Journal of Saffron Research (semi-annual)
Vol.11, No.1, Spring & Summer, 2023
p. 177-200
http://dx.doi.org/10.22077/JSR.2023.6225.1211

University of Birjand

Review Article

Machine Vision Applications in Saffron Plant Field

Seyed Reza Movahhed-Ghodsinya[1*]

1- Assistant Professor, Electrical and Computer Department, Technical and Engineering Faculty, Torbat Heydarieh University, Torbat Heydarieh, Iran.
*Corresponding Author: sr.movahhed@torbath.ac.ir

Received 17 March 2023; Accepted 25 September 2023

Extended Abstract

Introduction: Saffron, a prized spice with extensive applications in both culinary and medicinal realms, is extracted from the stigmas of the *Crocus sativus* flower, boasting a distinctive aroma and flavor profile. Its exceptional value renders it susceptible to adulteration, a process involving the addition of less expensive components to increase quantity or reduce production costs. Adulteration poses a substantial risk to quality and purity of saffron, potentially resulting in health concerns and economic setbacks. Therefore, ensuring the genuineness of saffron products is imperative. Machine vision techniques have emerged as a promising solution for detecting saffron adulteration and elevating product quality.

Materials and Methods: To assess the current state of research on how machine vision is used in the field of saffron plant, we conducted a comprehensive literature review utilizing various scientific databases, including Scopus, Web of Science, and PubMed. The search was conducted using a combination of keywords such as saffron, image processing, adulteration, and quality control. Articles were screened based on their relevance to the subject matter and adherence to inclusion criteria.

Results and Discussion: Our review underscores saffron image processing as a burgeoning research domain with the potential to substantially enhance the quality and purity of saffron products. Diverse imaging techniques have been employed for capturing saffron imagery, including RGB imaging, HSI, and hyperspectral imaging. RGB imaging, a straightforward and widely adopted method, captures images in the red, green, and blue channels. HSI imaging, on the other hand, captures images across hue, saturation, and intensity channels, while hyperspectral imaging records images at multiple wavelengths. Image preprocessing plays a pivotal role in saffron image processing, encompassing noise reduction, color balance correction, and contrast enhancement. Feature extraction and classification are equally crucial steps, involving the

identification and selection of pertinent image features and their subsequent categorization as authentic or adulterated. A variety of methodologies have been devised for saffron adulteration detection, including chemometric analysis, machine learning, and deep learning. Chemometric analysis employs statistical techniques to analyze the chemical composition of saffron samples and identify adulterants. Machine learning, a facet of artificial intelligence, entails training computer models on datasets to predict the authenticity of new samples. Deep learning, a more advanced variant, employs artificial neural networks to extract features from the images and classify them. While chemometric analysis has found widespread application in saffron adulteration detection and yielded promising outcomes, recent studies indicate the potential of machine and deep learning. Deep learning models such as convolutional neural networks and recurrent neural networks have been instrumental in feature extraction from saffron images and the subsequent authentication of their purity.

Conclusion: To conclude, our review underscores the critical role of machine vision in safeguarding the quality and purity of saffron products. The application of diverse imaging techniques and detection methodologies has demonstrated remarkable promise in detecting saffron adulteration. Nevertheless, further research is imperative to refine and advance the accuracy and reliability of saffron image processing techniques, particularly within the domain of saffron adulteration detection. Given the escalating demand for high-quality saffron products, the development of effective saffron image processing techniques stands as a critical factor in ensuring consumer trust and safety.

Conflict of Interest: Authors declared no conflict of interest.

Keywords: Image processing, Machine vision, Saffron, Stigma, Grading.

نشریه پژوهش‌های زعفران (دو فصلنامه)
جلد یازدهم، شماره اول، بهار و تابستان ۱۴۰۲
شماره صفحه: ۲۰۰-۱۷۷
http://dx.doi.org/10.22077/JSR.2023.6225.1211

مقاله مروری

کاربردهای بینایی ماشین در حوزه گیاه زعفران

سیدرضا موحد قدسی‌نیا[1]*

۱- استادیار، گروه برق و کامپیوتر، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربت حیدریه، تربت حیدریه، ایران.

* نویسنده مسئول: *Email: sr.movahhed@torbath.ac.ir*

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۲۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۰۳

