Saffron Agronomy & Technology
Homepage: http://saffron.torbath.ac.ir
Vol. 12, No. 3, Fall 2024, p. 327-349

Separating Stigma from Saffron Flower: Mechanized Methods (Review)

Danial Gandomzadeh[1], Mohammad Hossein Saeidirad[2*] and Yeganeh Sabeghi[3]

Article type:
Research Article
Article history:
Submitted: 23 February 2024
Revised: 16 September 2024
Accepted: 1 December 2024
Available Online: 1 December 2024

How to cite this article:
Gandomzadeh, D., Saeidirad, M.H., Sabeghi, Y. 2024. Separating Stigma from Saffron Flower: Mechanized Methods (Review) Saffron Agronomy & Technology, 12(3), 327-349.
DOI: 10.22048/jsat.2024.445321.1525

Abstract

Saffron is recognized as one of the important agricultural products in Iran, but in recent years, its yield production has significantly decreased by 3.42 kilograms per hectare. One of the factors contributing to this decrease is the time-consuming process of harvesting and separating the stigmas from the flowers, which requires approximately 180 to 204 minutes to process 2400 to 2700 flowers. Planting, maintenance, harvesting, and processing saffron stages are done manually, which not only adds value to the product but also raises concerns about microbial and fungal contamination. Various studies have been conducted to separate saffron stigmas from flowers, but so far, there has been no integration of these studies. In this study, different methods of stigma separation are classified into three stages: flower alignment methods before cutting (including human labor, robots, mechanical and airflow mechanisms), methods of cutting flower parts (including pulling out the stigmas, rotational force, and cutting blades), and stigma separation methods (including centrifugal force, friction coefficient, airflow, and porous surfaces). The review and comparison of various saffron stigma separation devices have shown that a combination of image processing techniques, optical sensors, optimized mechanical systems, and the application of airflow is the best method to achieve high precision and quality in stigma separation. These devices benefit from mechanical and suction mechanisms to more advanced systems such as image processing and optical sensors. High-precision image processing methods for identifying the cutting location and optical sensors for accurately detecting the color and shape of the stigmas can increase the speed and accuracy of separation. This combination, along with optimized mechanical systems and the use of airflow as a non-contact method to reduce damage to the stigmas, can help maintain the quality of the final product. This article will review the recent advancements reports by researchers in the field of saffron, particularly in the area of mechanized methods for separating stigmas from fresh saffron flowers. Furthermore, by comprehensively analyzing these methods, their strengths and weaknesses will be discussed, and suggestions for improving the

۱- PostDoc Researcher, Agricultural Engineering Research Department, Khorasan Razavi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Mashhad, Iran
Assistant professor, Department of Mechanical Engineering, National University of Skills (NUS), Tehran, Iran
۲- Associated professor, Agricultural Engineering Research Department, Khorasan Razavi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Mashhad, Iran,
۳- Ph.D Student, Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Corresponding author email: Saiedirad@yahoo.com

© 2022, University of Torbat Heydarieh. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial License (CC BY NC 4.0)
(http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0).

mechanization of the stigma separation process from fresh flowers will be presented.

Keywords: Harvesting; Image Processing; Mechanization; Quality; Saffron; Separation

نشریه زراعت و فناوری زعفران
جلد۱۲، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۳ ص. ۳۴۹-۳۲۷
Homepage: http://saffron.torbath.ac.ir

مقاله پژوهشی

مرورعامل هایی بر روش های مکانیزه جداسازی کلاله از گل زعفران

دانیال گندم زاده[۱]، محمدحسین سعیدی راد[۲]* و یگانه سابقی[۳]

تاریخ دریافت: ۴ اسفند ۱۴۰۲
تاریخ بازنگری: ۲۶ شهریور ۱۴۰۳
تاریخ پذیرش: ۱۱ آذر ۱۴۰۳
گندم زاده، د.، سعیدی راد، م. ح.، و سابقی، ی. ۱۴۰۳. مرور عامل‌هایی بر روش‌های مکانیزه جداسازی کلاله از گل زعفران. زراعت و فناوری زعفران، ۱۲(۳): ۳۴۹-۳۲۷.

چکیده

زعفران به عنوان یکی از محصولات مهم کشاورزی در ایران شناخته می‌شود، اما در سال‌های اخیر تولید آن به‌طور چشمگیری کاهش یافته و به ۳/۴۲ کیلوگرم در هکتار رسیده است. یکی از چرایی های این کاهش، زمان‌بر بودن مراحل برداشت و جداسازی کلاله‌ها از گل‌هاست که برای فرآوری ۲۴۰۰ تا ۲۷۰۰ گل تقریباً ۱۸۰ تا ۲۰۴ دقیقه زمان نیاز دارد. انجام دستی مراحل کاشت، داشت، برداشت و فرآوری زعفران علاوه بر ارزشمند کردن محصول، نگرانی‌هایی درباره آلودگی‌های میکروبی و قارچی به همراه دارد. در این مطالعه، روش‌های مختلف جداسازی کلاله زعفران به سه مرحله ردیف نمودن گل، برش اجزای گل و جداسازی کلاله طبقه‌بندی شده‌اند. بررسی دستگاه‌های مختلف نشان داده است که ترکیبی از تکنیک‌های پردازش تصویر، حسگرهای نوری، سیستم‌های مکانیکی با طراحی بهینه و استفاده از جریان هوا بهترین روش برای دستیابی به دقت و کیفیت بالا در جداسازی کلاله‌ها است. در این مقاله پیشنهاداتی نیز برای بهبود مکانیزاسیون این فرآیندها ارائه شده است.

کلمات کلیدی: برداشت ؛ پردازش تصویر، جداسازی، زعفران؛ کیفیت، مکانیزاسیون.

۱ – پسادکتری، بخش فنی و مهندسی موسسه تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی استان خراسان رضوی و استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران
۲ – دانشیار پژوهشی بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران
۳ – دانشجوی دکتری، علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشگاه فردوسی مشهد
(*– نویسنده مسئول: saiedirad@yahoo.com)

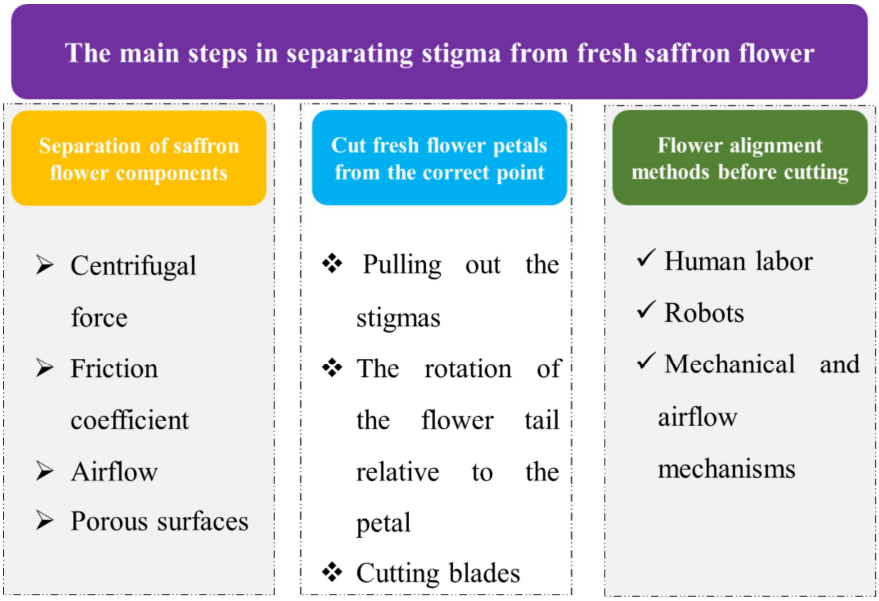
DOI: 10.22048/jsat.2024.445321.1525

مقدمه

زعفران از کلاله‌های خشک شده *Crocus sativus* L.، یک محصول چند ساله متعلق به خانواده *Iridaceae* به دست می‌آید (Ahrazem et al., 2015; Wang et al., 2021). گیاه زعفران از اجزای مختلفی تشکیل می شود، به نحوی که گل‌ها دارای شش سرگل بنفش (۲ تا ۴/۷ سانتی متر طول و ۱/۱ و ۲/۳ سانتی متر عرض)، سه پرچم و یک کلاله است (Cid-Pérez et al., 2021; Krishnan et al., 2017). زعفران در حال حاضر با موفقیت در کشورهای مختلف از جمله مراکش، مصر، آذربایجان، پاکستان، هند، نیوزلند، استرالیا و ژاپن کشت می‌شود. در ایران، با وجود اهمیت فراوان زعفران در بخش کشاورزی، عملکرد تولید آن در سال‌های اخیر به‌طور چشمگیری کاهش یافته است. متوسط تولید از ۱۵/۶ کیلوگرم در هکتار در سال ۱۳۵۰ به ۳/۴۲ کیلوگرم در هکتار در سال ۱۳۹۶ رسیده است (Ramezani et al., 2022). ادویه زعفران با کلاله مایل به قرمز و به شکل نخ مشخص می‌شود، هم چنین ۷/۴ درصد وزن کل گل زعفران را تشکیل می‌دهد (Serrano-Díaz et al., 2013). به عنوان مثال، در اسپانیا در سال ۲۰۰۹، تولید یک کیلوگرم ادویه زعفران نیاز به استفاده از ۱۷۳۲۵۰ گل با وزن بیش از ۶۸ کیلوگرم داشت که منجر به تولید ۶۳ کیلوگرم بقایای زیستی گل (شامل ۵۳ کیلوگرم گل برگ، ۹ کیلوگرم پرچم، و ۰/۵ کیلوگرم ساقه) شد (Serrano-Díaz et al., 2012; Sharayei et al., 2018).

کشت پیاز زعفران شامل فرآیندی پر زحمت از جمله کاشت دستی، برداشت و جداسازی با دست است. برداشت و جدا کردن کلاله‌ها از گل‌ها کار بسیار زمان بری است که برای فرآوری ۲۴۰۰ تا ۲۷۰۰ گل تقریباً ۱۸۰ تا ۲۰۴ دقیقه (شامل ۲۰ تا ۲۴ دقیقه برای جمع آوری و ۱۶۰ تا ۱۸۰ دقیقه برای برداشت و خشک کردن) نیاز دارد (Saeidirad et al., 2014; Winterhalter & Straubinger, 2000). توجه به این نکته ضروری است که وقتی گل‌های زعفران پژمرده می‌شوند، اجزای تشکیل‌دهنده آن را نمی‌توان به راحتی از هم جدا کرد. به دلیل طول عمر بسیار کوتاه گل زعفران (فقط ۲۰ تا ۲۴ ساعت) و حساسیت آن‌ها به نور خورشید، چیدن روزانه در اوایل صبح ضروری است (Saeidirad, 2020; Sharayei et al., 2018). این برداشت سریع برای حفظ عطر ارزشمند زعفران بسیار مهم است و تحقیقات نشان داده است که غنچه‌های گل خشک زعفران حاوی غلظت بالاتری از سافرانال در مقایسه با گل‌های نیمه باز و کاملا باز هستند. با توجه به ماهیت حساس زمان برداشت گل زعفران و نگرانی‌های مربوط به آلودگی احتمالی، مکانیزه کردن فرآوری پس از برداشت گل زعفران به یک موضوع قابل توجه تبدیل شده است. مراحل فرآوری مکانیزه گل‌های تازه زعفران را می‌توان در سه مرحله ردیف کردن گل‌های تازه، برش گلبرگ‌های گل تازه از نقطه صحیح و جداسازی اجزای گل برش خورده بیان نمود. در اکثر ماشین‌هایی که برای فرآوری زعفران مورد استفاده قرار می گیرند، تغذیه گل‌ها به داخل دستگاه و انجام فرایند ردیف کردن گل‌ها به صورت دستی و توسط چند کارگر انجام می‌پذیرد. ردیف کردن گل‌های تازه زعفران در یک مسیر مستقیم از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. در روش دستی، عموما برای تولید زعفران پوشال، تمامی گل‌ها از ناحیه یقه برش داده می‌شوند تا کلاله از سایر بخش های گل جدا گردد. اما در روش‌های مکانیزه، انتخاب دقیق و درست نقطه برش یک چالش مهم محسوب می‌شود که در صورت برش نادرست گل، تلفات و ضایعات بخش فرآوری زعفران به شدت افزایش می‌یابد. از سوی دیگر محل اتصال گلبرگ‌ها به دم‌گل بهترین نقطه برای برش گل به حساب می‌آید. از جمله روش‌هایی که برای انتخاب صحیح نقطه برش مورد استفاده قرار می‌گیرد، فناوری پردازش تصویر است.

