot

6- Wheeled Mobile Robots (WMR)

موازی نمونه‌های مختلفی در مراجع علمی و آزمایشگاهی تعریف شده است. روبات‌های موازی از یک بخش ثابت، حداقل دو زنجیره سینماتیکی مستقل و یک صفحه متحرک به‌عنوان مجری نهایی تشکیل می‌شوند. تعداد زنجیره‌های سینماتیکی برابر تعداد درجات آزادی خواهد بود. در این میان روبات‌های دلتا که کاربرد وسیعی در خطوط بسته‌بندی و جابه‌جایی مواد دارند به‌صورت خاص معرفی شده‌اند. در کل ساختار روبات‌های موازی برای کاربردهایی مناسب است که نیازمند سرعت بالا در فضای کاری محدود است (Merlet, 2006).

مواد و روش‌ها

این مقاله برای انجام بخشی از عملیات زراعی در محیط مزرعه، یک بازوی مکانیکی ماهر که هیچ حلقه بسته‌ای در آن وجود ندارد و یک زنجیره سینماتیکی باز با ۴ درجه آزادی است را پیشنهاد می‌نماید و به بررسی فضای کاری و تحلیل سینماتیکی سه نوع پیکربندی مشابه می‌پردازد. در ادامه با مدل‌سازی سینماتیکی در قالب ۲ آزمون در محیط نرم‌افزار متلب، پیکربندی منتخب ارائه می‌گردد. این بازوی مکانیکی با طراحی و نصب مجری نهایی‌های گوناگون قادر به انجام کارهای مختلفی است و آنچه در این پروژه مورد نظر است بارگیری و تخلیه مواد و محصولات در مزرعه به‌عنوان یک نیروی کمکی برای کشاورز است.

نوع کار یا وظیفه بازوی مکانیکی ماهر

برای طراحی و تحلیل یک بازوی مکانیکی در گام اول باید نوع کار و وظیفه‌ای که قرار است بازو انجام دهد مشخص گردد. در این مسئله قرار است تریلری حاوی بسته‌های علوفه را در مکانی مناسب تخلیه یا بارگیری گردد. یک بازوی مکانیکی هوشمند که قابلیت اتصال به تراکتور دارد می‌تواند این عملیات را در کمترین زمان بدون دخالت نیروی کارگری به انجام رساند. این عملیات نیازمند نیروی کارگری و صرف انرژی زیاد است. در مسئله تعریف شده کارگران نیازمند این هستند که جعبه‌های ۱۰ کیلوگرمی را در یک فاصله ۳ تا ۴ متر در ارتفاع ۱ تا ۲ متر جابه‌جا نمایند و این موضوع به گشتاور مفصلی زیاد نیاز خواهد داشت. فرآیند این عملیات شامل تشخیص موقعیت هدف برای قرارگیری مجری نهایی در روی هدف و در ادامه محاسبه جهت‌گیری مورد نیاز برای برداشتن محصول خواهد بود. اهداف مورد نظر در این پروژه متشکل از چند حجم مکعب براساس ابعاد شکل ۱ است.

خسته‌کننده و زمان‌بر می‌باشند، نیروی کار بیشتری می‌طلبند. آخرین نمونه روبات برداشت مواد سنگین در مزرعه توسط یک گروه تحقیقاتی در دانشگاه کیوتو ژاپن با یک ساختار روبات موازی طراحی و ساخته شده است. این روبات ۴ درجه آزادی دارد و قادر است به‌طور متوسط هر هندوانه را در مدت ۴۰ ثانیه برداشت نماید (Sakai & Iida, 2000; Sakai, Iida, & Osuka, 2008; Sakai, Iida, & Umeda, 2002). از آن‌جا که روبات‌ها در شرایط کنترل‌شده عملکرد بهتری خواهند داشت، استفاده از آن‌ها در گلخانه‌ها متداول‌تر است. به‌عنوان نمونه روبات ۹ درجه آزادی با ساختاری دارای حرکت اضافی^۱ برای برداشت محصولات درختچه‌ای در گلخانه، نمونه یک بازو با زنجیره سینماتیکی باز است که توسط جرج بور^۲ در سال ۲۰۱۲ ارائه شده است. این بازو در واقع یک روبات با قابلیت انجام چندین عملیات مختلف است. این روبات به دلیل آن که درجه آزادی آن از درجه آزادی مورد نیاز برای انجام کار مورد نظر بیشتر است، قادر خواهد بود مانور بسیار بالایی در عبور از موانع داشته باشد. هرچند حل معادلات سینماتیکی آن مشکل‌تر خواهد بود (Baur & Pfaff, 2012)؛ اما ساختارهای ساده‌تر بازوها مانند روبات‌های کشت نشاء در فضای گلخانه‌ای هم مورد استفاده می‌باشند. این بازوها با ۳ یا ۴ درجه آزادی مشابه روبات‌های مونتاژکار صنعتی می‌توانند عملیات جابه‌جایی نشاها در سینی‌های گلخانه را به سرعت انجام دهند. معمولاً این مدل بازوها روی بسترهای متحرک نبوده و در یک محل ثابت مستقر می‌شوند و سینی‌های نشاء از مقابل آن‌ها عبور می‌کنند (Belforte, 2006). نمونه دیگر روبات برداشت مرکبات است که فرآیند طراحی و نحوه انتخاب پیکربندی مناسب آن در مقاله‌ای در سال ۲۰۰۷ در کنفرانس ASBAE مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله شاخص‌هایی به‌عنوان ضوابط عملکرد ماهرانه نوع پیکربندی با توجه به مقادیر نقاط تکین ماتریس ژاکوبین تعیین می‌شوند. بعد از انتخاب نوع این پیکربندی، فاکتورهای دیگر مانند سرعت، بارگذاری و دقت را می‌توان از ویژگی‌های نوع کار مورد نظر به‌دست آورد (Sivaraman, 2007). این محقق در مقاله‌ای دیگر به نحوه طراحی یک بازوی مکانیکی روبات برای کاربردهای کشاورزی با استفاده از مدل‌سازی ساختار سینماتیکی در Matlab و Robotect پرداخته است (Sivaraman, 2006). نمونه دیگر از این بازوهای مکانیکی، روبات برداشت گوجه‌فرنگی است. این نمونه یک بازوی ۶ درجه آزادی و مجهز به یک سیستم مجری نهایی مکشی بود و در سال ۲۰۰۸ در آزمایشگاه تخصصی سیستم‌های هوشمند کشاورزی دانشگاهی در چین ساخته شد که در کنفرانسی در همان سال ارائه گردید (Li, Liu, Li, & Li, 2008; Monta, Kondo, & Ting, 1998). در رابطه با روبات‌های

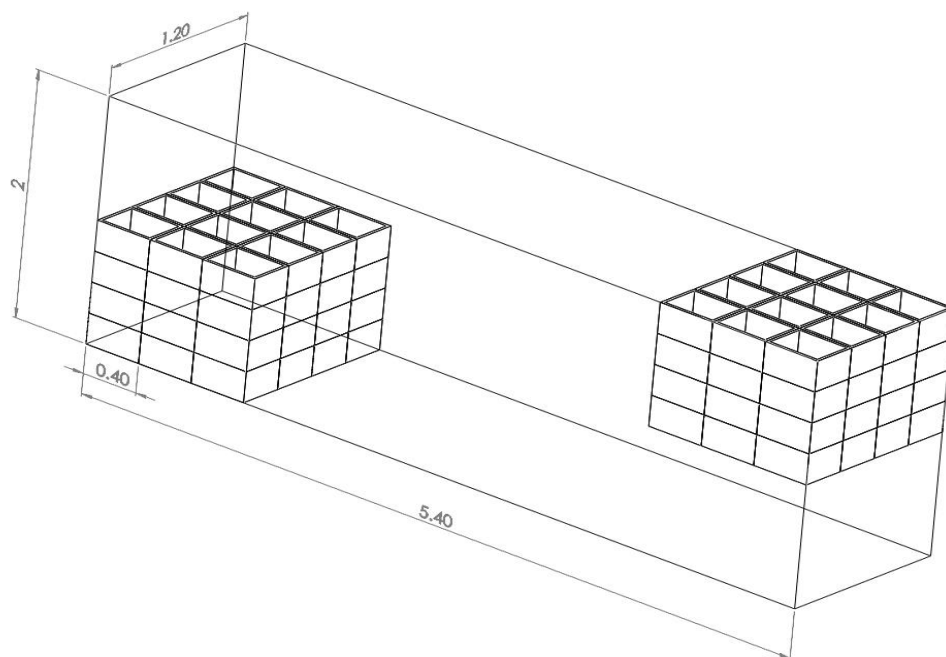


شکل ۱- نمونه بسته‌ها با وزن تقریبی ۱۰ کیلوگرم و ابعاد ۳۰*۴۰*۲۵

Fig.1. Sample packages Boxes with approximate weight of 10 kg and 30*40*25 cm

راست تصویر) به همان صورت منظم منتقل نماید. چیدمان منظم بسته‌ها به واسطه این است که در این مرحله از پروژه صرفاً بررسی سینماتیک بازو در حداقل فضای کاری مورد نظر بود. برای شروع عملیات، پایه اصلی روبات بر روی سکویی متصل به مالبند تراکتور قرار گرفته و روی زمین تثبیت می‌شود.

از آن‌جا که فضای کاری مورد نیاز روبات وابسته به مقیاس کاری است که باید انجام شود، لذا فضای عملیات روبات در قالب شکل ۲ مدل شده است. ۴۸ بسته علوفه انتخاب شده‌اند که در چهار ردیف سه‌تایی به صورت منظم در موقعیت مبدا (سمت چپ تصویر) قرار گرفته‌اند و قرار است روبات مورد نظر این بسته‌ها را تک به تک برداشته و به موقعیت هدف (تریلر یا هر وسیله انتقال بار) (سمت



شکل ۲- فضای کاری پیش‌بینی شده برای عملیات

Fig.2. Predicted workspace for operation

مفاصل به هم متصل شده‌اند. این بازوها را می‌توان در یک دسته‌بندی کلی به دو گروه تقسیم نمود: بازوهای سری^۲ که هیچ حلقه بسته‌ای در آن‌ها وجود ندارد و یک زنجیره سینماتیکی باز هستند. فضای

طراحی و تحلیل مدل سینماتیکی

بازوهای مکانیکی مجموعه‌ای از اتصالات^۱ هستند که به کمک

انتخاب این ۳ پیکربندی، رعایت اصول دیناویت هارتنبرگ و شرایط استقرار بازوی روبات در انتهای تراکتور در نظر گرفته شده است (Spong, Hutchinson, & Vidyasagar, 2004).

براین اساس توالی مفصل‌های چرخشی مشابه بوده و زاویه بین محورهای چرخش نیز بدون تغییر خواهد بود. آنچه در این بخش برای تمایز بین این سه پیکربندی لحاظ شده است طول رابط‌ها است. در رابطه (۳) پارامترهای p ، موقعیت مجری نهایی و پارامترهای r در ستون سوم، چرخش دستگاه متصل به مجری نهایی را نشان می‌دهد (Gan, Yu, He, Wang, & Sun, 2014).

ماتریس تبدیل نهایی که موقعیت مکانی انتهای مجری نهایی را برای سه پیکربندی مورد نظر نشان می‌دهد به ازای متغیرهای مفصلی مجری نهایی که هریک از پیکربندی‌ها در نقطه مقصد خواهند داشت از رابطه (۴) به دست خواهد آمد. مختصات مجری نهایی در ابتدا و انتهای مسیر به ترتیب برابر با مقادیر $P_1 = [1.25 \quad -2.16 \quad 0.86]$ ، $P_2 = [0.866 \quad 1.5 \quad 2]$ خواهد بود.

شبیه‌سازی در نرم‌افزار متلب

برای مقایسه و آزمون این سه پیکربندی، دو آزمون در نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی شده است. در هر دو آزمون، هرکدام از پیکربندی‌ها براساس یکسری متغیر مفصلی مسیری را از نقطه مبدا به نقطه مقصد طی خواهند نمود با این تفاوت که در آزمون دوم مسیر با یک توده درخت به عنوان مانع روبه‌رو است. موقعیت نقطه اول و نقطه دوم بر حسب متر با مختصات محاسبه شده در مرحله قبل یکسان است که صحت محاسبات و معادلات سینماتیک انجام شده را نشان می‌دهد. نمونه این صحت‌سنجی‌ها در سایر مقالات هم دیده می‌شود (Li et al., 2008).

برای مدل‌سازی در محیط متلب، مسیر حرکت بازو براساس روش فضای مفصلی، بین دو نقطه مفروض با متغیرهای مفصلی q_1 (متغیرهای مفصلی موقعیت اولیه محصول) و q_2 (موقعیت‌های هدف) در فضای کاری طبق یک تابع درجه ۵ $q(t)$ ، در یک بازه زمانی ۴ ثانیه و با گام‌های زمانی ۰/۱ ثانیه با ۴۱ مقدار برای q به دست آمد و شبیه‌سازی شد. این تابع در آزمون اول با فرض صفر بودن سرعت و شتاب مجری نهایی در نقاط ابتدا و انتهای مسیر به دست آمده است (شکل ۴) (Korayem, Ahmadi, Jaafari, Jamali, & Kiomarsi, 2008).

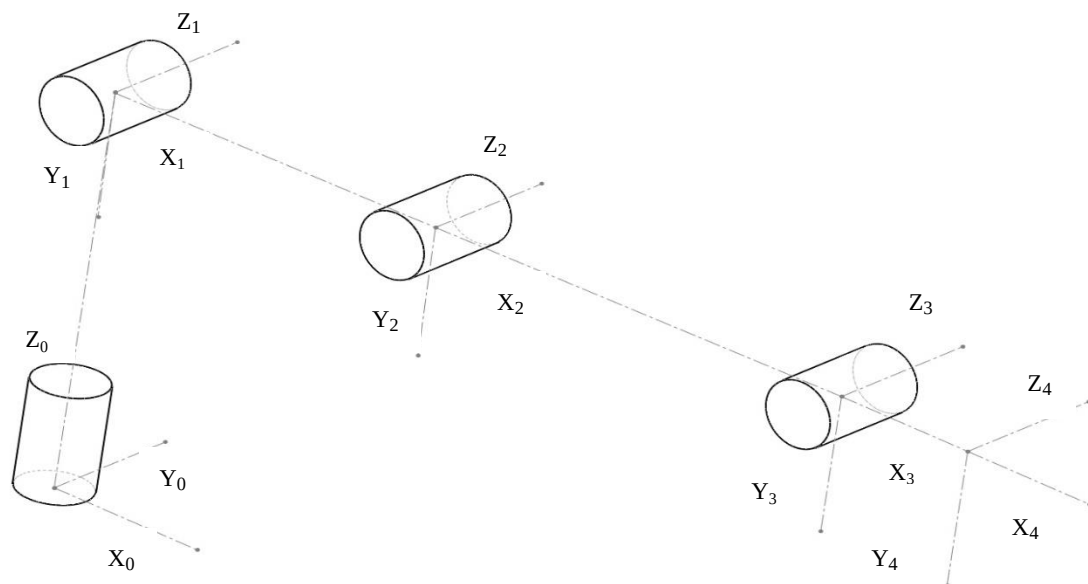
در آزمون دوم مجری نهایی همان عملیات آزمون اول را انجام داد با این تفاوت که باید از مانع پیش‌بینی شده در مسیر عبور می‌کرد. این مانع توده‌ای از شاخه‌های درخت بود که مختصات فضای تحت پوشش آن‌ها براساس بازخورد دوربین متصل به پایه اصلی روبات در دستگاه مختصات مرجع مشخص شده بود. برای عبور از این مانع براساس روش مفصلی از نقاط بینابینی استفاده شد.

کاری زیاد، تنوع بالا در انجام کار و ظرفیت حمل بار کمی دارند. بازوهای موازی^۱ یک زنجیره سینماتیکی بسته هستند و قادر به حرکات سریع و دقیق می‌باشند. برای آشنایی بیشتر می‌توان به مراجع مربوطه مراجعه نمود (Merlet, 2006). مفصل‌ها به دو صورت مفصل لغزشی (حرکت خطی) و مفصل چرخشی^۲ (حرکت دورانی) در یک بازو به کار گرفته می‌شوند. بدیهی است پیکربندی مناسب خواهد بود که بتواند در فضای کاری تعریف شده کار مورد نظر را به درستی انجام دهد. از میان مکانیزم‌های مختلف، طرحی با چهار درجه آزادی دورانی برای بازوی مکانیکی انتخاب شد (RRRR). برای شروع کار موقعیت مجری نهایی و سپس جهت‌گیری آن به کمک معادله سینماتیک مستقیم روبات بررسی گردید. این بازو شامل ساختار سربال با ۴ رابط اصلی و ۴ مفصل چرخشی است. به عبارت دیگر به عنوان پیش‌فرض اولیه یک پیکربندی ۴ درجه آزادی خواهیم داشت، که هریک از مفاصل صرفاً یک درجه آزادی دارد. برای توصیف فضای کاری مجری نهایی، در هر یک از مفاصل یک دستگاه مختصات پیش‌بینی شده و به کمک ماتریس‌های تبدیل، مختصات مجری نهایی به فضای دستگاه مختصات مرجع منتقل گردید. معادلات سینماتیکی حاکم بر آن نیز بر اساس ساختار هندسی پیکربندی مورد نظر حل شد (شکل ۳).

معادلات سینماتیک مستقیم

در بازوهای مکانیکی روبات برای رسیدن به نقطه هدف، سه درجه آزادی برای موقعیت و سه درجه آزادی برای جهت‌گیری مطرح است. در این پروژه مجری نهایی بازو با سه درجه آزادی در موقعیت هدف قرار می‌گیرد و با یک جهت‌گیری امکان فعال شدن چنگک^۳ برای گرفتن بسته فراهم می‌گردد و با توجه به مکانیزم تطبیق ثقلی و نحوه عملکرد نفوذی چنگک برای برداشتن بسته علوفه، دو درجه آزادی دیگر که برای تکمیل جهت‌گیری گرفتن بسته، مورد نیاز خواهد بود مرتفع می‌گردد. معادله سینماتیک مستقیم برای انتقال مختصات مجری نهایی به دستگاه مرجع تعریف می‌شود. برای حل این معادله نیازمند تعریف ۶ پارامتر برای هریک از مفاصل خواهیم بود. اما با استفاده از ماتریس تبدیل دیناویت هارتنبرگ (D-H)^۴ با کمک ۴ پارامتر این تبدیل به صورت ساده‌تری حل شد. فرمول تبدیل طبق ماتریس رابطه (۱) خواهد بود. ماتریس‌های تبدیل سینماتیک مستقیم برای هریک از مفاصل بازو در ۳ پیکربندی مورد آزمون طبق پارامترهای جدول ۱ محاسبه شده است. ماتریس تبدیل نهایی نیز از ضرب این ماتریس‌ها طبق رابطه (۲) و (۳) به دست آمده است. برای

- 1- Parallel Manipulator
- 2- Revolute Joint and Prismatic Joint
- 3- Gripper
- 4- Denavit-Hartenberg transformation matrix



شکل ۳- ساختار پیکربندی اصلی
Fig.3. Main selected configuration

$$T_i^{i+1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\cos(\alpha) \cdot \sin(\theta) & \sin(\alpha) \cdot \sin(\theta) & a \cdot \cos(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\alpha) \cdot \cos(\theta) & -\sin(\alpha) \cdot \cos(\theta) & a \cdot \sin(\theta) \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$T_0^4 = T_0^1 T_1^2 T_2^3 T_3^4 \quad (2)$$

$$T_0^4 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$T_0^4 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} r_{11} &= C_{\theta_1} C_{\theta_2} C_{\theta_3} C_{\theta_4} - C_{\theta_1} C_{\theta_4} S_{\theta_2} S_{\theta_3} - C_{\theta_1} C_{\theta_2} S_{\theta_3} S_{\theta_4} - C_{\theta_1} C_{\theta_3} S_{\theta_2} S_{\theta_4} \\ r_{21} &= S_{\theta_1} C_{\theta_4} C_{\theta_2} C_{\theta_3} - C_{\theta_4} S_{\theta_1} S_{\theta_2} S_{\theta_3} - C_{\theta_2} S_{\theta_1} S_{\theta_3} S_{\theta_4} - C_{\theta_3} S_{\theta_1} S_{\theta_2} S_{\theta_4} \\ r_{31} &= C_{\theta_4} (S_{\theta_2} C_{\theta_3} + S_{\theta_3} C_{\theta_2}) + S_{\theta_4} (-S_{\theta_3} S_{\theta_2} + C_{\theta_2} C_{\theta_3}) \\ r_{12} &= -S_{\theta_4} C_{\theta_1} C_{\theta_2} C_{\theta_3} + C_{\theta_1} S_{\theta_2} S_{\theta_3} S_{\theta_4} - C_{\theta_1} C_{\theta_2} C_{\theta_4} S_{\theta_3} - C_{\theta_1} C_{\theta_3} C_{\theta_4} S_{\theta_2} \\ r_{22} &= -C_{\theta_2} C_{\theta_3} S_{\theta_1} S_{\theta_4} + C_{\theta_1} S_{\theta_2} S_{\theta_3} S_{\theta_4} - C_{\theta_2} C_{\theta_4} S_{\theta_1} S_{\theta_3} - C_{\theta_3} C_{\theta_4} S_{\theta_1} S_{\theta_2} \\ r_{32} &= -S_{\theta_4} (S_{\theta_2} C_{\theta_3} + S_{\theta_3} C_{\theta_2}) + C_{\theta_4} (-S_{\theta_3} S_{\theta_2} + C_{\theta_2} C_{\theta_3}) \\ r_{13} &= S_{\theta_4} \\ r_{23} &= -C_{\theta_1} \\ r_{33} &= 0 \\ p_x &= C_{\theta_1} (a_4 C_{\theta_2 \theta_3 \theta_4} + a_3 C_{\theta_2 \theta_3} + a_2 C_{\theta_2}) \\ p_y &= S_{\theta_1} (a_4 C_{\theta_2 \theta_3 \theta_4} + a_3 C_{\theta_2 \theta_3} + a_2 C_{\theta_2}) \\ p_z &= a_4 S_{\theta_2 \theta_3 \theta_4} + a_3 S_{\theta_2 \theta_3} + a_2 S_{\theta_2} + d_1 \end{aligned}$$

جدول ۱- پارامترهای دینامیت هارتنبرگ برای پیکربندی‌های انتخاب‌شده بازوی روبات

Table 1- Denavit-Hartenberg Parameters for robot configurations

Type 1					
Link (i)	Link length a (m)	Link offset D(m)	Twist angle α (deg)	Joint angle θ (deg)	Range
1	0	0.5	90	θ_1	(-90)-90
2	2	0	0	θ_2	0-90
3	1	0	0	θ_3	0-180
4	0.5	0	0	θ_4	0-180
Type 2					
Link (i)	Link length a (m)	Link offset D(m)	Twist angle α (deg)	Joint angle θ (deg)	Range
1	0	0.5	90	θ_1	(-90)-90
2	1	0	0	θ_2	0-90
3	2	0	0	θ_3	0-180
4	0.5	0	0	θ_4	0-180
Type 3					
Link (i)	Link length a (m)	Link offset D(m)	Twist angle α (deg)	Joint angle θ (deg)	Range
1	0	1	90	θ_1	(-90)-90
2	1	0	0	θ_2	0-90
3	1	0	0	θ_3	0-180
4	0.5	0	0	θ_4	0-180

جدول ۲- مختصات نقاط اصلی مسیر و مقادیر متغیرهای مفصلی آن‌ها در هر دو آزمون برای پیکربندی‌های انتخاب‌شده بازوی روبات

Table 2- Main Point Poses of Path and Joint Variables for robot configurations

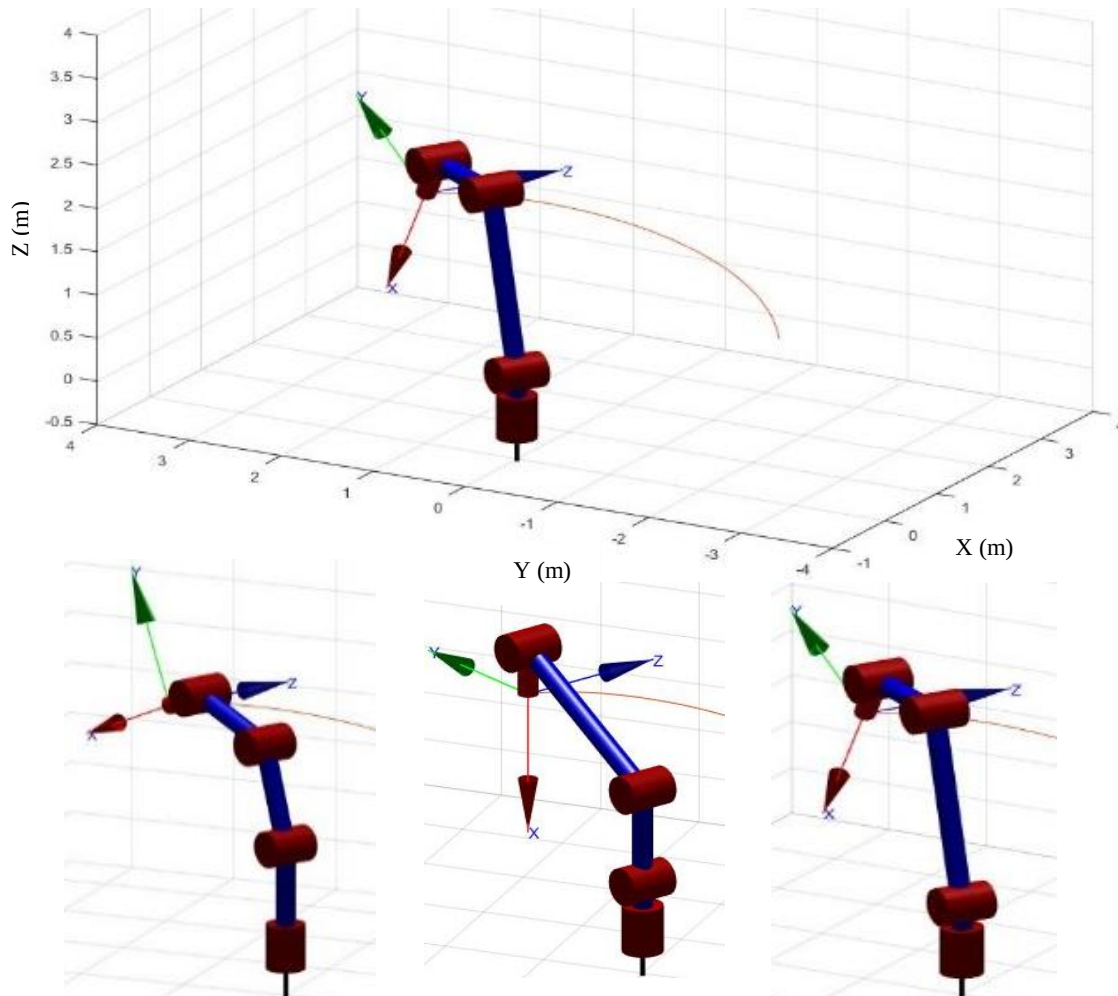
مختصات Coordinates(m)	نقطه میانی Middle point	نقطه مقصد Target Point	نقطه مبدا Start Point
	[0.866 1.5 2]	[2.031 0.021 0.98]	[1.25 -2.165 0.866]
متغیرهای مفصلی Joint Variables	آزمون دوم Test 2	آزمون اول و آزمون دوم Test 1 / 2	
پیکربندی نوع اول Config.type 1	[0.026 0.83 -1.39 -1.34]	[1.04 1.326 -1.3 -1.09]	[-1.05 0.67 $-\pi/3$ -1.21]
پیکربندی نوع دوم Config.type 2	[0 1.57 -1.58 -1.497]	[$\pi/3$ $\pi/2$ $-\pi/3$ $-2\pi/3$]	[$-\pi/3$ $\pi/3$ $-\pi/3$ $-\pi/2$]
پیکربندی نوع سوم Config.type 3	[0.01 0.738 -1.097 0.397]	[$\pi/3$ 1.25 -0.97 -0.712]	[-1.05 0.06 -0.188 0]

سینماتیک سرعت و ژاکوبین بازو

روبات از نقطه تعریف‌شده $P_1(X_1, Y_1, Z_1)$ به نقطه $P_2(X_2, Y_2, Z_2)$ حرکت می‌نماید. میزان تغییرات هر یک از مولفه‌های مختصاتی در واحد زمان، میزان سرعت مجری نهایی را در راستای مختصاتی مزبور مشخص می‌نماید. ماتریس ژاکوبین در واقع ماتریس مولفه‌های سرعت مجری نهایی را به ماتریس سرعت متغیرهای مفصلی مرتبط می‌سازد. درواقع یک نگاشت از سرعت‌های فضای مفصلی به سرعت‌های فضای کاری (فضای کارترین) است. روابط (۵)

در این آزمون یک نقطه بینابینی در نزدیکی توده موانع پیش‌بینی شد که سرعت و شتاب مجری نهایی در آن صفر نبوده و معادله مسیر بر همین اساس محاسبه گردید. مسیر حرکت بازوی روبات براساس پیکربندی نوع اول در این آزمون در شکل ۵ به‌عنوان نمونه نشان داده شده است. جدول ۲ مقادیر متغیرهای مفصلی پیکربندی‌ها را در دو آزمون نشان می‌دهد.

- و ۶). در این مسئله $n=4$ است و سرعت خطی و زاویه‌ای مجری
 نهایی برای این اساس تعیین می‌شود (Spong, Hutchinson, & Vidyasagar, 2004).
 (۵) $\dot{X}_{6 \times 1} = J_{6 \times n} \cdot \dot{q}_{n \times 1}$
 (۶) $X_{6 \times 1} = J_{6 \times 4} \cdot q_{4 \times 1}$



شکل ۴- مدل‌سازی بازوی روبات در دو نقطه مبدا و مقصد از فضای کاری در آزمون اول، پیکربندی نوع ۱ (راست)، پیکربندی نوع ۲ (وسط) و پیکربندی نوع ۳ (چپ)

Fig.4. Manipulator simulation for two positions of workspace, type1 (right), type2 (middle), type3 (left)

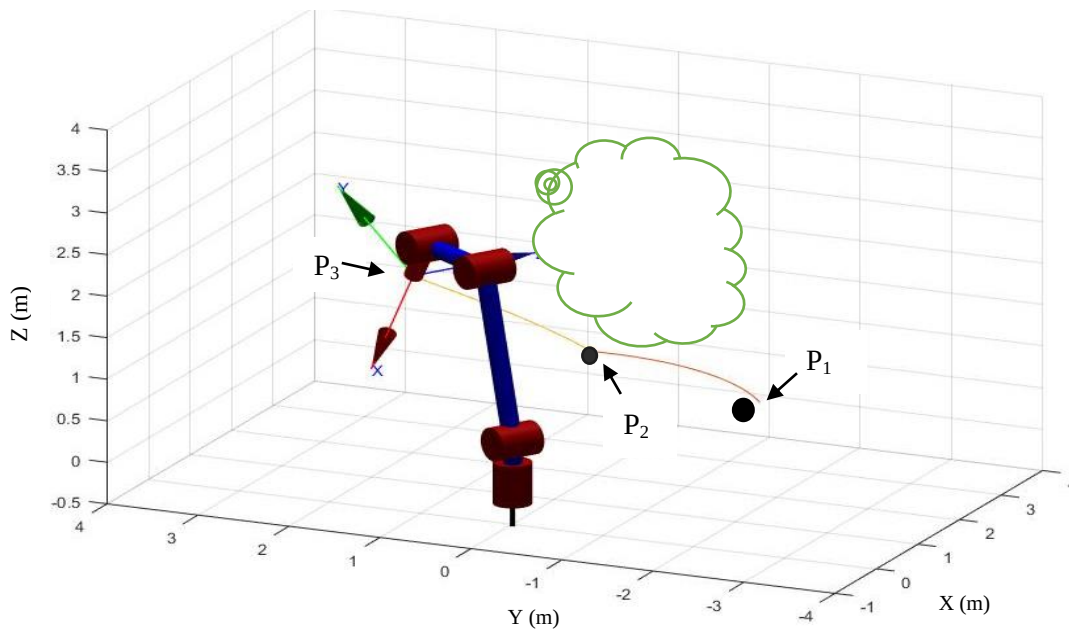
$$J = [J_1 \ J_2 \ J_3 \ J_4]_{6 \times 4} \quad (7)$$

$$J_1 = \begin{bmatrix} Z_0 \times (O_4 - O_0) \\ Z_0 \end{bmatrix} J_2 = \begin{bmatrix} Z_1 \times (O_4 - O_1) \\ Z_1 \end{bmatrix} J_3 = \begin{bmatrix} Z_2 \times (O_4 - O_2) \\ Z_2 \end{bmatrix} J_4 = \begin{bmatrix} Z_3 \times (O_4 - O_3) \\ Z_3 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$O_0 = [0 \ 0 \ 0] \quad (9)$$

$$O_1 = [0 \ 0 \ d_1] \quad (10)$$

$$O_2 = [a_2 \times \cos(\theta_2) \times \cos(\theta_1) \quad a_2 \times \cos(\theta_2) \times \sin(\theta_1) \quad a_2 \times \sin(\theta_1) + d_1] \quad (11)$$



شکل ۵- مدل‌سازی پیکربندی نوع اول بازو در مسیر عبور از مانع در آزمون دوم (متلب)

Fig.5. Manipulator type 1 simulation for a trajectory with the obstacle in test 2 (Matlab)

2004). صحت محاسبه ماتریس ژاکوبین با مقایسه خروجی محاسبات دستی و سرعت مجری نهایی مدل شبیه‌سازی شده در متلب، قابل تایید است. نمودارهای سرعت حرکت خطی مجری نهایی هر سه پیکربندی برای طی این مسیر در زمان ۴ ثانیه طبق آزمون دوم در شکل ۶ آمده است. نمودار سرعت در آزمون اول صرفاً دارای یک نقطه حداکثری برای سه نوع بازو خواهد بود و مشابه بخش اول نمودار شکل ۶ می‌باشد.

ماتریس ژاکوبین به ازای هریک از متغیرهای مفصلی به صورت دستی و مدل‌سازی در نرم‌افزار متلب محاسبه شده است. در رباتیک اگر بتوان ماتریس ژاکوبین را در موقعیت‌های مختلف به صورت خوش‌رفتار (کنترل‌پذیر) طراحی کرد، روبات مورد نظر از نظر انتقال خطا از فضای مفصلی به فضای کارترین در شرایط خوبی قرار خواهد گرفت. ماتریس ژاکوبین براساس روابط (۷) تا (۱۶) در قالب محاسبات دستی به دست آمد. در این روابط محور O مربوط به اولین سه عضو چهارمین ستون و محور Z اولین سه عضو سومین ستون مربوط به ماتریس تبدیل دستگاه مختصات مفصل مورد نظر است (Spong,

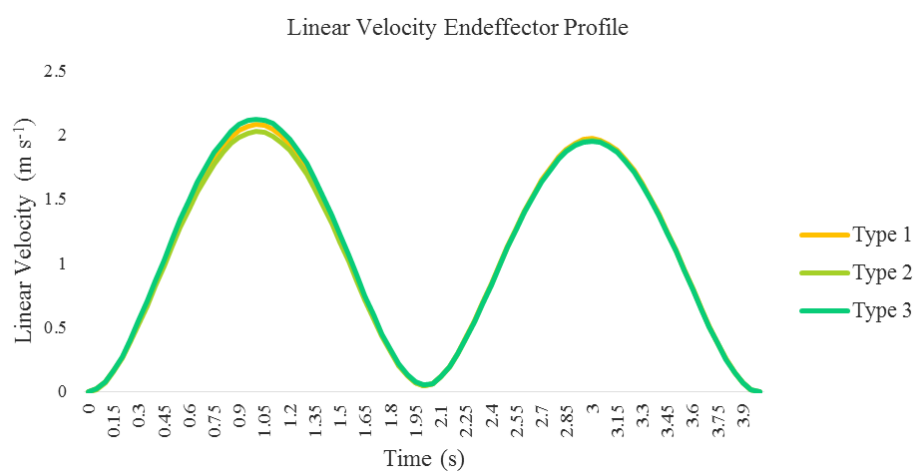
$$O_3 = \begin{bmatrix} a_3 \cos(\theta_1) \cos(\theta_2) \cos(\theta_3) - a_3 \cos(\theta_1) \sin(\theta_2) \sin(\theta_3) + a_2 \cos(\theta_2) \cos(\theta_1) \\ a_3 \cos(\theta_2) \sin(\theta_1) \cos(\theta_3) - a_3 \sin(\theta_3) \sin(\theta_1) \sin(\theta_2) + a_2 \cos(\theta_2) \sin(\theta_1) \\ a_3 \sin(\theta_2) \cos(\theta_3) + a_3 \sin(\theta_3) \cos(\theta_2) + a_2 \sin(\theta_2) + d_1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$O_4 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1)(a_4 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + a_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + a_2 \cos(\theta_2)) \\ \sin(\theta_1)(a_4 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + a_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + a_2 \cos(\theta_2)) \\ a_4 \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + a_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) + a_2 \sin(\theta_2) + d_1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

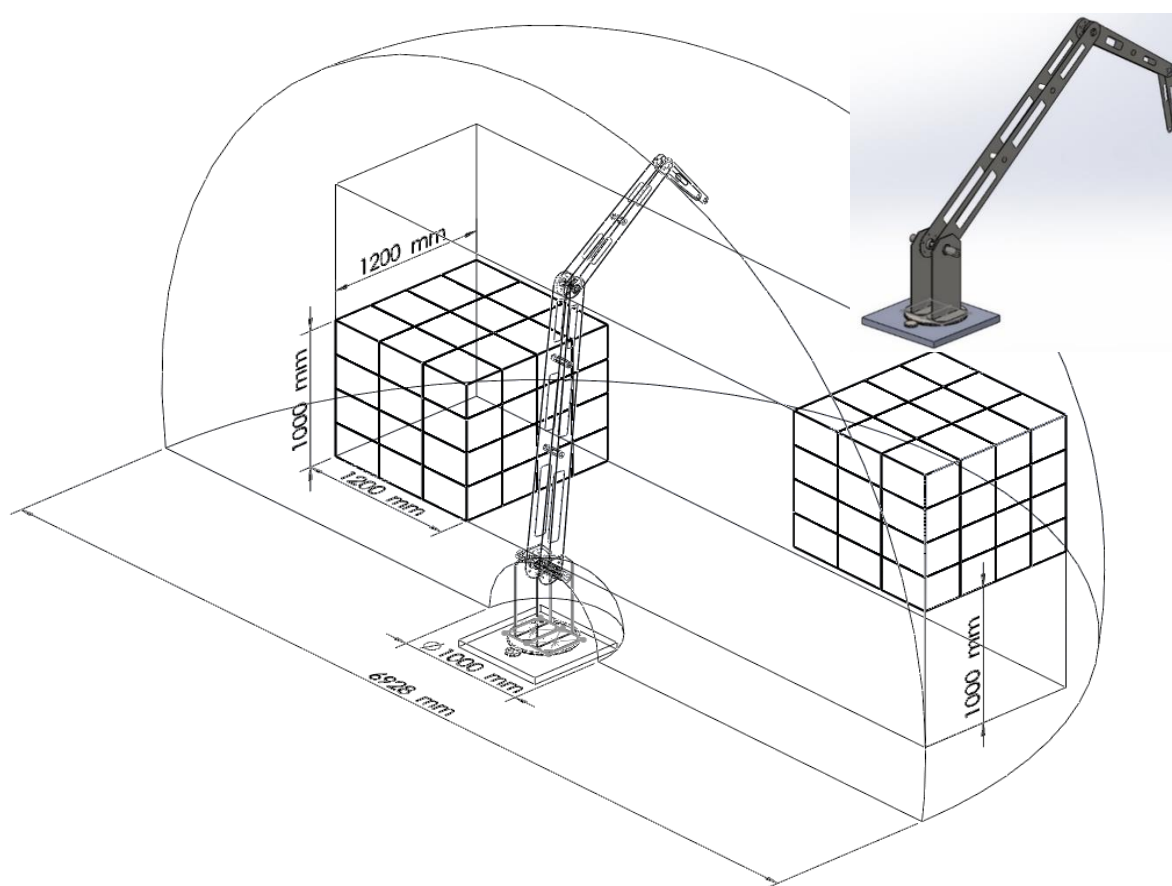
$$Z_0 = [0 \quad 0 \quad 0] \quad (14)$$

$$Z_1 = [\sin(\theta_1) \quad -\cos(\theta_1) \quad 0] \quad (15)$$

$$Z_3 = Z_2 = Z_1 \quad (16)$$



شکل ۶- نمودار سرعت خطی مجری نهایی نقاط مختلف مسیر در آزمون ۲ برای هر سه نوع پیکربندی روبات
Fig.6. Linear velocity Endeffector in path points-Test 2 for 3 Types profile (Matlab)



شکل ۷- فضای کاری شبیه‌سازی شده برای بازوی روبات
Fig.7. Simulated workspace for manipulator

تحلیل فضای کاری روبات^۱

بررسی شاخص فضای کاری روبات

فضای کاری براساس پیکربندی انتخاب شده برای روبات در قالب شکل ۷ با ۲ ویژگی شبیه‌سازی شده است. اول، دارای مدل هندسی قاعده‌مند مانند کره، مکعب، منشور و غیره باشد. دوم، دارای دامنه حرکتی کامل برای مجری نهایی با حداقل حجم باشد (Gen, et al., 2014).

در جدول ۱ دامنه تغییرات متغیرهای مفصلی به گونه‌ای تعریف شده که فضای کاری روبات مورد نظر کمی بیشتر از ۱/۴ حجم کره پیش‌بینی شود. روبات باید بتواند در راستاهای مختلف یک مقدار مطلوب از پیش تعیین شده را پیمایش نماید. دستیابی به حداکثر فضای کاری با ثابت ماندن ابعاد روبات دارای اهمیت است. در این رابطه محققین پیشنهاداتی ارائه نموده‌اند.

$$V_N = \int_V dV / \frac{4}{3} \pi L^3$$

شاخص فضای کاری نرمالایز شده که در آن حجم فضای کار واقعی یک بازو به حجم عملیاتی ایده‌آل (کره) از رابطه (۱۷) که یک انتگرال حجمی است، نرمالایز می‌شود. بدیهی است این شاخص هر اندازه به عدد یک نزدیک‌تر باشد شرایط بهتری برای کار روبات فراهم خواهد بود (Sakai, Iida, & Osuka, 2008).

این بازو با دو حجم کره مواجه بود. یک کره به شعاع مجموعه طول رابط‌های روبات که برای دو نوع پیکربندی اول برابر ۴ متر است (Vt) و یک کره به شعاع ۳/۵ متر که برابر مجموع طول رابط‌ها با کسر رابط اول است (Va) که در کره اول محاط شده و صرفاً در یک نقطه با کره اول مشترک است و در واقع فضای در دسترس^۲ بازوی روبات یا حجم فضای کار واقعی بازوی روبات است. البته لازم به ذکر است ۱/۴ هر دو کره در فضای کار واقعی این پروژه مطرح خواهد بود. این مقدار برای پیکربندی نوع ۱ و ۲ یکسان بوده و طبق روابط (۱۸)، (۱۹) و (۲۰) محاسبه گردید و برای نوع ۳ متفاوت و طبق روابط (۲۱)، (۲۲) و (۲۳) محاسبه گردیده است.

$$Va = \frac{4\pi}{3} L^3 = \frac{4\pi}{3} (1 + 2 + 0.5)^3 \quad (18)$$

$$Vt = \frac{4\pi}{3} L^3 = \frac{4\pi}{3} (0.5 + 1 + 2 + 0.5)^3 \quad (19)$$

$$Vn = \frac{Va}{Vt} = 0.67 \quad (20)$$

$$Va = \frac{4\pi}{3} L^3 = \frac{4\pi}{3} (1 + 1 + 0.5)^3 \quad (21)$$

$$Vt = \frac{4\pi}{3} L^3 = \frac{4\pi}{3} (1 + 1 + 1 + 0.5)^3 \quad (22)$$

$$Vn = \frac{Va}{Vt} = 0.36 \quad (23)$$

$$Q_L = \frac{\sum l_i}{\sqrt[3]{V}} \quad (24)$$

$$Q_L = \frac{4}{\sqrt[3]{\frac{4\pi}{3} (3.5^3)}} = 0.7 \quad (25)$$

$$Q_L = \frac{3.5}{\sqrt[3]{\frac{4\pi}{3} (2.5^3)}} = 0.868 \quad (26)$$

شاخص طولی سازه‌ای از نسبت مجموعه ابعاد رابط‌های روبات به ریشه سوم حجم فضای کاری طبق رابطه (۲۴) به‌دست می‌آید. در آن حجم فضای کاری پیمایش شده و l طول رابط روبات است. در نتیجه طرحی مناسب است که در آن بازو دارای مجموع طولی کوچک و در عین حال دارای حجم فضای کاری بزرگ باشد و هر اندازه این نسبت کمتر باشد این شاخص در وضعیت بهتری است. این شاخص برای بازوهای با پیکربندی متداول بند بند برابر ۰/۶۲، دکارتی برابر ۳ و اسکارا برابر ۱/۲ می‌باشد (Craig, 2005) برای پیکربندی نوع ۳ این مقدار طبق رابطه (۲۶) و برای برای پیکربندی نوع ۱ و ۲ طبق رابطه (۲۵) این شاخص به‌دست آمد.

بررسی شاخص چالاکی بازو

با توجه به این که بازوی مکانیکی ماهر در نقاط تکین یک یا چند درجه آزادی خود را از دست می‌دهد و عملکرد بازو تحت تاثیر این موضوع خواهد بود، لذا برای بررسی کمی این مسئله از معیاری که شاخص چالاکی بازو نامیده می‌شوند در هنگام طراحی استفاده می‌کنند. این معیار مهارت و چالاکی از رابطه (۲۷) به‌دست می‌آید (Yoshikawa, 1985).

$$w = \sqrt{\det(J(q) \cdot J^T(q))} \quad (27)$$

این شاخص میزان نزدیکی نقاط تکین به موقعیت فعلی بازو را نشان می‌دهد و در مقادیر بالا بیان‌گر آن است که بازو توانایی حرکات مساوی در تمام جهات را دارد و در مقادیر کم نزدیک شدن بازو به نقاط تکین را اعلام می‌کند. یک بازو مکانیکی خوب دارای نواحی بزرگی از فضای کاری با مقادیر بزرگ w خواهد بود. این شاخص براساس تحلیل سرعت بوده و وابستگی به پارامترهای سینماتیکی بازو مانند ژاکوبین دارد.

نتایج و بحث

مسئله جابه‌جایی بسته‌های علوفه در مزرعه به‌صورت زیر تشریح

- 1- Analysis of Manipulator Workspace
- 2- Reachable workspace

شاخص چالاکی بازوی مکانیکی

نمودار شکل‌های ۸ و ۹ حرکت بازوی مکانیکی در قالب هر سه پیکربندی را در هر یک از دو آزمون نشان می‌دهد. نقطه مبدا برای پیکربندی نوع ۳، به دلیل این که طول بازوی روبات در این حالت کمتر از دو نوع دیگر است به نقطه مرز فضای کاری نزدیک‌تر بوده و لذا شاخص مهارت و چالاکی کمتر است. در طول مسیر حرکت بین دو نقطه مبدا و مقصد، سینماتیک پیکربندی نوع اول شاخص چالاکی بهتری نسبت به دو نوع دیگر دارا است و در نتیجه مجری نهایی توانایی بهتری در انجام عملیات خواهد داشت. در آزمون دوم به دلیل وجود مانع و استفاده از نقطه بینابینی برای تصحیح مسیر حرکت بازو، این شاخص در ثانیه دوم در پیکربندی نوع ۱ و ۲ افت معنی‌داری می‌کند. بدیهی است برنامه‌ریزی مسیر باید به گونه‌ای تنظیم شود که بازوی روبات در فاصله مناسبی از مرکز فضای کاری، عملیات جابه‌جایی را انجام دهد تا شاخص چالاکی کاهش چشمگیر نداشته باشد. این موضوع در تحقیقی که در سال ۲۰۰۶ برای یک بازوی روبات برداشت مرکبات (Sivaraman & Bruks, 2006) و نیز در مقاله (Kucuk & Bingul, 2006) قابل مشاهده است.

براساس نمودارهای فوق، پیکربندی نوع اول نسبت به دو نوع دیگر مناسب‌تر خواهد بود و این موضوع طبق آنچه یوشیگاوا برای سه مفصل اول روبات پیوما^۱ پیشنهاد داده است، یکی از بهترین موقعیت‌ها است. زیرا که سه مفصل اول این روبات مشابه روبات پوما است و نسبت بین رابط ۳ به رابط ۲ بازوی روبات در این پروژه ۰/۵ است و میزان تغییر زاویه مفصل هم کمتر از ۹۰ درجه است و براساس رابطه (۲۸) این موضوع، شاخص W را در حداکثر مقدار نگاه می‌دارد (Yoshikawa, 1985).

نتیجه‌گیری

یکی از نکات اصلی در به‌کارگیری روبات‌ها در کشاورزی طراحی سینماتیکی مناسب مفصل‌ها و رابط‌ها برای انجام عملیات کاری است. براساس نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌سازی فضای کاری این بازوهای مکانیکی و مقایسه آن با روش‌های محاسباتی می‌توان نتیجه گرفت، به‌کارگیری این نمونه روبات‌ها در عملیات جابه‌جایی محصولات در زمین به‌عنوان یک کمک کاربر (راننده) کمتر از یک چهارم زمان عملیات عادی را خواهد برد. علاوه بر این که از نظر میزان مصرف انرژی و هزینه در بازه زمانی مشخص دارای توجیه اقتصادی است. پیکربندی نوع ۱ براساس بررسی‌های انجام شده از نظر سینماتیکی مسیر حرکت را در هر دو آزمون با شاخص چالاکی بالاتری طی نموده است و شاخص فضای کاری آن نیز براساس هر

می‌گردد تا انجام عملیات به‌وسیله بازوی مدل شده، قابل مقایسه باشد. اگر کشاورز قرار باشد ۴۸ بسته علوفه به وزن حدودی ۱۰ کیلوگرم را به‌صورت دستی (کارگر انسانی) در فضای کاری مدل‌شده در شکل ۱۰ جابه‌جا نماید، زمان جابه‌جایی هر بسته در حالت رفت و برگشت در مسیر بدون مانع به‌صورت متوسط ۳۰ ثانیه خواهد بود که برای کل بسته‌ها ۲۴ دقیقه خواهد شد. با توجه به متوسط مسافت ۴ متر، سرعت حرکت در حدود ۰/۲۷ متربرثانیه خواهد شد و این درحالی است که برآیند سرعت خطی مجری نهایی بازوی روبات در آزمون اول ۱ متر بر ثانیه می‌باشد که ۳/۷ برابر حالت کارگری است و جابه‌جایی کل بسته‌ها در حدود ۶/۵ دقیقه انجام خواهد شد. با ارتقای موتورهای می‌توان این سرعت را افزایش داد.

ارزیابی نمودارهای سرعت مجری نهایی بازوی روبات

بررسی نمودار سرعت مجری نهایی در هر دو آزمون نشان می‌دهد تفاوت خاصی در اثر تغییر پیکربندی‌ها روی سرعت و شتاب مجری نهایی بازو نخواهیم داشت و نکته حائز اهمیت در آزمون دوم وجود نقطه بینابینی در کنار مانع موجود در مسیر است که سرعت بازو در آن به حداقل ممکن می‌رسد اما همان‌طور که قبلاً اشاره شد صفر نمی‌شود (شکل ۶).

مقایسه شاخص‌های ارزیابی فضای کاری روبات و چالاکی بازو

در این بخش نتایج به‌دست آمده از محاسبه شاخص‌ها، توجیه اولیه انتخاب ابعاد بازو را نشان داد. برای مقایسه بهتر این شاخص‌ها برای سه پیکربندی محاسبه و مقایسه شده است.

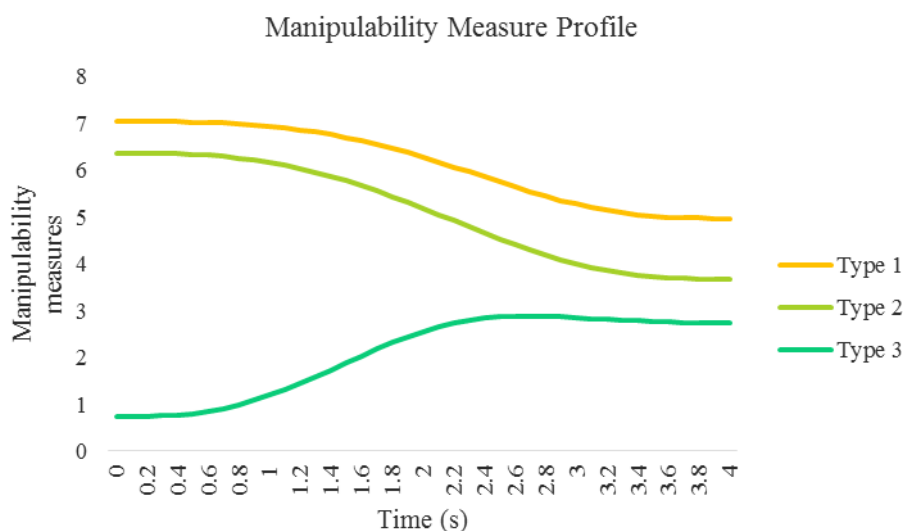
شاخص ارزیابی فضای کاری

در روش اول اگر بتوان طول رابط اول یا به عبارتی فاصله بین دو مفصل اول و دوم را که در دو صفحه متعامد باعث حرکت بازو می‌شوند را کم نمود، حجم پیمایش‌شده واقعی به حجم کره اصلی نزدیک‌تر شده و شاخص به عدد ۱ نزدیک‌تر می‌شود و این موضوع در شاخص پیکربندی نوع ۱ و ۲ دیده می‌شود. این موضوع عامل کاهش شاخص طولی سازه‌ای هم خواهد شد و در مجموع باعث بهبود شاخص فضای کاری روبات خواهد بود. بررسی شاخص طولی سازه‌ای در یک تحقیق بین ۱۶ گروه متنوع پیکربندی انجام شده و دامنه‌ای بین ۰/۸۲ تا ۳ برای مقادیر این شاخص حاصل شده است. بدیهی است مقدار ۰/۷ این شاخص که در این پروژه برای دو نوع پیکربندی ۱ و ۲ به‌دست‌آمده می‌تواند مناسب باشد (Kucuk & Bingul, 2006).

شاخص‌های چالاکی، عامل مهمی در طراحی، ساخت و تجاری‌سازی این بازوها محسوب می‌شود.

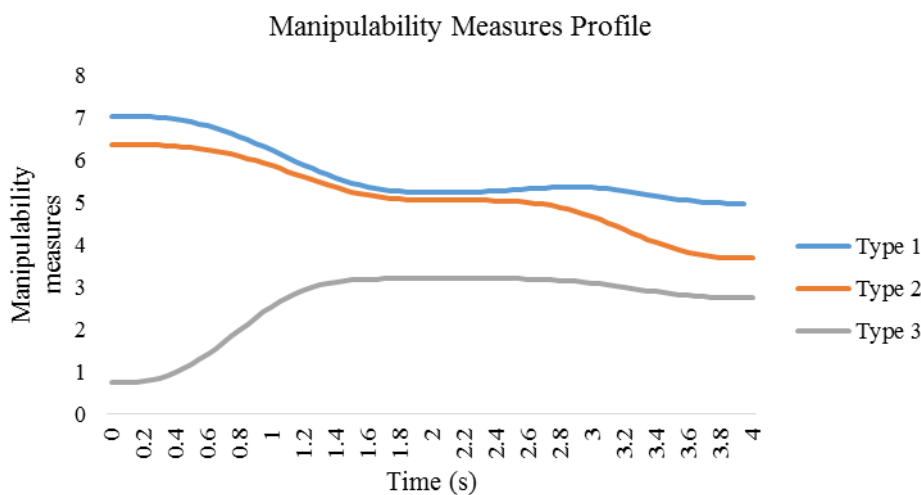
دو معیار محاسبه شده مناسب‌تر بوده و انتخاب ما در این پروژه خواهد بود. انتخاب مناسب پیکربندی بازوی‌های مکانیکی ماهر در کشاورزی براساس حداقل مصرف زمان و هزینه و بهینه‌سازی

$$l_3 = \gamma \cdot l_2, \gamma = 0.5, 1, 2 \quad (0^\circ \leq \theta_2 \leq 90^\circ) \quad (28)$$



شکل ۸- تغییرات شاخص چالاکی بازو در نقاط مختلف مسیر در آزمون ۱ برای هر سه نوع پیکربندی روبات

Fig.8. Manipulability measure in path points-Test 2 for 3 Types



شکل ۹- تغییرات شاخص چالاکی بازو در نقاط مختلف مسیر در آزمون ۲ برای هر سه نوع پیکربندی روبات

Fig.9. Manipulability measure in path points-Test 2 for 3 Types

References

1. Baur, J. & Pfaff, J. (2012). *Design and development of a redundant modular multipurpose agricultural manipulator*. International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. IEEE/ASME, Taiwan. <https://doi.org/10.1109/AIM.2012.6265928>

2. Belforte, G. (2006). Robot Design and Testing for Greenhouse Applications. *Biosystems Engineering*, 95, 309-321. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.07.004>
3. Craig, J. (2005). Introduction to Robotics Mechanics and Control. Third Edition. Pearson Prentice Hall. USA.
4. Gan, Y., Yu, W., He, W., Wang, J., & Sun, F. (2014). The Research about Prescribed Workspace for Optimal Design of 6R Robot. *Modern Mechanical Engineering*, 4, 154-163. <https://doi.org/10.4236/mme.2014.43015>
5. Korayem, M. H., Ahmadi, R., Jaafari, N., Jamali, Y., & Kiomarsi, M. (2008). Design, Modeling, Implementation and Experimental Analysis of a 6R robot. *IJE Transactions*, 21, 71-84.
6. Kucuk, S., & Bingul, Z. (2006). Comparative study of performance indices for fundamental robot manipulators. *Robotics and Autonomous Systems*, 54, 567-573. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2006.04.002>
7. Li, Z., Liu, J., Li, P., & Li, W. (2008). *Analysis of Workspace and Kinematics for a Tomato Harvesting Robot*. Proceedings International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, Changsha, China. <https://doi.org/10.1109/ICICTA.2008.138>
8. Merlet, J. P. (2006). *Parallel Robots*. Springer Press. Netherlands.
9. Moghimi, A., Aghkhani, M. H., & Golzarian, M. R. (2015). Designing of Computer Vision Algorithm to Detect Sweet Pepper for Robotic Harvesting Under Natural Light. *Journal of Agricultural Machinery*, 5, 82-91. <https://doi.org/10.22067/jam.v5i1.23528>
10. Monta, M., Kondo, N., & Ting, K. (1998). End Effectors for Tomato Harvesting Robot. *Artificial Intelligence Review*, 12, 11-25.
11. Sakai, S., Iida, M., & Osuka, K. (2008). Design and control of a heavy material handling manipulator for agricultural robots. *Autonomous Robots*, 25, 189-204.
12. Sakai, S., Iida, M., & Umeda, M. (2002). *Heavy Material Handling Manipulator for Agricultural Robot*. International Conference on Robotic & Automation. IEEE, Washington, USA. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2002.1013496>
13. Sivaraman, B. (2006). Using Modern Robot Synthesis and Analysis Tools for the Design of Agricultural Manipulators. *Agricultural Engineering International CIGR Ejournal*, VIII, 1-16.
14. Sivaraman, B. (2007). *Robot Manipulator for Citrus Harvesting*. Annual International Meeting Minneapolis Convention Center. ASABE, Minneapolis, Minnesota.
15. Sivaraman, B., & Bruks, T. F. (2006). Geometric Performance Indices for Analysis and Synthesis of Manipulators for Robotic Harvesting. *Transaction of ASABE*, 49(5), 1589-1597. <https://doi.org/10.13031/2013.22033>
16. Spong, W., Hutchinson, S., & Vidyasagar, M. (2004). *Robot Dynamics and Control*. John Wiley Press. USA.
17. Yoshikawa, T. (1985). Manipulability of robotic mechanisms. *The International Journal of Robotics Research*, 4, 3. <https://doi.org/10.1177/027836498500400201>



Design and Construction of a High-voltage System to Kill Weeds with a Feedback Mechanism

B. Besharati¹, A. Jafari^{1*}, H. Mousazadeh¹, H. Navid²

1- Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University of Tehran, Karaj, Iran

2- Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

(*- Corresponding Author Email: jafarya@ut.ac.ir)

<https://doi.org/10.22067/jam.2021.70524.1051>

Received: 28 June 2021
Revised: 30 July 2021
Accepted: 08 August 2021
Available Online: 10 August 2021

How to cite this article:

Besharati, B., Jafari, A., Mousazadeh, H., & Navid, H. (2023). Design and Construction of a High-voltage System to Kill Weeds with a Feedback Mechanism. *Journal of Agricultural Machinery*, 13(2), 117-133. (in Persian with English abstract).
<https://doi.org/10.22067/jam.2021.70524.1051>

Introduction

Various methods have been performed to control weeds in the world and the use of herbicides is one of them, but public concerns about human health have changed interest in alternative methods. Thermal methods based on flame-weeder, hot air, steam, and hot water have the potential to control weeds, but due to the high cost are not economical. Electromagnetic waves transfer energy into weeds and finally destroy them. The effect of radiation on plant mutation, high consumption of energy, and human health are problems for this approach. Unlike other methods, electrical energy is an ideal and non-chemical method for weeds. This method applies high voltage to weeds, their roots, and soil so that electric currents pass through them, and the vaporization of the liquid content of weeds kills the weeds. To increase the severity of damage to weeds, the development of a feedback mechanism is required. The ultrasonic sensor measuring physical parameters like plant height is a simple method. Some complex sensing systems include optical sensors such as infrared, and machine vision that require high-speed processors and expensive equipment. In this project, as a simple method, the monitoring of the electrical current passing through weeds was used for developing the feedback mechanism and increasing electric damage to weeds.

Materials and Methods

In this study, the system consisted of a high-voltage device that generated a 15 kV AC voltage to kill weeds, as well as a feedback mechanism that included a sensor to measure the electric current on the input of the weed killer and identify the presence of weeds and their annihilation. All parts were installed on a robotic platform, and an application on a laptop was connected to it via an access point for navigation and data reception. The system was tested in a greenhouse lab with various weeds. Initially, a test was performed to investigate the effect of high voltage on the weeds and establish relationships between the electric currents passing through weeds and their presence (before and after annihilation). During the test, the system was guided along a path and applied high voltage to kill the weeds. The feedback mechanism was then calibrated based on the extracted data on electric current relations. This allowed the system to detect weeds and their annihilation, enabling it to move to the next target once a weed had been eliminated. After calibration, a comparative test was conducted to evaluate the weed-killing efficiency of the two methods (with and without the feedback mechanism), and the results were analyzed using a t-test with $p \leq 0.01$.

Results and Discussion

The observations indicated that the input electric current on the weed killer was dependent on the electric current passing through weeds. When the high-voltage electrode touched a weed, the electric current passed through it increased, and simultaneously, the high electrical energy destroyed the weed. After the removal of the weed, the electric current rapidly decreased. The average energy consumption per weed plant was estimated to

be 250 joules, which can be compared with other methods. The final test comparing the use and non-use of the feedback mechanism revealed significant differences ($P < 0.01$) between the results obtained with and without the mechanism, demonstrating that the feedback mechanism increased the efficiency of weed annihilation. The sensing system used in the developed feedback mechanism is a simple method that is affected by the electrical resistivity of weeds. As such, it did not mistakenly detect other objects as weeds, unlike an ultrasonic mechanism. Based on these results, monitoring the electrical current passing through weeds proved to be a suitable method for developing a feedback mechanism for the weed killer to identify the presence of weeds and their annihilation.

Conclusion

The use of high voltage as a non-chemical and alternative method for weed control has shown promising results. The study revealed that measuring the electric current applied to the weed killer was an effective and straightforward approach to developing a feedback mechanism. This mechanism aids in identifying the presence of weeds and ensuring their elimination by intensifying the damage inflicted on them through the application of high electrical energy. To further enhance the efficiency and speed of weed control, future research should consider integrating an automatic guidance mechanism with the weed killer.

Keywords: Annihilator, Electric current, High-voltage, Identification, Weed

مقاله پژوهشی

جلد ۱۳، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۲، ص ۱۱۷-۱۳۳

طراحی و ساخت سامانه ولتاژ بالا برای نابودی علف‌های هرز با سازوکار بازخوردی

بهرام بشارتی^۱، علی جعفری^{۱*}، حسین موسی‌زاده^۱، حسین نوید^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۱۷

چکیده

در این پژوهش، سامانه‌ای شامل یک افزایشنده ۱۵ کیلوولتی برای از بین بردن علف‌های هرز و یک سازوکار بازخوردی برای تشخیص علف‌هرز و نابودی آن با استفاده از پایش جریان الکتریکی مصرفی نابودگر علف‌هرز در گروه ماشین‌های کشاورزی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران (سال ۱۳۹۹) توسعه داده شد. اجزای این سامانه بر روی یک سکوی رباتیک خودگردان نصب شد که اطلاعات را بین نرم‌افزار رایانه‌ای و سامانه انتقال می‌داد. طبق شواهد هنگامی که الکتروود ولتاژ بالا علف‌های هرز را لمس می‌کرد، جریان افزایش یافته و پس از نابودی علف‌های هرز، جریان کم می‌شد. متوسط انرژی مصرفی برای یک علف هرز ۲۵۰ ژول تخمین زده شد. بر مبنای مقدار جریان مصرفی، سازوکار بازخوردی برای تشخیص و دریافت بازخورد از نابودی علف‌های هرز واسنجی شد. آزمایش‌های نهایی برای مقایسه کارایی کنترل دو حالت کاری استفاده و عدم استفاده از سازوکار بازخوردی انجام شد و مشخص شد که استفاده از این سازوکار به شکل معنی‌داری کارایی نابودگر علف هرز را افزایش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: تشخیص، جریان الکتریکی، علف هرز، نابودگر، ولتاژ بالا

مقدمه

مواردی علف‌های هرز به دلیل داشتن توانایی بقای زیاد با روش‌های معمولی مبارزه نابود نمی‌شوند (Slaughter, Giles, & Downey, 2008). حذف و کنترل علف‌های هرز نیازمند سرمایه‌گذاری در بخش تجهیزات، نیروی انسانی و علف‌کش‌ها است که افزایش هزینه تولید محصولات زراعی را در پی دارد. مبارزه یا کنترل، درجه‌ای از مدیریت علف‌های هرز می‌باشد که در آن فراوانی علف‌های هرز در حدی باشد که برای گیاه اصلی مزاحمتی ایجاد نکند و باعث افت بازده محصول و مانع عملیات کشاورزی نشود (Utstumo et al., 2018).

استفاده از ترکیبات شیمیایی یکی از روش‌های رایج برای مبارزه با علف‌های هرز است که اثرات مخربی بر خاک، تنوع زیستی، آب‌های زیرزمینی، سلامت انسان و به‌طور کلی بر زنجیره غذایی دارد و همچنین در برخی موارد باعث می‌شود که گیاهان هرز به ماده شیمیایی مقاوم شوند. نگرانی‌های عمومی در مورد استفاده از آن، علایق محققان را به روش‌های جایگزین تغییر داده است (Peltzer et al., 2009). از دیگر روش‌های مبارزه، کنترل فیزیکی علف‌های هرز با استفاده از گاوآهن‌ها، دیسک‌ها، وجین‌کن‌های دوار و سایر ادوات مکانیکی کشاورزی است. وجین فیزیکی با ابزار مکانیکی تنها علف‌های هرز را قطع یا جابه‌جا می‌کند و بنابراین امکان رشد مجدد

افزایش جمعیت و در پی آن تقاضا برای افزایش بازده زمین‌های کشاورزی و سطح زیر کشت محصول باعث شده است تا اهمیت کنترل علف‌های هرز بیش از پیش افزایش یابد. علف هرز گیاه خاص و مشخصی نیست که ذاتاً علف هرز باشد، بلکه به‌دلیل غیر مفید بودن، ضرر و زیان ناشی از آن کاملاً ناخواسته است و برخلاف انتظار کشاورز در مزرعه یا گلخانه رشد و نمو می‌کند (Paap, 2014). علف‌های هرز بر سر منابع رشد شامل آب، عناصر غذایی خاک و نور خورشید با گیاهان زراعی رقابت می‌کنند و معمولاً نسبت به گیاه اصلی رشد سریع‌تر، توقع کمتر و تعداد بذره‌های بیشتری دارند. همچنین آن‌ها ماندگاری و طول عمر زیادتری دارند و در نتیجه به‌دلیل اثرات مخرب منجر به افت بازده زمین زراعی می‌شوند. در

۱- گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
۲- گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
(Email: jafarya@ut.ac.ir)

(*) نویسنده مسئول:
<https://doi.org/10.22067/jam.2021.70524.1051>

وجود دارد. در کوتاه‌مدت، این روش‌ها می‌توانند رشد علف‌های هرز را متوقف یا کاهش دهند ولی در درازمدت آن‌ها می‌توانند جمعیت علف‌های هرز را افزایش دهند و برای محصول اصلی مشکل ایجاد کنند (Bond & Grundy, 2001). در روش کنترل زیستی، معمولاً از دشمنان طبیعی علف‌های هرز چون حشرات، قارچ‌ها، ویروس‌ها، باکتری‌ها، بی‌مهرگان و مهره‌داران برای مبارزه با آن‌ها استفاده می‌کنند و تراکم علف‌های هرز را در سطح اقتصادی نگه می‌دارند. عده‌ای موافق و عده‌ای مخالف این روش مبارزه می‌باشند. موافقان معتقدند که در این روش از مواد شیمیایی استفاده نمی‌شود و فقط یک‌بار پخش حشرات برای مبارزه با علف‌های هرز کافی است. مخالفان این روش می‌گویند که مبارزه به روش زیستی علف‌های هرز را کاملاً نابود نمی‌کند و عوامل کنترلی برای استفاده در این روش نایاب است (Morin, 2020). شعله‌افکنی نیز در برخی موارد برای محصولات ردیفی استفاده شده است که می‌تواند جایگزینی برای سموم علف‌کش در نابودی علف‌های هرز جوان باشد. در این روش سوخت مایع یا گازی زیاد استفاده می‌شود و هدررفت انرژی را به دنبال دارد و امکان نشت شعله به ردیف گیاهان اصلی وجود دارد و لذا کنترل سطح شعله حائز اهمیت است. همچنین به ریشه علف‌های هرز صدمه‌ای وارد نمی‌شود که رشد مجدد گیاه را میسر می‌سازد (Slaughter et al., 2008). روش‌های حرارتی کنترل علف‌های هرز مبتنی بر هوا، بخار و آب داغ روش‌های جایگزینی برای جلوگیری از خطرات مربوط به آتش‌سوزی شعله‌افکنی هستند و به اندازه همان روش در کنترل و مدیریت علف‌های هرز موثر می‌باشند. در مواردی که استفاده از علف‌کش مجاز نیست یا روش‌های دیگر اثرات کمتری دارند می‌توانند روش‌های جایگزینی باشد. اما به دلیل اتلاف انرژی حرارتی بالا و هزینه اولیه سرمایه‌گذاری برای ساخت مقرون به صرفه نیستند (Rask & Kristoffersen, 2007). امواج الکترومغناطیسی با انرژی بالا مانند مایکروویو، مادون قرمز و اشعه ماوراء بنفش می‌توانند دمای علف‌های هرز را افزایش دهند و آن‌ها را از بین ببرند. این تشعشعات هیچ‌گونه باقی‌مانده شیمیایی در خاک نمی‌گذارند و خطر آتش‌سوزی ندارند. گرچه این روش یک روش غیرشیمیایی برای مدیریت علف‌های هرز است اما مصرف انرژی به دلیل حرارت انتقالی به خاک زیاد است و هنوز اقتصادی نمی‌باشد. همچنین تأثیر اشعه بر جهش ژنی گیاهان و سلامت انسان از مواردی است که باعث می‌شود راهی مناسب برای مدیریت علف‌های هرز نباشد (Astatkie et al., 2007). استفاده از نور لیزر برای آسیب رساندن به علف‌های هرز یکی دیگر از روش‌های حرارتی است که دارای چگالی انرژی بالا و متمرکز است و هدررفت کمتری نسبت به سایر روش‌ها حرارتی دارد. حذف بخش زایشی گیاه توسط لیزر، باعث کاهش رشد گیاه می‌شود و در

1- Biological control

برخی موارد اثرات کشنده‌ای روی گونه‌های علف‌های هرز دارد ولی پژوهش‌ها نشان داده است که پرتودرمانی با لیزر می‌تواند رشد علف‌های هرز را به عقب بیاورد اما آن‌ها را کاملاً از بین نمی‌برد (Marx, Barcikowski, Hustedt, Haferkamp, & Rath, 2012). امروزه انرژی الکتریکی کاربردهای وسیعی را در صنایع مختلف به خود اختصاص داده است. ایده استفاده از این انرژی برای بین بردن علف‌های هرز به چندین دهه سال پیش برمی‌گردد. برخی از پژوهشگران معتقدند استفاده از آن یک راه ایده‌آل، محیط زیست‌خواه و غیرشیمیایی برای کنترل علف‌های هرز جوان است. جریان ولتاژ بالا بر ریشه تأثیر می‌گذارد و امکان رشد مجدد را محدود می‌سازد. این روش هیچ‌گونه مواد شیمیایی را به محیط زیست و زنجیره مواد غذایی منتقل نمی‌کند و باعث اختلاط مواد مضر در خاک یا ایجاد فرسایش نمی‌شود تبدیل شدن انرژی ولتاژ بالا به حرارت تنها با ایجاد مقاومت الکتریکی مانند بوت‌ه علف هرز در مسیر جریان الکتریکی ایجاد می‌شود و مانند روش شعله‌افکنی نیاز به ایجاد شعله ندارد و امکان نشت حرارت و آتش‌سوزی به آن شدت میسر نمی‌باشد. انتقال توان و کنترل ابزار نابودگر علف هرز سهولت بیشتری در مقایسه با روش‌های دیگر دارد و ابزار حجم کمتری را اشغال می‌کند (Vigneault & Benoît, 2001). در پژوهش‌های متعددی از انرژی الکتریکی برای نابودی علف‌های هرز استفاده شده است. در نخستین پژوهش، از انرژی ولتاژ بالا (سطح ولتاژی ۵ و ۱۵ کیلو ولت) برای از بین بردن علف‌های هرز استفاده شد. به‌طوری که نرخ ولتاژی بیشتر شدت و سرعت نابودی بیشتری را در علف‌های هرز ایجاد کرد. این تحقیق نشان داد که کنترل علف‌های هرز یک روش سریع و قابل رقابت با روش‌های شیمیایی است (Diprose, Benson, & Willis, 1984). در تحقیقی از یک روبات دارای یک الکتروود با ولتاژ تخلیه ۱۵ کیلوولت برای نابودی علف‌های هرز و همچنین یک سامانه ماشین بینایی برای تشخیص علف‌های هرز در محصول کاهو استفاده شد. این سامانه قادر به از بین بردن همه علف‌های هرز جوان بود، اما به علف‌های هرز بزرگ‌تر فقط نوعی آسیب به برگ‌ها وارد کرد (Blasco, Aleixos, Roger, Rabatel, & Moltó, 2002). در پژوهشی دیگر از تخلیه الکتریکی با ولتاژهای ۴۴۰۰ و ۶۸۰۰ ولت برای کنترل علف‌های هرز در محصول سویا استفاده شد که بازده محصول را افزایش داد (Brighenti & Brighenti, 2009). در پژوهشی دیگر علف‌های هرز جوان روی تخته آزمایشگاهی قرار گرفتند و جریان توسط الکترودهای مسی در بوته‌ها برقرار شد. بوته‌ها تحت ولتاژهای ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ ولتی در طی زمان‌های مختلف تحت اثر انرژی الکتریکی قرار گرفتند. نتایج مشخص کرد که با افزایش زمان اثر یا مقدار ولتاژ، تغییرات معناداری در تعداد نابودی بوته‌ها مشاهده می‌شود (Sahin & Yalınkılıç, 2017).

استفاده می‌کند تا بتواند وجود بوته علف هرز و نابودی آن را پایش کند.

مواد و روش‌ها

ساختار اصلی نابودگر علف‌های هرز با سازوکار

بازخوردی

طرح‌واره اصلی برای نابودگر ولتاژ بالا علف‌های هرز با سازوکار بازخوردی در شکل ۱ نمایش داده شده است. ساخت و آزمایش این نابودگر علف هرز در گروه ماشین‌های کشاورزی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران (سال ۱۳۹۹) انجام شده است. در این سامانه عامل اصلی نابودی علف‌های هرز ولتاژ ۱۵ کیلوولتی است که توسط الکترودها از دو سمت به بوته علف هرز اعمال می‌شود. یک سمت جریان از طریق دو عدد دیسک (الکتروود زمین) به خاک نفوذ می‌کند تا احتمال همپوشانی جریان بیشتر باشد و سمت دیگر جریان از طریق الکتروود هوایی (الکتروود ولتاژ بالا) به سمت بوته می‌رسد. با فاصله‌ای که بین بوته و الکتروود هوایی وجود دارد قوس الکتریکی ایجاد می‌شد و علف هرز نابود می‌شود. در ابتدای مجموعه از یک ماژول افزایشده (اینورتر^۲ ۱۵۰ وات، ۲۰ کیلوهرتز پالس مربعی) استفاده شد. این ماژول ۱۲ ولت جریان مستقیم را به ۲۰۰ ولت جریان متناوب تبدیل می‌کند. در مرحله بعدی برای افزایش ولتاژ، ترانس افزایشده ولتاژ بالا (سوئیچینگ^۳ ۱۲۵ وات با حداکثر جریان خروجی ۳۰ میلی‌آمپر)، ولتاژ ۲۰۰ ولت متناوب را به ولتاژ تقریباً ۱۵ کیلوولت متناوب تبدیل می‌کند. این نوع افزایشده به علت وجود بخش پیش‌افزایشی الکترونیکی از نوع سوئیچینگ مبتنی بر نیمه‌هادی، از وزن کمتری نسبت به نوع ترانس‌های سیم‌پیچی برخوردار است و بازده بالاتری هم نسبت به آن‌ها دارد.

برای ایجاد سازوکار بازخوردی و پایش جریان مصرفی مجموعه افزایشده ولتاژ بالا، از ماژول حسگر جریان الکتریسیته (ACS712) استفاده شد. این ماژول از یک تراشه و دو عدد خازن فیلتر نویزگیر تشکیل شده است که قابلیت اندازه‌گیری جریان‌های مستقیم و متناوب تا حداکثر جریان ۳۰ آمپر را دارد. به علت ساده‌تر بودن تحلیل جریان مستقیم نسبت به متناوب، ماژول در بخش ابتدایی نصب شده است. تراشه از ویژگی اثر هال^۴ برای اندازه‌گیری جریان الکتریسیته استفاده می‌کند و مقدار جریان عبوری از خود را به ولتاژ آنالوگ تبدیل می‌کند که با اتصال به بخش مبدل آنالوگ به دیجیتال میکروکنترلر، قابل خواندن و تبدیل به مقدار عددی جریان الکتریسیته می‌شود. با پایش جریان مصرفی مجموعه ولتاژ بالا، تشخیص علف هرز و نابودی یا عدم نابودی آن فراهم می‌شود.