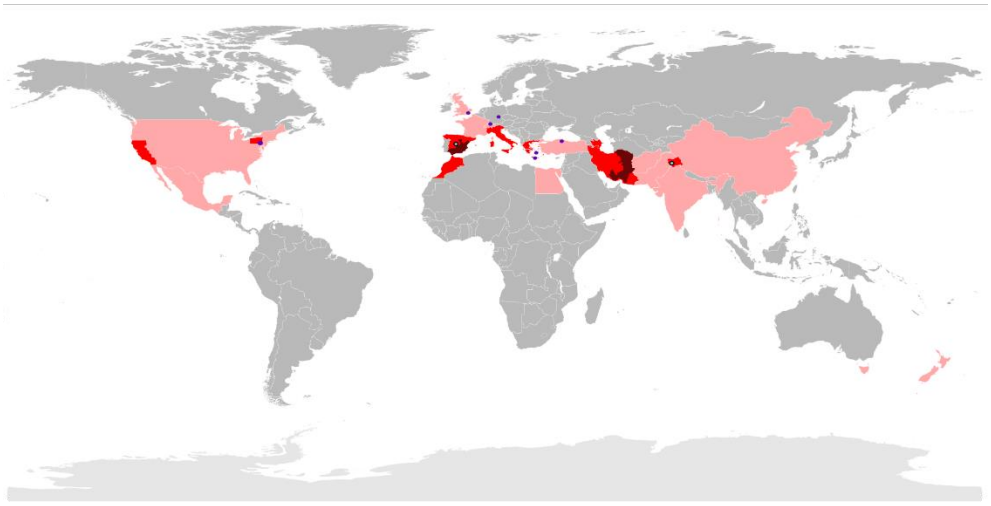
چکیده

این مقاله وضعیت فعلی تحقیقات در مورد چگونگی استفاده از بینایی ماشین در حوزه گیاه زعفران را بررسی می‌کند. زعفران یک ادویه با ارزش است که معمولاً دارای کاربردهای آشپزی و دارویی می‌باشد. با توجه به ارزش این محصول، نیازمند به اطمینان از کیفیت و خلوص آن وجود دارد که این مهم را می‌توان از طرق مختلف بخصوص از طریق روش‌های مبتنی بر بینایی ماشین بررسی نمود. در این راستا در این مقاله جنبه‌های مختلف پردازش تصویر زعفران، ازجمله گرفتن تصویر، پیش‌پردازش، استخراج ویژگی و طبقه‌بندی بررسی شده‌است. استفاده از تکنیک‌های مختلف تصویربرداری مانند تصویربرداری RGB، HSI و تصویربرداری فراطیفی به همراه مزایا و محدودیت‌های آن‌ها نیز موردبحث قرارگرفته است. این بررسی همچنین اهمیت استفاده از بینایی ماشین برای پردازش تصویر زعفران را در تشخیص تقلب زعفران که یک مشکل مهم در صنعت زعفران است، برجسته می‌کند. روش‌های مختلفی برای تشخیص تقلب، مانند آنالیز شیمی‌سنجی، یادگیری ماشینی و یادگیری عمیق، به‌تفصیل موردبحث قرارگرفته‌اند. به‌طورکلی، نتایج بررسی مقالات مختلف نشان می‌دهد که پردازش تصویر زعفران یک حوزه تحقیقاتی امیدوارکننده است که پتانسیل قابل توجهی برای بهبود کیفیت و خلوص محصولات زعفران دارد.

واژه‌های کلیدی: پردازش تصویر، بینایی ماشین، زعفران، کلاله، درجه‌بندی.

مقدمه

درجه بندی محصولات کشاورزی بر پایه تشخیص کیفیت بصری که به‌وسیله عامل انسانی انجام می‌شود، معمولاً زمان‌بر، آهسته و ناپایدار است. درجه‌بندی دقیق، سریع، پایدار و کم‌هزینه می‌تواند با استفاده از بینایی ماشین انجام گردد. در صنایع غذایی کشورهای پیشرفته، سیستم های خودکار با توجه به این حقیقت که نیروی کارگری گران بوده و دقت انسانی نیز محدود هستند، بیشتر توسعه‌یافته است. پیشرفت در فناوری‌های کامپیوتری و توجه به‌خصوص به مبحث پردازش تصویر در طول دهه گذشته سبب شده که کارایی این تکنیک در کنترل کیفی محصولات غذایی و کشاورزی بیشتر شناسانده شوند. زعفران گران‌ترین ادویه در جهان است. این محصول در کشورهای مختلف جهان ازجمله ایران، هند، اسپانیا، یونان، ایتالیا و مراکش کشت می‌گردد. پراکندگی کشت و تولید این گیاه در شکل ۱ نشان داده‌شده است. ایران بزرگ‌ترین تولیدکننده زعفران در جهان می‌باشد که هم‌اکنون ۹۴ درصد زعفران جهان در ایران تولید می‌گردد (Dehbashi, 2022).



شکل ۱. مناطق و مراکز تولید و کشت گیاه زعفران.
Fig 1. Areas and centers of saffron production and cultivation.

امروزه کلیه مراحل برداشت تا خشک‌کردن گل زعفران به‌صورت سنتی و دستی صورت می‌گیرد که شرایط کاری بسیار سخت و هزینه‌های بالا دارد. کیفیت نیز در این مسیر به خاطر پایبندی کشاورزان به روش‌های سنتی قربانی شده و به نظر می‌رسد که روش‌های نوین می بایست جایگزین کاشت، داشت و برداشت‌های سنتی زعفران گردد. دیگر بسته‌بندی‌های زیبا به‌تنهایی جوابگوی نیاز مشتریان زعفران ایران نبوده و فرآوری نامناسب این محصول با استانداردهای پایین باعث از دست دادن بازارها خواهد شد. هم‌اکنون در ایران، فرآیند فرآوری زعفران به‌صورت دستی و توسط کارگر انجام می شود که چالش‌های بسیار زیادی دارد. این روش زمان‌بر می‌باشد و به دلیل عدم رعایت اصول بهداشتی و طولانی شدن زمان جداسازی، موجب کاهش کیفیت محصول نهایی به‌ویژه از دست دادن عطر و بوی زعفران می‌گردد. به همین دلیل، مکانیزه کردن عملیات جداسازی کلاله از گل زعفران، می‌تواند علاوه بر کاهش هزینه‌های تولید و افزایش کیفیت محصول، بسیاری از مشکلات آلودگی ناشی از جداسازی دستی را برطرف کند. در سال‌های اخیر، جداسازی مکانیزه کلاله از گل زعفران بسیار موردتوجه تولیدکنندگان و صنعت گران داخلی و خارجی قرارگرفته و ماشین‌هایی نیز برای این منظور طراحی و ساخته‌شده است. خودکارسازی این فرآیند می‌تواند قیمت تمام‌شده محصول را کاهش دهد و منجر به رونق بیشتر صنعت کشت زعفران در کشور گردد (Saeidirad, 2020).