در این فناوری تغییر رنگ دم‌گل از بنفش کم رنگ به بنفش پررنگ (در نقطه برش)، به عنوان ویژگی اصلی جهت تشخیص این نقطه مدنظر قرار می‌گیرد (Saeidirad, 2014). در بخش جداسازی اجزای برش خورده گل‌های تازه زعفران نیز، تفکیک کلاله از سایر قسمت‌ها می‌تواند با توجه به تفاوت‌های موجود در جرم مخصوص، مقادیر ضریب اصطکاک، سرعت حد یا مقاومت آیرودینامیکی کلاله‌ها نسبت به سایر اجزای گل شامل گلبرگ‌ها و پرچم‌ها انجام شود (Emadi & Yarlagadda, 2008; Ghiasi, 2012). در این مقاله به بررسی پیشرفت‌های اخیر پژوهشگران در زمینه روش‌های مکانیزه جداسازی کلاله از گل تازه زعفران، پرداخته می‌شود. در ادامه، با تحلیل جامع این روش‌ها، نقاط قوت و ضعف آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته و پیشنهاداتی برای بهبود مکانیزاسیون فرآیند جداسازی کلاله از گل تازه ارائه خواهد شد. بر اساس مطالعات صورت گرفته در این مقاله، مراحل مختلف جداسازی کلاله شامل بخش‌هایی هم چون ردیف نمودن گل‌های زعفران، برش دم گل، گلبرگ، پرچم و کلاله از یکدیگر و جداسازی اجزای گل برش خورده در شکل ۱ نشان داد ه شده است.



شکل ۱- مراحل مختلف جداسازی کلاله (بر اساس تقسیم بندی صورت گرفته در این مقاله)

Figure 1- Separation of stigma in different stages (based on the classification made in this manuscript).

روش‌های مکانیزه جداسازی کلاله

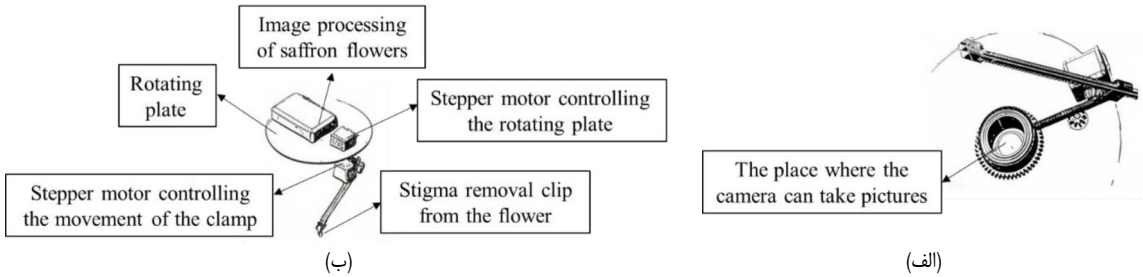
هاشمی حاجی آباد و شاهسون نژاد (۱۳۸۴)، ربات زعفران پاک کن به همراه تشخیص ریشه‌های اصلی از غیراصلی از طریق پردازش تصویر را طراحی کردند (شکل، ۲، ب). در این دستگاه از یک دوربین، یک بازوی رباتی (با قابلیت چرخش و تغییر ارتفاع به کمک دنده‌های شانه ای) و یک گیره استفاده شده است (شکل، ۲، الف). زعفران در انتهای قیف قرار می‌گیرد و دوربین اقدام به تهیه تصویر از آن می‌کند تا موقعیت کلاله‌ها مشخص گردد. سپس بازو به محل کلاله‌ها رفته و اقدام به بیرون کشیدن کلاله‌ها و خارج نمودن آن‌ها از قیف می‌نماید (Hashemi Hajiabad & Shahsavan Nejad, 2005). به‌طور مشابه، علی‌آبادی و محمدی (Aliabadi & Mohammadi, 2012) نیز از تکنیک پردازش تصویر برای تعیین نقطه برش گل زعفران به منظور جداسازی کلاله استفاده

کردند. این روش‌ها جایگزینی برای نیروی انسانی در طبقه‌بندی محصولات کشاورزی بر پایه کیفیت بصری است که معمولاً ملال‌آور، زمان‌بر، آهسته و ناپایدار است (Dehbashi et al., 2022). جایگزینی ربات‌ها و فناوری پردازش تصویر به جای نیروی انسانی، به بهداشت و تمیزی فرآیند و با افزایش دقت به کاهش هدررفت محصول و افزایش کیفیت نهایی زعفران کمک کرده که در صنعت غذایی از اهمیت بالایی برخوردار است. همچنین، مکانیزاسیون این فرآیند می‌تواند نیاز به نیروی کار انسانی را کاهش دهد، که به ویژه در شرایط کمبود نیروی کار یا هزینه بالا، مزیت بزرگی محسوب می‌شود (Saeidirad, 2020). با این حال، دستگاه نقاط ضعفی نیز دارد که باید به آن‌ها توجه شود. با توجه به سرعت و دقت مناسب پردازش تصویر، استفاده از این تکنولوژی در زمینه‌های مختلف از جمله کشاورزی و صنایع غذایی، به‌ویژه در عملیات مانند بازرسی و دسته‌بندی میوه‌ها و سبزیجات، تجزیه و تحلیل خصوصیات دانه‌ها، و ارزیابی مواد غذایی و نوشیدنی‌ها، بسیار حائز اهمیت است (Chen & Yu, 2021). سرعت پایین پردازش تصاویر دو بعدی می‌تواند کارایی دستگاه را در پاسخ به نیازهای تجاری محدود کند، به خصوص زمانی که حجم تولید بالاست. حساسیت گل‌های زعفران به زمان و تأخیر در فرآیند جداسازی می‌تواند کیفیت محصول را کاهش دهد (Cardone et al., 2020). در واقع اگرچه تلاش‌های متعددی برای برداشت رباتیک محصولات کشاورزی صورت گرفته است، آن‌ها بیش‌تر برای کاربردهای محصولاتی مانند گوجه فرنگی، توت فرنگی، یا خیار مناسب هستند. استفاده از ربات‌ها برای جداسازی کلاله‌های زعفران به دلیل شکنندگی بالای گل‌های زعفران و آسیب‌پذیری در برابر نیروهای وارده، ممکن است به کیفیت نهایی ادویه آسیب برساند. (Denarda et al., 2021). هم‌چنین، هزینه بالای پیاده‌سازی و نگه‌داری سیستم‌های پردازش تصویر و ربات ممکن است برای تولیدکنندگان کوچک قابل قبول نباشد. بهبود الگوریتم‌های پردازش تصویر یا استفاده از سخت‌افزارهای سریع‌تر می‌تواند سرعت فرآیند را افزایش دهد. هم‌چنین بهینه‌سازی سیستم مکانیکی، مانند طراحی بهتر بازوها و گیره‌ها، می‌تواند زمان عملیات مکانیکی را کاهش داده و دقت در جداسازی کلاله‌ها را افزایش دهد. ارتقای دوربین‌ها یا استفاده از سیستم‌های چند دوربینه می‌تواند به افزایش دقت تشخیص کمک کند (Wijaya et al., 2020). اخیراً نیز از بازوی روباتیک با شش درجه آزادی و مجهز به دوربین و سیستم پردازش تصویر مبتنی بر شبکه‌های عصبی رایج (CNN[1]) برای رفع مشکلات مربوط به برداشت دستی زعفران استفاده شده است (Priyadharshini et al., 2023).

در تحقیقی دیگر حداد بیگی (Haddad Beigi, 2007) اقدام به ساخت دستگاه جداسازی کلاله‌های قرمز زعفران کرد که در آن یک صفحه ارتعاشی اقدام به جلو بردن اجزاء گل به سمت لبه ریزش می‌کند. در لبه ریزش، به محض تشخیص رنگ قرمز کلاله توسط حسگرهای نوری، تفنگ‌های هوایی، هوا را به کلاله‌ها شلیک می‌کند و از این طریق جهت حرکت و سقوط کلاله‌ها را تغییر می‌دهند. (شکل ۳). بنابراین استفاده از حسگرهای نوری به عنوان ابزاری سریع، غیرتهاجمی، و ارزان برای تشخیص رنگ قرمز کلاله‌ها، دقت جداسازی را افزایش و احتمال اشتباه را کاهش می‌دهد (Ordoudi et al., 2024). همچنین، بهره‌گیری از تفنگ‌های هوایی برای تغییر مسیر کلاله‌ها به‌جای استفاده از قطعات مکانیکی، می‌تواند فرسایش و خرابی دستگاه را به حداقل برساند و به بهبود عمر مفید دستگاه کمک کند. علاوه بر این، سیستم ارتعاشی برای حرکت اجزای گل به سمت لبه ریزش، به فرایند جداسازی سرعت می‌بخشد و کارایی دستگاه را افزایش می‌دهد (Korendiy et al., 2022). با این حال، این دستگاه دارای نقاط ضعفی نیز هست. وابستگی

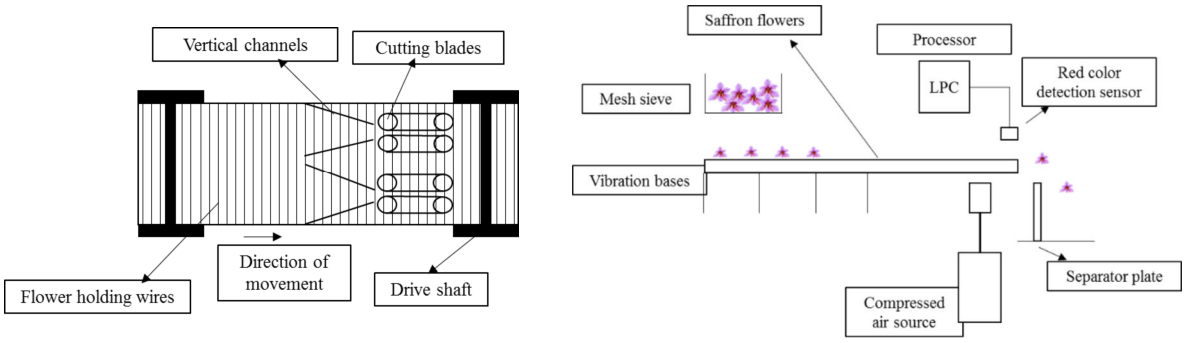
۱- Convolutional neural network

زیاد به حسگرهای نوری می‌تواند در شرایطی که رنگ گل‌ها به دلیل شرایط محیطی یا نوع زعفران متغیر است، باعث کاهش دقت شود. علاوه بر این، سیستم تفنگ‌های هوایی ممکن است به دلیل عدم کنترل دقیق فشار هوا یا محل شلیک، به گل‌ها آسیب برساند. همچنین، استفاده از سیستم‌های پیچیده‌ای مانند تفنگ‌های هوایی می‌تواند هزینه‌های ساخت و نگهداری دستگاه را افزایش دهد، که ممکن است برای تولیدکنندگان کوچک قابل تحمل نباشد. در این دستگاه، ارتقای سیستم حسگرهای نوری به گونه‌ای که بتواند تغییرات جزئی در رنگ و سایه‌های مختلف کلاله‌ها را تشخیص دهد، می‌تواند دقت جداسازی را بهبود بخشد. همچنین، بهینه‌سازی سیستم تفنگ‌های هوایی برای کنترل دقیق‌تر فشار و جهت هوا، به منظور جلوگیری از آسیب به گل‌ها، ضروری است (Abdullahakimovich & Sarvarbek, 2021).