روش استفاده از الکتریسیته به عنوان روش مورد مطالعه پژوهش به نظر می‌رسد نیازمند تجهیزات جانبی و کنترلی است که بتواند فرایند نابودی علف‌های هرز را به صورت موضعی انجام دهد تا درصد نابودی علف‌های هرز افزایش یابد و همچنین انرژی اتلاف نشود. با توجه به این که باید سامانه‌های علف‌کش، پوشش گیاهی زنده را هدف قرار دهند و باعث تبدیل توده گیاهی زنده به غیرزنده شوند، بررسی روش‌های مختلف تشخیص پوشش گیاهی می‌تواند کمکی برای پیش‌برد این پژوهش باشد. ساده‌ترین سازوکار برای تشخیص پوشش گیاهی، میله آونگی متصل به یک مقاومت متغیر است که با حرکت روی پوشش گیاهی ولتاژ متناسب با حجم آن پوشش را ایجاد می‌کند (Ehlert, Hammen, & Adamek, 2003). در پژوهش‌هایی عناصر فراصوت نیز به کار گرفته شد به نحوی که با ارسال امواج فراصوت به سمت بوته‌ها و سپس دریافت امواج بازتابی توسط حسگر فراصوت و استخراج داده‌های حاصل از آن، توصیف مشخصات فیزیکی مانند اندازه برگ‌ها و ارتفاع بوته‌ها مهیا گردید (Legg & Bradley, 2020). روش‌های دیگر استفاده از حسگرهای نوری مانند حسگر اشعه مادون قرمز و طیف‌های نزدیک به آن، لیدار^۱، ماشین بینایی و یا ترکیبی از آن‌ها می‌باشد. بوته گیاه زنده در مقایسه با اجسام غیرزنده (گیاه پژمرده، گیاه مرده و خاک) در طول امواج بازتابی تفاوت معنی‌داری دارد که به دلیل این ویژگی خاص، طیف‌سنجی اشعه مادون قرمز و اشعه‌های نزدیک به آن برای تشخیص پوشش گیاهی مورد توجه قرار گرفته است (Dworak et al., 2013). حسگر نوری لیدار با تاباندن نور لیزر، پوشش گیاهی در جهات مختلف پایش و اندازه‌گیری می‌شود. این روش مانند روش فراصوتی مشخصات فیزیکی را ارائه می‌دهد ولی چون در جهات مختلف پایش انجام می‌شود نسبت به آن برتری دارد (Yuan et al., 2018). در مواردی ماشین بینایی برای تصویرسازی از پوشش گیاهی استفاده شده است ولی به علت تراکم نرخ بالای داده‌های حسگر تصویر در عملیات‌های برخط، به سخت‌افزار و پردازش‌گر پرسرعت و پرهزینه نیازمند هستند (Birrell, Hughes, Cai, & Iida, 2020).

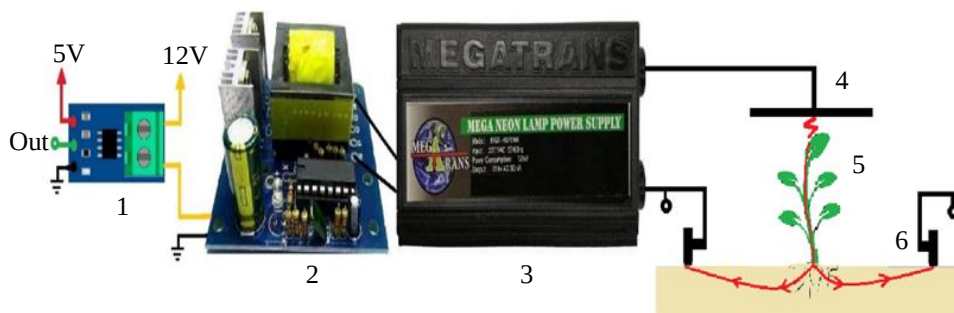
در حالت کلی روش‌های ساده‌تر بر روش‌هایی پیچیده و پرهزینه اولویت دارند. از طرفی حسگر و فرآیندی می‌تواند از کارایی کنترل علف هرز بازخورد ایجاد کند که داده‌های دریافتی از حسگر مربوطه امکان تشخیص گیاه مرده را از زنده به صورت برخط مهیا سازد و در عین حال از ساده‌ترین سازوکار پردازش و سخت‌افزار برخوردار باشد. با توجه به الزامات یادشده برای پایش عملیات نابودی علف‌های هرز توسط انرژی الکتریکی، هدف این پژوهش توسعه یک نابودگر ولتاژ بالا علف‌هرز دارای سازوکار بازخوردی است. سازوکار بازخوردی توسعه یافته از اندازه‌گیری جریان الکتریسیته مصرفی منبع ولتاژ بالا

2- Inverter

3- Switching transformer

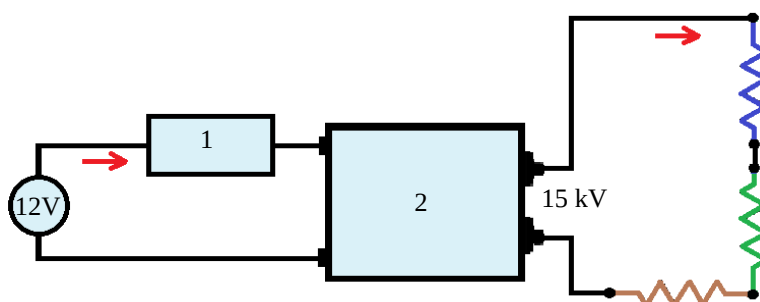
4- Hall effect

1- LIDAR (Light detection and ranging)



شکل ۱- طرح‌واره اصلی نابودگر ولتاژ بالا علف‌هرز با سازوکار بازخوردی (۱- ماژول حسگر جریان، ۲- ماژول افزایشدهنده ۲۰۰ ولتی، ۳- ترانس افزایشدهنده ۱۵ کیلوولتی، ۴- الکترود ولتاژ بالا، ۵- علف‌هرز، ۶- الکترود زمین)

Fig.1. The main scheme of the high-voltage weed killer with the feedback mechanism (1- Electric current sensor, 2- 200V booster module, 3- 15kV booster transformer, 4- High voltage electrode, 5- Weed, 6- Ground electrode)



شکل ۲- مدار الکتریکی معادل برای نابودگر علف‌هرز و حسگر جریان الکتریکی (۱- ماژول حسگر جریان، ۲- مجموعه افزایشدهنده ولتاژ بالا)

Fig.2. The equivalent circuit for the weed killer and the electric current sensor (1- Electric current sensor, 2- High voltage booster set)

جریان الکتریکی عبوری از علف‌هرز است و بنابراین رابطه (۴) تعریف می‌شود:

$$I_s = f(I_w) \quad (4)$$

طبق مدار الکتریکی شکل ۲ جریان الکتریکی عبوری از علف‌هرز به برآیند مقاومت الکتریکی علف‌هرز (R_w)، خاک (R_s) و هوای آزاد (R_a) وابسته است و رابطه (۵) که R_t در آن مقاومت الکتریکی برآیند است، بیان می‌گردد:

$$I_w = g(R_t) \quad (5)$$

زمانی که الکترود ولتاژ بالا در موقعیت ثابت روی بوته علف‌هرز است، می‌توان R_a و R_s را مقداری ثابت دانست و رابطه (۶) را تشکیل داد:

$$I_w = q(R_w) \quad (6)$$

با استفاده از رابطه (۴) و رابطه (۶)، رابطه (۷) تشکیل می‌شود:

$$I_s = h(R_w) \quad (7)$$

طبق رابطه (۷) جریان الکتریکی عبوری از حسگر به مقاومت

مدار الکتریکی معادل برای طرح‌واره اصلی سامانه نابودگر (شکل ۱)، در شکل ۲ به تصویر کشیده شده است. با توجه به ماهیت مدار الکتریکی، در حالت ایده‌آل توان ورودی (P_{in}) و توان خروجی (P_{out}) در مجموعه افزایشدهنده ولتاژ بالا برابر می‌باشد ولی در حالت واقعی اتلاف توان (P_{loss}) حرارتی و مغناطیسی وجود داشته و بازده کامل نمی‌باشد و رابطه (۱) برقرار است:

$$P_{in} = P_{out} + P_{loss} \quad (1)$$

بنابراین توان ورودی متأثر از توان خروجی و اتلافی است، با صرف‌نظر کردن از توان اتلافی رابطه (۲) بیان می‌شود:

$$P_{in} \approx P_{out} \quad (2)$$

و با اعمال ولتاژ ورودی، رابطه (۲) طبق جریان الکتریکی عبوری از حسگر (I_s) و علف‌هرز (I_w) و ولتاژ بالای اعمالی به آن، رابطه (۳) را تشکیل می‌دهد:

$$12 \times I_s \approx 15 \times 10^3 \times I_w \quad (3)$$

با توجه به رابطه (۳) جریان الکتریکی عبوری از حسگر متأثر از

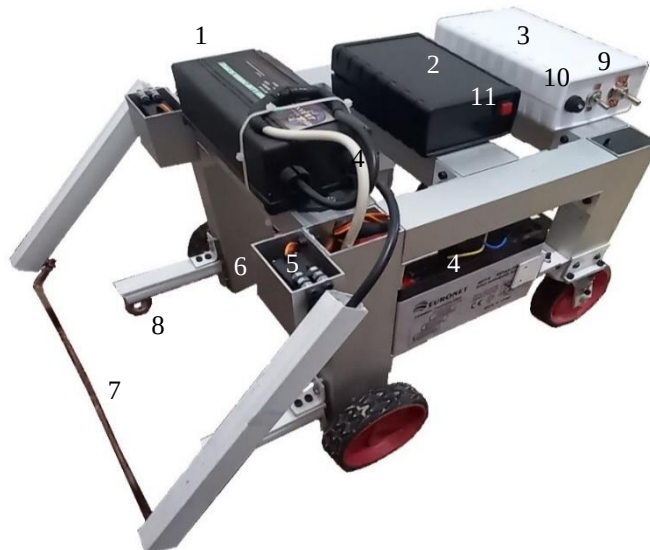
فرمان‌گیری دستگاه با معکوس شدن حرکت دورانی موتورهای دنده‌ای (موتورهای متصل به چرخ‌های جلویی) نسبت به هم انجام می‌شد. حداکثر گشتاور و سرعت بدون بار موتورها به ترتیب برابر یک نیوتن‌متر و ۹۰ دور بر دقیقه است. دو عدد سروموتور دنده فلزی (MG995) برای بالا و پایین بردن میله الکتروود ولتاژ بالا استفاده شد. حداکثر گشتاور و سرعت بدون بار سروموتورها به ترتیب برابر ۱/۳ نیوتن‌متر و ۶۰ دور بر دقیقه می‌باشد. طول کلی الکتروود ولتاژ بالا، ۳۶ سانتی‌متر و طول مؤثر آن ۲۵ سانتی‌متر است. افزایش ولتاژ بالا در جلوی دستگاه نصب گردیده و ولتاژ ۱۵ کیلوولتی را توسط کابل‌های دی‌الکتریک بالا به الکتروودهای زمین و الکتروود ولتاژ بالا می‌رساند. در زمان انجام آزمایش‌ها، الکتروود زمین با خاک و الکتروود ولتاژ بالا با علف‌های هرز در تماس بود.

مدارات الکترونیکی سامانه شامل ماژول اینترنت اشیا (Wemos D1 mini V2)، میکروکنترلر (Atmega328p) و راه‌انداز موتورهای دنده‌ای (L298N) در جعبه‌پردازش (شکل ۴-ا) به ابعاد ۱۰/۵×۷/۶×۳ سانتی‌متر نصب شد و سایر موارد مانند اینورتر، حسگر جریان الکتریکی (ACS712)، رله، ماژول‌های تغذیه و شارژر باتری در جعبه تغذیه (شکل ۴-ب) به ابعاد ۱۶×۱۰×۵ سانتی‌متر قرار گرفت.

الکتریکی علف هرز وابسته بوده و با اندازه‌گیری مقدار جریان الکتریکی، سامانه از وجود علف هرز و نابودی آن اطلاع می‌یابد و در حقیقت یک سازوکار بازخوردی را برای آن تشکیل می‌دهد.

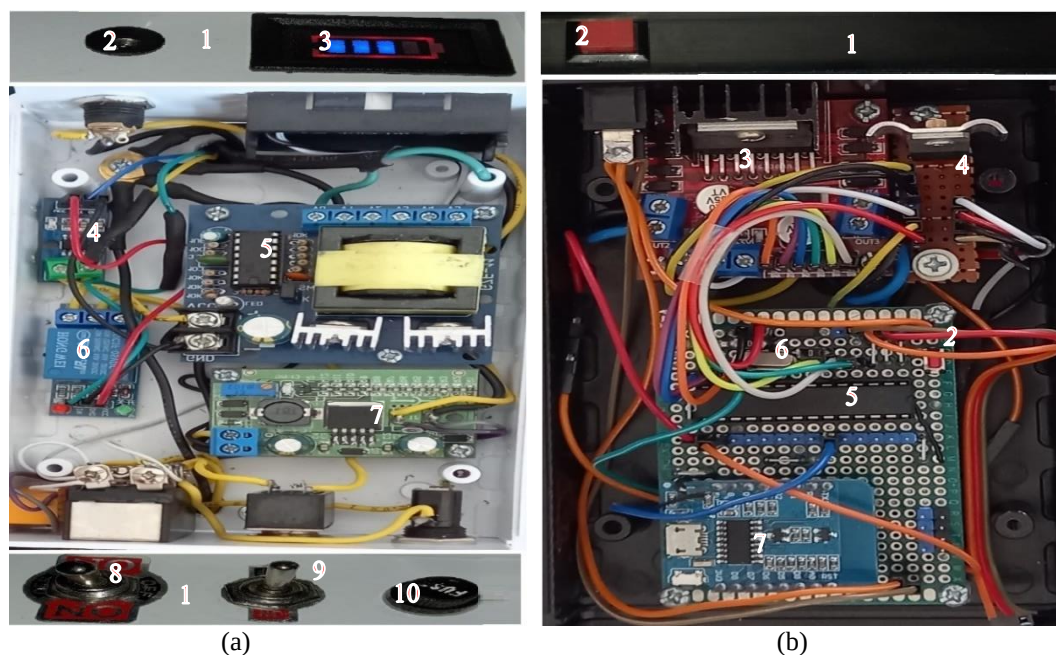
سکوی روباتیک خودگردان

برای انجام آزمایش‌های نابودی علف‌هرز با ولتاژ بالا و به‌دست آوردن داده‌هایی جهت انجام واسنجی سازوکار بازخوردی، سکوی روباتیک خودگردان شکل ۳ ساخته شد. شکل کلی سکو شبیه میز چهارپایه چرخ‌دار است و تمامی تجهیزات الکترونیکی و مکانیکی مورد نیاز بر روی آن سوار شده است. طراحی به نحوی صورت گرفته است که حداکثر فضای خالی زیری سکو مهیا شده باشد تا بتواند از بالای سر علف‌های هرز حرکت کند. برای ساخت سکو از قوطی‌های آلومینیومی به ابعاد ۳۵×۳۵ میلی‌متر و ۵۰×۳۵ میلی‌متر استفاده شد. اتصالات قوطی‌های آلومینیومی توسط پیچ‌های آلن شماره ۴ و براکت تأمین گردیده که از استحکام مناسبی برخوردار است. ارتفاع سکو ۳۰ سانتی‌متر، طول و عرض آن ۲۷ سانتی‌متر می‌باشد. سکو دارای چهار چرخ پلاستیکی با بوش فلزی به قطر ۱۰ سانتی‌متر و عرض ۲/۵ سانتی‌متر است. چرخ‌های عقبی به‌صورت آزاد دوران و فرمان‌گیری داشته ولی چرخ‌های جلویی این قابلیت را نداشته و حرکت دورانی خود را از موتور دنده‌ای ۱۲ ولتی (JGY-370) دریافت می‌کردند.



شکل ۳- سکوی روباتیک خودگردان برای نابودگر علف هرز با سازوکار بازخوردی (۱- افزایش ولتاژ بالا، ۲- جعبه پردازش، ۳- جعبه تغذیه، ۴- باتری، ۵- سروموتور، ۶- موتور دنده‌ای، ۷- الکتروود ولتاژ بالا، ۸- الکتروود زمین، ۹- کلیدهای روشن و خاموش، ۱۰- فیوز، ۱۱- دکمه راه‌اندازی مجدد)

Fig.3. The self-propelled robotic platform of the weed killer with the feedback mechanism (1- High-voltage booster, 2- Processing box, 3- Supply box, 4- Battery, 5- Servo motor, 6- Gear motor, 7- High-voltage electrode, 8- Ground electrode, 9- on/off switches, 10- Fuse 11- Restart button)



شکل ۴- (a) جعبه تغذیه (۱- نمای جانبی، ۲- جک ورودی ۱۲ ولت، ۳- نشانگر میزان شارژ باتری، ۴- ماژول حسگر جریان، ۵- ماژول افزایشنده ۱۲ ولت به ۲۲۰ ولت، ۶- ماژول رله، ۷- ماژول شارژ باتری، ۸- کلید سه‌حالت، ۹- کلید دوحالت، ۱۰- فیوز)، (b) جعبه پردازش (۱- نمای جانبی، ۲- کلید راه‌اندازی مجدد، ۳- ماژول راه‌انداز موتور، ۴- رگولاتور ۵ ولت، ۵- میکروکنترلر Atmega328p، ۶- کریستال نوسان‌ساز ۱۶ مگاهرتز، ۷- ماژول اینترنت اشیا Wemos D1 mini V2)

Fig.4. (a) Supply box (1- Side view, 2- Input jack, 3- Battery charge indicator, 4- Electric current sensor module, 5- 12 to 220V booster module, 6- Relay module, 7- Battery charging module, 8- Tri-state switch, 9- Two-state switch, 10- Fuse), (b) Processing box (1- Side view, 2- Restart button, 3- Motor driver module, 4- 5V regulator, 5- Atmega328p microcontroller, 6- 16 MHz crystal oscillator, 7- Wemos D1 mini V2 IoT module)

با بوت لودر^۱ هسته آردینو^۲ برنامه‌ریزی شد تا عملیات لازم را برای پیشبرد پژوهش انجام دهد. همچنین این تراشه با ماژول اینترنت اشیا دارای پروتکل ارتباطی سریال است. موتورهای پیشروی به ماژول راه‌انداز (L298N) متصل هستند. تراشه این ماژول از دو عدد پل قدرتی^۳ بهره می‌برد. این ماژول با مدولاسیون پهنای پالس^۴ به میکروکنترلر متصل است و با پالس دریافتی مقدار ولتاژ اعمالی به موتورها و در نهایت سرعت دورانی آن‌ها را کنترل می‌کند. جهت چرخش را هم با تغییر جهت جریان الکتریکی به موتورها تغییر می‌دهد. بنابراین کنترل سرعت پیشروی و فرمان‌گیری به صورت نرم‌افزاری انجام می‌شود. دو عدد سروموتور برای بالابر الکترود هم به شیوه مدولاسیون پهنای پالس زاویه چرخش سروموتورها را کنترل می‌کنند تا میله بتواند در ارتفاع‌های مختلف در بالای علف‌های هرز قرار گیرد.

دو عدد باتری اسیدی قابل شارژ ۶ ولت ۷ آمپر ساعت (Euronet NP7-12) به ابعاد $15 \times 9 \times 6/5$ سانتی‌متر در دو طرف سکو تعبیه شد. پایانه‌های این دو باتری به صورت سری به هم متصل هستند و ولتاژ ۱۲ ولت را تولید می‌کنند. مدارات الکترونیکی در برابر جریان کشی بیش از حد توسط فیوز محافظت می‌شوند. دو عدد کلید در جعبه تغذیه موجود است که کلید سه‌حالت برای شارژ کردن دستگاه، خاموش کردن کلی و روشن کردن آن است و کلید دوحالت برای خاموش و روشن کردن مجموعه ولتاژ بالا اختصاص داده شده است و همچنین دو عدد کلید فشاری برای راه‌اندازی مجدد میکروکنترلر و ماژول اینترنت اشیا به کار گرفته شده است.

معماری و پیکره‌بندی الکترونیکی

طرح‌واره کلی از معماری تجهیزات و مدار الکتریکی برای نابودگر علف‌هرز در شکل ۵ نشان داده شده است. پردازش و کنترل داده بر عهده میکروکنترلر Atmega328p است. سرعت پردازش داده‌ها در این تراشه توسط کریستال خارجی ۱۶ مگاهرتز تأمین می‌شود. تراشه

- 1- Bootloader
- 2- Arduino
- 3- H-Bridge
- 4- Pulse Width Modulation (PWM)

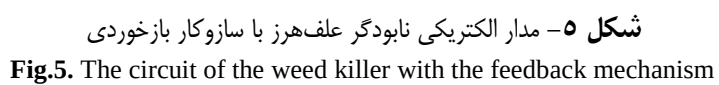
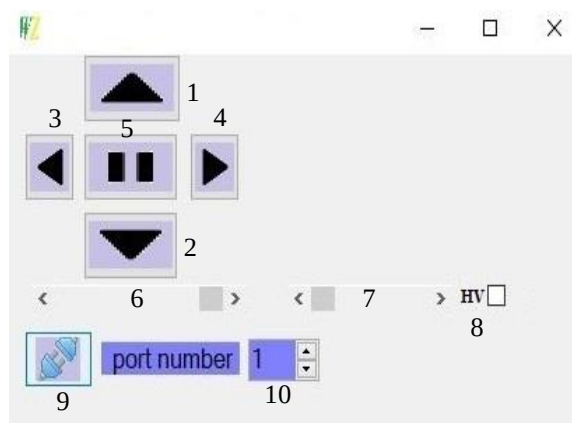


Fig.5. The circuit of the weed killer with the feedback mechanism



شکل ۶- نرم‌افزار کنترل نابودگر علف هرز با سازوکار بازخوردی (۱- پیشروی به جلو، ۲- پیشروی به عقب، ۳- چرخش به چپ، ۴- چرخش به راست، ۵- توقف پیشروی، ۶- تنظیم سرعت پیشروی، ۷- تنظیم ارتفاع الکترود، ۸- کلید ولتاژ بالا، ۹- اتصال به درگاه سریال، ۱۰- درگاه سریال)
Fig.6. The application for controlling the weed killer with the feedback mechanism (1- Move forward, 2- Move back, 3- Turn left, 4- Turn right, 5- Stop movement, 6- Movement speed, 7- Electrode height, 8- High-voltage switch, 9- Connect to port, 10- Serial port number)

بازخوردی استفاده شد. پس از آزمایش واسنجی، آزمایشی (۵ تکرار) برای ارزیابی و مقایسه عمل‌کرد نابودی دو حالت استفاده و عدم استفاده از سازوکار بازخوردی انجام شد. در حالت اول، سامانه در یک مسیر مستقیم به کمک سازوکار بازخوردی علف هرز اقدام به حذف علف‌های هرز کرد. به‌طوری که هنگام حرکت سامانه در مسیر آزمایش، با برخورد الکترود ولتاژ بالا به علف‌های هرز جریان الکتریکی افزایش می‌یافت و در این هنگام سازوکار بازخوردی با بررسی تغییرات جریان الکتریکی عبوری از بوته علف هرز، سامانه نابودگر را تا نابودی کامل علف هرز (کاهش جریان الکتریکی به مقدار اولیه) متوقف می‌کرد و سپس سامانه را در پی حذف علف‌های دیگر حرکت می‌داد. در حالت دوم سامانه بدون اطلاع از نابودی یا عدم نابودی علف هرز با سرعت متوسط (۱/۸ سانتی‌متر بر ثانیه) حالت اول اقدام به حذف علف‌های هرز کرد. در آزمایش‌ها بوته‌های تیمار دیده‌شده ناشی از جریان الکتریسته در صورت توقف رشد بعد از یک هفته به‌عنوان بوته نابود شده در نظر گرفته شد. با توجه به منابع علمی (Derrick, 2017; Khalil, Johnson, & Lamar, 2005; Zwietering, Jongenburger, Rombouts, & Van't Riet, 1990)، برای مقایسه میانگین‌های مربوطه به تعداد بوته‌های نابود شده در دو حالت آزمایش (استفاده و عدم استفاده از سازوکار بازخوردی) از آزمون آماری t در سطح معنی‌داری ۱٪ استفاده شد.

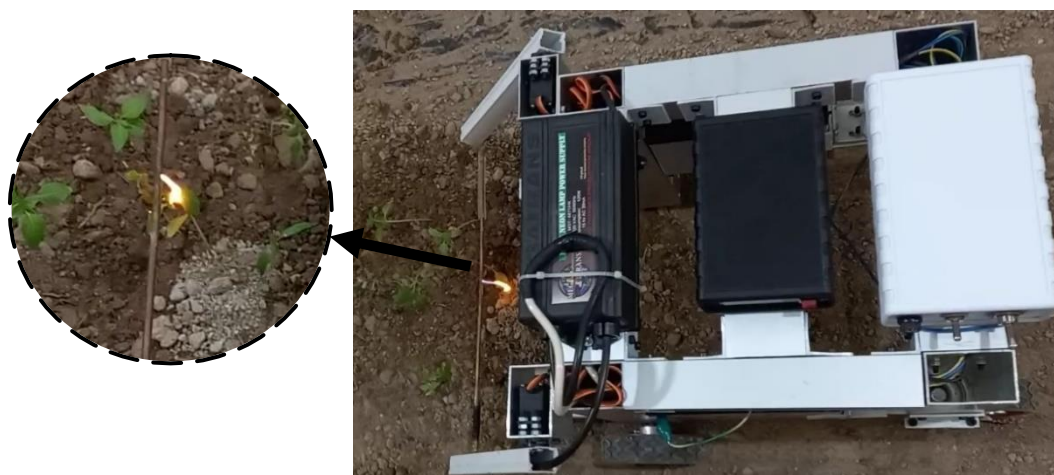
مجموعه ولتاژ بالا جهت راه‌اندازی به یک عدد مازول رله ۵ ولتی متصل است تا با دریافت دستور از میکروکنترلر، ولتاژ در بین الکترودها ایجاد شود و همزمان مقدار جریان الکتریکی نیز توسط میکروکنترلر دریافت و به رایانه ارسال شود.

نرم‌افزار کنترل

نرم‌افزاری برای کنترل نابودگر علف‌هرز و تبادل داده‌های آن با رایانه در ویژوال استودیو^{۲۰۱۵} طراحی شد (شکل ۶). این نرم‌افزار قابلیت ذخیره داده‌های حاصل از مازول حسگر جریان را دارد و از طریق وای‌فای رایانه به مازول اینترنت اشیاء موجود در سامانه متصل است. همچنین نوبری سکوی خودگردان، فعال‌سازی ولتاژ بالا و تنظیم ارتفاع الکترود از قابلیت‌های دیگر آن است که در انجام آزمایش‌ها مورد بهره‌برداری قرار گرفت.

آزمایش سامانه نابودگر علف هرز

آزمایش‌های سامانه در محیط حاوی چندین بوته علف‌هرز جوان انجام شد (شکل ۷). بوته‌های علف هرز از نوع گیاه خرفه و ریحان وحشی بودند (جدول ۱). در گام نخست، آزمایش نابودی علف هرز برای یافتن رابطه بین جریان الکتریکی (I_s) و وجود بوته‌های علف هرز (قبل و بعد از نابودی علف‌های هرز) انجام شد. با تنظیم الکترود در ارتفاع مناسب و پیشروی سامانه در مسیر مستقیم، ولتاژ بالا به بوته‌ها اعمال و داده‌ها حین انجام آزمایش جهت تحلیل در رایانه ذخیره شدند. سرانجام، از داده‌ها برای توسعه و واسنجی سازوکار



شکل ۷- محیط آزمایش‌ها، نابودگر علف هرز با سازوکار بازخوردی در حال نابودی علف هرز
 Fig.7. Test environment, the weed killer with the feedback mechanism killing weeds

جدول ۱- مشخصات علف‌های هرز آزمایش‌شده توسط نابودگر هرز با سازوکار بازخوردی

Table 1- Properties of the tested weeds by the weed killer with the feedback mechanism

ویژگی‌ها Properties	انواع علف‌های هرز Type of weeds	
	خرفه <i>Portulaca oleracea</i>	ریحان وحشی <i>Clinopodium vulgare</i>
متوسط ارتفاع Mean height (cm)	9	8
متوسط تعداد برگ‌ها Mean number of leaves	8	6

نتایج و بحث

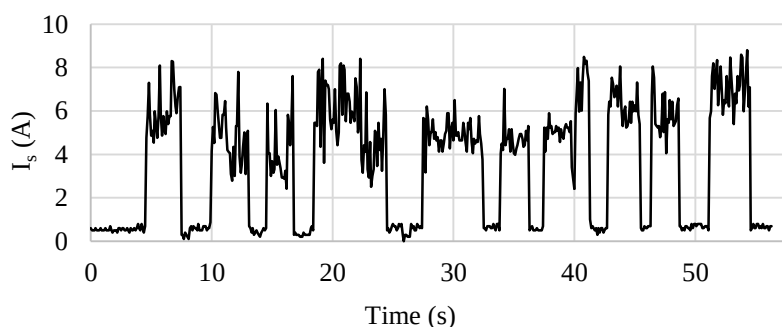
رابطه‌یابی و واسنجی

نمودار عملی از داده‌های دریافتی حسگر جریان الکتریکی در زمان نابودی علف‌های هرز برای ۱۰ عدد بوته (شامل ۱۰ ناحیه اوج) در شکل ۸ نشان داده شده است. این نمودار نشان می‌دهد مقدار تغییرات جریان الکتریکی (I_s) با وجود علف‌های هرز در ارتباط است و با نزدیک شدن الکتروود ولتاژ بالا به علف‌های هرز و تشکیل قوس الکتریکی مقدار جریان افزایش پیدا کرده و به مقدار بیشینه رسیده است. با اعمال انرژی الکتریکی زیاد، خاک و هوا به دلیل توان الکتریکی تحمیلی بالا، از صدمه در امان و همیشه رسانای الکتریکی بودند ولی بوته علف هرز به دلیل توان تحمیلی محدود، همچون مقاومت الکتریکی کم‌توان دمایش بالا رفته و باعث شده آب زیست‌توده‌ها تبخیر و بافت علف هرز تخریب شود. در نهایت ساختار درونی بوته علف هرز نابود و از مدار خارج شده و جریان الکتریکی در حسگر به حد ناچیز نزول پیدا کرده است. طبق نمودار مقدار عددی هر

قله^۱ مربوط به تغییرات جریان الکتریکی و همچنین طول زمانی آن به جثه هر بوته بستگی دارد که مقدار بیشتر قله نشان از بزرگی جثه (مقاومت الکتریکی کمتر) آن بوته دارد.

تعدادی داده از نمودار شکل ۸ برای ۱۰ عدد بوته علف هرز در جدول ۲ استخراج شده است. در فرآیند نابودی علف‌های هرز، مدت زمانی که جریان الکتریکی در اوج بوده است برابر با زمان (T_a) مورد نیاز برای نابودی هر علف هرز است. همچنین در زمان نابودی هر علف هرز، کمترین مقدار جریان الکتریکی I_s در متغیر I_a قرار گرفته است که کمترین مقدار جریان عبوری از هر علف هرز را به هنگام اعمال ولتاژ بالا نشان می‌دهد. حداکثر مقدار T_a و حداقل مقدار I_a برای همه علف‌های هرز مورد آزمایش به ترتیب در متغیرهای T_{max} و I_{min} به دست آمد. متغیر مربوط به جریان الکتریکی مینایی برای تشخیص نابودی علف هرز و واسنجی آن و متغیر مربوط به زمان برای جلوگیری از اتلاف توان و ایجاد ایمنی است تا در صورت عاجز بودن سامانه از نابودی بوته (مثلاً اندام بوته خیلی بزرگ‌تر باشد)، بوته بعدی مورد هدف قرار گیرد.

1- Peak



شکل ۸- نمودار تغییرات جریان الکتریکی در زمان نابودی علف‌های هرز توسط نابودگر علف هرز با سازوکار بازخوردی

Fig.8. The graph of electric current changes versus time during weeds being killed by the weed killer with the feedback mechanism

جدول ۲- داده‌های جریان الکتریکی و زمانی نابودی علف‌های هرز

Table 2- Electric current and time data of weeds killing

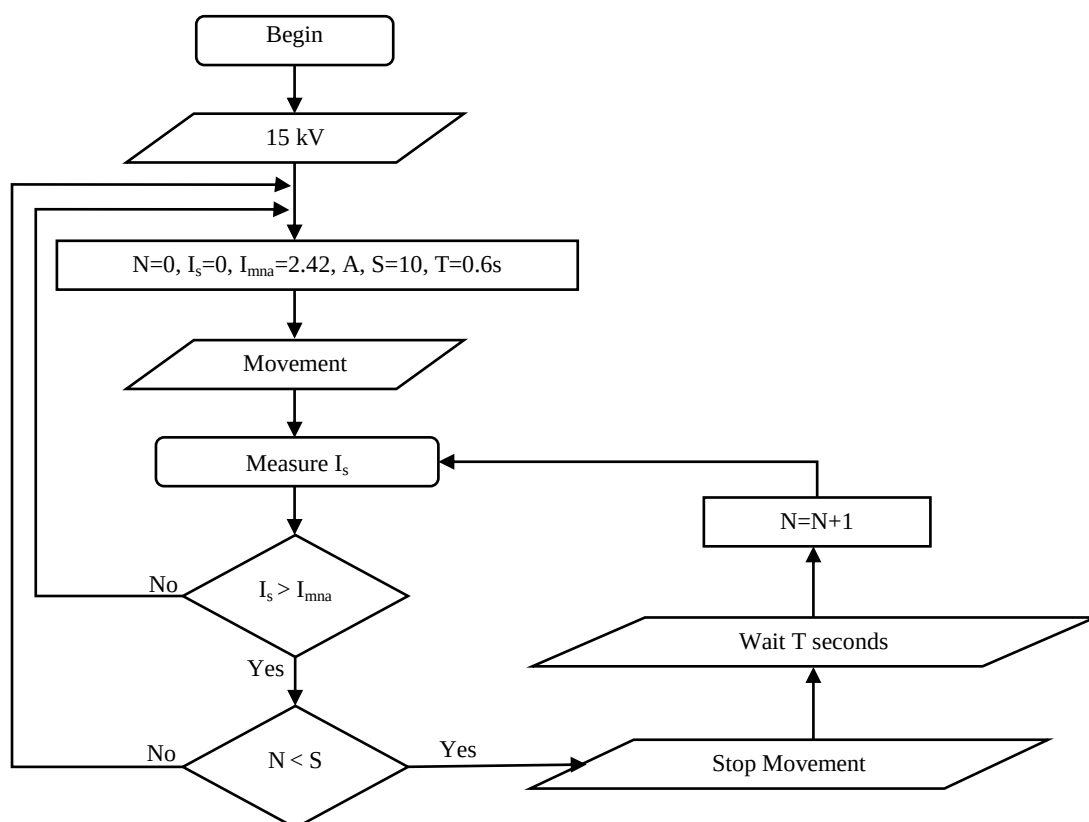
No	T _a (s)	T _{maxa} (s)	I _a (A)	I _{mna} (A)
1	2.9		4.54	
2	3.1		2.79	
3	2.2		2.42	
4	6		2.5	
5	5		3.17	
6	2.4	6	3.98	2.42
7	3.8		2.42	
8	2.7		5.24	
9	2.3		4.05	
10	3.4		5.39	

نابودی علف هرز و نواحی عدم نابودی علف هرز و ضرب آن‌ها در مقدار ۱۲ ولت نمودار توان مصرفی تشکیل شد (شکل ۱۰). در این نمودار، توان مصرفی بین مقدار عددی ۵۰ تا ۸۵ وات و همچنین توان متوسط استخراجی ۴۳ وات محاسبه شده است. با توجه به این که حداکثر توان ترانس افزایشده ۱۲۵ وات است اعداد استخراجی معقول به نظر می‌رسند. نمودار انرژی حاصل از شکل ۱۰ در شکل ۱۱ نشان داده شده است. بیشترین مقدار انرژی ۴۲۶/۵ ژول و کمترین مقدار انرژی ۱۱۰ ژول به دست آمد. مقدار متوسط انرژی مصرفی برای نابودی یک بوته علف هرز ۲۴۶ ژول با انحراف معیار ۹۲/۳۳ ژول است. در حالت ایده‌آل، بوته دارای جثه بزرگ‌تر (مانند سیم رسانی قطورتر) جریان الکتریکی بیشتری را از خود عبور می‌دهد و انرژی بیشتری را مصرف می‌کند. تغییرات قله‌های انرژی برای بوته‌های مختلف نیز گویای همین اصل قانون اهم است. با توجه به تفاوت عددی قله‌های انرژی در نمودار، به نظر می‌رسد وجود یک متغیر سرریز زمانی بازدارنده برای جلوگیری از اتلاف زمان و انرژی برای بوته‌های خارج از توان سامانه ضروری است تا سامانه معطل نابودی آن بوته نشود و بوته‌های بعدی را مورد هدف قرار دهد که البته این متغیر سرریز زمانی در برنامه کاری سامانه اعمال شده است.

با استفاده از داده‌های استخراجی مربوطه به جریان الکتریکی و متغیر زمانی (جدول ۲)، یک برنامه کاری (شکل ۹) برای سامانه نابودگر توسعه داده شد. با توجه به ساختار این برنامه، هنگام شروع، ولتاژ بالا روی الکترودها فعال می‌شود و متغیرها مقداردهی می‌شوند. سپس سامانه در یک مسیر مستقیم پیشروی می‌کند و حسگر جریان مقدار I_s را اندازه‌گیری می‌کند. اولین شرط ($I_s > I_{mna}$) برای وجود علف هرز بررسی می‌شود و با درست بودن شرط (وجود علف هرز)، شرط دوم ($N < S$) از نظر سرریز زمانی بررسی می‌شود و اگر درست باشد (تمام نشدن زمان اختصاصی برای اعمال ولتاژ بالا)، سامانه برای T ثانیه متوقف می‌شود و در طی این زمان علف هرز تحت تاثیر ولتاژ بالا قرار می‌گیرد. با تکرار چرخه، علف هرز از بین می‌رود یا سرریز زمانی ($T_{maxa} = S \times T$) تمام می‌شود. بنابراین، یکی از این دو شرط برآورده نمی‌شود و برنامه کاری مجدداً به ابتدا برمی‌گردد، متغیرها مقداردهی می‌شوند و سامانه اجازه می‌یابد تا دوباره برای شناسایی و نابودی بوته دیگر حرکت کند.

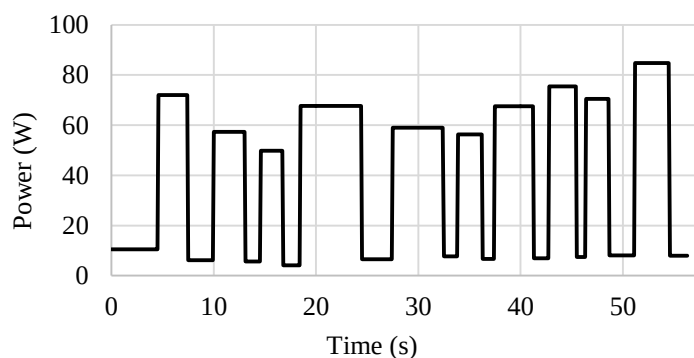
توان و انرژی مصرفی برای نابودی علف‌های هرز

با میانگین‌گیری داده‌های جریان الکتریکی مربوط به نواحی اوج



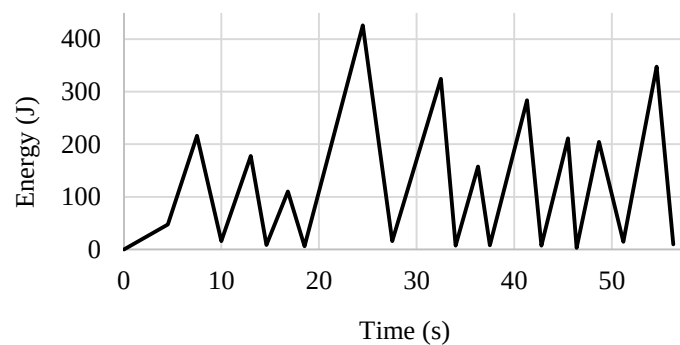
شکل ۹- برنامه کاری برای نابودگر علف هرز با سازوکار بازخوردی

Fig.9. Working program for the weed killer with the feedback mechanism



شکل ۱۰- نمودار توان مصرفی برای نابودی علف‌های هرز توسط نابودگر علف هرز با سازوکار بازخوردی

Fig.10. The graph of consumption power for weeds being killed by the weed killer with the feedback mechanism



شکل ۱۱- نمودار مصرف انرژی برای نابودی علف‌های هرز توسط نابودگر علف هرز با سازوکار بازخوردی

Fig.11. The graph of consumption energy for weeds being killed by the weed killer with the feedback mechanism

ارائه شده است. برای پی بردن به معنی‌دار بودن تعداد بوته‌های نابود شده دو حالت کاری و اثبات برتری روش بازخوردی به بدون بازخوردی نتایج آماری آزمون تی در جدول ۴ استخراج شده است.

ارزیابی سامانه بازخوردی

در جدول ۳ نتایج حاصل از آزمایش مقایسه دو حالت کاری بدون بازخوردی و بازخوردی در ۵ تکرار و برای هر تکرار ۳۰ بوته علف هرز

جدول ۳- تعداد بوته نابود شده در حالت‌های کاری سامانه نابودگر علف هرز با سازوکار بازخوردی

Table 3- Number of killed weeds in the operating modes of the weed killer with the feedback mechanism

شماره No.	تعداد بوته مرده Number of killed weeds	
	حالت با بازخورد Feedback	حالت بدون بازخورد Non feedback
1	27	19
2	24	23
3	23	17
4	28	18
5	24	21

جدول ۴- مقایسه آماری حالت‌های کاری سامانه نابودگر علف هرز با سازوکار بازخوردی

Table 4- Statistical comparison of the operating modes of the weed killer with the feedback mechanism

نوع آزمایش Type of test	Mean	SD	t	df	Sig (2-tailed)
بدون بازخورد Non-feedback	19.6	2.41	3.86	8	0.005
بازخورد Feedback	25.2	2.17			

اندازه‌گیری جریان الکتریکی از ماهیت درونی و رطوبت گیاه مورد هدف آگاهی پیدا می‌کند و به ماهیت ظاهری گیاه وابسته نیست. در حالی که اگر از سازوکار آونگ مکانیکی، فراصوتی و یا لیدار برای توسعه سازوکار بازخوردی نابودگر علف هرز استفاده می‌شد. تنها ماهیت ظاهری گیاه مورد قضاوت بود و به رطوبت گیاه و خشک بودن آن عکس‌العملی نشان داده نمی‌شد و حتی باعث می‌گردید اجسام غیرزنده نیز به عنوان بوته زنده مورد هدف قرار گیرند و در نتیجه موجب اتلاف انرژی و زمان شود. از طرفی روش اندازه‌گیری

مقدار ۰/۰۰۵ در قسمت Sig (2-tailed) کمتر از ۰/۰۱ است و یعنی بین دو حالت کاری، با ۹۹٪ اختلاف معناداری وجود دارد. بنابراین حالت کاری بازخوردی ($25/2 \pm 2/17$ عدد بوته) نسبت به حالت کاری بدون بازخوردی ($19/6 \pm 2/41$ عدد بوته) در نابودی علف‌های هرز موثرتر است؛ $t(8)=3/86$ ، $P < 0/01$. این نتایج نشان می‌دهد که استفاده از یک سازوکار بازخوردی نه تنها به پایش سامانه نابودگر کمک می‌کند بلکه در بهبود عملکرد آن و شدت عمل نابودی میسر است. سامانه بازخوردی توسعه یافته برای این پژوهش، با

تشکیل شده است. این مقایسه نشان می‌دهد که نابودگر ولتاژ بالا دارای سازوکار بازخوردی برخلاف روش‌های شیمیایی و زیستی سرعت اثر بالایی دارد. این روش تقریباً نسبت به تمامی روش‌ها به جز روش شیمیایی از بازده بالایی برخوردار است و همچنین پیاده‌سازی آن در مقایسه با روش‌های شیمیایی، زیستی و امواج الکترومغناطیسی پیچیدگی بالایی ندارد. اثر جانبی شامل آلودگی زیست‌محیطی و تاثیر سوء روش مورد استفاده بر محصول اصلی از دیگر متغیرهایی است که این پژوهش را از روش‌های شیمیایی، زیستی، حرارتی و امواج الکترومغناطیسی تفکیک می‌کند و برتری آن را نمایان می‌سازد.

جریان الکتریکی در مقایسه با روش‌های طیف‌سنجی و ماشین بینایی از ماهیت سخت‌افزاری و نرم‌افزاری ساده‌تری برخوردار است و پردازش داده‌ها هم به راحتی میسر است و زمان پاسخ‌دهی آن نیز کمتر است. بدیهی است هرچه قدر سامانه دارای اجزای کمتری باشد هزینه اولیه و تعمیر کمتری نیاز خواهد داشت.

مقایسه نابودگر علف هرز دارای سازوکار بازخوردی با سایر روش‌ها

با توجه به پژوهش‌های بررسی شده و آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش، جدول ۵ برای مقایسه انواع روش‌های نابودی علف هرز

جدول ۵- مقایسه نابودگر ولتاژ بالا علف هرز دارای سازوکار بازخوردی با سایر روش‌ها

Table 5- Comparison of the high-voltage weed killer with feedback mechanism with other methods

روش Method	عملکرد سریع Fast performance	بازده بالا High efficiency	پیچیده Complex	اثر جانبی Side effect
شیمیایی Chemical	No	Yes	Yes	Yes
زیستی Biological	No	No	Yes	Yes
مکانیکی Mechanical	Yes	No	No	No
حرارتی Thermal	Yes	No	No	Yes
امواج الکترومغناطیسی Electromagnetic waves	Yes	No	Yes	Yes
لیزری Laser	Yes	No	No	No
ولتاژ بالا High-voltage	Yes	No	No	No
ولتاژ بالا بازخوردی High-voltage with feedback	Yes	Yes	No	No

کرده بود ولی برای بوته‌های بزرگ‌تر فقط به برگ‌ها آسیب رسانده و از نابودی کامل آن‌ها عاجز مانده بود. حداکثر توان الکتریکی مصرفی در این پژوهش ۸۵ وات برآورد شد که در مقایسه با حداکثر توان مصرفی ۳۳۰ وات در پژوهش (Brighenti & Brighenti, 2009) مقدار کمتری را به خود اختصاص داد. برابری مقدار ولتاژ اعمالی در پژوهش‌های (Diprose et al., 1984) و (Blasco et al., 2002) با این پژوهش و بررسی نتایج نابودی علف‌های هرز در پژوهش‌های مرتبط با ولتاژ بالا نشان می‌دهد که نقصان این سامانه‌ها بیشتر به دلیل عدم امکان تشخیص برخط بوته‌های نابود شده بود نه مقدار ولتاژ اعمالی به آن‌ها، به طوری که حتی برآورد تعداد نابودی بوته‌ها نیز توسط سامانه‌ها مهیا نشد.

در این پژوهش، وجود سازوکار بازخوردی سبب شد قابلیت‌ها و نتایج متمایزی نسبت به سایر پژوهش‌های ولتاژ بالا نابودگر علف‌هرز ایجاد شود. در این سامانه جدید با به کارگیری ولتاژ ۱۵ کیلوولت، پایش جریان مصرفی و تشخیص نابودی بوته، انرژی و زمان برای نابودی علف‌های هرز به صورت بهینه مدیریت شد و باعث شد زمان نابودی از مقادیر بالاتر ۱۰۰ ثانیه در پژوهش (Sahin & Yalinkılıç, 2017) به مقادیر پایین‌تر از ۱۰ ثانیه در این پژوهش نزول کند. همچنین نرخ متوسط کنترل علف هرز با کمک سامانه بازخوردی در این پژوهش ۸۴٪ ($\frac{25.2}{3}$) حاصل شد، در حالی که این نرخ در پژوهش (Diprose et al., 1984) زیر مقدار ۵۰٪ گزارش شده بود و همچنین در پژوهش (Blasco et al., 2002) سامانه گرچه در نابودی علف‌های هرز در مرحله رشد پنج برگی به طور کامل عمل

نتیجه‌گیری

(2009) و (Sahin & Yalnıkcı, 2017) بدون سامانه بازخورد بود، مشخص نمی‌شد که در حین عملیات بوته نابود شده است یا نه و باعث می‌شد انرژی و زمان بدون کنترل به هدف اعمال و اتلاف شود یا حتی اعمال ناکافی انرژی به بوته سبب عدم نابودی آن می‌شد. بنابراین وجود سازوکار بازخوردی برای نابودگر علف هرز یک ضرورت محسوب می‌شود. پیشنهاد می‌شود برای پژوهش‌های آتی در شرایط مزرعه‌ای، از یک افزایش ولتاژ بالا با ظرفیت توان بالا و سازوکار هدایت خودکار استفاده شود تا سرعت پیشروی برای نابودی علف هرز و عرض‌کاری آن افزایش یابد. همچنین با توجه به خطرات برق‌گرفتگی ناشی از ولتاژ بالا استفاده از تجهیزات کنترل و سنجش از راه دور همیشه در اولویت قرار گیرد.

انرژی الکتریکی یک روش غیرشیمیایی و دوست‌دار محیط‌زیست برای نابودی علف‌های هرز است. بنابراین بهتر است در حد ممکن از این انرژی به صورت کنترل شده برای از بین بردن علف‌های هرز استفاده شود. در این پژوهش مشخص شد که سنجش جریان الکتریکی در ورودی سامانه نابودگر ولتاژ بالا علف هرز روشی ساده و کم‌هزینه برای ایجاد سازوکار بازخوردی جهت تشخیص علف هرز و نابودی آن است که شدت اثر نابودی علف هرز نیز را افزایش می‌دهد و همچنین عملکرد آن را پایش می‌کند. اگر این پژوهش مانند (Diprose et al., 1984)، (Blasco et al., 2002)، (Brighenti & Brighenti, 2002)

References

1. Astatkie, T., Rifai, M., Havard, P., Adsett, J., Lacko-Bartosova, M., & Otepka, P. (2007). Effectiveness of hot water, infrared and open flame thermal units for controlling weeds. *Biological Agriculture & Horticulture*, 25, 1-12. <https://doi.org/10.1080/01448765.2007.10823205>
2. Birrell, S., Hughes, J., Cai, J. Y., & Iida, F. (2020). A field-tested robotic harvesting system for iceberg lettuce. *Journal of Field Robotics*, 37, 225-245. <https://doi.org/10.1002/rob.21888>
3. Blasco, J., Aleixos, N., Roger, J., Rabatel, G., & Moltó, E. (2002). AE-Automation and emerging technologies: Robotic weed control using machine vision. *Biosystems Engineering*, 83, 149-157. <https://doi.org/10.1006/bioe.2002.0109>
4. Bond, W., & Grundy, A. (2001). Non-chemical weed management in organic farming systems. *Weed Research*, 41, 383-405. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3180.2001.00246>
5. Brighenti, A. M., & Brighenti, D. M. (2009). Weed control in organic soybean using electrical discharge. *Ciência Rural*, 39(8), 315-2319. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782009000800007>
6. Derrick, B. (2017). How to compare the means of two samples that include paired observations and independent observations: A companion to Derrick, Russ, Toher and White (2017). *The Quantitative Methods for Psychology*, 13, 120-126. <https://doi.org/10.20982/tqmp.13.2.p120>
7. Diprose, M., Benson, F., & Willis, A. (1984). The effect of externally applied electrostatic fields, microwave radiation and electric currents on plants and other organisms, with special reference to weed control. *The Botanical Review*, 50, 171-223. <https://doi.org/10.1007/BF02861092>
8. Dworak, V., Selbeck, J., Dammer, K. H., Hoffmann, M., Zarezadeh, A. A., & Bobda, C. (2013). Strategy for the development of a smart NDVI camera system for outdoor plant detection and agricultural embedded systems. *Sensors*, 13, 1523-1538. <https://doi.org/10.3390/s130201523>
9. Ehlert, D., Hammen, V., & Adamek, R. (2003). On-line sensor pendulum-meter for determination of plant mass. *Precision Agriculture*, 4, 139-148. <https://doi.org/10.1023/A:1024553104963>
10. Khalil, M., Johnson, T., & Lamar, C. (2005). Comparison of computer-based and paper-based imagery strategies in learning anatomy. *Clinical Anatomy: The Official Journal of the American Association of Clinical Anatomists and the British Association of Clinical Anatomists*, 18, 457-464. <https://doi.org/10.1002/ca.20158>
11. Legg, M., & Bradley, S. (2020). Ultrasonic Arrays for Remote Sensing of Pasture Biomass. *Remote Sensing*, 12, 111. <https://doi.org/10.3390/rs12010111>
12. Marx, C., Barcikowski, S., Hustedt, M., Haferkamp, H., & Rath, T. (2012). Design and application of a weed damage model for laser-based weed control. *Biosystems Engineering*, 113, 148-157. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.07.002>
13. Morin, L. (2020). Progress in Biological Control of Weeds with Plant Pathogens. *Annual review of phytopathology*, 58. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-010820-012823>
14. Paap, A. J. (2014). Development of an optical sensor for real-time weed detection using laser based spectroscopy. [Doctoral dissertation, Edith Cowan University]. <https://ro.ecu.edu.au/theses/1282>
15. Peltzer, S., Hashem, A., Osten, V., Gupta, M., Diggle, A., Riethmuller, G., Douglas, A., Moore, J., & Koetz, E. (2009). Weed management in wide-row cropping systems: a review of current practices and risks for Australian farming systems. *Crop and Pasture Science*, 60, 395-406. <https://doi.org/10.1071/CP08130>

16. Rask, A. M., & Kristoffersen, P. (2007). A review of non-chemical weed control on hard surfaces. *Weed Research*, 47, 370-380. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2007.00579.x>
17. Sahin, H., & Yalinkılıç, M. (2017). Using Electric Current as a Weed Control Method. *European Journal of Engineering Research and Science*, 2, 59-64. <https://doi.org/10.24018/ejers.2017.2.6.379>
18. Slaughter, D., Giles, D., & Downey, D. (2008). Autonomous robotic weed control systems: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 61, 63-78. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2007.05.008>
19. Utstumo, T., Urdal, F., Brevik, A., Dørum, J., Netland, J., Overskeid, Ø., Berge, T. W., & Gravdahl, J. T. (2018). Robotic in-row weed control in vegetables. *Computers and Electronics in Agriculture*, 154, 36-45. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.08.043>
20. Vigneault, C., & Benoit, D. L. (2001). *Electrical weed control: theory and applications*. Pages 174-188. Physical control methods in plant protection, Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-04584-8_12
21. Yuan, W., Li, J., Bhatta, M., Shi, Y., Baenziger, P. S., & Ge, Y. (2018). Wheat height estimation using LiDAR in comparison to ultrasonic sensor and UAS. *Sensors*, 18, 3731. <https://doi.org/10.3390/s18113731>
22. Zwietering, M., Jongenburger, I., Rombouts, F., & Van't Riet, K. (1990). Modeling of the bacterial growth curve. *Applied and Environmental Microbiology*, 56, 1875-1881. <https://doi.org/10.1128/AEM.56.6.1875-1881.1990>



Thermal and Mechanical Analysis of Rotary Kiln of Activated Carbon Producing Reactor

S. Naderi Parizi¹, R. Alimardani^{2*}, M. Soleimani³, H. Mousazadeh⁴

1- Ph.D. Student of Mechanic of Biosystem, Department of Mechanics of Agricultural Machinery Engineering, University of Tehran, Iran

2- Professor of Mechanic of Biosystem, Department of Mechanics of Agricultural Machinery Engineering, University of Tehran, Iran

3- Associate Professor of Chemical Engineering, Department of Chemical Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran

4- Associate Professor of Mechanic of Biosystem, Department of Mechanics of Agricultural Machinery Engineering, University of Tehran, Iran

(* - Corresponding Author Email: rmardani@ut.ac.ir)

<https://doi.org/10.22067/jam.2021.71896.1055>

Received: 23 August 2021

Revised: 11 December 2021

Accepted: 14 December 2021

Available Online: 14 December 2021

How to cite this article:

Naderi Parizi, S., Alimardani, R., Soleimani, M., & Mousazadeh, H. (2023). Thermal and Mechanical Analysis of Rotary Kiln of Activated Carbon Producing Reactor. *Journal of Agricultural Machinery*, 13(2), 135-146. (in Persian with English abstract).

<https://doi.org/10.22067/jam.2021.71896.1055>

Introduction

Activated carbon has a wide range of applications as a porous material in the liquid or gas phase adsorption process. The physical process of activated carbon production is divided into two stages thermal decomposition and activation. In this study, only the activation stage has been studied because it is very important in the properties of activated carbon being produced.

The production of activated carbon from horticultural waste not only leads to cheap production and supply of many industrial and environmental necessities but also reduces the amount of the produced solid waste. Iran produces about 94,000 tons of pistachio husk annually, which is a good raw material for the production of activated carbon. The profitability index of activated carbon production in Iran is equal to 3.63, which in the case of export, the profitability index will be tripled.

Studies have shown that temperature, period, and activation gas flow are the key factors affecting burn-off and iodine number during activated carbon production. Among the various activators tested, steam was found to be the most efficient, with the fastest activation time. For pistachio crops, the minimum iodine number required for economic efficiency is 600 mg g⁻¹, while the highest specific surface area according to the BET test is 1062.2 m² g⁻¹.

Materials and Methods

A Mannesmann tube made of 10 mm thick steel was used to construct the rotating reactor. To minimize heat loss during operation, the kiln body was insulated with a ceramic blanket capable of withstanding temperatures up to 1400°C. The kiln had a length and diameter of 190 cm and 48 cm, respectively, and operated at a temperature of 600°C, requiring approximately 25 kWh of energy for heating. CATIA V5 R21 software was employed to design the device, while ANSYS R20 software was used for thermal and mechanical analysis. The rotary reactor was identified as a critical component due to the high levels of thermal and mechanical stress it experiences. To address these issues, a thermal and fluid analysis was conducted, followed by a mechanical analysis using the results from the prior step. Subsequently, experimental tests were performed on the actual model, and the results were analyzed using statistical methods, including the T-student test in IBM SPSS software.

The central heating unit and its surroundings were modeled using ANSYS CFX to obtain valuable information on fluid velocity, radiant properties, and heat transfer within the kiln and surrounding area at an operating temperature of 650°C. The analysis revealed uniform steam flow velocity between the kiln and the heating unit. To accommodate longitudinal expansion resulting from heat stress, taller rollers were employed to

allow freedom of movement in that direction, while the lateral movement was unrestricted. This arrangement allows the reactor length to increase under varying temperatures. The reactor's end was designed with grooves and pressure plates, incorporating abrasion and compression plates made from refractory fibers to effectively seal the device. Furthermore, telescopic movement of the parts compensates for expansion effects.

Results and Discussion

The operating temperature of the system was gradually increased to reduce thermal stresses in the reactor shell. This led to a maximum increment in a longitudinal increase of 11.75 mm. Results from five sets of experimental tests and five software analyses demonstrated no significant differences between the experimental and analytical results at a significance level of 5%. Based on the thermal contour analysis, the thickness of the insulation layer was determined to be 5 cm. To control the operating temperature of the device, two methods were employed: adjusting the flame length of the burner and using different types of exhaust outlets. These measures effectively reduced thermal stress on the device.

Conclusion

Thermal and mechanical analysis were useful methods for predicting heat distribution, thermal stresses, and potential dimensional changes in the activated carbon reactor. To compensate for possible alterations in the reactor's length and diameter, abrasive plates and friction washers were implemented. Careful control of fuel input to the burner and regulation of exhaust gas flow helped effectively reduce thermal stresses on the device.

Keywords: Activated Carbon, Activation, Pyrolysis, Steam

مقاله پژوهشی

جلد ۱۳، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۲، ص ۱۴۶-۱۳۵

تحلیل حرارتی و مکانیکی کوره دوار رآکتور تولید کربن فعال

سجاد نادری پاریزی^۱، رضا علیمردانی^{۱*}، منصوره سلیمانی^۲، حسین موسی زاده^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۲۳

چکیده

کربن فعال یک جاذب با ظرفیت جذب بالا بوده و در فرآیندهای جداسازی مختلف در فازهای مایع و گاز کاربرد دارد. فرآیند اصلی تولید کربن فعال، شامل پیرولیز ماده خام اولیه است و کربن تولیدشده در کوره فعال‌سازی، فعال می‌شود. با توجه به اهمیت مرحله فعال‌سازی در خواص کربن فعال تولیدی، در این مقاله تحلیل حرارتی و مکانیکی کوره بخش فعال‌ساز مورد توجه قرار گرفت. مدل اولیه با نرم‌افزار CATIA V5 R27 طراحی و با نرم‌افزار ANSYS R20 تحلیل حرارتی و مکانیکی شد. تغییر طول‌های ناشی از حرارت کوره دوار و همچنین تلفات گرمایی و نحوه گردش جریان گرمایی در داخل کوره بررسی شد. به همین منظور ابتدا تحلیل حرارتی و سیالاتی کوره انجام، سپس نتایج با یک تحلیل مکانیکی ادغام گردید. کوره همراه با واحد گرمایش مرکزی و دامنه اطراف کوره در محیط ANSYS CFX مدل‌سازی شد. نتایج نشان داد که دمای دیواره داخلی حدود 600°C است. با توجه به میزان دمای داخلی بدنه و با مهار کردن یک سمت کوره که در مدل واقعی توسط واشر جانبی اعمال می‌شود، میزان تغییر طول کوره در راستای محور افقی، معادل ۱۱/۷۵ mm محاسبه شد. سپس آزمون تجربی روی مدل واقعی انجام گرفت و نتایج حاصل از تحلیل آماری نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار بین نتایج مدل‌سازی و تجربی می‌باشد. در نهایت برای مهار آن از غلتک و تکیه‌گاه‌های مناسب، ورق‌های سایشی همراه با صفحات فشاری و برای مهار تلفات گرمایی از عایق سرامیکی ۵ سانتی‌متری استفاده گردید.

واژه‌های کلیدی: بخار آب، پیرولیز، تحلیل مکانیکی و حرارتی، فعال‌سازی، کربن فعال

مقدمه

هر ماده ارزانی که دارای مقدار زیادی کربن و مقدار کمی مواد معدنی باشد می‌تواند به‌عنوان ماده خام برای تولید کربن فعال استفاده شود. متداول‌ترین مواد خامی که برای تولید کربن فعال استفاده می‌شوند عبارتند از: چوب، برخی از گیاهان، زغال قیردار، زغال قهوه‌ای، لیگنین، پوسته نارگیل، پوسته میوه‌هایی چون فندوق، گردو، پسته و غیره (Chen, Chen, Sun, Zheng, & Fu, 2016; Hoseinzadeh & Rahmani, 2012). بخشی از مواد زائد تولیدی را مواد زائد باغبانی تشکیل می‌دهد که با توجه به وجود بیش از دو و نیم میلیون هکتار سطح زیر کشت محصولات باغی، مواد زائد باغبانی قابل توجهی در کشور تولید می‌شود (Sayyahzadeh, Ganjidoust, & Ayati, 2014). تولید کربن فعال از مواد زائد باغبانی، علاوه بر تولید ارزان قیمت این فرآورده و تامین بسیاری از نیازهای صنعتی و زیست‌محیطی، باعث کاهش حجم مواد زائد جامد تولیدی و نیل به توسعه پایدار می‌شود. بر همین اساس طی دهه‌های گذشته، در زمینه تولید کربن فعال از مواد زائد کم‌ارزش، تحقیقات متعددی صورت گرفته است (Patil & Kulkarni, 2012; Sayyahzadeh et al., 2014). برای جذب مواد آلی فرار با غلظت کمتر از یک درصد وزنی،

کربن یا زغال فعال به‌عنوان یک ماده متخلخل کاربردهای مهم و گسترده‌ای دارد. این ماده از پیرولیز مواد گیاهی حاوی کربن تهیه می‌شود (Jadidian, Talaee, Mahdavi, & Homs, 2016). کربن فعال به‌عنوان یک جاذب با ظرفیت جذب بالا و قیمت پایین، در فرآیندهای جذب از فاز مایع و گاز کاربردهای بسیار فراوانی دارد. از جمله کاربردهای این ماده در فاز مایع می‌توان به رنگ‌بری از محلول شکر، تصفیه آب آشامیدنی، پساب و فاضلاب، بازیافت یا جداسازی فلزات با ارزش و سنگین و در فاز گاز به استفاده در ماسک‌های گاز اشاره نمود (Ozsin, Yucel, & Behlulgil, 2011; Tehranizadeh, Ghazanfari moghadam, & Hashemipour rafsanjani, 2012).

۱- گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
۲- دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
(*)- نویسنده مسئول: (Email: rmardani@ut.ac.ir)
<https://doi.org/10.22067/jam.2021.71896.1055>

(Hernandez, & Capareda, 2007).

در پژوهشی مقایسه‌ای روی سختی کربن فعال تولیدی به روش فیزیکی و با استفاده از بخار آب از ضایعات کشاورزی مختلف انجام گرفت و در آن نشان داده شد که در عدد یدی یکسان، هسته هلو بالاترین و پوست پسته پایین‌ترین سختی را دارد. همواره با افزایش عدد یدی از میزان سختی کاسته می‌شود که به دلیل ایجاد سطح ویژه زیاد و سست شدن ساختار کربن فعال می‌باشد (Safa, Azimirad, Kamandari, & Bayat, 2016).

در پژوهشی که بر روی کربن فعال تولیدی به روش فیزیکی از باگاس زیتون انجام و بیان شد که دمای فعال‌سازی مهم‌ترین عامل در این فرآیند است. به‌طوری‌که فعال‌سازی در دمای 900°C ، $3/2$ برابر سریع‌تر از دمای 750°C انجام می‌شود. بیشترین میزان تخلخل در دمای 900°C و زمان ماند 45 min به میزان $1106\text{ m}^2\text{ gr}^{-1}$ بر اساس آزمون BET گزارش شد (Demiral, Demiral, Karabacakoglu, & Tımsek, 2011; Faramarzi, Kaghazchi, Ale Ebrahim, & Afshar Ebrahimi, 2015). آزمون BET بر پایه تئوری لانگمویر به‌منظور محاسبه سطح ویژه حفرات شامل میکرو، مزو و ماکرو حفره‌ها از ایزوترم‌های جذب و دفع نیتروژن مایع در دمای 77 درجه کلون به‌کار می‌رود (Bhati et al., 2013).

پیرولیز یک فرآیند تجزیه حرارتی است که بدون اکسیژن انجام می‌شود. در فرآیند تجزیه حرارتی، مواد لیگنوسلولزی در محیط یک گاز بی‌اثر در دمای 400 تا 800°C قرار می‌گیرند و رطوبت و مواد فرار از آن‌ها خارج می‌شود. در اثر خروج مواد فرار، زغال به‌جا مانده تخلخل بسیار بالایی دارد که در واقع همان کربن فعال است (Aworn, Thiravetyan, & Nakbanpote, 2008; Tehranizadeh, 2012).

فرآیند فیزیکی (حرارتی) تولید کربن فعال را به دو مرحله می‌توان تقسیم کرد: مرحله اول تجزیه حرارتی^۲ یا کربنیزاسیون^۳ ماده اولیه و مرحله دوم فعال‌سازی^۴ کربن. کربنیزاسیون فرآیندی است که در طی آن بر درصد کربن در ماده اولیه افزوده می‌گردد (Aquino et al., 2007). به‌عنوان مثال 50 درصد وزنی چوب خشک کربن می‌باشد، که پس از کربنیزاسیون به $80-90$ درصد وزنی می‌رسد (Byrne & Nagle, 1997). معمولاً برای اندازه‌گیری میزان فعال‌سازی از میزان اکسید شدن استفاده می‌گردد که برابر با درصد کاهش وزن ماده در مدت زمان فعال‌سازی نسبت به وزن کربن است (Lyubchik, Benaddi, Shapranov, & Beguin, 1997). بخار آب، دی‌اکسید کربن و مخلوط آن‌ها، متداول‌ترین گازهای مصرفی در فرآیند

می‌توان از بسترهای ثابت کربن فعال به‌عنوان روشی موثر و باصرفه استفاده کرد (Fatemi & Saadatmehr, 2005).

سرزمین ایران نه تنها منشأ اصلی پسته به‌شمار می‌آید، بلکه کشت پسته از دیرباز در آن رایج بوده است. به‌طوری‌که در سال 1388 ، ایران بزرگ‌ترین تولیدکننده و صادرکننده پسته در جهان بوده که حدود 56% از تولید جهانی و حدود 70% از صادرات جهانی پسته را به خود، اختصاص داده بود (NaderiParizi, Beheshti, & Roustapour, 2015). میزان تولید سالانه پسته در کشور طی سال‌های 1394 و 1396 و 1398 به‌ترتیب 225 ، 195 و 195 هزار تن گزارش شده است (Iran pistachio association, 2017). با توجه به این‌که حدود 45% از این محصول را پوست سخت آن تشکیل می‌دهد، می‌توان پیش‌بینی نمود که سالانه در کشور حدود 94 هزار تن مواد زائد فقط از همین یک نوع محصول یافت می‌شود. حجم عظیمی از پوست سخت (عمدتاً پسته‌های پوک)، در زمین‌های کشاورزی کشور نابود و یا با قیمت اندک در کشورهای همسایه به‌عنوان سوخت مصرف می‌شود. در صورتی‌که با تولید کربن فعال از این ضایعات می‌توان علاوه بر رفع نیاز صنایع داخلی، با صادرات آن برای کشور ارزآوری نیز ایجاد کرد. هر کیلوگرم کربن فعال، تقریباً حاصل فرآوری 10 kg پوست سخت پسته می‌باشد. قیمت فروش هر کیلوگرم کربن فعال بسته به ویژگی‌های محصول بین 2 تا 5 دلار (متوسط 4 دلار) می‌باشد. با توجه به استفاده از گرمای حاصل از کربونیزاسیون پوست پسته، فرآیند بدون نیاز به مصرف سوخت خارجی قابل انجام و هزینه فرآوری فقط شامل هزینه‌های عملیاتی و حدود $0/1$ دلار به ازای هر کیلوگرم ماده خام می‌باشد. با احتساب قیمت خرید پوست پسته (حدود $0/1$ دلار به ازای هر کیلوگرم)، شاخص سودآوری تولید کربن فعال در ایران معادل $3/63$ خواهد بود که در صورت صادرات، این شاخص به سه برابر خواهد رسید (Daneshmandi, Azizi, & Farush, 2014).

در تحقیقی با سنتر آزمایشگاهی پوست پسته و فعال‌سازی آن در راکتور دوار در مجاورت دی‌اکسید کربن و بخار آب، اثر سه عامل دمای فعال‌سازی، زمان ماند و دبی گاز اکسیدکننده بر روی میزان عدد یدی و میزان سوختن^۱ بررسی شد. بر اساس مرجع استاندارد ASTM D4607-94، عدد یدی به‌صورت میلی‌گرم ید جذب شده به ازای یک گرم کربن فعال تعریف می‌شود. محققین بهینه دمای $816/5^{\circ}\text{C}$ ، زمان ماند 40 min و دبی بخار $47/4\text{ lit min}^{-1}$ را در فعال‌سازی با بخار آب گزارش کردند (Bhati, Mahur, Dixit, & Choubey, 2013; Kamandari, Hashemipour rafsanjani, Najarzadeh, & Rezaei, 2012). حداقل عدد یدی لازم برای بهره‌وری اقتصادی کربن اکتیو 600 mgr gr^{-1} می‌باشد (Aquino,

2- Thermal decomposition

3- Carbonization

4- Activation

1- Burn off

ملاحظه کوره، ساز و کار مناسبی برای این موضوع به کار گرفته شد. نمایی از طرح پیشنهادی برای این منظور در شکل ۳ دیده می شود. به منظور کاهش هدررفت انرژی حرارتی، بدنه کوره توسط یک پوسته مناسب احاطه می شود. سطح داخلی این پوسته از عایق نسوز پتوی سرامیکی با تحمل دمایی مناسب (حدود 1400°C) که با یک روکش آلومینیومی مجهز شده پوشیده شده است. قسمت های تحتانی این بدنه بخشی از شاسی کوره را شامل می شود که به همراه کوره زاویه گرفته و در ایجاد سرعت های متفاوت حرکت مواد شرکت خواهد کرد. به دلیل نیاز به یکنواخت بودن تغذیه مواد در هنگام ورود به کوره، از سامانه تغذیه ماریچی (یا نوار نقاله) استفاده می شود. طول کوره ۱۹۰ cm و قطر آن ۴۸ cm در نظر گرفته شد. در این صورت با توجه به ۱۰٪ پرشدگی کف کوره، وزن مرده مواد در داخل کوره حدود ۶ kg می باشد. دبی مواد خروجی (ظرفیت اسمی تولید) با توجه به سرعت چرخش و زاویه طولی کوره متغیر بوده که با فرض سرعت دورانی حدود ۳ rpm و زاویه ۳ درجه ای نسبت به افق، به ظرفیت تولید 2 kg hr^{-1} می رسد.

حداکثر دمای بدنه کوره حین عملیات فرآوری به حدود 1000°C درجه سلسیوس می رسد، اما دمای عملیاتی حدود 600°C روی محصول خواهد بود. که برای تامین این دما نیاز به صرف حدود ۲۵ kWh انرژی در واحد گرمایش می باشد. به منظور تولید بخار مورد نیاز کوره اکتیواسیون، نیاز به سامانه ای برای تولید، انتقال و کنترل دقیق دبی بخار ورودی احساس می شود. باتوجه به نیاز به ثابت بودن نسبت بخار/کربن ورودی کوره همواره دبی بخار ورودی به کوره به تناسب دبی مواد ورودی قابل تغییر می باشد. همچنین به دلیل دمای کارکردی بالا و به حداقل رساندن تنش های حرارتی در پوسته رآکتور، افزایش دما باید به صورت مرحله ای انجام گیرد. کنترل وضعیت کارکرد قسمت های مختلف دستگاه توسط کنترلر مدل MEGA R3 2560 ساخت شرکت آردوینو کشور ایتالیا انجام گرفت. مجموعه تابلوی کنترل مطابق شکل ۴ وظیفه پایش و کنترل پارامترهای دما، سرعت دورانی، زاویه طولی رآکتور، وضعیت تزریق بخار، دبی جرمی مواد ورودی و سایر قسمت های دستگاه را بر عهده دارد.

به منظور مدل سازی دستگاه از نرم افزار CATIA V5 R21 و برای تحلیل حرارتی و مکانیکی از نرم افزار ANSYS R20 استفاده شد. بخش هدف دستگاه کوره دوار می باشد زیرا بیشترین تنش های حرارتی و مکانیکی متوجه این بخش می باشد و برای ارائه یک راهکار مهار این تنش ها نیاز به محاسبه تنش ها و تغییر طول های ناشی از حرارت می باشد. به همین منظور ابتدا تحلیل حرارتی و سیالاتی کوره انجام و سپس نتایج تحلیل محیط Fluid flow با یک تحلیل مکانیکی در محیط Static structural کوپله گردید.

برای این منظور مطابق شکل ۶، کوره (۲) همراه با واحد گرمایش مرکزی (۳) و دامنه اطراف کوره (۱) در محیط ANSYS CFX

اکسیداسیون در دمای بالا (فعال سازی) هستند. مطالعات سینتیکی نشان می دهد که سرعت فعال سازی توسط بخار آب هشت بار بیش از دی اکسید کربن می باشد (Ullmann et al., 1985).

با توجه به مطالب ذکر شده، تداخل محصول نهایی به عوامل متعددی نظیر نوع ماده خام، شرایط کربنیزاسیون، نوع عامل فعال ساز، دما، زمان فعال سازی و نسبت بخار به ماده ورودی^۱ بستگی دارد. نبود دانش فنی در کنترل دقیق این عوامل از جمله مشکلات پیش روی سامانه های موجود بوده و دلیلی بر نافرجام ماندن طرح های انجام گرفته در کشور است. فرآیند ابتدایی تولید کربن فعال، شامل پیرولیز ماده خام اولیه بوده و زغال تولید شده در مهم ترین مرحله تولید (کوره فعال سازی) فعال می شود. لذا به دلیل پرهزینه بودن ساخت کوره کربنیزاسیون و تاثیر جزیی مرحله کربنیزاسیون در کیفیت محصول خروجی، در این تحقیق از ساخت مجموعه کربنیزاسیون صرف نظر شده و مواد اولیه به صورت زغال خروجی مرحله کربنیزاسیون از صنایع کشور تهیه می شود و پژوهش بر روی مرحله فعال سازی متمرکز می شود. در این مقاله تحلیل حرارتی و مکانیکی واحد کوره بخش فعال ساز مورد توجه قرار گرفته است.

مواد و روش ها

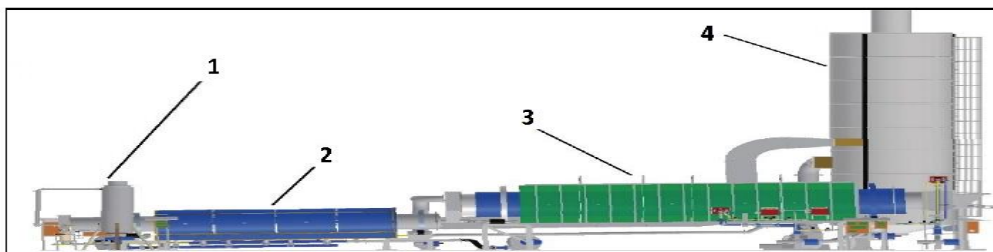
شکل ۱ نمای کلی از خط تولید پیوسته کربن فعال به روش فعال سازی فیزیکی با بخار آب را نمایش می دهد که در کشور نصب شده و در حال بهره برداری است. شکل ۲ نمای طرح پیشنهادی بهینه شده خط تولید فوق است که سامانه های کنترلی لازم در آن تعبیه و در محیط نرم افزار کتیا طراحی شده است. سامانه توزین دینامیک که در ورودی و خروجی طرح پیشنهادی تعبیه شده، قابلیت تعیین دبی جرمی مواد را داشته و می توان علاوه به محاسبه میزان بازده^۲ کلی خط، مقدار نسبت بخار به کربن را نیز در فرآیند کنترل کرد. همچنین سامانه تغییر زاویه طولی باعث تغییر زمان ماند مواد داخل رآکتور، بدون تغییر در سرعت چرخش را می دهد.