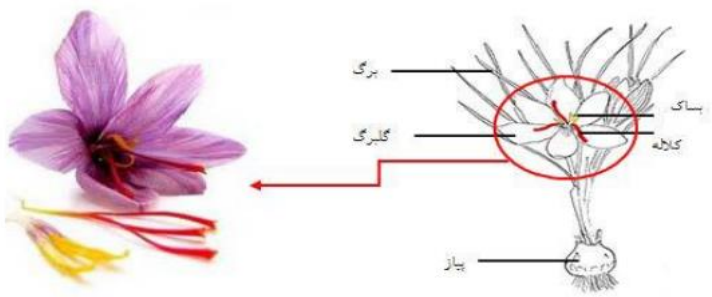
درجه‌بندی کیفیت زعفران همواره خواسته مشتریان و همچنین تجار می‌باشد. به‌طور سنتی، درجه‌بندی زعفران توسط کارشناسان بر اساس پارامترهای کیفی ظاهری انجام می‌شود. در کشورهای مختلفی مانند ایران، اسپانیا و هند، زعفران خالص با توجه به‌صورت ظاهری زعفران درجه‌بندی می‌گردد (Azarabadi & Özdemir, 2018). لازم به ذکر است که هیچ استانداردی برای درجه بندی زعفران بر اساس ظاهر آن وجود ندارد و تعاریف آن از یک کشور به کشور دیگر تغییر می‌کند. همچنین به دلیل اختلاف‌نظرهای کارشناسی در درجه‌بندی زعفران، ممکن است برخی از خطاها رخ دهد که با استفاده از یک رویکرد عینی مانند پردازش تصویر می‌توان از بروز آن جلوگیری کرد. پیشرفت در فناوری بینایی ماشین، الگوریتم‌های دقیق، قوی و کم‌هزینه‌ای را ارائه می‌دهد که می‌توان از آن‌ها برای تشخیص کیفیت مواد غذایی و همچنین درجه‌بندی کیفیت زعفران استفاده نمود (Mohamadzadeh Moghadam et al., 2020b). مطالعه برای خودکارسازی فرآیند فرآوری زعفران با استفاده از تکنیک‌های پردازش تصویر از سال‌ها قبل شروع‌شده است که در این مقاله ما به بررسی مروری بر کارهای انجام‌شده در این زمینه خواهیم پرداخت.

۱ ادبیات تحقیق

۲-۱ معرفی گیاه زعفران

زعفران با نام عمومی Saffron و نام علمی گیاه کرکوس ساتیوس (*Crocus sativus L.*) از تیره زنبقیان و سرده زعفران است. این گیاه جزو گران‌بهاترین گیاهان زراعی موجود در روی کره زمین بوده و تنها گیاهی است که واحد خریدوفروش آن به‌جای تن و کیلوگرم مثقال و گرم می‌باشد. زعفران رنگی بدون ساقه بوده و بستر مناسب رویش این گیاه خاک‌های کویری می‌باشد و به همین دلیل به طلای سرخ یا طلای کویر نیز شهرت دارد. امروزه خاستگاه اصلی این محصول در شرق مدیترانه و به‌ویژه شرق ایران است. زعفران به خاطر نیاز آبی کم اشتغال-زایی و درآمدزایی مناسب ارزآوری، بالا تحمل گیاه در سخت زیستی در برابر آفات و بیماری‌ها و همچنین خواص دارویی و غذایی، از دیرباز یک محصول استراتژیک و باارزش به‌حساب می‌آید. زعفران گیاهی است کوچک و چند ساله به ارتفاع ۱۰ الی ۳۰ سانتی‌متر که از وسط بنه یا قاعده ساقه، تعدادی برگ باریک و دراز خارج می‌شوند از وسط برگ‌ها گل زعفران خارج‌شده که به یک تا سه گل منتهی می‌شوند گل‌ها دارای ۶ گلبرگ بنفش‌رنگ هستند که ممکن است در بعضی موارد به رنگ ارغوانی باشند. همچنین گل‌ها دارای سه پرچم و یک مادگی منتهی به کلاله سه شاخه به رنگ قرمز متمایل به نارنجی هستند. قسمت مورداستفاده این گیاه انتهای خامه و کلاله سه شاخه می‌باشد که به نام زعفران مشهور است و دارای بوی معطر با طعم کمی تلخ می‌باشد (Zeraatkar et al., 2016).

زعفران مزروعی مانند زعفران‌های زینتی گیاهی است علفی، دائمی و دارای ساقه زیرزمینی یا بنه که در بین کشاورزان به پیاز زعفران مشهور است. در رأس پیازها بسته به درشتی و شادابی آن‌ها از یک تا چهار جوانه رأسی مشاهده می‌شود. جوانه‌های را سی ایجاد گل و برگ می‌کند. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده‌شده است، پوشش گل از سه کاسبرگ همرنگ بنفش تشکیل‌شده، به‌طوری‌که تشخیص کاسبرگ‌ها از گلبرگ‌ها مشکل است (Chaker-alhoseini, 2018).



شکل ۲. اندام‌های گیاه زعفران.