شکل ۲- ربات زعفران پاک کن به همراه تشخیص ریشه‌های اصلی از غیراصلی از طریق پردازش تصویر (الف) بازوی روباتی دستگاه و (ب) نمای کلی دستگاه (Hashemi & Shahsavan Nejad, 2005).

Figure 2- The saffron separating robot, along with the detection of the stigma through image processing (a) the robotic arm and (b) the general view of the device (Hashemi & Shahsavan Nejad, 2005).

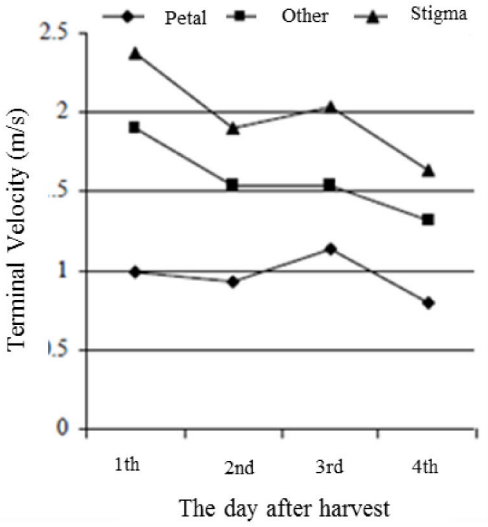


شکل ۳- (الف) نمای جانب دستگاه جداسازی کلاله های قرمز زعفران (ب) نمای بالای دستگاه برش دهنده گل زعفران با قابلیت جدا کردن ساقه گل (Haddad Beigi, 2007).

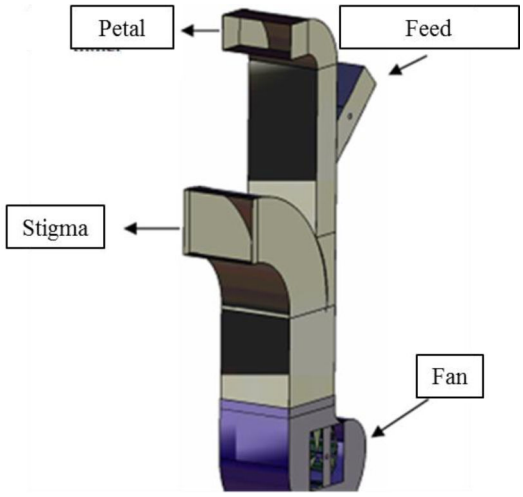
Figure 3- (a) Side view of the saffron stigma sorting machine (b) The top view of the saffron flower cutter device with the ability to separate the flower stem (Haddad Beigi, 2007).

عمادی و یارلاگادا (۱۳۸۷) نشان دادند که استفاده از بادسنج دیجیتال سیم داغ برای اندازه‌گیری سرعت هوا و تعیین سرعت حد ذرات، دقت بالایی در جداسازی اجزای گل فراهم می‌کند. تفاوت قابل توجه در سرعت حد کلاله و سایر قسمت‌های گل (کلاله: ۲/۴ تا ۲/۸ متر بر ثانیه متر بر ثانیه، سایر قسمت‌ها: ۱ تا ۲ متر بر ثانیه) به این معناست که می‌توان کلاله‌ها را با دقت از سایر اجزا جدا کرد، که این ویژگی برای حفظ کیفیت محصول نهایی بسیار مهم است. همچنین، استفاده از جریان هوا به عنوان

یک روش غیرتماسی، احتمال آسیب به اجزای حساس گل، به ویژه کلاله‌ها، را کاهش می‌دهد (شکل ۴) (Emadi & Yarlagadda, 2008). بنابراین در استفاده از این دستگاه، نیاز به تنظیم دقیق سرعت هوا برای اطمینان از جداسازی مؤثر است، زیرا هرگونه عدم دقت در تنظیم سرعت می‌تواند به خطا در جداسازی منجر شود. هم‌چنین، این روش ممکن است در شرایطی که تفاوت وزن یا شکل اجزا کم‌تر است، کارایی کم‌تری داشته باشد. علاوه بر این، استفاده از تجهیزات دقیق و حساس مانند بادسنج دیجیتال ممکن است هزینه‌ها و پیچیدگی‌های نگه‌داری و کالیبراسیون را افزایش دهد. انجام تحقیقات بیش‌تر برای بهینه‌سازی دستگاه در شرایط متغیر، مانند تغییرات در رطوبت یا شرایط محیطی، نیز می‌تواند به افزایش قابلیت اطمینان و عملکرد دستگاه کمک کند.



(ب)



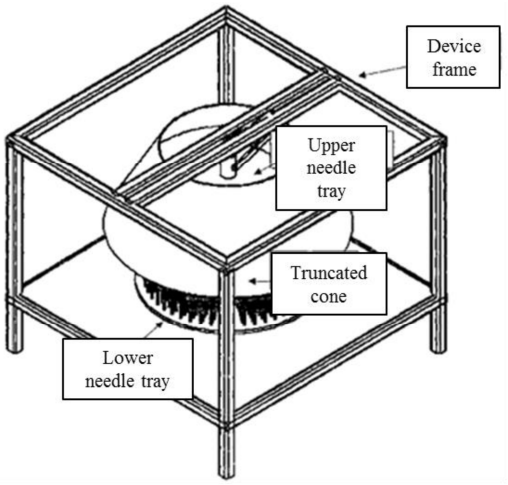
(الف)

شکل ٤- (الف) شمایی از تونل باد جداکننده کلاله از گل زعفران و (ب) مقادیر سرعت حد اجزاء مختلف گل زعفران (Emadi & Yarlagadda, 2008).

Figure 4- (a) Wind tunnel to separate stigma from saffron flower and (b) terminal speed for different parts of the saffron flower (Emadi & Yarlagadda, 2008).

راشدی مجاز (Rashedi Majaz, 2009) دستگاه جداکننده کلاله گل زعفران با استفاده از نیروی گریز از مرکز را طراحی کرد که در آن از دو عدد سینی (بالا و پایین) استفاده شده است. این سینی‌های دوار حاوی تعدادی سوزن می‌باشند. گل‌های زعفران در بین سوزن‌های سینی‌های بالا و پایین به دام می‌افتد. با چرخش ۱۴۴۰ دور در دقیقه ای سینی‌ها نسبت به یک دیگر، اجزاء مختلف گل دچار گسیختگی می‌شوند (شکل ۵). از جمله مزیت‌های استفاده از این دستگاه می‌توان به سرعت بالای عملیات جداسازی اشاره کرد؛ چرخش سینی‌ها با سرعت بالا باعث افزایش کارایی و تسریع فرآیند جداسازی می‌شود. هم‌چنین، طراحی مکانیکی سینی‌های دوار که گل‌های زعفران را بین سوزن‌ها به دام می‌اندازد، می‌تواند به دقت جداسازی کمک کرده و از هدررفت کلاله‌ها جلوگیری کند. از سوی دیگر، استفاده از نیروی گریز از مرکز با سرعت بالا ممکن است منجر به آسیب‌دیدگی اجزای حساس گل‌های زعفران، به ویژه کلاله‌ها، شود که می‌تواند کیفیت محصول نهایی را کاهش دهد.

علاوه بر این، وجود سوزن‌ها در سینی‌های دوار احتمالاً به دلیل تماس مکانیکی مکرر با گل‌ها، خطر خرابی و فرسایش سریع‌تر دستگاه را افزایش می‌دهد و نیاز به نگه‌داری و تعمیرهای مکرر دارد. برای بهبود این دستگاه، پیشنهاد می‌شود که مکانیزم کنترل دقیقی برای جلوگیری از آسیب‌دیدگی فراهم شود. علاوه بر این، استفاده از مواد مقاوم‌تر و دارای عمر طولانی‌تر برای سوزن‌ها می‌تواند دوام دستگاه را افزایش دهد و هزینه‌های نگه‌داری را کاهش دهد. هم‌چنین، می‌توان بررسی‌هایی را انجام داد تا در صورت امکان، از سیستم‌های جداسازی جایگزین که خطر آسیب به گل‌ها را کم‌تر می‌کند، استفاده شود.



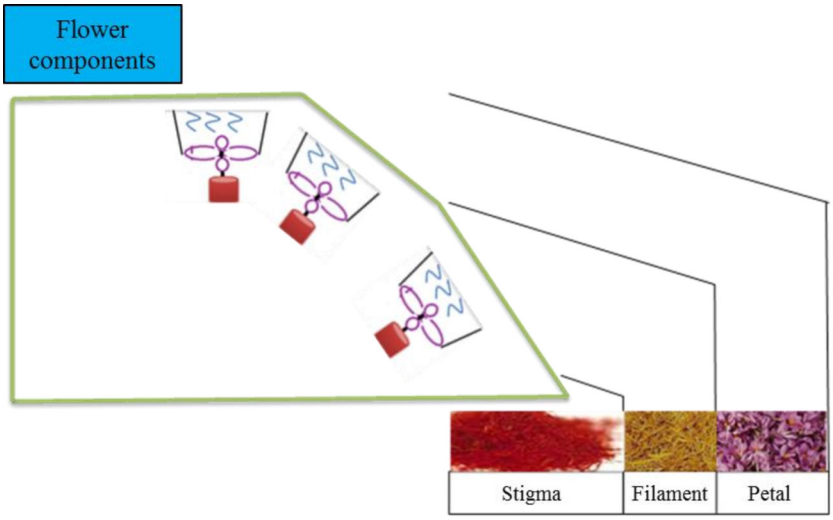
شکل ۵- شمایی از دستگاه جداکننده کلاله گل زعفران با استفاده از نیروی گریز از مرکز (Rashedi Majaz, 2009)
Figure 5- Saffron flower stigma separator device using centrifugal force (Rashedi Majaz, 2009).

ابریشمی فر (Abrishmi Far, 2004) اقدام به طراحی روشی در فرایند فرآوری زعفران کرد که در آن نیز گل‌ها به صورت دستی توسط اپراتور به قسمت تغذیه که دارای ساز وکار غلتک‌های متحرک بود، وارد می‌شدند. عمل برش توسط تیغه های روی غلتک های متحرک (که وظیفه تغذیه دستگاه را بر عهده دارند) انجام می شود. برای هر خط ورودی با توجه به نوع محصول مورد نیاز (از نگین تا پوشال)، امکان تنظیم نقطه برش گل وجود دارد. سپس اجزای برش خورده زعفران وارد استوانه ای می‌شوند که در داخل خود دارای تعدادی نقاله باریک می‌باشد. نقاله‌ها و استوانه موجب چرخش و جلو بردن اجزای گل به سمت انتهای استوانه می‌شوند. هم چنین در این دستگاه استفاده از جریان باد و میدان مغناطیسی به جداسازی گلبرگ‌ها، دم گل‌ها ، پرچم‌ها و کلاله‌ها از یک دیگر کمک می‌کنند.