با توجه به ملاحظات موجود در بحث دمای کارکرد و نوع مواد ورودی و همچنین وجود بخار آب و پایین بودن میزان گوگرد در مجموعه کوره، در تحقیقات گذشته، استفاده از فلز استیل نوع ۳۱۰ برای بدنه اصلی کوره پیشنهاد شده است. اما با توجه به محدودیت های تامین و قیمت بسیار بالای آن در بازار، از لوله مانیسمن فولادی با ضخامت ۱۰ mm استفاده شد که قابلیت تحمل دمای لازم جهت اکتیواسیون را داشته و فقط از نظر دوام با آلیاژ اصلی متفاوت است که با توجه به آزمایشی بودن طرح، جوابگوی نیازهای پروژه می باشد. به دلیل کارکرد کوره در دمای بالا و افزایش ابعاد قابل

1- Steam/Char
2- Yield

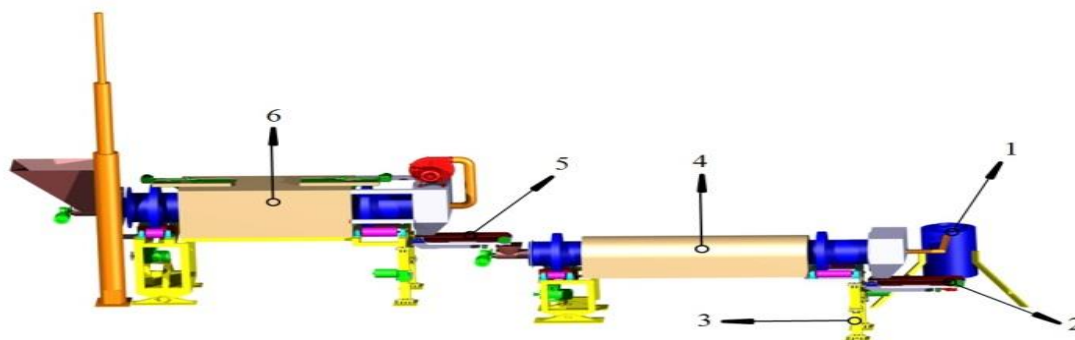
گرمایش (۵) بخار آبی با سرعت یکنواخت در جریان می‌باشد. در شکل ۵ کانتر دما بین واحد گرمایش و بدنه داخلی کوره نمایش داده شده است. از آنجایی که جداره خارجی کوره عایق‌بندی شده است. از تلفات گرمایی از بدنه به بیرون از طریق هدایت حرارتی صرف‌نظر شده است.

مدل‌سازی شد. در مجرای ورودی و خروجی، سرعت سیال 5 cm s^{-1} ، خواص تابشی و انتقال گرمای کوره و دامنه اطراف کوره اعمال و دمای واحد گرمایش 600°C که طبق تحقیقات انجام گرفته و با توجه به تامین حرارت مورد نیاز از داخل راکتور دمای مطلوب می‌باشد به‌عنوان ورودی‌های مساله در نظر گرفته شد. فضای بین کوره و واحد



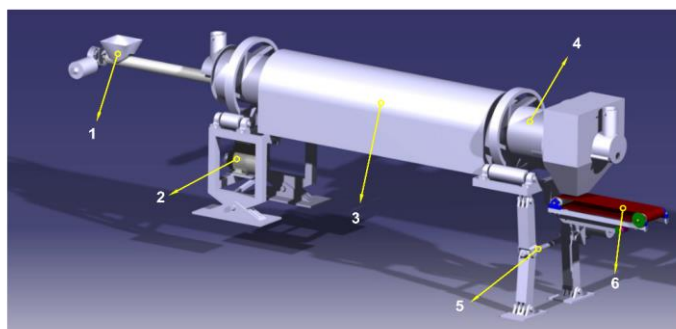
شکل ۱- خط تولید کربن فعال از پوست پسته (۱) بخارساز، (۲) کوره اکتیواسیون، (۳) کوره کربنیزاسیون، (۴) اکسیداسیون

Fig.1. Activated carbon production line from pistachio husk (1) Steam generator, (2) Activation kiln, (3) Char kiln, (4) Oxidizer



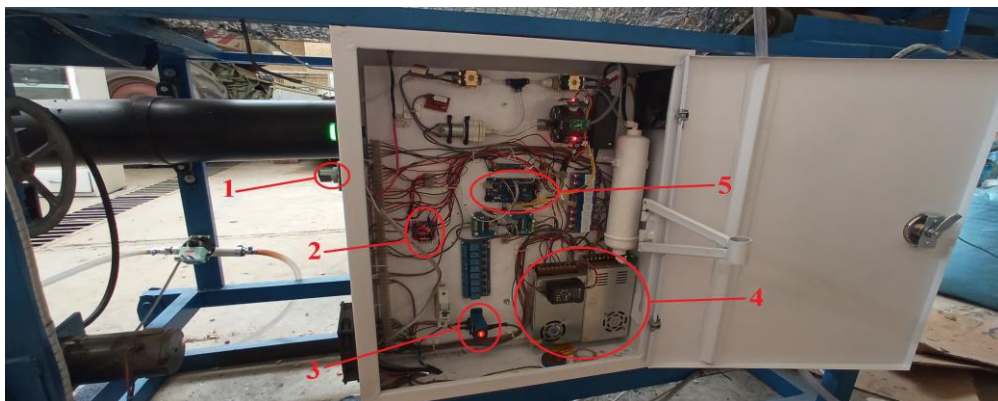
شکل ۲- طرح پیشنهادی خط تولید بهینه کربن فعال طراحی شده در نرم‌افزار CATIA: (۱) سامانه بخارساز، (۲) سامانه توزین دینامیک خروجی، (۳) سامانه تغییر زاویه طولی کوره، (۴) کوره فعال‌ساز، (۵) سامانه توزین دینامیک ورودی، (۶) کوره کربن

Fig.2. Proposed plan of the optimal activated carbon production line designed by CATIA software: (1) Steam generator system, (2) Outlet dynamic scaling system, (3) Variable kiln longitudinal angle system, (4) Activation kiln, (5) Inlet dynamic scaling system, (6) Char kiln



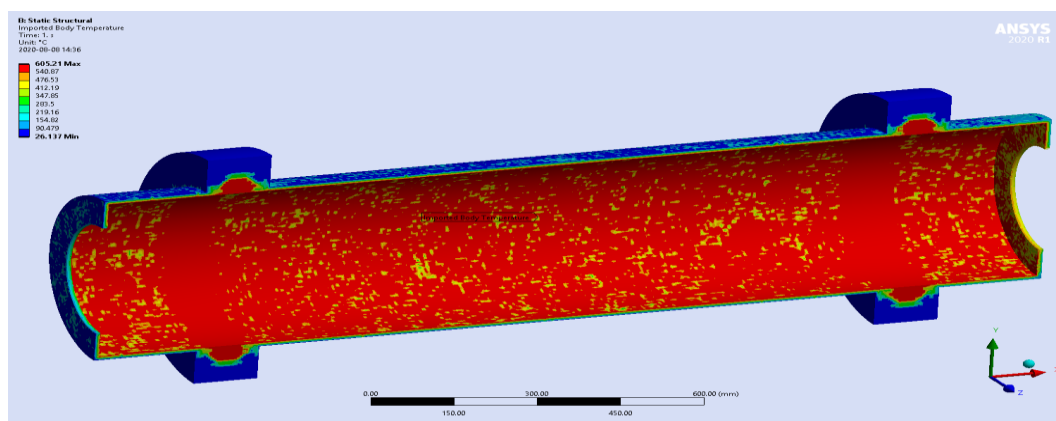
شکل ۳- واحد فعال‌ساز: (۱) واحد تغذیه، (۲) واحد تولید توان مکانیکی، (۳) پوشش عایق، (۴) استوانه گردان کوره، (۵) واحد تغییر زاویه طولی کوره، (۶) واحد توزین دینامیکی

Fig.3. Activator unit: (1) Feeder unit, (2) Mechanical power generation unit, (3) Insulation cover, (4) Rotary drum, (5) Variable kiln longitudinal angle unit, (6) Dynamic scaling unit



شکل ۴- تابلوی کنترل دستگاه: (۱) سوئیچ برق اصلی، (۲) درایور محرک کنترل شیر ورودی مشعل گازی، (۳) رله و نشانگر وضعیت کارکرد مشعل گازی، (۴) منابع تغذیه حسگرها و عملگرها، (۵) هسته کنترل مرکزی Arduino MEGA R3 2560

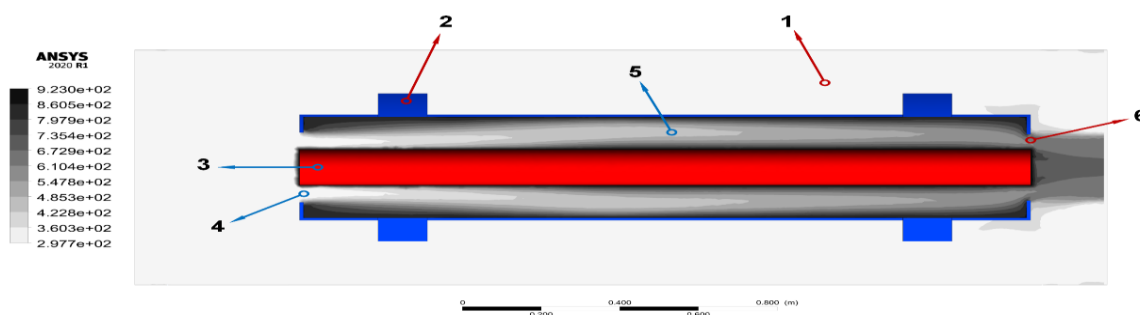
Fig.4. Device control panel: (1) Main switch, (2) Burner inlet valve actuator driver, (3) Relay and indicator of burner operation status, (4) Power supplies for sensors and actuators, (5) Arduino (MEGA R3 2560) as central processor unit



شکل ۵- مدل شبیه‌سازی شده کوره فعال‌ساز در محیط ANSYS CFX
Fig.5. Simulated model of activation kiln in ANSYS CFX environment

حدود 600°C به‌دست آمد. این توزیع دما در بدنه کوره به‌عنوان بار حرارتی برای تحلیل مکانیکی استفاده شد.

با توجه به وجود بخار آب در فضای بین دیواره داخلی کوره دوار و دیواره خارجی واحد تامین حرارت و حل مساله، دمای دیواره داخلی در



شکل ۶- وضعیت دیواره داخلی کوره در محدوده دمایی حدود 600°C : (۱) دامنه اطراف کوره، (۲) بدنه کوره، (۳) واحد گرمایش مرکزی، (۴) مجرای ورودی، (۵) بخار آب، (۶) مجرای خروجی

Fig.6. The condition of the inner wall of the kiln in the temperature range (600°C): (1) Domain around the kiln, (2) Kiln body, (3) Central heat generation unit, (4) Charge duct, (5) Steam, (6) Discharge duct

نتایج و بحث

مقایسه تغییر طول کوره در نرم‌افزار و آزمون تجربی

برای فراهم نمودن حرکت طولی دستگاه در اثر حرارت و در واقع فراهم نمودن شرایط درجه آزادی در راستای طولی، از یک غلتک با طول بیشتر استفاده گردید و حرکت جانبی روی آن غلتک مهار نگردید. این موضوع اجازه انبساط طولی رآکتور را در دماهای مختلف

فراهم می‌نماید. از طرفی انتهای رآکتور توسط شیارها و صفحات فشاردهنده طوری طراحی شده است که ضمن آب‌بندی مناسب، با کمک الیاف نسوز، قطعات در اثر انبساط به‌صورت تلسکوپی در داخل هم حرکت نمایند و اثرات انبساط را خنثی نمایند. شکل ۷ نمای کلی دستگاه پس از بازطراحی و ساخت را نشان می‌دهد.



شکل ۷- نمای کلی از دستگاه بازطراحی شده: (۱) شیر کنترل دبی مشعل، (۲) مشعل گازی، (۳) محل قرارگیری حسگر دما، (۴) مخزن ورودی مواد

Fig.7. Overview of the redesigned device: (1) Flow control valve, (2) Burner, (3) Location of the temperature sensor, (4) Input material bin

استناد نمود. در جدول ۲ نتایج تحلیلی و تجربی آزمون جفتی t- student خروجی نرم‌افزار IBM SPSS Statistics 26 ارائه شده است.

نتایج حاصل از ۵ آزمون تجربی در بازه‌های زمانی مختلف و همچنین تحلیل در ۵ اندازه مختلف مش‌بندی (جدول ۱)، نشان از عدم اختلاف معنی‌دار بین نتایج تجربی و تحلیلی در سطح ۵ درصد دارد، بنابراین با دقت قابل‌قبولی می‌توان به نتایج حاصل از تحلیل

جدول ۱- نتایج تحلیلی و تجربی دمای مواد خروجی در دمای ۶۰۰ درجه کوره

Table 1- Analytical and experimental results of T-temperature of outlet materials in 600°C of kiln temperature

آزمون تجربی Experimental test	1	2	3	4	5
دمای مواد خروجی Product temperature (°C)	545	570	550	547	565
تعداد المان Number of elements	154800	240587	368470	487549	687954
دمای مواد خروجی Product temperature (°C)	568	570	565	564	564

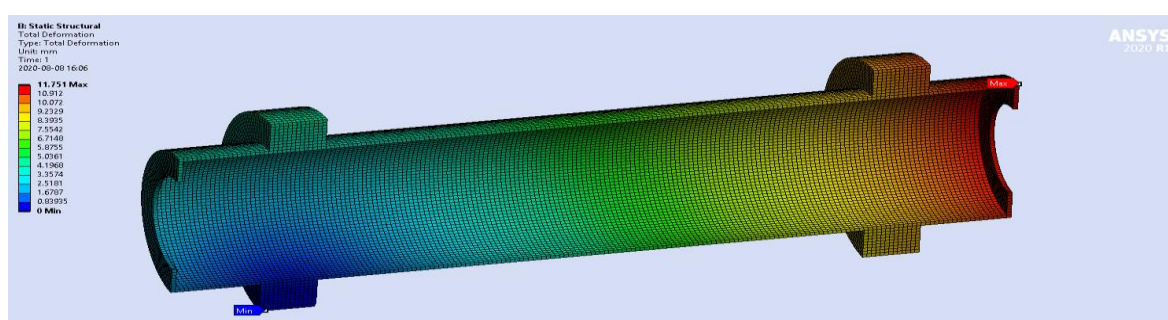
جدول ۲- آنالیز Paired samples T-test خروجی از نرم‌افزار SPSS (در سطح معنی‌داری ۹۵٪)

Table 2- Paired samples T-test output from SPSS software (95% Confidence Interval of the Difference)

	Mean	Std. Deviation	Std. Error	Mean Lower	Upper	t	df	Sig. (2-tailed)
Experimental- Analytical	-.192	.175	.078	-.409	.0258	-2.44	4	.071

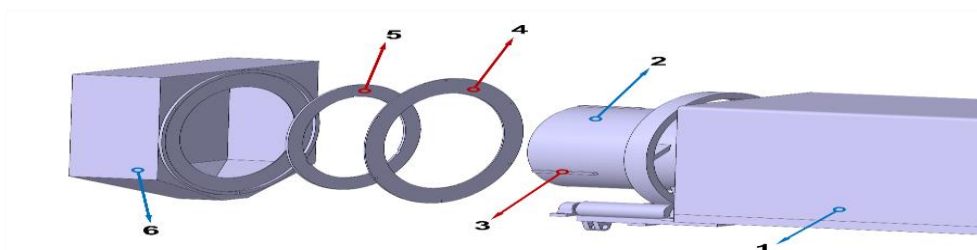
همچنین ایزوله بودن مجموعه از لحاظ عدم ورود اکسیژن از محدودیت‌های خاصی برخوردار است. اثرات ناشی از این تغییر طول، در طراحی کوره لحاظ شده و با توجه به آن تدابیری لحاظ گردید: استفاده از غلتک و تکیه‌گاه‌های مناسب و طراحی شوت و دریچه خروجی مواد که باید به‌صورت ثابت در انتهای کوره قرار گیرد و خروجی آن همواره نقطه معینی باشد. استفاده از ورق‌های سایشی که دارای شیار حرکت رآکتور باشند به همراه صفحات فشاری لازم در نقاطی از کوره که زائده‌های مربوط به این کار تعبیه شده‌اند اجباری خواهد بود (شکل ۹).

با توجه به میزان دمای داخلی بدنه به میزان 600°C و با مهار کردن یک سمت کوره که در مدل واقعی توسط واشر جانبی اعمال می‌شود، میانگین افزایش ابعاد کوره در راستای محور طولی آن معادل با $11/75\text{ mm}$ به‌دست آمد (شکل ۸). گرایلی و همکاران در تحقیق خود روی لوله فولادی با قطر 219 میلی‌متر، ضخامت 8 میلی‌متر و طول 3810 میلی‌متر در دمای 430 درجه سلسیوس به افزایش طول 21 میلی‌متر رسیدند (Grayeli, Naghipour, & Panahi, 2018). با توجه به نتایج به‌دست آمده، ملاحظه شد که بایستی سازوکار مناسبی جهت قابلیت افزایش طول رآکتور حین چرخش، طراحی و به‌کارگیری شود. انجام طراحی و ساخت به‌علت دوار بودن رآکتور و



شکل ۸- کانتور تغییر شکل کوره ناشی از دمای 600 درجه سلسیوس در دیواره داخلی کوره

Fig.8. Contour of internal kiln deformation at 600°C



شکل ۹- مکانیزم مهار اثرات تغییر شکل حرارتی: (۱) پوسته عایق کوره، (۲) کوره دوار، (۳) زائده‌های قفل‌کننده، (۴) صفحه فشاردهنده، (۵) صفحه سایشی، (۶) شوت خروجی

Fig.9. Thermal deformation control mechanism: (1) Kiln insulation cover, (2) Rotary drum, (3) Locking key, (4) Labyrinth ring, (5) Sliding ring, (6) Discharge chute

- استفاده از حالات مختلف عملکردی دو نوع آگروز در محدوده دمایی خاص.
- در دماهای پایین‌تر آگروز اول مورد استفاده قرار گرفته و آگروز دوم بسته می‌شود. در دماهای بالا عکس این حالت رخ می‌دهد. این سازوکار تعبیه شده منجر به عملکرد مطلوب حرارتی شده و تیمارهای مطلوب را جهت کاهش تنش‌های حرارتی بر روی مواد داخل کوره اعمال می‌نماید (شکل ۱۱).

نتایج تحلیل کانتور حرارتی بیانگر آن بود که جهت جلوگیری از اتلاف حرارت و تلفات رسانی، بایستی در اطراف کوره عایق‌بندی صورت گیرد. به این منظور از عایق سرامیکی با ضخامت 5 cm در اطراف کوره استفاده گردید (شکل ۱۰).

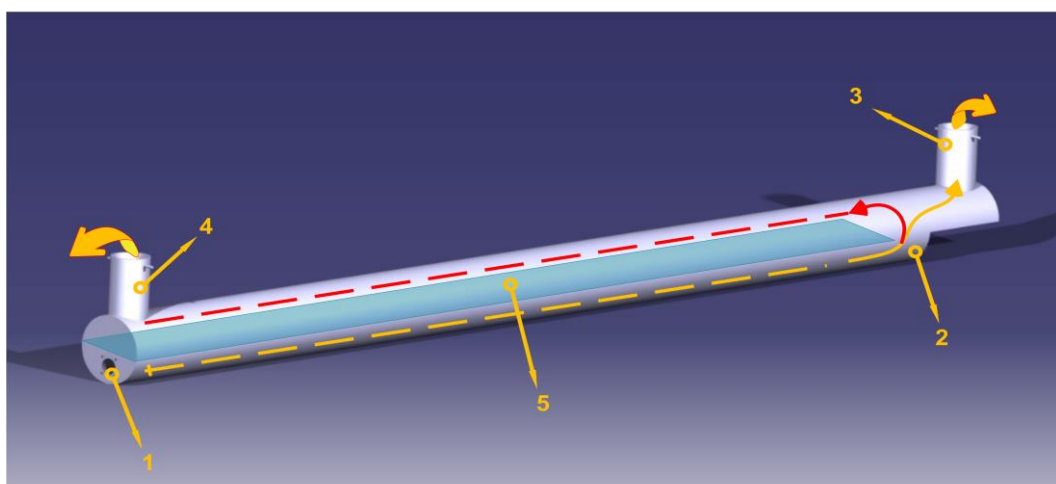
برای کنترل دمای عملکردی دستگاه، از دو ساز و کار استفاده شد:

- تغییر طول شعله مشعل گرمازا و نهایتاً تغییر حرارت تولیدی آن



شکل ۱۰- عایق‌بندی کوره

Fig. 10. Kiln insulation



شکل ۱۱- منبع حرارتی مرکزی و آگزوزهای دوگانه تعبیه شده برای شرایط مختلف حرارتی: (۱) محل نصب مشعل گرمازا، (۲) لوله گرمایش، (۳) خروجی اول با حداقل انتقال حرارت، (۴) خروجی دوم با حداکثر انتقال حرارت، (۵) صفحه جداکننده

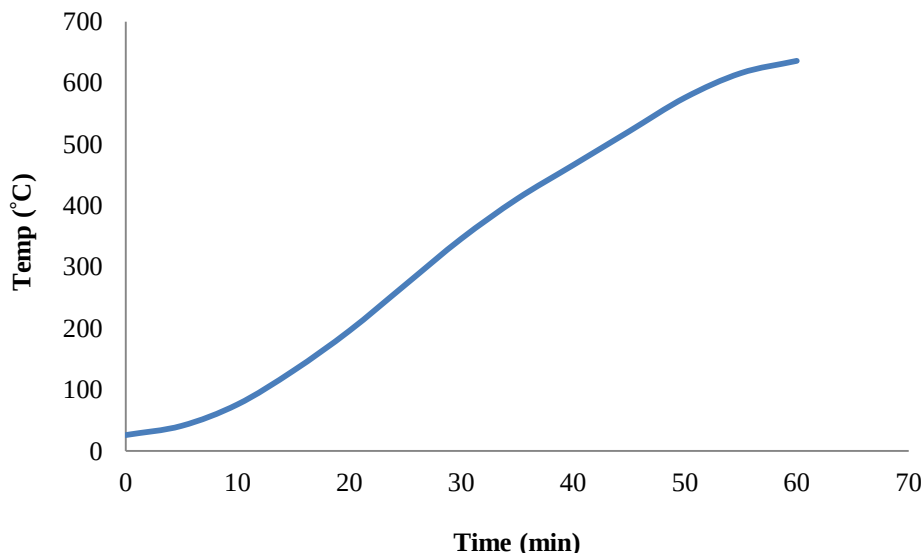
Fig.11. Central heat generator and its dual exhausts designed for different thermal conditions: (1) Burner position, (2) Heating Pipe, (3) First exhaust for minimum heat exchange, (4) Second exhaust for maximum heat exchange, (5) Separation Plate

نتیجه‌گیری

پس از طراحی دستگاه در نرم‌افزار CATIA و ساخت سامانه مطابق طرح بهینه‌شده، تحلیل‌های حرارتی و مکانیکی راکتور در نرم‌افزار ANSYS انجام و تنش‌های وارده با توجه به درجه آزادی سامانه تعیین شد. میزان افزایش طول کلی راکتور ۱۱/۷۵ mm و دمای سطح محصول در زمانی که دمای واحد گرمایش مرکزی 600°C باشد حدود 565°C برآورد شد. مقادیر تجربی به‌ترتیب ۱۱/۵ mm و 550°C به‌دست آمد. ضخامت لایه عایق ۵ cm و جنس آن عایق سرامیکی مجهز به لایه آلومینیومی انتخاب شد. سازوکار مناسبی در قسمت انتهایی کوره جهت قابلیت ازدیاد طول طراحی و به‌کار گرفته شد. همچنین به‌منظور کاهش تنش‌های حرارتی و

منحنی تغییرات درجه حرارت بدنه راکتور در شکل ۱۲ نشان داده شده است. آگزوز اول در دمای ۱۰۰ و آگزوز دوم در دمای 300°C درجه سلسیوس فعال شدند. در ابتدا مشعل با حداقل توان (۲۰ درصد) شروع به کار کرد، در این حالت آگزوز دوم بسته و آگزوز اول کاملاً باز بود. در دمای 100°C درجه آگزوز اول بسته و آگزوز دوم باز شد. در دمای 300°C درجه، به‌تدریج (هر ۴ درجه سلسیوس افزایش دما، ۱ درصد افزایش توان مشعل) توان مشعل به ۱۰۰ درصد توان اسمی خود رسید. یکنواختی افزایش دما و جلوگیری از ایراد تنش‌های حرارتی در بدنه راکتور باعث افزایش عمر آن می‌شود. افزایش دمای راکتور به بیشتر از دمای تعیین‌شده 600°C درجه سلسیوس به‌علت داغ شدن بیش از حد کوره داخلی و انتشار حرارت آن حتی بعد از کاهش طول شعله در مشعل گرمازا می‌باشد.

مکانیکی به بدنه رآکتور، از سامانه انتقال حرارت مرحله‌ای استفاده گردید. نتایج نشان داد که نتایج تحلیل نرم‌افزاری با خطای ۳ درصد با نتایج آزمون تجربی تفاوت دارند. در نتیجه مقادیر نرم‌افزاری قابل‌استناد بوده و مبنای اصلاحات و تغییرات در ساخت دستگاه قرار گرفت.



شکل ۱۲- منحنی افزایش دمای رآکتور با استفاده از روش‌های دوگانه کنترل حرارت
Fig.12. Reactor temperature curve using dual heat control methods

محترم عامل شرکت خدمات فنی و مهندسی هزار صنعت، مدیریت
محترم عامل و هیئت مدیره محترم شرکت کربن فعال پارس
رفسنجان، جناب آقای مهندس سروش توتونچیان و جناب آقای دکتر
آیدین ایمانی.

سپاسگزاری

نویسندگان مراتب تشکر خود را از همه اساتید و دوستانی که در
انجام این پروژه به هر نحوی سهم بوده‌اند، اعلام می‌دارد: مدیریت

References

1. Aquino, F. L., Hernandez, J. R., & Capareda, S. C. (2007). Elucidating the solid, liquid and gaseous products form pyrolysis of cotton gin trash. *ASABE Annual International Meeting*, 12(07). <https://doi.org/10.13031/2013.23321>
2. Aworn, A., Thiravetyan, P., & Nakbanpote, W. (2008). Preparation and characteristics of agricultural waste activated carbon by physical activation having micro- and mesopores. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 82(2), 279-285. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2008.04.007>
3. Bhati, S., Mahur, J. S., Dixit, S., & Choubey, O. N. (2013). Surface and adsorption properties of activated carbon fabric prepared from cellulosic polymer: Mixed activation method. *Bulletin of the Korean Chemical Society*, 34(2), 569-573. <https://doi.org/10.5012/bkcs.2013.34.2.645>
4. Byrne, C. E., & Nagle, D. C. (1997). Carbonization of wood for advanced materials applications. *Carbon*, 35(2), 259-266. [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(96\)00136-4](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(96)00136-4)
5. Chen, D., Chen, X., Sun, J., Zheng, Z., & Fu, K. (2016). Pyrolysis polygeneration of pine nut shell: Quality of pyrolysis products and study on the preparation of activated carbon from biochar. *Bioresource Technology*, 216, 629-636. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.05.107>
6. Daneshmandi, M., Azizi, M., & Farush, R. (2014). The Study on Physical, Chemical and Biochemical Characteristics of Pistachio (*Pistacia vera* L. cv. Daneshmandi) and Its Comparison to Some Commercial Cultivars From Iran. *Journal of Horticultural Science*, 28(1), 10-17. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jhorts4.v0i0.34996>
7. Demiral H., Demiral, I., Karabacakoğlu, B., & Tümssek, F. (2011). Production of activated carbon from olive bagasse by physical activation. *Chemical Engineering Research and Design*, 89(2), 206-213.

8. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2010.05.005>
8. Faramarzi, A. H., Kaghazchi, T., Ale Ebrahim, H., & Afshar Ebrahimi, A. (2015). Experimental investigation and mathematical modeling of physical activated carbon preparation from pistachio shell. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 114, 143-154. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2015.05.012>
9. Fatemi, S., & Saadatmehr, A. (2005). Mathematical modeling of dynamic and multicomponent adsorption of light hydrocarbons in fixed activated carbon substrate. *Journal of the College of Engineering*, 39(2). (in Persian with English abstract).
10. Grayeli, M., Naghipour, M., & Panahi, S. (2018). *Influence of friction coefficient and thermal expansion coefficient on composite sections under fire loading*. Fourth National Conference on Civil Engineerind and Architecture with emphasis on indigenou technologies of Iran. Tehran. (in Persian).
11. Hoseinzadeh, E., & Rahmani, A. (2012). Producing activated carbon from scrap tires by thermo-chemical method and evaluation its efficiency at removal racid black1 dye. *Iranian Journal of Health and Environment*, 4(4), 427-438. (in Persian with English abstract).
12. Iran pistachio association, Statistical archive. (2017). Retrieved from www.iranpistachio.org (in Persian with English abstract).
13. Jadidian, F., Talaee, M., Mahdavi, S., & Homs, A. (2016). Investigation on thermal energy and activated carbon production from Furfural residue. *Journal of Forest and Wood Product*, 69(3), 571-583. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/jfwp.2016.59896>
14. Kamandari, H., Hashemipour rafsanjani, H., Najarzadeh, H., & Rezaei, H. (2012). Investigation of the synthesis of physically activated carbon in a rotating reactor. pp. 1-5. (in Persian with English abstract).
15. Lyubchik, S. B., Benaddi, H., Shapranov, V. V., & Beguin, F. (1997). Activated carbons from chemically treated anthracite. *Carbon*, 35(1), 162-165. [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(97\)81121-9](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(97)81121-9)
16. NaderiParizi, S., Beheshti, B., & Roustapour, O. (2015). Investigation of pistachio (*Kalleh Ghoochi* v.) drying kinetics in a new intelligent rotary dryer under vacuum. *Journal of Food Science and Technology*, 13(54), 135-143. (in Persian with English abstract).
17. Ozsin, G., Yucel, H., & Behlulgil, A. (2011). Production and characterization of activated carbon from pistachio-nut shell. Middle easr technical univerty.
18. Patil, B. S., & Kulkarni, K. S. (2012). Development of high surface area activated carbon from waste material. *International Journal of Advanced Engineernig Research and Studies*, 1(2), 2249-8974.
19. Safa, S., Azimirad, R., Kamandari, H., & Bayat, F. (2016). Comparison of hardness of activated carbon synthesized from agricultural wastes by physical method. pp. 1-9.
20. Sayyahzadeh, A., Ganjidoust, H., & Ayati, B. (2014). Optimization of activated carbon production from almond shell for adsorption of soluble oil containants. *Journal of Water and Wastewater*, 25(5), 108-117. (in Persian with English abstract).
21. Tehranizadeh, M., Ghazanfari moghadam, A., & Hashemipour rafsanjani, H. (2012). Pyrolysis of date palm trunks to Produce Active Carbon. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 13(3), 77-88. (in Persian with English abstract).
22. Ullmann, F., Gerharts, W., Yamamoto, Y. S., Campbell, F. T., Pfefferkorn, R., & Rounsaville, J. F. (1985). Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry. Weinheim: VCH.



Thermal Analysis and Exergy of Linear Fresnel Reflectors for Feasibility of Use in Greenhouse Heating System

S. Noroozi¹, A. Maleki^{2*}, Sh. Besharati³

1- M.Sc. Student of Mechanical Engineering of Biosystems Department, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

2- Associate Professor of Mechanical Engineering of Biosystems Department, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

3- Lecture of Mechanical Engineering of Biosystems Department, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

(*- Corresponding Author Email: maleki@sku.ac.ir)

<https://doi.org/10.22067/jam.2021.72345.1060>

Received: 05 September 2021

Revised: 07 November 2021

Accepted: 15 November 2021

Available Online: 15 November 2021

How to cite this article:

Noroozi, S., Maleki, A., & Besharati, Sh. (2023). Thermal Analysis and Exergy of Linear Fresnel Reflectors for Feasibility of Use in Greenhouse Heating System. *Journal of Agricultural Machinery*, 13(2), 147-162. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jam.2021.72345.1060>

Introduction

Solar energy is one of the most important sources of renewable energy, and it is used to address problems related to energy needs, including increasing fossil fuels, rising energy transportation costs, higher energy demand worldwide, and greenhouse gas emissions. Solar collectors harness the sun's thermal energy to convert it into useful and usable energy. Solar collectors are divided into several types, including parabolic trough collectors (PTCs), linear Fresnel reflectors (LFRs), solar plates, and central towers. Among these, the most common heat generation systems are linear adsorption technologies. In this study, we examine the use of LFR technology for greenhouse heating during the winter in Shahrekord.

Materials and Methods

Previous studies (Huang *et al.*, 2014) were used for optical analysis. The Daneshyar model was utilized to calculate the amount of solar energy available at a particular location. Mathematical formulas were employed to calculate the instantaneous energy equilibrium, and a heat transfer resistance model was developed to calculate the heat loss of different parts of the collector. To create a model, the total amount of exergy must first be calculated, which can be done by using the Petlla formula given by Bellos *et al.* (2019).

Results and Discussion

The following results were obtained from this study:

- The proposed mathematical model for calculating solar energy was accurate in terms of daily and instantaneous performance. This model was valid for both clear and cloudy days, making it applicable in a variety of weather conditions.
- The maximum useful heat production of the current system for February was about 2.5 kW, resulting in an increased liquid temperature of 16 degrees Celsius in the heat tank.
- The maximum thermal efficiency of the Fresnel collector during the day was 64%, while the average daily efficiency was 56.4%.
- The most significant parameters that affected the production of useful energy were the position of the sun during the day and the number of cloudy days.
- The system was capable of heating stored water to 98 degrees per day, available for up to 14 hours.
- The system under consideration can be used to produce heat up to 1260 watts for 15 hours without heating the tank. The generated heat can be utilized in the food industry for steam production and industrial desalination of water.
- The decrease in exergy efficiency was due to the reduction in the thermal efficiency of the system and the

increase in the thermal difference between the collector and ambient temperatures. Higher values can be achieved by reducing the heat losses, which is a reason to reduce the exergy efficiency of the system.

Conclusion

This paper investigated the daily performance of a linear Fresnel collector with an 18 square meter mirror field, a parabolic collector, and an insulated storage tank with a volume of 250 liters. The investigation included experimental analysis and theoretical formulation of thermal phenomena under the weather conditions of Shahrekord. The mathematical model developed for this system is based on the energy balance in the collector and storage tank. The results show that this is an efficient greenhouse heating system, with an average thermal efficiency of 56%, which is reasonable and competitive with other similar technologies. Additionally, the cost of construction and maintenance of this system is much lower than that of competitors.

Keywords: Concentrated collectors, Heat loss, Reflector, Thermal efficiency

مقاله پژوهشی

جلد ۱۳، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۲، ص ۱۶۲-۱۴۷

تحلیل حرارتی و اکسرژی متمرکزکننده فرنل خطی به منظور امکان‌سنجی استفاده در سامانه گرمایش گلخانه

سعید نوروزی^۱، علی ملکی^{۲*}، شاهین بشارتی^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۲۴

چکیده

در سال‌های اخیر افزایش آلودگی هوا، قیمت حامل‌های انرژی و تنش آبی به دلیل تغییرات اقلیم باعث شده تا استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به‌ویژه انرژی خورشیدی افزایش یابد. جمع‌کننده‌های خورشیدی یکی از منابع مهم جمع‌آوری و تامین انرژی گرمایی هستند. در این راستا بازده و کارایی این کلکتورها و اقدامات لازم برای افزایش این عامل‌ها از اهمیت خاصی برخوردار است. لذا در این پژوهش عملکرد روزانه یک بازتابنده فرنل خطی جهت استفاده در سیستم گرمایش یک گلخانه در بهمن ماه در شرایط آب و هوایی شهرکرد به‌صورت عددی بررسی خواهد شد. این سامانه دارای یک گیرنده صفحه تخت با ۱۸ مترمربع میدان آینه بوده و به یک مخزن ذخیره‌سازی با حجم ۲۵۰ لیتر متصل شده است. علاوه بر این، بر اساس تعادل انرژی در جمع‌کننده و مخزن ذخیره‌سازی، یک مدل ریاضی برای پیش‌بینی عملکرد روزانه سامانه مورد نظر تهیه شد. تحلیل‌ها نشان داد که بیشینه بازده حرارتی سامانه برابر با ۶۴ درصد و حداکثر تولید حرارت مفید ۵/۱ کیلووات است که توانایی گرمایش محیط گلخانه را در طول شب در ماه بهمن را دارد. همچنین از نتایج این پژوهش می‌توان برای ارزیابی سامانه‌های متمرکز خورشیدی و به‌ویژه بازتابنده‌های فرنل خطی استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: بازتابنده، بازده حرارتی، تلفات حرارتی، متمرکزکننده‌های متمرکز

مقدمه

نشان‌دهنده اهمیت اصلاح مصرف انرژی در این بخش است همچنین میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در کشورهای در حال توسعه رو به افزایش است این در حالی است که در جوامع توسعه‌یافته این مقدار رو به کاهش است (Jovanović, Kaščelan, Despotović, & Kaščelan, 2015).

رشد و توسعه کشاورزی نوین استفاده از ادوات و ماشین‌آلات مدرن، استفاده از بسترهای کشت مصنوعی و گلخانه‌ای در این صنعت موجب ایجاد ارتباط مستقیم بین رشد کشاورزی و انتشار آلودگی شده است و باید در جهت کاهش ایجاد آلودگی بخش کشاورزی راه‌حلی‌هایی ارائه شود (Babu, Raj, & Arasu, 2019).

بررسی‌های انجام شده بر روی مصرف انرژی کشت گلخانه‌ای نشان می‌دهد که بیشترین هزینه تولید گلخانه‌ای مربوط به گرمایش گلخانه است. بستگی به نوع سامانه گرمایشی می‌تواند تا ۴۰ درصد هزینه‌ی نهایی محصول را شامل شود (Baudoin et al., 2013). همچنین در کشوری مانند ترکیه این مقدار بیشتر و برابر با ۶۰ تا ۸۰ درصد هزینه‌های تولید نهایی محصول را شامل می‌شود (Ozgener & Hepbasli, 2006). برخی تحقیقات نشان می‌دهد که بیش از ۹۰

کشاورزی یکی از پردرآمدترین و در عین حال پرمصرف‌ترین بخش تولیدی در کشور می‌باشد. تحقیقات نشان می‌دهد افزایش بهره‌وری در کشاورزی با افزایش مصرف انرژی همراه است به‌طوری که در ۵۰ سال گذشته تولید گازهای گلخانه‌ای در این بخش دو برابر شده است (Smith et al., 2014). طبق مطالعات صورت‌گرفته، بخش کشاورزی بیش از ده درصد از گازهای گلخانه‌ای جهان را تولید می‌کند اگر سهم منابع طبیعی را نیز به حساب بیاوریم این مقدار به حدود ۳۰ درصد خواهد رسید (Smith et al., 2008) که خود

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

۳- مربی، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

(*) نویسنده مسئول: Email: maleki@sku.ac.ir

<https://doi.org/10.22067/jam.2021.72345.1060>

درصد هزینه‌های تولید گلخانه‌ای مربوط به هزینه گرمایش است (Sherafati, 2009). کمینه دمای کمتر از ۱۲ درجه سلسیوس اثرات بدی بر عملکرد و کیفیت بیشتر محصولات کشاورزی دارد (Hassan, 2005). انرژی خورشیدی یکی از مهم‌ترین منابع انرژی تجدیدپذیر است و بهره‌برداری از آن برای مقابله با مشکلات امروزه انرژی مانند افزایش مصرف سوخت فسیلی، افزایش قیمت برق، تقاضای بالای انرژی در سراسر جهان و انتشار گازهای گلخانه‌ای پاسخ مناسبی است (Balaji, Reddy, & Sundararajan, 2016). در پژوهشی عملکرد سامانه گرمایش تجدیدپذیر برای گلخانه با استفاده از پنل‌های فتوولتائیک برای تولید برق و ذخیره‌ی آن به‌منظور راه‌اندازی پمپ زمین گرمایی در طول شب بررسی گردید (Anifantis, Colantoni, & Pascuzzi, 2017). همچنین گروهی دیگر از پژوهشگران توانایی یک مدل سامانه‌ی متمرکزکننده حرارتی خورشیدی آبی برای گرمایش گلخانه را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها گزارش کردند که سامانه‌ی پیشنهادی هزینه‌های گرمایش گلخانه را تا ۸۱/۵ درصد کاهش می‌دهد (Attar & Farhat, 2015). این مقدار نشان‌دهنده اهمیت استفاده از متمرکزکننده‌های خورشیدی در سامانه‌های گرمایشی است. گرمایش خورشیدی خود به دو نوع متمرکز و غیرمتمرکز مانند متمرکزکننده‌های صفحه تخت تقسیم می‌شوند.

متمرکزکننده‌های متمرکز به انواع سهموی (PTC)^۱، بازتابنده فرنل خطی (LFR)^۲، بشقاب خورشیدی و برج خورشیدی تقسیم می‌شود. در میان آن‌ها، متداول‌ترین سامانه‌های تولید گرما فناوری‌های جاذب خطی هستند، مانند انواع سهموی و متمرکزکننده فرنل که عملکرد تقریباً یکسانی دارند (Xu et al., 2014). در صورت ثابت نگه داشتن ناحیه جاذب، افزایش نسبت تراکم متمرکزکننده فرنل با افزودن بازتابنده‌های اضافی روی زمین قابل حل خواهد بود (Nixon, Dey, & Davies, 2013). بسیاری از مطالعات با تنظیم متغیرهای مختلف بهینه‌سازی از جمله عرض میدان، فاصله کانونی و فاصله آینه‌ها، بهینه‌سازی متمرکزکننده فرنل را مورد بررسی قرار دادند (Bellos et al., 2019). در مطالعاتی متمرکزکننده فرنل را با ردیابی آزمون مورد بررسی قرار دادند و آن‌ها ۶۱٪ میانگین عملکرد بازده حرارتی را با سطح دمای مایع نزدیک به ۴۰۰ درجه سلسیوس به‌دست آوردند (Huang, Li, & Huang, 2014).

در طرح‌های بازتابنده ثانویه می‌توان به دو نوع اصلی دوزنقه‌ای و سهموی اشاره کرد. در یکی از مطالعات به‌طور آزمایشی متمرکزکننده فرنل دوزنقه‌ای بدون پوشش بررسی شد و بازده حرارتی نسبتاً کم ۳۰ درصد و دمای آب نزدیک به ۷۰ درجه سلسیوس به‌دست آمد. دلیل

این بازدهی کم را طراحی بازتابنده ثانویه و تلفات نوری دانستند (Mokhtar, Boussad, & Noureddine, 2016). در یکی دیگر از مطالعات متمرکزکننده فرنل که با بازتابنده ثانویه دوزنقه‌ای بررسی شده بود، حداکثر بازده نوری پیکربندی پیشنهادی نزدیک به ۷۵٪ بود که یک مقدار مناسب قابل رقابت با انواع سهموی است (Huang et al., 2014). بازتابنده ثانویه با شکل سهموی، کارآمدتر از بازتاب مربوطه با هندسه دوزنقه است (Loni, Kasaeian, Asli, Ardeh, & Ghobadian, 2016). در تحقیقی دیگری که نوع فرنل با بازتابنده ثانویه سهموی با نمک مذاب کار می‌کرد حداکثر بازده سامانه برابر با ۶۵٪ گزارش شد (Qiu, He, Cheng, & Wang, 2015). به‌منظور حداکثر رساندن بازدهی نوری بازتابنده فرنل خطی همراه با سامانه ردیابی خورشیدی طرح‌های مختلفی برای این سامانه در نظر گرفته شده است در یکی از مطالعات سامانه طراحی شده دارای دقت ± 0.006 و افزایش ۱۶/۶۴ درصدی انرژی در انرژی تولیدی است (Barbón et al., 2021). در جدیدترین مطالعات صورت گرفته استفاده از نانو سیال‌ها به‌عنوان سیال انتقال حرارت مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که باعث افزایش بازدهی حرارتی این سیستم‌ها می‌شود (Said et al., 2021; Wang et al., 2020). کاربرد سامانه فرنل خطی تنها به تولید انرژی حرارتی مفید نبوده و کاربرد آن در طراحی سیستم‌های فتوولتائیک متمرکز نیز بررسی شده است این سیستم‌ها به‌دلیل دارا بودن چگالی نوری بیشتر بازدهی نوری بالاتر را ارائه می‌دهند (Boito & Grena, 2021).

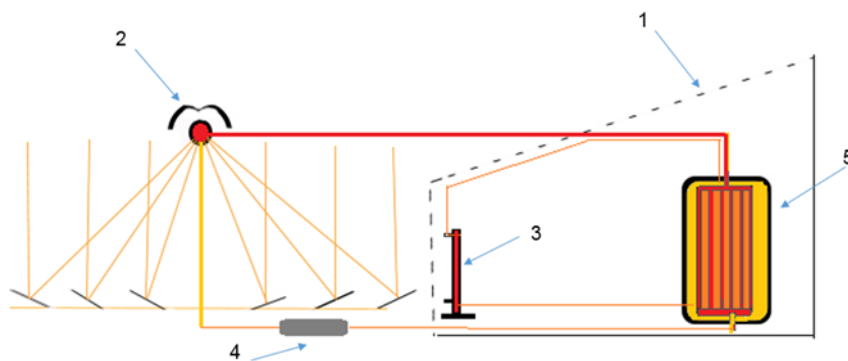
مشکلات زیست‌محیطی استفاده از سوخت‌های فسیلی و چالش‌های کشت گلخانه در فصل‌های خارج از کشت که معمولاً با بیشینه‌ی مصرف انرژی کشور همراه است، استفاده از یک سامانه گرمایش خورشیدی با مزایایی مانند ثبات قیمت و تولید انرژی مورد اهمیت است زیرا انرژی تولیدی رایگان و همیشگی است. با توجه تحقیقات انجام شده امکان‌سنجی به‌کارگیری سامانه متمرکزکننده فرنل خطی برای گرمایش گلخانه، از اهمیت خاصی برخوردار است. لذا با توجه به شرایط آب و هوایی فصل زمستان شهرکرد، یک مدل ریاضی برای پیش‌بینی عملکرد روزانه سامانه ایجاد شده، معادلات تحلیلی در مورد عملکرد سامانه به‌منظور معرفی یک مدل ریاضی از سامانه‌های متمرکزکننده فرنل یکپارچه پیشنهاد می‌شود. می‌توان بیان نمود که هدف این کار ارائه یک تحلیل نظری جامع، برای تعیین عملکرد روزانه یک متمرکزکننده فرنل خطی و امکان‌سنجی استفاده از این سیستم برای گرمایش گلخانه به‌منظور کاهش هزینه‌های تولید و رفع موانع کشت گلخانه‌ای در ماه‌های سرد سال است.

مواد و روش‌ها

با توجه به ضرورت بررسی سامانه گرمایش گلخانه با استفاده از

- 1- Parabolic trough collector
- 2- Linear fresnel reflector

کامل نیاز حرارتی آن است. برای ارزیابی سامانه‌ی گرمایش طراحی شده، از گلخانه با ساختار یک طرفه به طول ۵ متر، عرض ۲/۱۶ متر با ارتفاع قسمت جلو گلخانه ۱/۵ متر و قسمت عقب ۲/۷۵ متر استفاده می‌شود. در مورد ساختار گلخانه از قوطی‌های آهنی با سطح مقطع ۴×۴ سانتی‌متر و سطح بیرونی آن پوشیده شده از ورق‌های پلی‌کربنات شفاف با ضخامت ۱۰ میلی‌متر ساخته شده (Jafari et al., 2017). به‌منظور استفاده از انرژی حرارتی خورشیدی از یک بازتابنده فرنل خطی همراه با یک مخزن ذخیره‌سازی حرارتی استفاده شده است. سامانه گرمایشی طوری طراحی شده است تا حرارت تولیدی متمرکزکننده در مخزن، ذخیره و مبدل حرارتی وظیفه انتقال حرارت به محیط گلخانه را دارد (شکل ۱).



شکل ۱- نمای کلی یک سامانه گرمایشی فرنل خطی نصب‌شده در گلخانه: ۱- گلخانه، ۲- متمرکزکننده خطی فرنل، ۳- مبدل حرارتی، ۴- پمپ، ۵- مخزن

Fig.1. Overview of a linear Fresnel heating system installed in the greenhouse: 1-Greenhouse, 2- Fresnel linear concentrator, 3- Heat exchanger, 4- Pump, 5- Tank

محاسبه‌ی انرژی جذب خورشیدی

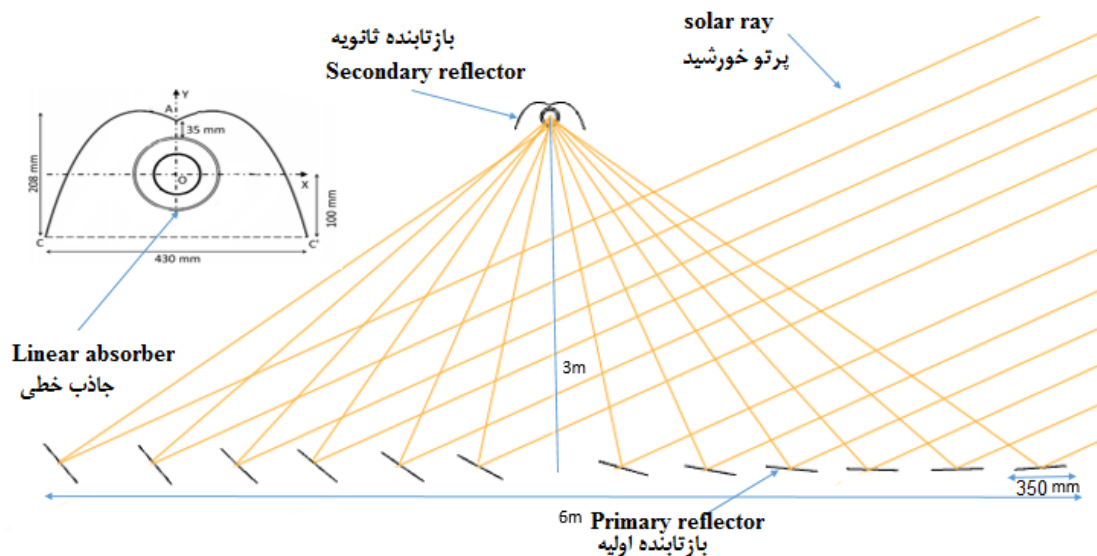
عوامل متعددی در میزان تابش خورشیدی در هر منطقه موثر است مثل طول و عرض جغرافیایی، ارتفاع از سطح دریا، میزان آلودگی، گرد و غبار، عوامل هواشناسی مانند رطوبت و مقدار ابر و غیره. اکثر مدل‌های پیش‌بینی نیز بر اساس این اطلاعات پایه‌گذاری شده‌اند علاوه بر شرایط آب و هوایی، وضعیت اقتصادی نیز باید مورد توجه قرار گیرد. می‌توان از مدل دانشیار برای محاسبه‌ی مقدار انرژی نوری خورشید استفاده کرد.

پارامترها و زوایه‌های خورشیدی

برای محاسبه مقدار تابش خورشیدی رسیده به سطح زمین احتیاج به تعریف پارامتر و زوایه‌های خورشیدی است که در موارد زیر اشاره شده است (Ebrahimpour, Maaref, & Nairi, 2009).

جمع‌کننده‌های فرنل خطی، گلخانه‌ای با ابعاد و نیاز حرارتی مشخص در نظر گرفته شد. بر اساس نیاز حرارتی گلخانه، نیاز حرارتی ۱۹۶۰ وات در کمینه دمای منفی ۲۰ درجه سلسیوس است (Jafari, Mortezapour, Jafari Naeimi, & Maharlooei, 2017). سامانه متمرکزکننده فرنل خطی طوری طراحی شده است که (این طرح، شامل تعدادی بازتابنده‌های اولیه و نوع بازتابنده ثانویه) برای دستیابی به چگالی نوری مناسب و تامین بخشی از نیاز حرارتی در طول شب فراهم کند. برای محاسبه چگالی نوری مناسب ابتدا باید طرح کلی سیستم را از نظر بازدهی نوری سنجید سپس بر اساس بازدهی حرارتی می‌توان میدان آینه‌های اولیه را مشخص نمود. همچنین این سامانه دارای یک مخزن ذخیره حرارتی برای تامین نیاز حرارتی گلخانه در شب و یک المنت حرارتی کمکی برای جبران

بازتابنده فرنل خطی مورد بررسی در شکل ۲ نشان داده شده است. این متمرکزکننده دارای یک گیرنده با جاذب خطی است. جاذب با استفاده از مواد عایق شفاف، عایق‌بندی شده است. جهت‌گیری جمع‌کننده جنوب-شمال (زاویه آزیموت صفر) است. محاسبات و ارزیابی نظری متمرکزکننده فرنل برای شرایط آب و هوایی شهرکرد (مدار ۲۳ تا ۳۲ درجه عرض جغرافیایی) در ماه بهمن انجام شد. همچنین جهت افزایش بازدهی سامانه یک سامانه ردیابی خودکار برای حرکت بازتابنده‌ها در نظر گرفته شده است. سرعت باد ثابت و به مقدار ۳ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده و از تلفات حرارتی در مسیر حرکت سیال خارج از جاذب صرف‌نظر شده است. مایع کار در متمرکزکننده آب و سطح دمای بررسی شده تقریباً ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد (سامانه آنتالپی کم) است.



شکل ۲- قسمت‌های مختلف یک سامانه بازتابنده فرنل خطی
Fig.2. Different parts of a linear Fresnel reflector system

می‌شود.

$$\cos \theta_z = \sin \delta \cdot \sin \phi + \cos \delta \cdot \cos \phi \cos \omega \quad (6)$$

در رابطه‌ی (۶)، مقدار ϕ برابر با عرض جغرافیایی محل می‌باشد.

بازده نوری η_{opt}

بازده نوری به وسیله‌ی پارامترهای زیر مانند ضریب جذب گیرنده (α)، ضریب بازتاب آینه‌ها (ρ)، ضریب انتقال پوشش (τ) و عامل رهگیری (γ) محاسبه می‌شود. علاوه بر این، برای در نظر گرفتن تغییر بازده نوری برای موقعیت‌های مختلف خورشید، از یک پارامتر اضافی، اصلاح کننده زاویه بازتاب خورشید (K) استفاده می‌شود. بنابراین، می‌توان نوشت:

$$\eta_{opt} = \alpha \cdot \tau \cdot \rho \cdot \gamma \cdot k \quad (7)$$

عامل رهگیری γ به عنوان کسری از تابش منعکس شده در جاذب به کل تابش منعکس شده تعریف می‌شود و برابر با ۰/۹۵ انتخاب می‌شود.

مشخصات سامانه گرمایشی فرنل خطی

نوع سامانه گرمایش خورشیدی متمرکز کننده فرنل خطی است که شامل ردیف‌های آینه به طول ۳ متر و عرض ۰/۳۵ است. طول جاذب ۳/۵ متر کمی بیشتر از طول آینه‌های اولیه در نظر گرفته می‌شود (به دلیل تابش مایل خورشید و افزایش بازدهی نوری). تعداد ردیف آینه‌ها بر اساس نیاز حرارتی قابل تغییر خواهد بود با توجه به نیاز حرارتی شبانه گلخانه به مخزن با حجم ۲۵۰ لیتر آب نزدیک ۱۰۰ درجه

زاویه انحراف δ : زاویه بین پرتوهای خورشید و خط استوا است

و از رابطه (۱) بر حسب درجه محاسبه می‌شود.

$$\delta = 23.45 \cdot \sin \left[\frac{360}{365} \cdot (284 + N) \right] \quad (1)$$

در رابطه (۱) مقدار N برابر با شماره روز بر مبنای اول ماه میلادی است.

زاویه ساعت ω : برای محاسبه زاویه ساعت می‌توان از رابطه

(۲) استفاده کرد.

$$\omega = 15 \left(h - 12.5 + \frac{E_t}{60} + \frac{L}{15} - T_z \right) \quad (2)$$

معادله زمان E_t از رابطه (۳) محاسب می‌شود.

$$E_t = 229.18 \left(0.000075 + 0.001868 \cos \delta - 0.032077 \sin \delta - 0.014615 \cos 2\delta - 0.040849 \sin 2\delta \right) \quad (3)$$

اختلاف ساعت زمانی منطقه‌ای از رابطه (۴) قابل محاسبه است.

$$T_z = (L + 7.5) / 15 \quad (4)$$

در رابطه (۴) L برابر با طول جغرافیایی محل می‌باشد.

مدل دانشیار: این مدل بر اساس روابط تجربی برای تخمین

میزان تابش خورشیدی در ۳۴ شهر ایران به دست آمده است. بر این اساس مقدار تابش کل بر سطح افق از رابطه (۵) محاسبه می‌شود.

$$Q_s = 1.432 + 2.107(90 - \theta_z) + 121.3CF + 950[1 - \exp(-0.75(90 - \theta_z))](1 - CF) \cos \theta_z \quad (5)$$

مقدار انرژی به دست آمده بر حسب (Wm^{-2}) خواهد بود. در این

رابطه CF ضریب ابر است. که از رابطه‌ی تقریبی $CF = 1 - \frac{\bar{n}}{N}$

مقدار $\frac{\bar{n}}{N}$ برابر با مقدار ساعات آفتابی روز به کل ساعات روز می‌باشد.

مقدار θ_z زاویه سمت راس خورشید می‌باشد که از رابطه (۶) محاسبه

همچنین ضریب حذف گرما (FR) از رابطه (۱۲) به دست آمده است (Kalogirou, 2012).

$$F_R = \frac{m_c \cdot c_p}{A_r \cdot U_L} \left[1 - \exp \left(\frac{A_r \cdot U_L \cdot \dot{F}}{m_c \cdot c_p} \right) \right] \quad (12)$$

$\dot{F}$ ضریب کارایی کلکتور از رابطه‌ی (۱۳) محاسبه می‌شود (Duffie, Beckman, & Blair, 2020).

$$\dot{F} = \frac{1/U_L}{1/U_L + \frac{D_{ro}}{h_{fi} \cdot D_{ri}} + \frac{D_{ro}}{2k_m} \left[\ln \left(\frac{D_{ro}}{D_{ri}} \right) \right]} \quad (13)$$

در این رابطه، مقادیر D_{ro} و D_{ri} قطر خارجی و داخلی جاذب، h_{fi} و k_m ضرایب انتقال حرارت مایع و جاذب هستند. میانگین دما در گیرنده از رابطه‌ی (۱۴) به دست می‌آید (Belessiotis, Mathioulakis, & Papanicolaou, 2010).

$$T_r = T_i + \frac{Q_u}{A_r \cdot U_L \cdot F_R} (1 - F_R) \quad (14)$$

تعدادهای آنی انرژی

ترازهای اساسی انرژی سامانه در زیر آورده شده است. تعادل انرژی در جاذب را می‌توان با استفاده از رابطه‌ی (۱۵) تعیین کرد (Duffie, Beckman, & Blair, 2020).

$$Q_u + (Mc)_c \frac{dT_f}{dt} = Q_{abs} - (UA)_c (T_f - T_{am}) \quad (15)$$

مقدار Q_{abs} کل انرژی خورشیدی رسیده به متمرکزکننده، $(Mc)_c$ ظرفیت حرارتی جاذب متمرکزکننده، $(UA)_c$ ضریب اتلاف حرارتی جاذب متمرکزکننده است. تعادل انرژی در مبدل حرارتی مخزن ذخیره را می‌توان به صورت رابطه‌ی (۱۶) نوشت (Belessiotis et al., 2010):

$$Q_u = (UA)_{ex} (T_f - T_{st}) \quad (16)$$

$(UA)_{ex}$ ضریب انتقال حرارت کلی در مبدل حرارتی و T_{st} برابر با دمای مخزن حرارتی است. تعادل انرژی در مخزن ذخیره‌سازی در رابطه (۱۷) به دست آمده است (Belessiotis et al., 2010).

$$(Mc)_{st} \frac{dT_{st}}{dt} = Q_u - (UA)_{st} (T_{st} - T_{am}) \quad (17)$$

$(Mc)_{st}$ ظرفیت حرارتی مایع مخزن، $(UA)_{st}$ ضریب انتقال حرارت کلی در مخزن ذخیره‌سازی است و دمای مخزن ذخیره‌ساز در طول شبانه‌روز به دلیل تقریباً خطی بودن تغییرات درجه حرارت می‌توان از رابطه (۱۸) محاسبه کرد.

$$T_{st-N} = T_{st} + \frac{\Delta t}{(Mc)_{st}} [Q_u - Q_l - (UA)_{st} (T_{st} - T_{am})] \quad (18)$$

بیان این نکته مهم است که از میانگین دما (T_f) در معادلات قبلی استفاده شده است. این سطح دما را می‌توان به عنوان میانگین مقدار دمای ورودی و خروجی برآورد کرد میزان انرژی مفید از رابطه

سلسیوس نیاز است. با توجه به میزان تابش خورشیدی شهر شهرکرد بدون در نظر گرفتن بازدهی نوری و حرارتی سامانه تعداد ۱۲ ردیف آینه توانایی گرمایش این مقدار آب را تا دمای ۹۷ درجه دارند. تلفات محاسبه و با استفاده از المنت حرارتی یا افزایش ردیف‌های آینه پاسخ داده می‌شود. نوع بازتابنده آینه یا آلومینیوم آنودایز شده است. قاب کلکتور از فولاد گالوانیزه ساخته می‌شود. وزن تخمینی سازه کمتر از ۵۰۰ کیلوگرم و عمر مفید سامانه بیش از ۲۰ سال تخمین زده شده است (Tagle, Agraz, & Rivera, 2016).

مساحت موثر آینه‌های اولیه (Aa) بر حسب (m^2) با استفاده از رابطه‌ی (۸) محاسبه می‌شود. این پارامتر با فرض این که آینه‌های اولیه در جهت افقی هستند مساحت موثر بازتابنده‌های اولیه را برآورد می‌کند (Sharma, Nayak, & Kedare, 2015).

$$A_a = N_{rf} \cdot W_0 \cdot L \quad (8)$$

مقادیر N_{rf} تعداد ردیف‌های آینه‌ها، W_0 برابر با عرض آینه‌ها و L طول آینه‌ها بر حسب (m) است. پرتو مستقیم خورشیدی موجود (Qs) بر حسب (W) از رابطه (۹) محاسبه شده است که در آن مقدار DNI برابر با نرخ تابش مستقیم نرمال بر حسب (Wm^{-2}) است.

$$Q_s = A_a \cdot DNI \quad (9)$$

تولید گرمای مفید توسط سامانه (Qu) با استفاده از تعادل انرژی در حجم سیال (رابطه ۱۰) بر حسب وات محاسبه شد (Bellos et al., 2016).

$$Q_u = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{out} - T_{in}) = G_b \cdot \eta_o \cdot A_a - A_r \cdot U_L \cdot (T_r - T_{am}) \quad (10)$$

مقدار $\dot{m}$ برابر با جرم آب بر حسب کیلوگرم بر ثانیه است. c_p برابر با ظرفیت گرمایی ویژه، T_{in} و T_{out} به ترتیب دمای ورودی و خروجی متمرکزکننده است. G_b برابر با تابش نرمال خورشیدی در محل (W)، A_r برابر با مساحت جاذب (m^2)، U_L برابر با ضریب اتلاف حرارتی جاذب ($Wm^{-2}K^{-1}$) مقادیر T_r و T_{am} برابر با دمای محیط و دمای جاذب بر حسب (°C) است.

بازده حرارتی

بازده حرارتی (η_{th}) در متمرکزکننده خطی فرنل به عنوان نسبت گرمای مفید به انرژی خورشیدی موجود تعریف می‌شود که در آن A_a مساحت متمرکزکننده فرنل و DNI شدت تابش خورشیدی هستند. با به دست آوردن راندمان نوری بازتاب‌کننده فرنل خطی می‌توان عملکرد نوری آن را (رابطه ۱۱) تحلیل کرد (Kalogirou, 2012).

$$\eta_{th} = \frac{Q_u}{Q_s} = \frac{Q_{LFR}}{A_a \cdot DNI} \quad (11)$$

تعیین کرد.

مدل محاسباتی مدل UA

مدل محاسباتی مبتنی بر مدل انتقال حرارت با مقاومت حرارتی حالت پایدار یک‌بعدی است، که در آن تمام حالت‌های انتقال حرارت مربوط به پدیده‌های فیزیکی در نظر گرفته می‌شوند. مدل محاسباتی برای اولین بار توسط (فورستال) ساخته شد و برای تعیین بازده حرارتی متمرکزکننده‌های خورشیدی سهموی استفاده شد (Forristall, 2003). این مدل می‌تواند رفتار هر متمرکزکننده سهموی را تحت هر شرایط محیطی و با انواع پارامترهای کاری پیش‌بینی کند. هر یک از قسمت‌های سامانه متمرکزکننده فرنل مورد بررسی در جدول ۱، شماره‌گذاری و با توجه به شکل ۳ مرزهای حرارتی تعیین می‌شود.

(۱۹) به‌دست می‌آید (Bellos et al., 2019).

$$Q_U = \frac{A_a \cdot \eta_{opt} \cdot G_b}{P_1} - \left[\frac{P_0}{P_1} - (UA)_{st} \right] \cdot (T_{st} - T_{am}) \quad (19)$$

مقدار A_a برابر با مساحت متمرکزکننده (m^2)، η_{opt} برابر با بازده نوری، G_b برابر با تابش رسیده به زمین (Wm^{-2}) است. پارامترهای (p_2, p_1, p_0) به‌صورت روابط (۲۰) تا (۲۲) محاسبه می‌شود (Bellos et al., 2019):

$$p_0 = (UA)_{st} + (UA)_c + \frac{(UA)_c (UA)_{st}}{(UA)_{ex}} \quad (20)$$

$$p_1 = 1 + \frac{(MC)_c}{(MC)_{st}} \cdot \left(1 + \frac{(UA)_{st}}{(UA)_{ex}} \right) + \frac{(UA)_c}{(UA)_{ex}} \quad (21)$$

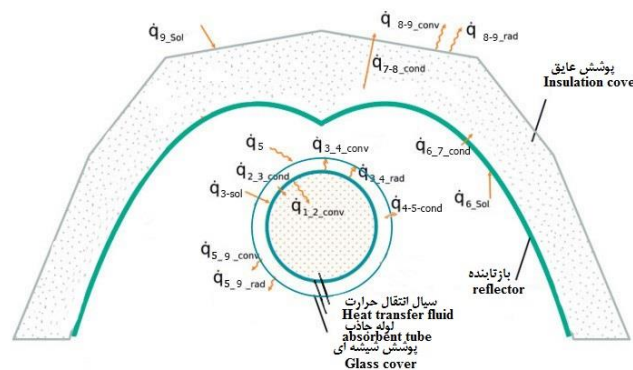
$$p_2 = (MC)_c \cdot (MC)_{st} / (UA)_{ex} \quad (22)$$

یکی از پارامتری که در رابطه (۲۲) محاسبه نشده است ضریب انتقال حرارتی UA است. این پارامتر را می‌توان با مدل‌سازی زیر

جدول ۱- تعیین مرزهای حرارتی با توجه به شکل ۳

Table 1- Determining thermal boundaries according to Figure 3

شماره Number	سطح Surface	شماره Number	سطح Surface
1	سیال انتقال حرارت Heat transfer fluid	6	آینه ثانویه secondary mirror surface
2	سطح جاذب داخلی Internal absorbent surface	7	سطح پوشش عایق داخلی Internal insulation coating surface
3	سطح جاذب خارجی External absorbent surface	8	سطح پوشش عایق بیرونی Exterior insulation coating surface
4	سطح پوشش داخلی Interior coating surface	9	زمین یا هوا Earth or air
5	سطح پوشش خارجی Exterior coating surface		

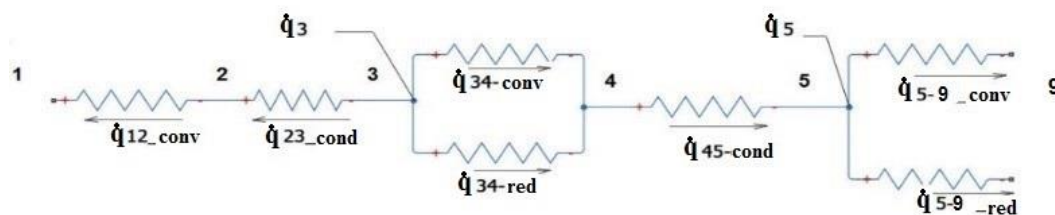


شکل ۳- نمای برش عرضی متمرکزکننده فرنل، شرایط شار حرارتی در نظر گرفته شده بین اجزای مختلف گیرنده فرنل خطی

Fig.3. Cross-sectional view of Fresnel collector, the heat flux conditions considered between the different components of the linear Fresnel receiver

شار حرارتی خورشیدی قابل اندازه‌گیری است. انتقال گرما به محیط خارجی با ترکیب دمای محیط و سرعت باد مشخص می‌شود. این مدل برای پیکربندی گیرنده‌ی نشان داده شده در شکل ۳ توسعه یافته است. برای آنالیز حرارتی سامانه از مدل نمایش داده شده در شکل ۴ استفاده شد. مشخصات هندسی سامانه در جدول ۲ آمده است.

انتقال گرما از طریق هدایت، همرفت و تابش و همچنین تابش خورشیدی جذب شده از نظر مدل مقاومت حرارتی اعمال شده است (شکل ۳). اثرات شار گرمایی رسانش، همرفت و تابش توسط معادلات فیزیکی محاسبه می‌شود. همچنین در طول متمرکزکننده ثانویه توزیع همگن تابش خورشید را داریم. با توجه به نتایج ردیابی پرتو نوری بر کل سامانه و با استفاده بازدهی نوری کلی سامانه محاسبات مربوط به



شکل ۴- مدل مقاومت حرارتی عبوری از متمرکزکننده فرنل

Fig.4. Thermal resistance diagram passing through the Fresnel collector

جدول ۲- مشخصات هندسی سامانه

Table 2- Geometric specifications of the system

تعریف Definition	پارامتر Parameter	مقدار Amount
قطر داخلی جاذب Absorbent inner diameter- mm	D_{ri}	66
قطر خارجی جاذب Absorbent outer diameter- mm	D_{ro}	70
قطر داخلی کاور Inner diameter of the cover- mm	D_{ci}	109
قطر خارجی جاذب Absorbent outer diameter-mm	D_{co}	115
مساحت جاذب Absorbent area- m^2	A_r	0.66
مساحت پوشش Coverage area- m^2	A_c	1.08
طول جاذب Absorbent length-m	L	3

با توجه به نوع جریان (جریان آشفته) سیال عدد ناسلت از رابطه‌ی (۲۴) به دست می‌آید. ضریب انتقال حرارت بین دیواره جاذب و سیال از رابطه (۲۵) محاسبه شده است (Mokhtar et al., 2016).

$$Nu = \frac{h_{12_conv} \cdot D_{ri}}{k} = 0.023 Re^{0.8} \cdot Pr^{0.4} \quad (24)$$

$$h_{12_conv} = \frac{k \cdot Nu}{D_{ri}} \quad (25)$$

مقادیر عدد رینولز و پراتل از رابطه‌های (۲۶) و (۲۷) قابل محاسبه است (Bellos, Tzivanidis, Korres, & Antonopoulos, 2015).

مقدار ضریب اتلاف حرارتی متمرکزکننده از رابطه‌ی (۲۳) محاسبه شده است.

$$(UA)_C = \left[\frac{1}{\frac{1}{h_{12_conv} + A_{ri}} + \frac{\ln\left(\frac{r_2^2}{r_1^2}\right)}{2k_{cu}\pi L}} + \frac{1}{\frac{1}{(h_{34_conv} + h_{34_rad})A_{ro}} + \frac{\ln\left(\frac{r_3^2}{r_2^2}\right)}{2k_{glass}\pi L}} + \frac{1}{(h_{5,10_conv} + h_{5,10_rad})A_{ro}} \right]^{-1} \quad (23)$$

مدل‌سازی اکسرژی

برای مدل‌سازی در ابتدا باید مقدار کل اکسرژی را به‌دست آورد که می‌توان از فرمول پتلا (۳۶) استفاده نمود (Petela, 2003).

$$E_s = Q_s \cdot \left(1 - \frac{4}{3} \cdot \left[\frac{T_0}{T_{sun}}\right] + \frac{1}{3} \cdot \left[\frac{T_0}{T_{sun}}\right]^4\right) \quad (36)$$

T_0 برابر با دمای محیط و T_{sun} برابر با دمای خورشید است. اکسرژی مفید از رابطه‌ی (۳۷) به‌دست آمده است (Bellos et al., 2017):

$$E_u = m \cdot c_p \cdot (T_{out} - T_{in}) - m \cdot c_p \cdot T_0 \ln \left[\frac{T_{out}}{T_{in}} \right] - \frac{T_0 \cdot m \cdot \Delta P}{T_{fm} \cdot \rho_{fm}} \quad (37)$$

رابطه (۳۷) را می‌توان برای مایعات و گازها استفاده کرد. در مایعات، آخرین افت فشار (ΔP) معمولاً کم است و می‌توان از آن صرف‌نظر کرد. همچنین کار با سیالات گازی به دلیل چگالی کم گازها با از دست دادن فشار زیاد همراه است و باید مورد توجه قرار گیرد.

بازده اکسرژی (η_{ex}) نسبت اکسرژی مفید (E_u) به اکسرژی خورشیدی (E_s) است که با روابط (۳۸) و (۳۹) محاسبه شد (Bellos et al., 2018):

$$\eta_{ex} = \frac{E_u}{E_s} = \frac{Q_u \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)}{Q_s \cdot \left(1 - \frac{4}{3} \cdot \left[\frac{T_0}{T_{sun}}\right] + \frac{1}{3} \cdot \left[\frac{T_0}{T_{sun}}\right]^4\right)} \quad (38)$$

$$\eta_{ex} = \eta_{th} \cdot \frac{1 - \frac{T_0}{T}}{1 - \frac{4}{3} \cdot \left[\frac{T_0}{T_{sun}}\right] + \frac{1}{3} \cdot \left[\frac{T_0}{T_{sun}}\right]^4} \quad (39)$$

نتایج و بحث

با توجه به رابطه (۷) و نتایج جدول ۳ مقدار بازدهی نوری کل برابر با ۷۰ درصد است. برای محاسبه میزان انرژی خورشیدی شهرکرد به عرض جغرافیایی ۳۲ درجه نیاز به ضریب ابر است. این مقدار برای شهرکرد برابر با ۰/۳ است (Jafarpour & Mahmoud, 2001). مقدار انرژی تابشی خورشید از رابطه (۵) محاسبه شده است. مطابق شکل ۵ بیشترین تابش در ساعت ۱۲ و تابش موثر از ساعت ۷ صبح تا ۱۷ است. لذا با توجه به شرایط انتقال حرارت اشاره شده، مشخصات ترمودینامیکی سامانه در جدول ۲ به‌دست آمده است.

$$Re = \frac{4 \cdot \dot{m}}{\pi \cdot D_{r1} \cdot \mu} \quad (26)$$

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{k} \quad (27)$$

ضرایب انتقال حرارت از رابطه (۲۸) و (۲۹) محاسبه می‌شود (Duffie, Beckman, & Blair, 2020).

$$h_{34_{conv}} = \left(3.25 + 0.0085 \frac{T_r - T_c}{4r_2}\right) \frac{A_c}{A_r} \quad (28)$$

$$h_{34_{rad}} = \frac{\varepsilon \sigma \cdot (T_r^2 + T_c^2) \cdot (T_r + T_c)}{\frac{1}{\varepsilon_r} + \left(\frac{1}{\varepsilon_c} - 1\right) \cdot \left(\frac{A_r}{A_c}\right)} \quad (29)$$

در روابط بالا T_c دمای کاور ($^{\circ}C$) و T_r برابر با دمای جاذب ($^{\circ}C$)، مقادیر A_r و A_c برابر با مساحت جاذب و کاور شیشه‌ای [M^2] می‌باشد. ε برابر با ضریب صدور سطح جسم و σ ثابت استفان بولتزمن $5.6 \cdot 10^{-8} (Wm^{-2}K^{-4})$ است.

$$h_{5_{10_{conv}}} = \frac{8.6 \cdot V_{air}^{0.6}}{L^{0.4}} \quad (30)$$

مقدار V_{air} برابر با سرعت باد در محیط ($m s^{-1}$) و L برابر با طول متمرکزکننده (m) است.

$$h_{5_{10_{rad}}} = \varepsilon \sigma (T_c^2 + T_{am}^2) (T_c + T_{am}) \quad (31)$$

T_{am} برابر با دمای محیط ($^{\circ}C$) است. مقدار ε_r از رابطه‌ی (۳۲) به‌دست می‌آید.

$$\varepsilon_r = 0.05599 + 1.039 \cdot 10^{-4} \cdot T_r + 2.249 \cdot 10^{-7} \cdot T_r^2 \quad (32)$$

انرژی ذخیره شده روزانه

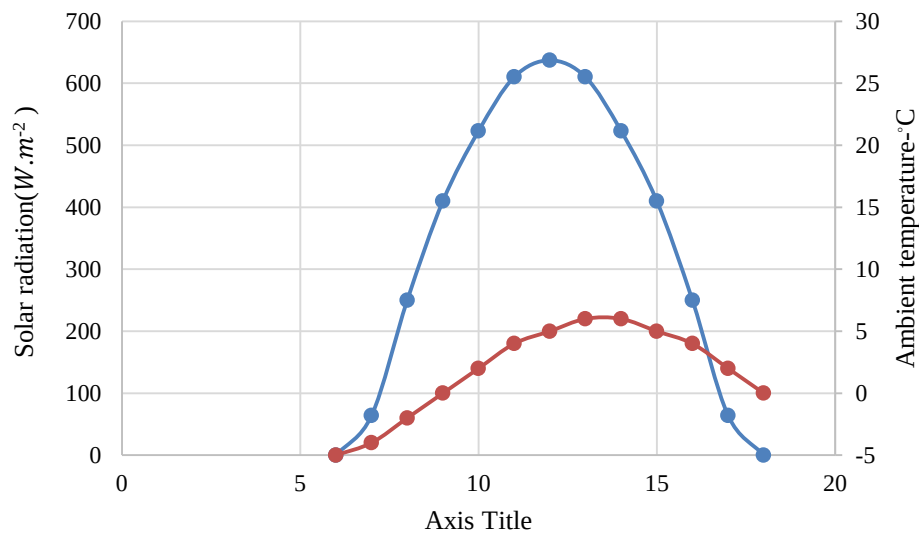
با استفاده از پارامترهای سامانه، تابش مستقیم خورشید (H_b)، میانگین اصلاح کننده زاویه حادثه روزانه (K_{mean})، دمای اولیه مخزن ذخیره‌سازی (T_{st0}) و میانگین دمای روزانه محیط، انرژی ذخیره شده روزانه در مخزن را می‌توان به‌صورت زیر نوشت (Bellos et al., 2019):

$$E_{st} = F_1 \cdot K_{mean} \cdot H_b + F_2 \cdot (T_{am} - T_{st0}) \quad (33)$$

مقادیر F_1 و F_2 از رابطه‌های (۳۴) و (۳۵) به‌دست می‌آیند. مقدار N برابر با تعداد ساعات روز است.

$$F_1 = \frac{A_a \cdot \eta_{opt,0}}{P_1 + \frac{P_0 \cdot N}{2(MC)_{st}}} \quad (34)$$

$$F_2 = \frac{P_0 \cdot N}{P_1 + \frac{P_0 \cdot N}{2(MC)_{st}}} \quad (35)$$



شکل ۵- متوسط انرژی خورشیدی شهرکرد در تاریخ ۱۰/۱۵ برحسب ساعت روز

Fig.5. Average chart of Shahrekord solar energy on 1/5 in terms of daylight hours

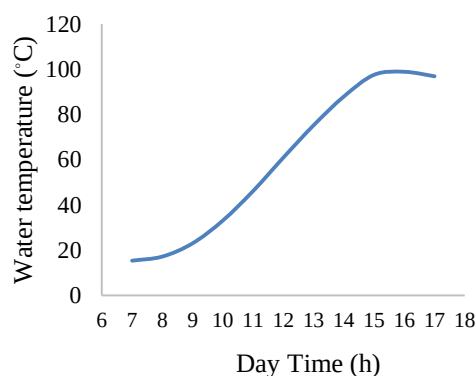
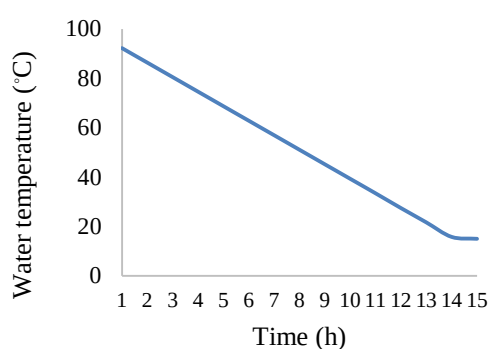
جدول ۳- مشخصات ترمودینامیکی سامانه

Table 3- Thermodynamic characteristics of the system

تعریف Definition	پارامتر Parameter	مقدار Amount
ظرفیت حرارتی مخزن ذخیره سازی Storage tank heat capacity (W)	$(MC)_{st}$	$1050 \cdot 10^3$
ظرفیت حرارتی متمرکزکننده Collector heat capacity (W)	$(MC)_c$	$16.38 \cdot 10^3$
ضریب اتلاف حرارتی مخزن ذخیره سازی Storage tank heat loss coefficient (Wk^{-1})	$(UA)_{st}$	2.09
ضریب اتلاف حرارتی متمرکزکننده Collector heat loss coefficient (Wk^{-1})	$(UA)_c$	4
ضریب انتقال حرارت کلی در مبدل حرارتی Overall heat transfer coefficient in heat exchanger (Wk^{-1})	$(UA)_{ex}$	460
حجم مخزن ذخیره سازی Storage tank volume (kg)	V	250
جرم جریان Flow mass ($kg s^{-1}$)	m_f	0.7
بازده نوری کل Total optical efficiency	η_{opt}	70%
جذب گیرنده Receptor absorption	α	0.92
انتقال پوشش Cover transfer	τ	0.95
بازتاب آینه Mirror reflection	ρ_{mir}	0.94
ضریب اصلاح کننده زاویه بازتاب خورشید Incident angle modifier	k	0.92

نتایج عملکرد روزانه سامانه

نتایج مربوط به عملکرد روزانه عمدتاً با استفاده از خروجی گرمایی مفید و همچنین سطح دمای مایع بیان می‌شود. در مرحله اول، نتایج



شکل ۶- عملکرد حرارتی مخزن: گرمایش سیال مخزن به کمک سامانه متمرکزکننده فرنل (راست)، سرمایش سیال به منظور ایجاد حرارت شبانه مورد نیاز در گلخانه (چپ)

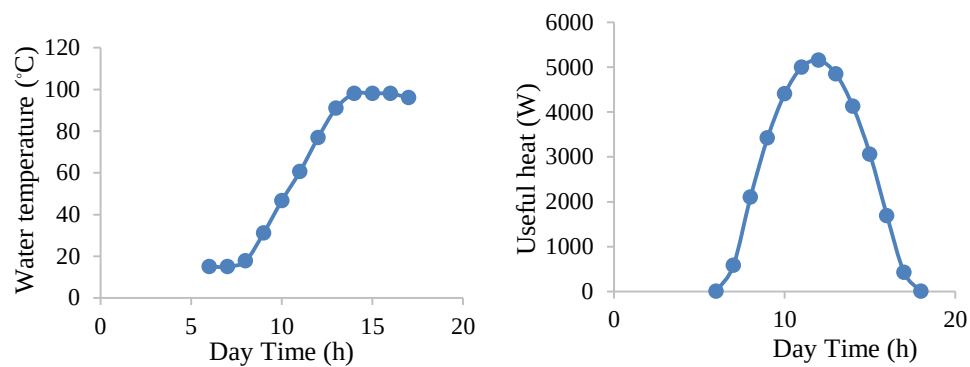
Fig.6. Thermal performance of the tank: heating of the tank fluid using the Fresnel collector system (Right), cooling of the fluid to create the required night heat in the greenhouse (Left)

شکل ۷ تولید گرمای مفید در طول روز را نشان می‌دهد. نتایج نظری از رابطه (۱۹) به دست آمده است. بدیهی است که تولید گرمای مفید از مقادیر تابش پرتوی خورشیدی پیروی می‌کند، بدین ترتیب بالاترین تولید گرمای مفید در دوره زمانی نزدیک به ظهر خورشیدی مشاهده می‌شود و برابر با ۵۱۵۲ وات است.