Fig 2. Organs of the saffron plant.

۲-۲ ترکیبات شیمیایی موجود در زعفران

در تجزیه شیمیایی کلاله زعفران عطرمایه روغن فرار، گلوکوزید کروسین[۱] کروستین[۲] و پیکروکروسین[۳] وجود دارد. بیش از ۱۵۰ ترکیب فرار و غیر فرار در کلاله خشک زعفران گزارش‌شده است. افزون بر آنتوسیانین‌ها، فلاونوئیدها، ویتامین‌ها و به‌ویژه ریبوفلاوین، اسیدهای آمینه، پروتئین‌ها، نشاسته و صمغ‌ها از دیگر ترکیبات زعفران به‌حساب می‌آیند. تجزیه خاکستر زعفران دارای مواد معدنی و املاح، منگنز، مس، پتاسیم، سدیم، آهن و گوگرد می‌باشد. ازجمله اجزای طبیعی خاکستر زعفران، عنصر بور (B) است. دو دسته متابولیت اصلی تشکیل‌دهنده زعفران عبارت‌اند از:

- کاروتنوئیدهای تشکیل‌دهنده زعفران شامل آلفا و بتا کاروتن، لیکوپن زاگزانتین[۴] کروستین و کروسین‌ها[۵] هستند.
- مونوترپن آلوئیدهای تشکیل‌دهنده زعفران شامل پیکروکروسین و سافرانال[۶] می‌باشند (Maggi et al., 2020).

رنگ‌دانه‌های موجود در زعفران دو نوع رنگ‌دانه محلول در چربی و محلول در آب هستند. لیکوپن آلفا کاروتن بتاکاروتن و زاگزانتین، ازجمله رنگ‌دانه‌های محلول در چربی می‌باشند. از گلوکوزیدهای کاوتنوئیدی محلول در آب، کروسین که مخلوطی از گلوکوزیدها هستند، دارای اهمیت بیشتری هستند. زعفران دارای آگلیکون کروستین به‌صورت آزاد و مقدار کمی رنگ‌دانه‌های آنتوسیانین می‌باشد. زعفران با اکسید آلومینیوم رنگ نارنجی تیره و با املاح قلع ایجاد رنگ زرد می‌نماید. کروسین یکی از اجزای اساسی تشکیل‌دهنده زعفران و در حقیقت منبع غنی رنگ آن و یکی از محدود کاروتنوئیدهای محلول در آب موجود در طبیعت است. عطر و بوی زعفران بستگی به روغن‌های فرار موجود در آن مانند سافرانال دارد. پیاز زعفران سمی می‌باشد و گرده پرچم گل زعفران دارای یک گلوکوزید متبلور است که مقدار آن ۰/۳ تا ۰/۵۶ متغیر می‌باشد (Moghaddasi, 2010).

باقی‌مانده اجزا گل (پرچم و گل‌پوش‌ها) زعفران از محصولات فرعی تولید زعفران هستند که حاوی مقدار قابل‌ملاحظه‌ای رنگیزه از نوع آنتوسیانین می‌باشد. این رنگیزه به همراه دیگر ترکیبات فلاونوئیدی موجود در شیره سلولی رنگ بنفش گلبرگ زعفران را به وجود می‌آورد به دلیل پایداری محدود و تغییرات ایجادشده در رنگ آنتوسیانین‌ها در اثر تغییرات در PH محیط، تنها در مواد غذایی اسیدی PH کمتر از چهار امکان استفاده و نگهداری از آن‌ها وجود دارد. درنتیجه می‌توان از زعفران به‌عنوان بهترین رنگ خوراکی استفاده نمود (Cusano et al., 2018).

۲-۳ تقسیم‌بندی انواع زعفران

در ایران معمولاً زعفران تولیدی به چند شکل تقسیم‌بندی می‌گردد. یکی از اصطلاحاتی که از گذشته در این زمینه استفاده می‌شد، زعفران دختر پیچ است. این نوع زعفران شامل قسمت کلاله و خامه، (قسمت سرخ و قسمت سفید یا زردرنگ زعفران) می‌باشد که در فارسی به آن زعفران دسته‌ای نیز گفته می‌شود و در خارج از کشور آن را به‌عنوان زعفران دسته‌ای[۷] یا سرخ و سفید[۸] می‌شناسند. درواقع قسمت قرمز در این نوع زعفران باید بین ۷۵-۷۰ درصد باشد و قسمت ریشه یا کنج آن حدود ۳۰-۲۵ درصد است. از نام‌های جدیدتری که بعداً مرسوم شد، زعفران سرگل یا به‌اصطلاح عامیانه زعفران سر قلم بود که از زعفران دسته‌ای تولید گردید، بدین نحو که قسمت‌های زرد آن را با قیچی کردن و سپس با استفاده از روش الکتریسیته ساکن جدا کردند و زعفرانی تمیزتر و کاملاً قرمز به دست آوردند که در زبان انگلیسی به آن کاملاً سرخ[۹] گویند و مشابه زعفرانی است که کوپه[۱۰] (قطع‌شده یا بریده) گفته می‌شود. بعدها زعفران‌هایی را که برای تهیه آن‌ها به‌طور مستقیم قسمت قرمز (تنها شامل مقدار بسیار کمی از زردی) را از گل جدا می‌کنند، پوشالی نامیدند، شاید به این دلیل که این نوع یک حالت حجیم و پوشال مانند پیدا می‌کند. هرکدام از این زعفران‌ها ممکن است درجه یک یا دو و مرغوب یا نامرغوب