بنابراین، در این دستگاه، امکان تنظیم نقطه برش گل‌ها بر اساس نوع محصول مورد نیاز، مانند نگین یا پوشال، وجود دارد. این ویژگی به انعطاف‌پذیری دستگاه در تولید انواع مختلف محصولات منجر می‌شود. استفاده از غلتک‌های متحرک و تیغه‌ها برای برش دقیق گل‌ها، علاوه بر افزایش دقت در فرآیند جداسازی، به حفظ کیفیت بالای کلاله‌ها نیز کمک می‌کند. هم‌چنین، استفاده از استوانه با نقاله‌های باریک برای حرکت اجزای برش خورده و استفاده از جریان هوا و میدان مغناطیسی برای خالص‌سازی اجزا، به بهبود دقت و کارایی در جداسازی و خالص‌سازی اجزای گل زعفران کمک می‌کند. با این حال، فرآیند تغذیه دستی گل‌ها به داخل دستگاه ممکن است باعث کاهش کارایی و افزایش زمان عملیات شود، به ویژه در شرایطی که حجم تولید بالاست. هم‌چنین، استفاده از تیغه‌ها و غلتک‌ها

برای برش گل‌ها می‌تواند به آسیب دیدن کلاله‌ها منجر شود، که این امر بر کیفیت نهایی محصول تأثیر منفی می‌گذارد. بنابراین، استفاده از فرآیند تغذیه گل‌ها به دستگاه به صورت مکانیزه و خودکار موجب افزایش کارایی و سرعت تولید می‌شود.

غیاثی (Ghiasi, 2012) اقدام به ساخت دستگاه فرآوری زعفران با استفاده ی هم زمان از تمایزات خواص فیزیکی و آیرودینامیکی اجزای گل کرد که در آن با توجه به تفاوت معنی دار ضریب اصطکاک اجزاء گل، آن‌ها روی سطوحی شیبدار با شیب متناسب با ضریب اصطکاک خود قرار می‌گیرند. در این روش کلاله دارای چسبندگی بیش‌تر به سطح می‌باشد. بنابراین کلاله روی سطح می‌ماند و سایر اجزا به خاطر چسبندگی کم‌تر و سرعت حد کم‌تر، از سطح جداشده و با وزش باد جدا می‌شوند (شکل ۶). این روش نه تنها دقت بالایی در جداسازی اجزا دارد، بلکه به حفظ کیفیت کلاله‌های حساس نیز کمک می‌کند، زیرا استفاده از روش‌های فیزیکی ملایم (چسبندگی و وزش باد) خطر آسیب دیدن کلاله‌ها را کاهش می‌دهد. از چالش‌های اصلی، نیاز به تنظیم دقیق شیب سطوح بر اساس ضریب اصطکاک اجزای مختلف گل است، که در صورت عدم تنظیم مناسب، ممکن است به جداسازی نادرست منجر شود. علاوه بر این، تغییرات در ویژگی‌های فیزیکی اجزای گل زعفران، مانند رطوبت یا چسبندگی، می‌تواند عملکرد دستگاه را تحت تأثیر قرار دهد. استفاده از حسگرهای پیشرفته برای مانیتورینگ مداوم ویژگی‌های فیزیکی اجزا و تنظیمات دینامیکی دستگاه نیز می‌تواند عملکرد آن را بهبود بخشد. هم‌چنین، تحقیق و توسعه بیش‌تر در زمینه مواد سطحی استفاده‌شده می‌تواند به کاهش هزینه‌ها و افزایش دوام و کارایی دستگاه کمک کند (Zhang et al., 2024).



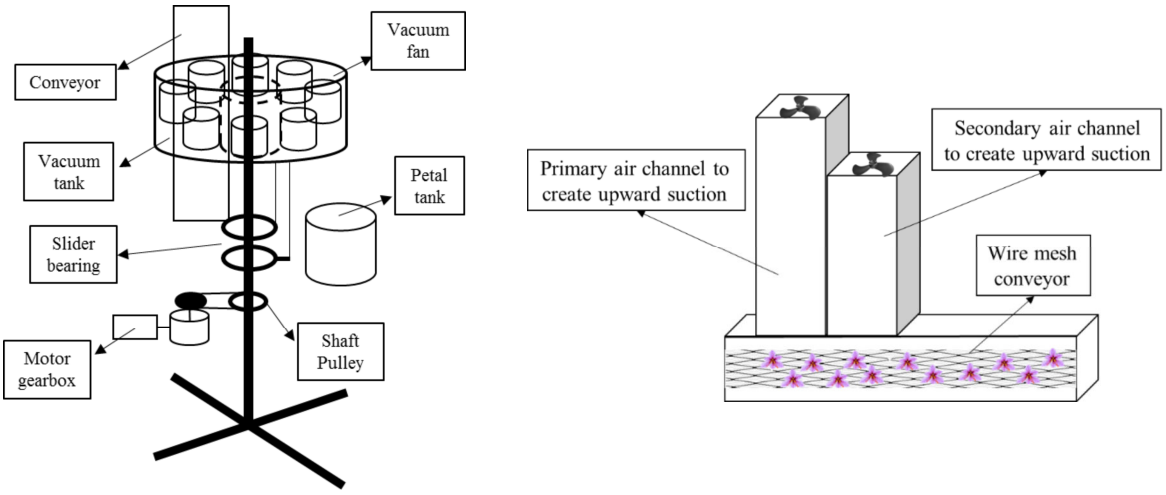
شکل ٦- شمایی از فرآوری زعفران با استفاده ی هم زمان از تمایزات خواص فیزیکی و آیرودینامیکی اجزای گل (Ghiasi, 2012)
Figure 6- Processing of saffron using physical and aerodynamic properties of flower components (Ghiasi, 2012)

نمازی (Namazi, 2014) اقدام به ساخت دستگاه زعفران پاک کن (جداساز کلاله از برگ) کرد که در آن گل‌ها توسط یک نقاله به داخل یک کانال مکشی اولیه وارد می‌شوند. این کانال موجب می‌شود که گل‌ها با دم بر روی یک صفحه توری سقوط نمایند (به نحوی که گل برگ‌ها به سمت بالا قرار گیرند). صفحه توری (که دارای مش‌های لوزی شکل می‌باشد) حاوی

گل‌ها مجددا از زیر یک کانال مکشی دیگر با ارتفاع کم‌تر عبور می‌کند. عبور از زیر این کانال موجب می‌شود که گل‌ها در محل خود قدری جا به جا شده و به صورت مرتب قرار گیرند. توری، گل‌های مرتب شده بر روی خود را به سمت صفحات فنری دوار (که در فواصل مختلف از هم قرار گرفته و بر روی هر محور ۵ تا ۷ جفت از آن جانمایی شده است) هدایت می‌کند. این صفحات، گل‌ها را به میزان ۱۸۰ درجه به سمت پایین (جایی که یک قیچی با فک ثابت و متحرک قرار گرفته است) حرکت می‌دهند. فک متحرک قیچی به کمک یک مکانیزم مکانیکی رفت و برگشتی موجب برش قسمت پایینی گل‌ها می‌شود. در نهایت، محصولات برش خورده وارد یک سیکلون شده و در بخش خروجی آن توسط مکش فن و حرکت دورانی سینی، گلبرگ‌ها به توری فن می‌چسبد اما در مقابل کلاله ها نخواهند چسبید که همین امر موجب جدایش کلاله از گلبرگ‌ها خواهد شد (شکل ۷). یکی از ویژگی‌های مثبت این دستگاه، استفاده از نقاله‌ها و کانال‌های مکشی است که باعث می‌شود گل‌ها به‌طور منظم و با دقت بالا روی صفحه توری قرار گیرند. این فرآیند به قرارگیری گلبرگ‌ها به سمت بالا کمک کرده و دسترسی آسان به کلاله‌ها را فراهم می‌کند. هم‌چنین، استفاده از صفحات فنری دوار و مکانیزم قیچی برای برش دقیق قسمت پایینی گل‌ها، امکان جداسازی دقیق کلاله‌ها را افزایش می‌دهد. این دقت بالا در جداسازی به حفظ کیفیت محصول نهایی کمک می‌کند. در نهایت، استفاده از سیکلون و فن برای جداسازی نهایی گلبرگ‌ها از کلاله‌ها بر اساس ویژگی‌های چسبندگی، یک روش نوآورانه و کارآمد است که خطر آسیب به کلاله‌ها را کاهش می‌دهد. با این حال، این دستگاه نقاط ضعفی نیز دارد. یکی از چالش‌های این دستگاه، پیچیدگی مکانیزم‌های آن است که ممکن است هزینه‌های نگه‌داری و تعمیرها را افزایش دهد. استفاده از کانال‌های مکشی و سیکلون ممکن است نیازمند تنظیمات دقیق و مکرر باشد تا از عملکرد صحیح دستگاه اطمینان حاصل شود. هم‌چنین، استفاده از قیچی مکانیکی برای برش ممکن است به دلیل تنظیمات نادرست یا استهلاک اجزا، به گل‌ها آسیب بزند، که این امر بر کیفیت نهایی محصول تأثیر می‌گذارد. برای بهبود این دستگاه، پیشنهاد می‌شود که سیستم‌های نظارت و کنترل خودکار برای تنظیم دقیق مکش هوا، برش قیچی، و حرکت نقاله‌ها پیاده‌سازی شوند تا دقت و کارایی فرآیند افزایش یابد. هم‌چنین، استفاده از مواد با دوام بیش‌تر و طراحی ساده‌تر برای کاهش هزینه‌های نگه‌داری و افزایش طول عمر دستگاه مفید خواهد بود. انجام تحقیقات بیش‌تر برای بهینه‌سازی مراحل جداسازی و استفاده از فناوری‌های جدید نیز می‌تواند به بهبود عملکرد و کارایی کلی دستگاه کمک کند.

در پژوهشی ابتدا گل‌های زعفران در داخل یک مخزن ریخته می‌شوند. در این مخزن یک جریان هوا به سمت بالا وجود دارد که موجب سقوط گل‌ها از سمت نهنج آن‌ها می‌شود. گل‌ها در این شرایط بر روی یک نوار نقاله قرار می‌گیرند که آن‌ها را به سمت دیسک برش دهنده هدایت می‌کند هم چنین می توان از یک استوانه چرخان زاویه دار/ مایل با قابلیت سرعت چرخش قابل تنظیم و یک فن (با جریان هوا در جهت مخالف حرکت اجزای گل) استفاده کرد به گونه ای که گلبرگ‌ها و پرچم‌ها به سمت جریان هوا حرکت می‌کنند و کلاله‌ها در جهت مخالف جریان هوا از گلبرگ‌ها جدا می‌شوند و به بیرون هدایت می‌شوند. عملکرد این تجهیز ۷۰ درصد در نرخ ۱۱ کیلوگرم در ساعت بود (شکل ۸) (Aziz et al., 2015). بنابراین، در این دستگاه، استفاده از جریان هوا برای جدا کردن گل‌ها از نهنج موجب حفظ کیفیت اجزای حساس گل، مانند کلاله‌ها، می‌شود. استفاده از نوار نقاله برای هدایت گل‌ها به سمت دیسک برش‌دهنده نیز موجب می‌شود که گل‌ها به‌طور منظم و مداوم وارد مرحله برش شوند، که این ویژگی می‌تواند بهره‌وری دستگاه را افزایش دهد. هم‌چنین، بهره‌گیری از استوانه چرخان زاویه‌دار با قابلیت تنظیم سرعت و فن برای جداسازی گلبرگ‌ها و پرچم‌ها