همان‌طور که در شکل ۸ مشخص است بیشترین بازده حرارتی متمرکزکننده فرنل در طول روز ۶۴ درصد و میزان بازده متوسط روزانه ۵۶/۴ درصد است. از دلایل کاهش بازده متمرکزکننده از ساعت ۱۲ به بعد کم شدن شدت تابش خورشیدی، افزایش اختلاف دمای متمرکزکننده و دمای محیط می‌توان نام برد. افزایش نرخ دبی آب باعث افزایش بازدهی حرارتی می‌شود. نتایج به دست آمده از مطالعات مختلف نشان می‌دهد متمرکزکننده فرنل خطی با استفاده از طراحی جدید می‌تواند بازدهی حرارتی بالایی داشته باشد (Bellos et al., 2018). به‌طور مثال متمرکزکننده سهموی خطی دارای بازدهی حداکثر ۷۰ درصد است (Jafari et al., 2017). با توجه به بازدهی به دست آمده در روز به میزان ۶۴ درصد رسید که قابل رقابت با متمرکزکننده‌های سهموی است. در مطالعات دیگری بازدهی متمرکزکننده فرنل خطی در ظهر به حدود ۶۵ درصد رسیده است (Ma et al., 2018).

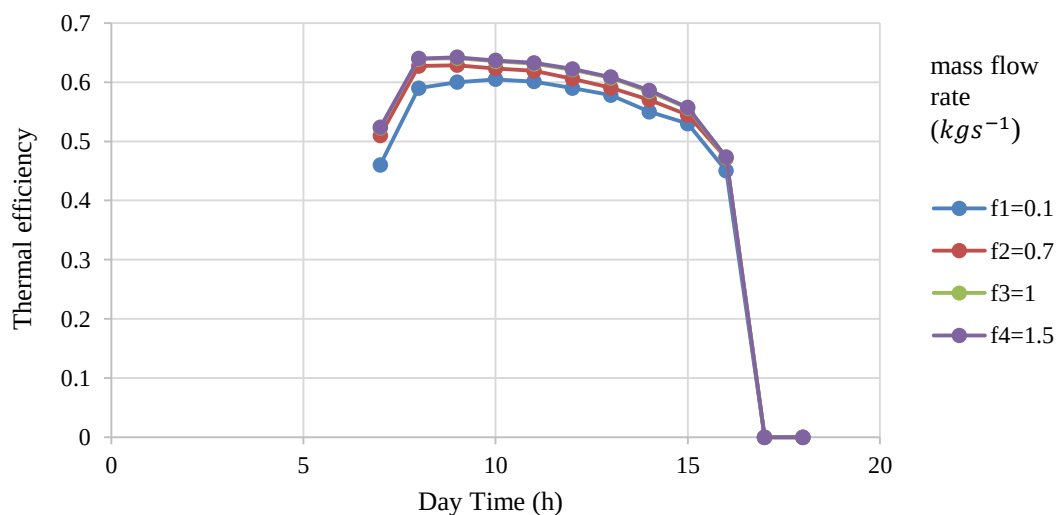
با توجه به گلخانه نمونه با نیاز حرارتی متوسط ۱۹۶۰ وات برای ثابت نگه داشتن دمای ۱۵ درجه‌ای گلخانه با استفاده از رابطه (۱۸) نیاز به مخزن حرارتی با حجم ۲۵۰ لیتر است. تعداد ردیف آینه‌ها با توجه به بازده نوری ۷۰ درصد محاسبه شده از رابطه (۷) و با توجه به نیاز حرارتی گلخانه با استفاده از رابطه (۹) تعداد و مساحت کلی آینه‌ها محاسبه می‌شود. دلیل استفاده از المنت حرارتی محاسبه نشدن تلفات حرارتی بازتابنده فرنل خطی است. که بعد از محاسبه این مقدار به عنوان سیستم کمکی گرمایشی استفاده می‌شود.

همان‌طور که در شکل ۶ مشخص است برای یک شب سرد زمستانی با کمینه دمای منفی ۲۰ درجه دمای مخزن آب با وجود المنت حرارتی ۷۰۰ وات می‌تواند پاسخگوی نیاز حرارتی برای گلخانه تا ۱۵ ساعت باشد (شکل ۶ چپ). همچنین عملکرد متمرکزکننده به گونه‌ای طراحی شده است که در طول یک روز زمستانی توانایی گرمایش ۲۵۰ لیتر آب را تا نقطه جوش در مدت کاری ۸ ساعت را داشته باشد (شکل ۶ راست). در مقایسه با کار انجام شده توسط (Jafari et al., 2017) می‌توان بیان نمود آزمایش انجام شده در شهر کرمان با عرض جغرافیایی پایین‌تری صورت گرفته و دارای تابش خورشیدی بالاتری نسبت به کار حاضر است. که خود دلیلی بر افزایش کارایی حرارتی متمرکزکننده است.



شکل ۷- تولید گرمای مفید در طول روز توسط متمرکزکننده، متمرکزکننده فرنل (راست) و تغییرات دمای آب متمرکزکننده در طول روز (چپ)

Fig.7. Useful heat production during the day by Fresnel collector (Right) and collector water temperature changes during the day (Left)



شکل ۸- نمودار بازده حرارتی متمرکزکننده فرنل در طول روز

Fig.8. Fresnel collector heat efficiency diagram during the day

جدول ۴- بازده اکسرژی با توجه به شرایط روزانه سامانه

Table 4- Express efficiency according to the daily conditions of the system

زمان روز Day Time (h)	دما Temperature (°C)	بازده حرارتی Thermal efficiency	بازده اکسرژی Exergy efficiency (%)
7	15	0.56	3.5
8	17.73	0.64	4.3
9	31.15	0.65	7
10	46.66	0.65	10
11	60.55	0.65	12
12	76.80	0.64	15
13	90.97	0.63	17
14	98	0.56	15
15	98	0.41	11
16	98	0.25	7
17	98	0.05	1

تحلیل اکسرژی

تجزیه و تحلیل اکسرژی متمرکزکننده شامل تحلیل اکسرژی نوری خورشیدی، اکسرژی تولیدشده مفید و تلفات اکسرژی است. می‌توان از مدل پتلا برای تخمین جریان اکسرژی در تابش خورشیدی ورودی استفاده کرد. این مدل خورشید را مخزن تابشی دما (Tsun) در نظر می‌گیرد که دما در لایه‌های بیرونی آن ۵۷۷۰ درجه‌ی کلوین تخمین زده می‌شود. از روابطه (۳۸) و (۳۹) بازده اکسرژی محاسبه و نتایج در جدول ۴ نشان داده شده است. می‌توان بیان نمود بازده اکسرژی تابعی از بازده و اتلاف حرارتی است. این مقدار به تدریج افزایش و سپس کاهش می‌یابد به دلیل افزایش تلفات حرارتی و نوری با افزایش تابش خورشیدی است. بیشترین بازده اکسرژی برابر با ۱۷ درصد در ساعت ۱۳ است که مقادیر به دست آمده با نتیجه مطالعات قابل بررسی است بیشینه این مقدار برابر با ۱۹/۸۳ درصد است (Bellos et al., 2019).

نتیجه‌گیری

در این مطالعه عملکرد روزانه‌ی جمع‌کننده فرنل خطی همراه با میدان آینه ۱۸ مترمربع، یک جمع‌کننده پارابولیک و مخزن ذخیره عایق‌بندی شده با حجم ۲۵۰ لیتر بررسی شده است، که شامل تجزیه و تحلیل تجربی، فرمول‌بندی نظری پدیده‌های حرارتی و نیز شرایط آب و هوایی شهرکرد بوده است. مدل ریاضی توسعه‌یافته بر اساس توازن انرژی در جمع‌کننده و مخزن ذخیره‌سازی است. لذا بر اساس موارد ذکر شده در بخش قبل، نتیجه تحلیل‌های انجام شده به شرح زیر است:

- مدل‌سازی ریاضی پیشنهاد شده برای محاسبه‌ی انرژی خورشیدی از نظر عملکرد روزانه و آنی دقیق است. این مدل هم برای روزهای صاف و هم ابری به دلیل استفاده از ضریب ابر معتبر است، بنابراین می‌توان آن را در انواع شرایط آب و هوایی اعمال کرد.
- معادلات تحلیلی برای اصلاح‌کننده زاویه تابش روزانه

جمع‌کننده، پیشنهاد شده است. این معادلات امکان ارزیابی سریع و دقیق نوری LFR را فراهم می‌آورد.

- حداکثر تولید گرمای مفید سامانه فعلی برای ماه بهمن نزدیک به ظهر خورشیدی است و در حدود ۵/۲ کیلووات است (شکل ۷)، در حالی که افزایش دمای مایع در مخزن حرارتی ۱۶ درجه سلسیوس است.
- بیشترین بازده حرارتی متمرکزکننده فرنل در طول روز ۶۴ درصد است و میزان بازده متوسط روزانه ۵۶/۴ درصد است.
- مهم‌ترین پارامترهایی که بر تولید انرژی مفید تأثیر می‌گذارند، موقعیت خورشیدی در طول روز و میزان ابر در روز است.
- سامانه توانایی گرمایش آب ذخیره در منبع را تا دمای ۹۸ درجه در روز را دارد. این مقدار تا ساعت ۱۴ قابل دسترس است.
- از سامانه مورد بررسی می‌توان برای گرمایش تا میزان ۱۲۶۰ وات بدون گرم‌کننده‌ی مخزن به مدت ۱۵ ساعت استفاده کرد. این مقدار گرمایش برای استفاده در مصارف خانگی، دستگاه‌های تولید مثل گرمایی و گلخانه‌ها استفاده کرد. مقیاس‌های بزرگ‌تر برای استفاده‌های نیروگاهی، تولید برق، تولید بخار صنایع غذایی و آب شیرین‌کن‌های صنعتی قابل استفاده است.
- سامانه دارای بازدهی متوسط حرارتی ۵۶ درصدی دست پیدا کرد. که یک مقدار مناسب و قابل رقابت با سایر فناوری‌های مشابه است. در حالی که هزینه ساخت و نگهداری به مراتب پایین‌تری از رقبا برخوردار است.
- کاهش بازدهی اکسرژی به دلیل کاهش یافتن بازدهی حرارتی سامانه و نیز افزایش اختلاف حرارتی دمای متمرکزکننده و محیط است. با کاهش تلفات حرارتی می‌توان به مقادیر بالاتری دست یافت. همچنین می‌توان بیان نمود که نوع طراحی سامانه ما را از به دست آوردن مقادیر بالاتر دمای سیال محدود می‌کند (در سامانه از تغییر فاز آب به بخار جلوگیری شده است) که خود دلیلی بر کاهش بازدهی اکسرژی سامانه است.

References

1. Anifantis, A. S., Colantoni, A., & Pascuzzi, S. (2016). Thermal energy assessment of a small scale photovoltaic, hydrogen and geothermal stand-alone system for greenhouse heating. *Renewable Energy*, 103, 115-127. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.11.031>
2. Attar, I., & Farhat, A. (2015). Efficiency evaluation of a solar water heating system applied to the greenhouse climate. *Solar Energy*, 119, 212-224. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.06.040>
3. Babu, M., Raj, S. S., & Arasu, A. V. (2019). Experimental analysis on Linear Fresnel reflector solar concentrating hot water system with varying width reflectors. *Case Studies in Thermal Engineering*, 14, 100444. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2019.100444>
4. Balaji, S., Reddy, K. S., & Sundararajan, T. (2016). Optical modelling and performance analysis of a solar LFR

- receiver system with parabolic and involute secondary reflectors. *Applied Energy*, 179, 1138-1151. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.07.082>
5. Barbón, A., Barbón, N., Bayón, L., & Otero, J. A. (2016). Theoretical elements for the design of a small scale Linear Fresnel Reflector: Frontal and lateral views. *Solar Energy*, 132, 188-202. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.02.054>
6. Barbón, A., Fernández-Rubiera, J. A., Martínez-Valledor, L., Pérez-Fernández, A., & Bayón, L. (2021). Design and construction of a solar tracking system for small-scale linear Fresnel reflector with three movements. *Applied Energy*, 285, 116477. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116477>
7. Baudoin, W., Nono-Womdim, R., Lutaladio, N., Hodder, A., Castilla, N., Leonardi, C., De Pascale, S., Qaryouti, M., & Duffy, R. (2013). Good agricultural practices for greenhouse vegetable crops: Principles for mediterranean climate areas. FAO plant production and protection paper (FAO).(book)
8. Bellos, E. (2019). Progress in the design and the applications of linear Fresnel reflectors—A critical review. *Thermal Science and Engineering Progress*, 10, 112-137. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2019.01.014>
9. Bellos, E., Mathioulakis, E., Papanicolaou, E., & Belessiotis, V. (2018). Experimental investigation of the daily performance of an integrated linear Fresnel reflector system. *Solar Energy*, 167, 220-230. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.04.019>
10. Bellos, E., Mathioulakis, E., Tzivanidis, C., Belessiotis, V., & Antonopoulos, K. A. (2016). Experimental and numerical investigation of a linear Fresnel solar collector with flat plate receiver. *Energy Conversion and Management*, 130, 44-59. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.10.041>
11. Bellos, E., Tzivanidis, C., Korres, D., & Antonopoulos, K. A. (2015). *Thermal analysis of a flat plate collector with Solidworks and determination of convection heat coefficient between water and absorber*. In ECOS conference. <https://doi.org/10.1177/0957650917712403>
12. Belessiotis, V., Mathioulakis, E., & Papanicolaou, E. (2010). Theoretical formulation and experimental validation of the input–output modeling approach for large solar thermal systems. *Solar Energy*, 84(2), 245-255. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.10.024>
13. Benyakhlef, S., Al Mers, A., Merroun, O., Bouatem, A., Boutammachte, N., El Alj, S., Ajdad, H., Erregueragui, Z., & Zemmouri, E. (2016). Impact of heliostat curvature on optical performance of Linear Fresnel solar concentrators. *Renewable Energy*, 89, 463-474. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.12.018>
14. Boito, P., & Grena, R. (2021). Application of a fixed-receiver Linear Fresnel Reflector in concentrating photovoltaics. *Solar Energy*, 215, 198-205. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.12.024>
15. Duffie, J. A., Beckman, W. A., & Blair, N. (2020). *Solar engineering of thermal processes, photovoltaics and wind*. John Wiley & Sons; 2020 Mar 24.(book)
16. Ebrahimpour, A., Maaref, M., & Nairi, H. (2009). Comparison of two different methods for estimating air purity coefficient for Iranian cities. *Geography and Planning*, 14(28), 1-16. (In Persian).
17. Forristall, R. (2003). Heat transfer analysis and modeling of a parabolic trough solar receiver implemented in engineering equation solver (No. NREL/TP-550-34169). National Renewable Energy Lab., Golden, CO.(US).
18. Hasandokht, M. (2005). *Greenhouse management (greenhouse product technologies)*. Marze danesh publication, pp: 31-35. (In Persian).
19. Huang, F., Li, L., & Huang, W. (2014). Optical performance of an azimuth tracking linear Fresnel solar concentrator. *Solar Energy*, 108, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.05.010>
20. Jafari, M., Mortezapour, H., Jafari Naeimi, K., & Maharlooei, M. (2017). Performance Investigation of a Solar Greenhouse Heating System Equipped with a Parabolic Trough Solar Concentrator and a Double-Purpose Heat Exchanger. *Journal of Agricultural Machinery*, 7(2), 364-378. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jam.v7i2.56939>
21. Jafarpour, Kh., & Karshenas, M. (2001). Cloud coefficient and its application in estimating solar radiation in different climates of Iran. *Iranian Journal of Energy*, 6 (1), 45-56. (In Persian).
22. Kalogirou, S. A. (2012). A detailed thermal model of a parabolic trough collector receiver. *Energy*, 48(1), 298-306. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.06.023>
23. Loni, R., Kasaeian, A. B., Asli-Ardeh, E. A., & Ghobadian, B. (2016). Optimizing the efficiency of a solar receiver with tubular cylindrical cavity for a solar-powered organic Rankine cycle. *Energy*, 112, 1259-1272. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.06.109>
24. Jovanović, M., Kaščelan, L., Despotović, A., & Kaščelan, V. (2015). The impact of agro-economic factors on GHG emissions: Evidence from European developing and advanced economies. *Sustainability*, 7(12), 16290-16310. <https://doi.org/10.3390/su71215815>
25. Ma, J., & Chang, Z. (2018). February. Understanding the effects of end-loss on linear Fresnel collectors. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 121, No. 5, p. 052052). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/121/5/052052>
26. Mokhtar, G., Boussad, B., & Nouredine, S. (2016). A linear Fresnel reflector as a solar system for heating water:

- theoretical and experimental study. *Case Studies in Thermal Engineering*, 8, 176-186. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2016.06.006>
27. Nixon, J. D., Dey, P. K., & Davies, P. A. (2013). Design of a novel solar thermal collector using a multi-criteria decision-making methodology. *Journal of Cleaner Production*, 59, 150-159. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.06.027>
 28. Ozgener, O., & Hepbasli, A. (2006). An economical analysis on a solar greenhouse integrated solar assisted geothermal heat pump system. *Journal of Energy Resources Technology*, 128, 28-34. <https://doi.org/10.1115/1.2126984>
 29. Petela, R. (2003). Exergy of undiluted thermal radiation. *Solar Energy*, 74(6), 469-488. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(03\)00226-3](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(03)00226-3)
 30. Qiu, Y., He, Y. L., Cheng, Z. D., & Wang, K. (2015). Study on optical and thermal performance of a linear Fresnel solar reflector using molten salt as HTF with MCRT and FVM methods. *Applied Energy*, 146, 162-173. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.135>
 31. Said, Z., Ghodbane, M., Sundar, L. S., Tiwari, A. K., Sheikholeslami, M., & Boumeddane, B. (2021). Heat transfer, entropy generation, economic and environmental analyses of linear Fresnel reflector using novel rGO-Co3O4 hybrid nanofluids. *Renewable Energy*, 165, 420-437. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.11.054>
 32. Smith, P., Clark, H., Dong, H., Elsiddig, E. A., Haberl, H., Harper, R., House, J., Jafari, M., Masera, O., Mbow, C., & Ravindranath, N. H. (2014). Agriculture, forestry and other land use (AFOLU).
 33. Smith, P., Martino, D., Cai, Z., Gwary, D., Janzen, H., Kumar, P., McCarl, B., Ogle, S., O'Mara, F., Rice, C., & Scholes, B. (2008). Greenhouse gas mitigation in agriculture. *Philosophical transactions of the royal Society B: Biological Sciences*, 363(1492), 789-813. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2184>
 34. Sharma, V., Nayak, J. K., & Kedare, S. B. (2015). Effects of shading and blocking in linear Fresnel reflector field. *Solar Energy*, 113, 114-138. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.12.026>
 35. Sherafati, K. (2009). *Investigation of energy consumption indices of cucumber production in Tehran greenhouses*. Final report of the research project of the Institute of Agricultural Technical and Engineering Research. (In Persian).
 36. Tagle, P. D., Agraz, A., & Rivera, C. I. (2016). Study of applications of parabolic trough solar collector technology in Mexican industry. *Energy Procedia*, 91, 661-667. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.06.227>
 37. Tzivanidis, C., & Bellos, E. (2016). The use of parabolic trough collectors for solar cooling—A case study for Athens climate. *Case Studies in Thermal Engineering*, 8, 403-413. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2016.10.003>
 38. Wang, G., Wang, F., Shen, F., Jiang, T., Chen, Z., & Hu, P. (2020). Experimental and optical performances of a solar CPV device using a linear Fresnel reflector concentrator. *Renewable Energy*, 146, 2351-2361. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.090>
 39. Xu, C., Chen, Z., Li, M., Zhang, P., Ji, X., Luo, X., & Liu, J. (2014). Research on the compensation of the end loss effect for parabolic trough solar collectors. *Applied Energy*, 115, 128-139. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.11.003>



Detection of Different Percentages of Palm in Corn Oil with the Help of an Electric Nose

Z. Zangeneh Wand¹, H. Javadikia^{2*}, N. Aghili Nategh³, L. Naderloo⁴

1- M.Sc. of Mechanical Engineering of Biosystems Department, Razi University, Kermanshah, Iran

2- Associate Professor of Mechanical Engineering of Biosystems Department, Razi University, Kermanshah, Iran

3- Assistant Professor of Mechanical Engineering of Biosystems Department, Sonqor Agriculture Faculty, Razi University, Kermanshah, Iran

4- Associate Professor of Mechanical Engineering of Biosystems Department, Razi University, Kermanshah, Iran

(*- Corresponding Author Email: pjavadikia@gmail.com)

<https://doi.org/10.22067/jam.2021.70930.1046>

Received: 13 September 2021

Revised: 13 November 2021

Accepted: 16 November 2021

Available Online: 16 November 2021

How to cite this article:

Zanganeh Wand, Z., Javadikia, H., Aghili Nategh, N., & Naderloo, L. (2023). Detection of Different Percentages of Palm in Corn Oil with the Help of an Electric Nose. *Journal of Agricultural Machinery*, 13(2), 163-174. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jam.2021.70930.1046>

Introduction

The use of corn oil in diets is due to its positive effects on cardiovascular and immune systems. Corn oil is composed of 99% triacylglycerol, with 59% unsaturated fatty acids and 13% saturated fatty acids. Of the unsaturated fatty acids, 24% contain a double bond. Because of this composition, corn oil can be a good alternative to other oils high in saturated fatty acids, as it reduces blood cholesterol levels.

This study employed an electrical nasal system to detect the amount of palm oil present in corn oil. The properties extracted from the signals obtained by the device were processed using principal component analysis, artificial neural networks, infusion, and response surface methods. The results were then compared to find the best method for detecting palm oil levels in corn oil.

Materials and Methods

The required palm oil was obtained from the Nazgol Oil Agro-industrial Plant, while the corn oil was obtained from natural lubrication centers. To prepare samples with different percentages of palm oil, 75 grams of palm oil and corn oil with the specified percentages were mixed and stored in special containers.

In the electrical nose system, ten metal oxide semiconductor sensors (MOS) were used to collect output data. Pre-processing operations were performed on this data using RSM, ANFIS, PCA, and ANN methods to estimate the percentage of palm oil in corn oil. The Unscrambler V.9 software, Design Expert 8.07.1, and MATLAB R2013a were used to analyze the results.

Results and Discussion

Based on the Score plot, PC-1 and PC-2 explain 53% and 25%, respectively, describing the variance between samples for a total of 78 data points. The analysis indicates that sensors 7 and 8 have minimal impact on the detection process and can be removed from the sensor array. When reducing the cost of the olfactory system's sensor array, sensor 6 plays a more significant role than other sensors in detecting corn oil with palm composition.

According to the loading diagram of palm percentage in corn oil, the MQ6 sensor had the least effect in classifying different percentages of palm in corn oil and pattern identification. Out of all functional parameters (accuracy, sensitivity, and specificity), the RSM method is deemed more appropriate for determining the percentage of palm in corn oil.

Regarding the separation of corn oil and palm oil by ANFIS, RSM, and ANN, the results in Table 3-1 indicate that the RSM method is better suited for classifying corn and palm oil.

Conclusion

In this study, we used an electronic multi-sensor system based on metal oxide sensors to analyze various aromatic compounds in different oil and palm samples and to detect the presence of palm. The system provided

comparable information for classifying different samples of palm oils. Using PCA, ANN, ANFIS, and RSM methods, we evaluated the system's performance in differentiating and classifying various oil and palm samples.

The results obtained from the loading diagrams for the detection of palm in corn oil indicated that the MQ6 sensor had the least impact on the detection process. Therefore, this sensor can be removed from the sensor array.

Additionally, our analysis showed that using the RSM method is more effective in detecting different percentages of palm in corn oil. Overall, our study demonstrates the efficacy of the electronic multi-sensor system in analyzing different oil and palm samples and detecting the presence of palm.

Keywords: Fatty acid, Fraud, Sensory evaluation

مقاله پژوهشی

جلد ۱۳، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۲، ص ۱۷۴-۱۶۳

تشخیص درصدهای مختلف پالم در روغن ذرت به کمک بینی الکتریکی (تشخیص تقلب)

زهرا زنگنه‌وندی^۱، حسین جوادی کیا^{۲*}، ناهید عقیلی ناطق^۳، لیلا ندرلو^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۲۵

چکیده

روغن‌های جامد نباتی یا روغن‌هایی مثل پالم دارای اسید چرب اشباع بالا هستند، چنین روغن‌هایی می‌توانند باعث بالا رفتن چربی خون، افزایش کلسترول بدن و در نهایت موجب گرفتگی و انسداد عروق شوند. در این پژوهش از یک سامانه به‌منظور تشخیص میزان پالم در روغن ذرت استفاده شده که شامل ده حسگر نیمه‌هادی اکسید فلزی بود. ویژگی‌های استخراج شده از سیگنال‌های به‌دست‌آمده از بینی الکتریکی با روش‌های تحلیل مولفه‌های اصلی، شبکه‌ی عصبی مصنوعی، انفیس و سطح پاسخ پردازش شدند. نمونه‌های مورد آزمایش شامل روغن ذرت خالص، روغن ذرت دارای ۲۵ درصد پالم، روغن ذرت ۵۰ درصد و روغن ذرت ۷۵ درصد است. براساس نتایج به‌دست‌آمده دقت طبقه‌بندی در روش‌های RSM و ANFIS، ANN، PCA به‌ترتیب برابر ۸۷، ۷۱/۹، ۹۳/۸ و ۹۶/۹ درصد است و با توجه به این نتایج روش سطح پاسخ روشی مناسب‌تری برای تشخیص درصد پالم در روغن ذرت می‌باشد. با مدل ارائه شده می‌توان میزان روغن پالم بیش از حد مجاز استفاده شده را تشخیص داد.

واژه‌های کلیدی: اسید چرب، ارزیابی حسی، تقلب

مقدمه

دلیل استفاده‌ی روغن ذرت در رژیم غذایی تأثیرات مثبت آن بر سیستم قلبی و عروقی و سیستم ایمنی بدن می‌باشد. روغن ذرت دارای ۹۹ درصد تری‌اسیل گلیسرول است، که خود این حاوی ۵۹ درصد اسید چرب غیراشباع، ۲۴ درصد اسید غیراشباع شامل یک باند مضاعف می‌باشد و همچنین دارای ۱۳ درصد اسید چرب اشباع می‌باشد. به همین دلیل روغن ذرت دارای مقدار بالایی اسید چرب غیر اشباع می‌باشد و می‌تواند جایگزین مناسبی برای اسیدهای چرب اشباع باشد. زیرا باعث کاهش کلسترول خون شده و به همین خاطر نسبت به سایر روغن‌های مصرفی اهمیت بالایی دارد (Mirmiran, Shideh, Aminpour, & Raei, 2001).

روغن‌ها بعد از غلات به‌عنوان دومین منبع تامین انرژی در

تغذیه‌ی انسان مطرح می‌باشند و به دلیل ارزش غذایی بالا از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد (Nik-Mehr et al., 2015). روغن‌ها به جذب برخی ویتامین‌ها کمک می‌کنند و برای رشد و نموی بافتی ضروری هستند. مقدار و نوع چربی دریافتی تأثیر زیادی بر سلامت افراد جامعه دارد. وجود چربی‌های اشباع و ترانس در روغن‌ها خطر ابتلا به بیماری‌های قلبی و عروقی را افزایش می‌دهد (Lupton, 2005).

روغن پالم، روغنی خوراکی است که از میوه‌ی درخت نخل روغنی استخراج شده‌است و به دلیل مصرف گسترده‌ی آن در صنایع غذایی باعث توجه زیاد به این روغن شده‌است. روغن پالم دارای نسبت‌های مساوی اسیدهای چرب اشباع و غیراشباع است و به اندازه‌ی کافی دارای اسیدهای چرب اساسی می‌باشد. روغن پالم سرشار از اسید اولئیک و اسید پالمیتیک است اما تا زمانی که محتوای چربی کل در سطح توصیه شده‌ی سازمان بهداشتی باشد روی لیپیدهای پلاسمای خون تأثیری نمی‌گذارد. در مالزی خواص فیزیکی و شیمیایی روغن پالم توسط مجامع علمی و طی چند مورد بررسی جامع، به دقت تعیین شده و نتایج آن تحت استاندارد MS 814 مالزی مورخ سال ۱۹۹۴ میلادی ثبت شده‌است (Berger, 1981; Siew & Chong, 1998).

۱- کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

۲- دانشیار مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

۳- استادیار مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی سنقر، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

۴- دانشیار مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

(*) نویسنده مسئول: Email: pjavadikia@gmail.com

<https://doi.org/10.22067/jam.2021.70930.1046>

اولئین و پنبه‌دانه و مخلوط‌های گوناگون پرداختند. نتایج نشان داد بین‌الکتریکی مورد استفاده در این آزمایش با موفقیت درصد ترکیب اجزای تشکیل‌دهنده نمونه مجهول را به‌دست آورد (Seif Elahi, 2011).

تحقیقات گسترده‌ای توسط دستگاه بین‌الکتریکی و ارزیابی کیفیت و نظارت بر تخمیر غذاها و غیره صورت گرفته است (Sanaeifar, Zaki Dizaji, Jafari, & Guardia, 2017).

در پژوهشی به کمک دستگاه بین‌الکتریکی بوی متصاعدشده از شربت نیشکر مورد ارزیابی قرار گرفت و مقدار ساکاروز و درصد خلوص و قند تصفیه‌شده آن توسط خروجی‌های سه حسگر MQ3، MQ5 و MQ9 و به کمک رگرسیون خطی چندگانه و شبکه عصبی مصنوعی مدل شد که عملکرد مدل شبکه عصبی با $R^2 = 0.96$ و RMSE 0.33 بهتر بود (Zaki Dizaji, Adibzadeh, & Aghili, 2021).

از دستگاه بین‌الکتریکی برای ارتباط بوهای ساطع‌شده از انواع شربت نیشکر جهت تشخیص بهترین زمان برداشت استفاده شد. چهار گونه نیشکر (CP57، CP69، IRC99-02 و CP48) انتخاب شدند. از تجزیه و تحلیل تفکیک خطی (LDA)، تجزیه و تحلیل مولفه‌های اصلی (PCA) و شبکه‌های عصبی (ANN) در مدل‌سازی‌ها استفاده شد. نتایج نشان داد که هر سه روش دارای دقت بالایی در طبقه‌بندی تنوع هستند. اما روش‌های LDA و PCA بهتر از روش ANN عمل کردند. به طوری که دقت طبقه‌بندی انواع نیشکر به‌ترتیب ۹۳/۳۳ درصد، ۹۷ درصد و ۹۶/۷ درصد بود (Adibzadeh, Zaki Dizaji, & Aghili, 2019).

در تحقیقی دیگر توسط دستگاه بین‌الکتریکی ۸ گونه گیاه ریحان شناسایی و درجه‌بندی شد. در این تحقیق ابتدا ترکیب‌های اصلی تأثیرگذار اسانس ۸ گونه از گیاه ریحان استخراج شده و با استفاده از روش‌های مرسوم دقیق آزمایشگاهی، نوع و درصد ترکیبات آن‌ها مشخص شد؛ سپس درجه‌بندی این کلاس‌ها با استفاده از دستگاه بین‌الکتریکی و توسط دو مؤلفه اصلی اول PCA مورد ارزیابی قرار گرفت. با استفاده از دو مؤلفه اصلی در این تحقیق می‌توان ۸۸٪ واریانس داده‌ها را توجیه کرد. بررسی نتایج نشان داد دقت طبقه‌بندی توسط حسگر MQ135 حدود ۸۹٪ بود (Golchin, Zaki Dizaji, Surestani, & Fardevani, 2019).

در این تحقیق از یک سامانه بین‌الکتریکی برای تشخیص میزان پالم در روغن ذرت استفاده شده است. ویژگی‌های استخراج شده از سیگنال‌های به‌دست‌آمده از دستگاه با روش‌های تحلیل مولفه‌های اصلی، شبکه‌ی عصبی مصنوعی، انفیس و سطح پاسخ پردازش شدند و نتایج با یکدیگر مقایسه گردید تا بهترین روش جهت تشخیص میزان پالم در روغن مشخص گردد.

اضافه کردن مواد افزودنی برای ماندگاری بیشتر محصولات و بالابردن راندمان از جمله مشکلات موجود در صنعت مواد غذایی است که در حال افزایش می‌باشد (Tawhidi, Ghasemi- Vernamkhasti, GhaffariNia, Mohtasbi & Bonyadian, 2016). حدود ۵۰ درصد از اسیدهای چرب روغن پالم را اسیدهای چرب اشباع تشکیل می‌دهند که باعث بالا رفتن کلسترول بد خون می‌شود که با افزایش آن خطر ابتلا به بیماری‌های قلبی افزایش می‌یابد (Rashidi & Birmie, 2014). امروزه دانشمندان به اهمیت شناسایی و تعیین بو در بسیاری از زمینه‌ها دست یافتند. یکی از راه‌های شناسایی مواد شیمیایی در هوا استفاده از دستگاه‌های آزمایشگاهی بزرگ مانند کروماتوگرافی گازی (GC) و اسپکترومتری جرمی (MS) است، در حالی که این روش‌ها وقت‌گیر و پرهزینه است. این دلایل سبب پیدایش بین‌الکتریکی شده است (Ghasemi- Vernamkhasti et al., 2011).

بین‌الکتریکی مجموعه‌ای از حسگرهاست که برای شناسایی دقیق بوهای پیچیده از محصولات کشاورزی و محصولات غذایی و مانند آن استفاده می‌شود. حسگرهای هوشمند بین‌الکتریکی کار سیستم بویایی انسان را شبیه‌سازی می‌کند و گازهای فراری که متصاعد می‌شوند را بو می‌کند. ماشین بویایی از روش‌های جدید ارزیابی غیرمخرب مواد غذایی و محصولات کشاورزی است (Foroughi-Rad, Mohtasebi, Ghasemi, & Omid, 2014).

در پژوهشی به بررسی مقدار پالم در کره به روش کروماتوگرافی پرداختند. در این پژوهش ۵/۰ تا ۵۰ درصد پالم به کره اضافه گردید. نتایج افزایش در اسید چرب غیراشباع و کاهش در اسید چرب اشباع در اثر اضافه نمودن پالم را نشان داد (Feizy & Jahani, 2020).

ایاری و همکاران نیز در سال ۱۳۹۶، کیفیت روغن حیوانی گاوی را با استفاده از ماشین بویایی، ارزیابی کردند. نتایج حاصل شده از تحقیقات نشان داد که سامانه بین‌الکتریکی می‌تواند جایگزین مناسبی برای روش‌های پیچیده و زمان‌بر برای تعیین کیفیت روغن حیوانی و تعیین درجه خلوص آن باشد (Ayari, Mirzaee-Ghaleh, Rabbani, & Heidarbegi, 2020).

در پژوهش دیگری از یک بین‌الکتریکی برای شناسایی و تشخیص تقلب در روغن زیتون استفاده شد. سامانه مورد استفاده شامل ۱۲ حسگر نیمه‌هادی اکسید فلز بود که برای تولید الگو از ترکیبات فرار موجود در نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفت. روش نمونه‌گیری سیستم از نوع استاتیکی، سیستم تشخیص از نوع حسگرهای نیمه‌هادی اکسید فلز و سیستم پردازش داده شامل شبکه عصبی مصنوعی بود. براساس نتایج تفکیک روغن تقلبی و غیرتقلبی به‌خوبی انجام گرفت. حتی دستگاه قادر به تعیین نوع روغن تقلبی نیز بود (Mildner-Szkudlarz & Jeleń, 2008).

در مطالعه‌ای دیگر به بررسی خواص بویایی روغن‌های پالم

مواد و روش‌ها

آماده‌سازی نمونه‌ها

برای آماده کردن نمونه‌ها با درصد‌های مختلف پالم برای هر نمونه مقدار ۷۵ گرم روغن پالم و روغن ذرت با درصد‌های تعیین شده در ظرف‌های مخصوص تهیه و نگهداری شد.

روغن پالم مورد نیاز، از کارخانه‌ی کشت و صنعت روغن نازگل در کرمانشاه تهیه شد و روغن ذرت از مراکز روغن‌گیری طبیعی تهیه شد.



شکل ۱- نمونه‌های آماده شده جهت آزمایش

Fig.1. Prepared samples for testing

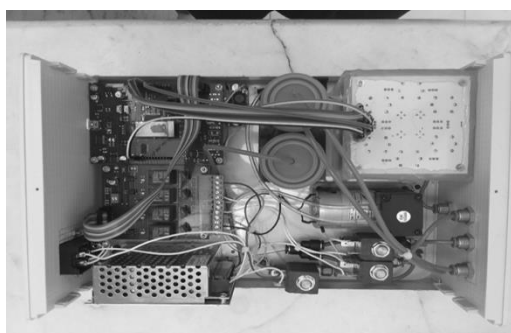
جدول ۱- نمونه‌های مورد آزمایش

Table 1- Test samples		
ذرت	پالم	نمونه
Corn (%)	Palm (%)	Sample
75	25	1
50	50	2
25	75	3
100	0	4

پیاده‌سازی سامانه بینی الکترونیک

اکسید فلزی (MOS) استفاده شد که تصویر واقعی این سیستم در شکل ۲ نشان داده شده است.

در سامانه‌ی بینی الکترونیکی استفاده شده از ده حسگر نیمه‌هادی



شکل ۲- نمای کلی سامانه بینی الکترونیک

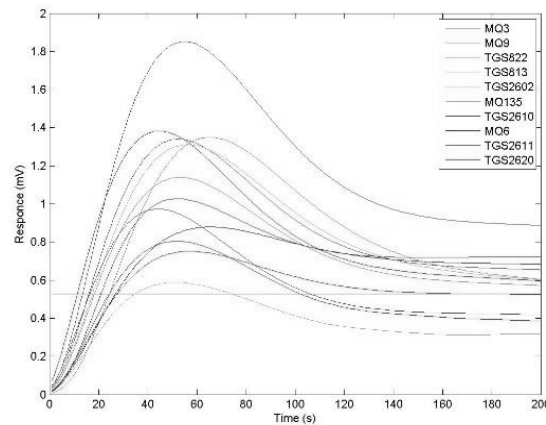
Fig.2. Overview of electronic nose system

تشخیص ترکیبات فرار به‌خوبی انجام می‌شود و هم در هزینه صرفه‌جویی (Doleman & Lewis, 2001). به همین دلیل از ده حسگر (TGS813, TGS2611, TGS2610, TGS2620, MQ135, MQ9, TGS2602, TGS822, MQ5, MQ3) ساخت چین استفاده گردید (جدول ۱).

این سامانه شامل محفظه حسگرها، محفظه نمونه، یک میکروپمپ، سه شیر سولنوییدی ۲ راهه دو حالت، سیستم جمع‌آوری داده (USB)، منبع تغذیه ۵ و ۱۲ ولتی، فیلتر هوای ورودی (کربن فعال) و رابط گرافیکی (LabVIEW 2014) می‌باشد. یکی از مراحل مهم انتخاب حسگرهای مناسب می‌باشد که با یک انتخاب درست هم

جدید و پاسخ حسگرها به صورت تغییرات ولتاژ مناسب با زمان ثبت گردید.

سامانه‌ی مورد استفاده شامل سه مرحله‌ی کاری بود: ۱- رسیدن به خط مبنا، ۲- انتقال بوی نمونه به داخل محفظه‌ی حسگرها، ۳- پاک شدن محفظه‌ی حسگرها از بوهای دیگر برای شروع داده‌برداری



شکل ۳- پاسخ حسگر بینی الکترونیک به بوی نمونه

Fig.3. Electronic nasal sensor response to sample odor

اختلافی، کسری و نسبی صورت می‌گیرد (Kiani, Minaei, & Ghasemi-Varnamkhasti, 2018). در حسگرهای نیمه‌هادی اکسید فلزی از روش کسری برای تصحیح خط مبنا استفاده می‌گردد (Gutierrez-Osuna, 2002).

تحلیل داده‌ها

داده‌های خروجی حسگرها که عملیات پیش‌پردازش بر روی آن‌ها انجام شد با روش‌های ANFIS, PCA, ANN, RSM برای تخمین درصد پالم در روغن ذرت، با استفاده از نرم‌افزار Unscrambler V. 9.1 و Design expert 8.07.1 و R2013a MATLAB تحلیل شدند.

تحلیل مؤلفه اصلی (PCA)

برای فشردن داده‌های خطی و کاهش ابعاد داده‌ها استفاده می‌شود (Scott, James, & Zulfiquir, 2007). این روش یک تبدیل خطی متعامد در ریاضی نامیده می‌شود، که داده‌های خروجی را به یک دستگاه متخصات جدید می‌برد و به این داده‌های جدید که بدون همبستگی هستند مولفه‌های اصلی می‌گویند. طبقه‌بندی بر روی این نمونه‌ها انجام می‌شود به دلیل کم بودن متغیرهای اصلی کار تحلیل، توزیع و نمایش نمونه‌ها راحت تر انجام می‌شود.

مرحله‌ی اول و دوم ۱۰۰ ثانیه و مرحله‌ی سوم (پاک‌سازی) ۵۰ ثانیه طول کشید که در مرحله‌ی اول هوای تازه با دبی ۶۰۰۰ سی‌سی بر دقیقه با عبور از میکروپمپ خلائی و شیر سولنوییدی ۱ وارد محفظه سنسورها شد و باعث پاک‌سازی فضای حسگرها شد تا تغییرات ولتاژی حسگرها به حالت پایدار برگردد. در این مرحله شیر سولنوییدی ۲ بسته می‌شود و شیر سولنوییدی ۳ باز می‌شود تا هوا خارج شود. در مرحله‌ی بعدی بوی نمونه به وسیله‌ی شیر سولنوییدی ۲ و میکروپمپ خلائی با دبی ۶۰۰۰ سی‌سی بر دقیقه وارد محفظه حسگرها می‌شود در این مرحله به خاطر افزایش غلظت در محفظه‌ی حسگرها ولتاژ خروجی حسگرها افزایش می‌یابد، در مرحله‌ی دوم شیرهای سولنوییدی ۱ و ۳ بسته می‌باشند. در مرحله ۳ شیرهای سولنوییدی ۱ و ۳ باز می‌شوند و هوای فیلترشده از طریق میکروپمپ خلائی وارد محفظه حسگرها شده و بعد از پاک‌سازی محفظه‌ی حسگرها خارج می‌شود. که برای هر نمونه ۷ بار تکرار انجام شد و الگوی پاسخ‌ها به صورت فایل اکسل برای هر حسگر ذخیره می‌شود.

پیش‌پردازش و آماده‌سازی داده‌های مستخرج از

سیگنال‌های بینی الکترونیک

برای به دست آوردن ویژگی‌ها ابتدا باید پیش‌پردازشی روی داده‌های خروجی حسگرها انجام شود. دلیل پیش‌پردازش داده‌ها مشخص کردن پاسخ سنسورها و افزایش دقت در تحلیل الگوها است. از سه روش برای تصحیح خط مبنا استفاده شده که شامل روش

نتایج و بحث

تشخیص درصد پالم در روغن ذرت با استفاده از بینی الکترونیک

تعداد مولفه‌های استخراج شده در هر مدل برابر است با تعداد متغیرهایی که بررسی می‌شوند. اما می‌توان تعداد مشخصی از این مولفه‌ها را انتخاب نمود. معمولاً دو یا سه مولفه اول مقدار قابل توجهی از پراکندگی داده‌ها را در نظر می‌گیرد. بنابراین انتخاب دو یا سه مولفه اول برای ادامه کار کفایت می‌کند (Ghasemi-Varnamkhasti, Mohtasebi, Siadat, Ahmadi, & Razavi, 2015).

با توجه به نمودار اسکور مولفه‌های اصلی شکل ۴ مؤلفه‌ی اصلی PC-1 و PC-2 به ترتیب ۵۳ و ۲۵ درصد بودند که مقدار واریانس بین نمونه‌ها در مجموع ۷۸ کل داده‌ها را توصیف می‌کند. با توجه به نتایج به دست آمده شکل ۵ مشاهده می‌شود که حسگرهای MQ6 و TGS2610 تأثیر کمی در فرآیند تشخیص داشتند می‌توان آن‌ها را از آرایه حسگری حذف کرد. زمانی که نیاز است تا هزینه ساخت آرایه حسگری سامانه ماشین بویایی کاهش یابد حسگر شماره ۶ در مقایسه با دیگر حسگرها نقش بیشتری در تشخیص روغن ذرت با ترکیب پالم دارد.

در تحقیقی مشابه مارینا و همکاران از یک سامانه بینی الکترونیک بر پایه حسگرهای صوتی موج سطحی و روش مولفه‌های اصلی برای تشخیص تقلب در روغن نارگیل استفاده کردند. نمونه‌های تقلبی و روغن نارگیل خالص در دسته‌های مجزایی و با دقت ۷۴ درصد برای مولفه اول و ۱۷ درصد برای مولفه دوم و در مجموع کل ۹۱ درصد قابل تشخیص بودند (Marina, Che Man, & Amin, 2010).

با استفاده از شبکه عصبی

الگوریتم پرسپترون چندلایه پس‌انتشار برای طبقه‌بندی و تشخیص درصدهای مختلف پالم در روغن ذرت با استفاده از داده‌های حاصل از بینی الکترونیک به عنوان ورودی شبکه، استفاده شد. به منظور طبقه‌بندی، شبکه‌ای شامل یک لایه ورودی، یک لایه پنهان و یک لایه خروجی استفاده گردید. تابع فعال‌سازی تانژانت هیپربولیک برای لایه پنهان استفاده گردید. تعداد نرون‌ها در لایه پنهان معمولاً از طریق سعی و خطا تعیین می‌گردد. تعداد نرون‌های لایه ورودی برابر تعداد ویژگی‌های استخراج شده از بینی الکترونیک ۱۰ عدد است و تعداد نرون‌های لایه خروجی برای تشخیص درصدهای مختلف پالم ۴ می‌باشد. در شبکه طراحی شده، نرخ یادگیری ۰/۰۲ استفاده شد. لازم به ذکر است که از ۷۵٪ داده‌ها برای آموزش شبکه و از ۲۵٪ باقی‌مانده برای ارزیابی نهایی استفاده گردید.

روش سطح پاسخ (RSM)

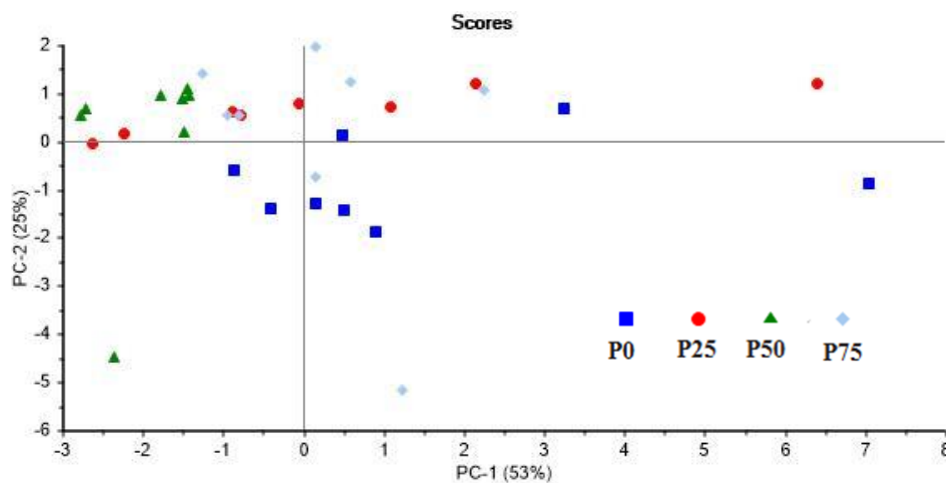
مجموعه‌ای از روش‌های ریاضی است که رابطه بین یک یا چند متغیر پاسخ را با چندین متغیر مستقل (مورد مطالعه) تعیین می‌کند این روش در سال ۱۹۵۱ توسط باکس و ویلسون معرفی شد، تا به امروز نیز از آن به عنوان یکی از ابزارهای طراحی آزمایش استفاده می‌گردد. کرمی و همکاران روش سطح پاسخ را به عنوان یک روش قابل قبول در مقایسه با روش‌های سنتی مدل‌سازی نشان داده است (Karami, Keyhani, & Mowla, 2016).

شبکه عصبی مصنوعی (ANN)

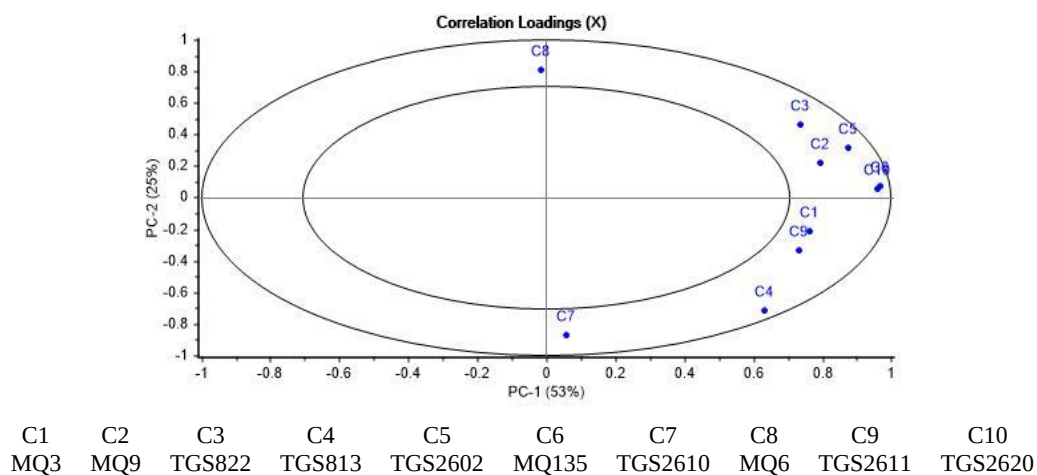
این روش از پرکاربردترین روش‌ها برای داده کاوی هوشمند است. ایده‌ی این روش از نرون‌های عصبی مغز انسان توسط پیتز و مک کالاج در سال ۱۹۴۰ مطرح شد. یک سامانه‌ی پردازشی داده‌ها محسوب می‌شود و وظیفه‌ی پردازش داده‌ها را به عهده دارد که این کار توسط پردازنده‌های کوچک و بسیار زیاد (نرون‌های مصنوعی) انجام می‌شود و آن‌ها به صورت شبکه‌ای به هم پیوسته و موازی عمل می‌کنند تا مسئله را حل کنند و در این شبکه به کمک برنامه‌نویسی، ساختاری لایه‌ای طراحی می‌شود (Neapolitan, 2012).

روش عصبی-فازی (ANFIS)

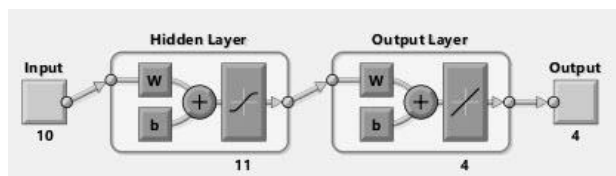
روش عصبی-فازی، نوعی شبکه عصبی مصنوعی است. این شیوه در اوایل ۱۹۹۰ ایجاد شده است از آنجایی که این سیستم، شبکه‌های عصبی و مفاهیم منطق فازی را یکی می‌کند، می‌تواند از امکانات هر دوی آن‌ها در یک قاب بهره برد. از این رو، ANFIS به عنوان یک برآورد جهانی مطرح شده است (Jang, 1991). عملکرد این روش به دو روش شبکه عصبی مصنوعی و منطق فازی بسیار شبیه می‌باشد. در هر دو روش مذکور، نهاده از لایه ورودی (توسط تابع عضویت ورودی) گذر کرده و سپس خروجی مدل در لایه خروجی (توسط تابع عضویت خروجی) به دست می‌آید. از آنجایی که در چنین مدل منطق فازی پیشرفته‌ای از شبکه عصبی استفاده شده است، با استفاده از یک الگوریتم یادگیری می‌توان پارامترها را تا آنجا که به جواب بهینه دست یافت، تغییر داد. در حقیقت در این روش منطق فازی با استفاده از قابلیت‌های شبکه عصبی پارامترهای خود را تنظیم می‌نماید.



شکل ۴- نمودار اسکور درصد پالم در روغن ذرت
Fig. 4. Score chart of the percentage of palm in corn oil



شکل ۵- نمودار لودینگ درصد پالم در روغن ذرت
Fig.5. Palm loading chart in corn oil



شکل ۶- ساختار کلی مدل ANN برای تخمین عملکرد روغن ذرت
Fig.6. General structure of ANN model for estimating corn oil yield

پالم ۲۵ درصد) ۷۰ درصد تشخیص و در نمونه ۳ که روغن ذرت دارای پالم ۵۰ درصد است، دقت طبقه‌بندی برابر ۲۵ درصد است و نمونه‌ی ۴ که شامل ذرت با پالم ۷۵ درصد است با دقت ۸۷/۵

با توجه به شکل ۷، ماتریس اغتشاش حاصل از شبکه عصبی نمونه روغن ذرت خالص را با دقت ۱۰۰ درصد شناسایی کرده است در ماتریس اغتشاش دقت طبقه‌بندی برای نمونه ۲ (روغن ذرت دارای

تشخیص داده شده‌است و در مجموع دقت طبقه‌بندی برای نمونه روغن ذرت با درصد‌های مختلف پالم در تحلیل به روش شبکه عصبی برابر با ۷۱/۹ درصد است.

Confusion Matrix

	1	2	3	4	
1	8 25.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
2	0 0.0%	6 18.8%	0 0.0%	2 6.3%	75.0% 25.0%
3	0 0.0%	3 9.4%	2 6.3%	3 9.4%	25.0% 75.0%
4	1 3.1%	0 0.0%	0 0.0%	7 21.9%	87.5% 12.5%
	88.9% 11.1%	66.7% 33.3%	100% 0.0%	58.3% 41.7%	71.9% 28.1%
	1	2	3	4	
	Target Class				

شکل ۷- ماتریس اغتشاش تشخیص درصد پالم به کمک شبکه عصبی با استفاده از داده‌های بینی الکترونیک
Fig.7. Turbulence matrix detects palm percentage using neural network using electronic nose data

اغتشاش دقت طبقه‌بندی برای نمونه اول که مربوط به روغن ذرت خالص است ۱۰۰ درصد می‌باشد. اما دقت طبقه‌بندی صحیح در نمونه‌های دوم (روغن ذرت دارای پالم ۲۵ درصد) ۸۸/۹ درصد و در نمونه سوم (روغن ذرت دارای پالم ۵۰ درصد) با دقت طبقه‌بندی ۱۰۰ درصد و نمونه چهارم (روغن ذرت دارای پالم ۷۵ درصد) ۸۷/۵ درصد به‌دست آمد. همچنین به‌طور کلی نمونه‌ها با دقت ۹۳/۸ درصد طبقه‌بندی شد.

با استفاده از شبکه RSM

نتایج آنالیز برای تشخیص درصد پالم در روغن ذرت توسط RSM در شکل ۹ نشان داده شده است. با توجه به نتایج حاصل از تحلیل به روش RSM نشان می‌دهد که در ماتریس اغتشاش دقت طبقه‌بندی برای نمونه اول، نمونه دوم و چهارم ۱۰۰ درصد می‌باشد. اما دقت طبقه‌بندی در نمونه سوم ۸۸/۹ درصد به‌دست آمد. همچنین به‌طور کلی نمونه‌ها با دقت ۹۶/۹ درصد طبقه‌بندی شد.

با توجه به روش‌های تحلیل شده در این پژوهش نشان می‌دهد که روش سطح پاسخ روش مناسب‌تری برای تشخیص درصد پالم در روغن ذرت می‌باشد و همچنین با توجه به مقدار همه پارامترهای عملکردی (دقت، حساسیت و ویژگی) (Chicco & Jurman, 2020) مربوط به تفکیک ترکیب روغن ذرت با پالم توسط ANFIS، RSM و ANN با توجه به جدول ۲ به این نتیجه رسیدیم که در طبقه‌بندی روغن ذرت و پالم بهتر است از روش RSM استفاده شود.

ضریب رگرسیون داده‌های آموزش ۰/۷۹۱۵۳، اعتبارسنجی ۰/۶۳۸۵۱، آزمایش ۰/۳۷۶۴۶ و در انتها میزان ضریب رگرسیون کل برابر با ۰/۶۷۵۱۳ به‌دست آمد. بهترین عملکرد اعتبارسنجی در اپوک ۲ با مقدار $MSE = 0/12086$ به‌دست آمد.

های و وانگ با استفاده از یک بینی الکترونیک مجهز به ۱۰ حسگر نیمه‌هادی اکسید فلزی تقلبی و یا غیرتقلبی بودن روغن دانه‌ی کاملیا و روغن کنجد را بررسی کردند. آن‌ها گزارش دادند که تحلیل مولفه‌ی اصلی در تشخیص اصالت روغن کاملیا موثر واقع نمی‌شود اما در مورد روغن کنجد روش مناسبی است و این درحالی است که تحلیل تفکیک خطی قادر به تشخیص اصالت هر دو نوع روغن است. که تشخیص اصالت روغن با استفاده از شبکه‌ی عصبی برای روغن کاملیا ۸۳/۶ و برای روغن کنجد ۹۴/۵ تعیین کردند (Hai & Wang, 2006).

با استفاده از انفیس

نتایج آنالیز برای تشخیص درصد پالم در روغن ذرت توسط ANFIS در شکل ۸ آورده شده است. در روش ANFIS تابع فعال‌سازی هیبرید برای لایه‌ی پنهان استفاده شد. تعداد نرون‌های لایه‌ی پنهان از روش آزمون و خطا تعیین شد. تعداد نرون‌های لایه‌ی ورودی برای تعداد پارامترهای استخراج شده از دستگاه بینی الکترونیک ۱۰ و تعداد نرون‌های لایه‌ی خروجی برای تشخیص درصددهی مختلف پالم ۴ می‌باشد.

نتایج به‌دست آمده با توجه به شکل ۸ نشان می‌دهد که در ماتریس

Confusion Matrix

1	8 25.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
2	0 0.0%	8 25.0%	0 0.0%	1 3.1%	88.9% 11.1%
3	0 0.0%	0 0.0%	7 21.9%	0 0.0%	100% 0.0%
4	0 0.0%	0 0.0%	1 3.1%	7 21.9%	87.5% 12.5%
	100% 0.0%	100% 0.0%	87.5% 12.5%	87.5% 12.5%	93.8% 6.3%
	1	2	3	4	

Target Class

شکل ۸- ماتریس اغتشاش روش ANFIS برای روغن ذرت
Fig.8. ANFIS method perturbation matrix for corn oil

Confusion Matrix

1	8 25.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
2	0 0.0%	7 21.9%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
3	0 0.0%	1 3.1%	8 25.0%	0 0.0%	88.9% 11.1%
4	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	8 25.0%	100% 0.0%
	100% 0.0%	87.5% 12.5%	100% 0.0%	100% 0.0%	96.9% 3.1%
	1	2	3	4	

Target Class

شکل ۹- نتایج حاصل از تحلیل به روش RSM برای روغن ذرت
Fig.9. Results of RSM analysis for corn oil

بینی‌الکتریکی و تکنیک‌های QDA و PCA مدل‌هایی استخراج شد که دقت آن‌ها به‌ترتیب برای ناخالصی روغن نباتی ۹۵/۲۴ و برای ناخالصی روغن دنبه ۹۷/۱۵ بود (Ayari et al., 2020). در این تحقیق حسگر MQ135 کمترین تاثیر را داشت. در تحقیق دیگر که برای تشخیص تقلب در روغن زیتون با ناخالصی روغن فندق صورت گرفت از تکنیک بینی‌الکتریکی و PCA استفاده شد و توانست کیفیت روغن زیتون را به‌خوبی تشخیص دهد (Mildner-Szkudlarz & Jeleń, 2008).

به‌طور خلاصه در این تحقیق از سه تکنیک ANN، ANFIS و RSM به کمک خروجی‌های دستگاه بینی‌الکتریکی استفاده شد که بهترین مدل ۹۶/۹ درصد دقت تشخیص داشت و قادر بود ناخالصی‌های روغن ذرت توسط روغن پالم را با نسبت‌های صفر، ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد تشخیص دهد در صورتی که در بررسی‌های انجام شده پژوهشی بر روی میزان پالم در روغن ذرت و روغن‌های دیگر به کمک دستگاه بینی‌الکتریکی صورت نگرفته است. با این وجود در تحقیقی که جهت تشخیص تقلب در روغن حیوانی گاوی صورت گرفت درصدهای مختلفی از ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد روغن نباتی و روغن دنبه به روغن حیوانی اضافه شد و توسط دستگاه

جدول ۲- تحلیل عملکرد سیستم‌های دسته‌بندی برای روغن ذرت

Table 2- Performance analysis of classification systems for corn oil

ذرت	درصد	حساسیت	ویژگی	دقت
Corn	Percentage	allergy	Property	Accuracy
ANFIS	0	1	0.95	1
	25	0.63	1	0.89
	50	0.88	0.86	1
	75	0.75	0.91	0.88
ANN	0	1	0.95	0.89
	25	0.63	1	1
	50	0.88	0.86	0.75
	75	0.75	0.91	0.75
RSM	0	1	1	1
	25	0.88	1	1
	50	1	0.96	0.89
	75	1	1	1

نتیجه‌گیری

در این پژوهش جهت تحلیل ترکیبات معطر متفاوت نمونه‌های مختلف روغن و پالم، به جهت تشخیص پالم از سامانه چند حسگری بینی الکترونیک بر پایه حسگرهای اکسید فلزی استفاده گردید. سامانه ایجادشده اطلاعات قابل مقایسه‌ای را برای طبقه‌بندی نمونه‌های روغن ذرت با پالم فراهم کرد. با استفاده از روش‌های PCA، ANN، ANFIS و RSM عملکرد سامانه برای تمایز و طبقه‌بندی نمونه‌های

روغن ذرت و پالم مورد بحث و بررسی قرار گرفت.

نتایج به‌دست‌آمده از نمودار لودینگ برای تشخیص پالم در روغن ذرت نشان داد در روغن ذرت حسگر MQ6 و TGS2610 کمترین تاثیر در فرآیند تشخیص را داشتند. برای تشخیص درصد‌های مختلف پالم در روغن ذرت بهتر است از روش RSM استفاده کرد.

References

- Adibzadeh, A., Zaki Dizaji, H., & Nategh, N. A. (2019). Feasibility of Detecting Sugarcane Varieties by Electronic Nose Technique in Sugarcane Syrup. *Iranian Journal of Biosystem Engineering*, 51, 1-10. <https://doi.org/10.22059/IJBSE.2019.287027.665209>
- Ayari, F., Mirzaee-Ghaleh, E., Rabbani, H., & Heidarbeigi, K. (2020). Implementation of a Machine Olfaction for the Detection of Adulteration in Cow Ghee. *Journal of Agricultural Machinery*, 10(2), 129-139. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jam.v10i2.67524>
- Berger, K. G. (1981). Food uses of palm oil. *Porim occasional paper*, 2, 1-27.
- Chicco, D., & Jurman, G. (2020). The advantages of the Matthews correlation coefficient (MCC) over F1 score and accuracy in binary classification evaluation. *BMC Genomics*, 21(6), 1-13. <https://doi.org/10.1186/s12864-019-6413-7>
- Doleman, B. J., & Lewis, N. S. (2001). Comparison of odor detection thresholds and odor discriminabilities of a conducting polymer composite electronic nose versus mammalian olfaction. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 72, 41-50. Available at: https://people.ee.duke.edu/~lcarin/DeminingMURI/Doleman_Sensor_Actuators_2001.pdf
- Feizy, J., & Jahani, M. (2020). A chromatographic method for detection of palm oil in butter. *Journal of Food and Bioprocess Engineering*, 3, 47-52. <https://doi.org/10.22059/JFABE.2020.76393>
- Foroughi-Rad, A., Mohtasebi, S. S., Ghasemi, M., & Omid, M. (2014). Nondestructive quality evaluation of Abbot Kiwifruit using electronic nose. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 45, 1-9. <https://doi.org/10.22059/IJBSE.2014.51285>
- Ghasemi-Varnamkhasti, M., Mohtasebi, S. S., Siadat, M., Ahmadi, H., & Razavi, S. H. (2015). From simple classification methods to machine learning for the binary discrimination of beers using electronic nose data. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 8, 44-51. <https://doi.org/10.1016/j.eaef.2014.07.002>
- Ghasemi-Varnamkhasti, M., Mohtasebi, S. S., Siadat, M., Lozano, J., Ahmadi, H., Razavi, S. H., & Dicko, A. (2011). Aging fingerprint characterization of beer using electronic nose. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 159, 51-59.
- Golchin, A., Zaki Dizaji, H., Surestani, M. M., & Fardevani, M. E. K. (2019). The Electronic Nose Technique for Nondestructive clustering of Basil as a Medicinal Plant. *Non-destructive Testing Technology*, 2(4), 54-60.

- <https://doi.org/10.30494/JNDT.1398.95385>
11. Gutierrez-Osuna, R. (2000). Pattern analysis for machine olfaction: a review. *IEEE Sensors Journal*, 2(3), 189-202. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2002.800688>
12. Hai, Z., & Wang, J. (2006). Detection of adulteration in camellia seed oil and sesame oil using an electronic nose. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 108, 116-124. <https://doi.org/10.1002/ejlt.200501224>
13. Jang, J. S. R. (1991). Fuzz Modeling Using Generalized Neural Networks and Kalman Filter Algorithm in Proceedings of the 9th National Conference on Artificial Intelligence. Anaheim, CA, USA.
14. Karami, H. R., Keyhani, M., & Mowla, D. (2016). Experimental analysis of drag reduction in the pipelines with response surface methodology. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 138, 104-112. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2015.11.041>
15. Kiani, S., Minaei, S., & Ghasemi-Varnamkhasti, M. (2018). Real-time aroma monitoring of mint (*Mentha spicata* L.) leaves during the drying process using electronic nose system. *Measurement*, 124, 447-452. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.03.033>
16. Lupton, J. R. (2005). *For Energy, Carbohydrate, Fiber, Fat, Fatty Acids, Cholesterol, Protein, and Amino Acids*. Washington, DC: US Government Printing Office: Institute of Medicine. Report no.
17. Marina, A. M., Che Man, Y. B., & Amin, I. (2010). Use of the SAW Sensor Electronic Nose for Detecting the Adulteration of Virgin Coconut Oil with RBD Palm Kernel Olein. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 87, 263-270. <https://doi.org/10.1007/s11746-009-1492-2>
18. Mildner-Szkudlarz, S., & Jeleń, H. H. (2008). The potential of different techniques for volatile compounds analysis coupled with PCA for the detection of the adulteration of olive oil with hazelnut oil. *Food Chemistry*, 110(3), 751-761. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.02.053>
19. Mirmiran, P., Shideh, F., Aminpour, A., & Raei, F. (2001). The effect of corn oil on the metabolism of laboratory mice. *Research in Medicine*, 25, 43-46.
20. Neapolitan, R. E. (2012). Contemporary artificial intelligence. Boca Raton, Fla: CRC.
21. Nik-Mehr, S., Abdshahi, A., & Mirzaei, A. (2015). Evaluation of welfare effects of changes in the market inventory of edible oils in Iran. *Agricultural Economics Research*, 8(1), 71-83. Available at: <https://ensani.ir/file/download/article/20160903152009-10006-210.pdf>
22. Rashidi, H., & Birmie, M. (2014). *Palm oil: benefits and harms*. Third National Conference on Food Science and Industry, Quchan.
23. Sanaeifar, A., Zaki Dizaji, H., Jafari, A., & Guardia, M. D. L. (2017). Early detection of contamination and defect in foodstuffs by electronic nose: A review. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 97, 257-271. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2017.09.014>
24. Scott, S. M., James, D., & Zulfiquir, A. (2007). Data analysis for electronic nose systems. *Microchimica Acta*, 156(3), 183-207. <https://doi.org/10.1007/s00604-006-0623-9>
25. Seif Elahi, F. (2011). Investigation of olfactory properties of palm olein and cottonseed oils and their various mixtures. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 10, 16-22.
26. Siew, W. L., & Chong, C. L. (1998). *Phase transition of crystals in palm olein*. PORIM Report PO 283: 1-71.
27. Tawhidi, M., Ghasemi-Varnamkhasti, M., GhaffariNia, V., Mohtasbi, S. S., & Bonyadian, M. (2016). Fabrication and development of a machine olfaction system combined with pattern recognition techniques for detecting formalin adulteration in raw milk. *Iranian Journal of Biosystem Engineering*, 47, 761-770.
28. Zaki Dizaji, H., Adibzadeh, A., & Aghili Nategh, N. (2021). Application of E-nose technique to predict sugarcane syrup quality based on purity and refined sugar percentage. *Journal of Food Science and Technology*, 58, 4149-4156. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04879-4>



Maize Tassel Detection and Counting Using Deep Learning Techniques

Sh. Falahat Nejad Mahani¹, A. Karami^{2*}

1- Ph.D. Student, Faculty of Physics, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

2- Associate Professor, Faculty of Physics, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

(*- Corresponding Author Email: azam.karami@gmail.com)<https://doi.org/10.22067/jam.2022.72477.1062>

Received: 16 September 2021

Revised: 28 November 2021

Accepted: 02 January 2022

Available Online: 02 January 2022

How to cite this article:Falahat Nejad Mahani, Sh., & Karami, A. (2023). Maize Tassel Detection and Counting Using Deep Learning Techniques. *Journal of Agricultural Machinery*, 13(2), 175-194. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jam.2022.72477.1062>

Introduction

Maize is one of the most important cereal crops worldwide, providing staple food for people globally. Counting maize tassels provides essential information about yield prediction, growth status, and plant phenotyping, but traditional manual approaches are expensive and time-consuming. Recent developments in technology, including high-resolution RGB imagery acquired by unmanned aerial vehicles (UAVs) and advanced machine-learning techniques such as deep learning (DL), have been used to analyze genotypes, phenotypes, and crops.

In this study, we modified the YOLOv5s single-stage object detection technique based on a deep convolutional neural network and named it MYOLOv5s. We incorporated BottleneckCSP structures, Hardswish activation function, and two-dimensional spatial dropout layers to increase tassel detection accuracy and reduce overfitting. Our method's performance was compared with three state-of-the-art algorithms: TasselNetv2+, RetinaNet, and Faster R-CNN. The results obtained from our proposed method demonstrate the effectiveness of MYOLOv5s in detecting and counting maize tassels.

Materials and Methods

The High-Intensity Phenotyping Site (HIPS) dataset was collected from the large field at the Agronomy Center for Research and Education (ACRE) of Purdue University, located in West Lafayette, Indiana, USA during the 2020 growing season. A Sony Alpha 7R-III RGB camera mounted on a UAV at a 20m altitude captured high-resolution orthophotos with a pixel resolution of 0.25 cm. The dataset consisted of two replications of 22 entries each for hybrids and inbreds, planted on May 12 using a two-row segment plot layout with a plant population of 30,000 per acre. The hybrids and inbreds in this dataset had varying flowering dates, ranging from 20 days between the first and last variety.

This article uses orthophotos taken on July 20th and 24th to train and test the proposed deep network "MYOLOv5s." These orthophotos were divided into 15 images (3670×2150) and then cropped to obtain 150 images (608 × 2048) for each date. Three modifications were applied to the original YOLOv5s to form MYOLOv5s: BottleneckCSP structures were added to the neck part of the YOLOv5s, replacing some C3 modules; two-dimensional spatial dropout layers were used in the defect layer; and the Hardswish activation function was utilized in the convolution structures. These modifications improved tassel detection accuracy. MYOLOv5s was implemented in the Pytorch framework, and the Adam algorithm was applied to optimize it. Hyper-parameters such as the number of epochs, batch size, and learning rates were also optimized to increase tassel detection accuracy.

Results and Discussion

In this study, we first compared the original and modified YOLOv5s techniques, and our results show that MYOLOv5s improved tassel detection accuracy by approximately 2.80%. We then compared MYOLOv5s performance to the counting-based approach TasselNetv2+ and two detection-based techniques: Faster R-CNN and RetinaNet. Our results demonstrated the superiority of MYOLOv5s in terms of both accuracy and inference time. The proposed method achieved an AP value of 95.30% and an RMSE of 1.9% at 84 FPS, making it about

1.4 times faster than the other techniques. Additionally, MYOLOv5s correctly detected the highest number of maize tassels and showed at least a 17.64% improvement in AP value compared to Faster R-CNN and RetinaNet, respectively. Furthermore, our technique had the lowest false positive and false negative values. The regression plots show that MYOLOv5s provided slightly higher fidelity counts than other methods.

Finally, we investigated the effect of score values on the performance of detection-based models and calculated the optimal values of hyperparameters.

Conclusion

1. The MYOLOv5s technique outperformed other state-of-the-art models in detecting maize tassels, achieving the highest precision, recall, and average precision (AP) values.
2. The MYOLOv5s method had the lowest root mean square error (RMSE) value in the error counting metric, demonstrating its accuracy in detecting and counting maize tassels.
3. We evaluated the correlation between predicted and ground-truth values of maize tassels using the R2 score, and for the MYOLOv5s method, the R2 score was approximately 99.28%, indicating a strong correlation between predicted and actual values.
4. The MYOLOv5s method performed exceptionally well in detecting tassels, even in highly overlapping areas. It accurately distinguished and detected tassels, regardless of their proximity or overlap with other objects.

When compared to the counting-based approach TasselNetv2+, our proposed MYOLOv5s method showed faster inference times. This suggests that the MYOLOv5s method is computationally efficient while maintaining accurate tassel detection capabilities.