---

[۱] Crocin glucoside
[۲] Crocetin
[۳] Picrocrocin
[۴] Zeaxanthin
[۵] Crocin
[۶] Safranal
[۷] Bunch
[۸] Red & White
[۹] All-Red
[۱۰] Coupé

باشند و هیچ‌یک را نمی‌توان به دیگری ترجیح داد. آنچه مسلم است قدرت رنگ‌دهی و کیفیت زعفران دسته‌ای به‌مراتب پایین‌تر از انواع دیگر زعفران است، همین‌طور ازنظر روش خشک‌کردن چون با تأخیر خشک می‌گردد و درواقع بخشی از قدرت رنگ‌دهی خود را در طول فرآیند خشک‌کردن از دست می‌دهد دارای کیفیت پایین‌تری است (Aliabadi, 2013).

۲-۴ فرآیند برداشت محصول زعفران

امروزه فناوری برداشت مکانیکی گیاهان با محصول در حجم زیاد مانند ذرت و گندم با استفاده از ماشین‌های مکانیزه به‌راحتی انجام می‌گیرد. متأسفانه علی‌رغم پیشرفت‌های زیاد و فناوری‌های جدید همچنان برداشت محصولاتی مانند زعفران توسط نیروی انسانی و به‌صورت دستی صورت می‌گیرد که این مسئله علاوه بر افزودن هزینه تمام‌شده و تحت تأثیر قراردادن کیفیت محصول همچنین سلامتی نیروی انسانی به دلیل تماس مستقیم کارگر با آفت‌کش‌ها را به خطر می‌اندازد. طبق بررسی‌های انجام‌شده دلیل اصلی عدم وجود سیستم‌های مکانیزه شکل ردیابی خودکار، محصولات مقطع محل برش و جمع‌آوری هم‌زمان بدون آسیب رساندن به آن‌ها می‌باشد. در محصول زعفران اولین مرحله پس از شروع گل‌دهی مرحله برداشت بوده که دشوارترین و پرزحمت‌ترین و درعین‌حال حساس‌ترین مرحله زراعت زعفران است. برداشت شامل چیدن گل از مزرعه و جدا کردن کلاله از گل بوده که در هر دو مرحله توسط دست به‌وسیله کارگر و نیروی انسانی صورت می‌گیرد. بر اساس تحقیقات صورت گرفته، کشت زعفران در مناطق مختلف به سه روش کپه‌ای ردیفی و درهم انجام می‌گردد که در شکل ۳ نشان داده‌شده است (Dehbashi, 2022).

فرآیند استحصال زعفران از شروع گل‌دهی تا مصرف، سه مرحله مهم برداشت جداسازی کلاله از گل و خشک شدن کلاله را شامل می‌شود. به علت این‌که تابش نور آفتاب بر روی گل موجب باز شدن غنچه می‌گردد، برداشت چیدن غنچه یا گل زعفران در ساعات اولیه روز در هوای بسیار سرد و خشن قبل از طلوع خورشید صورت می‌گیرد. عمر متوسط گل زعفران سه روز می‌باشد. در طی این مدت کشاورز موظف به جمع‌آوری است که این موضوع خود یکی از مشکلات برداشت بوده و همچنین جداسازی کلاله از گل باید بلافاصله بعد از برداشت صورت گیرد و این موضوع از وقوع آلودگی قارچی و افت کیفیت جلوگیری خواهد کرد.

بر اساس تحقیقات انجام‌شده زعفران برداشت‌شده به‌صورت غنچه میزان رنگ‌دهی، عطر و طعم بیش‌تری نسبت به گل باز یا نیمه‌باز دارد، ضمن آنکه آسیب کمتری در حمل‌ونقل به آن وارد می‌شود. از سوی دیگر به دلیل اینکه چیدن گل از بوته توسط دست انجام می‌شود و با توجه به آلودگی دست‌ها و همچنین کوتاه بودن ارتفاع و احتمال تماس با خاک در زمان چیدن، شدت آلودگی محصول نهایی افزایش می‌یابد و این آلودگی کیفیت محصول را با مشکل مواجه می‌کند (Dehbashi, 2022).

شکل ۳. روش‌های کشت زعفران از راست به چپ: درهم، کپه‌ای، ردیفی.
Fig 3. Saffron cultivation methods.