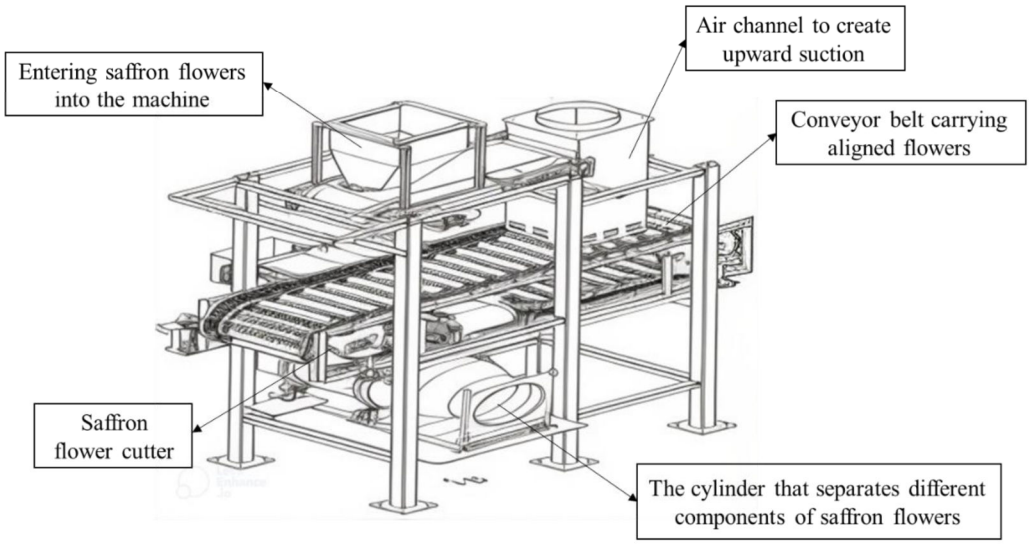
از کلاله‌ها، یک روش نوآورانه است که به دقت بالاتر در جداسازی اجزا منجر می‌شود. هم‌چنین، نرخ جداسازی ۷۰ درصد که نشان می‌دهد که هنوز بخشی از گلبرگ‌ها و پرچم‌ها به‌طور کامل از کلاله‌ها جدا نمی‌شوند. بنابراین ممکن است نیاز به فرآوری دستی یا تکرار فرآیند داشته باشد.



(ب) (الف)

شکل ۷- (الف) شماتیک بخش ردیف کن دستگاه زعفران پاک کن (ب) بخش جداساز صفحه ای متخلخل دستگاه زعفران پاک کن (Namazi, 2014).

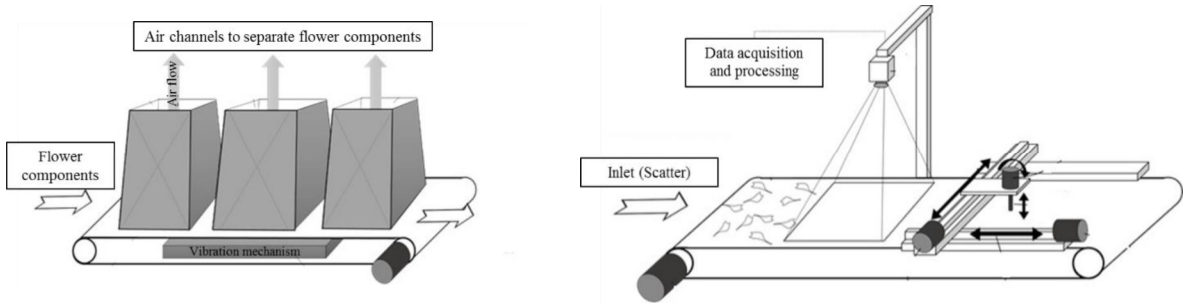
Figure 7- (a) Schematic of the of lining up the flower in the saffron processing machine (b) Porous plate separator of saffron processing machine (Namazi, 2014).



شکل ۸- شمایی از دستگاه جداسازی کلاله از گل‌های زعفران (Aziz et al., 2015)

Figure 8- The device of stigma separator from saffron flowers (Aziz et al., 2015).

کرمی و همکاران (Karami et al., 2015)، دستگاه اتوماتیک فرآوری گل زعفران، مبتنی بر ماشین بینائی طراحی کردند که در آن گل‌ها به صورت توده ای وارد دستگاه می‌شوند. در این دستگاه جهت‌گیری گل‌ها کاملا با یک دیگر متفاوت می‌باشد. سپس نقاله گل‌ها را به بخش تصویر برداری و برش منتقل می‌نماید تا اندکی فاصله بین گل‌ها ایجاد شود. سپس به منظور تعیین جهت‌گیری گل‌ها، از آن‌ها به صورت توده ای تصویربرداری می‌شود. پس از تشخیص جهت گیری گل‌های زعفران بر روی نوار نقاله به کمک پردازش تصویر، دستگاه برش با سه درجه آزادی خود را با جهت گیری گل‌ها منطبق می نماید. سپس بخش‌های مختلف برش خورده گل زعفران (شامل گلبرگ، پرچم، کلاله و ساقه) وارد صفحه مرتعش کننده شده که از سه کانال هوایی (روش آیرودینامیک) با جهت‌های مختلف اقدام به وزش جریان هوایی می‌کند. در این مرحله به ترتیب گلبرگ‌ها، پرچم و کلاله از یک دیگر جدا می‌گردند (شکل ۹). در این دستگاه انجام فرآیند پردازش گل زعفران به طور کامل اتوماتیک منجر به کاهش نیاز به نیروی انسانی و افزایش بازدهی می‌شود. استفاده از ماشین بینایی و پردازش تصویر، این دستگاه قادر به انجام برش‌های دقیق بر روی گل‌ها است، که به بهبود کیفیت محصول منجر می‌شود برش گل‌ها به صورت توده‌ای، سرعت پردازش را افزایش می‌دهد و زمان لازم برای فرآیند را کاهش می‌دهد. با این حال، این دستگاه به دلیل پیچیدگی ساختاری و نیاز به تکنولوژی‌های پیشرفته، ممکن است هزینه بالایی داشته باشد. تکنولوژی‌های پیشرفته و دقیق این دستگاه نیازمند سرویس و نگه‌داری منظم هستند تا بتوان از عملکرد آن اطمینان حاصل کرد. از همه مهم‌تر این دستگاه ممکن است نسبت به تغییرات فیزیکی گل‌های زعفران، مانند اندازه و شکل، حساس باشد و این می‌تواند منجر به کاهش دقت در برش شود. می‌توان با بهبود الگوریتم‌های پردازش تصویر، دقت تشخیص جهت‌گیری گل‌ها را افزایش داد و در نتیجه کیفیت برش را بهبود بخشید. با تنظیمات بیش‌تر برای دستگاه برش، می‌توان آن را به گونه‌ای تنظیم کرد که قادر به برش گل‌ها با ابعاد و اشکال متنوع شود (Denarda et al., 2021).



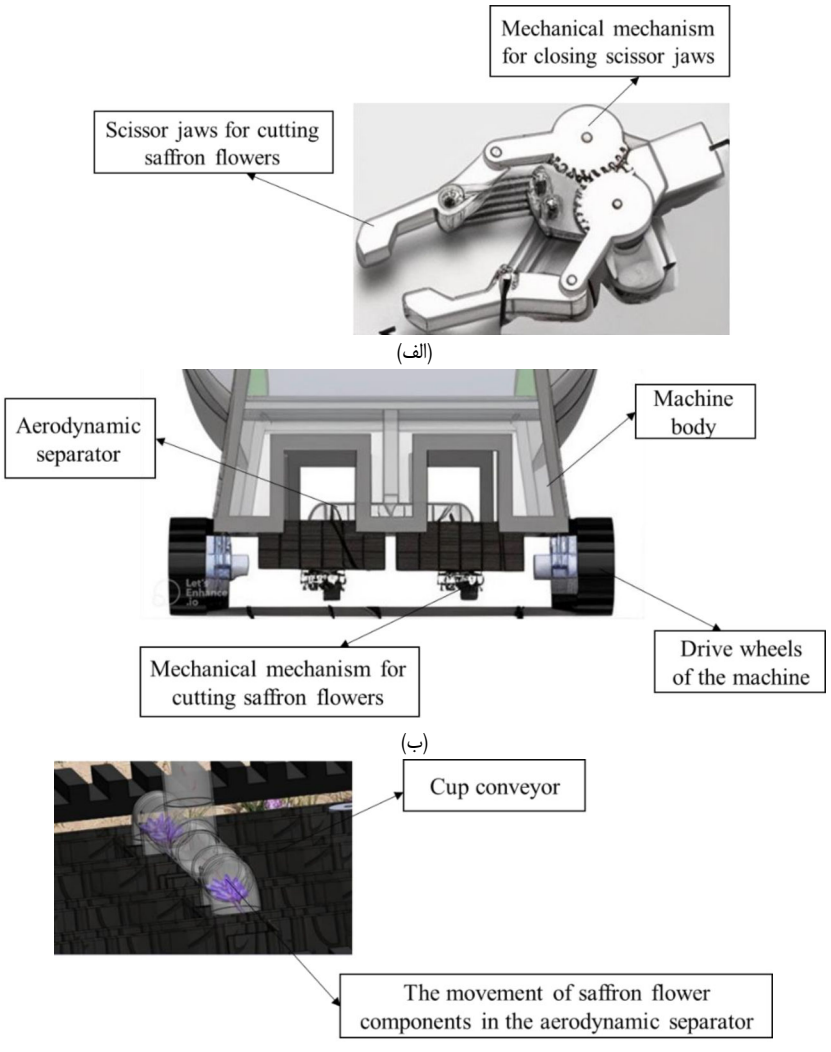
(ب) (الف)

شکل ۹- (الف) شمایی از بخش تشخیص جهت گیری و برش گل های زعفران در دستگاه اتوماتیک فرآوری گل زعفران، مبتنی بر بینائی ماشین (ب) شمایی از دستگاه اتوماتیک جداسازی کلاله به روش آیرودینامیکی (Karami et al., 2015).

Figure 9- (a) Detection of the orientation and cutting of the saffron flowers in the automatic saffron flower processing machine based on machine vision (b)Stigma separation by aerodynamic method (Karami et al., 2015).

فرح بخش و ترابی فارم (Farah Bakhsh & Torabi Farm, 2015)، دستگاه خودگردان برداشت گل و جداساز کلاله زعفران در مزرعه ساختند که در آن از سطح مزرعه تصویر برداری می‌شود. سپس این تصاویر به حالت سیاه–سفید تبدیل می‌شوند. در این مرحله بوته‌های زعفران از خاک و علف‌های هرز شناسایی می‌گردند. پس از تشخیص گل‌های زعفران به

کمک پردازش تصویر، گل‌ها توسط یک قیچی برش زده می‌شود و توسط نوار نقاله قاشقکی به انتهای ربات منتقل می‌شود. اجزای مختلف گل به وسیله تفاوت در خصوصیات آیرودینامیکی از یک دیگر جدا می‌گردند (شکل ۱۰).



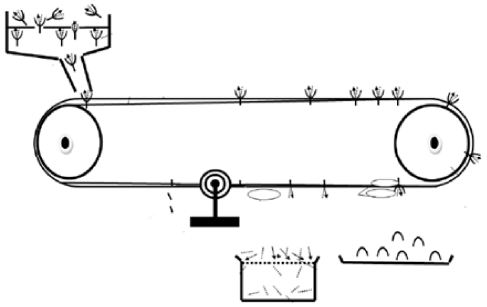
شکل ۱۰- (الف و ب) مکانیزم برداشت گل و جداساز کلاله زعفران در مزرعه، (ج) شمایی از بخش جداساز کلاله زعفران در مزرعه (Farah Bakhsh & Torabi Farm, 2015)

Figure 10- (a and b) The mechanism of harvesting and separating saffron in the field, (c) Device for separating saffron flower in the field (Farah Bakhsh & Torabi Farm, 2015).