Keywords: Deep learning, Image processing, Maize tassel, Object detection, UAV

مقاله پژوهشی

جلد ۱۳، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۲، ص ۱۷۵-۱۹۴

تشخیص و شمارش خودکار کاکل‌های ذرت با استفاده از آشکارساز مبتنی بر یادگیری عمیق

شهرزاد فلاحت نژاد ماهانی^۱، اعظم کرمی^{۲*}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۱۲

چکیده

در سال‌های اخیر استفاده از یادگیری عمیق در کشاورزی دقیق به منظور تشخیص و شمارش آفات و یا بیماری‌های گیاهان، سمپاشی هوشمند، تخمین سطح زیر کشت و نظارت بر روند رشد گیاهان جهت مقابله با عوامل بازدارنده و یا کاهش‌دهنده رشد و با هدف افزایش بهره‌وری محصولات کشاورزی به سرعت رو به افزایش است. در این مقاله، به طراحی الگوریتمی برگرفته از شبکه عصبی عمیق YOLOv5s جهت تشخیص و شمارش خودکار کاکل‌های گیاه ذرت پرداخته شده است. برای این منظور، از تصاویر اخذ شده توسط پهپاد از مزرعه ذرت در دو تاریخ متفاوت جهت آموزش و ارزیابی شبکه استفاده گردیده و با توجه به نوع و اندازه داده به اعمال تغییراتی در معماری و تابع فعال‌سازی الگوریتم اصلی YOLOv5s با هدف افزایش تعداد پارامترهای شبکه، کاهش بیش برآزش و افزایش دقت تشخیص پرداخته شد و الگوریتم Modified YOLOv5s که به اختصار MYOLOv5s نام دارد به عنوان نسخه بهبودیافته YOLOv5s با قابلیت شناسایی و شمارش کاکل‌های ذرت با مقادیر ضریب تبیین R^2 ۹۹/۲۸ درصد و دقت متوسط (AP) ۹۵/۳۰ درصد حاصل شد. همچنین، عملکرد روش پیشنهادی به کار گرفته شده در این مقاله با الگوریتم‌های معتبر معرفی شده در این زمینه $TasselNetv2+$ ، Faster R-CNN و RetinaNet مقایسه گردید. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که مقادیر ضریب تبیین برای این سه شبکه به ترتیب ۷۷/۸۶، ۸۶/۸۳ و ۹۵/۵۳ درصد می‌باشد. همچنین برای الگوریتم‌های Faster R-CNN و RetinaNet مقادیر دقت متوسط ۷۶/۹۹ و ۷۷/۶۶ درصد به دست آمد. این نتایج نشان می‌دهند که الگوریتم MYOLOv5s حداکثر مقادیر ضریب تبیین R^2 و دقت متوسط (AP)، دقت (Precision) و یادآوری (Recall) را دارد که بیانگر کارایی بالای روش پیشنهادی در تشخیص کاکل ذرت است. شایان ذکر است MYOLOv5s با دارا بودن سرعت پردازش ۸۴ فریم بر ثانیه سریع‌ترین روش در تشخیص کاکل ذرت محسوب می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: پردازش تصویر، پهپاد، تشخیص شی، کاکل ذرت، یادگیری عمیق

مقدمه

ذرت یک مزرعه به منظور مقابله با این گونه اثرات آسیب‌زا در صورت مشاهده تغییر در رشد امری ضروری است (Parihar et al., 2011; Lu, Cao, Xiao, Zhuang, & Shen, 2017). علاوه بر این جمعیت یک گیاه به عنوان یک شاخص اساسی در بررسی خواص فنوتایپینگ آن نیز به شمار می‌رود. نظارت بر گیاه ذرت در زمان گل‌دهی آن نیز نقش مهمی در تعیین بهره‌وری این محصول دارد زیرا اگر گیاهان خیلی زود گل بدهند محصول قبل از پایان فصل رشد بالغ می‌شود و فرصت جذب و استفاده از مقادیر زیادی انرژی نور برای فوتوسنتز را از دست می‌دهند و چنانچه خیلی دیر گل بدهند ممکن است محصول قبل از آماده شدن برای برداشت با تغییر فصل از بین برود. لذا، حتی مقادیر اندک تنش می‌تواند عملکرد را به میزان قابل توجهی تغییر دهد (Alzadjali et al., 2021). در گذشته این نظارت از طریق اشخاص انجام می‌گرفت که امری طاقت‌فرسا، زمان‌بر و غیردقیق بود. اما اکنون برای فایده آموختن بر این مشکل، روش‌هایی نوین برای شمارش

ذرت به عنوان یکی از مهم‌ترین غلات در فراهم آوردن تغذیه بخش کثیری از جمعیت کره زمین به شمار می‌رود. همچنین، به‌طور گسترده‌ای به عنوان خوراک دام، سوخت زیستی و مواد اولیه در صنعت نیز کاربرد دارد (Tagne, Feujio, & Sonna, 2008). از این رو، برداشت حداکثری این محصول حائز اهمیت می‌باشد. این امر نیازمند کاهش و یا ترجیحاً حذف عوامل آسیب‌زا به گیاهان نظیر خاک نامرغوب، آفات، بیماری‌ها، خورده شدن بذر توسط حشرات و پرندگان و غیره می‌باشد. از این رو نظارت مستمر بر روند رشد و تعداد گیاهان

۱ و ۲- به ترتیب دانشجوی دکترا و دانشیار دانشکده فیزیک، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

(*)- نویسنده مسئول: Email: azam.karami@gmail.com
<https://doi.org/10.22067/jam.2022.72477.1062>

طریق رسم کادرهای محصورکننده با امتیاز معین در اطراف شی و یا رسم نقطه در مرکز آن انجام می‌گیرد (Lempitsky & Zisserman, 2010).

اخیراً، تعدادی مدل یادگیری عمیق نیز برای تشخیص و شمارش کاکل‌های ذرت پیشنهاد شده‌اند. الگوریتم‌های بر پایه شمارش TasselNet (Lu et al., 2017)، TasselNetv2 (Xiong et al., 2019) و TasselNetv2+ (Lu & Cao, 2020) از جمله مدل‌های مورد استفاده برای شمارش هستند. همان‌گونه که گفته شد این مدل‌ها از یک الگوریتم رگرسیون جهت پیش‌بینی تعداد کاکل‌های ذرت استفاده می‌کنند و TasselNetv2+ به‌عنوان نسخه بهبودیافته دو الگوریتم TasselNet و TasselNetv2 قادر خواهد بود کاکل‌های ذرت موجود در تصاویر ابعاد بالا را در زمان کم بشمارد. شبکه‌های Faster R-CNN (Liu et al., 2020) و RetinaNet (Zou, Lu, Li, Liu, & Cao, 2020) برای تشخیص و شمارش کاکل‌ها به‌کار گرفته شده‌اند. در مدل مبتنی بر Faster R-CNN جهت این امر از دو شبکه پشتیبان VGGNet³ و ResNet⁴ استفاده شده است و با بهبود اندازه لنگرها⁵ مدل شناسایی کاکل ذرت طراحی شده است. در طراحی مدل بر پایه RetinaNet نیز از ResNet34 به‌عنوان شبکه پشتیبان مدل تشخیص کاکل ذرت استفاده شده است. از مقایسه این روش‌ها با هم در (Zou et al., 2020) این نتیجه حاصل شد که مدل‌های استفاده شده جهت شمارش نسبت به روش‌های بر پایه تشخیص سریع‌تر عمل می‌کنند و توانایی بیشتری در شمارش کاکل‌های با هم‌پوشانی بالا دارند اما علی‌رغم روش‌های مبتنی بر تشخیص قادر به تعیین دقیق موقعیت مکانی و اندازه هر کاکل نمی‌باشند.

بدین جهت، برای هرچه کارآمدتر بودن روش‌های یادگیری عمیق در شناسایی کاکل‌های ذرت طراحی الگوریتمی مبتنی بر تشخیص که دارای سرعت پردازش بالا نیز باشد برای امر شمارش گیاهان بسیار حائز اهمیت می‌باشد. از این رو، در این مقاله به طراحی شبکه MYOLOv5s به‌عنوان نسخه بهبودیافته الگوریتم مبتنی بر تشخیص YOLOv5s (Jocher et al., 2020) برای تحلیل داده‌های کاکل ذرت پرداخته شده است. این الگوریتم به‌صورت تخصصی با توجه به نوع مجموعه داده و ویژگی‌های کاکل‌های ذرت در آن (شکل، اندازه، رنگ، بافت و غیره) جهت شناسایی این گیاه به‌صورت اختصاصی طراحی شده است. در ادامه به نوآوری‌های انجام گرفته در طراحی الگوریتم MYOLOv5s اشاره خواهد شد:

۱- جایگزین کردن برخی ساختارهای C3 در قسمت گردن⁶ شبکه

خودکار محصولات زراعی مبتنی بر هوش مصنوعی و پردازش تصویر در سالیان اخیر پیشنهاد شده است.

از جمله به‌کارگیری روش‌های هوش مصنوعی و پردازش تصویر در حوزه کشاورزی می‌توان به شناسایی علف‌های هرز (Parihar et al., 2011)، تشخیص بیماری‌ها (Gómez-Flores, Garza, Saldaña, & Varela-Fuentes, 2019; Pourreza, Lee, Lu, & Banerjee, 2015)، شمارش کاکل‌های ذرت (Liu et al., 2020)، شمارش برگ (Ubbens, Cieslak, Prusinkiewicz, & Stavness, 2018)، تشخیص نهال‌ها (Quan et al., 2019) و شناسایی و شمارش سورگوم (Ghosal et al., 2019) اشاره کرد. تمامی مقالات نام‌برده با طراحی الگوریتم‌های مختلف مبتنی بر هوش مصنوعی و پردازش تصویر توانسته‌اند عمل شمارش و یا تشخیص شی مورد نظر را به‌صورت خودکار انجام داده و با کاهش زمان و افزایش قدرت شمارش و یا تشخیص گام بزرگی در جهت کشاورزی هوشمند بردارند. هرچند کاهش زمان تشخیص و افزایش بیشتر دقت هنوز یک مسئله باز محسوب می‌گردد و هر پیشرفتی در این امر شایسته تقدیر است.

الگوریتم‌های هوش مصنوعی به‌کار رفته در مقالات ذکر شده در دو گروه روش‌های کلاسیک و یادگیری عمیق¹ جهت شمارش و یا تشخیص شی مورد نظر قابل بحث هستند. از جمله روش‌های کلاسیک می‌توان به تشکیل تصویر دودویی، روش‌های مورفولوژی، لبه‌یابی و روش‌های یادگیری ماشین اشاره کرد. در این روش‌ها استخراج ویژگی‌های با ارزش تصویر که به‌منظور کاهش بار محاسباتی الگوریتم باید انجام گیرد به‌صورت دستی و مجزا از الگوریتم طراحی شده جهت تشخیص و یا شمارش شی باید انجام گیرد اما در یادگیری عمیق این ویژگی‌ها در ساختاری سراسری² توسط لایه‌های شبکه عمیق به‌صورت خودکار استخراج می‌شوند (Ongsulee, 2017). از این رو، استفاده از الگوریتم‌های یادگیری عمیق در تشخیص و یا شمارش اشیا به نتایج بهتری منتهی می‌گردد. الگوریتم‌های یادگیری عمیق به‌کار رفته برای این منظور خود نیز به دو دسته الگوریتم‌های مبتنی بر شمارش و تشخیص قابل دسته‌بندی هستند. الگوریتم‌های یادگیری عمیق مبتنی بر شمارش با به‌کارگیری یک الگوریتم رگرسیون مناسب داده‌های مسئله و ایجاد رابطه‌ای معنادار بین متغیرهای وابسته و تعداد اشیا موجود در تصویر به‌طور مستقیم به پیش‌بینی تعداد شی مورد نظر در سایر تصاویر می‌پردازند حال آن‌که در روش‌های مبتنی بر تشخیص از یک شبکه عمیق برای تشخیص و شمارش اشیا در تصویر استفاده می‌شود. این عمل از

3- Visual Geometry Group Neural Network

4- Residual Neural Network

5- Anchor

6- Neck

1- Deep Learning

2- End-to-End

اطلاعات فوتویی از جمله شمارش و تاریخ گل‌دهی با بازرسی‌های بصری در مزرعه در طول مدت رشد نیز ثبت شده است. در شکل ۱ نمونه‌ای از اورتوفوتوهای تاریخ‌های ۲۰ و ۲۴ جولای نشان داده است. همان‌گونه که از تصاویر پیداست در تاریخ ۲۴ جولای در مقایسه با تاریخ ۲۰ جولای ذرت‌ها رشد بیشتری داشته‌اند، هم‌پوشانی بیشتری دارند، خاک خشک است و تصویربرداری در شرایط جوی متفاوت از تاریخ ۲۰ جولای انجام گرفته است.

به‌منظور آماده‌سازی مجموعه داده جهت استفاده برای طراحی مدل، هر تصویر اورتوفوتو باید به تصاویر کوچک‌تر برش داده شود. برش تصاویر با اهداف استفاده بهینه از این تصاویر، افزایش دقت الگوریتم و کاهش مدت زمان پردازش داده انجام می‌گیرد و با توجه به نوع داده باید به گونه‌ای باشد که تغییر چاندی در اشیاء موجود در آن ایجاد نکند، توسط الگوریتم در نظر گرفته شده قابل پردازش باشد، عملکرد الگوریتم را بهبود بخشد و متناسب با داده‌های آزمون تعیین شده توسط مرکز تحقیقات کشاورزی دانشگاه پردو آمریکا در مجموعه داده باشد. داده آزمون تعیین شده توسط این مرکز برای هر تصویر اورتوفوتو شامل دو ردیف سمت چپ هر تصویر می‌باشد و ۱۰ درصد کل تصاویر را تشکیل می‌دهد. این تصاویر متشکل از کاکل‌های ذرت اینبرد و هیبرید بوده و با اندکی تفاوت برای ۳۰ تصویر مختلف اندازه‌ای در حدود ۶۰۰×۲۱۵۰ پیکسل دارد. با توجه به این‌که جهت حصول نتیجه بهتر در زمان آموزش اندازه تصاویر آموزش بهتر است که نزدیک به تصاویر آزمون انتخاب شود لذا اندازه ۶۰۸×۲۰۴۸ به‌عنوان اندازه مناسب برش تصاویر در این الگوریتم انتخاب شد و بدین طریق هر تصویر به ۱۰ تصویر کوچک‌تر برش داده شد. برش هر تصویر اورتوفوتو در این کار به گونه‌ای انجام گرفته است که کاکل‌های گیاه ذرت برش داده نشوند و الگوریتم با دقت بیشتری و بدون تشخیص نادرست قادر به شناسایی درست و دقیق کاکل‌های ذرت باشد. سپس تصاویر از طریق رسم کادرهای محصورکننده^۹ اطراف کاکل‌های ذرت برچسب زده شدند و بدین طریق ۴۰۴۶ کادر محصورکننده برای این مجموعه داده به‌دست آمد. پس از آن با توجه به استاندارد موجود ۱۰ درصد باقی‌مانده تصاویر (کل تصویر به‌جز دو ردیف آخر از سمت چپ) برای اعتبارسنجی و مابقی جهت آموزش در نظر گرفته شدند.

شرح مدل

YOLO^{۱۰} (Redmon, Divvala, Girshick, & Farhadi, 2016) از جمله شبکه‌های عصبی پیچشی^{۱۱} (Albawi, 2016)

YOLOv5s با ساختار BottleneckCSP به‌منظور افزایش

قابلیت یادگیری شبکه

۲- استفاده کردن از تابع فعال‌سازی Hardswish جهت افزایش

قابلیت یادگیری شبکه

۳- قرار دادن لایه‌های حذف تصادفی مکانی^۱ در قسمت سر^۲

شبکه به‌منظور جلوگیری از بیش‌برازش

۴- بهینه کردن ابر پارامترهای^۳ الگوریتم به‌منظور افزایش دقت

تشخیص کاکل‌های ذرت

اعمال اصلاحات فوق ضمن دستیابی به دقت بالای تشخیص

کاکل‌های ذرت در مدت زمان کم شرایط را برای عملکرد مطلوب

شبکه با تعداد داده آموزش کم فراهم آورده که خود با توجه به

هزینه‌های بالای تشکیل پایگاه داده دستاورد مهمی محسوب

می‌گردد. همچنین، جهت بررسی بیشتر عملکرد این مدل نتایج حاصل

از آن با سه شبکه RetinaNet، Faster R-CNN، TasselNetv2+ مقایسه شده و برتری شبکه طراحی‌شده در تشخیص و شمارش

کاکل‌های ذرت در کوتاه‌ترین زمان به اثبات رسیده است.

مواد و روش‌ها

مجموعه داده HIPS^۴

در این مقاله، برای طراحی مدل MYOLOv5s از داده‌های

تصویری تهیه شده توسط بخش تحقیقات کشاورزی دانشگاه پردو^۵،

ایندیانا، آمریکا استفاده شده است. این داده‌ها متشکل از تصاویر ۲۲

ردیف کاکل ذرت اینبرد^۶ و ۲۲ ردیف کاکل ذرت هیبرید^۷ هستند که

با جمعیت ۳۰۰۰ گیاه بر هکتار در تاریخ ۱۲ ماه می سال ۲۰۲۰

میلادی کاشته شده‌اند. تصویربرداری در طول فصل رشد ذرت در

تاریخ‌های ۲۰ و ۲۴ جولای از ۱۵ ناحیه با استفاده از دوربین رنگی

DJI Matrice 300 RTK نصب‌شده بر روی پهپاد Sony Alpha 7R-III

M600 Pro از ساعت ۱۰:۰۰ الی ۱۲:۰۰ صبح که نور مناسب برای

تصویربرداری وجود دارد و از ارتفاع ۲۰ متری انجام گرفت. این

دوربین دارای رزولوشن ۴۲/۴ مگاپیکسل است. سپس تصاویر خام

رنگی پردازش شدند و به ۱۵ اورتوفوتو^۸ (Habib, Kim, & Kim, 2007)

رنگی بسیار با کیفیت برای هر تاریخ با اندازه میانگین

۳۶۷۰×۲۱۵۰ و رزولوشن مکانی ۰/۲۵ سانتی‌متر تبدیل شدند.

1- Spatial-Dropout

2- Head

3- Hyper-parameter

4- High Intensity Phenotyping Sites

5- Purdue University

6- Inbred

7- Hybrid

8- Orthophoto

9- Bounding Box

10- You Look Only Once

11- Convolutional Neural Network

نسخه آن در سال ۲۰۱۶ منتشر شد و پس از آن YOLOv2 (Farhadi & Redmon, 2017)، YOLOv3 (Redmon & Farhadi, 2017)، YOLOv4 (Bochkovskiy, Wang, & Redmon, 2018)، YOLOv5 (Liao, 2020) و PP-YOLO (Long et al., 2020) با هدف بهبود دقت و سرعت تشخیص نسخه‌های پیشین ارائه شدند.



ب) تصویر اخذ شده در ۲۴ جولای ۲۰۲۰
b) Captured orthophotos on 2020/07/24

(Mohammed, & Al-Zawi, 2017) و الگوریتمی تک مرحله‌ای و یک‌پارچه برای تشخیص اشیاء است که از طریق رسم کادرهای محصورکننده با امتیاز معین، که بیان‌کننده احتمال وجود شیء در کادر است، به شناسایی آن شیء و برچسب مربوط به آن می‌پردازد. این الگوریتم از آن جهت تک مرحله‌ای نام گرفته که عملیات شناسایی شیء و اختصاص برچسب به آن را به یکباره انجام می‌دهد. اولین



الف) تصویر اخذ شده در ۲۰ جولای ۲۰۲۰
a) Captured orthophotos on 2020/07/20

شکل ۱- تصاویر اورتوفوتو اخذ شده از مزرعه ذرت در تاریخ‌های ۲۰ و ۲۴ جولای

Fig.1. Captured orthophotos from corn farm on July 20 & 24

مکانی^۳ (SPP) (He, Zhang, Ren, & Sun, 2015) شبکه پشتبان شبکه را بر مبنای شبکه مرتبه جزئی متقاطع^۴ (CSPNet) (Wang et al., 2020) شکل می‌دهند. در این قسمت، ابتدا به‌منظور تسریع الگوریتم، یک نقشه ویژگی^۵ از تصویر ورودی بر مبنای جابه‌جایی پیکسل‌ها^۶ (Shi et al., 2016) در اندازه نصف ابعاد مکانی تصویر ورودی و ۱۲ باند توسط ساختار تمرکز ایجاد شده و به ساختار پیچشی وارد می‌شود. سپس، تصویر ایجاد شده به ساختار C3 (Jocher et al., 2020) که مشابه با BottleneckCSP (Wang et al., 2020) اما با سه لایه پیچشی است وارد می‌شود تا از طریق تقسیم باندها توسط این ساختار شرایط برای یادگیری تعداد بیشتری ویژگی توسط الگوریتم فراهم آید. در نهایت، در این قسمت، از ساختار SPP برای ادغام ویژگی‌ها با مقیاس‌های مختلف و افزایش قابلیت الگوریتم بهره برده می‌شود.

YOLOv5 خود نیز شامل چهار الگوریتم YOLOv5s، YOLOv5m، YOLOv5l و YOLOv5x با عمق‌های مختلف است. هرچه شبکه‌ای عمیق‌تر باشد تعداد لایه‌های بیشتری جهت آموزش شبکه به کار رفته و در نتیجه شبکه ویژگی‌های بیشتری را می‌آموزد و کندتر عمل می‌کند. در این بین، جهت طراحی الگوریتم تشخیص و شمارش کاکل‌های ذرت MYOLOv5s با توجه به ظرفیت سیستم پردازش داده در ابتدا از الگوریتم YOLOv5s به عنوان کم‌عمق‌ترین و سریع‌ترین الگوریتم از بین الگوریتم‌های نامبرده استفاده می‌شود و سپس با اعمال پاره‌ای تغییرات بر روی آن، الگوریتم بهبودیافته مختص شناسایی انواع کاکل‌های ذرت ایجاد می‌گردد.

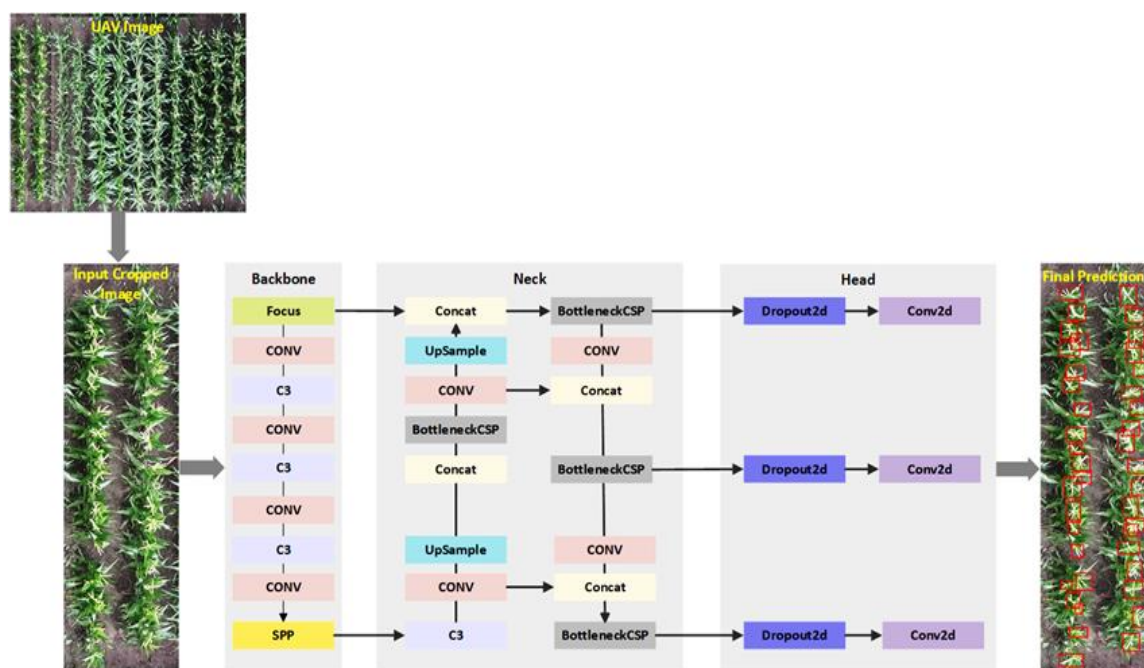
معماری الگوریتم

الگوریتم MYOLOv5s از سه قسمت شبکه پشتبان، گردن و سر تشکیل شده است. معماری این الگوریتم در شکل ۲ نشان داده شده است. در ادامه جزئیات این معماری شرح داده خواهد شد.

ساختارهای تمرکز^۱، پیچشی^۲ (CONV)، C3 و ادغام هرم

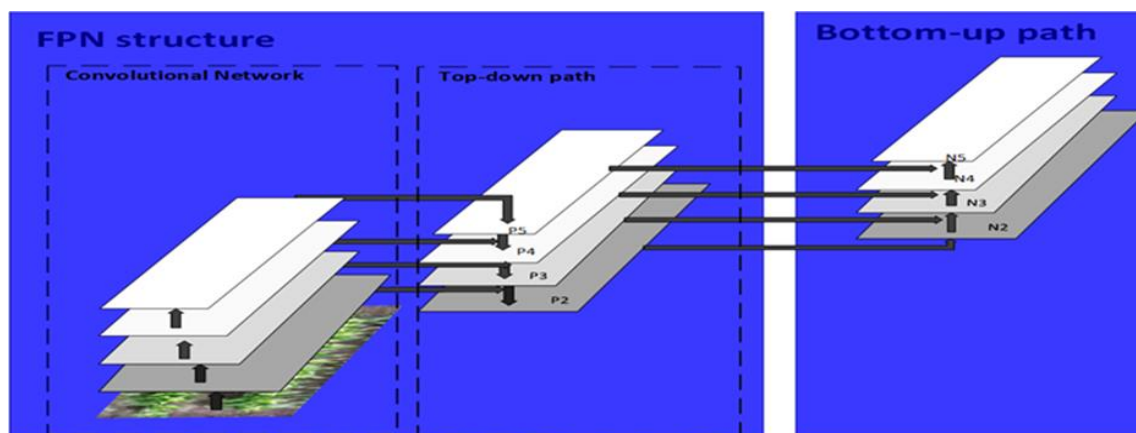
3- Spatial Pyramid Pooling
4- Cross Stage Partial Network
5- Feature Map
6- Pixel Shuffling

1- Focus
2- Convolutional



شکل ۲- معماری الگوریتم MYOLOv5s

Fig.2. MYOLOv5s architecture



شکل ۳- ساختار PANet استفاده شده در گردن مدل

Fig.3. PANet structure used in the neck part of the model

می‌باشد، ایجاد شده است. ساختارهای اتصال^۳ (Concat)، نمونه‌برداری افزایشی^۴، پیچشی، C3 و BottleneckCSP اجزای تشکیل‌دهنده PANet در نسخه بهبودیافته MYOLOv5s هستند که با هدف افزایش قابلیت الگوریتم در شناسایی اشیاء با اندازه و مقیاس‌های مختلف کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند. قراردعی

گردن در الگوریتم MYOLOv5s از نوع شبکه تجمیع مسیر^۱ (PANet) (Liu, Qi, Qin, Shi, & Jia, 2018) است. همان‌گونه که در شکل ۳ پیداست شبکه PANet با اضافه کردن یک مسیر پایین به بالا به شبکه ویژگی‌های هرمی^۲ (FPN) (Lin et al., 2017)، که خود متشکل از یک مسیر بالا به پایین و یک ساختار پیچشی

3- Concatenation
4- Up-Sampling

1- Path Aggregation Network
2- Feature Pyramid Network

زمانی که نتیجه‌ای نزدیک‌تر به خروجی واقعی و با خطای کم‌تر دست آید و یا تعداد معینی تکرار سپری شود مراحل قبل تکرار می‌شوند. در پایان برای سنجش بی‌طرفانه الگوریتم آموزش‌دیده نهایی از داده‌های آزمون استفاده می‌شود. در ادامه طبقه‌شناسایی و شمارش شی و تابع خطای استفاده شده در این شبکه شرح داده خواهند شد.

شناسایی و شمارش شی

شناسایی شی توسط این الگوریتم در سه مرحله انجام می‌گیرد. در ابتدا، ویژگی‌های با ارزش تصویر ورودی توسط شبکه پشتیبان شبکه استخراج می‌شوند. سپس، در قسمت گردن شبکه این ویژگی‌ها با هم آمیخته شده و سه نقشه ویژگی به صورت $S \times S$ شبکه مشبک با گام‌های ۸، ۱۶ و ۳۲ جهت افزایش قابلیت شبکه در شناسایی اشیا کوچک، متوسط و بزرگ شکل می‌دهد. در آخر، تشخیص شی در قسمت سر شبکه از طریق در نظر گرفتن سه کادر محصورکننده برای هر سلول شبکه مشبک و نسبت دادن بهترین کادر به شی انجام می‌گیرد. تعداد کادرهای تعیین‌شده در انتها تعداد اشیا را مشخص می‌کند و اندازه هر یک نمایان‌کننده اندازه شی مورد نظر است.

تابع خطا

تابع خطا الگوریتم‌های YOLO در طول آموزش ترکیبی از امتیاز شی بودن^۴ (L_{conf})، امتیاز احتمال کلاس^۵ (L_{cl}) و امتیاز رگرسیون کادر محصورکننده^۶ (L_{GloU}) است (Redmon et al., 2016). امتیاز شی بودن، احتمال وجود شی درون کادر محصورکننده، امتیاز احتمال کلاس احتمال برچسب درست زدن برای هر شی و امتیاز رگرسیون کادر محصورکننده میزان هم‌پوشانی کادر محصورکننده پیش‌بینی‌شده و کادر حقیقی را تعیین می‌کند. در MYOLOv5s خطای امتیاز شی و احتمال کلاس از طریق آنتروپی متقاطع دودویی^۷ همراه با تابع خطای منطقی^۸ و خطای کادر محصورکننده توسط اشتراک پیرامون اجتماع کلی^۹ (GIoU) (Rezatofighi et al., 2019) به دست می‌آید. توابع خطای نامبرده در روابط (۱) تا (۴) نشان داده شده‌اند:

$$L_{conf} = - \sum_{i=0}^{S^2} \sum_{j=0}^B I_{ij}^{obj} [\hat{C}_i \log(C_i) + (1 - \hat{C}_i) \log(1 - C_i)] \quad (1)$$

$$- \lambda_{noobj} \sum_{i=0}^{S^2} \sum_{j=0}^B I_{ij}^{noobj} [\hat{C}_i \log(C_i) + (1 - \hat{C}_i) \log(1 - C_i)]$$

$$L_{cl} = - \sum_{i=0}^{S^2} \sum_{c \in class} I_{ij}^{obj} [\hat{P}_i(c) \log(P_i(c)) + (1 - \hat{P}_i(c)) \log(1 - P_i(c))] \quad (2)$$

4- Objectness Score

5- Class Probability Score

6- Bounding Box Regression Score

7- Binary Cross-Entropy

8- Logits Loss Function

9- Generalized Intersection Over Union

BottleneckCSP به عنوان ساختاری با عملکردی مشابه با C3 اما با تعداد پارامتر بیشتر در کنار سایر اجزای گردن در این الگوریتم به عنوان بخش نوآورانه طرح سبب افزایش تعداد پارامترهای الگوریتم به منظور یادگیری ویژگی‌های بیشتر می‌گردد و با توجه به اندازه کوچک مجموعه داده HIPS و شکل خاص کاکل‌های ذرت نتایج بهتر تشخیص شی را نتیجه می‌دهد.

قسمت سر الگوریتم آخرین قسمت در معماری MYOLOv5s است که توسط لایه تشخیص متشکل از لایه‌های پیچشی به تشخیص نهایی اشیا در تصویر ورودی می‌پردازد. با توجه به این که الگوریتم YOLOv5s یک الگوریتم پیچشی است و از طریق ویژگی‌ها آموزش می‌یابد و پیکسل‌های مجاور در نقشه ویژگی تصویر بسیار همبسته‌اند. لذا، افزودن لایه‌های حذف تصادفی مکانی (Tompson, Goroshin, Jain, LeCun, & Bregler, 2015) قبل از لایه‌های پیچشی قسمت سر در الگوریتم بهبود یافته MYOLOv5s به عنوان بخشی از نوآوری طرح سبب صفر شدن تصادفی نقشه ویژگی‌های دوبعدی شده، میزان همبستگی بین پیکسل‌ها را کاهش می‌دهد،

از بیش‌برازش^۱ (Hawkins, 2004) جلوگیری می‌کند و دقت تشخیص الگوریتم را بهبود می‌بخشد. لازم به ذکر است، با توجه به کوچک بودن مجموعه داده، متفاوت بودن شکل کاکل‌های ذرت، محدود بودن برخی ویژگی‌ها و کم‌عمق بودن الگوریتم، استفاده از تابع فعال‌سازی Hardswish (Howard et al., 2019) به جای SiLU (Elfwing, Uchibe, & Doya, 2018) در الگوریتم بهبود یافته MYOLOv5s نوآوری دیگر طرح محسوب شده و منجر به یادگیری ویژگی‌های بیشتر توسط الگوریتم و عملکرد بهتر در تشخیص کاکل‌های ذرت با اشکال متفاوت می‌گردد.

جزئیات آموزش و تشخیص شی در الگوریتم

آموزش در الگوریتم MYOLOv5s مانند سایر شبکه‌های عصبی پیچشی از طریق روش پس‌انتشار خطا^۲ (Leung & Haykin, 1991) انجام می‌گیرد. در این روش، ابتدا داده‌های آموزش به شبکه داده می‌شوند و سپس ویژگی‌های آن‌ها در حرکتی رو به جلو^۳ لایه به لایه شبکه عمیق را طی می‌کنند تا جهت شناسایی شی آموزش داده شوند. آموزش به گونه‌ای انجام می‌پذیرد که یک تابع خطا حداقل گردد. پس از آن جهت ارزیابی عملکرد شبکه آموزش‌یافته، شبکه با داده‌های اعتبارسنجی بررسی می‌شود و در صورتی که خطای آموزش زیاد باشد مجدداً داده‌ها از طریق لایه‌ها برگشت داده می‌شوند و تا

1- Overfitting

2- Back Propagation of Error

3- Feed Forward

تعداد کادرهایی که اشتباهاً در محل‌های دیگر زده شده‌اند^۹ (FP) قابل محاسبه هستند. با استفاده از این مقادیر معیارهای ارزیابی (۵) تا (۸) محاسبه می‌شوند (Sokolova, Japkowicz, & Szpakowicz, 2006):

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (5)$$

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (6)$$

$$F1 = \frac{TP}{TP + \frac{1}{2}(FP + FN)} \quad (7)$$

$$\text{Accuracy} = \frac{TP + TN}{TP + FP + TN + FN} \quad (8)$$

در روابط ذکر شده دقت^{۱۱} بیانگر تعداد تشخیص‌های انجام‌گرفته صحیح، یادآوری^{۱۲} بیانگر تعداد کاکل‌هایی است که به اشتباه تشخیص داده نشده‌اند، معیار امتیاز F1 میانگین متوازن دقت و یادآوری و صحت^{۱۳} نسبت بین تشخیص‌های صحیح به کل تشخیص‌ها است. معیار امتیاز F1 و صحت عملکرد شبکه را در حالت کلی نشان می‌دهند.

با در نظر گرفتن سطح زیر منحنی دقت-یادآوری دقت میانگین^{۱۴} به‌دست می‌آید (Zhu, 2004):

$$AP = \int_0^1 p(r) dr \quad (9)$$

در این رابطه $p(r)$ مقدار بیشینه دقت در مقدار یادآوری r است. به‌منظور مقایسه نتایج به‌دست آمده توسط روش‌های مبتنی بر تشخیص با روش‌های مبتنی بر شمارش، تعدادی معیار که در روابط (۱۰) و (۱۱) نشان داده شده‌اند جهت ارزیابی عملکرد روش‌های مختلف در شمارش کاکل‌های ذرت در این مقاله استفاده شده‌اند (Chicco, Warrens, & Jurman, 2021):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_1^N (g_j - c_j)^2} \quad (10)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_j (g_j - c_j)^2}{\sum_j (g_j - \bar{g})^2} \quad (11)$$

ضریب تبیین R^2 نشان‌دهنده میزان همبستگی بین تعداد حقیقی کاکل‌های ذرت و تعداد به‌دست‌آمده آن‌ها توسط الگوریتم و معیار

$$L_{GloU} = 1 - \frac{|b \cap b^{gt}|}{|b \cup b^{gt}|} - \frac{|G \setminus (b \cup b^{gt})|}{|G|} \quad (3)$$

$$LOSS = L_{GloU} + L_{conf} + L_{cl} \quad (4)$$

در این روابط S^2 بیانگر شبکه مشبک $S \times S$ و B کادرهای محصورکننده داخل هر سلول است. $\mathcal{L}_{noobj}$ فاکتور وزن می‌باشد و I_{ij}^{noobj} و I_{ij}^{obj} در صورت وجود شی داخل به‌ترتیب کادر مقادیر ۱ و ۰ را اتخاذ می‌نمایند و در صورت نبود شی برعکس این امر اتفاق می‌افتد. $\hat{C}_i$ و C_i نیز نمایانگر امتیاز قطعیت کادرهای محصورکننده پیش‌بینی شده و حقیقی می‌باشند. احتمال کادر پیش‌بینی شده و حقیقی نیز برای هر کلاس با $\hat{P}_i(c)$ و $P_i(c)$ نمایش داده می‌شوند. b و b^{gt} کادرهای محصورکننده پیش‌بینی و حقیقی را نشان می‌دهند و G کوچک‌ترین کادری است که b و b^{gt} را احاطه می‌کند.

جزئیات پردازش

در این کار، تمامی پردازش‌ها در سرورس گوگل کولب^۱ (Bisong, 2019) با ۲۵ گیگابایت حافظه رم (RAM) و واحد پردازش گرافیکی^۳ (GPU) مدل Tesla P100 با ۱۶ گیگابایت حافظه انجام گرفت. MYOLOv5s مبتنی بر کتابخانه پایتورچ^۴ (Paszke et al., 2019) پیاده‌سازی شده است. این مدل از بهینه‌ساز آدام^۵ جهت به‌روزرسانی وزن‌ها در طول آموزش استفاده می‌کند. تعداد تکرارها^۶ برای این شبکه ۲۰۰ و اندازه دسته^۷ جهت تعیین تعداد تصاویری که در قالب ورودی در هر تکرار به شبکه ارائه می‌گردد ۱۶ در نظر گرفته شده‌اند.

ارزیابی مدل

پس از آن که شناسایی کاکل‌ها توسط شبکه انجام گرفت، مجموعه‌ای از کادرهای محصورکننده که هر یک امتیازی بین صفر و یک را دارا می‌باشند به‌دست می‌آیند. با در نظر گرفتن یک مقدار آستانه برای امتیاز و اشتراک پیرامون اجتماع (IoU) که بیان‌کننده مقدار هم‌پوشانی کادر محصورکننده حقیقی و تشخیص‌داده شده است، تعداد کادرهایی که به‌درستی توسط شبکه بر روی کاکل‌های ذرت زده شده‌اند^۸ (TP)، تعداد کادرهایی که به اشتباه زده نشده‌اند^۹ (FN) و

- 1- Google Colab
- 2- Random-Access Memory
- 3- Graphics Processing Unit
- 4- Pytorch
- 5- Adam
- 6- Epoch
- 7- Batch Size
- 8- True Positive

- 9- False Negative
- 10- False Positive
- 11- Precision
- 12- Recall
- 13- Accuracy
- 14- Average Precision (AP)

بررسی دقت تشخیص و شمارش روش‌ها

عملکرد الگوریتم MYOLOv5s در تشخیص و شمارش کاکل‌های ذرت تصاویر آزمون با یک الگوریتم مبتنی بر شمارش TasselNetv2+ (Lu & Cao, 2020) و دو الگوریتم مبتنی بر تشخیص Faster R-CNN (Liu et al., 2020) و RetinaNet (Zou et al., 2020) مقایسه شده است. TasselNetv2+ و RetinaNet در کتابخانه پایتورچ پیاده‌سازی شده‌اند و الگوریتم Faster R-CNN مبتنی بر کتابخانه تنسورفلو^۳ (Dillon et al., 2017) می‌باشد. همچنین، برای مقایسه روش‌ها در شرایط برابر، از قریبه‌سازی^۴ افقی ۵۰ درصد از داده‌ها جهت داده‌افزایی^۵ استفاده می‌شود و بهترین عملکرد هر الگوریتم به‌ازای تعداد تکرارها و اندازه دسته بهینه در نظر گرفته شده است. داده‌های آموزش، اعتبارسنجی و آزمون استفاده شده نیز برای تمامی الگوریتم‌ها یکسان هستند. جزییات آموزش روش‌ها در جدول ۲ آورده شده است.

همان‌گونه که در شکل ۴ نشان داده شده است مقادیر اندازه دسته و تکرار برای مدل MYOLOv5s به‌صورت بهینه به‌ازای بهترین عملکرد الگوریتم به‌دست آمده‌اند. در این شکل مقادیر دقت‌های میانگین به‌دست آمده برای الگوریتم MYOLOv5s به‌ازای اندازه دسته‌های مختلف ۴، ۸ و ۱۶ در ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ تکرار نشان داده شده است. همان‌گونه که از شکل پیداست عملکرد بهینه شبکه به‌ازای ۲۰۰ تکرار و اندازه دسته ۱۶ به‌دست می‌آید و پس از آن بیش‌برازش رخ می‌دهد. لازم به ذکر است که مقادیر اندازه دسته بیشتر از ۱۶ به علت عدم ظرفیت سیستم پردازشی (محدودیت RAM مربوط به کارت گرافیک مورد استفاده) بررسی نشده‌اند. برای سایر الگوریتم‌ها نیز پارامترهای بهینه نیز با توجه به مقادیر گزارش شده در مقالات مربوطه، پایگاه داده موجود و محدودیت توان سیستم پردازشی انتخاب شده‌اند.

نمودار همگرایی دقت میانگین الگوریتم MYOLOv5s نیز در شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به این منحنی انتخاب ۲۰۰ تکرار جهت آموزش شبکه مناسب می‌باشد.

نتایج حاصل از دقت میانگین و R^2 بر روی داده‌های اعتبارسنجی و زمان آموزش مورد نیاز در جدول ۳ آورده شده است که نشان می‌دهد روش پیشنهادی ویژگی‌های کاکل‌های ذرت را بیشتر یاد گرفته و با دقت بالاتری آن‌ها را تشخیص می‌دهد. همچنین زمان آموزش MYOLOv5s در مقایسه با دیگر روش‌های بررسی شده کمتر است.

نتایج کمی و بصری تشخیص و شمارش کاکل‌های ذرت توسط

خطای جذر میانگین مربعات^۱ (RMSE) بیان‌کننده اختلاف بین این دو دسته مقدار است.

در این روابط، N تعداد تصاویر آزمون، C_j و g_j به‌ترتیب تعداد کاکل‌های ذرت به‌دست‌آمده توسط الگوریتم و تعداد حقیقی آن‌ها برای تصویر z ام و $\bar{g}$ میانگین تعداد حقیقی کاکل‌های ذرت برای تصاویر آزمون است. تعداد فریم بر ثانیه^۲ (fps) معیار دیگری است که برای ارزیابی سرعت عملکرد الگوریتم در این مقاله استفاده شده است.

نتایج و بحث

در این قسمت ابتدا عملکرد الگوریتم تشخیص و شمارش کاکل‌های گیاه ذرت MYOLOv5s با الگوریتم YOLOv5s مقایسه می‌شود و پس از اثبات بهبود عملکرد الگوریتم در اثر اعمال تغییرات این الگوریتم با سایر الگوریتم‌های طراحی‌شده در این زمینه مقایسه و عملکرد هر یک بررسی می‌شود. همچنین تاثیر امتیاز بر عملکرد الگوریتم‌های مبتنی بر تشخیص و شمارش کاکل‌های گیاه ذرت نیز مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

مقایسه مدل‌های اصلی و بهبودیافته YOLOv5s

در جدول ۱ مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از تشخیص کاکل‌های ذرت در مرحله آزمون الگوریتم‌های YOLOv5s و MYOLOv5s به‌ازای ۸۰ درصد داده آموزش، ۱۰ درصد داده اعتبارسنجی و ۱۰ درصد داده آزمون انجام گرفته است. چنانچه که از جدول پیداست، با اعمال اصلاحات در معماری شبکه، ۲/۸۰ درصد بهبود در دقت تشخیص کاکل‌های ذرت حاصل می‌شود که بیانگر افزایش تعداد کاکل‌های ذرت به‌درستی تشخیص داده شده توسط روش پیشنهادی و موثر بودن نوآوری‌های در نظر گرفته شده است.

جدول ۱- مقایسه دقت میانگین روش‌های YOLOv5s و MYOLOv5s

Table 1- Comparison between the AP values of YOLOv5s and MYOLOv5s algorithms

الگوریتم	دقت میانگین
Algorithm	AP (%)
YOLOv5s	92.50
MYOLOv5s	95.30

مقایسه با سایر روش‌های تشخیص و شمارش شی

3- Tensorflow

4- Flip

5- Data Augmentation

1- Root Mean Square Error

2- Frame Per Second

رخ نداده است. همان‌گونه که از جدول ۴ پیداست الگوریتم MYOLOv5s قادر می‌باشد که مقادیر دقت، یادآوری و دقت میانگین معادل با ۹۳/۵۸، ۹۴/۹۷ و ۹۵/۳۰ درصد را به‌ترتیب به‌دست آورد.

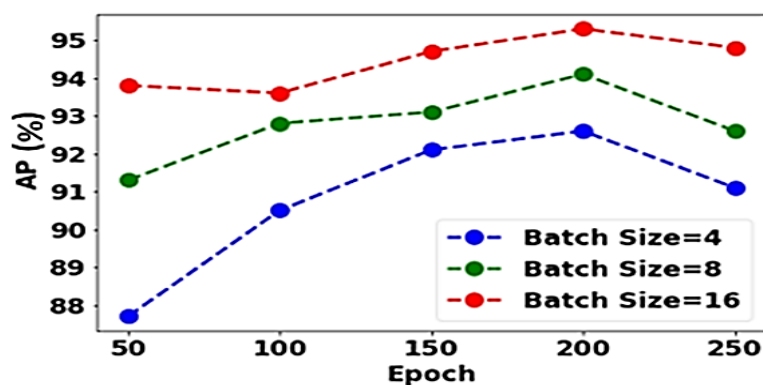
الگوریتم‌های نامبرده در زمان آزمون نیز در جدول ۴ و شکل ۶ آمده است.

از مقایسه نتایج حاصل از جداول ۳ و ۴ و نزدیک بودن مقادیر به‌دست‌آمده آموزش و آزمون شبکه‌ها می‌توان دریافت که مقادیر پارامترهای آموزش الگوریتم‌ها به خوبی انتخاب گردیده و بیش‌برازش

جدول ۲- تنظیم پارامترهای مجموعه داده HIPS توسط الگوریتم‌های مختلف

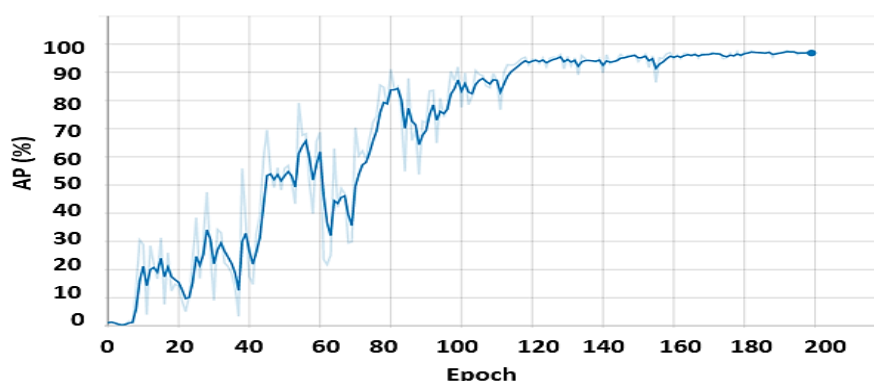
Table 2- Parameter setting of HIPS dataset by different methods

الگوریتم Algorithm	تعداد تصاویر آموزش NO. Train	تعداد تصاویر اعتبارسنجی NO. Validation	تعداد تصاویر آزمون NO. Test	اندازه دسته Batch Size	تعداد تکرار Epoch	روش بهینه‌سازی Optimization method
TasselNetv2+	270 (mixed with validation data)	—	30	16	300	SGD
Faster R-CNN	240	30	30	4	833	SGD
RetinaNet	240	30	30	4	500	Adam
MYOLOv5s	240	30	30	16	200	Adam



شکل ۴- تعیین مقدار بهینه پارامترهای اندازه دسته و تکرار MYOLOv5s

Fig.4. MYOLOv5s determination of the optimal batch-size and epoch values



شکل ۵- منحنی همگرایی دقت میانگین الگوریتم MYOLOv5s

Fig.5. AP convergence plot of MYOLOv5s algorithm

جدول ۳- مقایسه دقت میانگین و R^2 به‌دست‌آمده توسط الگوریتم‌های مختلف در مرحله آموزشTable 3- Comparison among the AP and R^2 values obtained by different algorithms in training step

الگوریتم Algorithm	دقت میانگین AP (%)	R^2 (%)	تعداد فریم بر ثانیه FPS
TasselNetv2+	—	80.23	61
Faster R-CNN	80.83	79.71	13
RetinaNet	81.26	99.44	29
MYOLOv5s	98.69	99.45	84

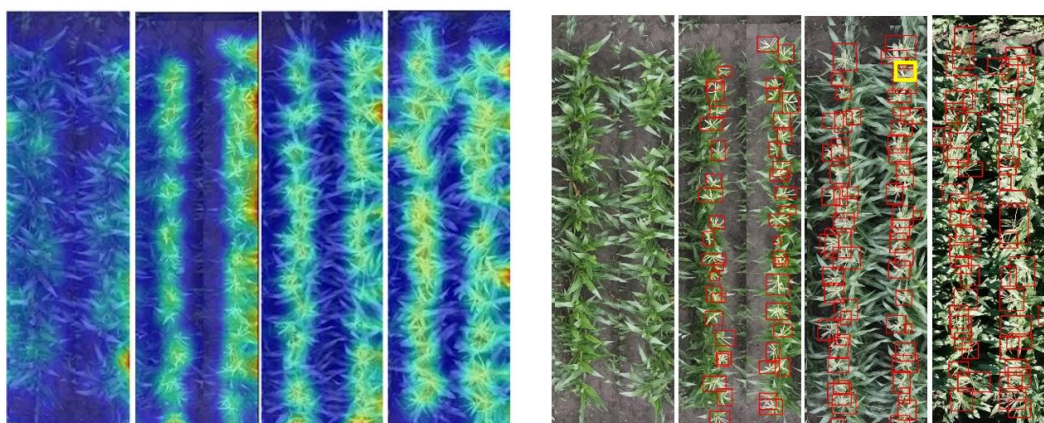
جدول ۴- مقایسه عملکرد و سرعت پردازش روش‌های مختلف بر روی تصاویر آزمون مجموعه داده HIPS

Table 4- Comparison of performance and inference time of different methods on HIPS test images

الگوریتم Algorithm	دقت Precision (%)	یادآوری Recall (%)	دقت میانگین AP (%)	خطای جذر میانگین مربعات RMSE	R^2 (%)	تعداد فریم بر ثانیه FPS
TasselNetv2+	—	—	—	10.32	77.86	61
Faster R-CNN	91.35	82.85	76.99	8.58	86.83	13
RetinaNet	92.49	88.04	77.66	6.01	95.53	29
MYOLOv5s	93.58	94.97	95.30	1.9	99.28	84

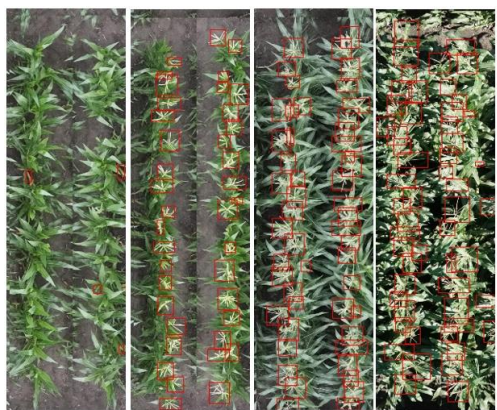
این مقادیر برای الگوریتم Faster R-CNN به‌ترتیب ۹۱/۳۵، ۸۲/۸۵، ۷۶/۹۹ درصد و برای الگوریتم RetinaNet به‌ترتیب ۹۲/۴۹، ۸۸/۰۴ و ۷۷/۶۶ درصد گزارش شده است. مقدار بالای دقت الگوریتم MYOLOv5s نسبت به سایر الگوریتم‌ها حاکی از عملکرد بهتر آن در تشخیص درست تعداد بیشتری از کاکل‌های ذرت نسبت به الگوریتم دیگر است. الگوریتم Faster R-CNN نسبت به الگوریتم‌های MYOLOv5s و RetinaNet مقدار یادآوری کمتری را کسب کرده که نمایانگر این است در این الگوریتم بسیاری از کاکل‌های ذرت تشخیص داده نشده‌اند. این مقدار برای RetinaNet نیز در مقایسه با MYOLOv5s، ۶/۹۳ درصد کمتر است. لذا، با مقایسه این مقادیر می‌توان دریافت که تعداد زیادی از کاکل‌های گیاه ذرت با توجه به شکل خاص، متفاوت و هم‌پوشانی بالایی که دارند به آسانی توسط الگوریتم‌های Faster-RCNN و RetinaNet قابل تشخیص نیستند و تنها کاکل‌های واضح توسط این الگوریتم‌ها شناسایی می‌شوند حال آن‌که الگوریتم MYOLOv5s قادر خواهد بود کاکل‌ها با اندازه‌ها و شکل‌های متفاوت و در نواحی با هم‌پوشانی بالا را شناسایی کند لذا تعداد بیشتری از کاکل‌های ذرت توسط این الگوریتم قابل شناسایی‌اند و مقدار یادآوری بالاتری را کسب می‌کند. با بررسی نتایج حاصل از دقت میانگین به‌عنوان معیاری استاندارد که مقادیر دقت و یادآوری را برای سنجش الگوریتم‌ها توأم در نظر می‌گیرد، مجدداً اثبات می‌گردد که در بین الگوریتم‌های مورد بررسی Faster-RCNN ضعیف‌ترین عملکرد را داراست و الگوریتم

MYOLOv5s با کمترین مقدار تشخیص‌های اشتباه و یا انجام نگرفته بهترین عملکرد را در کوتاه‌ترین زمان در مقایسه با سایر روش‌ها دارد. معیارهای خطای جذر میانگین مربعات و R^2 نیز برای ارزیابی دقت الگوریتم‌ها در شمارش کاکل‌های ذرت با یکدیگر مقایسه شده‌اند. این مقادیر برای الگوریتم MYOLOv5s به‌ترتیب ۱/۹ و ۹۹/۲۸ درصد، برای الگوریتم‌های مبتنی بر تشخیص Faster-RCNN و RetinaNet به‌ترتیب ۸/۵۸، ۸۶/۸۳ و ۶/۰۱، ۹۵/۵۳ درصد و برای الگوریتم مبتنی بر شمارش TasselNetv2+ به‌ترتیب ۱۰/۳۲ و ۷۷/۸۶ درصد به‌دست آمده‌اند. مقدار کم خطای جذر میانگین مربعات حاصل آمده توسط الگوریتم MYOLOv5s، نزدیک بودن تعداد کاکل‌های ذرت تخمین زده توسط این الگوریتم به تعداد حقیقی آن‌ها را نشان می‌دهد. حال آن‌که این مقدار برای الگوریتم‌های Faster-RCNN، RetinaNet و TasselNetv2+ بیشتر گزارش شده است که به معنای عدم عملکرد دقیق الگوریتم‌های نامبرده در شمارش کاکل‌های ذرت به‌ویژه در نواحی با هم‌پوشانی بالا است. مقدار R^2 نیز برای الگوریتم MYOLOv5s بیشتر از سه الگوریتم بررسی شده دیگر به‌دست آمده است که خود به معنای همبستگی بیشتر تعداد کاکل‌های ذرت تخمین زده شده و مقادیر حقیقی آن‌ها در این الگوریتم می‌باشد. با بررسی نتایج بصری شکل ۶ عملکرد روش‌های مختلف بهتر نمایان می‌شود.



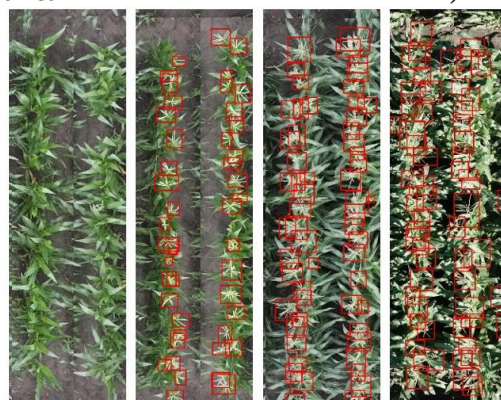
الف) کادرهای محصورکننده حقیقی
ب) TasselNetv2+

الف) کادرهای محصورکننده حقیقی
ا) Ground Truth Bounding Boxes



د) RetinaNet
د) RetinaNet

ج) Faster R-CNN
ج) Faster R-CNN



ه) MYOLOv5s

ه) MYOLOv5s

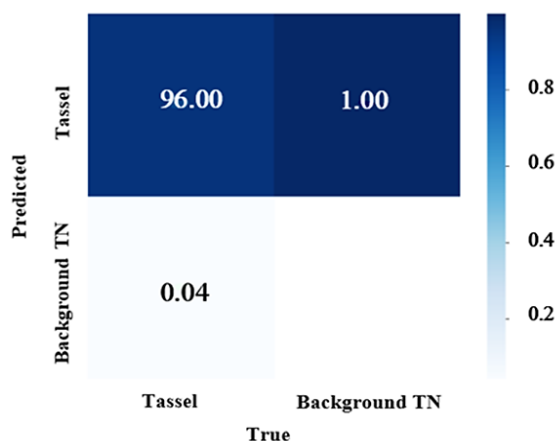
شکل ۶- نتایج بصری کادرهای محصورکننده حقیقی و نتایج به‌دست‌آمده توسط الگوریتم‌های TasselNetv2+، Faster R-CNN، RetinaNet و MYOLOv5s

Fig.6. Visual results of ground truth bounding boxes and the obtained results by TasselNetv2+, Faster R-CNN, RetinaNet, and MYOLOv5s algorithms

موقعیت قرارگیری و اندازه شباهت بیشتری به کادرهای محصورکننده حقیقی نسبت به سایر روش‌ها دارند لذا این الگوریتم عملکرد بهتری دارد. این در حالی است که در روش مبتنی بر شمارش TasselNetv2+، به علت گزارش تنها تخمینی از تعداد کاکل‌های ذرت، نمی‌توان در مورد موقعیت و تشخیص صحیح آن‌ها توسط الگوریتم اظهار نظر نمود. بنابراین تنها می‌توان ادعا کرد که با توجه به مقدار پایین R^2 و بالای RMSE به‌دست آمده توسط TasselNetv2+ اختلاف معناداری بین مقادیر حقیقی و مقادیر پیش‌بینی شده توسط آن وجود دارد که خود نمایانگر تعداد زیاد تشخیص‌های اشتباه صورت گرفته توسط TasselNetv2+ می‌باشد.

ماتریس اغتشاش الگوریتم MYOLOv5s در شکل ۷ نشان داده شده است. با توجه به شکل، ۹۶ درصد از کاکل‌های ذرت درست تشخیص داده شده‌اند و ۴ درصد دیگر شناسایی نشده‌اند که با توجه به پیچیدگی پایگاه داده دقت قابل توجهی برای مدل MYOLOv5s محسوب می‌گردد.

این شکل متشکل از ۴ تصویر از مجموعه داده آزمون است که دو تصویر اول از سمت راست کاکل‌های ذرت هیبرید را نشان می‌دهند و دو تصویر بعدی مربوط به کاکل‌های ذرت اینبرد هستند. همان‌گونه که در تصاویر قابل رویت است دو نوع ذرت نامبرده شکل و میزان رشد متفاوتی دارند. با بررسی شکل می‌توان دریافت که الگوریتم‌های Faster-RCNN و RetinaNet کاکل‌های ذرت را در نواحی متراکم نمی‌توانند به‌خوبی تشخیص دهند. کاکل مربوط به ذرت هیبرید مشخص شده با رنگ زرد در تصویر کادرهای محصورکننده حقیقی از این دست است که از بین مدل‌های مبتنی بر تشخیص تنها مدل MYOLOv5s آن را شناسایی کرده است. همچنین تعداد تشخیص‌های اشتباه الگوریتم‌های Faster R-CNN و RetinaNet نیز نسبت به MYOLOv5s بیشتر است. این امر را می‌توان در تصویر دوم مربوط به ذرت اینبرد مشاهده کرد که علی‌رغم عدم وجود کاکل ذرت در آن الگوریتم‌های Faster-RCNN و RetinaNet تعدادی را به اشتباه تشخیص داده‌اند. به‌علاوه، کادرهای محصورکننده تخمین زده شده توسط الگوریتم MYOLOv5s از منظر

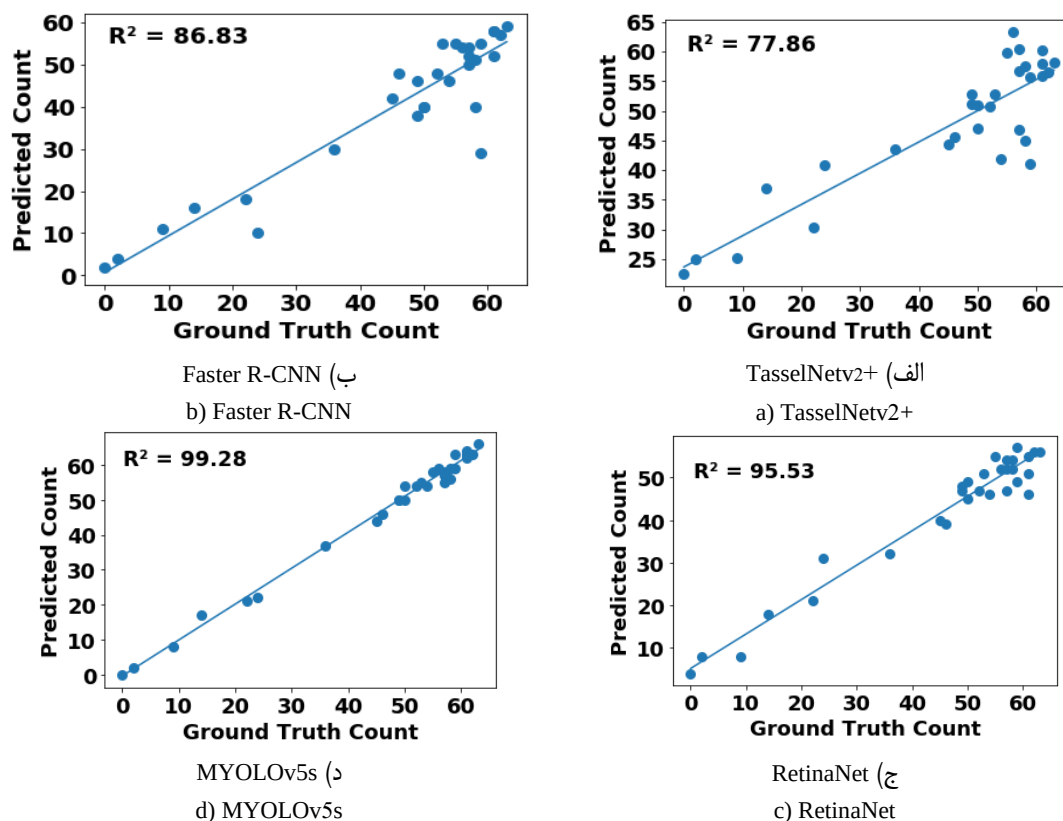


شکل ۷- ماتریس اغتشاش مربوط به داده‌های آزمون الگوریتم MYOLOv5s

Fig.7. MYOLOv5s confusion matrix of test images

تخمین زده شده و حقیقی توسط این الگوریتم می‌توان گفت الگوریتم MYOLOv5s نسبت به سایر الگوریتم‌ها قادر به تخمین دقیق‌تر تعداد کاکل‌های ذرت می‌باشد. در این بین منحنی مربوط به TasselNetv2+ پراکنده‌ترین نقاط و در نتیجه ضعیف‌ترین عملکرد را داراست.

به‌منظور ارزیابی دقیق‌تر عملکرد الگوریتم‌ها در شمارش، از منحنی رگرسیون خطی استفاده می‌شود. شکل ۸ این منحنی‌ها را برای الگوریتم‌های به‌کاربرده در این مقاله نشان می‌دهد. همان‌گونه که از منحنی‌ها پیداست، نقاط در الگوریتم MYOLOv5s متراکم‌ترند. لذا، با توجه به نزدیک‌تر بودن تعداد کاکل‌های ذرت



شکل ۸- منحنی‌های رگرسیون خطی الگوریتم‌های MYOLOv5s، RetinaNet، Faster R-CNN و TasselNetv2+
Fig.8. Linear regression plots of TasselNetv2+, Faster R-CNN, RetinaNet, and MYOLOv5s algorithms

جدول ۵- مقادیر امتیاز F1 (%) تصاویر آزمون مجموعه داده HIPS برای الگوریتم‌های مبتنی بر تشخیص Faster R-CNN، RetinaNet و MYOLOv5s

Table 5- F1 (%) score values of HIPS test images obtained by Faster R-CNN, RetinaNet and MYOLOv5s algorithms

تصویر آزمون	الگوریتم			تصویر آزمون	الگوریتم		
Test subset	Algorithm			Test subset	Algorithm		
	Faster R-CNN	RetinaNet	MYOLOv5s		Faster R-CNN	RetinaNet	MYOLOv5s
S1-20	88.53	85.97	98.37	S1-24	85.98	88.47	94.67
S2-20	95.79	94.85	97.59	S2-24	92.44	94.9	97.59
S3-20	94.71	88.69	94.94	S3-24	90.77	96.11	98.17
S4-20	92.44	91.07	99.19	S4-24	91.8	92.43	97.7
S5-20	82.22	94.94	94.21	S5-24	88.09	83.65	93.99
S6-20	89.91	93.15	99.14	S6-24	96.48	98.27	96.75
S7-20	96.32	96.32	97.38	S7-27	94.5	90.9	97.33
S8-20	79.99	97.7	93	S8-24	86.67	88.41	92
S9-20	93.68	93.68	94.7	S9-24	65.95	90.77	91.5
S10-20	97.85	91.77	95.7	S10-24	94	90.87	92.42
S11-20	66.67	65	100	S11-24	41.21	69.11	73.91
S12-20	92.01	89.97	94.4	S12-24	81.66	94.63	91.27
S13-20	—	—	—	S13-24	60.03	75.02	77.42
S14-20	79.99	94.12	94.12	S14-24	84.85	94.12	93.13
S15-20	96.53	94.12	94.39	S15-24	89.93	89.61	94.94
کل				کل			
Total	89.045	90.81	96.22	Total	82.96	89.15	92.19

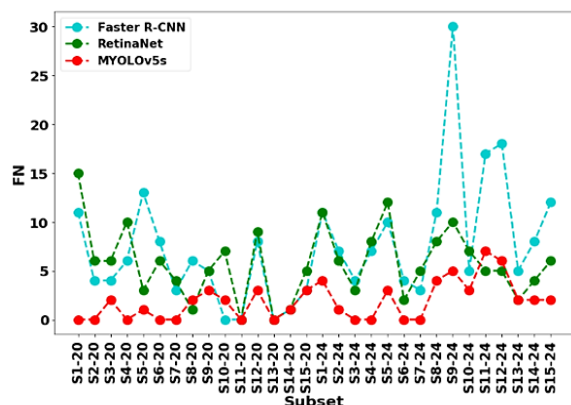
بررسی اثرات زمان کاشت در عملکرد روش‌های مبتنی بر

تشخیص

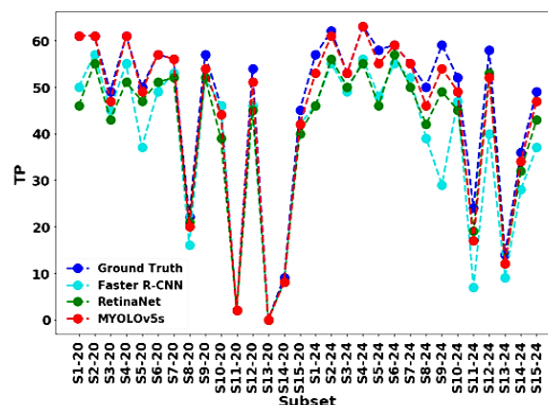
در جدول ۵ مقایسه‌ای بین روش‌های مبتنی بر تشخیص شناسایی دقیق موقعیت کاکل‌های ذرت تصاویر آزمون برای دو نوع ذرت هیبرید و اینبرد و در دو تاریخ مختلف بیستم و بیست و چهارم جولای آورده شده است.

تصاویر مشخص شده با عنوان S1-S7 کاکل‌های ذرت هیبرید را نشان می‌دهند و تصاویر S8-S15 مربوط به ذرت از نوع اینبرد هستند. عددهای ۲۰ و ۲۴ نیز اشاره به تاریخ تصویربرداری در این نام‌گذاری می‌کنند. جهت ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های مختلف و تاثیر زمان بر روی دقت تشخیص الگوریتم‌ها از معیار امتیاز F1 در این جدول استفاده شده است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهند که در تاریخ بیست و چهارم با افزایش رشد کاکل‌های گیاه ذرت به علت تراکم

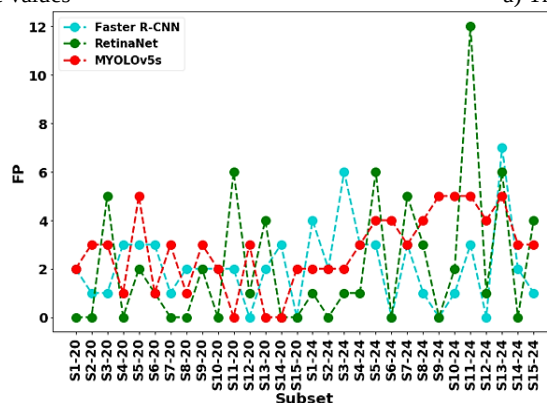
بالای آن‌ها تشخیص توسط الگوریتم‌های مختلف دشوارتر می‌گردد. علاوه بر آن به علت نور زیاد محیط در زمان تصویربرداری و خشک بودن خاک تعداد تشخیص‌های اشتباه برای این تاریخ نسبت به تاریخ بیستم نیز بیشتر است. در بین الگوریتم‌های مورد بررسی MYOLOv5s کاکل‌های ذرت اکثر تصاویر آزمون را بهتر از الگوریتم‌های Faster R-CNN و RetinaNet تشخیص می‌دهد و بیشترین تعداد تشخیص‌های درست را داراست. این الگوریتم قادر است که کاکل‌های ذرت را در تاریخ ۲۰ جولای با اختلاف به‌ترتیب ۷/۱۸ و ۵/۴۱ درصد نسبت به الگوریتم‌های Faster R-CNN و RetinaNet و در تاریخ ۲۴ جولای با اختلاف ۹/۲۳ و ۳/۰۴ درصد بهتر از دو الگوریتم دیگر شناسایی کند. شکل ۹ نیز منحنی‌های تعداد TP، تعداد FP و تعداد FN را برای سه الگوریتم مبتنی بر تشخیص مورد بحث در دو زمان نشان می‌دهد.



ب) تعداد منفی‌های کاذب
b) False negative values



الف) تعداد مثبت‌های صحیح
a) True positive values



ج) تعداد مثبت‌های کاذب
c) False positive values

شکل ۹- تعداد تشخیص‌های مثبت صحیح (TP)، منفی کاذب (FN) و مثبت کاذب (FP) به‌دست‌آمده توسط الگوریتم‌های مبتنی بر تشخیص

MYOLOv5s و RetinaNet، Faster R-CNN

Fig.9. TP, FN, and FP values obtained by detection-based Faster R-CNN, RetinaNet, and MYOLOv5s algorithms

گفت که در تصاویر مربوط به ذرت هیبرید که ذرت‌ها در آن رشد بیشتری داشته‌اند و متراکم‌تر واقع شده‌اند تعداد تشخیص‌های صحیح انجام گرفته توسط MYOLOv5s بیشتر از سایر الگوریتم‌هاست. Faster R-CNN نیز در تصاویر مربوط به ذرت اینبرد تاریخ بیست و چهارم جولای به صورت محسوسی ضعیف‌تر عمل می‌کند که نشان‌دهنده عدم توانایی این الگوریتم در شناسایی کاکل‌های ریز است.

همچنین، با توجه به جدول ۵، می‌توان تصویر S11-24 را به عنوان چالش برانگیزترین داده با پایین‌ترین دقت تشخیص از بین تصاویر مجموعه داده HIPS دانست. این اتفاق به علت تفاوت در شدت نور و رنگ داده‌های آموزش و آزمون این تصویر رخ داده است. شکل ۱۰ نمونه‌ای از داده آموزش و ارزیابی متعلق به این تصویر را نشان می‌دهد.



ب) تصویر آزمون
b) Test image



الف) تصویر آموزش
a) Train image

شکل ۱۰ - نمونه‌ای از تصاویر آموزش و آزمون داده S11 تاریخ ۲۴ جولای (S11-24)

Fig.10. Train and test images S11 on 24th July (S11-24)

به ترتیب ۰/۲۶، ۰/۲۸ و ۰/۲ به دست آمد.

نتیجه‌گیری

در این مقاله، جهت نظارت مستمر بر روند رشد گیاه ذرت با هدف برداشت حداکثری این گیاه به عنوان یکی از مهم‌ترین غلات، الگوریتمی جهت تشخیص و شمارش خودکار کاکل‌های ذرت بر پایه الگوریتم عمیق YOLOv5s پیشنهاد شده است. جهت آموزش و

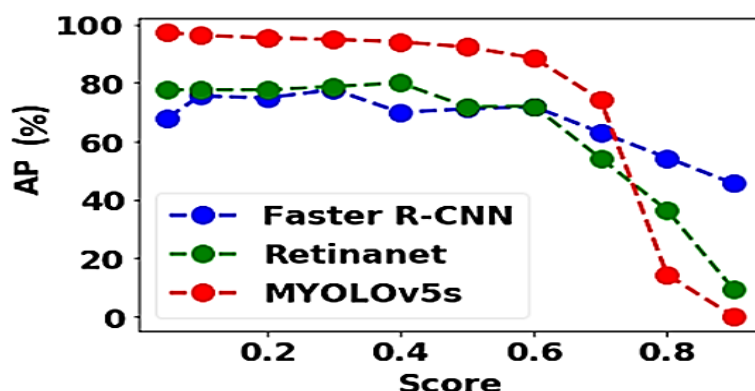
همان گونه که در این شکل پیداست، در دو تاریخ مورد بررسی الگوریتم MYOLOv5s بیشترین تعداد تشخیص‌های درست را داراست. با توجه به شکل این الگوریتم در تشخیص‌های صحیح بسیار مشابه با منحنی تعداد حقیقی کاکل‌های ذرت (Ground truth) عمل کرده است. به علاوه، تعداد تشخیص‌های نادرست آن نسبت به کل تشخیص‌های درست انجام گرفته توسط این الگوریتم تنها ۶/۴۲ درصد است در حالی که این نسب برای روش‌های Faster R-CNN و RetinaNet به ترتیب ۸/۶۵ و ۷/۵۱ درصد می‌باشد. در این شکل تعداد تشخیص‌های صحیح انجام گرفته توسط Faster R-CNN کمتر از سایر روش‌هاست. همچنین، هر سه نمودار کلیه الگوریتم‌ها برای داده‌های تاریخ بیست و چهارم نسبت به بیستم تغییرات بیشتری را نشان می‌دهند که خود ثابت‌کننده عملکرد ضعیف‌تر الگوریتم‌ها در این تاریخ به علت چالش‌های موجود می‌باشد. استفاده از این شکل تحلیل بر اساس نوع ذرت را نیز ملموس‌تر می‌سازد و بر این اساس می‌توان

بررسی تاثیر امتیاز

امتیاز تشخیص شی نقش به سزایی در عملکرد مدل‌های مبتنی بر تشخیص ایفا می‌کند. برای مطالعه اثر این پارامتر در مدل‌های مختلف، تغییرات مقدار دقت میانگین (AP) به ازای مقادیر مختلف امتیاز در منحنی شکل ۱۱ آمده است. همان گونه که از شکل پیداست امتیاز بر روی عملکرد مدل‌های تک مرحله‌ای نظیر MYOLOv5s و RetinaNet تاثیر بیشتری دارد. مقدار بهینه این پارامتر برای الگوریتم‌های MYOLOv5s، RetinaNet، Faster R-CNN

از کاکل‌های گیاه ذرت در دو تاریخ مختلف با میزان رشد متفاوت استفاده شده است.

ارزیابی این الگوریتم از مجموعه داده HIPS دانشگاه پردو، ایندیانا، آمریکا مربوط به سال ۲۰۲۰ متشکل از تصاویر پهپادی برداشت شده



شکل ۱۱- منحنی دقت میانگین بر اساس امتیاز برای الگوریتم‌های مبتنی بر تشخیص Faster R-CNN، RetinaNet، و MYOLOv5s
Fig.11. AP versus score plot for detection-based methods TasselNetv2+, Faster R-CNN, RetinaNet, and MYOLOv5s

است و در نواحی متراکم نیز عملکرد خوبی دارد. در کارهای آینده از ایده یادگیری انتقالی جهت شمارش گیاهان مشابه مانند سویا و پنبه استفاده خواهد شد. همچنین با به‌کارگیری شبکه‌های عمیق متفاوت و بهبود هرچه بیشتر آن‌ها و استفاده از روش‌های داده‌افزایی مبتنی بر یادگیری عمیق نظیر تولید داده مصنوعی در جهت عملکرد هرچه بهتر روش‌های یادگیری عمیق در حوزه کشاورزی اقدام خواهد شد. به‌علاوه، با تصویربرداری از گیاهان با سنجنده‌های دیگر نظیر دوربین چند طیفی روش‌هایی برای تعیین خردکار آفات و بیماری‌های گیاهان تعبیه خواهد شد.

سپاسگزاری

این پژوهش مربوط به مرکز تحقیقات و آموزش زراعت (ACRE) دانشگاه پردو، ایندیانا، آمریکا است. بر خود لازم می‌دانیم از شرکت دانش بنیان فنی مهندسی داده کاوی ویرا ژرف کویر که تصاویر پایگاه داده را تهیه نموده و در به ثمر رسیدن این پژوهش نقش به‌سزایی داشت تقدیر و تشکر نماییم.