۲-۵ پردازش تصویر

از سال ۱۹۶۴ تاکنون، موضوع پردازش تصویر، رشد فراوانی کرده است. علم پردازش تصویر، از علوم پرکاربرد و مفید در فنون مهندسی می‌باشد. سرعت گسترش این پیشرفت‌ها به حدی بوده است که هم‌اکنون و پس از گذشت مدت زمان کوتاهی می‌توان تأثیر پردازش تصویر را در بسیاری از علوم و صنایع به‌وضوح مشاهده نمود. درحالی‌که برخی از این کاربردها، آن‌گونه به پردازش تصویر وابسته است که بدون آن اساساً قابل‌استفاده نیست. مسئله بزرگی داده‌های تصویری و تلاش جهت حذف نویز و اختلالات تصویری نظیر پارامترهای حاصل از منابع نوری نامناسب، عدم تناسب ترکیب رنگ‌ها و عوامل متعدد دیگر در تصاویر دریافتی، از موضوعات بسیار مهم در کار با تصاویر و پردازش آن‌ها می‌باشد (Chaker-alhoseini, 2018). امروزه با پیشرفت‌های متعددی که در روش‌های اخذ اطلاعات گسسته، مانند اسکنرها و دوربین‌های دیجیتالی به وجود آمده است، پردازش تصویر کاربرد فراوانی یافته است. تصاویر حاصل از این اطلاعات همواره در حد قابل‌توجهی دارای نویز و یا تیرگی محسوس بوده است و در مواردی نیز دارای مشکل محوشدگی مرزهای نمونه‌های داخل تصویر است که باعث کاهش وضوح تصویر دریافتی می‌گردد. به مجموعه عملیات و پردازش‌هایی که در راستای آنالیز تصویر در زمینه‌های مختلف انجام‌شده است، علم پردازش تصویر گویند. پنج کاربرد عمده پردازش تصویر را می‌توان رباتیک، دستگاه‌های دفاعی، مهندسی پزشکی، کنترل صنعتی و گرافیک کامپیوتری عنوان کرد (Rozegar & Golzarian, 2015).

اخیراً سیستم‌های ارزیابی خودکار، عمدتاً بر مبنای تکنولوژی رایانه‌ها برای ارزیابی‌های حسی محصولات کشاورزی مورداستفاده قرار می‌گیرند که اساس آن‌ها را پردازش تصویر تشکیل می‌دهد. مراحل پردازش تصویر، شامل تصویرگیری، پیش‌پردازش، تقطیع تصویر، اندازه گیری جسم و طبقه‌بندی می‌باشد. یکی از مهم‌ترین مراحل در پردازش تصاویر برای اخذ بهترین نتایج، مرحله پیش‌پردازش است. این مرحله معمولاً کارهایی مرتبط با بالا بردن کیفیت تصویر و رساندن به کیفیت مطلوب برای انجام عملیات پردازش است (Mohammadzadeh-Moghadam, 2016).

۳ کاربردهای بینایی ماشین در حوزه زعفران

۳-۱ تشخیص گل زعفران با استفاده از بینایی ماشین

تشخیص گل زعفران با استفاده از پردازش تصویر یک حوزه تحقیقاتی فعال در بینایی کامپیوتری است و موضوع مطالعات متعددی در سال‌های اخیر بوده است. مطالعات متعددی در سال‌های اخیر منتشرشده است که به بررسی استفاده از تکنیک‌های پردازش تصویر برای تجزیه‌وتحلیل گل‌های زعفران می‌پردازد. یکی از چالش‌های کلیدی در شناسایی گل زعفران، تمایز دقیق بین انواع مختلف گل زعفران است. تکنیک‌های پردازش تصویر در مقابله با این چالش مؤثر بوده است. به‌عنوان‌مثال، از تکنیک‌های تجزیه‌وتحلیل رنگ برای شناسایی تغییرات رنگی مختلف گل زعفران، ازجمله تغییرات در رنگ کلاله، گلبرگ‌ها و سبک‌ها استفاده‌شده است. علاوه بر این، از تکنیک‌های تجزیه‌وتحلیل بافت برای شناسایی الگوهای بافت منحصربه‌فرد در گل زعفران، مانند ساختار منحصربه‌فرد کلاله استفاده‌شده است (Dehbashi, 2022). یکی دیگر از حوزه‌های موردتوجه در شناسایی گل زعفران با استفاده از پردازش تصویر، توسعه الگوریتم‌ها و پایگاه‌های اطلاعاتی برای تحلیل دقیق و کارآمد تصاویر گل زعفران است. محققان الگوریتم‌های قوی ایجاد کرده‌اند که می‌تواند به‌طور دقیق بین انواع مختلف گل‌های زعفران تمایز قائل شود و همچنین بیماری‌ها یا ناهنجاری‌ها را در گل‌های زعفران تشخیص دهد. علاوه بر این، محققان استفاده از تکنیک‌های پیشرفته پردازش تصویر، مانند یادگیری ماشینی را برای شناسایی گل زعفران موردبررسی قرار داده‌اند (Poramini, 2017).

یکی از جنبه‌های کلیدی شناسایی گل زعفران آنالیز رنگ است. گل‌های زعفران به دلیل رنگ متمایز متمایل به قرمز خود شناخته می‌شوند که در درجه اول به دلیل وجود کروسین، رنگ‌دانه کاروتنوئیدی است. با تجزیه‌وتحلیل الگوهای رنگی گل‌های زعفران، تکنیک‌های پردازش تصویر می‌توانند به تمایز بین انواع گل‌های زعفران و تشخیص هرگونه ناهنجاری یا بیماری که ممکن است بر کیفیت زعفران تأثیر بگذارد کمک کند. یکی دیگر از جنبه‌های شناسایی گل زعفران، تجزیه‌وتحلیل بافت است. ساختار و بافت منحصربه‌فرد گل زعفران را می‌توان با استفاده از تکنیک‌های پردازش

تصویر برای شناسایی و تمایز بین انواع مختلف گل زعفران تجزیه‌وتحلیل کرد. به‌عنوان‌مثال، ساختار کلاله که از چندین شاخه دراز تشکیل‌شده است، برای شناسایی نوع خاص گل زعفران قابل تجزیه‌وتحلیل است (Dehbashi, 2022). در ادامه یک مرور کلی از تکنیک‌های مختلف پردازش تصویر مورداستفاده برای تشخیص گل زعفران آورده شده است.