استفاده از فناوری پردازش تصویر برای تشخیص دقیق بوته‌های زعفران از خاک و علف‌های هرز است که دقت در شناسایی و برداشت گل‌ها را افزایش می‌دهد. هم‌چنین، این دستگاه با بهره‌گیری از قیچی و نوار نقاله قاشقکی، فرآیند برداشت و انتقال گل‌ها را به صورت کارآمد انجام می‌دهد. جداسازی اجزای مختلف گل بر اساس خصوصیات آیرودینامیکی نیز یک ویژگی برجسته است که به بهبود کیفیت نهایی محصول کمک می‌کند. از مشکلات اصلی این دستگاه، پیچیدگی سیستم

پردازش تصویر و نیاز به کالیبراسیون دقیق برای شناسایی صحیح گل‌های زعفران در شرایط مختلف نوری و محیطی است. این امر می‌تواند باعث کاهش کارایی دستگاه در شرایط مختلف شود. هم‌چنین، قابلیت اطمینان مکانیزم برش و جداسازی در صورت استفاده مداوم و در مقیاس بزرگ، نیاز به نگه‌داری و نظارت مستمر دارد (Denarda et al., 2021). برای بهبود دستگاه، پیشنهاد می‌شود که از الگوریتم‌های پیشرفته‌تر پردازش تصویر استفاده شود که توانایی تطبیق با شرایط نوری و محیطی مختلف را داشته باشند. هم‌چنین، بهینه‌سازی سیستم‌های مکانیکی به منظور افزایش دوام و کاهش نیاز به نگه‌داری می‌تواند کارایی دستگاه را بهبود بخشد.

زارعی فرد (Zarei Fard, 2015)، اقدام به ساخت دستگاه جداسازی مکانیکی پرچم و کلاله گل زعفران به صورت سرگل کرد که در آن ابتدا گل‌ها در داخل ظرف ورودی ریخته می‌شوند. در انتهای این ظرف یک صفحه ارتعاشی تعبیه شده است که دارای روزنه‌هایی است و با حرکت ارتعاشی خود باعث عمودی قرار گرفتن گل‌ها در داخل روزنه‌ها خواهد شد. این ویژگی به تنظیم دقیق‌تر فرآیند جداسازی کمک می‌کند. سپس گل‌ها توسط یک نوار نقاله با دو نوار موازی و سرعت‌های متفاوت هدایت می‌شوند، این بخش به حرکت دورانی گل‌ها و جداسازی مؤثرتر گلبرگ‌ها، کلاله‌ها، و پرچم‌ها کمک می‌کند. با حرکت دورانی گل‌ها و تعبیه نمودن یک تیغه در مسیر برگشت نوار، ابتدا گلبرگ‌ها جدا شده و تیغه‌های بعدی، کلاله و پرچم‌ها را برش می‌دهد که این روش به تفکیک دقیق‌تر اجزا منجر می‌شود پس از برش کلاله ها و پرچم ها، این اجزاء بر روی یک الک (که در زیر تیغه برش تعبیه شده است) سقوط می‌کنند. پرچم‌ها از حفره‌های این الک سقوط می‌کنند و صرفا کلاله ها بر روی آن باقی می‌مانند (شکل ۱۱). با این حال، یکی از چالش‌های اصلی، پیچیدگی مکانیزم‌ها و نیاز به تنظیم دقیق سرعت نوار نقاله و ارتعاش صفحه است که ممکن است بر کارایی و دقت فرآیند تأثیر بگذارد. هم‌چنین، تیغه‌های برش ممکن است در صورت تنظیم نادرست یا استهلاک، به کلاله‌ها آسیب برسانند که این موضوع بر کیفیت محصول نهایی تأثیر منفی می‌گذارد (Denarda et al., 2021). پیشنهاد می‌شود که سیستم‌های کنترل خودکار برای تنظیم دقیق سرعت نوار نقاله و ارتعاش صفحه به کار گرفته شود تا دقت و کارایی فرآیند افزایش یابد. هم‌چنین، استفاده از تیغه‌های با کیفیت بالا و قابل تنظیم می‌تواند به کاهش احتمال آسیب به کلاله‌ها کمک کند.



شکل ۱۱- شمایی از دستگاه اتوماتیک فرآوری گل زعفران، مبتنی بر بینائی ماشین (Zarei Fard, 2015)
Figure 11- Automatic saffron flower processing machine based on machine vision (Zarei Fard, 2015).

هم چنین جهانشیری (Jahanshiri, 2016) اقدام به طراحی سیستم مکانیزه جداسازی کلاله گل زعفران کرد که گل‌های تازه بر روی نوار نقاله‌ای (که بر روی آن قطعاتی با مقطع T شکل به صورت عرضی نصب شده است) ریخته می‌شود سپس از ارتفاع ۲ متری گل‌ها بر روی یک استوانه (که بر روی آن قطعاتی با مقطع U شکل تعبیه شده است) ریخته می‌شوند.

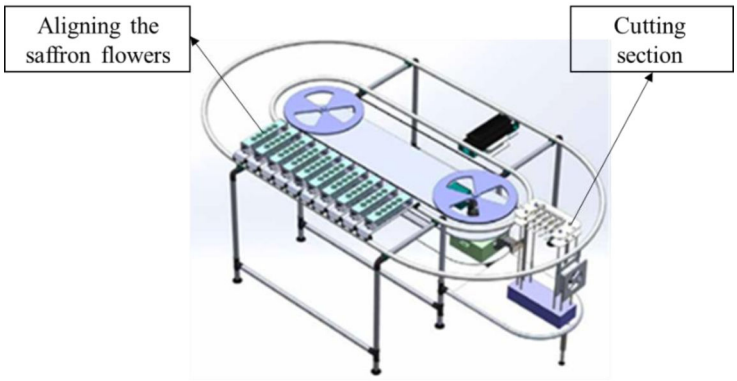
انتهای این مقاطع U شکل باریک می‌شود. مراحل قبل موجب می‌شود که گل‌ها از یک‌دیگر مجزا شوند و از سوی دیگر گل‌ها از سمت دم گل در محل باریک مقطع U شکل قرار گیرند. سپس با رسیدن گل‌ها به یک دیسک برش دهنده، دم گل از سایر اجزای گل جدا می‌گردد. اجزای برش خورده زعفران بر روی یک درام شش ضلعی (که تعدادی قطعه با مقطع مثلثی به صورت محیطی به فاصله ۲ میلی‌متر از یک دیگر نصب گردیده است) سقوط می‌کند. اجزای ریز (مانند پرچم) از این فاصله ۲ میلی‌متری عبور کرده و اجزای درشت تر به سمت یک نوار نقاله هدایت می‌شوند (شکل ۱۲). استفاده از نوار نقاله با مقطع T شکل و استوانه‌ای با مقطع U شکل برای تفکیک اولیه گل‌ها است. این سیستم باعث می‌شود که گل‌ها به خوبی از یک‌دیگر جدا شوند و فرآیند جداسازی دقیق‌تری صورت گیرد. استفاده از دیسک برش دهنده برای جدا کردن دم گل از سایر اجزای گل نیز به بهبود دقت و کیفیت جداسازی کمک می‌کند. هم‌چنین، طراحی درام شش ضلعی با قطعات مثلثی برای جداسازی اجزای ریزتر از درشت‌ترها، به کارآمدی سیستم افزوده و امکان پردازش بهتر محصول را فراهم می‌کند. از سوی دیگر، یکی از چالش‌های اصلی، پیچیدگی مکانیکی سیستم و نیاز به تنظیم دقیق مقاطع T و U شکل برای اطمینان از جداسازی صحیح گل‌ها است. این امر می‌تواند باعث کاهش کارایی و افزایش نیاز به نگه‌داری و تعمیرهای مداوم شود. برای بهبود این دستگاه، پیشنهاد می‌شود که سیستم مکانیکی بهینه‌سازی شود تا مقاومت و دوام بیش‌تری داشته باشد، در حالی که نیاز به تنظیمات مکرر کاهش یابد. استفاده از مواد با کیفیت بالا و مقاوم در برابر سایش می‌تواند طول عمر دستگاه را افزایش دهد و هزینه‌های نگه‌داری را کاهش دهد. هم‌چنین، می‌توان از فناوری‌های جدیدتری مانند حسگرهای پیشرفته و سیستم‌های خودکار برای کنترل دقیق‌تر فرآیند جداسازی استفاده کرد، که می‌تواند دقت و کارایی دستگاه را بهبود بخشد. ایجاد یک سیستم نظارتی و هشدار دهنده نیز می‌تواند از خرابی‌های احتمالی جلوگیری کرده و بهره‌وری دستگاه را افزایش دهد.

(الف) (ب) (ج)

شکل ۱۲- (الف) بخش ردیف کننده گل‌های زعفران (ب) بخش برش دهنده (ج) بخش جداکننده سیستم مکانیزه جداسازی کلاله گل زعفران (Jahanshiri, 2016).

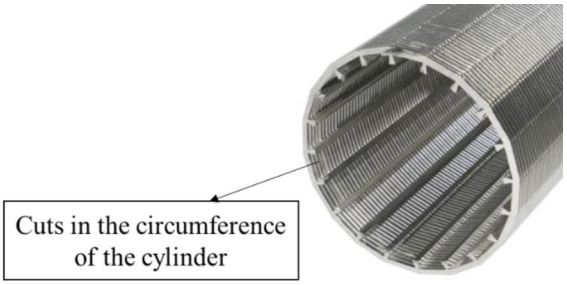
Figure 12- (a) Lining up the flower (b) Flower cutter (c) Mechanized separator of stigma from saffron flower (Jahanshiri, 2016).

آخوندی (Akhundi, 2017)، اقدام به ساخت دستگاه با نام زعفران پاک کن مکانیکی کرد که در آن واگن‌ها توسط کاربر پر می‌شوند. واگن‌ها به سمت گیره‌ها (که دو عدد می باشند و در بالا و پایین قرار می‌گیرند) حرکت می‌کنند (شکل ۱۳). در این دستگاه از چرخش نسبی دم‌گل نسبت به گلبرگ به منظور برش اجزای گل استفاده شده است. گیره پایینی به اندازه ۱۸۰ درجه حول گل‌ها می‌چرخد. بنابراین گلبرگ‌ها که ترد هستند شکسته می‌شود و ریشه‌ها فقط می‌چرخند. گیره‌های پایینی به سمت زمین جا به جا می‌شوند و کلاله‌ها را نیز با خود به سمت پایین حرکت می‌دهند. سپس یک برش دهنده اقدام به برش کلاله‌ها می‌نماید و جاذبه زمین آن‌ها را به سمت زمین هدایت می‌کند. جریان هوا موجب تخلیه شدن واگن‌ها از باقی‌مانده گلبرگ‌ها می‌شود. بنابراین، این دستگاه استفاده از نیروهای دورانی برای جداسازی اجزای گل زعفران است که به شکستن گلبرگ‌های ترد و حرکت دادن کلاله‌ها به سمت پایین کمک می‌کند. این روش می‌تواند کارایی بالایی در جداسازی اجزای مختلف گل داشته باشد و به بهبود کیفیت جداسازی کمک کند. هم‌چنین، استفاده از جریان هوا برای تخلیه باقی‌مانده گلبرگ‌ها از واگن‌ها به تسهیل و تسریع فرآیند پاکسازی کمک می‌کند. با این حال، یکی از چالش‌ها، نیاز به نیروی انسانی برای پر کردن واگن‌ها است که می‌تواند فرآیند را زمان‌بر و نیازمند نیروی کار کند. هم‌چنین، پیچیدگی مکانیکی دستگاه و استفاده از گیره‌ها و نیروی دورانی ممکن است نیاز به نگه‌داری مکرر داشته باشد و خطر خرابی قطعات را افزایش دهد. این موارد می‌تواند هزینه‌های عملیاتی و نگه‌داری را افزایش داده و بهره‌وری دستگاه را کاهش دهد (Chakravarthy et al., 2019). برای بهبود این دستگاه، می‌توان به سمت افزایش خودکارسازی حرکت کرد. به عنوان مثال، می‌توان از سیستم‌های خودکار برای پر کردن واگن‌ها استفاده کرد تا نیاز به نیروی انسانی کاهش یابد. هم‌چنین، بهینه‌سازی طراحی مکانیکی دستگاه و استفاده از مواد با دوام می‌تواند طول عمر دستگاه را افزایش دهد و نیاز به تعمیرها را کاهش دهد. استفاده از حسگرها و سیستم‌های کنترل پیشرفته نیز می‌تواند دقت و کارایی فرآیند جداسازی را بهبود بخشد و از خطاهای احتمالی جلوگیری کند.