با توجه به کوچک بودن مجموعه داده و ویژگی‌های کاکل‌های ذرت در تصاویر (شکل، اندازه، رنگ، بافت و غیره) به‌منظور هرچه بهتر عمل کردن الگوریتم اصلاحات اساسی در معماری الگوریتم اصلی صورت گرفته و الگوریتم بهبودیافته مختص شناسایی کاکل‌های ذرت با نام MYOLOv5s ارائه شده است. بهبودهای صورت گرفته شامل استفاده از ساختار BottleneckCSP در گردن شبکه و تابع فعال‌سازی Hardswish جهت یادگیری تعداد بیشتری ویژگی توسط شبکه و بهبود عملکرد آن و استفاده از لایه‌های حذف تصادفی مکانی در سر شبکه جهت جلوگیری از بیش‌برازش و افزایش دقت تشخیص به‌ویژه در زمان کوچک بودن مجموعه داده می‌شود. عملکرد این شبکه در تشخیص و شمارش کاکل‌های ذرت با روش‌های معتبر معرفی‌شده در سال‌های اخیر Faster R-CNN، RetinaNet و TasselNetv2+ مقایسه گردیده و نتایج عددی به‌دست‌آمده نشان دادند که الگوریتم MYOLOv5s بیشترین تعداد تشخیص صحیح کاکل‌های ذرت با بالاترین دقت میانگین و کم‌ترین زمان پردازش را دارا می‌باشد. تصاویر حاصل از کاکل‌های ذرت تشخیص داده شده توسط چند روش مورد بررسی نیز اثبات کردند که این الگوریتم بیش از سایر روش‌ها قادر به تشخیص کاکل‌های ذرت با اندازه‌های متفاوت

References

1. Albawi, S., Mohammed, T. A., & Al-Zawi, S. (2017). *Understanding of a convolutional neural network*. Pages 1-6. 2017 International Conference on Engineering and Technology (ICET): IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICEngTechnol.2017.8308186>
2. Alzadjali, A., Alali, M. H., Sivakumar, A. N. V., Deogun, J. S., Scott, S., Schnable, J. C., & Shi, Y. (2021). Maize Tassel Detection from UAV Imagery Using Deep Learning. *Frontiers in Robotics and AI*. <https://doi.org/10.3389/frobt.2021.600410>

3. Bisong, E. (2019). Building machine learning and deep learning models on Google Cloud Platform. Springer.
4. Bochkovskiy, A., Wang, C. Y., & Liao, H. Y. M. (2020). YOLOv4: Optimal speed and accuracy of object detection. arXiv preprint arXiv:2004.10934. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2004.10934>
5. Chicco, D., Warrens, M. J., & Jurman, G. (2021). The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation. *Computer Science*, 7, e623. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.623>
6. Dillon, J. V., Langmore, I., Tran, D., Brevdo, E., Vasudevan, S., Moore, D., Patton, B., Alemi, A., Hoffman, M., & Saurous, R. A. (2017). Tensorflow distributions. arXiv preprint arXiv: 1711.10604. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1711.10604>
7. Elfwing, S., Uchibe, E., & Doya, K. (2018). Sigmoid-weighted linear units for neural network function approximation in reinforcement learning. *Neural Networks*, 107, 3-11. <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2017.12.012>
8. Farhadi, A., & Redmon, J. (2018). YOLOv3: An incremental improvement. Pages 1804-2767. Computer Vision and Pattern Recognition: Springer Berlin/Heidelberg, Germany. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1804.02767>
9. Ghosal, S., Zheng, B., Chapman, S. C., Potgieter, A. B., Jordan, D. R., Wang, X., Singh, A. K., Singh, A., Hirafuji, M., & Ninomiya, S. (2019). A weakly supervised deep learning framework for sorghum head detection and counting. *Plant Phenomics* 2019. <https://doi.org/10.34133/2019/1525874>
10. Gómez-Flores, W., Garza-Saldaña, J. J., & Varela-Fuentes, S. E. (2019). Detection of huanglongbing disease based on intensity-invariant texture analysis of images in the visible spectrum. *Computers and Electronics in Agriculture*, 162, 825-835. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.05.032>
11. Habib, A. F., Kim, E. M., & Kim, C. J. (2007). New methodologies for true orthophoto generation. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 73, 25-36.
12. Hawkins, D. M. (2004). The problem of overfitting. *Journal of Chemical Information and Computer Sciences*, 44, 1-12. <https://doi.org/10.1021/ci0342472>
13. He, K., Zhang, X., Ren, S., & Sun, J. (2015). Spatial pyramid pooling in deep convolutional networks for visual recognition. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 37, 1904-1916. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2015.2389824>
14. Howard, A., Sandler, M., Chu, G., Chen, L. C., Chen, B., Tan, M., Wang, W., Zhu, Y., Pang, R., & Vasudevan, V. (2019). Searching for mobilenetv3. Pages 1314-1324. Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision.
15. Jocher, G., et al. (2020). YOLOv5. <https://github.com/ultralytics/yolov5>
16. Lempitsky, V., & Zisserman, A. (2010). Learning to count objects in images. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 23, 1324-1332.
17. Leung, H., & Haykin, S. (1991). The complex backpropagation algorithm. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 39, 2101-2104. <https://doi.org/10.1109/78.134446>
18. Lin, T. Y., Dollár, P., Girshick, R., He, K., Hariharan, B., & Belongie, S. (2017). Feature pyramid networks for object detection. Pages 2117-2125. Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition.
19. Liu, S., Qi, L., Qin, H., Shi, J., & Jia, J. (2018). Path aggregation network for instance segmentation. Pages 8759-8768. Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition.
20. Liu, Y., Cen, C., Che, Y., Ke, R., Ma, Y., & Ma, Y. (2020). Detection of maize tassels from UAV RGB imagery with faster R-CNN. *Remote Sensing*, 12, 338. <https://doi.org/10.3390/rs12020338>
21. Long, X., Deng, K., Wang, G., Zhang, Y., Dang, Q., Gao, Y., Shen, H., Ren, J., Han, S., & Ding, E. (2020). PP-YOLO: An effective and efficient implementation of object detector. arXiv preprint arXiv:2007.12099. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2007.12099>
22. Lu, H., & Cao, Z. (2020). Tasselnetv2+: A fast implementation for high-throughput plant counting from high-resolution RGB imagery. *Frontiers in Plant Science*, 11, 1929. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.541960>
23. Lu, H., Cao, Z., Xiao, Y., Zhuang, B., & Shen, C. (2017). TasselNet: counting maize tassels in the wild via local counts regression network. *Plant Methods*, 13, 1-17. <https://doi.org/10.1186/s13007-017-0224-0>
24. Ongsulee, P. (2017). Artificial intelligence, machine learning and deep learning. Pages 1-6. 2017 15th International Conference on ICT and Knowledge Engineering (ICT&KE): IEEE.
25. Parihar, C., Jat, S., Singh, A., Kumar, R. S., Hooda, K., GK, C., & Singh, D. (2011). Maize production technologies in India.
26. Paszke, A., Gross, S., Massa, F., Lerer, A., Bradbury, J., Chanan, G., Killeen, T., Lin, Z., Gimelshein, N., & Antiga, L. (2019). Pytorch: An imperative style, high-performance deep learning library. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 32, 8026-8037.
27. Pourreza, A., Lee, W. S., Etxeberria, E., & Banerjee, A. (2015). An evaluation of a vision-based sensor performance in Huanglongbing disease identification. *Biosystems Engineering*, 130, 13-22. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.11.013>

28. Quan, L., Feng, H., Lv, Y., Wang, Q., Zhang, C., Liu, J., & Yuan, Z. (2019). Maize seedling detection under different growth stages and complex field environments based on an improved Faster R-CNN. *Biosystems Engineering*, 184, 1-23. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.05.002>
29. Redmon, J., & Farhadi, A. (2017). *YOLO9000: better, faster, stronger*. Pages 7263-7271. Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition.
30. Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R., & Farhadi, A. (2016). *You only look once: Unified, real-time object detection*. Pages 779-788. Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition.
31. Rezatofighi, H., Tsoi, N., Gwak, J., Sadeghian, A., Reid, I., & Savarese, S. (2019). *Generalized intersection over union: A metric and a loss for bounding box regression*. Pages 658-666. Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition.
32. Shi, W., Caballero, J., Huszár, F., Totz, J., Aitken, A. P., Bishop, R., Rueckert, D., & Wang, Z. (2016). *Real-time single image and video super-resolution using an efficient sub-pixel convolutional neural network*. Pages 1874-1883. Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition.
33. Sokolova, M., Japkowicz, N., & Szpakowicz, S. (2006). *Beyond accuracy, F-score and ROC: a family of discriminant measures for performance evaluation*. Pages 1015-1021. Australasian joint conference on artificial intelligence: Springer.
34. Tagne, A., Feujio, T., & Sonna, C. (2008). *Essential oil and plant extracts as potential substitutes to synthetic fungicides in the control of fungi*. Pages 12-15. International Conference Diversifying crop protection.
35. Tompson, J., Goroshin, R., Jain, A., LeCun, Y., & Bregler, C. (2015). *Efficient object localization using convolutional networks*. Pages 648-656. Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition.
36. Ubbens, J., Cieslak, M., Prusinkiewicz, P., & Stavness, I. (2018). The use of plant models in deep learning: an application to leaf counting in rosette plants. *Plant methods*, 14, 1-10. <https://doi.org/10.1186/s13007-018-0273-z>
37. Wang, C. Y., Liao, H. Y. M., Wu, Y. H., Chen, P. Y., Hsieh, J. W., & Yeh, I. H. (2020). *CSPNet: A new backbone that can enhance learning capability of CNN*. Pages 390-391. Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition workshops.
38. Xiong, H., Cao, Z., Lu, H., Madec, S., Liu, L., & Shen, C. (2019). TasselNetv2: in-field counting of wheat spikes with context-augmented local regression networks. *Plant Methods*, 15, 1-14. <https://doi.org/10.1186/s13007-019-0537-2>
39. Zhu, M. (2004). *Recall, precision and average precision*. Department of Statistics and Actuarial Science, University of Waterloo, Waterloo 2: 6.
40. Zou, H., Lu, H., Li, Y., Liu, L., & Cao, Z. (2020). Maize tassels detection: a benchmark of the state of the art. *Plant Methods*, 16, 1-15. <https://doi.org/10.1186/s13007-020-00651-z>



Detection of *Chilo Suppressalis* using Smartphone Images and Deep Learning

M. Fallah¹, E. Ghanbari Parmehr^{2*}

1- BSc Student, Department of Geomatics, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

2- Assistant Professor, Department of Geomatics, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

(*- Corresponding Author Email: parmehr@nit.ac.ir)

<https://doi.org/10.22067/jam.2022.72647.1064>

Received: 21 September 2021

Revised: 19 January 2022

Accepted: 31 January 2022

Available Online: 31 January 2022

How to cite this article:

Fallah, M., & Ghanbari Parmehr, E. (2023). Detection of *Chilo Suppressalis* using Smartphone Images and Deep Learning. *Journal of Agricultural Machinery*, 13(2), 195-211. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jam.2022.72647.1064>

Introduction

Rice is one of the most important main food sources in Iran and the world. The correct identification of the type of pest in the early stages of preventive action has a significant role in reducing the damage to the crop. Traditional methods are not only time-consuming but also provide inaccurate results. As a result, precision agriculture and its associated technology systems have emerged. Precision agriculture utilizes information technology such as GPS, GIS, remote sensing, and machine learning to implement agricultural inter-farm technical measures to achieve better marginal benefits for the economy and environment. Machine learning is a division of artificial intelligence that can automatically progress based on experience gained. Deep learning is a subfield of machine learning that models the concepts of using deep neural networks with several high-level abstract layers. This capability has led to careful consideration in agricultural management. The diagnosis of disease and predicting the time of destruction, with a focus on artificial intelligence, has been the subject of much research in precision agriculture. This article presents, in the first step, a trained model of the *Chilo suppressalis* pest using data received from the smartphone, validated with the opinion of experts. In the second step, we introduce the developed system based on the smartphone. By using this system, farmers can share their pest images through the Internet and learn about the type of pest on their farm, and finally, take the necessary measures to combat it. This operation is done quickly and efficiently using the developed artificial intelligence. In the continuation of the article, the second part introduces the materials and methods, and the third part presents the results. The fourth section also discusses and concludes the research.

Materials and Methods

Chilo suppressalis is one of the most important pests of rice in temperate and subtropical regions of Asia. The conventional approach employed by villagers to gather the *Chilo suppressalis* pest entails setting up a light source above a pan filled with water infused with a pesticide. At sunset, these insects are attracted to the light and fall into the water in the pan. This method is known as optical trapping. After catching the pest using optical traps, they are collected from the water surface, and their photo is taken with a mobile phone based on the location of the optical trap.

The proposed method in this research consists of three main steps. Firstly, the farmer utilizes the software provided by the extended version known as Smart Farm. The farmer captures an image of the *Chilo suppressalis* pest and sends it along with its location to the system. The Smart Farm software program carries out image processing and pest range detection operations. The user then verifies the accuracy of the pest detection. In the second step, the images sent by the farmer are processed by the pre-trained model within the system. The model analyzes the images and determines the presence of the pest. Finally, after identifying the type of pest, the results, along with recommended methods for pest control, are sent back to the farmer.

In summary, In this method, farmers employ the Smart Farm software to capture and transmit images of the *Chilo suppressalis* pest. The captured images then undergo image processing and pest range detection as the next steps in the process. The results, including pest identification and control methods, are then returned to the farmer.

Results and Discussion

The model has been designed with 400 artificial neural network processing units (APCs), achieving accuracy percentages of 88% and 92%. To conduct a more detailed study of the proposed model, the statistical criteria of recall and F-score were used. Based on the calculations, the trained model demonstrated a recall score of 91%. This criterion shows that the model was able to identify a large percentage of what was expected to be identified by the model. Additionally, the F-score, with an acceptable percentage of 88%, confirmed the accuracy of the trained model.

Conclusion

Researchers have always been highly interested in the valuable data freely provided by farmers for their studies and analyses. In this study, an intelligent system was designed for identifying types of pests such as worms and stalk eaters, which can automatically determine the pest type from the image sent by the farmer using artificial intelligence and deep learning. By utilizing the developed system, farmers can be informed of the type of pest present on their farm in the shortest possible time, with minimal required software training.

Keywords: Automatic pest detection, Intelligent agriculture, Machine learning, Smartphone

مقاله پژوهشی

جلد ۱۳، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۲، ص ۲۱۱-۱۹۵

تشخیص کرم ساقه‌خوار برنج (*Chilo suppressalis*) با کمک تصاویر تلفن هوشمند و یادگیری

عمیق

محمد فلاح^۱، عبادت قنبری پرمهر^{۲*}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۱۱

چکیده

در بین محصولات کشاورزی، برنج یکی از اصلی‌ترین منابع غذایی در کشورهای خاورمیانه، به‌ویژه ایران است. مقابله موثر و به‌هنگام با آفات مزارع برنج، یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های پیش رو در زمینه زراعت این محصول است. کرم ساقه‌خوار برنج (*Chilo suppressalis*) از آفات کلیدی گیاه برنج در شمال ایران می‌باشد. در حال حاضر، تشخیص نوع آفت‌هایی که به مزارع برنج هجوم می‌برند به نیروی انسانی و تجربه کافی متکی است. تشخیص آفت در مراحل اولیه به‌منظور به حداقل رساندن خسارت به‌عنوان اقدام پیشگیرانه ضروری است. توسعه هوش مصنوعی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین، دریچه جدیدی را در صنایع مختلف از جمله کشاورزی صنعتی ایجاد کرده است. با استفاده از یادگیری ماشین می‌توان تا حدود زیادی از خطاهای موجود در شناسایی آفت جلوگیری کرد. از طرف دیگر در سال‌های اخیر همگانی شدن استفاده از تلفن همراه هوشمند و توسعه شیوه دریافت اطلاعات داوطلبانه، امکان پایش خودکار به‌منظور کاهش نیروی انسانی برای کشاورزان فراهم شده است. هدف از این تحقیق، شناسایی خودکار کرم ساقه‌خوار برنج با استفاده از تصاویر تلفن همراه و معرفی و توسعه یک برنامه کاربردی برای کشاورز جهت شناسایی دقیق آفت است. از برنامه کاربردی توسعه داده شده برای کشاورز به‌منظور دریافت تصاویر کرم ساقه‌خوار برنج برای آموزش شبکه عصبی عمیق استفاده شد. سپس، با استفاده از تکنیک‌های یادگیری عمیق به آموزش مدل پرداخته شد. نتایج حاصل نشان داد که مدل آموزش دیده با استفاده از تصاویر تلفن هوشمند با دقت ۹۲ درصد و صحت ۸۸ درصد عملکرد مناسبی در تشخیص آفت کرم ساقه‌خوار دارد.

واژه‌های کلیدی: تشخیص خودکار آفات، تلفن همراه هوشمند، کشاورزی هوشمند، یادگیری ماشین

مقدمه

طرفی قسمت اعظم کنترل این آفت به‌وسیله آفت‌کش‌های شیمیایی (حشره‌کش‌های گرانول) صورت می‌گیرد. بنابراین شناسایی صحیح نوع آفت در مراحل اولیه برای اقدام پیشگیرانه نقش به‌سزایی در کاهش میزان خسارت وارده به محصول دارد. کرم ساقه‌خوار برنج^۳ یکی از مهم‌ترین آفات برنج در مناطق معتدل و نیمه‌استوایی آسیا است (Dale, 1994). این آفت از راسته *Lepidoptere* و خانواده *Pylalidae* اولین بار در دنیا در سال ۱۸۶۳ توسط واکر^۴ شناسایی و نام‌گذاری شد. لارو این آفت بر روی گیاه برنج در مرحله رشد منجر به زردی و خشکی گیاه می‌شود که به خسارت نسل اول^۵ معروف است. در این مرحله با رشد ساقه‌های جانبی، گیاه در مقابل آفت عکس‌العمل نشان داده و با ایجاد ساقه‌های جدید از خسارت آفت تا حدی جلوگیری می‌کند. اما در مرحله خوشه‌دهی، تغذیه لارو منجر به

برنج یکی از مهم‌ترین و اصلی‌ترین منابع غذایی در ایران و جهان به‌شمار می‌رود. با توجه به این که کمیت و کیفیت برنج بر اثر آفات مختلف کاهش می‌یابد، بنابر گزارش‌های جهاد کشاورزی در سال گذشته دو میلیون و ۶۰۰ هزار تن برنج در سطح زیرکشت ۸۰۰ هزار هکتار تولید شد که این میزان از برنج تولیدی ۸۵ درصد نیاز کشور را تأمین می‌کند. کرم ساقه‌خوار برنج از آفات مهم مزارع برنج محسوب می‌شود، سالانه خسارت زیادی به محصول برنج وارد می‌سازد، از

۱- دانشجوی کارشناسی، گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

(Email: parmehr@nit.ac.ir)

(*) نویسنده مسئول:

<https://doi.org/10.22067/jam.2022.72647.1064>

3- *Chilo suppressalis*

4- Walker

5- Dead Hearts

Shuibian در استان Jiangxi در کشور چین انجام پذیرفته اشاره کرد. در این تحقیق اثر بخشی تلفیق داده‌های VGI و مدیریت تلفیقی آفت مورد بررسی قرار گرفت. با تجزیه و تحلیل خسارات به‌جا مانده از هجوم کرم ساقه‌خوار برنج که از طریق داده‌های داوطلبانه‌ای کشاورزان به‌دست آمده است الگوهای پخش مکانی این آفت را در سراسر منطقه آشکار کردند. این الگوها شامل تاریخ، میزان شدت آفت‌زدگی، جهت‌گیری یا تغییرات ساختاری مکانی آلودگی خوشه‌ها می‌باشد. این مطالعه موردی، شایستگی منحصر به فرد VGI را در افزایش مدیریت تلفیقی آفت نشان می‌دهد (Yan, Feng, & Chang, 2017).

کشاورزی به‌صورت روزانه با چالش‌های زیادی از زمان کاشت بذر تا برداشت محصول مانند تخریب محصول توسط آفات، استفاده بی‌رویه آفت‌کش‌ها، عدم مدیریت صحیح علف‌های هرز و فقدان امکانات آبیاری و زهکشی روبه‌رو است. برای به حداقل رساندن تلفات محصولات کشاورزی، تشخیص نوع و شدت خسارت در مراحل اولیه برای اقدام پیشگیرانه مورد نیاز است. با توجه به قابلیت‌های هوش مصنوعی و یادگیری ماشین در حل مسائل پیچیده، می‌توان از این روش در بخش‌های مذکور استفاده نمود (Karabatak & Ince, 2009). استفاده از روش‌های هوش مصنوعی به‌جای تصمیم‌گیری‌های سنتی علاوه بر این که سبب افزایش بهره‌وری می‌گردد، از دقت بالایی نیز برخوردار است. امروزه صنعت کشاورزی به شدت نیازمند محاسبات و انجام عملیات تشخیص خودکار آفات با استفاده از هوش مصنوعی است (Jha, Doshi, Patel, & Shah, 2019).

در طول ۵۰ سال گذشته، به دلیل سودمندی زیاد و کاربرد فراوان، هوش مصنوعی به‌طور مداوم توسعه یافته و در حوزه‌های مختلف از جمله کشاورزی مورد استفاده قرار گرفته است. نوآوری‌های فنی مانند کامپیوترها، اینترنت و گوشی‌های هوشمند ابتدا در مراکز پرجمعیت شهری و سپس در مناطق روستایی مورد استفاده وسیع قرار گرفته ولی یک زیرساخت دیجیتال با عملکرد خوب در مناطق روستایی به‌منظور غلبه بر عدم دسترسی به امکانات شهری و جلوگیری از مهاجرت روستایان به مناطق شهری ضروری است (Opara, 2004; Soomro et al., 2001). با توجه به آماری که مرکز تحقیقات Pew منتشر کرده است. میانگین ضریب نفوذ گوشی همراه هوشمند در سطح جهانی، تا پایان سال ۲۰۱۸، ۶۶ درصد است (Pew Research Center, Feb. 05, 2019). افزایش نفوذ تلفن همراه هوشمند و رایانش ابری به نشر اطلاعات مرتبط به کشاورزی به کشاورزان کمک شایانی خواهد کرد. یکی از مزایای جریان اطلاعات این است که کشاورز می‌تواند تصمیمات مدیریتی بهتری را اتخاذ نماید.

خشکی گیاه می‌شود که این علامت را خسارت نوع دوم^۱ می‌نامند. مرحله دوم خسارت گیاه تقریباً در پایان مرحله رویش است و امکان ترمیم خسارت از طریق رشد ساقه‌های جانبی وجود ندارد. ساقه‌های آلوده به آفت در این زمان در اثر وزش باد شکسته و باعث خرابی و از بین رفتن ساقه‌های سالم مجاور می‌گردد (Pathak, 1968). درحال حاضر، آسیب‌شناسان گیاهی از یک روش قدیمی که به‌طور عمده متکی به پیش‌بینی با چشم غیرمسلح است، برای درجه‌بندی شدت خسارت وارده به گیاهان استفاده می‌کنند. روش‌های سنتی نه تنها زمان‌بر هستند، بلکه نتایج غیردقیقی را نیز ارائه می‌دهند (Deshpande, Sengupta, & Raghuvanshi, 2014). تغییر روش‌های کشاورزی از سنتی به صنعتی و حمایت از فناوری‌های نوپهور باعث افزایش سرمایه‌گذاری و تبدیل آن به یک صنعت پررونق شده است. از اواخر دهه ۱۹۸۰ به‌منظور حل مشکلات کشاورزی سنتی، از قبیل آلودگی محیط‌زیست، هدر دادن منابع و همین‌طور برای تحقق توسعه کشاورزی، محققان سراسر جهان شروع به بررسی کاربرد کشاورزی دقیق و سیستم‌های ارتباطی هوشمند کرده‌اند. کشاورزی دقیق می‌تواند از فناوری اطلاعات مانند فناوری سیستم اطلاعات جغرافیایی، فناوری سنجش از دور و یادگیری ماشین استفاده کند تا به‌منظور دستیابی به منافع بهتر اقتصادی و کاهش خطرات محیط‌زیستی، از اقدامات فنی کشاورزی در میان مزارع استفاده کند (Zhu, Zhang, & Sun, 2009).

مفهوم مشترک سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) ساده نبوده و بسیاری از مردم آن را به‌عنوان ابزار تولید نقشه می‌شناسند. در واقع، سیستم اطلاعات جغرافیایی یک محیط پیچیده متشکل از نمایش دیجیتالی مناظر، سنجش از دور، محیط پایگاه داده است (Opara, 2004; Soomro, Naqvi, & Zheng, 2001). نقش سیستم اطلاعات جغرافیایی در کشاورزی در حال افزایش است چرا که فناوری برای کسب، تحلیل و مدیریت داده‌های مرتبط با مکان بر روی محصولات کشاورزی در حال پیشرفت است (Soomro, 2015). فن‌آوری GIS نقش مهمی در کشاورزی دقیق را با ارزیابی شرایط محصول و پیش‌بینی بازده، کشف بیماری‌ها و آفات، نقشه‌برداری و محل وقوع فاجعه، اطلاعات مدیریت تامین آب، مدیریت حیات‌وحش و پیش‌بینی آب و هوا بازی می‌کند (Praveen & Sharma, 2020). در مالزی برای حمایت از تصمیم‌گیری و نظارت بر افزایش پایداری کشتزار روغن نخل، از GIS استفاده شده است. در این پژوهش از تصاویر چند طیفی و راداری سنجش از دور و تلفیق آن با GIS استفاده شد تا به‌صورت موثر این پایش انجام گردد (Pohl, Kanniah, & Loong, 2016). در ارتباط با نقش مهم اطلاعات جغرافیایی داوطلبانه می‌توان به تحقیقات موردی که در شهر

برای شناسایی گونه‌های آفت بر اساس تصاویر، از ترکیب مناسب شکل، رنگ، بافت و ویژگی‌های عددی استخراج‌شده برای توصیف پروانه استفاده کردند. سپس تکنیک $IpSDAE^3$ برای شبکه عصبی عمیق طراحی شد که توانسته است پروانه‌های ایجادشده (پروانه‌هایی که توسط شبکه به صورت مصنوعی تولید شد) و پروانه‌های طبیعی را با دقت $98/13\%$ شناسایی کند. در تحقیق لو و همکاران (Lu, Rustia, & Lin, 2019)، مدل طبقه‌بندی شبکه کانولوشن (CNN) را در ترکیب با تکنیک GAN^4 پیشنهاد دادند که برای این روش از یک دوربین Raspberry Pi v2 استفاده شد و حشرات مگس سفید و تریپس مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند و تصاویر مصنوعی از طریق افزایش داده مبتنی بر GAN ایجاد شد تا طبقه‌بندی CNN با داده‌های تصویری محدود افزایش یابد. در این روش شناسایی گونه حشره مگس با دقت ۸۵ تا ۹۵ درصد انجام شد. پیشرفت‌ها در شبکه‌های عصبی کانولوشن مبتنی بر یادگیری عمیق دقت طبقه‌بندی تصویر را تا حد زیادی بهبود بخشیده است با توجه به این که شبکه‌های کانولوشن در طبقه‌بندی تصاویر موفق بوده‌اند، رویکردهای مبتنی بر یادگیری عمیق در این مقاله برای تشخیص بیماری‌ها و آفات از تصاویر گیاه برنج توسعه داده شده است (Ngugi et al., 2020).

همان‌طور که تحقیقات جدید نشان می‌دهد با اضافه شدن تکنیک‌های شبکه عصبی عمیق روند شناسایی آفات گیاهی با دقت بیشتری انجام پذیرفت. تحقیقاتی که به آن اشاره شد برای اخذ تصویر نیاز به فرد متخصص و وجود شرایط نوری مناسب و یا استفاده از فناوری‌های مختلف برای شناسایی آفت وابسته هستند که امکان اجرای آن‌ها برای کشاورزان وجود ندارد. زیرا علاوه‌بر هزینه زیاد ساخت این دستگاه‌ها و استخدام نیروی کارآمد، زمان برای مبارزه با آفت برنج از دست خواهد رفت. نکته دیگری در این تحقیقات جدا بودن بخش تشخیص آفت و تحلیل‌های مکانی مبتنی بر GIS است. همواره عدم اطمینان از داده‌های ارسالی از داوطلب در VGI وجود خواهد داشت. بنابراین، نیاز به اعتبار داده‌های مکانی داوطلبانه همواره مورد توجه قرار گرفته است.

در پژوهش حاضر، در گام اول با استفاده از داده‌های دریافتی از تلفن هوشمند و اعتبارسنجی آن با نظر کارشناسان مدل آموزش دیده‌ای از آفت کرم ساقه‌خوار ارائه می‌شود. سپس، در گام دوم سامانه توسعه‌یافته بر پایه تلفن هوشمند معرفی می‌شود. با استفاده از این سامانه کشاورزان می‌توانند با به اشتراک‌گذاری تصاویر آفت از طریق اینترنت، به نوع آفت زمین زراعی خود آگاهی یابند و اقدامات لازم جهت مقابله با آفت را انجام دهند. این عمل در کمترین زمان ممکن

یادگیری ماشین^۱ شاخه‌ای از هوش مصنوعی است که قابلیت پیشرفت خودکار بر اساس تجربه‌های کسب شده را دارد (Mitchell, Carbonell, & Michalski, 1986). به عبارت دیگر، یادگیری ماشین برای یافتن الگوها و جستجوی تغییرات کوچک، بر پایه‌ی بررسی و مقایسه‌ی داده‌هایی از مقادیر کوچک تا حجم عظیمی از داده استوار است و یکی از راه‌های دستیابی به هوش مصنوعی محسوب می‌شود. یادگیری عمیق یک زیر شاخه از یادگیری ماشین است که مفاهیم استفاده از گرافی با یال‌های زیاد و پیچیده با چندین لایه انتزاعی سطح بالا را مدل می‌کند.

این قابلیت موجب شده تا در مدیریت کشاورزی دقیق مورد توجه قرار گیرد. در کشاورزی دقیق اطلاعات مواد شیمیایی و تخریب آفات از نظر زمان و مکان مورد بررسی قرار می‌گیرند. تشخیص بیماری و پیش‌بینی بازده زمان تخریب، با محوریت هوش مصنوعی عنوان مقالات و پژوهش‌های زیادی در حوزه کشاورزی بوده است. تکنیک‌های یادگیری عمیق در طبقه‌بندی تصویر بسیار نویدبخش ظاهر شده‌اند در سال‌های اخیر، این تکنیک‌ها برای تجزیه و تحلیل بیماری‌های چای، سیب، گوجه‌فرنگی، انگور، هلو و گلابی مورد استفاده قرار گرفته است (Ngugi, Abdelwahab, & Abo-Zahhad, 2020). از جمله این پژوهش‌ها می‌توان به مقاله پنتازی و همکاران اشاره کرد که برای تشخیص ماریتغال^۲ سالم و آلوده به سیاهک در طول رشد گیاه انجام شد (Pantazi et al., 2017). در تحقیق دیگری یک روش جدید براساس روند پردازش تصویر برای طبقه‌بندی و تشخیص خودکار قارچ گیاه توت‌فرنگی در محیط گلخانه توسعه داده شد که به صورت به هنگام اقدام به شناسایی و طبقه‌بندی انواع قارچ‌های این گیاه می‌کند (Ebrahimi, Khoshtaghaza, Minaei, & Jamshidi, 2017). در تحقیقی مشابه نیز برای تشخیص و غربالگری بیماری پوسیدگی طوقه برنج، از پردازش تصویر برای تشخیص دقیق پاتوژن‌های قارچ فوزاریوم برای دو وارته برنج استفاده شد (Chung et al., 2016). با توجه به تحقیقات انجام شده، تشخیص خودکار آفت محصول علاوه بر افزایش میزان تولید محصول، زمان تشخیص بیماری را نسبت به روش‌های سنتی کاهش می‌دهد. در استفاده از تکنیک یادگیری ماشین، محققان (Silveira & Monteiro, 2009) ابزاری را برای شناسایی خودکار الگوهای نقطه چشم پروانه *Bicyclus anynana*، با استفاده از یک الگوریتم یادگیری ماشین با ویژگی‌های مبتنی بر دایره‌ای و تقارن برای تشخیص نقاط چشمی روی تصاویر ایجاد کردند. این نرم‌افزار همچنین توانست الگوهای سایر گونه‌های پروانه را با موفقیت تشخیص دهد. ون و همکاران (Wen, Wu, Hu, & Pan, 2015)،

3- Improved Pyramidal Stacked De-noising AutoEncoder (IpSDAE)
4- Generative adversarial network

1- Machine Learning (ML)
2- Silybum marianum

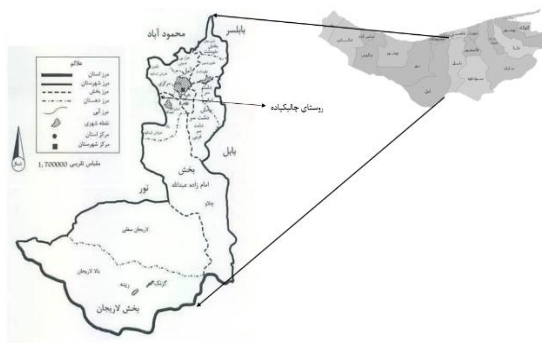
با استفاده از هوش مصنوعی توسعه داده شده انجام می‌شود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

زمین‌های کشاورزی واقع در روستای چالیکیاده شهرستان آمل از توابع امامزاده عبدالله برای جمع‌آوری داده‌های آفت مورد مطالعه مطابق شکل ۱ انتخاب شد. در این روستا هر ساله در دو نوبت کشت

برنج انجام می‌شود. اقلام برنج تولیدی شامل گونه‌های پر محصول (فجر) و بومی (طارم هاشمی) بوده و فرآیند کشت محصول از اواخر اسفند ماه شروع و برداشت محصول در تیر ماه انجام می‌شود. این روستا در طول جغرافیایی $13^{\circ} 17' 56''$ و عرض جغرافیایی $36^{\circ} 8'$ قرار گرفته است. شکل ۲ موقعیت منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۲- موقعیت جغرافیایی منطقه

Fig.2. Geographical location of the region



شکل ۱- تصویر ماهواره‌ای از زمین‌های کشاورزی

Fig.1. Satellite image of agricultural lands

جمع‌آوری داده

برای جمع‌آوری تصاویر کرم ساقه‌خوار به تعداد کافی برای آموزش شبکه از روش سنتی اهالی روستا استفاده شد. در این روش مطابق شکل ۳ یک منبع نور را در بالای تشتت پر از آب حاوی مقداری آفت‌کش قرار داده و هنگام غروب آفتاب این حشرات به دنبال نور جذب می‌شوند و بعد از چرخش زیاد به داخل آب موجود در

تشت سقوط می‌کنند. این روش به تله نوری (فرولایت) معروف است. بعد از شکار آفت با استفاده از تله نوری آن‌ها را از سطح آب جمع‌آوری کرده و با گوشی همراه اقدام به عکس‌برداری از این حشره با توجه به موقعیت مکانی تله نوری می‌شود نمونه‌ای از این تصویر در شکل ۴ قابل مشاهده است.



شکل ۳- تله نوری مورد استفاده برای شکار آفت

Fig.3. Optical traps used for pest hunting



شکل ۴- نمایش حشرات کامل به تله‌افتاده کرم ساقه‌خوار برنج
Fig.4. Display of trapped insects of *Chilo suppressalis*

آموزش دیده را توسعه داده و پس از ساخت مدل که شامل وزن‌های آموزش دیده است در سرور بارگذاری می‌شود سپس زمانی که کشاورز تصویر آفت را در برنامه بارگذاری کند تصویر برای تشخیص در سرور فراخوانی می‌شود و توسط مدل توسعه داده شده نوع آفت تشخیص داده می‌شود و نتیجه برای کشاورز ارسال می‌شود. کل این مراحل در سرور انجام می‌پذیرد و این امکان باعث می‌شود نتایج به‌هنگام به دست کشاورز برسد و در نهایت برای بررسی دقت نتایج حاصل، شبکه عصبی براساس معیارهای ارزیابی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

دریافت اطلاعات از کشاورز

محیط گرافیکی نرم‌افزار مطابق شکل ۵ نشان داده شده است. کشاورز برای استفاده از نرم‌افزار بایستی ابتدا مشخصات خود را به همراه موقعیت تقریبی زمین کشاورزی وارد نماید. سپس، برای تشخیص آفت، عکسی از آفت را همراه با برچسب موقعیت مکانی مطابق شکل ۶ برای این سامانه ارسال می‌کند.

InfoCamera : Date & Time: 2021:02:22 19:34:38
Flash: 16
Focal Length: 1600/1000

GPS Datestamp: 16
GPS Latitude: 36/1,26/1,20043/10000
GPS Latitude Ref: N
GPS Longitude: 52/1,17/1,198560/10000
GPS Longitude Ref: E
GPS Processing Method: null
GPS Timestamp: 16:04:22

Image Length: 1440
Image Width: 2560

Camera Make: LG Electronics
Camera Model: LG-M700
Camera Orientation: 8
Camera White Balance: 0

شکل ۶- اطلاعات دریافتی از درخواست کشاورز
Fig.6. Information received from the farmer's request

روش پیشنهادی

روش پیشنهادی در این تحقیق شامل سه مرحله اصلی است. ابتدا کشاورز با استفاده از نرم‌افزار توسعه‌یافته (مزرعه هوشمند) عکس دریافت شده از آفت کرم ساقه‌خوار را همراه با موقعیت مکانی آن برای سامانه ارسال می‌کند. عملیات پردازش تصویر و شناسایی محدوده آفت در برنامه نرم‌افزار مزرعه هوشمند انجام می‌پذیرد و کاربر صحت شناسایی آفت را تایید می‌کند. در گام دوم تصاویر ارسالی کشاورز در مدل از پیش‌آموزش دیده سامانه مورد تصمیم‌گیری قرار می‌گیرد و در گام نهایی بعد از تشخیص نوع آفت نتایج همراه با روش‌های مبارزه با این آفت برای کشاورز ارسال خواهد شد. تمرکز اصلی این تحقیق بررسی امکان تشخیص آفت کرم ساقه‌خوار برنج با استفاده از تصاویر به‌دست آمده از تلفن همراه است. اما برای توسعه این روش سامانه‌ای طراحی شد تا کشاورز بتواند نیازهای کشاورزی خود را با صرف کمترین زمان برآورده کند. بنابراین، ابتدا با استفاده از تصاویر به‌دست آمده از تلفن هوشمند و صحت داده‌ها و تایید آن توسط کارشناسان کشاورزی مدل



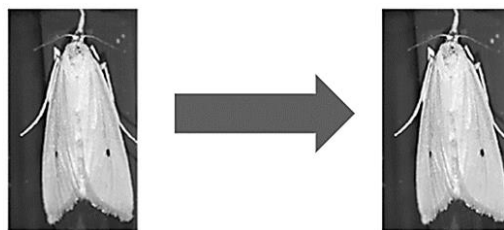
شکل ۵- قسمتی از ورود اطلاعات کشاورز هوشمند
Fig.5. Part of smart farmer information entry

پردازش تصاویر و شبکه عصبی عمیق

پیش‌پردازش داده‌های دریافتی

پردازش تصاویر دریافتی از کشاورز برای تشخیص کرم ساقه‌خوار از آفت‌های مشابه ضروری است. روشی که در این تحقیق پیشنهاد شده شامل پیش‌پردازش، بخش‌بندی و استخراج ویژگی است. ویژگی‌های تولیدشده از این مراحل برای تصمیم‌گیری و طبقه‌بندی به شبکه آموزش‌دیده ارسال خواهد شد تا عارضه یا آفت را تشخیص دهد. ابتدا عملیات پیش‌پردازش انجام می‌شود، تا علاوه بر انتخاب محدوده مورد نظر فیلترهای استاندارد مانند فیلترهای نرم‌کننده برای حذف نویز احتمالی هم روی داده‌ها انجام پذیرد. این کار می‌تواند در

تلفن همراه هوشمند کاربر انجام شود و فایل بعد از انجام پیش‌پردازش در سرور بارگذاری شود. با این عمل سرعت بارگذاری داده بیشتر خواهد شد و کاربر هزینه کمتری بابت انتقال اطلاعات می‌پردازد. پردازش تصویر باعث می‌شود تا کیفیت تصویر بهبود یافته و تصحیحات هندسی مورد نظر بر روی تصویر اعمال شود (Hornberg, 2017). برای شناسایی و طبقه‌بندی تصاویر با پیچیدگی زیاد می‌توان از شبکه‌های عصبی استفاده نمود. تصاویر دریافتی از کاربر مطابق شکل ۷ به تصویر خاکستری تبدیل می‌شوند تا عملیات پردازش با سرعت بیشتری انجام پذیرد. سپس پس زمینه تصویر از تصویر با استفاده از رابطه (۱) حذف می‌شود.



شکل ۷- تبدیل عکس رنگی به درجه خاکستری

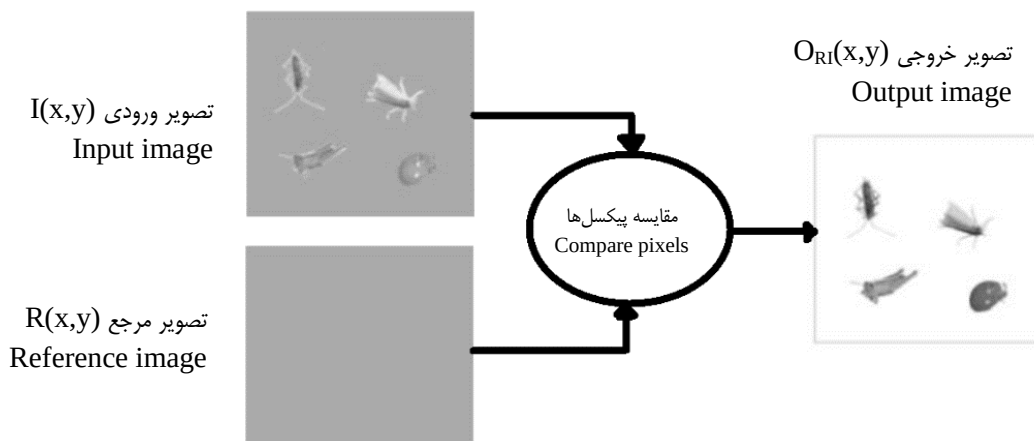
Fig.7. Converting a color photo to a gray degree

رابطه (۱) مورد استفاده قرار گرفت (Miranda, Gerardo, & Tanguilig, 2014):

$$O_{RI}(x, y) = \begin{cases} 255 & \text{if } R(x, y) = I(x, y) \\ I(x, y) & \text{if } R(x, y) \neq I(x, y) \end{cases} \quad (1)$$

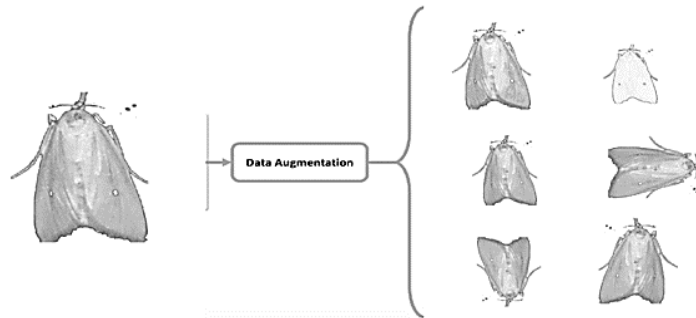
در این رابطه، مختصات x, y پیکسل‌های خروجی در عکس اولیه یعنی عکس رنگی جاگذاری شده و شکل حشره به صورت رنگی مطابق تصاویر شکل ۸ از عکس خام اولیه جدا می‌شود.

روش مورد استفاده برای تشخیص آفت حشرات در تصویر ساده و در عین حال کارآمد است. دو تصویر در تشخیص تفاوت، مورد استفاده قرار می‌گیرد. تصویر اول به عنوان تصویر مرجع عمل کرده و تصویر دوم به عنوان تصویر ورودی عمل می‌کند. این دو تصویر با هم مقایسه شده و تفاوت در مقادیر پیکسل تعیین می‌شود. اگر مقادیر پیکسل ورودی برابر با مقادیر پیکسل مرجع نباشد مقدار پیکسل ورودی به عنوان پیکسل تصویر خروجی ذخیره خواهد شد و اگر مقدار پیکسل تصویر ورودی برابر با تصویر مرجع باشد، پس زمینه سفید خواهد شد. برای مشخص کردن تفاوت تصویر مرجع و ورودی،



شکل ۸- مراحل پردازش

Fig.8. Processing steps



شکل ۹- تولید داده‌های آموزشی مصنوعی
Fig.9. Production of artificial train data

آموزش مدل برای تشخیص آفت

در این مقاله به دلیل محدودیت تعداد عکس‌های مورد نیاز برای تولید ساختارهای شبکه‌ای فقط از عکس‌های پروانه کرم ساقه‌خوار استفاده شده است. این عکس‌ها از منابع مختلفی از جمله گوگل و جمع‌آوری میدانی مورد استفاده قرار گرفته است. روش پیشنهادی با کتابخانه TensorFlow 1.13.1 و چارچوب نرم‌افزاری Keras 2.2.4 مورد استفاده قرار گرفت. نمونه مورد استفاده دارای ۹۰ تصویر کرم ساقه‌خوار و ۶۰ تصویر شامل دیگر حشرات بوده است. اما این تعداد نمونه برای آموزش شبکه کافی نمی‌باشد. از طرف دیگر، دریافت نمونه‌های زیاد، نیازمند صرف هزینه و زمان زیادی است. عموم مدل‌های یادگیری عمیق به‌خاطر پارامترهای زیادی که دارد نیازمند حجم زیادی از داده‌های آموزشی هستند که همیشه این حجم زیاد داده آموزشی در دسترس نیست. یکی از روش‌های استفاده شده برای افزایش تعداد نمونه‌های آموزشی شیوهی «داده‌افزایی»^۱ است. انعکاس، اضافه کردن نویز، تغییر رنگ، تغییر اندازه و برش تصاویر از جمله شیوه‌های داده‌افزایی هستند (Ba & Frey, 2013). در این مقاله از تابع سازنده Image Data Generator برای تولید نمونه‌های تصادفی استفاده شد. یکی از تکنیک‌های مورد استفاده تکنیک شیف عمودی و افقی تصاویر می‌باشد. این کار به معنای هل دادن تمامی پیکسل‌های تصویر در یک جهت مشخص است در حین این عمل اندازه تصویر ثابت است. تکنیک دیگری که مورد استفاده قرار گرفته است تکنیک چرخش تصویر به مقدار تصادفی می‌باشد. این روش جهت تقویت دیتاست از چرخش و دوران تصاویر استفاده می‌شود و هر تصویر به مقداری تصادفی در جهت عقربه‌های ساعت می‌چرخد. تکنیک آخری که برای تولید نمونه‌های مصنوعی مورد استفاده قرار گرفت تکنیک برگرداندن تصاویر از چپ به راست و بالا به پایین می‌باشد. برگرداندن تصویر به معنای معکوس کردن جهت ردیف‌ها یا ستون‌های پیکسل‌های یک تصویر است که در نهایت موجب می‌شود

محورهای عمودی یا افقی تصویر برعکس شوند (شکل ۹). در نهایت ۱۲۱۳ تصویر برای آموزش شبکه و ۵۲۱ تصویر برای آزمایش شبکه که مقدار ۳۰ درصد از داده آموزشی است به منظور اعتبارسنجی^۲ مورد استفاده قرار گرفت. استفاده از تکنیک افزایش داده‌های آموزشی امری رایج در آموزش شبکه‌های عمیق است. به‌عنوان مثال کاسرینی و همکاران (Kusrini et al., 2020) برای شناسایی آفت‌های درخت انبه با استفاده از تکنیک افزایش داده تعداد داده‌های آموزشی را از ۵۱۰ تصویر به ۶۲۰۴۷ تصویر افزایش دادند. از طرف دیگر، خان رمکی و همکاران (Khanramaki, Askari Asli-, Ardeh, Kozegar, & Loni, 2020) از تکنیک افزایش داده با چرخش تصاویرها با زوایای مختلف و همین‌طور از تکنیک برگرداندن تصاویر از چپ به راست و بالا به پایین اقدام به تولید داده‌های مصنوعی کردند که موجب بهبود دقت شبکه طراحی‌شده گردید. استفاده از تکنیک‌های دیگر برای تولید داده‌های مصنوعی احتمال ایجاد تصاویری که در واقعیت وجود ندارند را زیاد می‌نماید. به‌عنوان مثال، استفاده از تکنیک تغییر فضای رنگی احتمال تولید یک کرم ساقه‌خوار با رنگ غیر واقعی را افزایش می‌دهد که موجب تمایز بین داده‌هایی می‌شود که در دنیای واقعی وجود ندارند.

راهکار دیگر برای جلوگیری از بیش‌برازش در شبکه یادگیری عمیق و افزایش کارایی مدل استفاده از «نظم‌دهی»^۳ است. اضافه کردن پارامتر نظم‌دهی، مقادیر درون ماتریس وزن را کاهش خواهد داد و این موضوع شبکه عصبی را همگرا می‌کند. در یادگیری عمیق هدف به حداقل رسانی تابع هزینه رابطه (۲) است.

$$J(w^{[1]}, b^{[1]}, \dots, w^{[L]}, b^{[L]}) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m L(\hat{y}^{(i)}, y^{(i)}) \quad (2)$$

در رابطه (۲)، L می‌تواند هر تابع هزینه باشد. حال، برای نظم‌دهی $L2$ پارامتری به‌منظور تنظیم وزن‌ها اضافه می‌شود که رابطه

2- Validation
3- Regularization

1- Data Augmentation

(۳) حاصل خواهد شد.

$$J(\mathbf{w}^{[1]}, \mathbf{b}^{[1]}, \dots, \mathbf{w}^{[L]}, \mathbf{b}^{[L]}) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m L(\hat{\mathbf{y}}^{(i)}, \mathbf{y}^{(i)}) + \frac{\lambda}{2m} \sum_{l=1}^L \|\mathbf{w}^{[l]}\|_F^2 \quad (3)$$

در این جا که λ (لاندا) پارامتر نظم‌دهی می‌باشد، F به‌عنوان پارامتر نرمال Frobenius شناخته می‌شود و درواقع برابر با مجذور نرمال یک ماتریس می‌باشد. لاندا پارامتری است که وابسته به شرایط می‌تواند تنظیم شود یعنی مقدار بالای وزن‌ها با در نظر گرفتن مقدار بالایی برای لاندا قابل کنترل خواهد بود و به‌طور مشابه مقدار کم برای لاندا به‌منظور تنظیم مقدار کم وزن‌ها در نظر گرفته می‌شود. از آنجایی که تابع هزینه باید حداقل‌رسانی شود، تناسب مطرح‌شده منطقی به نظر می‌رسد و با اضافه کردن مجذور نرمال ماتریس وزن‌ها و ضرب آن در پارامتر نظم‌دهی، وزن‌های زیاد به نوعی تنظیم و تابع هزینه کاهش می‌یابد. معمولاً برای کاهش بیش‌برازش مدل در شبکه‌های کانولوشن از عملگر «رهاسازی»^۱ استفاده می‌شود. رهاسازی روشی برای منظم‌سازی است و خطای تعمیم‌پذیری را با کاهش گنجایش مدل کمتر می‌کند؛ بدین ترتیب که در هر دور آموزشی، به جای استفاده از همه نورون‌ها، تنها برخی از نورون‌ها (با احتمال p) فعال می‌شوند. هنگام آموزش، بعضی از نورون‌ها خاموش می‌شود تا در هر تکرار، شبکه‌ها باهم متفاوت باشند. شکل ۱۰ نحوه خاموش کردن نورون‌ها را نشان می‌دهد که هر ورودی $\mathbf{y}_i$ را در یک نورون r_i که یک توزیع دوقطبه‌ای با خروجی ۰ و ۱ (با توزیع برنولی) است، ضرب می‌شود.

بدون اجرای رهاسازی، گذر رو به جلو در مرحله آموزشی چنین شکلی خواهد داشت:

$$\mathbf{z}_i^{(l+1)} = \mathbf{w}_i^{(l+1)} \mathbf{y}^l + \mathbf{b}_i^{(l+1)}, \mathbf{y}_i^{(l+1)} = f(\mathbf{z}_i^{(l+1)}) \quad (4)$$

در این رابطه، ورودی تابع فعال‌سازی f در واقع همان حاصل ضرب جمع وزن‌ها (w) در ورودی (y) است. اما بعد از اجرای رهاسازی، گذر رو به جلو بدین شکل خواهد بود.

$$\mathbf{r}_i^{(l)} \sim \text{Bernoulli}(p), \hat{\mathbf{y}}^{(l)} = \mathbf{r}^{(l)} * \mathbf{y}^{(l)}, \mathbf{z}_i^{(l+1)} = \mathbf{w}_i^{(l+1)} \hat{\mathbf{y}}^l + \mathbf{b}_i^{(l+1)} \quad (5)$$

$$\mathbf{y}_i^{(l+1)} = f(\mathbf{z}_i^{(l+1)})$$

در خط دوم این معادله یک نورون r به معادله اضافه می‌شود که یا (به احتمال p) با ضرب وزن در ۱ آن را نگه می‌دارد یا این‌که (به احتمال $p-1$) با ضرب آن در ۰ آن را خاموش می‌کند؛ ادامه گذر رو به

جلو، مشابه زمانی است که از تکنیک رهاسازی استفاده نشود (Baldi & Sadowski, 2014)

الگوریتم آموزش شبکه عصبی کانولوشن

شبکه‌های عصبی کانولوشن از این واقعیت که ورودی شامل تصاویر است استفاده کرده و معماری شبکه را به روش منطقی محدود می‌کند. یک شبکه کانولوشن از چند لایه تشکیل می‌شود و هر لایه شیوه کار ساده‌ای دارد که در آن یک توده سه‌بعدی ورودی را دریافت کرده و با استفاده از توابعی مشتق‌پذیر^۲ به یک توده سه‌بعدی خروجی تبدیل می‌کند. قرارگیری یک لایه تجمع^۳ بین چندین لایه کانولوشن امری رایج است. وظیفه‌ی این لایه کاهش اندازه مکانی (عرض و ارتفاع) تصویر (ورودی) به جهت کاهش تعداد پارامترها، محاسبات و کنترل بیش‌برازش در داخل شبکه است. لایه تجمع به‌صورت مستقل بر روی هر برش عمقی از توده ورودی عمل کرده و آن را با استفاده از عملیات بیشینه‌سنجی^۴ از لحاظ مکانی تغییر اندازه می‌دهد. خلاصه‌ای از این معماری را می‌توان در شکل ۱۱ مشاهده کرد.

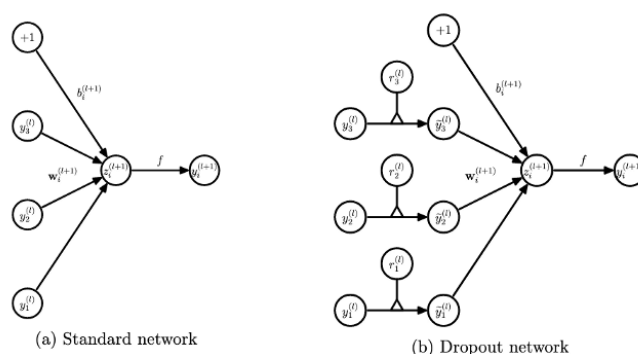
رایج‌ترین شکل استفاده از این لایه کاهشی به‌صورت فیلترهای با اندازه 2×2 به همراه اندازه گام ۲ است که هر برش عمقی در ورودی را با حذف ۲ عنصر از عرض و ۲ عنصر از ارتفاع کاهش داده و باعث حذف ۷۵٪ مقادیر موجود در آن برش عمقی می‌شود. در این عملیات بعد عمق بدون تغییر باقی می‌ماند. به‌طور کلی لایه تجمع یک توده با اندازه $W \times H \times D$ را به‌عنوان ورودی دریافت می‌کند و با توجه به اندازه پنجره و اهداف شبکه، مقدار میانگین یا بیشینه موجود در آن را در خروجی ارائه می‌دهد. اعمال این لایه بر روی لایه ورودی، باعث می‌شود که ابعاد ورودی به‌تدریج کاهش یابد (Tajbakhsh et al., 2016).

شبکه کانولوشنی پیشنهادی

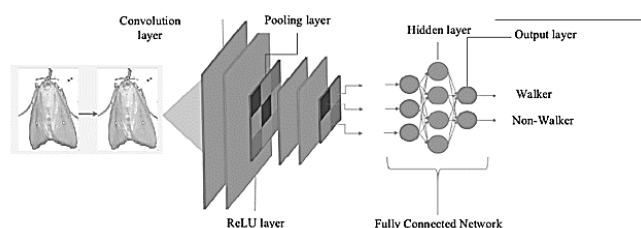
آموزش شبکه به معنی به حداقل رساندن تابع هزینه بر حسب خروجی‌های واقعی شبکه در مقایسه با خروجی‌های مطلوب شبکه است. این کار از طریق اصلاح وزن‌ها و بایاس‌ها صورت می‌گیرد. شبکه کانولوشنی دارای معماری‌های مختلفی هستند که برای اهداف خاصی طراحی شده‌اند که می‌توان AlexNet, GoogleNet, VGG را نام برد. اما شبکه‌های کانولوشنی همراه از معماری‌های آماده پیروی نمی‌کنند و با سعی و خطا طراحی می‌شوند. در این مقاله هم پارامترها، تعداد تکرار، تعداد لایه‌های کانولوشنی^۵ و نوع تابع فعال‌سازی^۶ تا حدود زیادی با سعی و خطا اعمال شده است.

- 2- Differentiable Function
- 3- Pooling
- 4- Max pooling
- 5- Convolutional layer
- 6- Activation Function

- 1- Dropout



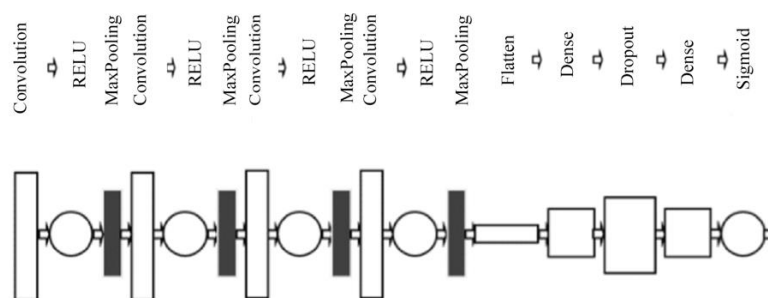
شکل ۱۰- سمت چپ شبکه اصلی با یک لایه پنهان و سمت راست نحوه عملکرد تکنیک رهاسازی در این شبکه
Fig.10. The left is a basic hidden layer network, and the right is how dropout work on this network



شکل ۱۱- معماری کلی شبکه
Fig.11. General network architecture

استفاده می‌شود که اگر به‌طور مجدد به شبکه همان ورودی‌ها داده شود، خروجی شبکه به خروجی مطلوب نزدیک‌تر شود (Najaf-Zadeh & Ghaffari, 2020). در این روش تصاویر به‌صورت دسته‌های ۱۶ تایی به شبکه وارد می‌شود. معماری روش پیشنهادی در تصویر شماره ۱۲ نشان داده شده است و سپس در ادامه مهم‌ترین لایه‌های این معماری به‌صورت خلاصه توضیح داده شده است.

بنابراین روش آموزش مورد استفاده در ساختار پیشنهادی، روش آموزش نظارت‌شده است. در این روش یک سرپرست بر رفتار یادگیرنده نظارت می‌کند و نحوه عملکرد صحیح را به او یادآور می‌شود. به بیان دیگر، سیستم یادگیرنده، مجموعه‌ای از زوج‌های داده متشکل از ورودی شبکه و خروجی مطلوب است. پس از اعمال ورودی شبکه، خروجی آن با خروجی مطلوب مقایسه شده و خطای یادگیری محاسبه و از آن برای اصلاح پارامترهای شبکه به‌گونه‌ای



شکل ۱۲- شبکه کانولوشنی پیشنهادی
Fig.12. Proposed convolutional network

نورون‌های موجود در این لایه به دنبال ویژگی‌های خاصی هستند. اگر آن‌ها ویژگی‌های مورد نظر خود را پیدا کنند، تابع فعال‌ساز آن‌ها فعال می‌شود. عملیات کانولوشن در تصویر این‌گونه عمل می‌کند که فیلتر با

شبکه کانولوشنی شامل لایه‌های کانولوشنی، لایه‌های کاهش اندازه، لایه Flatten و لایه‌های تمام‌متصل Dense است. لایه کانولوشنی را می‌توان چشم‌های شبکه کانولوشن دانست به‌طوری‌که

سیگموئید (رابطه ۷) می‌تواند برای تولید مشتق آن مورد استفاده قرار بگیرد. باتوجه به مزایای ذکر شده، در این مقاله در لایه تمام‌متصل از الگوریتم طبقه‌بندی sigmoid استفاده شده است.

تابع هزینه تفاوت نتیجه واقعی و نتیجه پیش‌بینی شده را مشخص می‌کند و با استفاده از این تابع هزینه مقادیر وزن‌های شبکه عصبی به‌روزرسانی می‌شود و شبکه را به سمت جواب‌های بهتر سوق می‌دهد. توابع هزینه مختلفی برای شبکه‌های عمیق معرفی شد یکی از رایج‌ترین تابع‌های هزینه Cross Entropy است که در طبقه‌بندی مورد استفاده قرار می‌گیرد و دارای دو نوع اختلاف آنتروپی دو دویی^۱ و اختلاف آنتروپی موضوعی^۲ می‌باشد که در این مقاله به دلیل تعداد خروجی مورد نظر تابع هزینه به‌صورت binary_crossentropy انتخاب شد. استفاده از تابع بهینه‌ساز و نرخ یادگیری و همچنین از تابع Adamax برای بهینه‌سازی تابع هزینه با نرخ یادگیری 1e-5 استفاده شد.

ارسال اطلاعات به کشاورز

برای استفاده از این سامانه لازم است کشاورز عکسی از آفت مورد نظر را برای سامانه ارسال نماید. سپس، سامانه با استفاده از مدل آموزش دیده خود مطابق شکل ۱۳ نوع آفت را تشخیص می‌دهد و دستورالعمل‌های مبارزه با این آفت برای کشاورز ارسال می‌کند تا در سریع‌ترین زمان ممکن به مبارزه با این آفت پرداخته شود.

معیار ارزیابی شبکه عصبی

برای ارزیابی نتایج طبقه‌بندی از معیارهای ارزیابی استاندارد استفاده می‌شود که مشهورترین و عمومی‌ترین معیار برای تعیین کارایی یک الگوریتم طبقه‌بندی معیار دقت^۳، معیار صحت^۴ و معیار حساسیت^۵ است. معیار امتیاز F1 پارامترهای دقت و حساسیت را با هم ترکیب می‌کند تا کارایی یک مدل طبقه‌بندی ارزیابی شود. برای محاسبه پارامتر ارزیابی از روابط (۸) استفاده می‌شود که در این روابط، FP^6 مربوط به تصاویر کرم ساقه‌خواری است که به اشتباه به عنوان حشره دیگر طبقه‌بندی شده است. FN^7 تعداد تصاویری که به اشتباه کرم ساقه‌خوار طبقه‌بندی شده‌اند. TP^8 تعداد تصاویری از کرم ساقه‌خوار است که به درستی تشخیص داده شده است و TN^9 مربوط تصاویری است که به درستی کرم ساقه‌خوار تشخیص داده نشده‌اند.

سایز موردنظر بر روی تصویر اصلی حرکت کرده و در هر لحظه آرایه‌های ماتریس فیلتر روی آرایه‌های پیکسل‌های تصویر قرار گرفته و ضرب می‌شوند. در نهایت حاصل تمام نقاط با یکدیگر جمع می‌شوند و به ازای هر قسمت فیلتر شده یک عدد به دست می‌آید. در مرحله بعد، فیلتر یک واحد به سمت راست رفته و مجدد عملیات تکرار می‌شود. این عملیات تا زمانی پیش می‌رود که محاسبات روی کل پیکسل‌های تصویر انجام شوند. در نهایت یک ماتریس جدید تولید می‌شود. در این مقاله از ۴ لایه کانولوشنال با تابع فعال‌ساز ReLU، که در هر لایه ۱۶ فیلتر با ابعاد ۳×۳ قرار دارد، استفاده شده است. تابع ReLU یک تابع غیرخطی است (رابطه ۶) که با خطاهای پس‌انتشار مواجهه نمی‌شود. علاوه بر این، اگر در شبکه‌های عصبی بزرگ‌تر به جای تابع sigmoid از تابع ReLU استفاده شود، سرعت مدل‌سازی بیشتر شده و در نتیجه مدت زمان مدل‌سازی کاهش می‌یابد.

$$f(x) = \text{Max}(x, 0) \quad (۶)$$

لایه‌های کاهش اندازه به‌صورت دوره‌ای در بین لایه‌های کانولوشن متوالی قرار دارند. قرار دادن یک لایه Pooling معمولاً بین چند لایه کانولوشنی پشت سر هم در یک معماری کانولوشنی امری بسیار رایج است و از آن برای کاهش اندازه نگاشت ویژگی‌ها و پارامترهای شبکه می‌توان استفاده کرد. کارکرد این لایه کاهش اندازه مکانی تصویر به جهت کاهش تعداد پارامترها و محاسبات در داخل شبکه و بنابراین کنترل بیش‌برازش است.

لایه Flatten یک لایه مهم است که بین لایه‌های استخراج ویژگی کانولوشنی و طبقه‌بندی خروجی قرار می‌گیرد. این لایه داده‌هایی که قصد ورود به مرحله طبقه‌بندی دارند را به بردار تبدیل می‌کند.

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (۷)$$

آخرین لایه، لایه‌های تمام‌متصل Dense است که بعد از لایه‌های کانولوشنی قرار می‌گیرند. این لایه‌ها تقریباً ۹۰ درصد پارامترهای یک شبکه کانولوشنی را شامل می‌شوند. لایه‌های تماماً متصل نتیجه شبکه را در قالب یک بردار با اندازه مشخص ارائه می‌کنند. از این بردار برای دسته‌بندی تصاویر استفاده می‌شود و یا این‌که از آن، جهت ادامه پردازش‌های بعدی بهره برد. در بسیاری از شبکه‌های عصبی توصیه می‌شود که از توابعی مانند sigmoid استفاده شود. زیرا خاصیت غیر خطی بودن آن‌ها، در ترکیب با یکدیگر قادر به شناسایی الگوهایی به مراتب پیچیده‌تر منجر می‌شود. این تابع هر مقدار را به یک مقدار از ۰ تا ۱ نگاشت می‌کند و کمک می‌کند تا مجموع وزنی ورودی‌ها نرمال‌سازی شوند (Elfwing, Uchibe, & Doya, 2018). بعد از آن، مشتق تابع sigmoid برای کمک به محاسبه تنظیمات اساسی وزن‌ها گرفته می‌شود. خروجی تابع

- 1- Binary Cross-Entropy
- 2- Categorical Cross-Entropy
- 3- Accuracy
- 4- Precision
- 5- Sensitivity
- 6- False Positive
- 7- False Negative
- 8- True Positive
- 9- True Negative



شکل ۱۳- تصویری از محیط برنامه از خروجی تشخیص آفت
Fig.13. Image of the program environment from the pest detection output

شرایط نوری نامناسب و وجود نویز با استفاده از تولید داده‌های مصنوعی وابستگی مدل آموزش دیده به کیفیت تصاویر ارسالی کاهش یافت. مدل طراحی شده با ۴۰۰ اپک زمانی به دقت ۸۸ درصد و صحت ۹۲ درصد رسیده است. همین‌طور، برای بررسی دقیق‌تر مدل پیشنهادی از معیار آماری یادآوری و معیار F استفاده شد. طبق محاسبات انجام شده مدل آموزش دیده توانست معیار یادآوری ۹۱ درصد را نشان دهد. این معیار نشان می‌دهد که مدل توانسته تا حد خیلی زیادی هر آنچه که انتظار شناسایی توسط مدل بوده را به‌خوبی شناسایی کند. همچنین، معیار F با درصد قابل قبول ۸۸ درصد دقت مدل آموزش‌دیده را تایید کرد. در جدول ۲ تمام معیارهای محاسبه‌شده برای این مدل آورده شد.

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}$$

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP}$$

$$Sensitivity = \frac{TP}{TP + FN}$$

$$F1 = 2 \times \frac{Sensitivity \times Precision}{Sensitivity + Precision}$$

(۸)

نتایج و بحث

در این تحقیق با استفاده از یادگیری عمیق نوع آفت کرم ساقه‌خوار از سایر آفت‌ها تشخیص داده شد. به دلیل ارسال تصاویر با

جدول ۲- تمام معیارهای آماری به‌دست‌آمده از مدل

Table 2- All statistical criteria obtained from the model

Accuracy	Precision	Recall	F1
88%	92%	91%	88%

چندلایه (MLP^2) عملکرد بهتری را در شناسایی آفت نشان می‌دهد. چن و همکاران (Chen, Liu, & Gao, 2021) پتانسیل شبکه‌های عصبی کانولوشن را در شناسایی آفت چای را ارزیابی کردند. آن‌ها با توجه به این‌که که تصاویر آفات چای در شبکه به اندازه کافی برای

کارایی شبکه‌های یادگیری عمیق و داده‌افزایی

استفاده از شبکه‌های یادگیری عمیق به جای شبکه‌های یادگیری ماشین سنتی مانند ماشین بردار پشتیبان (SVM^1) و پرسپترون

2- Multilayer perceptron

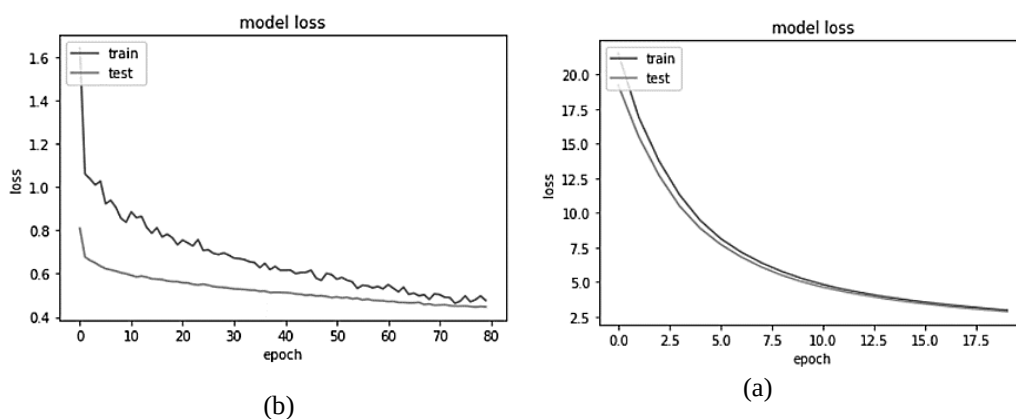
1- Support Vector Machine

این تحقیق، مدل‌های شبکه عصبی کانولوشنی برای تشخیص و شناسایی سه نوع آفت مرکبات متداول در شمال ایران نظیر پروانه مینوز، فوماژین (قارچ دوده مرکبات) و بالشتک با استفاده از تصاویر برگ‌های آلوده از طریق روش‌های یادگیری عمیق توسعه داده شده است. آن‌ها از روش داده‌افزایی برای افزایش تعداد نمونه‌های آموزشی و بهبود تعمیم‌پذیری طبقه‌بندی‌ها استفاده کردند که بر اساس آزمایش‌های انجام شده و استفاده از داده‌افزایی، دقت تشخیص مدل ResNet به ۹۶٪ درصد رسید. در این تحقیق، شبکه با داده‌های واقعی بدون تکنیک افزایش داده و همراه با داده‌های مصنوعی ساخته شده آموزش داده شد که استفاده از تکنیک داده‌افزایی ۰/۲۸ درصد دقت شبکه را افزایش داد (Khan Ramaki et al., 2020).

در این تحقیق، به علت استفاده از شبکه عصبی عمیق کانولوشنی شخصی‌سازی شده برای کرم ساقه‌خوار و همین‌طور برای جلوگیری از بیش‌برازش شبکه و به منظور کاهش اشتباه (تابع هزینه) در وزن‌دهی به پارامترها از L2 استفاده شد و بعد از افزودن این تکنیک‌ها مطابق شکل ۱۴ مشاهده شد که شبکه در تکرارهای بالاتر با مقدار ضرر کمتری در انتخاب وزن‌ها و انحراف مواجه خواهد شد.

آموزش شبکه عصبی کانولوشنال عمیق وجود ندارد، پیشنهاد دادند که شبکه VGGNET-1 را با تنظیم دقیق پارامترها برای آفت چای توسعه دهند. سپس این روش را با طبقه‌بندی‌های سنتی مقایسه نموده‌اند. شبکه عصبی کانولوشنال پیشنهادی دارای دقت طبقه‌بندی تا ۹۷/۷۵ درصد است در حالی که MLP و SVM به ترتیب دارای دقت ۷۶/۰۷ درصد و ۶۸/۸۱ درصد هستند (Chen, Liu, & Gao, 2021). گاتیرز و همکاران (Gutierrez et al., 2019) بهترین رویکرد برای شناسایی آفت عسلک پنبه (*Bemisia tabaci*) و سفید بالک گلخانه‌ای (*Trialeurodes vaporariorum*) را مورد بررسی قرار دادند. الگوریتم یادگیری عمیق با دقت ۸۵/۵٪ نسبت به روش نزدیک‌ترین همسایه (KNN) با دقت ۶۳/۸٪ و پرسپترون چندلایه (MLP) با دقت ۶۴/۹٪ عملکرد بهتری را نشان داده است و این بدین معنی است که یادگیری عمیق راه‌حل بهتری نسبت به تکنیک یادگیری ماشین است (Gutierrez et al., 2019).

روش یادگیری عمیق نیازمند داده‌های زیادی است تا مانع بیش‌برازش در شبکه گردد. مرتضی خان رمکی و همکاران در سال ۱۳۹۹ به تشخیص آفات متداول مرکبات در شمال ایران پرداختند در



شکل ۱۴- (a) تابع هزینه بدون استفاده از نظم‌دهی، (b) تابع هزینه با استفاده از نظم‌دهی

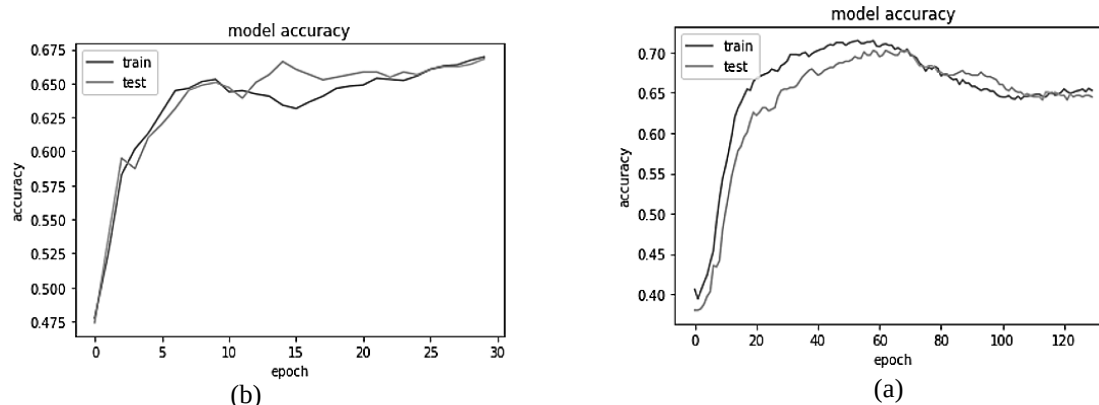
Fig.14. (a) Cost function without the use of regulation, (b) Cost function using regulation

و اضافه نمودن تکنیک‌های نرمال‌سازی L2 و تکنیک رهاسازی سعی گردید تا از وقوع بیش‌برازش جلوگیری شده و سپس، با افزایش اپک‌های زمانی دقت شبکه افزایش یابد.

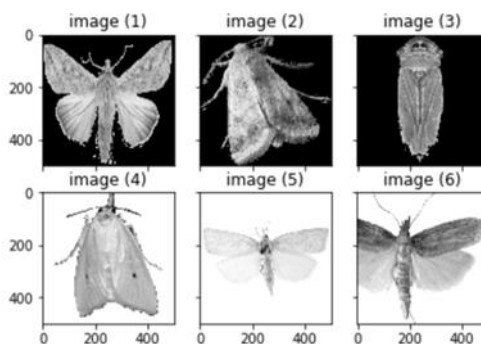
نتایج حاصل از سامانه پیشنهادی

در شکل ۱۶ تعدادی از تصاویر ارسال شده از طریق برنامه برای سامانه نشان داده شده و نتایج مربوطه نیز در جدول ۳ ارائه شده است.

به‌منظور دستیابی به دقت بالاتر افزایش اپک‌های زمانی ضروری است. اما برای جلوگیری از بیش‌برازش یک لایه با تکنیک رهاسازی به شبکه با مقدار احتمال ۰/۵ اضافه شد که این تغییرات به‌خوبی در شکل ۱۵ قابل‌مشاهده است. پس از اعمال این تکنیک بر روی شبکه دوباره برای رسیدن به دقت بالاتر اپک‌های زمانی افزایش داده شد. اما با افزایش بیشتر از ۳۵۰ اپک تغییر محسوسی در دقت شبکه به‌دست نیامده و آموزش شبکه با ۴۰۰ اپک به پایان رسید. در تحقیق مشابه (Khan Ramaki et al., 2020)، با تنظیم پارامترهای شبکه



شکل ۱۵- (a) تعداد اپک زمانی با ۳۰ اپک بدون تکنیک رهاسازی، (b) تعداد اپک زمانی با ۱۲۰ اپک بدون تکنیک رهاسازی
Fig.15. (a) Number of time 30 APCs (without dropout technique), (b) Number of time 120 APCs (with dropout technique)



شکل ۱۶- تصاویر انتخاب شده به عنوان تست مدل، تصاویر حشرات مختلف (a)، تصاویر کرم ساقه‌خوار برنج (b)
Fig.16. (a) Images selected as a test model of various insect images, (b) images of *Chilo suppressalis*

جدول ۳- پیش‌بینی‌های مدل تولیدشده

Table 3- Predictions of generated model

تصاویر Images	احتمال دیگر حشرات Another possibility of insects	احتمال حشره کرم ساقه‌خوار Probability of <i>chilo suppressalis</i> insect
تصویر ۱ Image 1	89%	11%
تصویر ۲ Image 2	78%	22%
تصویر ۳ Image 3	99%	1%
تصویر ۴ Image 4	15%	85%
تصویر ۵ Image 5	30%	70%
تصویر ۶ Image 6	19%	81%

تصاویر حشرات مشابه دچار اشتباه نشده است. طبق آخرین اطلاع نویسندگان، نرم‌افزار مشابه با سامانه پیشنهادی وجود نداشته و این

همان‌طور که در جدول ۳ نشان داده شده، شناسایی کرم ساقه‌خوار با دقت خوبی صورت گرفته و همچنین برنامه در برابر

نرم‌افزار تنها نرم‌افزار موجود در این حوزه است. به‌عنوان مثال نرم‌افزار Rice Doctor قابل نصب بر روی گوشی هوشمند بر اطلاعات توصیفی دریافتی از کشاورز از مزرعه استوار بوده و قابلیت پردازش عکس را ندارد (Jearanaiwongkul, Anutariya, Racharak, & Andres, 2021). همان‌طور که از تحقیقات پیشین به‌دست آمده استفاده از تکنیک‌های یادگیری ماشین در ارتباط با شناسایی خودکار آفات امری رو به گسترش است اما این تحقیقات پیشین وابسته به سخت‌افزار خاصی مانند بردهای Raspberry Pi می‌باشد (Zhong, Gao, Lei, & Zhou, 2018) که این موضوع باعث محدودیت در استفاده عموم کشاورزان خواهد شد. از طرف دیگر اکثر تحقیقات انجام‌شده بر اساس اخذ تصویر توسط کارشناس مربوطه بوده و شبکه مورد نظر بر اساس این تصاویر آموزش دیده است. در این تحقیق تصاویر توسط خود کشاورز و با استفاده از واسط کاربری برنامه کشاورز هوشمند برای سامانه ارسال می‌شود. از مزیت ویژه این روش عدم وابستگی به نوع سخت‌افزار مورد استفاده است. از این‌رو، شبکه عصبی عمیق پیشنهادی در این تحقیق بر اساس داده‌های ارسالی از کشاورز بهینه شده است تا بیشترین همخوانی را با تصاویر تلفن همراه داشته باشد.

نتیجه‌گیری

استفاده از داده‌های رایگان ارسال شده توسط کشاورزان همواره از جذابیت زیادی برای محققین برخوردار بوده است. در این تحقیق

سامانه هوشمند شناسایی نوع آفت (کرم ساقه‌خوار) طراحی و توسعه داده شده است. با استفاده از روش هوش مصنوعی و یادگیری عمیق نوع آفت از تصویر ارسالی توسط کشاورز به‌صورت خودکار شناسایی می‌گردد. نوع آفت تشخیص داده‌شده از طریق سامانه به کشاورز اطلاع داده می‌شود تا به کنترل آفت بپردازد. با استفاده از این سامانه درصد تشخیص اشتباه نوع آفت توسط کشاورز کاهش می‌یابد. کشاورز با استفاده از سامانه توسعه‌یافته و فقط با آموزش حداقلی نرم‌افزار در کمترین زمان ممکن از نوع آفت مزرعه خود مطلع می‌شود. سرعت و دقت سامانه موجب کاهش اثر مخرب آفت بر مزرعه می‌گردد. با توجه به امکان دریافت موقعیت مکانی از تصاویر ارسالی کشاورز به سامانه، تهیه نقشه گسترش آفت به‌صورت منطقه‌ای میسر است. در نتیجه، پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده تاثیر مکانی این آفت بر مزارع اطراف بررسی شود. همچنین، برای افزایش دقت و بررسی دقیق‌تر مدل آموزش‌دیده می‌توان گونه‌های دیگری از حشرات مضر یا مفید در کشاورزی را در این دسته‌بندی لحاظ کرد تا این مدل بهتر بتواند تصمیم‌گیری واقعی‌تری را اتخاذ کند.