۱-۱-۳ روش‌های مبتنی بر رنگ

این روش‌ها از اطلاعات رنگ به‌عنوان ویژگی اولیه برای تشخیص گل زعفران استفاده می‌کنند. به‌عنوان‌مثال، گل زعفران دارای رنگ منحصربه‌فرد نارنجی-قرمز است که می‌توان از آن برای متمایز کردن آن از سایر گل‌ها استفاده کرد. برای استخراج ویژگی‌های رنگی از تصاویر و شناسایی گل‌های زعفران از هیستوگرام‌های رنگی، لحظه‌های رنگی و تحلیل بافت رنگ استفاده‌شده است. در مرحله اول برای شناسایی گل زعفران از تبدیلات فضاهای رنگی استفاده نموده سپس از طریق هیستوگرام و آستانه مینیمم نسبت به بخش‌بندی و حذف پیکسل‌های اضافی اقدام می‌شود. همچنین از سایر ویژگی‌های قابل‌استخراج از تصاویر مانند اندازه قطر اصلی اندازه قطر فرعی و سایر ویژگی‌ها استفاده می‌گردد که تجزیه‌وتحلیل پردازش ساختار هندسی گل‌ها توسط عملیات مورفولوژیک صورت بپذیرد حذف اثر برگ‌ها، رفع روی‌هم افتادگی انواع گل‌ها و تعیین نوع گل‌های زعفران به ترتیب انجام می‌شود. به دلیل اینکه تصاویر در شرایط نوری مختلف گرفته می‌شود الگوریتم باید توانایی حذف این اثر منفی را داشته باشد. در فضای رنگ RGB زمانی که روشنایی محیط افزایش یابد، هر یک از اجزای اصلی تصویر RGB نیز افزایش خواهد یافت. سپس برای شناسایی گل زعفران از فضای رنگی YC_bC_r و برای شناسایی سایر اشیاء در تصویر از ترکیب فضاهای رنگی HSI و YC_bC_r استفاده‌شده است. به دلیل اینکه تصاویر در شرایط نوری مختلف گرفته‌شده و نور نیز بر روی رنگ‌ها تأثیر می‌گذارد، لذا الگوریتم پیشنهادی باید توانایی حذف آن را داشته باشد. در فضای رنگ YC_bC_r مقدار روشنایی به‌صورت فاکتور جداگانه مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد بنابراین ارزش نقاط آبی نسبت به سایر نقاط می‌توانند بر اساس شدت روشنایی تغییر قابل‌ملاحظه‌ای نداشته باشند بدین‌صورت که مجموع ضرایب ارزش‌های R، G و B در معادله C_b (معادله ۲) برابر صفر می‌باشد؛ بنابراین ارزش تفاوت نقاط آبی نسبت به سایر نقاط (C_b) می‌تواند با این افزایش روشنایی تغییر نکند درنتیجه این دو مؤلفه مستقل از تغییرات نوری بوده و در مواردی که باید این تغییرات کمترین تأثیر را داشته مناسب هستند. این بدان معنی است که وضعیت گل در روشنایی یا در سایه بر نتیجه تقسیم‌بندی تأثیر کمتری نسبت به فضای رنگی RGB می‌گذارد.

ضمناً فضای رنگ HSI نیز از سه مؤلفه رنگ (H)، اشباع (S) و شدت (I) تشکیل‌شده است. اطلاعات لومینانس (روشنایی) که مؤلفه I را شامل می‌شود را از اطلاعات کرومینانس (رنگ) که مؤلفه‌های H و S را تشکیل می‌دهد، جدا می‌کند. در حقیقت، دو مؤلفه H و S به شیوه‌ای که انسان رنگ را تشخیص می‌دهد، بسیار نزدیک بوده و درنتیجه این فضای رنگ نیز برای هدف ما مناسب می‌باشد (Dehbashi, 2022).

یکی از نمونه‌های شناسایی گل زعفران با استفاده از روش‌های مبتنی بر رنگ مقاله جعفری و بخشی پور (Jafari & Bakhshipour, 2010) می‌باشد. در این مقاله دو الگوریتم مختلف برای تشخیص گل زعفران بر اساس مؤلفه‌های رنگ (H) و تفاوت رنگ آبی (C_b) تصاویر ایجاد شد. نتایج نشان داد که وقتی تصاویر عمود بر گل گرفته می‌شوند، مرکز می‌تواند مرجع مناسبی برای استفاده بیشتر توسط دستگاه برداشت در نظر گرفته شود. قطعات رنگ RGB به‌عنوان داده ورودی برای شبکه و همچنین اجزای رنگ HSI و YC_bC_r در شبکه‌های دیگر مورداستفاده قرارگرفته است. در ارزیابی میزان تقسیم‌بندی صحیح برای روش HSI ۹۶/۴ درصد برای روش YC_bC_r ۹۸/۷ درصد ثبت‌شده است. مقادیر ضریب همبستگی و خطای جذر میانگین مربعات زمانی که اجزای رنگ HSI به‌عنوان ورودی شبکه‌های استفاده شد که ۹۹/۷ رصد و ۰/۰۱۲۵ و در حالت فضای عصبی رنگ RGB ۶۷/۳۹ درصد و ۰/۰۸۷۴ به‌دست‌آمده است. بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که با ترکیب کردن شبکه عصبی با ویژگی‌های رنگ در صد موفقیت افزایش می‌یابد. ولی نقایص موجود در اکثر الگوریتم‌های فرابتکاری مانند کلونی مورچگان و ازدحام ذرات همچنان در این الگوریتم نیز وجود دارد. علاوه بر ویژگی رنگ بهتر است از سایر ویژگی‌های قابل‌استخراج مانند خصوصیات هندسی و غیره استفاده نمود.