شکل ۱۳- بخش برش دهنده و بخش ردیف کننده زعفران پاک کن مکانیکی (Akhundi, 2017)

Figure 13- The section of cutting the flower and lining up the flower in the mechanical separator (Akhundi, 2017).

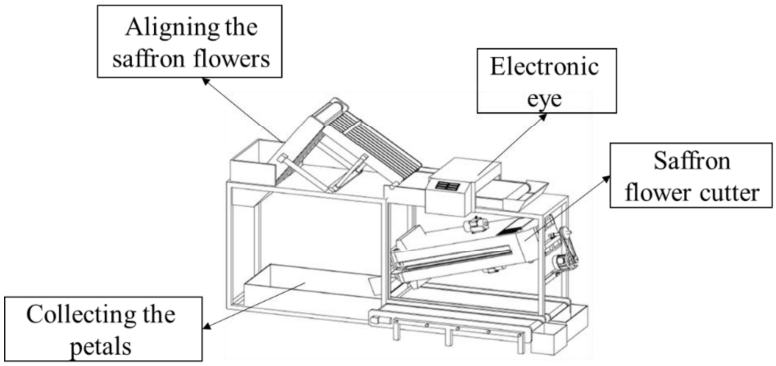


شکل ١٤- بخش جداساز دستگاه زعفران پاک کن با نوارهای برجسته و شیارهای موازی (Ansari, 2019)
Figure 14- Separating saffron with raised strips and parallel grooves (Ansari, 2019).

انصاری (Ansari, 2019) اقدام به ساخت دستگاه زعفران پاک کن با نوارهای برجسته و شیارهای موازی کرد که در آن گل‌ها توسط کاربر در داخل دستگاه قرار می‌گیرند پس از قرار گرفتن گل به صورت دستی در داخل دستگاه و به سمت پایین قرار گرفتن گل‌ها توسط نقاله، گل‌ها توسط تیغه های برش دهنده، بریده می شوند. با وجود برش‌هایی در محیط استوانه، اجزای ریزتر مانند پرچم و کلاله از محیط استوانه خارج می‌شوند. این اجزا به کمک جریان هوا مجددا خالص سازی و جداسازی می‌شوند.

فدایی همت آبادی (Fadaei Hemmatabadi, 2019) اقدام به ساخت دستگاهی با نام دستگاه فرآوری گل زعفران مبتنی بر چشم الکترونیک و تیغه سوراخ کننده همراه با جداسازی اتوماتیک مبتنی بر خواص فیزیکی اجزاء گل کرد که در آن گل‌ها در یک صف بر روی ایرانیت با مقطع سینوسی حرکت می‌کنند. گل‌ها از حسگرهای نوری عبور کرده و بخش تیره آن جهت برش تشخیص داده می‌شود و سپس تیغه حلقوی اقدام به برش گل‌ها می‌نماید. پس از برش گل‌ها توسط تیغه حلقوی، اجزای مختلف گل بر روی یک صفحه ارتعاشی سوراخ دار شیب دار حرکت داده می‌شود. گلبرگ‌ها از روی سطح سر خورده و به سمت پایین هدایت می‌شوند. کلاله‌ها داخل حفره ها گیر می‌کنند و پرچم‌ها از داخل حفره ها پایین می‌افتند (شکل ۱۵). از مزیت‌های این دستگاه، استفاده از حسگرهای نوری برای تشخیص محل برش مناسب بر روی گل‌ها است، که باعث افزایش دقت و کاهش هدررفت محصول می‌شود. هم‌چنین، استفاده از تیغه حلقوی و مکانیزم خودکار برای جداسازی اجزاء مختلف گل، از جمله کلاله، پرچم و گلبرگ، بهره‌وری و سرعت فرآیند را بهبود می‌بخشد. طراحی صفحه ارتعاشی سوراخ دار با شیب مناسب نیز به تفکیک دقیق‌تر اجزاء کمک می‌کند، که این امر به افزایش کیفیت نهایی محصول می‌انجامد. اما وابستگی به تشخیص بصری ممکن است در شرایط نوری مختلف عملکرد یک‌سانی نداشته باشد، که می‌تواند به کاهش دقت در برش و جداسازی منجر شود. بنابراین افزودن سیستم‌های خودکار تنظیم نور برای بهبود عملکرد حسگرهای نوری در شرایط نوری متغیر می‌تواند دقت تشخیص و برش را افزایش دهد. بهینه‌سازی صفحه ارتعاشی برای کاهش آسیب به کلاله‌ها نیز می‌تواند به حفظ کیفیت محصول کمک کند.

عباسی دوغ آبادی و اسماعیلی (Abbasi Doghabadi & Esmaili, 2019)، اقدام به ساخت دستگاه خودکار جداکننده کلاله از گل زعفران با روش اسکن ضخامت کردند که در آن از یک سیستم گل انداز جهت جداسازی گل‌ها استفاده شده است. این دستگاه دارای دو عدد جک با حرکت رفت و برگشتی (جلو و عقب) می‌باشد (که این جک‌ها مجهز به دستک بردارنده گل هستند). این جک‌ها دارای پیستونک‌های مکنده‌ای می‌باشند که قابلیت گرفتن گل‌ها را فراهم می‌کنند. سپس جک‌ها با حرکت رو به سمت جلو خود، گل را به دیواری می‌رسانند که موجب راست شدن گل می‌شود (به صورت سر یا ته).



شکل ۱۵- شمایی از دستگاه فرآوری گل زعفران مبتنی بر چشم الکترونیک و تیغه سوراخ کننده همراه جداساز اتوماتیک مبتنی بر خواص فیزیکی اجزاء گل (Fadaei Hemmatabadi, 2019)

Figure 15- Schematic of saffron flower processing device based on electronic eye and physical properties of flower components (Fadaei Hemmatabadi, 2019).

در مرحله بعدی، گل‌ها از طریق یک دیواره شیب‌دار (با زاویه ۴۵ درجه) به سمت یک واگن هدایت می‌شوند. پس از قرارگیری مناسب گل‌ها در واگن‌ها، صفحه تشخیص ضخامت دم گل به صورت متناوب به سمت جلو حرکت می‌کند تا نقطه خاصی از گلوگاه گل را تشخیص دهد. آن گاه صفحه برش که به کمک جک پنوماتیک تا کف واگن قابلیت پایین آمدن را دارد، اقدام به برش گل می‌نماید. سپس فرچه تمیز کننده که به کمک جک پنوماتیک عمل می‌کند، به کف واگن تماس پیدا کرده و با حرکت واگن به سمت عقب، کف واگن از اجزاء زعفران برش خورده تخلیه می‌شود. استفاده از سیستم اسکن ضخامت برای تشخیص نقطه مناسب برای برش گل‌ها است که دقت و کارایی فرآیند جداسازی را بهبود می‌بخشد. هم‌چنین، وجود جک‌ها و پیستونک‌های مکنده برای گرفتن و حرکت دادن گل‌ها، مکانیزم مناسبی برای اطمینان از قرارگیری صحیح گل‌ها و انجام فرآیند برش فراهم می‌کند. استفاده از فرچه تمیز کننده برای تخلیه اجزاء زعفران برش خورده نیز به بهبود بهداشت و تمیزی دستگاه کمک می‌کند. از سوی دیگر، پیچیدگی مکانیکی و تعداد زیاد قطعات متحرک، از جمله جک‌ها و سیستم‌های مکنده، ممکن است به نگه‌داری و تعمیرهای مکرر نیاز داشته باشد که می‌تواند هزینه‌های عملیاتی را افزایش دهد. هم‌چنین، فرآیند مکانیکی قرارگیری و برش گل‌ها نیازمند تنظیمات دقیقی است تا از آسیب به کلاله‌ها و کاهش کیفیت محصول جلوگیری شود (Denarda et al., 2021). برای بهبود این دستگاه، می‌توان به چندین راهکار اشاره کرد. بهینه‌سازی و ساده‌سازی طراحی مکانیکی می‌تواند به کاهش هزینه‌های نگه‌داری و افزایش طول عمر دستگاه کمک کند. استفاده از مواد مقاوم‌تر و با کیفیت بالاتر برای قطعات متحرک می‌تواند نیاز به تعمیرهای مکرر را کاهش دهد. هم‌چنین، می‌توان از حسگرهای پیشرفته‌تر و سیستم‌های کنترل دقیق‌تر برای افزایش دقت در تشخیص و برش گل‌ها استفاده کرد، که می‌تواند منجر به کاهش هدررفت محصول و افزایش کیفیت کلاله‌های جدا شده شود. نهایتاً، توسعه سیستم‌های خودکار برای جایگزینی نیروی انسانی در برخی مراحل، مانند تغذیه گل‌ها به دستگاه، می‌تواند بهره‌وری کلی فرآیند را افزایش دهد.

در پژوهشی، به منظور جداسازی کلاله از سیستم سیکلون و پمپ باد جهت جداسازی دم گل از گلبرگ ها استفاده شد. این اجزاء به کمک نیروی گریز از مرگز از یک دیگر جدا می‌گردند. بر اساس نتیجه‌های منتشر شده، عملکرد این روش در جداسازی کلاله از سایر اجزای گل زعفران برش خورده، ۸۹ درصد می‌باشد (شکل۱۶) (Namazi, 2014).

شکل ١٦- بخش جداساز جریان هوایی دستگاه زعفران پاک کن (جداساز کلاله از برگ) (Namazi, 2014)

Figure 16- The air separator of the saffron processing machine (separating stigma from leaves) (Namazi, 2014).