سپاسگزاری

این تحقیق در قالب طرح مزیت استانی با عنوان افزایش بازده و بهبود کیفی مزارع برنج در استان مازندران و با استفاده از اعتبارات ویژه پژوهشی دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل با شماره طرح ۱۰۹۱/م/پ انجام شده است.

References

1. Ba, J., & Frey, B. (2013). Adaptive dropout for training deep neural networks. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 26, 3084-3092.
2. Baldi, P., & Sadowski, P. (2014). The dropout learning algorithm. *Artificial Intelligence*, 210, 78-122. <https://doi.org/10.1016/j.artint.2014.02.004>
3. Chen, J., Liu, Q., & Gao, L. (2021). Deep Convolutional Neural Networks for Tea Tree Pest Recognition and Diagnosis. *Symmetry*, 13(11), 2140. <https://doi.org/10.3390/sym13112140>
4. Chung, C. L., Huang, K. J., Chen, S. Y., Lai, M. H., Chen, Y. C., & Kuo, Y. F. (2016). Detecting Bakanae disease in rice seedlings by machine vision. *Computers and Electronics in Agriculture*, 121, 404-411. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.01.008>
5. Dale, D. (1994). Insect pests of the rice plant—their biology and ecology. *Biology and Management of Rice Insects*, 438, 442.
6. Deshpande, T., Sengupta, S., & Raghuvanshi, K. (2014). Grading & identification of disease in pomegranate leaf and fruit. *International Journal of Computer Science and Information Technologies*, 5, 4638-4645.
7. Ebrahimi, M., Khoshtaghaza, M. H., Minaei, S., & Jamshidi, B. (2017). Vision-based pest detection based on SVM classification method. *Computers and Electronics in Agriculture*, 137, 52-58. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.03.016>
8. Elfwing, S., Uchibe, E., & Doya, K. (2018). Sigmoid-weighted linear units for neural network function approximation in reinforcement learning. *Neural Networks*, 107, 3-11. <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2017.12.012>
9. Gutierrez, A., Ansuategi, A., Susperregi, L., Tubío, C., Rankić, I., & Lenža, L. (2019). A Benchmarking of Learning Strategies for Pest Detection and Identification on Tomato Plants for Autonomous Scouting Robots Using Internal Databases. *Journal of Sensors*, 5219471. <https://doi.org/10.1155/2019/5219471>
10. Hornberg, A. (2017). *Handbook of Machine and Computer Vision: The Guide for Developers and Users*. Wiley-

- VCH. Germany.
11. Jearanaiwongkul, W., Anutariya, C., Racharak, T., & Andres, F. (2021). An Ontology-Based Expert System for Rice Disease Identification and Control Recommendation. *Applied Sciences*, 11(21), 10450. <https://doi.org/10.3390/app112110450>
12. Jha, K., Doshi, A., Patel, P., & Shah, M. (2019). A comprehensive review on automation in agriculture using artificial intelligence. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 2, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.aiia.2019.05.004>
13. Karabatak, M., & Ince, M. C. (2009). An expert system for detection of breast cancer based on association rules and neural network. *Expert Systems with Applications*, 36, 3465-3469. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2008.02.064>
14. Khanramaki, M., Askari Asli-Ardeh, E., Kozegar, E., & Loni, R. (2021). Detection of common citrus pests in northern Iran using an artificial neural network. *Journal of Food Science and Technology (Iran)*, 17(109), 143-152. <https://fsct.modares.ac.ir/article-7-43117-en.html>
15. Kusriani, K., Suputa, S., Setyanto, A., Agastya, I. M. A., Priantoro, H., Chandramouli, K., & Izquierdo, E. (2020). Dataset for pest classification in Mango farms from Indonesia. *Mendeley Data*, V1. <https://doi.org/10.17632/94jf97jzc8.1>
16. Lu, C. Y., Rustia, D. J. A., & Lin, T. T. (2019). Generative adversarial network based image augmentation for insect pest classification enhancement. *IFAC-PapersOnLine*, 52, 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.12.406>
17. Miranda, J. L., Gerardo, B. D., & Tanguilig, B. T. (2014). Pest detection and extraction using image processing techniques. *International Journal of Computer and Communication Engineering*, 3, 189. <https://doi.org/10.7763/IJCCE.2014.V3.317>
18. Mitchell, T. M., Carbonell, J. G., & Michalski, R. S. (1986). Machine learning: a guide to current research.
19. Najaf-Zadeh, A., & Ghaffari, H. R. (2020). A Two-Dimensional Convolutional Neural Network for Brain Tumor Detection from MRI. Original. *Quarterly of Horizon of Medical Sciences*, 26(4), 398-413. <https://doi.org/10.32598/hms.26.4.3303.1>
20. Ngugi, L. C., Abdelwahab, M., & Abo-Zahhad, M. (2020). Tomato leaf segmentation algorithms for mobile phone applications using deep learning. *Computers and Electronics in Agriculture*, 178, 105788. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105788>
21. Opara, L. (2004). *Emerging technological innovation triad for smart agriculture in the 21st century*. Part I. Prospects and impacts of nanotechnology in agriculture.
22. Pantazi, X. E., Tamouridou, A. A., Alexandridis, T., Lagopodi, A. L., Kontouris, G., & Moshou, D. (2017). Detection of Silybum marianum infection with Microbotryum silybum using VNIR field spectroscopy. *Computers and Electronics in Agriculture*, 137, 130-137. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.03.017>
23. Pathak, M. (1968). Ecology of common insect pests of rice. *Annual Review of Entomology*, 13, 257-294.
24. Pew Research Center. Feb. 05, 2019. Smartphone Ownership Is Growing Rapidly Around the World, but Not Always Equally. www.pewresearch.org/global/2019/02/05/smartphone-ownership-is-growing-rapidly-around-the-world-but-not-always-equally
25. Pohl, C., Kanniah, K. D., & Loong, C. K. (2016). *Monitoring oil palm plantations in Malaysia*. Pages 2556-2559. 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS): IEEE.
26. Praveen, B., & Sharma, P. (2020). A review: The role of geospatial technology in precision agriculture. *Journal of Public Affairs*, 20, e1968. <https://doi.org/10.1002/pa.1968>
27. Silveira, M., & Monteiro, A. (2009). Automatic recognition and measurement of butterfly eyespot patterns. *Biosystems*, 95, 130-136. <https://doi.org/10.1016/j.biosystems.2008.09.004>
28. Soomro, T. R. (2015). GIS enabling smart agriculture. *Smart agriculture: An approach towards better agriculture management*: 1-6.
29. Soomro, T. R., Naqvi, M. R., & Zheng, K. (2001). GIS: A Weapon to Combat the Crime. Pages 228-230. *Proceedings of the World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics: Information Systems Development-Volume I-Volume I*.
30. Tajbakhsh, N., Shin, J. Y., Gurudu, S. R., Hurst, R. T., Kendall, C. B., Gotway, M. B., & Liang, J. (2016). Convolutional neural networks for medical image analysis: Full training or fine tuning? *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 35, 1299-1312. <https://doi.org/10.1109/TMI.2016.2535302>
31. Wen, C., Wu, D., Hu, H., & Pan, W. (2015). Pose estimation-dependent identification method for field moth images using deep learning architecture. *Biosystems Engineering*, 136, 117-128. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.06.002>
32. Yan, Y., Feng, C. C., & Chang, K. T. T. (2017). Towards enhancing integrated pest management based on volunteered geographic information. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6, 224. <https://doi.org/10.3390/ijgi6070224>
33. Zhong, Y., Gao, J., Lei, Q., & Zhou, Y. (2018). A Vision-Based Counting and Recognition System for Flying Insects in Intelligent Agriculture. *Sensors*, 18(5), 1489. <https://doi.org/10.3390/s18051489>
34. Zhu, Z., Zhang, R., & Sun, J. (2009). Research on GIS-based agriculture expert system. Pages 252-255. 2009 WRI World Congress on Software Engineering: IEEE.



Evaluation of the Effects of Artificial Light on Some Plant Characteristics in the Design and Construction of a Small-scale Plant Factory

P. Shamsi Roodbarsar¹, S. R. Mousavi Seyedi^{2*}, D. Kalantari², K. Ghasemi³

1- MSc. Graduated, Mechanics of Biosystem Department, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

2- Associate Professor, Mechanics of Biosystem Department, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

3- Assistant Professor, Horticultural Sciences Department, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

(*- Corresponding Author Email: mousavi22@sanru.ac.ir)

<https://doi.org/10.22067/jam.2022.73522.1070>

Received: 12 November 2021

Revised: 11 February 2022

Accepted: 19 February 2022

Available Online: 19 February 2022

How to cite this article:

Shamsi Roodbarsar, P., Mousavi Seyedi, S. R., Kalantari, D., & Ghasemi, K. (2023). Evaluation of the Effects of Artificial Light on Some Plant Characteristics in the Design and Construction of a Small-scale Plant Factory. *Journal of Agricultural Machinery*, 13(2), 213-226. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jam.2022.73522.1070>

Introduction

It is predicted that the world population will grow to 9.3 billion by 2050 and the urban population will increase by 73%, growing from 3.6 billion to 6.3 billion. This huge population requires abundant food production. A plant factory with artificial light (PFAL) is a closed growing system that is insulated against heat and air. The plants grow on shelves under horizontal artificial lighting. The main goal of PFAL is commercial plant production, but mini PFALs do not have commercial goals and are used to produce plants in small domestic sizes. Plants that are less than 30 cm tall, and grow well in relatively low light conditions and at high planting densities, are suitable for the plant factory. Therefore, plants such as rice, wheat, and potatoes are not suitable for cultivation in a plant factory.

The main purpose of this research is to study the proper light quality for growing radish plants. All light treatments had a significant effect on biomass, sugar, and photosynthetic pigments of radish. The results showed that the highest amount of chlorophyll a was 0.964 mg g⁻¹ fresh leaf weight and the lowest amount was 0.318 mg g⁻¹ fresh leaf weight. For chlorophyll b, the highest value was 0.666 mg g⁻¹ wet weight and the lowest value was 0.229 mg g⁻¹ wet weight. The highest and lowest carotenoid contents were 74.75 mg g⁻¹ and 30.6 mg g⁻¹ wet weight, respectively. The highest sugar content was 0.717 µg g⁻¹ dry weight and the lowest was 0.02 µg g⁻¹ dry weight. The highest fresh and dry weights of the plant were 0.27 g and 0.014 g, respectively, while the lowest values recorded were 0.155 g and 0.007 g, respectively. In this study, plant length was also examined, but no significant difference was observed between different light treatments. Based on these findings, it can be concluded that the light composition (R2, G0, B1) was the most suitable light regime for use in the designed system.

Materials and Methods

The plant studied in this investigation was radish. The place of growth was a vertically built system consisting of four floors, each divided into two sections. A controller was required in each section to regulate parameters such as light time, temperature, and moisture. The controllers were designed using Fritzting software and built with parts and sensors like DHT 11, Arduino UNO based on ATMEGA328P, Relay module Arduino, data logging shield, and driver module RC. A programming platform like Arduino was used to write codes for controlling the remaining parameters. This study tested seven different light treatments, plus sunlight as a control, to investigate their effects on radish growth. The light treatments were developed by adjusting the number of three different lights: red, green, and blue. LEDs were installed after designing and constructing the m-PFAL system. Based on previous research conducted in this field, all LED lights were positioned above the shelves to ensure that the plants received an appropriate amount of light in a vertical orientation. Additionally, light reflectors were installed beside the plants to provide proper lighting for the lower leaves. The experimental design involved a completely randomized design with eight treatments and three replications, and all data

analysis was conducted through SAS software. The average comparison was performed using the Duncan method at a probability of 1% and 5%.

Results and Discussion

The results indicate that the light regime (R2, G0, B1) resulted in the highest amount of chlorophyll "a", which was significantly different from both the control and other treatments. The treatment with the lowest amount of chlorophyll "a" was (R1, G0, B0), which did not differ significantly from the control or (R1, G1, B1). The treatment with the highest amount of chlorophyll "b" was (R2, G0, B1), which differed significantly from the control but not from (R2, G1, B0) or (R1, G0, B2). Using a mixed light treatment of blue and red resulted in higher amounts of photosynthesis pigments, especially when the red light was more prevalent. The treatment with the highest wet weight was (R2, G0, B1), which did not differ significantly from natural light. The treatment with the lowest wet weight was the just red light treatment, which was much lower than the other treatments. The dry weight of the radish was 4-6 percent of its wet weight, and the treatment with the highest dry weight was (R2, G0, B1), which did not differ significantly from (R0, G1, B2) or (R1, G0, B0). The treatment with the highest amount of sugar was (R2, G0, B1), which was significantly higher than other optical regimes used and natural light. Because the production of carbohydrates and sugar is directly related to photosynthesis, it can be concluded that the state of photosynthesis was most proper in the (R2, G0, B1) treatment.

Conclusion

This study investigated the optimal light quality for the healthy and rapid growth of radish plants in a plant factory. LED lights can be an excellent alternative to natural light when there are limitations, such as in greenhouses or multi-floor plantings. The results show that the best light mixture was red and blue lights, with more red light than blue light, while the worst light regime was just red color, which had a negative effect on all parameters.

Keywords: Artificial light, Chlorophyll, Light regime, Plant factory, Urban agriculture

مقاله پژوهشی

جلد ۱۳، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۲، ص ۲۱۳-۲۲۶

ارزیابی اثرات نور مصنوعی بر برخی شاخص‌های گیاه در طراحی و ساخت یک کارخانه گیاهی
مقیاس کوچک

یوریا شمسی رودبار سرا^۱، سیدرضا موسوی سیدی^{۲*} ID، داوود کلانتری^۲، کامران قاسمی^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۳۰

چکیدہ

تولید مواد غذایی در محیط شهری راهکار مناسبی برای به کارگیری فضاهای بلااستفاده می‌باشد. هدف اصلی این پژوهش طراحی و ساخت یک کارخانه گیاهی مجهز به نور مصنوعی جهت استفاده در مناطق شهری می‌باشد. از آن‌جا که تامین نور مناسب از مهم‌ترین ویژگی‌های تاثیرگذار بر کارایی یک کارخانه گیاهی محسوب می‌شود، تعداد ۸ تیمار نوری ($R=2, G=0, B=1$)، ($R=2, G=1, B=0$)، ($R=1, G=0, B=2$)، ($R=1, G=1, B=1$)، ($R=0, G=0, B=1$)، ($R=0, G=1, B=0$)، ($R=0, G=0, B=2$)، ($R=0, G=1, B=1$)، ($R=1, G=0, B=0$) و نور خورشید به‌عنوان شاهد و در سه تکرار مورد آزمایش قرار گرفت. گیاه مورد استفاده تربچه به نام علمی *Raphanus sativus* بود که پس از ۵ هفته برداشت شد و پارامترهای مختلفی از قبیل کلروفیل، وزن تر و خشک، قند و طول گیاه اندازه‌گیری گردید. بیشترین میزان کلروفیل a 0.964 و کمترین مقدار آن 0.318 میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ ثبت شد که به‌ترتیب برای تیمارهای ($R2, G0, B1$) و ($R1, G0, B0$) به‌دست آمد. بیشترین و کمترین مقدار کلروفیل b نیز به‌ترتیب مربوط به تیمار ($R2, G0, B1$) با مقدار 0.666 و تیمار ($R1, G0, B0$) با مقدار 0.229 میلی‌گرم بر گرم وزن تر بود. بیشترین و کمترین مقدار کارتنوئید نیز به‌ترتیب مربوط به تیمار ($R2, G1, B0$) با مقدار $74/75$ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ و تیمار ($R1, G0, B0$) با مقدار $30/6$ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ بود. بیشترین میزان قند 0.717 و کمترین مقدار آن 0.102 میکروگرم بر گرم وزن خشک برگ ثبت شد که به‌ترتیب برای تیمارهای ($R2, G0, B1$) و ($R1, G0, B0$) به‌دست آمد. همچنین بالاترین وزن تر و خشک گیاه مربوط به تیمار ($R2, G0, B1$) با مقادیر 0.27 گرم و 0.14 گرم و کمترین آن مربوط به تیمار ($R1, G0, B0$) بود که به‌ترتیب 0.185 و 0.007 گرم ثبت شدند. اما تیمارها بر طول گیاه تاثیر نداشتند و اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. نتایج نشان داد که ترکیب نوری ($R2, G0, B1$) مناسب‌ترین تیمار در سامانه طراحی شده بود.

واژه‌های کلیدی: رژیم نوری، کارخانه گیاهی، کشاورزی شهری، کلروفیل، نور مصنوعی

مقدمه

سوی دیگر، با توجه به محدود بودن منابع طبیعی مانند آب و زمین و همچنین تغییرات اقلیمی، تولید محصولات کشاورزی با چالش‌های مختلفی روبه‌رو است. افزایش جمعیت و تغییرات اقلیمی با هم مرتبط بوده و ضروری است که بر اساس روش‌های مناسب و به‌صورت هم‌زمان چالش‌های ناشی از آن‌ها مدیریت شود (Kozai, 2012). با افزایش جمعیت شهری، مقادیر زیادی از منابع مانند غذا، آب، سوخت‌های فسیلی و غیره نیز به مناطق شهری آورده می‌شود که این امر موجب تولید مقادیر زیادی از زباله و آلوده شدن محیط‌زیست می‌گردد. به‌عنوان مثال انتقال محصولات کشاورزی و مواد غذایی به‌وسیله کامیون‌های معمولی به مناطق شهری، موجب انتشار دی‌اکسید کربن ناشی از حمل و نقل شده که شدت انتشار آن بین مقدار ۰/۸ تا ۱/۹ کیلوگرم دی‌اکسید کربن به ازای هر تن در کیلومتر برآورد شده است (Ohyama, Takagaki, & Kurasaka, 2008).

پیش‌بینی شده است که جمعیت جهان در سال ۲۰۵۰ به ۹/۳ میلیارد نفر افزایش خواهد یافت و جمعیت شهری نیز از ۴۸ درصد فعلی به ۷۳ درصد خواهد رسید. این افزایش جمعیت، نیاز به محصولات غذایی را به صورت قابل ملاحظه‌ای افزایش خواهد داد. از

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

۲- دانشیار، گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

۳- استادیار، گروه علوم و مهندسی باغبانی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

(Email: mousavi22@sanru.ac.ir)

(*) - نویسندہ مسئول:

<https://doi.org/10.22067/jam.2022.73522.1070>

هنگامی که گیاهان در مزارع آزاد کشت می‌شوند، کیفیت و عملکرد مواد غذایی تحت تاثیر شرایط آب و هوایی منطقه می‌باشد. بنابراین کیفیت آن‌ها همیشه در معرض خطر است. با توجه به این که شدت نور خورشید در طول روز و همچنین فصول مختلف متفاوت است، تولید گیاه در گلخانه نیز از لحاظ مصرف انرژی کارآمد نمی‌باشد زیرا شدت نور آن به‌طور دقیق قابل تنظیم شدن نیست. اما کارخانه گیاهی یک سیستم تولید پیشرفته است که در آن محیط رشد به‌صورت بهینه کنترل می‌شود (Kozai, Niu, & Takagaki, 2019).

کارخانه گیاهی با نور مصنوعی (PFAL^۱)، به یک کارخانه تولید گیاه با ساختاری انبارگونه گفته می‌شود که نسبت به حرارت، عایق بوده و تقریباً غیرقابل نفوذ به‌وسیله هوا می‌باشد و درون آن قفسه‌های متعدد کشت با لامپ‌های الکتریکی به‌صورت عمودی روی هم قرار گرفته‌اند و به منظور تولید تجاری گیاهان مورد استفاده قرار می‌گیرد (Kozai, 2013). اما مینی PFAL^۲ها دارای اهداف تجاری نبوده و بیشتر در زمینه کشاورزی خانگی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Takagaki, Hara, & Kozai, 2014). در کارخانه گیاهی این امکان وجود دارد که محیط رشد گیاه به‌صورت دلخواه و دقیق کنترل شود. علاوه بر موارد ذکر شده، این امکان وجود دارد که آب حاصل از تعرق گیاه جمع‌آوری و برای آبیاری خود گیاه مورد استفاده قرار گیرد (Kozai et al., 2019) با توجه به این که کارخانه گیاهی در برابر حرارت عایق بوده و همچنین هوا تقریباً غیرقابل نفوذ است بنابراین محیط کشت در کارخانه گیاهی تحت تاثیر آب و هوا و به‌ویژه نوسانات تابشی خورشید قرار نمی‌گیرد. به همین دلیل می‌توان محیط کشت کارخانه گیاهی را به‌طور دقیق و دلخواه کنترل کرد اما گلخانه‌ها و به‌ویژه مزارع باز تحت تاثیر موارد ذکر شده قرار می‌گیرند (Li et al., 2012). گیاهانی مانند برنج، گندم و سیب‌زمینی که معمولاً به‌عنوان منبع کالری مورد استفاده انسان و دام قرار می‌گیرند و گیاهانی که نیاز به مناطق وسیعی جهت پرورش دارند، مناسب تولید در کارخانه گیاهی نیستند. کارخانه گیاهی در ژاپن و کشورهای آسیایی جهت تولید سبزیجات، گیاهان دارویی و نشا مورد استفاده قرار گرفته است (Kozai, 2013). با توجه به این که یکی از مشکلات هر جامعه‌ای موضوع اشتغال‌زایی است، کارخانه گیاهی تا حدودی برای حل این مشکل مناسب است. بدین صورت که با ارائه آموزش‌هایی ساده به افراد جامعه، کارخانه گیاهی می‌تواند موجب ایجاد فرصت‌های شغلی برای سالمندان و معلولین با محیط کاری امن و دلپذیر شود و سبب تولید گیاهانی تازه و با کیفیت بالا گردد (Kozai et al., 2019).

در تحقیقی (Ikeda et al., 1991) به تولید کاهو با استفاده از

لامپ‌های فلورسنت و تحت یک برنامه کشت سالانه پرداختند. در این آزمایش از ۱۶ ساعت روشنایی استفاده کردند به‌طوری که شدت نور در زمان روشنایی در محدوده $560-330 \mu E \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ، دما $25/5 \pm 0$ درجه سانتی‌گراد و در دوره خاموشی نیز $20/2 \pm 0$ درجه سانتی‌گراد تنظیم شد. همچنین رطوبت برابر با 57 ± 5 درصد، غلظت کربن دی‌اکسید 500 ± 50 ppm، سرعت جریان هوا $0/5$ متر بر ثانیه، هدایت الکتریکی $1/3$ ms و pH محلول غذایی برابر با $5/5$ تنظیم شد. نتایج نشان داد که در شرایط فوق رشد کاهو افزایش یافت به‌طوری که وزن تازه گیاه در طی ۲۹ روز به ۷۵ گرم رسید. همچنین مصرف الکتریسته برای روشنایی در طول دوره جوانه‌زنی گیاه و مصرف الکتریسته کل به‌ترتیب برابر با $1/1$ و $2/5$ کیلووات‌ساعت گزارش شد که حدود ۵۰ و ۲۰ درصد کمتر از تجهیزات متعارف با استفاده از لامپ‌های سدیم فشار بالا بود. در پژوهشی (Kozai, 2007) در یک کارخانه گیاهی از روش نوردهی رو به بالا با استفاده از LEDهایی که روی پانل‌های کشت قرار گرفت تا انرژی نورانی بیشتری برای برگ‌های پایینی ایجاد شود، استفاده کردند. در کارخانه گیاهی، نور رو به بالا که توسط برگ‌های پایینی جذب نمی‌شود، توسط برگ‌های بالا جذب می‌شود و یا توسط بازتابنده نوری که در بالای تاج پوششی گیاه قرار می‌گیرد، به سمت جامعه گیاهی بازتاب می‌شود که از نوردهی بین محصولات مفیدتر می‌باشد در تحقیقی (Shimizu, Saito, Nakashima, Miyasaka, & Ohdoi, 2011) به توسعه یک دستگاه جدید بهینه شده با LED برای تولید سبزیجات در یک کارخانه گیاهی پرداختند که در آن هدف اصلی بررسی کیفیت نور موثر برای رشد سالم و سریع تر گیاهان بود. تاثیر کیفیت نور توسط ترکیبی از LEDها (آبی، سبز و قرمز) بر میزان فتوسنتز و رشد کاهو بررسی شد. نتایج نشان داد که میزان فتوسنتز کاهو در نور مخلوط با LEDهای قرمز و آبی بیشتر است. طول ساقه در نور قرمز و آبی افزایش و در نور ترکیبی کاهش یافت. همچنین وزن تر کاهو در نور قرمز و فلورسنت افزایش یافت. در پژوهشی (Graamans, Baeza, Dobbelsteen, Tsafaras, & Stanghellini, 2018) با استفاده از منابع موجود در مورد تولید کاهو، عملکرد یک کارخانه گیاهی را با یک گلخانه سنتی برای سه منطقه جغرافیایی مختلف مقایسه کردند. با توجه به نتایج اعلام شده، از لحاظ بهره‌وری انرژی کارخانه گیاهی ($1411 MJkg^{-1}$) حتی از کارآمدترین گلخانه‌ها ($1699 MJkg^{-1}$) نیز بهتر عمل کرد. همچنین از لحاظ منابع مصرفی مانند آب و کربن دی‌اکسید نیز عملکرد بهتری از خود نشان داد. هدف از این پژوهش طراحی و ساخت یک کارخانه گیاهی و ارزیابی اثر رژیم‌های نوری مختلف بر برخی از ویژگی‌های محصول تولیدی در آن به‌منظور تولید مواد غذایی در محیط شهری بود. در این تحقیق از گیاه تربچه استفاده شد.

- 1- Plant factory with artificial lighting
- 2- Mini-PFAL

مواد و روش‌ها

طراحی و ساخت کارخانه گیاهی با استفاده از نرم‌افزار Solidworks برای طراحی محفظه رشد، نرم‌افزار Fritzing برای طراحی مدار الکترونیکی ارزیابی اثرات نور مصنوعی بر برخی شاخص‌های گیاه، کدنویسی در آردینو برای راه‌اندازی کنترلر، مازول رطوبت و دما، مازول درایور I2C، کنترلر و LEDها استفاده شد.

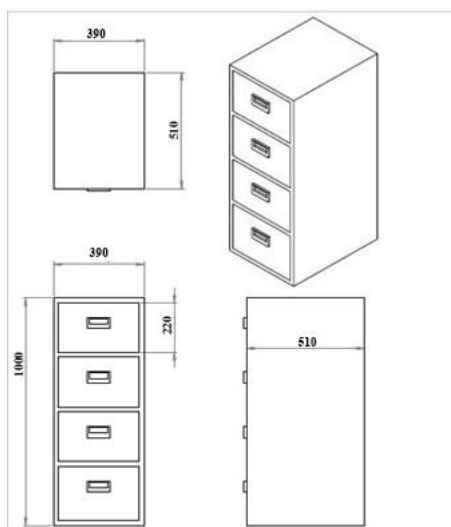
طراحی و ساخت محفظه رشد

محفظه رشد به‌صورت عمودی در ۴ طبقه ساخته شد و به‌منظور کاهش حجم محفظه، هر طبقه به دو بخش تقسیم گردید. برای طراحی فضای کشت از نرم‌افزار Solidworks استفاده شد. در شکل ۱، نمای سه‌بعدی و در شکل ۲، نمای دوبعدی محفظه رشد که در بخش Drawing طراحی گردید، نشان داده شده است. واحد اندازه‌گیری همه ابعاد محفظه بر حسب میلی‌متر می‌باشد که در شکل ۲ نشان داده شده است. برای ارزیابی محفظه رشد و اطمینان از کارکرد صحیح سایر قطعات، میزان دما و رطوبت کارخانه گیاهی خالی از گیاه هر ده دقیقه به مدت ۴۸ ساعت اندازه‌گیری و ذخیره شد.



شکل ۱- طرح سه‌بعدی محفظه رشد

Fig.1. Three-dimensional design of the growth chamber



شکل ۲- طرح دوبعدی محفظه رشد

Fig.2. Two-dimensional design of the growth chamber

شیلد دیتالاگر

به منظور ذخیره داده‌ها و همچنین تنظیم ساعت برای خاموشی و روشنایی از یک شیلد دیتالاگر آردینو استفاده شد. با استفاده از این شیلد می‌توان فایل‌ها را بر روی یک حافظه SD ذخیره کرد. دیتالاگر برای ذخیره داده‌هایی به کار می‌رود که بعد از قطع شدن برق، اطلاعات آن از بین نرود.

طراحی و ساخت کنترلر برای کارخانه گیاهی

برای کنترل برخی از پارامترها مانند دما، رطوبت و زمان روشن و خاموش شدن لامپ‌های مورد استفاده جهت تولید نور مصنوعی، نیاز به یک کنترلر می‌باشد. ابتدا با استفاده از نرم‌افزار Fritzing کنترلر مورد نظر طراحی شد (شکل ۳) و در ادامه از قطعات و سنسورهای DHT-11 برای اندازه‌گیری رطوبت و دما، برد آردینو UNO بر پایه ATMEGA328P، ماژول رله، شیلد دیتالاگر و ماژول درایور I2C استفاده شد. همچنین برای نوشتن کدها جهت کنترل پارامترهای مورد نیاز، از محیط برنامه‌نویسی نرم‌افزار آردینو استفاده شد. شکل ۴ کنترلر استفاده شده در این پژوهش را نشان داده است.

تیمارهای رنگی

برای بررسی تاثیر نورهای مختلف بر گیاه از ۷ تیمار رنگی و از نور خورشید به عنوان تیمار شاهد استفاده شد. این تیمارها از طریق تغییر در تعداد سه رنگ قرمز (۶۶۰-۶۱۰ نانومتر)، سبز (۵۵۰-۵۰۰ نانومتر) و آبی (۴۵۰-۴۰۰ نانومتر) به وجود آمدند (جدول ۱). طول همه‌ی LEDهای مورد استفاده ۱۰ سانتی‌متر و محدوده پوشش آن‌ها حدود ۳۰ سانتی‌متر بود (شکل ۵).

در این آزمایش دمای اندازه‌گیری روی ۲۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت روی ۶۰ درصد تنظیم شد. حداکثر اختلاف دما و رطوبت برای سنسورها در طی این مدت به ترتیب دو درجه سانتی‌گراد و چهار درصد به دست آمد.

ماژول اندازه‌گیری دما و رطوبت DHT-11

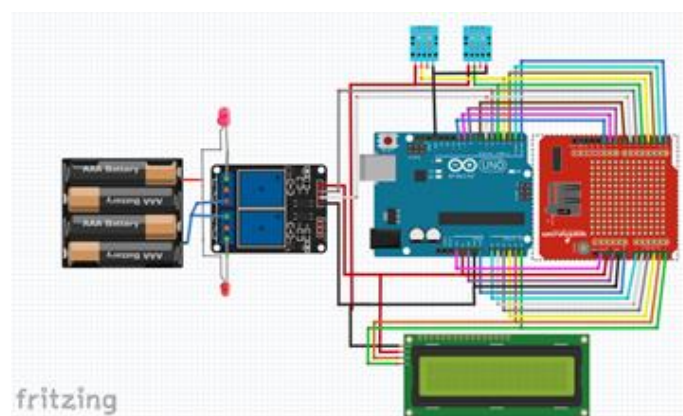
این سنسور برای اندازه‌گیری دما و رطوبت می‌باشد. دارای مصرف انرژی کم، انتقال سیگنال به مسافت بیش از ۲۰ متر و دارای اندازه‌ی کوچک است. دقت اندازه‌گیری دما ± 2 درصد و دقت اندازه‌گیری رطوبت ± 5 درصد است. ولتاژ ورودی و خروجی آن ۳ الی ۵ ولت می‌باشد. دمای بین ۲۰- الی ۶۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت بین ۵ الی ۹۵ درصد را می‌تواند اندازه‌گیری کند.

ماژول رله

این ماژول زمان روشنایی و خاموشی را کنترل می‌کند از رله ۵ ولت هشت کاناله استفاده شد. این ماژول به گونه‌ای است که پین‌های دیجیتال برد آردینو مستقیماً به ورودی کنترل رله وصل می‌شود.

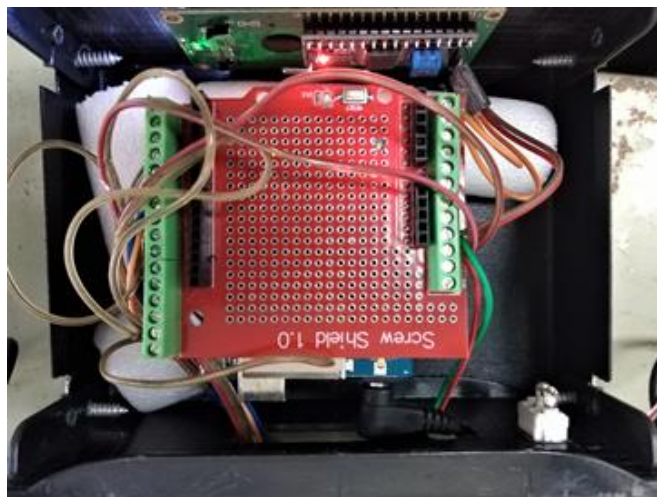
ماژول درایور I2C

در این طراحی از یک ماژول درایور LCD کاراکتری ۱۶*۲ با ارتباط I2C استفاده شد. به کمک این درایور راه‌اندازی LCD بسیار آسان می‌شود و از تعداد پین‌های دیجیتال آردینو کمتری استفاده می‌شود.



شکل ۳- مدار طراحی شده در نرم‌افزار Fritzing

Fig.3. Circuit designed in Fritzing software



شکل ۴- کنترلر مورد استفاده

Fig.4. The controller used



شکل ۵- LEDها برای تولید نور مصنوعی

Fig.5. LEDs to produce artificial light

اجرای آزمایش و تست با گیاه مدل

پس از طراحی و ساخت کارخانه گیاهی کوچک، LEDها نصب شدند. با توجه به پژوهش‌های انجام شده، همه‌ی LEDها در قسمت بالایی هر قفسه قرار گرفت و گیاه در معرض تابش نور مستقیم لامپ‌های مورد استفاده بود. مدت زمان روشنایی و خاموشی به ترتیب بر ۱۶ و ۸ ساعت تنظیم شد و شدت نور بر ۱۰۰ ± 3000 لوکس تنظیم شد که این مقدار توسط دستگاه لوکس‌متر اندازه‌گیری شد. همچنین برای رسیدن نور به برگ‌های زیرین گیاه، از بازتابنده‌ها (فویل آلومینیومی) در اطراف گیاه استفاده شد. شکل ۶ محل قرارگیری LEDها را نشان داده است. دما و رطوبت در طول انجام

آزمایش ثابت بود و برای تنظیم آن‌ها از سیستم خنک‌کننده آزمایشگاه استفاده شد. همچنین برای اندازه‌گیری دما و رطوبت از دو سنسور استفاده شد که در قفسه‌های اول و سوم و در بالای LEDها نصب شدند. شکل ۷ محل قرارگیری سنسور دما و رطوبت را نشان داده است. پس از نصب سنسورها و سایر قطعات مربوط به کارخانه گیاهی کوچک و تنظیم دمای مورد نظر برای رشد گیاه، بذر گیاه تریچه درون لیوان‌های یکبارمصرف کاشته شد و داخل دستگاه قرار گرفت. همچنین از کوکویت و پرلیت به عنوان بستر کشت استفاده شد. در ابتدا تنها آب مورد نیاز در اختیار گیاهان قرار گرفت و پس از دو هفته و رشد برگ‌های حقیقی، محلول غذایی رقیق شده نیز به منظور تغذیه

گیاهان استفاده شد. پس از گذشت پنج هفته اقدام به برداشت تربچه‌ها شد و در آون با دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت قرار گرفت. همچنین طول گیاه (طول اندام رویشی) در سه مرحله زمانی اندازه‌گیری شد. سپس پارامترهای مختلف مانند وزن تر و خشک، قند و همچنین رنگیزه‌های فتوسنتزی (کلروفیل a، کلروفیل b و کارتنوئید) اندازه‌گیری گردید.

جدول ۱- نسبت لامپ‌های LED به کار رفته در این آزمایش

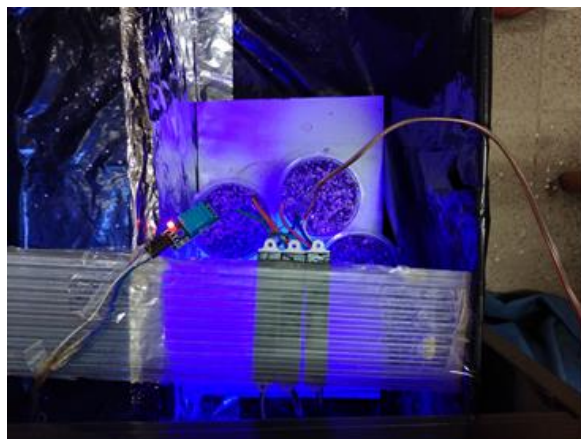
Table 1- The ratio of LED lamps used in this experiment

تیماها Treatments	قرمز Red	سبز Green	آبی Blue
تیما ۱ Treatment 1	2	0	1
تیما ۲ Treatment 2	2	1	0
تیما ۳ Treatment 3	1	0	2
تیما ۴ Treatment 4	0	1	2
تیما ۵ Treatment 5	1	1	1
تیما ۶ Treatment 6	0	0	1
تیما ۷ Treatment 7	1	0	0
تیما ۸ Treatment 8	شاهد (نور طبیعی محیط) Control (natural ambient light)		



شکل ۶- محل قرارگیری LEDهای تولیدکننده نور مصنوعی

Fig.6. Location of LEDs producing artificial light



شکل ۷- محل قرارگیری سنسور دما و رطوبت

Fig.7. Location of temperature and humidity sensor

اندازه‌گیری قند گیاه

پس از خشک کردن گیاه تریچه، نمونه‌ها با ۵ میلی‌لیتر اتانول ۸۰ درصد مخلوط شد و به مدت ۱۰ دقیقه درون حمام آب گرم در دمای ۷۰ درجه قرار گرفت. سپس محلول ساخته‌شده در دستگاه سانتریفیوژ با چرخش ۱۰۰۰ دور بر دقیقه و به مدت ۱۰ دقیقه قرار داده شد. این فرآیند چهار بار تکرار و در ادامه محلول آنترون ساخته شد و مقدار ۱۵۰ میلی‌گرم آنترون در ۱۰۰ میلی‌لیتر اسید سولفوریک رقیق حل شد. سپس جهت اندازه‌گیری قند محلول، مقدار ۱۰۰ میکرولیتر از عصاره گیاه تریچه در لوله آزمایش ریخته شد و ۳ میلی‌لیتر محلول آنترون به آن اضافه گردید. مخلوط به‌دست آمده به مدت ۲۰ دقیقه در درجه حرارت ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد در حمام آب جوش قرار گرفت. در نهایت جذب عصاره در طول موج ۶۲۰ نانومتر توسط اسپکتوفتومتر خوانده شد و با استفاده از رابطه (۱) مقدار قند برحسب میکروگرم بر گرم وزن خشک گیاه به‌دست آمد (McCready, Guggolz, Silveira, & Owens, 1950).

$$(1) \text{ وزن خشک} \times \left(\frac{0.304 - \text{میزان جذب}}{0.01242} \right) = \text{مقدار قند}$$

اندازه‌گیری رنگی‌های فتوسنتزی

جهت عصاره‌گیری رنگی‌ها، از حلال متانول استفاده شد و جذب عصاره متانولی به‌دست آمده در طول موج‌های ۶۶۵/۲، ۶۵۲/۴ و ۴۷۰ نانومتر خوانده شد و محاسبات لازم با استفاده از روابط (۲) تا (۴) انجام گرفت (Lichtenthaler & Buschmann, 2001). در این روابط، C_a کلروفیل a ، C_b کلروفیل b و $C_{(x+c)}$ کارتنوئیدها (گزانتوفیل+کاروتن) می‌باشد.

$$(2) C_a (\mu\text{g.ml}^{-1}) = 16.72 A_{665.2} - 9.16 A_{652.4}$$

$$(3) C_b (\mu\text{g.ml}^{-1}) = 34.09 A_{652.4} - 15.28 A_{665.2}$$

$$(4) C_{(x+c)} (\mu\text{g.ml}^{-1}) = (1000 A_{470} - 1.63 C_a - 104.96 C_b) / 221$$

طرح آماری مورد استفاده

در این پژوهش از نور مصنوعی تولیدشده با استفاده از LED با هفت ترکیب طیف نوری و از نور خورشید به‌عنوان تیمار شاهد استفاده شد. طرح مورد استفاده، طرح کاملاً تصادفی با ۸ تیمار و ۳ تکرار بود و تجزیه و تحلیل آماری با استفاده از نرم‌افزار SAS صورت گرفت. مقایسه میانگین‌ها نیز از روش دانکن و در سطح احتمال یک و پنج درصد انجام شد.

نتایج و بحث

نتایج نشان داد، تاثیر تیمارهای به‌کار رفته بر تمامی صفات مورد ارزیابی به‌جز طول گیاه، در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲).

با توجه به نتایج به‌دست آمده، تیمار نوری (R2, G0, B1) دارای بیشترین مقدار کلروفیل a بود و اختلاف معنی‌داری با شاهد و سایر تیمارهای دیگر داشت (شکل ۸). کمترین مقدار کلروفیل a نیز مربوط به تیمار (R1, G0, B0) بود که اختلاف معنی‌داری با شاهد و تیمار (R1, G1, B1) نداشت (شکل ۸).

بیشترین مقدار کلروفیل b متعلق به تیمار (R2, G0, B1) بود که با شاهد دارای اختلاف معنی‌دار بود ولی نسبت به تیمارهای (R2, G1, B0) و (R1, G0, B2) تفاوت معنی‌داری نداشت (شکل ۹). مشابه آن‌چه در خصوص کلروفیل a بیان شد، کمترین مقدار کلروفیل b نیز مربوط به تیمار (R1, G0, B0) بود که اختلاف معنی‌داری با شاهد و تیمار (R1, G1, B1) نداشت (شکل ۹).

جدول ۲- آنالیز واریانس تاثیر تیمارهای نوری بر زیست‌توده، قند و رنگیزه‌های فتوسنتزی تربچه

Table 2- Analysis of variance of the effect of light diets on biomass, sugar, and photosynthetic pigments of radish

منابع تغییر Source of variation	درجه آزادی (df)	میانگین مربعات Mean of square							
		کلروفیل a Chlorophyll a	کلروفیل b Chlorophyll b	کلروفیل کل Total chlorophyll	کارتنوئید Carotenoid	وزن تر Wet weight	وزن خشک Dry weight	قند Sugar	طول Length
تیمار Treatment	7	0.106**	0.065**	0.328**	718.27**	0.0046**	0.000017**	0.168**	1.13 ^{ns}
خطا Error	16	0.019	0.011	0.057	153.31	0.0006	0.0000015	0.006	0.46
ضریب تغییرات Coefficient of variation	-	22.16	22.54	22.02	22.52	10.61	10.77	22.01	9.13

ns عدم وجود اختلاف معنی‌دار، ** اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد

ns No significant difference, ** Significant difference at the level of one percent probability

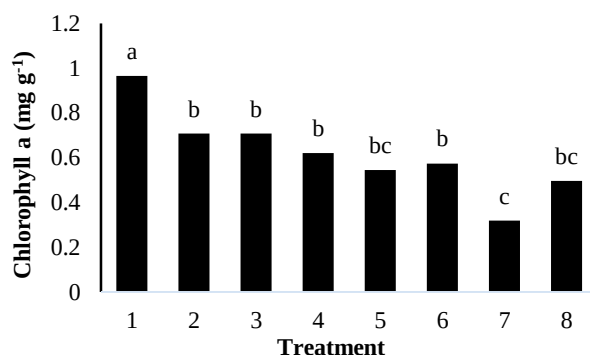
بازتاب می‌کند. براساس برتری تیمار (R2, G0, B1)، از نظر همه‌ی رنگیزه‌های فتوسنتزی می‌توان نتیجه گرفت، این تیمار نوری مطلوب‌ترین تیمار برای رنگیزه‌های فتوسنتزی است. نتایج پژوهش (Shimizu et al., 2011) نیز نشان داد که ترکیب نور قرمز و آبی در افزایش رنگیزه‌های فتوسنتزی نقش موثری دارد.

با توجه به نتایج به‌دست آمده (شکل ۱۲)، بیشترین مقدار وزن تر مربوط به تیمار (R2, G0, B1) بود که اختلاف معنی‌داری با نور طبیعی و تیمارهای (R1, G0, B2) و (R1, G0, B1) نداشت. کمترین وزن تر نیز در تیمار نوری صرفاً قرمز به‌دست آمد که به‌طورمعنی‌داری از تمامی تیمارها پایین‌تر بود (شکل ۱۲). بر اساس نتایج به‌دست آمده، وزن خشک گیاه تربچه بین ۴ الی ۶ درصد وزن تر گیاه بود. در وزن خشک نیز مانند وزن تر بیشترین میزان وزن خشک مربوط به تیمار (R2, G0, B1) بود که اختلاف معنی‌داری با سایر تیمارها به‌جز (R0, G1, B2) و (R1, G0, B0) نداشت (شکل ۱۳). نتایج نشان داد که طیف نوری قرمز به تنهایی نمی‌تواند شرایط لازم برای رشد و در نهایت حصول عملکرد مطلوب گیاه را فراهم نماید. در هنگام استفاده از یک طیف نوری، نور آبی شرایط بهتری نسبت به نور قرمز برای رشد گیاه فراهم نمود. این نتیجه علاوه بر زیست‌توده، درخصوص رنگیزه‌های فتوسنتزی نیز صادق بود و طیف آبی نسبت به طیف قرمز شرایط بهتری را برای فتوسنتز گیاه فراهم کرد.

کلروفیل کل به مجموع دو کلروفیل a و b گفته می‌شود. با توجه به شکل ۱۰ بیشترین میزان کلروفیل کل، مربوط به تیمار (R2, G0, B1) بود که به‌طور معنی‌داری نسبت به شاهد و همه‌ی تیمارهای نوری مورد بررسی به‌جز دو تیمار (R2, G1, B0) و (R1, G0, B2)، برتری داشت (شکل ۱۰).

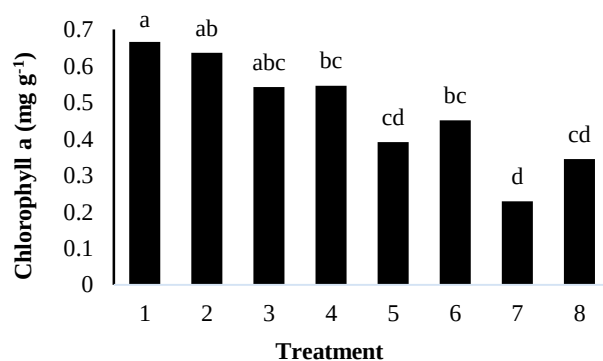
کارتنوئید مجموع رنگیزه‌هایی مانند گزانتوفیل و کاروتن می‌باشد که نقش آن جمع‌آوری انرژی و استفاده در فتوسنتز است. شکل ۱۱ مقایسه میانگین کارتنوئید در تیمارهای مختلف را نشان داده است. بیشترین مقدار کارتنوئید مربوط به تیمار (R2, G1, B0) بود که با تیمارهای شاهد، (R0, G0, B1)، (R1, G0, B0) و (R1, G1, B1) اختلاف معنی‌دار در سطح پنج درصد داشت (شکل ۱۱).

نتایج این بخش نشان داد که تیمار نوری ترکیب قرمز و آبی به‌ویژه زمانی که نور قرمز بیشتر باشد، دارای رنگیزه‌های فتوسنتزی بالاتری است. برعکس اگر تنها از یک طیف نوری آبی یا قرمز استفاده شود و یا نسبت نوری مساوی قرمز، سبز و آبی اعمال شود، وضعیت رنگیزه‌های فتوسنتزی و به تبع آن میزان فتوسنتز کاهش خواهد یافت. زیرا توسعه روزنه (روزنه‌هایی بر روی گیاه که با جذب دی‌اکسیدکربن امکان فتوسنتز را برای گیاه فراهم می‌کند) گیاه در نور تک‌رنگ نسبت به نور مخلوط کمتر است. نور آبی و قرمز بیشترین تاثیر را در فرآیند فتوسنتز دارند و نور آبی دارای قدرت نفوذ بیشتری در بافت‌های گیاه نسبت به نور قرمز دارد و می‌بایست به نسبت منطقی از نور آبی بهره برد و برای رشد بیشتر نیاز به حجم نور قرمز بیشتری است. همچنین کلروفیل بیشتر نور سبز جذب نمی‌کند و آن را



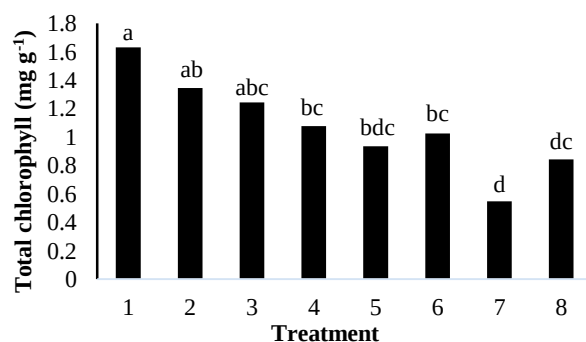
شکل ۸- تاثیر کیفیت نور بر میزان کلروفیل a برگ تربچه

Fig.8. The effect of light quality on the amount of chlorophyll a in radish leaves



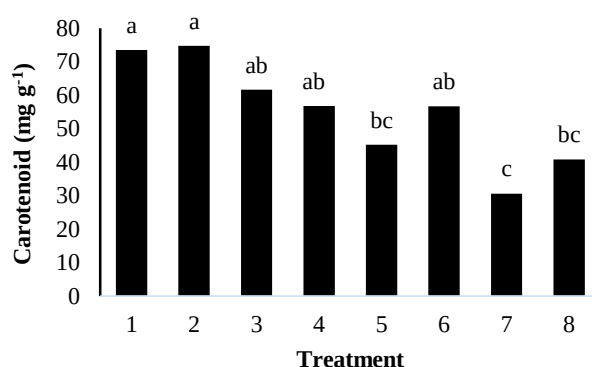
شکل ۹- تاثیر کیفیت نور بر میزان کلروفیل b برگ تربچه

Fig.9. The effect of light quality on the amount of chlorophyll b in radish leaves



شکل ۱۰- تاثیر کیفیت نور بر میزان کلروفیل کل برگ تربچه

Fig.10. The effect of light quality on the amount of total chlorophyll in radish leaves

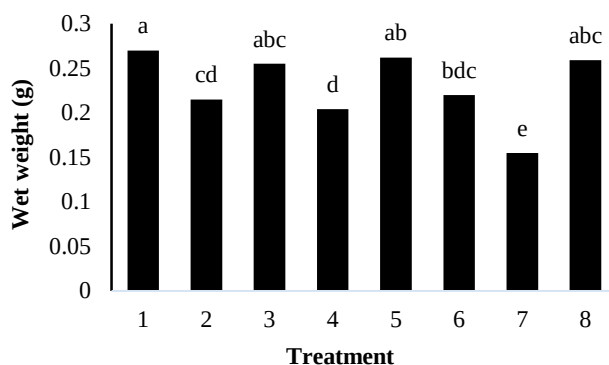


شکل ۱۱- تاثیر کیفیت نور بر میزان کارتنوئید برگ تربچه

Fig.11. The effect of light quality on the amount of carotenoid in radish leaves

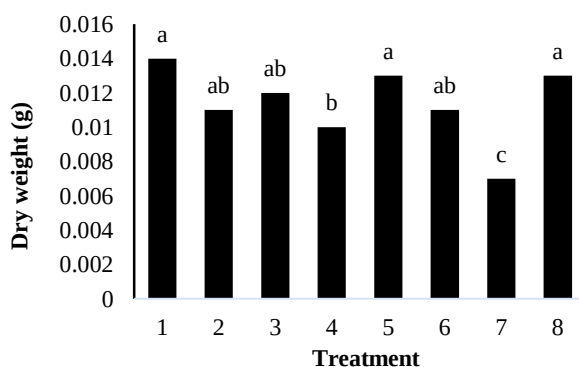
تولید کربوهیدرات‌ها و قند ارتباطی مستقیم با کارایی فتوسنتزی دارد لذا می‌توان گفت که در تیمار (R2, G0, B1) وضعیت فتوسنتز نسبت به سایر تیمارهای مورد بررسی وضعیت بهتری داشته است.

شکل ۱۴ نتایج مقایسه میانگین بین قند گیاه در تیمارهای مختلف را نشان داده است. بیشترین میزان قند گیاه مربوط به تیمار (R2, G0, B1) بود که به‌طور معنی‌داری نسبت به تیمار شاهد، نور طبیعی و سایر تیمارهای نوری به کار رفته برتری داشت. از آنجا که



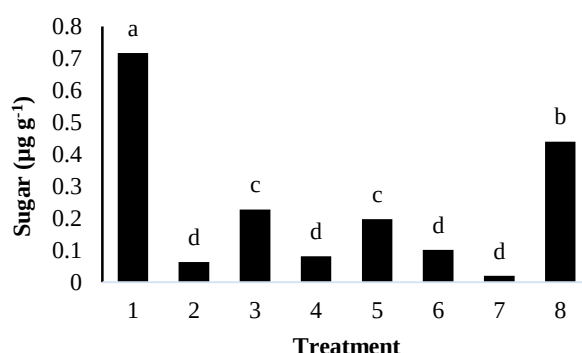
شکل ۱۲- تاثیر کیفیت نور بر میزان وزن تر برگ تربچه

Fig.12. The effect of light quality on the fresh weight of radish leaves



شکل ۱۳- تاثیر کیفیت نور بر میزان وزن خشک برگ تربچه

Fig.13. The effect of light quality on the dry weight of radish leaves

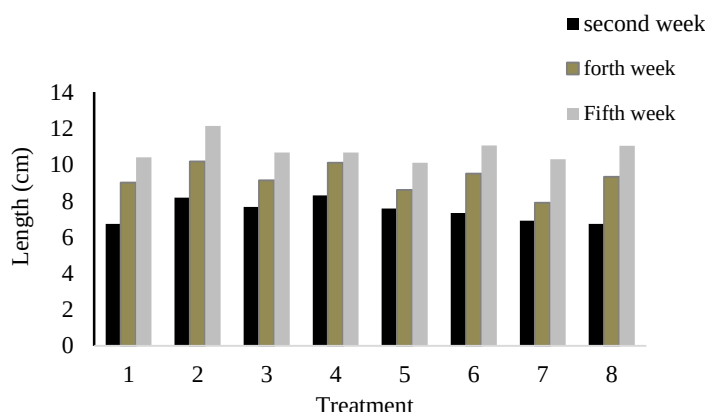


شکل ۱۴- تاثیر کیفیت نور بر میزان قند برگ تربچه

Fig.14. The effect of light quality on the sugar content of radish leaves

نشان داده شده است. با توجه به جدول ۲، اختلاف معنی‌داری بین تیمارها از نظر طول گیاه وجود نداشت. نتایج ارزیابی طول گیاه در تیمارهای مختلف نشان داد که اگر شدت نور مناسبی انتخاب گردد؛ لامپ‌های LED عارضه کشیدگی (legginess) در مقایسه با نور طبیعی ایجاد نمی‌کنند. در اختلال کشیدگی، ساقه گیاه طویل شده ولی ضعیف و دارای کیفیت پایین است (Javanmardi, 2010). نور مصنوعی در صورتی که به‌درستی تنظیم نشود ممکن است عارضه کشیدگی را تشدید نماید.

در پژوهشی که به‌منظور بررسی اثر طیف‌های مختلف نوری بر گیاه کاهو انجام شد، نتایج نشان داد که ترکیب نور قرمز و آبی، کارایی فتوسنتزی بالاتری نسبت به طیف‌های نوری مورد آزمایش داشت (Shimizu et al., 2011). همراستایی میزان بالای قند و میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی نیز نشان داد که در تیمار (G0, B1, R2) شرایط مناسب‌تری برای جذب نور و انجام فتوسنتز نسبت به سایر تیمارهای نوری وجود دارد. طول گیاه در سه مقطع زمانی اندازه‌گیری و نتایج در شکل ۱۵



شکل ۱۵- تاثیر کیفیت نور بر طول گیاه در سه مقطع زمانی

Fig.15. The effect of light quality on plant length in three time periods

نشان داد که ترکیب نور قرمز و آبی در صورتی که شدت نور قرمز نسبت به نور آبی بیشتر باشد، می‌تواند در مقایسه با دیگر تیمارها شرایط بهتری را برای گیاه فراهم نماید، زیرا گیاه می‌تواند همه‌ی انرژی موجود در نورهای قرمز و آبی را جذب کند. دلیل بیشتر بودن شدت نور قرمز این است که، نور قرمز دارای قدرت نفوذ کمتری نسبت به نور آبی است به همین دلیل، برای آن که بتواند به بافت‌های گیاه نفوذ کند باید شدت آن را افزایش داد. ترکیب نور قرمز و آبی در

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که اگر محدودیتی از نظر نور طبیعی در فضاهایی مانند گلخانه و کشت‌های طبقاتی و همچنین کارخانه‌های گیاهی ایجاد شود، می‌توان نور مصنوعی حاصل از لامپ‌های LED در کیفیت بهینه‌شده را جایگزین نور طبیعی نمود. بررسی اثر تیمارهای مختلف نوری بر برخی از خصوصیات گیاه تربچه

ترکیب نوری جهت رشد گیاه ضروری به نظر نمی‌رسد. پژوهش‌های آینده می‌تواند بررسی رژیم‌های نوری دیگر، به‌ویژه رنگ نارنجی و بنفش را در گیاهان متنوع، مورد ارزیابی قرار دهد. همچنین پرداختن به ارزش غذایی و دارویی گیاهان تحت نور مصنوعی می‌تواند از دیدگاه تجاری مهم و ارزشمند باشد.

افزایش رنگیزه‌های فتوسنتزی، وزن تر و خشک و افزایش قند گیاه نسبت به سایر تیمارها برتری داشت. در مقایسه با تیمارهای مختلف مورد بررسی، استفاده از نور قرمز به‌تنهایی، تاثیر نامطلوبی بر همه شاخص‌های مورد بررسی داشت. نور سبز تاثیر زیادی بر زیست‌توده و پارامترهای فیزیولوژیکی اندازه‌گیری‌شده نداشت؛ لذا حضور آن در

References

1. Graamans, L., Baeza, E., Dobbelsteen, A.V. D., Tsafaras, I., & Stanghellini, C. (2018). Plant factories versus greenhouses: Comparison of resource use efficiency. *Agricultural Systems*, 160, 31-43. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.11.003>
2. Ikeda, A., Tanimura, Y., Ezaki, K., Kawai, Y., Nakayama, S., Iwao, K., & Kageyama, H. (1991). Environmental control and operation monitoring in a plant factory using artificial light. *International Workshop on Sensors in Horticulture*, 304, 151-158. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1992.304.16>
3. Javanmardi, J. (2010). *Scientific and applied basis for vegetable*. University of Mashhad press. (In Persian).
4. Kozai, T. (2007). Propagation, grafting and transplant production in closed systems with artificial lighting for commercialization in Japan. *Propagation of Ornamental Plants*, 7(3), 145-149.
5. Kozai, T. (2012). Sustainable plant factory: Closed plant production systems with artificial light for high resource use efficiencies and quality produce. *International Symposium on Soilless Cultivation 1004*: 27-40. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2013.1004.2>
6. Kozai, T. (2013a). Resource use efficiency of closed plant production system with artificial light: concept, estimation and application to plant factory. *Japan Academy*, 89, 447-461. <https://doi.org/10.2183/pjab.89.447>
7. Kozai, T. (2013b). Plant factory in Japan-current situation and perspectives. *Chronica Horticulturae*, 53(2), 8-1.
8. Kozai, T., Niu, G., & Takagaki, M. (2019). *Plant factory: an indoor vertical farming system for efficient quality food production*. Academic press.
9. Li, M., Kozai, T., Ohyama, K., Shimamura, S., Gonda, K., & Sekiyama, S. (2012). Estimation of hourly CO₂ assimilation rate of lettuce plants in a closed system with artificial lighting for commercial production. *Ecological Engineering*, 24(3), 77-83.
10. Lichtenthaler, H. K., & Buschmann, C. (2001). Chlorophylls and carotenoids: Measurement and characterization by UV-VIS spectroscopy. *Current Protocols in Food Analytical Chemistry*, 1(1), F4-3. <https://doi.org/10.1002/0471142913.faf0403s01>
11. Ohyama, K., Takagaki, M., & Kurasaka, H. (2008). Urban horticulture: its significance to environmental conservation. *Sustainability Science*, 3(2), 241-247. <https://doi.org/10.1007/s11625-008-0054-0>
12. McCready, R. M., Guggolz, J., Silveira, V., & Owens, H. S. (1950). Determination of starch and amylose in vegetables. *Analytical Chemistry*, 22(9), 1156-1158. <https://doi.org/10.1021/ac60045a016>
13. Shimizu, H., Saito, Y., Nakashima, H., Miyasaka, J., & Ohdoi, K. (2011). Light environment optimization for lettuce growth in plant factory. *IFAC Proceedings Volumes*, 44(1), 605-609. <https://doi.org/10.3182/20110828-6-IT-1002.02683>
14. Takagaki, M., Hara, H., & Kozai, T. (2014). Indoor horticulture using micro-plant factory for improving quality of life in urban areas: design and a social experiment Approach, IHC 2014, Abstract book.



Predicting Whole-body Vibration-based on Linear Regression Models and Determining Permissible Exposure Time of Tractor Operator

A. Mohammadi¹, K. Kheiralipour^{1*}, B. Ghamary¹, A. Jahanbakhshi¹, R. Shahidi²

1- Mechanical Engineering of Biosystems Department, Ilam University, Ilam, Iran

2- Occupational Health Engineering Department, Hamadan University of Medical Sciences, Hamadan, Iran

(*- Corresponding Author Email: k.kheiralipour@ilam.ac.ir)

<https://doi.org/10.22067/jam.2021.73589.1071>

Received: 14 November 2021

Revised: 11 December 2021

Accepted: 20 December 2021

Available Online: 20 December 2021

How to cite this article:

Mohammadi, A., Kheiralipour, K., Ghamari, B., Jahanbakhshi, A., & Shahidi, R. (2023). Predicting Whole-body Vibration-based on Linear Regression Models and Determining Permissible Exposure Time of Tractor Operator. *Journal of Agricultural Machinery*, 13(2), 227-237. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jam.2021.73589.1071>

Introduction

The permissible exposure time to vibration for the operator is one of the key factors in maintaining the operator's health while optimizing machinery and equipment. The tractor studied was the ITM475, manufactured in Iran. The purpose of this study was to calculate the operator's permissible vibration exposure time while using the tractor to ensure the driver can maintain good bodily health.

Materials and Methods

In this study, experiments were conducted using a 3-axis vibration meter based on the ISO 2631 standard. The obtained data were analyzed through a factorial experiment using 18 treatments and 3 replications. The factors studied were engine rotation speed (at three levels of 1000, 1500, and 2000 rpm), road type (dirt and asphalt), and gear position (at three levels of 1, 2, and 3).

Results and Discussion

Various total vibration models were obtained for the tractor, and their determination coefficient varied from 90.11% for gear No. 3 on an asphalt road to 100% for gear No. 1 on an asphalt road and gear No. 2 on a dirt road. The maximum whole-body vibration, and consequently the minimum permissible exposure time, was observed for gear No. 3 at an engine rotation speed of 2000 rpm on a dirt road, which was 1.49 and 1.16 hours, respectively.

Conclusion

The maximum whole-body vibration experienced during an 8-hour tractor-driving session was measured at 0.85 m s^{-2} . It is important to note that the permissible exposure time decreases as vibration levels increase, and it reaches a limit of 1.16 hours. To ensure drivers adhere to these permissible exposure times across various driving conditions, measures must be implemented to reduce tractor vibration and minimize its transmission to the driver. By reducing overall tractor vibration and minimizing its impact on the driver, it becomes possible to increase the permissible exposure time for drivers.

Keywords: Engine rotational speed, Gear ratio, Modeling, Road, Vibration

مقاله پژوهشی

جلد ۱۳، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۲، ص ۲۳۷-۲۲۷

پیش‌بینی ارتعاش تمام بدن بر اساس مدل‌های رگرسیونی تک‌متغیره و تعیین مدت زمان مجاز مواجهه کاربر تراکتور

علی محمدی^۱، کامران خیرعلی‌پور^{۱*}، بهرام قمری^۱، احمد جهانبخشی^۱، رضا شهیدی^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۲۹

چکیده

مدت زمان مجاز مواجهه کاربر با ارتعاش یکی از عوامل اصلی در حفظ سلامت کاربر از یک طرف و بهینه‌سازی ماشین‌ها و تجهیزات از طرف دیگر می‌باشد. تحقیق حاضر به منظور محاسبه مدت زمان مجاز مواجهه کاربر با ارتعاش تراکتور ITM475 صورت پذیرفته است. آزمایش‌های این پژوهش با استفاده از یک ارتعاش‌سنج سه جهته و بر اساس استاندارد بین‌المللی ارتعاش ISO 2631-1 انجام گرفت. اطلاعات به‌دست آمده براساس اندازه‌گیری‌های به‌عمل‌آمده از ۱۸ تیمار و ۳ تکرار مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. عامل‌های مورد بررسی شامل دور موتور در سه سطح ۱۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ دور در دقیقه، موقعیت دنده در سه سطح دنده ۱، ۲ و ۳ و نوع جاده در دو سطح خاکی و آسفالت بود. بیشترین میزان ارتعاش کل بدن و به تبع آن کمترین مدت زمان مجاز مواجهه در جاده خاکی، دور موتور ۲۰۰۰ دور بر دقیقه، و دنده ۳ بوده که مقدار آن‌ها به‌ترتیب برابر ۱/۴۹ متر بر مجذور ثانیه و ۱/۱۶ ساعت بود. ضمن رعایت مدت زمان مجاز مواجهه توسط کاربران این تراکتور، نیاز است تمهیداتی برای کاهش ارتعاش تمام بدن کاربر تراکتور مورد نظر اندیشیده شود.

واژه‌های کلیدی: ارتعاش، جاده، دور موتور، مدل‌سازی، نسبت دنده

مقدمه

تراکتور به‌عنوان منبع توان برای ادوات و ماشین‌ها در عملیات مختلف کشاورزی، استفاده از آن مشکلاتی از جمله ارتعاش را به همراه دارد (Faraji, Heidarbeigi, & Samadi, 2021). از جمله مشکلات مکانیزه کردن کشاورزی ارتعاشات منتشرشده از ماشین‌ها می‌باشد که دارای اثرات نامطلوبی بر روی انسان از جمله بیماری‌های مختلف تأثیرگذار بر رگ‌های خونی، اعصاب، ماهیچه‌ها، کاهش بازده کاری و افزایش حوادث می‌گردد (Boshuizen et al., 1990).

آن‌چه که در ارتباط بین ارتعاش اجسام در محیط و انسان از نظر بهداشت و سلامت حائز اهمیت است، مخاطره‌آمیز بودن میزان انرژی برخی امواج ارتعاشی در تماس مستقیم با اعضا و اندام‌ها می‌باشد. انتقال انرژی مکانیکی از یک منبع مرتعش به بدن می‌تواند باعث اختلال در راحتی یا آسایش فرد، کاهش بازدهی در اثر خستگی ناشی از ارتعاش و نیز اختلال در اعمال فیزیولوژیک کارگر یا در مواردی نیز می‌تواند باعث اختلالات اسکلتی-عضلانی و برخی بیماری‌ها گردد. مطالعه ارتعاش انسانی شامل دو بخش اصلی است: ارتعاش تمام بدن و ارتعاش دست-بازو. ارتعاش دست-بازو از وسایل مرتعش دستی

در عصر حاضر، کشاورزی بدون استفاده از ماشین‌امری بعید می‌باشد. امروزه ماشین‌های کشاورزی یکی از نهاده‌های مهم تأثیرگذار در توسعه کشاورزی و افزایش بهره‌وری در این بخش می‌باشد؛ تا حدی که یکی از شاخص‌های اندازه‌گیری پیشرفت کشاورزی در هر کشور درجه مکانیزاسیون آن می‌باشد. امروزه بخش عظیمی از نیروی کار در بخش کشاورزی حضور دارند که بر اساس اطلاعات منتشرشده از سازمان آمار جهانی حدود ۲۰/۰۴ درصد نیروی کار را شامل می‌شود (Boshuizen, Bongers, & Hulshof, 1990; Jahanbakhshi, Ghamari, & Heidarbeigi, 2016; Jahanbakhshi, Ghamari, & Heidarbeigi, 2017; Jahanbakhshi & Heidarbeigi, 2019). با توجه به جایگاه ویژه

۱- گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

۲- گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشگاه علوم پزشکی، همدان، ایران

(*)- نویسنده مسئول:
(Email: k.kheiralipour@ilam.ac.ir)
<https://doi.org/10.22067/jam.2021.73589.1071>

نصیری و همکاران (Nasiri, Beheshti, & Hajizadeh, 2014) به ارزیابی میزان مواجهه کاربران تیلر با ارتعاش پرداختند. آن‌ها چهل کاربر تیلر و پارامترهای مربوط به ارتعاش دست و بازو و کل بدن در حالت‌ها و جهت‌های گوناگون کاری اندازه‌گیری و با میزان مجاز مقایسه نمودند و گزارش نمودند میزان مواجهه ارتعاش کل بدن بیش از میزان مجاز بوده، زمان مجاز کاری در حد چند ثانیه است و خطر بروز اختلالات اسکلتی عضلانی وجود دارد. احمدی و همکاران (Ahmadi, Ghamari, & Kheiralipour, 2017) و دهام و همکاران (Dahham, Tawfik, & Saleh, 2019) ارتعاشات تراکتورهای مختلف را با استفاده از ارتعاش سنج تک‌جهته اندازه‌گیری نمودند. نتایج تحقیقات جهان بخشی و همکاران (Jahanbakhshi, Ghamari, & Heidarbeigi, 2020) نشان داد که تجزیه واریانس اثر عامل‌های اصلی دور موتور و موقعیت دنده در سطح احتمال ۱٪ بر سطح ارتعاش منتشرشده از صندلی کمباین معنی‌دار بود. ایشان گزارش نمودند که در دنده ۱ و ۲ با سرعت موتور ۱۸۰۰ دور در دقیقه و دنده ۱ با سرعت موتور ۲۵۰۰ دور در دقیقه، راننده می‌تواند بدون هیچ مشکلی به مدت ۸ ساعت در روز رانندگی نماید. با توجه به بررسی منابع، مشخص شد که در مورد مدت زمان مواجهه کاربر تراکتور ITM 475 مطالعه‌ای صورت نگرفته است. بنابراین هدف از تحقیق حاضر اندازه‌گیری ارتعاش کل وارده بر بدن و محاسبه مدت زمان مجاز مواجهه کاربر این نوع تراکتور در شرایط مختلف دور موتور، نسبت دنده، و جاده می‌باشد تا مشخص شود در شرایط مختلف، هر کاربر چه مدت زمان می‌تواند از این تراکتور استفاده نماید.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش داده‌های ارتعاش صندلی تراکتور ITM475 در سه جهت (X, Y و Z) حین حرکت بر روی جاده آسفالت و خاکی در دانشگاه علوم پزشکی همدان دانشکده بهداشت، اندازه‌گیری شدند. برای انجام آزمون‌ها از یک دستگاه تراکتور ITM475، جفت دیفرانسیل، چهار سیلندر، با وزن ۳۱۷۰ کیلوگرم و توان ۷۵ اسب بخار، ساخت سال ۱۳۹۳ کارخانه تراکتورسازی ایران استفاده شد. در این پژوهش تراکتور قبل از انجام آزمون‌ها مورد بازرسی فنی قرار گرفته و سرویس‌های دوره‌ای جهت آماده‌سازی بر روی آن انجام گرفت. تراکتور مورد آزمون در این پژوهش بدون اتاقک یا قاب ایمنی بود. همچنین تراکتور با مخزن سوخت و رادیاتور پر با وزنه‌های سنگین‌کننده عقبی و جلوئی تایر و بدون ادوات و تجهیزات سوارشونده و هرگونه قطعه خاص انتخابی مورد استفاده قرار گرفت. بر اساس استانداردهای ملی تایرهای تراکتور مورد استفاده در آزمون باید دارای اندازه استاندارد باشد. عمق عاج تایر نباید کمتر از ۶۵ درصد عمق عاج تایر نو باشد، دیوارهای تایر نباید دارای صدمه‌دیدگی بوده و

مانند مته برقی، چکش، کلنگ، اره‌های چوب‌بری و غیره تولید می‌گردد. ارتعاشی که به تمام بدن وارد می‌شود در محدوده بسامد بحرانی ۸۰-۱۰۰ HZ مورد مطالعه قرار می‌گیرد و طی استاندارد ISO-2631 مورد بحث قرار گرفته است. در ارتعاش تمام بدن سطح وسیعی از بدن در تماس با جسم مرتعش و حتی ممکن است کل بدن در یک محیط مرتعش مانند رانندگان ماشین‌های کشاورزی و اتومبیل‌ها قرار گیرد (Golmohammadi, 2010).

در حال حاضر ارتعاش از معضلات اساسی دنیای صنعتی و بخش کشاورزی بوده و خیل عظیمی از افراد در محیط کار خود و در محل زندگی از آزار ناشی از آن‌ها در مخاطره هستند، لذا تحقیقات مختلفی جهت بررسی وضعیت خستگی در اثر ارتعاش و مدت زمان مواجهه کاربر با ارتعاش گزارش شده است که در اینجا به مواردی از آن‌ها در بخش کشاورزی اشاره شده است. تواری و همکاران (Tewari, Dewangan, & Karmakar, 2004) در بررسی خستگی کاربرهای تراکتور دستی، تراکتورهای دارای صندلی و فاقد صندلی را با هم مقایسه نمودند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که به‌طور میانگین میزان کم‌رود در کاربرهای تراکتورهای دارای صندلی به میزان ۲۷٪ نسبت به تراکتورهای بدون صندلی کمتر است. ملکی (Maleki, 2008) در تحقیقی به بررسی بسامدهای بحرانی اندام‌های بدن راننده تراکتور پرداخت. نتایج تحقیق ایشان بیانگر افزایش مقدار ارتعاش طولی در بسامدهای ۳-۴ هرتز برای اندام‌های بدن بود. محمدی و همکاران (Mohammadi, Mirzaee, & Ghal Jehi, 2009) در تحقیقی میزان مواجهه با ارتعاش و اختلالات اسکلتی-عضلانی رانندگان تراکتور را مورد بررسی قرار دادند. در تحقیقی نصیری و همکاران (Nasiri, Mohammadi, Beheshti, Azam, & Hajizadeh, 2013) مدت زمان مجاز مواجهه رانندگان تراکتور مسی فرگوسن مدل ۱۶۵ با ارتعاش کل بدن را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها پارامترهای مربوط به ارتعاش تمام بدن مانند شتاب ریشه مجموع مربعات، شتاب معادل کلی، میزان ارتعاش به‌صورت مجزا در تراکتور مسی فرگوسن مدل ۱۶۵ و در سه حالت مختلف انتقال (بدون تریلی، با تریلی خالی و همراه با تریلی با بار خاک) شخم‌زدن زمین و بارگیری تریلی خاک با تراکتور و در وضعیت‌های کاری با دنده‌های اندازه‌گیری و با میزان مجاز مقایسه کردند. آن‌ها گزارش نمودند که در تمام موقعیت‌های اندازه‌گیری شده میزان مواجهه با ارتعاش کل بدن بیش از میزان مجاز بوده و خطر بروز اختلالات ناشی از ارتعاش وجود دارد. بیگزاده (Beigzadeh, 2013) به بررسی و تحلیل ارتعاشات سم‌پاش پستی موتوری پرداخت. نتایج تحقیقات ایشان نشان داد که با افزایش سرعت دورانی موتور میانگین شتاب ارتعاش به‌طور کلی در همه موقعیت‌ها افزایش می‌یابد. همچنین گزارش نمود که افزایش دور موتور در تمام حالات باعث افزایش ارتعاش در هر جهت شد و حجم سم تانک سم‌پاش پستی موتوری تأثیر محسوسی بر ارتعاش نداشت.

مزرعه برای تراکتور دارای صندلی باشد تمامی مشخصه‌های ذکر شده برای تراکتور ITM475 مورد آزمایش، کاملاً مطابق با شرایط مندرج در مقررات استاندارد ملی ایران، شماره ۱۴۱۳۳ (Iranian National Standard No. 14133) رعایت شد.

فشار تایر باید میانگین حسابی گستره‌های توصیه‌شده به‌وسیله سازنده باشد. تایرها حداقل دو مرتبه مسیر آزمون را قبل از شروع مراحل آزمون طی نموده تا گرم شوند. فشار تایر قبل و بعد از انجام مجموعه آزمون‌ها اندازه‌گیری و در محدوده ± 5 کیلوپاسکال یکدیگر قرار داشتند. تنظیم عرض چرخ باید همان تنظیم معمول در شرایط عادی



شکل ۱- ارتعاش‌سنج مورد استفاده

Fig.1. The used vibration meter instrument

ارزیابی آسایش و راحتی راننده، و ارزیابی محدوده سلامتی راننده می‌باشند. جهت ارزیابی اولیه باید موارد زیر به‌ترتیب انجام گیرند: اساس ارزیابی ارتعاش‌های وسیله، استفاده از میانگین ریشه مربع‌های شتاب‌های وزن‌دار شده است. این عامل برای شتاب‌های خطی برحسب متر بر مجذور ثانیه و برای شتاب‌های زاویه‌ای برحسب رادیان بر مجذور ثانیه بیان می‌گردد (ISO 2631-1, 1997). عامل شوک (فاکتور تیزی) برابر نسبت بیشینه مقادیر سیگنال شتاب وزن‌دار شده به مقدار میانگین ریشه مربع‌های شتاب می‌باشد. عامل شوک معیاری برای بررسی روش ارزیابی ارتعاش‌های وارده بر بدن راننده است. برای ارتعاش‌هایی با عامل شوک کمتر از نه تعیین میانگین ریشه مربع‌های شتاب کافی است؛ در صورتی که برای مقادیر بیشتر از نه باید روش ارزیابی دیگری اتخاذ گردد (ISO 2631-1, 1997). برای ارزیابی سلامتی کاربر به این روش عمل می‌شود (ISO 2631-1, 1997). ۱- برای کلیه اندام‌های راننده که با وسیله مورد نظر در تماس می‌باشند، میانگین ریشه مربع‌های شتاب در هر سه جهت محاسبه گردد و ۲- جمع برداری شتاب در نقاط مورد نظر محاسبه

در این تحقیق برای اندازه‌گیری ارتعاش، از یک دستگاه ارتعاش‌سنج سه‌جهته مدل B&K2۲۶۰، ساخت شرکت برول و کیار^۱، دانمارک، با دقت $0.1 \mu m.s^{-2}$ و محدوده فرکانس ۱۰۰-۴ Hz استفاده شد (شکل ۱).

ارتعاش‌سنج دارای یک صفحه نیمه‌صلب، با ضخامت ۱۲ میلی‌متر و از جنس لاستیک بود. آزمون‌ها در این پژوهش حین حرکت بر روی جاده آسفالت و خاکی در دانشگاه علوم پزشکی همدان، دانشکده بهداشت، ذخیره شدند. شکل ۲ تراکتور مورد آزمون بر روی جاده آسفالت را نشان می‌دهد. حسگر با استفاده از چسب بر روی صندلی مهار شد و آزمون‌های لازم جهت استخراج سیگنال‌های ارتعاش صندلی انجام گرفت. در شکل ۲ صندلی و نحوه اتصال حسگر به آن نشان داده شده است.

جهت ارزیابی ارتعاش وارده بر سرنشین در استانداردهای جهانی، روش‌های مختلفی بیان گردیده که سه روش از آن در این پژوهش در نظر گرفته شد (ISO 2631-1, 1997) که شامل ارزیابی اولیه،

1- Brüel & Kjær

(ISO 2631-1, 1997). ارتعاش کل (برآیند سه جهت) با استفاده از رابطه (۱) محاسبه گردید (ISO 2631-1, 1997):

$$a_t = \sqrt{(1.4a_x)^2 + (1.4a_y)^2 + a_z^2} \quad (1)$$

که a_x ، a_y ، a_z و a_t به‌ترتیب میانگین ریشه مربع‌های شتاب در جهت طولی، عرضی، عمودی و شتاب کلی بر حسب متر بر مجذور ثانیه می‌باشد.

گردد. جهت ارزیابی آسایش و راحتی راننده پس از به‌دست آوردن شتاب‌ها در هر یک از جهت‌های سه‌گانه و یا محاسبه شتاب‌های زاویه‌ای در آن نقطه، این مقادیر در ضرایب ثابتی که در استانداردهای جهانی بیان شده، ضرب می‌گردند و شتاب نهایی محاسبه شده با توجه به جداول موجود در این استانداردها ارزیابی خواهند شد. به‌عنوان مثال، این ضرایب برای شخصی که روی یک صندلی نشسته و تنها در معرض شتاب‌های خطی قرار دارد، برای هر سه جهت برابر یک می‌باشد ولی اگر همین شخص در معرض شتاب زاویه‌ای قرار گیرد این ضرایب بسته به نوع و جهت شتاب از ۰/۲۵ تا ۰/۸ متغیر است



شکل ۲- صندلی تراکتور و اتصال تجهیزات اندازه‌گیری ارتعاش (راست) و اندازه‌گیری ارتعاش صندلی تراکتور حین حرکت بر روی جاده آسفالت (چپ)

Fig.2. The tractor seat and connection of vibration measuring equipment (right) and measurement of tractor seat vibration while the tractor is running on an asphalt road (left)

مدت زمان مواجهه کوتاه‌تری مورد نیاز است و برعکس هرگاه شتاب وارده بر بدن کوچک باشد؛ مدت زمان طولانی‌تری را برای ایجاد اثرات می‌طلبد. بر این اساس، دو الگوی زیر به صورت رابطه‌های (۲) و (۳) برای این تناسب معرفی شده است (Golmohammadi, 2010):

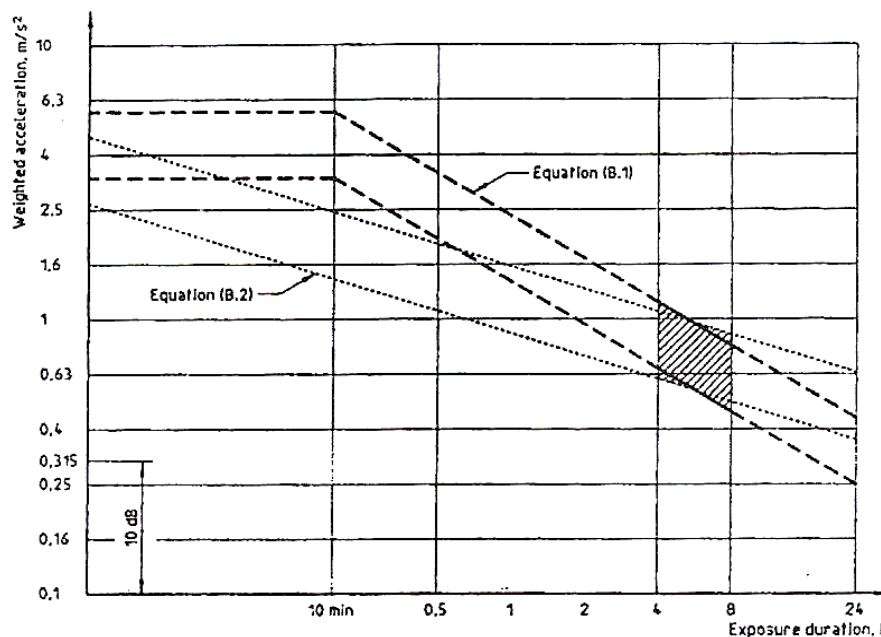
$$(B.1) \quad A_{eq(T1)} \times T_1^2 = A_{eq(T2)} \times T_2^2 \quad (2)$$

$$(B.2) \quad A_{eq(T1)} \times T_1^{1/4} = A_{eq(T2)} \times T_2^{1/4} \quad (3)$$

که B.1 و B.2 دو الگوی معرفی شده، $A_{eq(Ti)}$ شتاب معادل کلی مواجهه در مواجهه‌های ۱ و ۲ و T_1 و T_2 زمان‌های مواجهه در دو وضعیت می‌باشد.

با توجه به هر دو الگو محدوده مخاطره با داشتن شتاب معادل کلی تعیین می‌شود. برای هر کدام از دو الگو معرفی شده دو مرز معین شده است (شکل ۳). مرز B2 در شکل ۳ حد مراقبت (حد عمل یا مرز حداقل) بوده که مواجهه با ارتعاش در زیر این مرز بدون مخاطره است و مرز B1 محدوده مجاز را نشان می‌دهد که زیر آن مجاز و بالای آن ناحیه مخاطره بهداشتی می‌باشد و محدوده بین این دو مرز منطقه احتیاط است.

هرچه زمان تماس با ارتعاش بیشتر باشد، صدمات وارده بیشتر می‌باشد. جهت بررسی آثار و صدمات فیزیولوژیکی ارتعاش به بدن سه شاخص وجود دارد: ۱- شاخص کاهش آسایش یا راحتی: این شاخص برای وسایل حمل‌ونقل و مسافرتی به کار می‌رود و حدودهایی را تعیین می‌کند که بالای آن حد باعث رنج و ناراحتی مسافر می‌شود، ۲- شاخص کاهش مهارت در اثر خستگی: این شاخص حدودی را تعیین می‌کند که چنانچه مقدار ارتعاش وارده بر بدن بیش از حد تعیین شده باشد، دقت و مهارت فرد افت پیدا می‌کند و نهایتاً بازده کاری فرد کاهش پیدا می‌کند، ۳- شاخص حدود مواجهه: این شاخص حدودی را پیشنهاد می‌کند که بالاتر از آن حدود صدمات فیزیولوژیکی به انسان وارد می‌شود و در اثر عدم رعایت این شاخص بیماری‌های ناشی از ارتعاش در انسان به‌وجود می‌آید (Sanai, Ghazaei, Zia Zarifi, & Habibi, 1995). پاسخ بدن به ارتعاش، متناسب با میزان انرژی وارده بر بدن است. بنابراین، اگر محدوده معینی از اثر یا پاسخ فیزیولوژیک در نظر گرفته شود، همواره ارتباطی بین میزان شتاب وارده و مدت زمانی که کاربر در معرض ارتعاش است، برقرار می‌باشد. این بدان معنی است که برای ایجاد اثرات یکسان با افزایش شتاب وارده بر بدن



شکل ۳- مدت زمان مجاز مواجهه با ارتعاش (ISO 2631-1, 1997). ناحیه زیر مرز B2 حد عمل، ناحیه زیر مرز B1 محدوده مجاز و ناحیه بین این دو مرز محدوده احتیاط است.

Fig.3. Permissible vibration exposure range (ISO 2631-1, 1997). The area under the B2 boundary is the action limit, the area under the B1 boundary is the exposure range, and the area between the two boundaries is the caution range

نتایج و بحث

ارتعاش کل بدن (برآیند جهتهای سه گانه x ، y و z) در سرعت و موقعیت دنده‌های مختلف تراکتور در حرکت بر روی جاده آسفالت و خاکی در جدول ۱ آمده است. با توجه به این جدول، با افزایش سرعت موتور از ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ دور بر دقیقه و نسبت دنده از ۱ تا ۳، برآیند ارتعاش کل صندلی تراکتور افزایش می‌یابد که علت آن می‌تواند افزایش تعداد کورس‌های احتراق و ضربات پیستون و نیروهای اینرسی موتور در واحد زمان، افزایش سرعت پیشروی و اثرات سطح جاده باشد. نتایج تحقیق حاضر با نتایج تحقیق تقی زاده (Taghizade Alisaraee, 2011) که ارتعاشات تراکتور MF399 در هشت دور موتور از ۸۰۰ تا ۲۲۰۰ دور بر دقیقه را اندازه‌گیری نمودند، مشابه است.

میزان ارتعاش صندلی تراکتور مربوط به جاده خاکی برای تمامی سرعت‌های موتور و نسبت دنده‌های مورد بررسی، بیشتر از حالت حرکت بر روی جاده آسفالت بود. علت این موضوع اختلاف نوع سطح و ناهمواری‌های جاده خاکی نسبت به جاده آسفالت است؛ زیرا جنس سطح جاده تأثیر مستقیمی بر ارتعاش تراکتور در حال حرکت و ارتعاش رسیده به صندلی تراکتور دارد. مقادیر ارتعاش کل ایجاد شده توسط سرعت‌های مختلف موتور

عامل‌های مورد بررسی در این پژوهش عبارت بودند از: دور موتور (در سه سطح ۱۰۰۰، ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰ دور در دقیقه)، نسبت دنده (در سه سطح دنده ۱، ۲ و ۳) و نوع جاده (در دو سطح خاکی و آسفالت) که در سه تکرار انجام شدند. برای اندازه‌گیری ارتعاش صندلی تراکتور کل ۵۴ آزمایش مطابق با استاندارد (ISO 2631-1 (1997) و Iranian National Standard No. 14133 (2011) صندلی طبق دستور کارخانه سازنده بر حسب جرم شخص مورد آزمایش تنظیم شد. از آن‌جا که جرم‌های متفاوت نتایج آزمون‌های ارتعاش را تحت تأثیر قرار می‌دهند، برای انجام آزمون‌ها در این تحقیق از یک کاربر با جرم ۷۵ کیلوگرم استفاده گردید.

جهت تجزیه و تحلیل داده‌ها از نرم‌افزار Excel 2013 استفاده شد. مقادیر ارتعاش تمام بدن در شرایط مختلف رانندگی تراکتور محاسبه شد و مقدار میانگین آن‌ها به دست آمد. سپس بر اساس مقادیر میانگین به دست آمده، مدت زمان مجاز مواجهه تعیین شد. برای پیش‌بینی ارتعاش کل بدن کاربر تراکتور از رگرسیون تک‌متغیره استفاده شد. رگرسیون روشی برای مدل‌سازی ریاضی داده‌ها است تا بتوان نتایج مربوط به حالت‌هایی که آزمایشی برای آن‌ها صورت نگرفته است، پیش‌بینی نمود. بر اساس این روش، مدل‌هایی برای ارتعاش تمام بدن بر حسب دور موتور برای نسبت دنده‌ها و جاده‌های مختلف به دست آمد.

یونیورسال 650M در راستای عمودی در پنج دور موتور ۱۰۰۰ تا ۱۸۰۰ دور در دقیقه گزارش دادند که ارتعاش در تمامی دورهای موتور در صندلی تراکتور مساوی با دو برابر بسامد دور موتور یا برابر با ضربات پیستون موتور در مرحله توان (انفجار سوخت در سیلندر) است و با افزایش دور موتور بسامد ارتعاش صندلی افزایش می‌یابد. احمدیان و همکاران (Ahmadian et al., 2014) در بررسی ارتعاش دسته و صندلی تراکتور نشان دادند که ارتعاش با افزایش سرعت موتور در تمامی سطوح دنده و در تمام جهات افزایش می‌یابد.

بیشتر از دنده‌های مختلف جعبه‌دنده می‌باشد که علت اصلی آن افزایش تعداد کورس احتراق و ضربات پیستون در واحد زمان که عامل اصلی تولید ارتعاش است، می‌باشد. از طرف دیگر علت افزایش شتاب ارتعاش با تغییر دنده از ۱ تا ۳، افزایش سرعت پیشروی است. این نتایج مشابه نتایجی است که احمدیان و همکاران (Ahmadian, Hassan-Beygi, & Ghobadian, 2014) و تقی زاده و همکاران (Taghizade Alisaraee, Tavakoli Hashjin, & Ghobadian, 2007) گزارش نموده‌اند. تقی زاده و همکاران (Taghizade Alisaraee et al., 2007) در بررسی ارتعاش صندلی تراکتور

جدول ۱- ارتعاش کل بدن مربوط به صندلی تراکتور ITM475

Table 1- Whole-body vibration related to the seat of the ITM475 tractor

دور موتور Engine speed (rpm)	نوع جاده Road type	موقعیت دنده Gear ratio	ارتعاش کل بدن Whole-body vibration (m.s ⁻²)
1000	آسفالت Asphalt	1	0.23
		2	0.32
		3	0.43
	خاکی Dirt	1	0.50
		2	0.65
		3	1.11
1500	آسفالت Asphalt	1	0.33
		2	0.40
		3	0.56
	خاکی Dirt	1	0.69
		2	0.90
		3	1.31
2000	آسفالت Asphalt	1	0.43
		2	0.49
		3	1.04
	خاکی Dirt	1	0.85
		2	1.15
		3	1.49

شکل ۴ مدل‌های رگرسیونی ارتعاش کل تراکتور مورد بررسی در جاده آسفالت و خاکی را نشان می‌دهند. مدل‌های رگرسیونی مربوط به جاده آسفالت در دنده‌های ۱، ۲ و ۳ به‌ترتیب در روابط (۴) تا (۶) آمده‌اند. ضریب تبیین مدل ارتعاش کل تراکتور مورد بررسی در دنده‌های مختلف از ۸۳/۳۹٪ تا ۸۸/۲۱٪ بر روی جاده آسفالت متغیر بود.

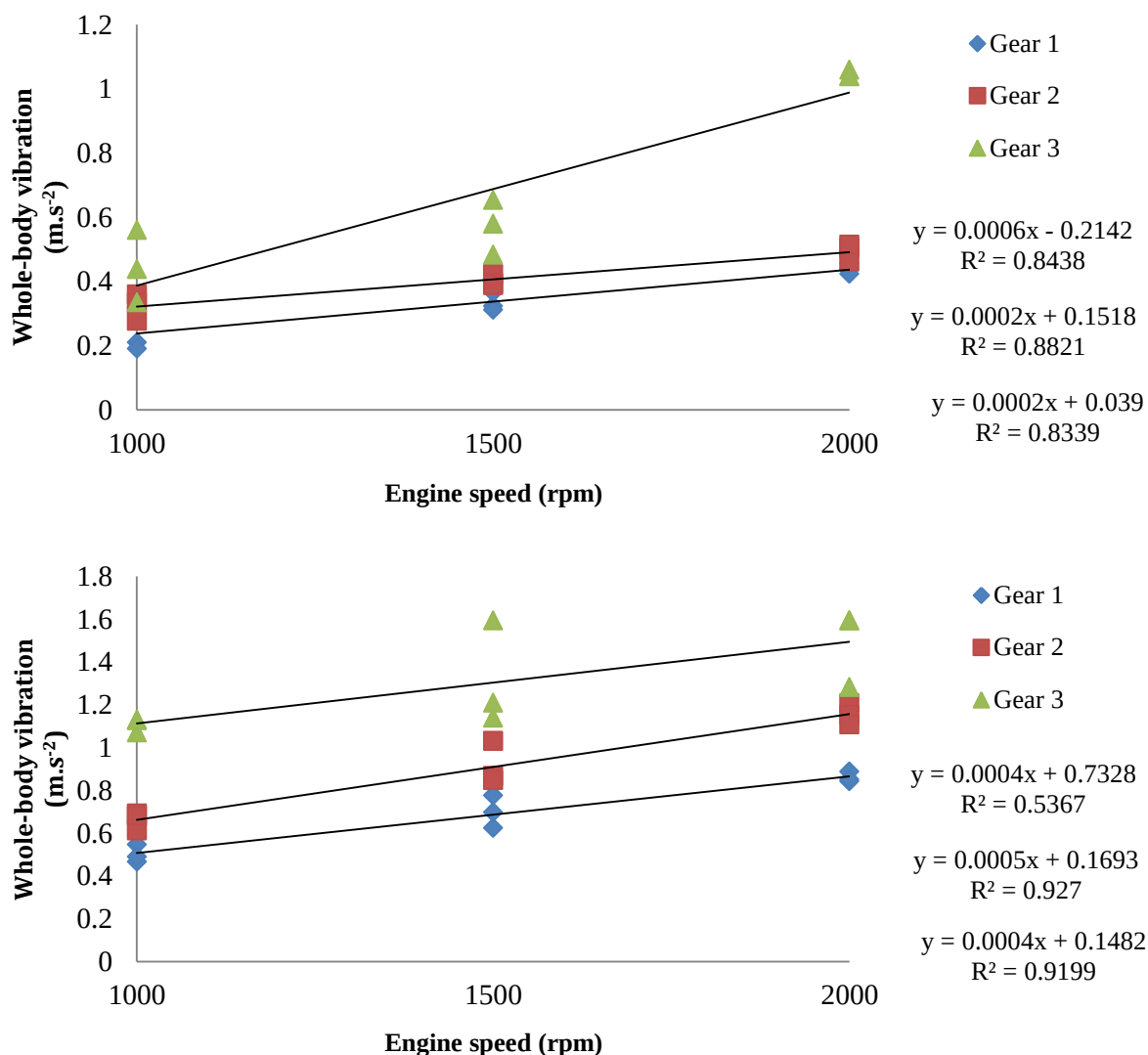
$$TV = 0.0002ERS + 0.039 \quad R^2 = 0.83 \quad (4)$$

$$TV = 0.0002ERS + 0.1518 \quad R^2 = 0.88 \quad (5)$$

$$TV = 0.0006ERS - 0.2142 \quad R^2 = 0.84 \quad (6)$$

در اینجا TV ارتعاش کل، ERS دور موتور و R^2 ضریب تبیین می‌باشد.

ملمز و همکاران (Melemez, Tunay, & Emir, 2013) در بررسی ارتعاش تمام بدن تراکتور Ford 6610، International 444 و Leyland 154 در ترکیه بر روی جاده‌های آسفالت و جنگلی، میزان ارتعاش اندازه‌گیری شده را بین ۰/۷۶ تا ۱/۵۱ m s⁻² گزارش دادند. نصیری و همکاران (Nasiri et al., 2013) ارتعاش معادل تراکتور مسی فرگوسن مدل ۱۶۵ را در ایران و حالت‌های مختلف انتقال (بدون تریلی، همراه تریلی خالی و همراه با تریلی با بار خاک)، شخم زدن زمین، و بارگیری تریلی خاک با تراکتور و در وضعیت‌های کاری با دنده‌های مختلف بر اساس استاندارد ISO 2631 اندازه‌گیری نمودند. محققین میزان ارتعاش معادل برای تراکتور فرگوسن مدل ۱۶۵ در حالت‌های مختلف از ۰/۶۳ تا ۲/۳۵ m s⁻² را به‌دست آوردند.



شکل ۴- مدل‌های رگرسیونی ارتعاش تمام بدن در جاده آسفالت (بالا) و جاده خاکی (پایین)

Fig.4. The regression models of whole-body vibration on an asphalt road (top) and dirt road (bottom)

و سپس مدت زمان مجاز مواجهه کاربر با ارتعاش این نوع تراکتور را محاسبه نمود. قابل ذکر است که دقت مدل مربوط به دنده ۳ و جاده خاکی پایین بوده است (۰/۵۴). این موضوع به دلیل تغییرات زیاد بین نتایج تکرارهای انجام شده در این شرایط می‌باشد که آن را می‌توان به تغییرات ناهمگن سطح جاده خاکی نسبت داد، چرا که ممکن است سطح جاده خاکی در جایی صاف‌تر و در جایی دیگر ناصاف‌تر باشد. به‌منظور دستیابی به یک مدل جامع برای پیش‌بینی ارتعاش کل بدن کاربر تراکتور مورد بررسی، از رگرسیون چندمتغیره با استفاده از نرم‌افزار متلب بهره گرفته شد.

پس از محاسبه مدت زمان مجاز مواجهه کاربر با ارتعاش تراکتور مورد بررسی، نتایج آن در جدول ۲ گزارش شده است. نتایج حاکی از

مدل‌های رگرسیونی مربوط به ارتعاش کل بدن تراکتور مورد بررسی در جاده خاکی در دنده‌های ۱، ۲ و ۳ به‌ترتیب در رابطه‌های (۷) تا (۹) آمده‌اند. ضریب تبیین مدل ارتعاش کل تراکتور مورد بررسی در جاده خاکی از ۵۳/۶۷٪ تا ۹۲/۷۰٪ متغیر می‌باشد.

$$TV = 0.0004ERS + 0.1482 \quad R^2 = 0.92 \quad (7)$$

$$TV = 0.0005ERS + 0.1693 \quad R^2 = 0.93 \quad (8)$$

$$TV = 0.0004ERS + 0.7328 \quad R^2 = 0.54 \quad (9)$$

در اینجا TV ارتعاش کل، ERS دور موتور و R² ضریب تبیین می‌باشد.

با استفاده از مدل‌های (۴) تا (۹) می‌توان ارتعاش کل بدن تراکتور مورد بررسی را در هر دور موتور دلخواه، با دقت بالایی پیش‌بینی نمود

آن است که اثر عامل‌های اصلی دور موتور، موقعیت دنده، نوع جاده و اثر متقابل دور موتور در نوع جاده، موقعیت دنده در نوع جاده، دور موتور در موقعیت دنده و دور موتور در موقعیت دنده در نوع جاده در سطح احتمال ۱٪ بر مدت زمان مجاز مواجهه کاربر تراکتور معنی‌دار بود.

بر اساس الگوی مورد پذیرش در ایران که توسط کمیته فنی بهداشت حرفه‌ای کشور که ۸ ساعت کار روزانه و ۴۰ ساعت کار هفتگی را اعلام نموده و همچنین با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۲ مشاهده می‌شود که در دنده ۳ با دور موتور ۱۰۰۰ دور در دقیقه و

در دنده ۲ و ۳ با سرعت موتور ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰ دور در دقیقه در جاده خاکی و در دنده ۳ با دور موتور ۲۰۰۰ دور در دقیقه در جاده آسفالت، کاربر تراکتور مورد بررسی مجاز نمی‌باشد به مدت ۸ ساعت در روز رانندگی نماید. بنابراین راننده تراکتور مورد نظر هنگام رانندگی در این شرایط، باید به منظور حفظ سلامتی خود، کمتر از ۸ ساعت در روز رانندگی نماید یا شرایط رانندگی را تغییر دهد. البته در سایر دورها و دنده‌های آزمایش شده در جدول بالا، راننده تراکتور مجاز است بیشتر از ۸ ساعت نیز رانندگی نماید. بنابراین انتخاب دور و دنده مربوطه برای تعیین ساعات مجاز رانندگی در روز مهم می‌باشد.

جدول ۲- مدت زمان مجاز مواجهه کاربر تراکتور

Table 2- Permissible exposure time of tractor operator

دور موتور	نوع جاده	موقعیت دنده	مدت زمان مجاز مواجهه
Engine speed (rpm)	Road type	Gear ratio	Permissible exposure time (h)
1000	آسفالت Asphalt	1	894.46
		2	298.73
		3	98.35
	خاکی Dirt	1	60.48
		2	22.16
		3	3.34
1500	آسفالت Asphalt	1	261.61
		2	133.13
		3	37.54
	خاکی Dirt	1	18.08
		2	6.94
		3	1.79
2000	آسفالت Asphalt	1	97.27
		2	63.23
		3	4.12
	خاکی Dirt	1	8.44
		2	2.92
		3	1.16

موتور برای کار با تراکتور بر روی جاده‌های خاکی و آسفالت و نسبت دنده‌های مختلف تخمین زد. نتایج مربوط به محاسبه حداکثر دور موتور تراکتور مورد بررسی در شرایط مختلف جاده و نسبت دنده برای کار مجاز به مدت ۸ ساعت در روز در جدول ۳ ارائه شده است.

دورهای بالاتر از ۲۰۰۰ دور بر دقیقه در جدول ۳ نشان می‌دهد که استفاده از تراکتور در شرایط مربوطه با دور موتور ۲۰۰۰ دور بر دقیقه از منظر اثرات ارتعاش محدودیتی ندارد. با توجه به جدول ۳، حداکثر دور موتور در دنده ۱ و ۲ برای مدت مجاز مواجهه ۸ ساعت رانندگی در روز بر روی جاده خاکی به ترتیب ۱۷۵۴ و ۱۳۶۱ می‌باشد و بر اساس استاندارد مربوطه، کاربر در این شرایط قادر به رانندگی تراکتور مورد بررسی در دورهای موتور بالاتر از این مقادیر نمی‌باشد.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از مدت زمان مجاز مواجهه کاربر تراکتور، می‌توان گفت که اثر کاهش دور موتور بر افزایش مدت زمان مواجهه کاربر بیشتر از کاهش نسبت دنده تراکتور می‌باشد و برعکس. این نتیجه بیان می‌کند که به‌منظور افزایش سرعت پیشروی تراکتور، بهتر است راننده تراکتور به‌جای افزایش دور موتور، نسبت دنده را افزایش دهد تا ارتعاش تمام بدن ثابت بماند یا به مقدار کمتری افزایش یابد.

با استفاده از این مدل‌ها می‌توان دور مناسب موتور تراکتور برای رانندگی به مدت ۸ ساعت در روز را تخمین زد. با توجه به شکل ۳ حداکثر ارتعاش تمام بدن برای مدت مواجهه ۸ ساعت در روز، برابر ۰/۸۵ متر بر مجذور ثانیه می‌باشد. بر این اساس و با استفاده از مدل‌های به‌دست‌آمده (رابطه‌های (۴) تا (۹)) می‌توان حداکثر دور

جدول ۳- حداکثر دور موتور تراکتور در شرایط مختلف برای ۸ ساعت کار در روز

Table 3- The maximum engine rotational speed of the tractor in different conditions for 8 h working per day

نوع جاده Road type	موقعیت دنده Gear ratio	دور موتور Engine speed (rpm)
آسفالت Asphalt	1	4055
	2	3491
	3	2660.5
خاکی Dirt	1	1754.5
	2	1361.4
	3	293

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، با بررسی ارتعاش تمام بدن وارده بر کاربر تراکتور ITM 475 با استفاده از یک شتاب‌سنج سه‌جهته و بر اساس استاندارد بین‌المللی ارتعاش ISO 2631-1، مشخص شد که کمترین میزان ارتعاش مربوط به جاده آسفالت با پایین‌ترین دور و دنده و بیشترین میزان ارتعاش مربوط به جاده خاکی و با بیشترین دور موتور و نسبت دنده بود. در همه دوره‌های موتور و نسبت دنده‌های مورد بررسی، ارتعاش کل بدن در جاده خاکی از جاده آسفالت بیشتر بود. با تعیین مدت زمان مجاز مواجهه، مدت زمان حد مراقبت و واکنش کاربر، مشخص گردید که کاربر تراکتور مورد نظر در برخی شرایط باید کمتر از ۸ ساعت رانندگی کند. بنابراین پیشنهاد می‌شود دور موتور و نسبت دنده پایین‌تری برای رانندگی بر روی جاده خاکی انتخاب شود. از آن‌جا که حداکثر ارتعاش مجاز صندلی برای رانندگی تراکتور ITM

475 به مدت ۸ ساعت برابر ۰/۸۵ متر بر مجذور ثانیه است، نیاز است در طراحی تراکتور شرایطی لحاظ شود که حداکثر ارتعاش به کمتر از این میزان رسانده شود.

از آن‌جا که کاهش ارتعاش تمام بدن موجب افزایش مدت زمان مجاز مواجهه کاربر می‌شود، بازطراحی صندلی تراکتور مورد بررسی می‌تواند اثربخش باشد. می‌توان صندلی تراکتور را به یک سامانه تعلیق مناسب تجهیز نمود تا ارتعاشات تمام بدن کاهش یابد. همچنین، طراحی یک کابین مناسب با سامانه تعلیق مناسب برای کاربر تراکتور، راهی دیگر برای کاهش ارتعاشات تمام بدن تراکتور و بنابراین افزایش مدت زمان مجاز مواجهه شود؛ که با استفاده از مدل‌سازی رگرسیونی می‌توان ارتعاش تمام بدن ناشی از تراکتور مورد بررسی را با دقت بالایی برای دیگر سرعت‌ها پیش‌بینی نمود.

References

- Ahmadi, Y., Ghamari, B., & Kheiralipour, K. (2017). *Determination and Evaluation of seat vibration of ITM 800 Tractor*. 11th Iranian National Congress on Mechanical Biosystems Engineering and Mechanization. September 12-14, Hamedan, Iran. (In Persian).
- Ahmadian, H., Hassan-Beygi, S. R., & Ghobadian, B. (2014). Investigating a power tiller handle and seat vibration on transportation mode. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 16(4), 194-206.
- Beigzadeh, Y. (2013). *Investigation and analysis of vibration of motorised backpack sprayer*. M.Sc. Thesis, Mechanical Engineering of Biosystems. Ilam: Ilam University. (In Persian).
- Boshuizen, H. C., Bongers, P. M., & Hulshof, C. T. (1990). Self-reported back pain in tractor drivers exposed to whole-body vibration. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 62(2), 109-115. <https://doi.org/10.1007/BF00383586>
- Dahham, G. A., Tawfik, S., & Saleh, S. M. (2019). Practical Study for the Effect of Speed, Direction of Acceleration and Type of Machine on Vibrations Transferred to the Steering Wheel Horticulture Tractor Type (Goldoni). *Engineering*, 11(1), 48-58. <https://doi.org/10.4236/eng.2019.111005>
- Faraji, H., Heidarbeigi, K., & Samadi, S. (2021). Characterization of vibration and noise pollution of SI engine fueled with magnetized ethanol-gasoline blends by time-frequency methods. *Noise & Vibration Worldwide*, 52(11). <https://doi.org/10.1177/09574565211030704>
- Golmohammadi, R. (2010). *Noise and Vibration Engineering*. (4th ed). Hamadan: Daneshjou Publication. (In Persian).
- Iranian National Standard No. 14133. (2011). *Agricultural wheeled tractors and farm machineries-Measuring total vibration operator body*. (1st ed). (In Persian).
- ISO 2631-1. (1997). *Mechanical vibration and shock evaluation of human exposure to whole-body vibration*, ISO International standard.
- Jahanbakhshi, A., Ghamari, B., & Heidarbeigi, K. (2016). Effect of engine rotation speed and gear ratio on the acoustic emission of John Deere 1055I combine harvester. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*,

- 18(3), 106-112.
11. Jahanbakhshi, A., Ghamari, B., & Heidarbeigi, K. (2017). Assessing acoustic emission in 1055I John Deere combine harvester using statistical and artificial intelligence methods. *International Journal of Vehicle Noise and Vibration*, 13(2), 105-117. <https://doi.org/10.1504/IJNVN.2017.10008785>
12. Jahanbakhshi, A., Ghamari, B., & Heidarbeigi, K. (2020). Vibrations analysis of combine harvester seat in time and frequency domain. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 14(1), 6251-6258. <https://doi.org/10.15282/jmes.14.1.2020.04.0489>
13. Jahanbakhshi, A., & Heidarbeigi, K. (2019). Analysis and prediction of noise pollution of garden tractor using statistical methods, artificial intelligence and ANFIS. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 50(3), 499-512. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/IJBSE.2019.274185.665148>
14. Maleki, A. (2008). *Analysis, simulation and evaluation of human and tractor vibration*. Ph.D. Dissertation. Mechanical Engineering of Agricultural Machinery. Tehran: University of Tehran. (In Persian).
15. Melemez, K., Tunay, M., & Emir, T. (2013). The role of seat suspension in whole-body vibration affecting skidding tractor operators. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 11(2), 1211-1215.
16. Mohammadi, M., Mirzaee, R., & Ghal Jehi, M. (2009). *Investigation of amount of vibration transmitted to the tractor drivers in Zahedan and prevalence of musculoskeletal disorders based on Nordic questionnaire in 2008*. Esfahan: 2nd Conference on health, safety and environment; 7-8 October. (In Persian).
17. Nasiri, P., Beheshti, M. H., & Hajizadeh, R. (2014). Evaluation of exposure time of tiller operators to vibration. *Sound and Vibration*, 3(6), 66-74. (In Persian).
18. Nasiri, P., Mohammadi, A., Beheshti, M. H., Azam, K., & Hajizadeh, R. (2013). Evaluation of Massey Ferguson Model 165 Tractor Drivers exposed to whole-body vibration. *Journal of Health and Safety at Work*, 3(3), 55-62. (In Persian).
19. Sanai, G., Ghazaei, S., Zia Zarifi, A., & Habibi, A. (1995). Occupational contact limits of pathogens, *Ministry of Health and Medical Education*, 327-340. (In Persian).
20. Taghizade Alisaraee, A., Tavakoli Hashjin, T., & Ghobadian, B. (2007). Investigation of vibration of seat of U650 tractor. *Iranian Journal of Agriculture Science*, 38(4), 571-580. (In Persian).
21. Taghizade Alisaraee, A. (2011). *Investigation of parameters of vibration signal of MF 399 Tractor by diesel and biodiesel fuels*. Ph.D. Dissertation. Tehran: Tarbiat Modares University. (In Persian).
22. Tewari, V. K., Dewangan, K. N., & Karmakar, S. (2004). Operator's fatigue in field operation of hand tractors. *Biosystems Engineering*, 89(1), 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2004.05.006>



Technical Evaluation of Three Methods of Manual, Semi-mechanized, and Mechanized Peanut Harvesting in Moghan

J. Taghinazhad^{1*}, S. A. Rahmani²

1- Academic member, Department of Agricultural Engineering Research, Ardabil Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Ardabil, Iran

2- Academic member, Department of Agricultural Engineering Research, AREEO, Tehran, Iran

(*- Corresponding Author Email: j.taghinezhad@areeo.ac.ir)

<https://doi.org/10.22067/jam.2022.74048.1079>

Received: 07 December 2021

Revised: 05 January 2022

Accepted: 18 January 2022

Available Online: 18 January 2022

How to cite this article:

Taghinazhad, J., & Rahmani, S. A. (2023). Technical Evaluation of Three Methods of Manual, Semi-mechanized, and Mechanized Peanut Harvesting in Moghan. *Journal of Agricultural Machinery*, 13(2), 239-247. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jam.2022.74048.1079>

Introduction

The harvesting stage is the most crucial phase in peanut production. In other words, one of the critical stages in producing this product is the harvest stage. Although it has its difficulties, this stage is associated with significant losses, which experts attribute to the high economic value of peanuts. In recent years, farmers in the Moghan Plain have also started considering this product due to the special conditions of the Iranian economy. In 2020, this study investigated three methods of peanut harvesting in two stages: manual, tractor-mounted thresher (semi-mechanized), and harvesting with a pull-type combine. The first stage involves the complete removal of the plants from the soil, while the second stage involves drying and separating the peanut pod from the plant in Moghan.

Methods and Materials

The experiment followed a split-plot design in the form of randomized complete blocks with four replications. The main plot consisted of soil moisture levels at harvest time, which were tested at three different levels: a1- 21%, a2- 18%, and a3- 15%. The sub-plot involved testing the separation of peanut pods from the plant using three different methods: b1- combine harvesting, b2- harvesting with a tractor-mounted thresher, and b3- manual harvesting. The study evaluated important harvest indicators such as quantitative loss (first and second-stage losses), actual field capacity, harvest time, and the number of required laborers. The results led to the identification of the best harvesting system.

Results and Discussion

The study revealed that the optimal soil moisture content for the initial stage of harvest was 18%. For most parameters, there was a significant difference observed among treatments at the 1% level. The pull-type combine method had the highest farm capacity with a maximum of 0.46 ha per hour, while the manual harvesting method had the lowest capacity with a minimum of 0.006 ha per hour. The total losses ranged between 5.95% and 10.58%, with the manual harvesting method exhibiting the lowest loss and the pull-type combine method showing the highest loss. Furthermore, the manual harvesting method required more labor compared to the other methods.

Conclusion

Based on the obtained results, it is recommended to use a pull-type combine for the early harvesting of peanuts and a manual method for obtaining high-quality peanuts in the Moghan region.

Keywords: Combine, Harvesting method, Peanut losses, Yield

مقاله پژوهشی

جلد ۱۳، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۲، ص ۲۴۷-۲۳۹

ارزیابی فنی سه روش برداشت دستی، نیمه‌مکانیزه و مکانیزه‌ی بادام‌زمینی در مغان

جبرائیل تقی نژاد^{۱*}، صفت اله رحمانی^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۲۸

چکیده

مرحله برداشت از مهم‌ترین مراحل تولید بادام‌زمینی است. برداشت بادام‌زمینی به‌صورت دو مرحله‌ای است: مرحله اول شامل درآوردن کامل بوته‌ها از خاک است که به‌صورت یکسان انجام شد و مرحله دوم خشک‌کردن و جداکردن غلاف بادام‌زمینی از بوته گیاهی است. در این پژوهش، سه روش برداشت بادام‌زمینی در مرحله دوم بررسی شد. آزمایش بر پایه طرح کرت‌های خردشده در قالب بلوک‌های کامل تصادفی در چهار تکرار انجام شد. کرت اصلی شامل میزان رطوبت خاک در زمان برداشت در سه سطح: $a_1-21\%$ ، $a_2-18\%$ و $a_3-15\%$ و کرت فرعی شامل جداکردن غلاف بادام‌زمینی از بوته گیاهی در سه سطح: b_1 - استفاده از کمباین کششی مخصوص بادام‌زمینی، b_2 - کوبش با خرمن‌کوب پشت تراکتوری، b_3 - روش دستی بود. پارامترهای اندازه‌گیری‌شده شامل ظرفیت مزرعه‌ای موثر، زمان موردنیاز برداشت، درصد تلفات مرحله اول و دوم برداشت، درصد تلفات کل و تعداد کارگر مورد نیاز بود. نتایج نشان داد مناسب‌ترین محتوی رطوبتی خاک برای شروع برداشت مرحله اول 18% بود. تفاوت اکثر پارامترها در میان تیمارها در سطح یک درصد معنی‌دار بودند. بیشترین و کمترین ظرفیت مزرعه‌ای موثر به‌ترتیب برای کمباین کششی و روش برداشت دستی برابر با 0.46 و 0.06 هکتار در ساعت بود. کمترین و بیشترین تلفات کل به‌ترتیب با $5/95$ و $10/58$ درصد مربوط به روش دستی و برداشت با کمباین کششی مخصوص بادام‌زمینی بود. بنابراین با توجه به نتایج به‌دست‌آمده کمباین مخصوص کششی برای برداشت زودهنگام بادام‌زمینی و روش دستی از لحاظ کیفیت مناسب محصول به‌دست‌آمده برای منطقه توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: بادام‌زمینی، روش برداشت، کمباین کششی، عملکرد

مقدمه

بادام‌زمینی $43-55$ درصد و میزان پروتئین آن $25-28$ درصد است (Reddy, Reddy, & Anbumozhi, 2003) پروتئین بادام‌زمینی می‌تواند نقش مهمی در بهبود تغذیه مردم کشورهای فقیر داشته باشد. پوست آن نیز به‌عنوان سوخت، تولید کمپوست و مقوا کاربرد دارد. کنجاله بادام‌زمینی و علوفه آن برای تغذیه دام و طیور کاربرد دارد (Safarzadeh Vishkaei, 2006).

در سطح جهان، سالانه $25/7$ میلیون تن بادام‌زمینی از 21 میلیون هکتار زمین زراعی تولید می‌شود که آسیا با داشتن $17/9$ میلیون تن حدود 70 درصد از تولید این محصول را به خود اختصاص داده است. آفریقا و آمریکا نیز به‌ترتیب با $5/2$ و $2/6$ میلیون تن حدود 10 و 20 درصد از تولید این محصول را دارند. در کشور ما تا چند سال قبل، رتبه اول کشت بادام‌زمینی مربوط به شهرستان آستانه‌اشرفیه (استان گیلان) بود که میانگین عملکرد بادام‌زمینی آن حدود 3400 کیلوگرم در هکتار با میانگین سطح زیر کشت حدود 2555 هکتار بوده گزارش شده است (Emadi, Nikkhah, Khojastehpour, &)

بادام‌زمینی گیاهی است که در مناطق گرمسیر و نیمه‌گرمسیر کشت می‌شود و از نظر کیفیت روغن و پروتئین بسیار غنی بوده و در روغن‌گیری و مصارفی مانند آجیل، در وعده غذایی انسان‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. این گیاه بوته‌ای، یک‌ساله و از خانواده نخودیان و از جنس آراچیز (Arachis) و دارای یک ریشه اصلی و مستقیم می‌باشد (Blum, 1999). به‌طور کلی این محصول بیشتر با هدف تولید روغن و پروتئین کشت می‌شود که میزان روغن

۱- استادیار بخش تحقیقات فنی و مهندسی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل (مغان)، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اردبیل، ایران
۲- استادیار گروه اقتصادی سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

(*) نویسنده مسئول: Email: j.taghinezhad@areeo.ac.ir
<https://doi.org/10.22067/jam.2022.74048.1079>

شده و کیفیت آن دارد، مرحله برداشت می‌باشد (Gulluoghlu, 2014). (Bakal, Onat, Kurt, & Arioglu, 2016; Zou et al., 2019). عملیات برداشت بادام زمینی برای به‌دست آوردن حداکثر عملکرد، درجه و کیفیت محصول به دلیل طبیعت باردهی غیرمحدود آن بسیار حائز اهمیت است (Jordan, Beasley, & Calhoun, 2008). این مرحله از تولید محصول بادام‌زمینی همانند برخی از گیاهان لیفی بسیار دشوار بوده و همراه با تلفات می‌باشد (Sharifi, Abbasi, & Fallah, 2015). تلفات علاوه بر هزینه‌های ناشی از کاهش درآمد به واسطه از دست دادن محصول، هزینه‌های پنهان دیگری نیز از جمله از هزینه آب، زمین، انرژی و سایر منابع مصرفی برای کاشت و داشت محصول از دست‌رفته را نیز به دنبال دارد (FAO, 2015).

در پژوهشی که توسط سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد با عنوان "آنالیز تلفات غذایی: علل و راه‌حل‌ها؛ مطالعه موردی زنجیره تولید محصول بادام زمینی در کشور آفریقایی مالاوی" انجام یافته، بررسی تلفات زنجیره تولید این محصول در شش مرحله درآوری غلاف‌ها از داخل خاک، خشک کردن، جداسازی غلاف از پگ، حمل غلاف‌ها، انبارداری و غلاف‌کنی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این پژوهش نشان داد که بیشترین تلفات کمی مربوط به مراحل انبارداری و جداسازی غلاف‌ها از پگ‌ها به ترتیب با مقادیر ۱۵ و ۱۴ درصد و کمترین تلفات کمی مربوط به مرحله حمل با مقدار ۱/۵ درصد می‌باشد. در این پژوهش علت بالا بودن تلفات در مرحله برداشت (جداسازی غلاف‌ها از پگ‌ها)، با توجه به برداشت دستی، نبود ماشین‌آلات برداشت نهایی در این کشور و استفاده متداول از کودکان زیر سن قانونی و نیروی کار اجاره‌ای غیرقابل اعتماد و وجود علف هرز فراوان بیان شده است (FAO, 2018). محققین در پژوهشی ضمن تحلیل اقتصادی با مقایسه تلفات برداشت بادام‌زمینی دو روش ماشینی و دستی نشان دادند به‌جز درصد غلاف‌های حفر نشده (موجود در سطح خاک)، بقیه متغیرها اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۱٪ داشتند. مجموع درصد تلفات غلاف‌ها در برداشت دستی و ماشینی به ترتیب ۳/۴۸۷، ۲۰/۲۳ درصد گزارش کردند. همچنین نتایج نشان داد، برداشت بادام‌زمینی در محتوی رطوبت خاک ۱۹/۹٪ (لومی-رسی) کمترین درصد تلفات را داشتند. نتایج بررسی اقتصادی نشان داد که برداشت ماشینی بادام‌زمینی (استفاده از خرمن‌کوب پشت تراکتوری) نسبت به برداشت دستی، باعث کاهش هزینه‌های برداشت و افزایش هزینه‌های تلفات می‌گردد. مقایسه هزینه‌های کاهشی یا افزایشی در روش‌های برداشت ماشینی نشان داد، استفاده از این برداشت‌کننده باعث افزایش خسارت می‌شود و استفاده مجدد از آن با شرایط حاضر برای منطقه مورد مطالعه توصیه نمی‌گردد (Azmoudeh Mishamandani, Navid, Abdollahpour, & Moghaddam Vahed, 2013). هدف از این پژوهش بررسی فنی

(Peyman, 2014). درحالی که در سال زراعی ۱۳۹۸ رتبه اول سطح زیرکشت بادام‌زمینی با افزایش چشمگیر (حدود ۷۰۰۰ هکتار) در شهرستان پارس‌آباد مغان اتفاق افتاد که با متوسط عملکرد ۴۳۰۰ کیلوگرم در هکتار بیش از ۳۰۰۰ تن محصول تولید گردید. کشت بادام‌زمینی از سال زراعی ۹۱-۹۰ در الگوی کاشت منطقه مغان قرار گرفته است و به دلیل سازگاری مطلوب با شرایط آب‌وهوایی مغان و صرفه اقتصادی بالا، مورد استقبال کشاورزان قرار گرفته است. با توجه به رشد جمعیت، افزایش تولید این محصول و کاهش تلفات آن در جلوگیری از واردات این محصول اهمیت ویژه‌ای دارد. در حال حاضر کاشت بادام‌زمینی و بیشتر مراحل داشت این محصول در منطقه مغان به‌صورت مکانیزه در کوتاه‌ترین زمان مناسب و صرفه اقتصادی بالا انجام می‌شود. ولی روش‌های برداشت مختلفی در بین کشاورزان مرسوم است که هرکدام از این روش‌ها مزایا و معایب خاصی دارند. از طرفی تلفات بادام‌زمینی در مرحله برداشت بیشترین تلفات محصول را به خود اختصاص داده است بنابراین کاهش تلفات در این مرحله ضروری است و این امر مستلزم برداشت به‌موقع محصول، جداسازی غلاف بادام‌زمینی از بوته گیاهی با کمترین تلفات، به‌دست آوردن محصول با کیفیت بالا و انتخاب روش مناسب برداشت است. همچنین بر اساس تحقیقات انجام‌شده در نقاط مختلف دنیا، عملکرد قابل‌حصول بادام‌زمینی و سایر فرآورده‌های آن و نیز میزان افت محصول در حین برداشت، تابعی از زمان و روش برداشت است. میزان رطوبت مناسب دانه در زمان برداشت به دستگاه‌ها و ماشین‌های برداشت مورد استفاده بستگی دارد. عملیات متداول برداشت بادام‌زمینی در منطقه طی دو مرحله بیرون کشیدن ریشه‌های حاوی پگ (Peg) به‌همراه غلاف و مرحله بعدی جداسازی غلاف از پگ می‌باشد. مرحله نخست فرایند برداشت با استفاده از دستگاهی با تیغه‌های V-شکل انجام می‌گردد. این تیغه‌ها در خاک بستر گیاه نفوذ کرده و با شل کردن خاک و قطع ریشه اصلی زیر غلاف، بوته‌های گیاه به‌همراه پگ و غلاف‌های محصول روی هر ردیف قرار گرفته سپس توسط نیروی کارگری از خاک شل بیرون کشیده شده و در معرض نور آفتاب قرار می‌دهند تا با خشک شدن به رطوبت مد نظر برسد. در مرحله نهایی عملیات برداشت، جداسازی غلاف‌های حاوی مغز بادام از پگ‌های بوته گیاه با سه روش متفاوت انجام می‌گیرد (Taghinezhad, 2019).

اولویت‌های به‌کارگیری روش‌های مکانیزه در مراحل تولید محصول با توجه به شرایط فنی، اقتصادی و اجتماعی هر جامعه مشخص می‌شود. عموماً در کشورهای توسعه‌یافته کاربرد مکانیزاسیون برای کاهش هزینه‌ها است اما در کشورهای در حال توسعه برای افزایش تولید است (Reshad Sedghi & Zabolestani, 2003). یکی از مراحل مهم تولید این محصول که به شدت هزینه‌بر و نیازمند کار کارگری بیشتری است و تاثیر زیادی بر بازارپسندی و قیمت تمام

قالب بلوک‌های کامل تصادفی در چهار تکرار اجرا شد. کرت اصلی شامل میزان رطوبت خاک در زمان برداشت در سه سطح: $a_1 - 15$ درصد، $a_2 - 18$ درصد و $a_3 - 21$ درصد و کرت فرعی نیز شامل روش جداسازی غلاف بادام‌زمینی از بوته‌ها در سه سطح: $b_1 -$ استفاده از کمباین کششی مخصوص (ساخت کشور ترکیه مدل BACANAKLAR)، $b_2 -$ کوبش با خرمن‌کوب پشت تراکتوری (شرکت دزفول ماشین)، $b_3 -$ روش دستی برداشت محصول بود. سطوح تیمار رطوبت خاک بر مبنای تحقیقات محققین در استان گیلان (انتخاب دو سطح رطوبتی) و بررسی وضعیت خاک منطقه مغان در زمان برداشت انتخاب شده است (Azmoudeh Mishamandani et al., 2013). در جدول ۱ مشخصات ماشین‌های استفاده شده در روش‌های مختلف برداشت بادام‌زمینی آورده شده است. شکل ۱ مرحله اول و شکل ۲ و ۳ مرحله دوم برداشت ماشینی بادام‌زمینی را در منطقه مغان نشان می‌دهد.

روش‌های مختلف برداشت بادام‌زمینی با محتوی رطوبتی متفاوت برای انتخاب روش مناسب‌تر و ارائه راهکارهای لازم برای کشاورزان منطقه مغان است.

مواد و روش‌ها

این پژوهش برای ارزیابی و مقایسه روش‌های مختلف برداشت بادام‌زمینی در منطقه مغان انجام شد. برداشت بادام‌زمینی در دو مرحله انجام می‌شود مرحله اول شامل درآوردن کامل بوته‌ها از خاک است که تابع محتوی رطوبتی خاک است. مرحله دوم نیز شامل خشک کردن و جدا کردن غلاف‌های بادام‌زمینی از بوته گیاهی است که بیشترین هزینه را برای کشاورزان دارد. از مرحله اول برداشت حدود یک هفته زمان لازم است تا بوته‌ها و غلاف‌ها رطوبت اولیه را به همراه محتوی رطوبتی خاک از دست بدهند تا مرحله دوم برداشت شروع شود. در این راستا، آزمایشی بر پایه طرح کرت‌های خردشده در

جدول ۱- مشخصات ماشین‌های استفاده‌شده در سه روش مختلف برداشت بادام‌زمینی

Table 1- Characteristics of machines used in three different methods of peanut harvesting

نام ماشین یا ادوات مورد استفاده Machine name or equipment used	کشور سازنده Manufacturing Country	عرض کار Working width (m)	نوع اتصال Connection type	توان کششی مورد نیاز Required drawbar power (hp)
تیغه V شکل V-shaped Blade	ایران Iran	1.5	سوار Mounted	75
بادام‌کن Peanut digger	ترکیه Turkey	2.25	سوار Mounted	>75
کمباین کششی Pull type combine	ترکیه Turkey	3	سوار Mounted	>75
خرمن‌کوب پشت تراکتوری Tractor-mounted thresher	ایران Iran	3	سوار Mounted	75



شکل ۱- کندن ریشه بادام‌زمینی در زیر خاک با بادام‌کن و مکانیزه ردیف کردن

Fig.1. Digging underground peanut roots with fully mechanized removing and aligning peanuts



شکل ۲- کندن ریشه بادامزمینی در زیر خاک توسط تیغه‌های شمشیری (تیغه V شکل)
Fig.2. Digging underground peanut roots with sword blades (V-shaped)



شکل ۳- برداشت نیمه مکانیزه بادامزمینی با خرمن کوب پشت تراکتوری
Fig.3. Semi-mechanized harvesting of peanuts by tractor-mounted thresher



شکل ۴- برداشت مکانیزه بادامزمینی با کمباین کششی مخصوص
Fig.4. Mechanized harvesting of peanuts by special pull type combine

بود. روش‌های اندازه‌گیری این پارامترها در ادامه شرح داده شده است.

این روش‌ها از نقطه نظر تأثیر آن‌ها بر ظرفیت مزرعه‌ای موثر، زمان مورد نیاز برداشت، درصد تلفات مرحله اول و دوم برداشت، درصد تلفات کل و تعداد کارگر مورد نیاز برای برداشت محصول بادامزمینی

درصد رطوبت خاک

برای اندازه‌گیری درصد محتوی رطوبتی خاک، نمونه‌های خاک در عمق‌های معین (تا جایی که غلاف‌های بادام‌زمینی در خاک موجود است) با اوگر نمونه‌برداری و در آزمایشگاه وزن شده و در آونی با درجه حرارت ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۲۴ ساعت قرار گرفت. سپس نمونه خاک خشک‌شده را توزین و در نهایت با استفاده از رابطه (۱) رطوبت خاک بر مبنای وزن خشک به‌دست آمد.

$$MC = \frac{W_w - W_d}{W_d} \times 100 \quad (1)$$

که در این رابطه MC درصد رطوبت، W_w = جرم خاک مرطوب و W_d = جرم خاک خشک برحسب گرم (g) است.

ظرفیت مؤثر مزرعه‌ای

ظرفیت مؤثر مزرعه‌ای ماشین‌ها و سیستم‌های مختلف برداشت بادام‌زمینی بر مبنای سطح برداشت‌شده و زمان مورد نیاز و با استفاده از رابطه (۲) محاسبه گردید (Almassi, Kiani, & Loveimi, 2001).

$$FC = \frac{A}{T_t} \quad (2)$$

که در آن A سطح برداشت‌شده برحسب هکتار، T_t جمع کل زمان مفید و غیرمفید صرف‌شده برای برداشت بادام‌زمینی برحسب ساعت و FC ظرفیت مؤثر مزرعه‌ای برحسب هکتار در ساعت است.

اندازه‌گیری میزان تلفات محصول

برای تعیین میزان تلفات کمی در برداشت بادام‌زمینی کافی است بعد از برداشت کامل در هرکدام از روش‌ها، با انداختن تصادفی کادر فلزی ۵۰×۵۰ سانتی‌متر (در ۱۰ نقطه مزرعه) که دور از حاشیه و در مجاورت مسیر ارزیابی روش‌های برداشت است با جمع‌آوری بادام‌زمینی‌های موجود در خاک و روی زمین، نهایتاً تلفات کمی در هکتار برآورد شد. تلفات بادام‌زمینی شامل آن‌هایی است که بعد از درآوردن بوته‌ها از خاک و همچنین برداشت کامل بادام‌زمینی در درون یا روی خاک باقی می‌مانند، با به عبارتی در برداشت ماشینی از دسترس کمباین خارج می‌شود. وزن دانه‌های جمع‌آوری‌شده بر زمین به‌عنوان تلفات کل بادام‌زمینی در نظر گرفته شد. برای این منظور با استناد با استفاده از روابط موجود در زمینه محاسبه تلفات گندم و تعمیم آن برای محصول بادام‌زمینی، با توزین غلاف‌های بادام‌زمینی میزان تلفات کل بادام‌زمینی و عملکرد به‌ترتیب از روابط (۳) و (۴) محاسبه شد (Padasht Dehgahei, 2016; Behroozi-Lar, 2000).

$$P_n = \frac{W_b}{W_a + W_b} \times 100 \quad (3)$$

در این‌جا، P_n = درصد تلفات کل غلاف بادام‌زمینی (%)، W_a = وزن کل غلاف‌های موجود در درون خاک که به سطح خاک آورده می‌شود در واحد سطح (g)، W_b = وزن غلاف‌های موجود که درون خاک می‌ماند و از دسترس خارج می‌شود در واحد سطح (g).

$$Y_t = \frac{(W_a + W_b)}{n \times A_k} \times 10 \quad (4)$$

در این رابطه، n = تعداد دفعات کادراندازی (در اینجا برابر ۱۰ است)، A_k = مساحت کادر نمونه‌برداری (در اینجا ۰/۲۵ مترمربع)، Y_t = کل غلاف‌های جمع‌آوری‌شده در واحد سطح (kg ha^{-1}).

آنالیز داده‌ها

داده‌های خام قبل از تجزیه توسط آزمون گراب برای شناسایی داده‌های پرت و نرمال بودن توزیع داده‌ها توسط آزمون شاپیرو-ویلک (Shapiro & Wilk, 1965) مورد بررسی قرار گرفت. سپس تجزیه داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۴ (IBM Corporation, 2016) انجام و مقایسه میانگین‌ها از طریق آزمون دانکن انجام شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس نشان داد تفاوت سه روش برداشت از نظر تلفات کل برداشت (مجموع تلفات مرحله اول و دوم) در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). تلفات و ضایعات محصول از عوامل مهم در انتخاب روش برداشت هر محصولی از جمله بادام‌زمینی است. مطابق جدول ۳ مقایسه میانگین تلفات برداشت در مراحل مختلف نشان داد کمترین مقدار تلفات در روش برداشت دستی به‌ترتیب در مرحله اول، دوم و کل برابر با ۲/۸۹، ۳/۰۶ و ۵/۹۵ درصد بود. بیشترین تلفات کل بادام‌زمینی در روش برداشت با کمباین مخصوص بادام‌زمینی با ۱۰/۵۹ درصد بود. متوسط ضایعات برداشت بادام‌زمینی از میان روش‌های مورد بررسی در این تحقیق مربوط به برداشت با خرمن‌کوب معمولی برابر با ۸/۶۸ درصد بود (جدول ۴).

در برداشت بادام‌زمینی علاوه بر مراحل رسیدگی غلاف‌ها محتوی رطوبتی خاک یکی از فاکتورهای مهم برداشت است. از لحاظ محتوی رطوبت خاک فقط مرحله اول برداشت مؤثر بود. کمترین مقدار تلفات و ضایعات بادام‌زمینی در این مرحله زمانی حادث شد که رطوبت خاک در زمان برداشت ۱۸ درصد بود. به‌عبارتی مناسب‌ترین رطوبت خاک برای درآوردن بوته‌های بادام‌زمینی از خاک در محتوی رطوبت تیمار دوم (۱۸ درصد) با ۲/۹۸ درصد تلفات در مرحله اول برداشت به‌دست آمد (جدول ۳).

جدول ۲- آنالیز واریانس پارامترهای مورد بررسی و تلفات روش‌های برداشت در محتوی رطوبتی مختلف

Table 2- Variance analysis of the studied parameters and losses of harvesting methods in different moisture content

منابع تغییر (S.O.V)	درجه آزادی (D.F)	میانگین مربعات (MS)				تعداد کارگر مورد نیاز Number of workers required (Per hr ha ⁻¹)
		تلفات مرحله اول برداشت First stage harvest losses (%)	تلفات مرحله دوم برداشت Second stage harvest losses (%)	تلفات کل Total losses (%)	ظرفیت مزرعه- ای موثر Field capacity (ha hr ⁻¹)	
تکرار (R)	3	0.76	0.69	2.32	0.43	45.03
محتوی رطوبت خاک Soil moisture content	2	0.26*	0.32 ^{ns}	1.18 ^{ns}	0.45 ^{ns}	49.77 ^{ns}
خطا E(a)	6	0.024	.039	0.19	0.006	365.03
روش برداشت Harvest method	2	0.64**	53.08**	65.21**	0.63**	202647.11**
محتوی رطوبت × روش برداشت Soil moisture content × Harvest method	4	0.014 ^{ns}	0.024 ^{ns}	0.016 ^{ns}	0.0001 ^{ns}	180.44 ^{ns}
خطا E(b)	6	0.25	0.144	0.53	0.0004	146.37
جمع کل Total	35	-	-	-	-	-
ضریب تغییرات (C.V%)		6.83	6.25	4.86	1.20	3.24

** اختلاف معنی‌دار در سطح ۱ درصد، * اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد و ns عدم وجود اختلاف معنی‌دار

*, **, Significant at 5% and 1% probability levels, respectively and ^{ns} no Significant

جدول ۳- مقایسه میانگین پارامترهای مورد بررسی در میزان محتوی رطوبت مختلف خاک

Table 3- Mean comparison of the studied parameters in different soil moisture content

محتوی رطوبت خاک Soil moisture content (%)	تلفات مرحله اول برداشت First stage harvest losses (%)	تلفات مرحله دوم برداشت Second stage harvest losses (%)	تلفات کل Total losses (%)	ظرفیت مزرعه‌ای موثر Field capacity (ha hr ⁻¹)	تعداد کارگر مورد نیاز Number of workers required (Per hr ha ⁻¹)
21	3.26 a	5.38 a	8.64 a	1.15 a	294.66 a
18	2.98 b	5.06 a	8.04 a	1.21 a	293.33 a
15	3.20 ab	5.30 a	8.50 a	1.13 a	290.66 a

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشترک از نظر آزمون دانکن در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

Means in each column followed by similar letter(s) are not significantly different at 5% probability level, using Dunkans Test.

تلف شده است. معمولاً هنگام کار با کمباین استفاده از عرض کامل ماشین غیرممکن است و همیشه مقداری همپوشانی وجود دارد. منتهی در برداشت بادام‌زمینی و استفاده از کمباین کشتی به دلیل جمع‌آوری بوته‌های بادام‌زمینی در مرحله اول توسط نیروی کارگری شرایط متفاوتی را به وجود می‌آورد که عرض کار تقریباً برابر و حتی در برخی موارد عرض کار مفید بیشتر از عرض کار تنوری کمباین به کار گرفته می‌شود که شرایط منطقه، سطح آموزش کاربران و خدمات ارائه شده برای ماشین‌ها به شدت راندمان مزرعه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. با در نظر گرفتن این عوامل و ارزیابی یکسان روش‌های برداشت، بیشترین ظرفیت مزرعه‌ای مؤثر در مرحله دوم مربوط به کمباین

نتایج نشان داد تفاوت سه روش برداشت از نظر ظرفیت مزرعه‌ای در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود ولی از لحاظ تأثیر محتوی رطوبت خاک بر ظرفیت مزرعه‌ای اختلاف آماری معنی‌داری بین تیمارها مشاهده نگردید (جدول ۲). منتهی ظرفیت مزرعه‌ای تیمار محتوی رطوبت ۱۸ درصد به دلیل راحتی کار ابزار مکانیکی در داخل خاک با ۱/۲۱ هکتار در ساعت بیشترین بود (جدول ۳). برآورد و مشاهدات نگارنده نشان داد بادام‌زمینی از جمله محصولات است که طول زمان برداشت (شروع تا پایان برداشت) در خوش‌بینانه‌ترین حالت ۱۰-۱۲ روز طول می‌کشد تا فرایند برداشت و کیسه‌گیری به اتمام برسد. ظرفیت مزرعه‌ای مؤثر تابعی از عرض کار، سرعت پیشروی و زمان

مزرعه‌ای مؤثر کمباین مخصوص برداشت بادام‌زمینی می‌توان به عرض کار بیشتر و روش تقریباً مکانیزه کامل نسبت به دو روش دیگر برداشت اشاره کرد. یافته‌های محققین در زمینه کاربرد روش برداشت دستی در مقایسه با روش‌های مکانیزه و نیمه‌مکانیزه دیگر محصولات زراعی گزارش مشابهی ارائه کرده‌اند (Rahmati, Sohrabondi, Khodadadi, & Razdadi, 2014).

مخصوص برداشت بادام‌زمینی با ۰/۴۶ هکتار در ساعت بود. کمترین آن مربوط به روش دستی با ۰/۰۰۶ هکتار در ساعت بود که تقریباً این مرحله از برداشت با متوسط ۲۵-۲۰ کارگر با ۸ ساعت کاری یک هکتار بادام زمینی جمع‌آوری گردید. همچنین ظرفیت مزرعه‌ای مؤثر در مرحله دوم برداشت در استفاده از خرمن‌کوب معمولی برابر با ۰/۱۵ هکتار در ساعت محاسبه شد (جدول ۴). از دلایل بالا بودن ظرفیت

جدول ۴- مقایسه میانگین پارامترهای مورد بررسی در روش‌های مختلف برداشت

Table 4- Mean comparison of the studied parameters in different harvesting methods

روش برداشت Harvest method	تلفات مرحله اول برداشت First stage harvest losses (%)	تلفات مرحله دوم برداشت Second stage harvest losses (%)	تلفات کل Total losses (%)	ظرفیت مزرعه‌ای مؤثر Field capacity (ha hr ⁻¹)	تعداد کارگر مورد نیاز Number of workers required (Per hr ha ⁻¹)
کمباین کششی Harvesting with pull type combine	3.32 a	7.25 a	10.58 a	0.46 a	191.33 c
کوبیدن با خرمن‌کوب پشت تراکتوری Harvesting with tractor- mounted thresher	3.24 a	5.42 b	8.65 b	0.15 b	248/00 b
برداشت دستی Harvesting with labor force	2.89 b	3.06 c	5.95 c	0.006 c	439.32 a

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشترک از نظر آزمون دانکن در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

Means in each column followed by similar letter(s) are not significantly different at 5% probability level, using Dunkans Test.

هکتار مناسب است. از طرفی برداشت ماشینی سبب برداشت محصول در کوتاه‌ترین زمان و به‌صورت نیمه‌مکانیزه گردید. معمولاً کشاورزان با سطح کاشت بالاتر تمایل بیشتری به روش مکانیزه دارند تا محصول خود در اولین فرصت برداشت و زمین خود را برای کاشت پاییزه آماده کنند بنابراین استفاده از کمباین کششی را بیشتر ترجیح می‌دهند (جدول ۴).

نتیجه‌گیری

۱- با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، روش برداشت محصول بادام‌زمینی با کمباین کششی مخصوص از نظر ظرفیت مؤثر مزرعه‌ای و صرفه‌جویی در وقت نسبت به روش برداشت دستی و استفاده از خرمن‌کوب معمولی برتری دارد ولی افزایش تلفات و ضایعات محصول را به‌ترتیب با ۴/۶۳ و ۱/۹۳ درصد نسبت به روش دستی و خرمن‌کوب معمولی داشته است. بیشترین ظرفیت مزرعه‌ای مؤثر در مرحله دوم برداشت مربوط به کمباین مخصوص بادام‌زمینی با ۰/۴۶ هکتار در ساعت بود. کمترین آن مربوط به روش دستی با ۰/۰۰۶ هکتار در ساعت بود.

نتایج تجزیه و تحلیل تعداد کارگر مورد نیاز در روش‌های مختلف برداشت بادام‌زمینی در مرحله اول معنی‌دار نبود اما در مرحله دوم در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). مقایسه میانگین نشان داد کمباین کششی با ۱۹۱/۳۳ نفر ساعت در هکتار کمترین نیروی انسانی را در برداشت بادام‌زمینی داشته است ولی برداشت دستی با ۴۳۹/۳۲ نفر ساعت در هکتار بیشترین نیروی کارگری نیاز داشت (جدول ۴). به عبارتی در استفاده از کمباین کششی مقدار نیروی انسانی مورد نیاز به بیش از نصف کاهش می‌یابد به‌طوری که در روش دستی در مجموع هر دو مرحله برداشت با نیروی انسانی انجام می‌گیرد به‌طور متوسط ۵۵-۶۰ نفر کارگر در روز برای هر هکتار موردنیاز است که حدود ۲۵-۲۰ نفر کارگر روز در هکتار برای هر سه روش برداشت بادام‌زمینی به‌طور یکسان در مرحله اول مورد استفاده می‌شود. مشخص شد که در روش برداشت با خرمن‌کوب معمولی ۲۴۸ نفر ساعت در هکتار کار می‌کردند. نتایج کلی تأثیر فاکتورهای مورد بررسی نشان داد برداشت دستی حدود ۳/۷ درصد کاهش تلفات و محصولی با کیفیت مناسب‌تر نسبت به روش‌های ماشینی داشته است منتهی نیاز به زمان کافی و نیروی انسانی بیشتر برای برداشت دارد که بیشتر برای کشاورزان با سطح برداشت کمتر حدود ۱-۳

مخصوص کشتی و از لحاظ کیفیت محصول استحصالی روش دستی برای منطقه مناسب است.

سپاسگزاری

از همکاران معاونت تولیدات گیاهی و اداره فناوری‌های مکانیزه سازمان جهاد کشاورزی استان اردبیل و مدیریت‌های جهاد کشاورزی شهرستان پارس‌آباد به دلیل حمایت و همکاری در اجرای پروژه، صمیمانه سپاسگزاری می‌شود.

- ۲- مناسب‌ترین زمان شروع برداشت مرحله اول بادام‌زمینی در محتوی رطوبت ۱۸ درصد با ۲/۹۸ درصد تلفات در این مرحله بود.
- ۳- علی‌رغم این که تعداد نیروی کارگری مورد نیاز در مرحله اول برداشت به‌طور متوسط ۲۹۰ نفر ساعت در هکتار مورد نیاز برای هر سه روش برداشت تقریباً یکسان بود ولی کمترین و بیشترین نیروی کارگری لازم در مرحله دوم برداشت به‌ترتیب برای کمباین کشتی مخصوص و روش دستی با ۱۹۱/۳۳ و ۴۳۹/۳۲ نفر ساعت در هکتار لازم بود.
- ۴- به‌طور کلی برای برداشت زودهنگام بادام‌زمینی کمباین

References

1. Almassi, M., Kiani, Sh., & Loveimi, N. (2001). *Principles of agricultural mechanization*, Hazrat Masumeh Press, 2, 248.
2. Azmoudeh Mishamandani, A., Navid, H., Abdollahpour, Sh., & Moghaddam Vahed, M. (2013). *Comparison of peanut harvest losses in both machine and manual methods*. 8th National Congress of Agricultural Machinery Engineering (Biosystems) and Mechanization of Iran, Mashhad, Ferdowsi University of Mashhad. (in Persian).
3. Behrooz-Lar, M. (2000). *Principles of Design of Agricultural Machinery*. Scientific Publish Center of Islamic Azad University. Tehran, Iran. (in Persian).
4. Blum, A. (1999). *Towards standard assay of drought resistance in crop plants*. In: J. M. Ribaut & D. Poland. Molecular approaches for the genetic improvement of cereals for stable production in water- limited environments (final report). A strategic planning workshop, 21-25 June 1999. CIMMYT, El Batan, Mexico.
5. Emadi, B., Nikkhah, A., Khojastehpour, M., & Peyman, S. H. (2014). The effect of farm size on energy consumption and input costs of peanut production in Guilan province. *Journal of Agricultural Machinery*, 5(1), 217-227. (in Persian). <https://doi.org/10.22067/jam.v5i1.24894>
6. FAO, (2015). Global Initiative on Food Loss and Waste Reduction. Retrieved from <https://www.fao.org/3/i4068e/i4068e.pdf>
7. FAO. (2018). Food loss analysis: causes and solutions; Case study on the groundnut value chain in the Republic of Malawi. Rome. 50 pp. License: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.
8. Gulluoglu, L., Bakal, H., Onat, B., Kurt, J., & Arioglu, H. (2016). The Effect of Harvesting on Some Agronomic and Quality Characteristics of Peanut Grown in the Mediterranean Region of Turkey. *Turkish Journal of Field Crops*, 21(2), 224-232. <https://doi.org/10.17557/tjfc.20186>
9. IBM Corporation. (2016). SPSS for Windows, version 24. IBM Corp Armonk (NY).
10. Jordan, D., Beasley, J., & Calhoun, S. (2008). *Agricultural practices for peanut growing and harvesting*. American Peanut Council Good Management Practices.
11. Padasht Dehgahei, M. N. (2016). *Study of agronomic and morphological characteristics of peanut genotypes in Guilan province*. Research Report, Oilseeds Research Department, Seed and Plant Breeding Research Institute, Karaj, Iran. (in Persian).
12. Rahmati, M. H., Sohrabondi, G., Khodadadi, M., & Razdadi, A. M. (2014). Technical and economic study of rice harvesting methods in Shirvan Chardavol region. *Journal of Agricultural Machinery*, 4(2), 378-386. <https://doi.org/10.22067/jam.v4i2.34821>
13. Reddy, T. Y., Reddy, V. R., & Anbumozhi, V. (2003). Physiological response of groundnut to drought stress and its amelioration: a critical review. *Plant Growth Regulation*, 41, 75-88. <https://doi.org/10.1023/A:1027353430164>
14. Reshad Sedghi, A., & Zabolostani, M. (2003). *Comparison of two methods mechanized and conventional of direct rice cultivation in terms of product performance and production costs*, East Azarbaijan Research Center for Agriculture and Natural Resources Publications.
15. Safarzadeh Vishkaei, M. N. (2006). *The effect of methanol on the growth and yield of peanuts*. PhD Thesis Islamic Azad University, Research Sciences Branch, Tehran. (in Persian).
16. Shapiro, S. S., & Wilk, M. B. (1965). An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika* 52, 591-611.
17. Sharifi, Gh. J., Abbasi, M. R. & Fallah, S. N. (2015). *Importance of peanut cultivation and its properties*. Entesharate Noruzi. 1st Edition: 44-46.
18. Taghinezhad, J. (2019). Mechanization of peanuts in Moghan plain. Technical Journal. Publishing Committee of the Institute of Technical Research and Agricultural Engineering. Registration number 56307. (in Persian).
19. Zou, Sh., Tseng, Y. C., Zare, A., Rowland, D. L., Tillman, B. L., & Yoon, S. Ch. (2019). Peanut maturity classification using hyperspectral imagery. *Biosystems Engineering*, 188, 165-177. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.10.019>

Contents

Research Articles

Analysis of Workspace and Kinematics of <i>Robot Manipulator</i> for Product Handling in Agricultural Farm	101
S. I. Shariati, M. H. Aghkhani, M. R. Golzarian, A. A. Akbari	
Design and Construction of a High-voltage System to Kill Weeds with a Feedback Mechanism	117
B. Besharati, A. Jafari, H. Mousazadeh, H. Navid	
Thermal and Mechanical Analysis of Rotary Kiln of Activated Carbon Producing Reactor	135
S. Naderi Parizi, R. Alimardani, M. Soleimani, H. Mousazadeh	
Thermal Analysis and Exergy of Linear Fresnel Reflectors for Feasibility of Use in Greenhouse Heating System	147
S. Noroozi, A. Maleki, Sh. Besharati	
Detection of Different Percentages of Palm in Corn Oil with the Help of an Electric Nose	169
Z. Zangeneh Wandi, H. Javadikia, N. Aghili Nategh, L. Naderloo	
Maize Tassel Detection and Counting Using Deep Learning Techniques	181
Sh. Falahat Nejad Mahani, A. Karami	
Detection of <i>Chilo Suppressalis</i> using Smartphone Images and Deep Learning	201
M. Fallah, E. Ghanbari Parmehr	
Evaluation of the Effects of Artificial Light on Some Plant Characteristics in the Design and Construction of a Small-scale Plant Factory	219
P. Shamsi Roodbarsar, S. R. Mousavi Seyedi, D. Kalantari, K. Ghasemi	
Predicting Whole-body Vibration-based on Linear Regression Models and Determining Permissible Exposure Time of Tractor Operator	233
A. Mohammadi, K. Kheiralipour, B. Ghamary, A. Jahanbakhshi, R. Shahidi	
Technical Evaluation of Three Methods of Manual, Semi-mechanized, and Mechanized Peanut Harvesting in Moghan	245
J. Taghinazhad, S. A. Rahmani	

Journal of Agricultural Machinery

Vol. 13

No. 2

2023

Published by: Ferdowsi University of Mashhad, (College of Agriculture), Iran

Editor in charge: Prof. M. R. Modarres Razavi, Dept. of Mechanical Eng. Ferdowsi University of Mashhad

General Chief Editor: Prof. M. H. Abbaspour-Fard, Dept. of Biosystems Eng. Ferdowsi University of Mashhad

Editorial Board:

- Abbaspour-Fard, M. H. Professor, Department of Biosystems Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
- Aboonajmi, M. Associate Professor, Department of Agrotechnology, College of Abouraihan, University of Tehran, Tehran, Iran
- Aghkhani, M. H. Professor, Department of Biosystems Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
- Alimardani, R. Professor, Department of Faculty of College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
- Emadi, B. Adjunct Professor, Department of Chemical and Biological Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada
- Ghazanfari Moghaddam, A. Professor, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran
- Kadkhodayan, M. Professor, Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
- Khoshtaghaza, M. H. Professor, Department of Biosystems Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran. Iran
- Loghavi, M. Professor, Department of Biosystems Engineering, Shiraz University, Iran
- Modarres Razavi, M. Professor, Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
- Mohtasebi, S. S. Professor, Department of Faculty of College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Tehran, Iran
- Nasirahmadi, A. Department of Agricultural Engineering University of Kassel, Nordbahnhofstrasse, Witzenhausen, Germany
- Pourreza, A. Department of Biological and Agricultural Engineering, University of California, Davis, United States of America
- Raji, A. Professor, Department of Agricultural and Environmental Engineering, Faculty of Technology, University of Ibadan, Nigeria
- Rohani, A. Associate Professor, Department of Biosystems Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
- Saiedirad, M. H. Associate Professor, Agricultural Engineering Research Institute, Mashhad, Iran
- Sayasoonthorn, S. Assistant Professor, Department of Farm Mechanics, Faculty of Agriculture, Kasetsart University, Thailand

Publisher: Ferdowsi University of Mashhad

Address: College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

P.O. BOX: 91775-1163

Fax: +98-05138787430

E-Mail: jame@um.ac.ir

Web Site: <http://jame.um.ac.ir>



Ferdowsi University
of Mashhad

Vol. 13

No. 2

2023

Journal of Agricultural Machinery



Iranian Society of
Mechanical Engineers
(ISME)

ISSN: 2228-6829

Contents

Research Articles

- Analysis of Workspace and Kinematics of *Robot Manipulator* for Product Handling in Agricultural Farm** 101
S. I. Shariati, M. H. Aghkhani, M. R. Golzarian, A. A. Akbari

- Design and Construction of a High-voltage System to Kill Weeds with a Feedback Mechanism.....** 117
B. Besharati, A. Jafari, H. Mousazadeh, H. Navid

- Thermal and Mechanical Analysis of Rotary Kiln of Activated Carbon Producing Reactor** 135
S. Naderi Parizi, R. Alimardani, M. Soleimani, H. Mousazadeh

- Thermal Analysis and Exergy of Linear Fresnel Reflectors for Feasibility of Use in Greenhouse Heating System** 147
S. Noroozi, A. Maleki, Sh. Besharati

- Detection of Different Percentages of Palm in Corn Oil with the Help of an Electric Nose.....** 169
Z. Zangeneh Wandji, H. Javadikia, N. Aghili Nategh, L. Naderloo

- Maize Tassel Detection and Counting Using Deep Learning Techniques** 181
Sh. Falahat Nejad Mahani, A. Karami

- Detection of *Chilo Suppressalis* using Smartphone Images and Deep Learning** 201
M. Fallah, E. Ghanbari Parmehr

- Evaluation of the Effects of Artificial Light on Some Plant Characteristics in the Design and Construction of a Small-scale Plant Factory.....** 219
P. Shamsi Roodbarsar, S. R. Mousavi Seyedi, D. Kalantari, K. Ghasemi

- Predicting Whole-body Vibration-based on Linear Regression Models and Determining Permissible Exposure Time of Tractor Operator** 233
A. Mohammadi, K. Kheiralipour, B. Ghamary, A. Jahanbakhshi, R. Shahidi

- Technical Evaluation of Three Methods of Manual, Semi-mechanized, and Mechanized Peanut Harvesting in Moghan** 245
J. Taghinazhad, S. A. Rahmani