نتیجه‌گیری

انجام مراحل کاشت، داشت، برداشت و فرآوری محصول زعفران به صورت دستی موجب ارزشمند شدن این محصول زراعی شده است. اما انجام این مراحل به صورت دستی باعث ایجاد نگرانی‌هایی در زمینه آلودگی‌های میکروبی و قارچی گشته است. هم چنین پژوهش‌های متفرقه ای در زمینه فرآوری این محصول در جهت جداسازی کلاله از گل تازه زعفران صورت پذیرفته است که متاسفانه تا کنون پژوهشی در جهت یک‌پارچه سازی این تحقیقات انجام نشده است. در این مطالعه با طبقه بندی مطالعات انجام گرفته به سه مرحله یعنی روش‌های ردیف نمودن گل قبل از مرحله برش (شامل نیروی انسانی، ربات‌ها و مکانیزم های مکانیکی و جریان هوا)، روش‌های برش اجزای گل (شامل بیرون کشیدن کلاله، نیروی دورانی و تیغه‌های برش) و روش‌های جداسازی کلاله (شامل نیروی گریز از مرکز، ضریب اصطکاک، جریان هوا و صفحات متخلخل) اقدام به توصیف این روش‌ها شد. با بررسی و مقایسه دستگاه‌های مختلف جداسازی کلاله زعفران، مشاهده شد که ترکیبی از تکنیک‌های پردازش تصویر، حسگرهای نوری، سیستم‌های مکانیکی با طراحی بهینه، و استفاده از جریان هوا، به نظر می‌رسد بهترین روش برای دستیابی به دقت و کیفیت بالا در جداسازی کلاله‌ها باشد. این دستگاه‌ها از مکانیسم‌های مکانیکی و مکشی گرفته تا سیستم‌های پیشرفته‌تر مانند پردازش تصویر و حسگرهای نوری بهره می‌برند. روش‌های پیشرفته پردازش تصویر، با دقت بالایی که در شناسایی محل برش دارند، همراه با حسگرهای نوری برای تشخیص دقیق رنگ و شکل کلاله‌ها، می‌توانند دقت و سرعت جداسازی را افزایش دهند. این ترکیب، با سیستم‌های مکانیکی بهینه‌شده، مانند بازوها و گیره‌های دقیق، و هم‌چنین استفاده از جریان هوا به عنوان یک روش غیرتماسی برای کاهش آسیب به کلاله‌ها، می‌تواند به حفظ کیفیت محصول نهایی کمک کند. با این حال، همچنان چالش‌هایی مانند پیچیدگی مکانیکی، نیاز به نگه‌داری و تنظیمات دقیق، و هزینه‌های بالای نگه‌داری و تعمیرها در این دستگاه‌ها مشاهده می‌شود. برای بهبود عملکرد این سیستم‌ها، پیشنهاد می‌شود از سخت‌افزارهای سریع‌تر و الگوریتم‌های پردازش تصویر بهبود یافته استفاده شود تا سرعت پردازش و دقت تشخیص افزایش یابد. هم‌چنین، استفاده از سنسورهای اضافی برای شناسایی بهتر ویژگی‌های فیزیکی و تغییرات محیطی، و بهینه‌سازی سیستم‌های مکانیکی برای کاهش تماس

مستقیم با کلاله‌ها، می‌تواند کارایی و کیفیت نهـایی محصـول را ارتقا دهد. به‌کارگیری مواد مقاوم و با دوام برای قطعات مکانیکی و بهینه‌سـازی سیسـتم‌های کنتـرل نیـز می‌توانـد هزینـه‌های نگه‌داری را کاهش داده و عمر مفید دستگاه را افـزایش دهـد. بـا این حال متاسفانه، احتمال می‌رود نتـوان بـه طـور قطـع و یقـین یکی از این فناوری‌ها را به عنوان یک دسـتگاه بـا عملکـرد بـالا معرفی نمود چراکه عدم عملکرد مطلـوب هریـک از بخش‌هـای ردیف کن، برش دهنده و نیز جداساز کلاله موجـب افـت شـدید عملکرد خواهد شد. اما پیش بینی می‌گردد که درصـورت تجمیـع و تقویت نقاط قوت روش‌های مؤثر، می‌توان تجهیزی با عملکرد مطلوب را به بهره برداران محصول زعفران ارائه نمود.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است

سپاس‌گزاری

نویسندگان از کمک های مالی و فنی ارائه شده توسط بنیـاد ملـی علـوم ایـران (INSF)، وزارت علـوم، تحقیقـات و فنـاوری (MSRT) و سـازمان تحقیقـات، آمـوزش و تـرویج کشـاورزی (AREEO) برای این پروژه تقدیر و تشکر می کنند.

تأمین مالی

این تحقیق توسط بنیـاد ملـی علـوم ایـران (INSF)، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری (MSRT) و سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی (AREEO) تامین شده است.

منابع

Abbasi Doghabadi, H., Esmaili, A. (2019). Automatic machine for separating the stigma from saffron flower with thickness scanning method. Patent No. 104492. (In Persian)

Abdullahakimovich, T. A., & Sarvarbek, K. (2021). Pneumatic weapons and their technical properties. *Galaxy International Interdisciplinary Research Journal*, *9* (8), 165-170.

Abrishmi Far, M.A. (2004). A method in the saffron processing. Patent No. 30788. (In Persian)

Ahrazem, O., Rubio-Moraga, A., Nebauer, S. G., Molina, R. V., & Gomez-Gomez, L. (2015). Saffron: its phytochemistry, developmental processes, and biotechnological prospects. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, *63* (40), 8751-8764.

Akhundi, A. (2017). The mechanical saffron machine. Patent No. 98644. (In Persian)

Aliabadi, R., & Mohammadi, M. (2012). Introducing a new method for automating cutting of saffron flowers using intelligent techniques. 2nd National Conference Computer and Electrical and IT 24 May 2012, Markazi-Khomeyn pp. 22-31. (In Persian)

Ansari, K. (2019). Separating saffron with raised strips and parallel grooves. Patent No. 103909. (In Persian)

Aziz, S., Mostofi, M. R., & Faridi, H. (2015). Design and Construction of a Mechanical machine for Separating Stigmas from the Saffron's Petals. *Journal of Multidisciplinary Engineering Science & Technology,* 2 (9), 2408-2416.

Cardone, L., Castronuovo, D., Perniola, M., Cicco, N., & Candido, V. (2020). Saffron (*Crocus sativus* L.), the king of spices: An overview. *Scientia Horticulturae*, *272*, 109560.

Chakravarthy, Y. K., Srinath, A., Prasad, P. R., Krishna, K. P., Nagadhar, K. C., & Kumar, K.

R. (2019). Micro controller based post harvesting robot. *International Journal of Mechanical Engineering & Technology*, *10* (11).

Cid-Pérez, T. S., Nevárez-Moorillón, G. V., Ochoa-Velasco, C. E., Navarro-Cruz, A. R., Hernández-Carranza, P., & Avila-Sosa, R. (2021). The relation between drying conditions and the development of volatile compounds in saffron (*Crocus sativus*). *Molecules*, *26* (22), 6954.

Chen, T. C., & Yu, S. Y. (2021). The review of food safety inspection system based on artificial intelligence, image processing, and robotic. *Food Science & Technology*, *42*, e35421.

Dehbashi, M., Rajaei, A., & Kardanmoghadam, H. (2022). Location and detection of the saffron flower using image processing technique. *Saffron Agronomy & Technology*, *10* (3), 227-260. (In Persian with English abstract)

Denarda, A. R., Bertetto, A. M., & Carbone, G. (2021). Designing a Low-Cost Mechatronic Device for Semi-Automatic Saffron Harvesting. *Machines*, *9* (5), 94.

Emadi, B., & Yarlagadda, P. (2008). Design of a wind tunnel for separating flower parts of saffron. *Journal of Achievements in Materials & Manufacturing Engineering*, *31* (2), 635–638.

Fadaei Hemmatabadi, M. (2019). Saffron flower processing device based on electronic eye and blade with automatic separator based on the physical properties of flower components. Patent No. 104283. (In Persian)

Farah Bakhsh, K., & Torabi Farm, A. (2015). Device for harvesting flowers and separating saffron stigma in the field. Patent No. 92259. (In Persian)

Ghiasi, J. (2012). Processing of saffron using physical and aerodynamic properties of flower components. Patent No. 97756. (In Persian)

Haddad Beigi, S.H. (2007). The saffron stigma sorting machine. Patent No. 39367. (In Persian)

Hashemi Hajiabad, M., Shahsavan Nejad, K.Z. (2005). The saffron separating robot along with the detection of the stigma through image processing. Patent No. 35183. (In Persian)

Jahanshiri, M. (2016). Mechanized separator of stigma from saffron flower. Patent No. 96974. (In Persian)

Karami, M., Durali, M., Khakrand, M.H. (2015). The automatic saffron flower processing machine based on machine vision. Patent No. 92799. (In Persian)

Korendiy, V., Kachur, O., Hurey, I., Predko, R., Palash, R., & Havrylchenko, O. (2022). Modelling and experimental investigation of the vibratory conveyor operating conditions. *Vibroengineering Procedia*, *47*, 1-7.

Krishnan, A. R., Mathew, J., Salam, S. A., Jiju, V., & Elessy, A. (2017). A review on saffron as an alternative therapy in medicine and dermatology. *European Journal of Pharmaceutical & Medical Research*, *4*, 283-286.

Namazi, M. (2014). The saffron processing machine. Patent No. 89235. (In Persian)

Ordoudi, S., Ricci, C., Imparato, G., Chroni, M., Nucara, A., Gerardino, A., & Bertani, F. (2024). A non-invasive, sensor-based approach to exploit the autofluorescence of saffron (*Crocus sativus* L.) for on-site evaluation of aging. *Food Chemistry*, *455* (15), 139822.

Priyadharshini, J., Arunn, T., Roshan, B. R., & Kumar, S. V. (2023). Saffron harvesting using robotic arm embedded on a rover. 2nd International Conference on Automation, Computing and Renewable Systems (ICACRS) 11-13 Dec. 2023, Pudukkottai, Tamilnadu, India.

Ramezani, M., Dourandish, A., Jamali Jaghdani, T., & Aminizadeh, M. (2022). The influence of dense planting system on the technical efficiency of saffron production and land use

sustainability: Empirical evidence from Gonabad county, Iran. *Agriculture*, *12* (1), 92.

Rashedi Majaz, A. (2009). Saffron flower stigma separator device using centrifugal force. Patent No. 60892. (In Persian)

Saeidirad, M. H. (2020). Mechanization of saffron production. In Saffron (pp. 187-204). Elsevier.

Saeidirad, M. H., Sharayei, P., & Zarifneshat, S. (2014). Effect of drying temperature, airflow rate and flower types on dried saffron flower quality. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, *16* (4), 251-254.

Serrano-Díaz, J., Sánchez, A. M., Alvarruiz, A., & Alonso, G. L. (2013). Preservation of saffron floral bio-residues by hot air convection. *Food Chemistry*, *141* (2), 1536-1543.

Serrano-Díaz, J., Sánchez, A. M., Maggi, L., Martínez-Tomé, M., García-Diz, L., Murcia, M. A., & Alonso, G. L. (2012). Increasing the applications of Crocus sativus flowers as natural antioxidants. *Journal of Food Science*, 77 (11), pp. 1162-1168.

Sharayei, P., Hedayatizadeh, M., Chaji, H., & Einafshar, S. (2018). Studying the thin-layer drying kinetics and qualitative characteristics of dehydrated saffron petals. *Journal of Food Processing & Preservation*, *42* (9), e13677.

Wang, Z., Li, X., Xu, J., Yang, Z., & Zhang, Y. (2021). Effects of ambient temperature on flower initiation and flowering in saffron (*Crocus sativus* L.). *Scientia Horticulturae*, *279* (15), 109859.

Wijaya, R., Hariono, B., Saputra, T. W., & Rukmi, D. L. (2020). Development of plant monitoring systems based on multi-camera image processing techniques on hydroponic system. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 411, No. 1, p. 012002). IOP Publishing.

Winterhalter, P., & Straubinger, M. (2000). Saffron—renewed interest in an ancient spice. *Food Reviews International*, *16* (1), 39-59.

Zarei Fard, M. (2015). Automatic saffron flower processing machine based on machine vision. Patent No. 92049. (In Persian)

Zhang, J., Wang, H., Gao, Z., Zhang, S., Liu, S., & Yang, S. (2024). Kinematic mechanics study of silicon wafers and glass particles oscillatory separation based on friction coefficient differences. *Minerals Engineering*, *216*, 108876.