در مقاله‌ای دیگر جعفری و همکاران (Jafari et al., 2014) الگوریتمی برای تشخیص و تعیین محل گل زعفران ارائه نمودند. در الگوریتم پیشنهادی آن‌ها، اولین گام تشخیص گل زعفران از دیگر اشیاء مانند خاک‌برگ، علف‌های هرز، بوته و غیره می‌باشد. آن‌ها بدین منظور از ویژگی رنگ استفاده نمودند. در گام دوم تصویر RGB به HSI تبدیل‌شده و در الگوریتم فضای رنگی YC_bC_r هر دو از روش آستانه گیری برای تشخیص گل زعفران استفاده نمودند. پس از ارزیابی الگوریتم، دقت تشخیص برای روش HSI، ۹۴/۵ در صد به ثبت رسیده است. درحالی‌که این میزان دقت برای روش YC_bC_r، ۹۸/۷ درصد می‌باشد. محمدزاده مقدم و همکاران (Moghadamzadeh-Moghadam et al., 2020)، برای طبقه‌بندی زعفران با استفاده از ویژگی‌های رنگی استخراج‌شده از تصویر یک روش مبتنی بر ماشین بینایی ارائه کردند. در این مقاله تقریباً تمام ویژگی‌های رنگ استخراج و در تعداد زیادی از طبقه‌بندی کننده‌ها استفاده‌شده است. افراد خبره در ایران زعفران را بر اساس خصوصیات ظاهری به سه طبقه اصلی یعنی پوشال نگین و سرگل طبقه‌بندی می‌کنند. در این مقاله یک بانک اطلاعاتی متشکل از ۴۴۰ تصویر از زعفران برای سه کلاس مختلف با استفاده از دوربین تلفن همراه جمع‌آوری شد. پس از اعمال تعدادی از مراحل پیش‌پردازش مانند حذف پس‌زمینه بریدن و حذف مناطق ناخواسته تصاویر و غیره، ۲۱ ویژگی رنگی با استفاده از روش‌های مختلف تحلیل تصویر استخراج شد. برای طبقه‌بندی از ۲۲ طبقه‌بند استفاده شدند. به‌طور خاص در این کار، میانگین دقت ۸۲/۲۳ درصد با استفاده از طبقه‌بندی کننده خطی SVM به دست آمد. خلاصه موارد بیان شده در جدول ۱ درج شده است.

۳-۱-۲ روش‌های مبتنی بر شکل

در این روش‌ها از شکل گل زعفران به‌عنوان ویژگی اولیه برای تشخیص استفاده می‌شود. برای استخراج ویژگی‌های شکل از تصاویر و شناسایی گل‌های زعفران از تکنیک‌هایی مانند تشخیص لبه، عملیات مورفولوژیکی و توصیف‌کننده‌های شکل استفاده‌شده است. برای مثال علی‌آبادی و محمدی به بررسی استفاده از تکنیک‌های هوشمند برای برش گل زعفران پرداختند. آن‌ها در این مقاله، روش پیدا کردن نقطه برش گل زعفران به‌منظور جداسازی کلاله از گل را بهبود بخشیدند. ابتدا تصویر باینری مناسب از گل زعفران توسط پردازش تصویر به دست آمد، سپس استخراج ویژگی‌های گل و ذخیره آن‌ها پایگاه داده‌ای را تشکیل دادند. ویژگی‌ها عبارت‌اند از: طول، عرض، نسبت طول به عرض مساحت، نسبت مجموع طول و عرض به مساحت گل مساحت مستطیل، مساحت گل نسبت به مساحت مستطیل در مرحله بعد با استفاده از این پایگاه داده، یک شبکه عصبی را آموزش و عمل تشخیص صورت می‌پذیرد. در انتها با استفاده از تشخیص نوع گل و ترکیب آن با روش‌های مختلف فرا ابتکاری نقطه برش گل زعفران جهت جداسازی کلاله مشخص می‌شود نتایج دقت ۹۶ درصد را برای رویکرد پیشنهادی نشان می‌دهد (Aliabadi & Mohammadi, 2012). همچنین علی‌آبادی در پایان‌نامه خود گل زعفران با استفاده از تکنیک‌های هوشمند بررسی کرد.

در این مطالعه ابتدا با استفاده از روش‌های پردازش تصویر، تصویر باینری مناسب از گل زعفران به دست آمد و در ادامه به انتخاب و استخراج ویژگی‌های گل و مقایسه تأثیر ویژگی‌های مختلف پرداخت. سپس با ذخیره آن‌ها مجموعه داده‌ای به دست آورده و به اعمال و مقایسه روش‌های یادگیری ماشین روی این مجموعه داده پرداخت. در انتها با استفاده از تشخیص میزان بلوغ گل و ترکیب آن با روش‌های مطروحه در جدول فوق، نقطه برش گل زعفران جهت جداسازی کلاله مشخص شد (Aliabadi, 2013).

در مقاله‌ای دیگر محمدی و کرمی (Mohammadi & Karami, 2021)، یک الگوریتم مبتنی بر شبکه‌های همگشتی عمیق برای تشخیص مکان و زاویه گل‌های زعفران در تصویر پیشنهاد دادند. در معماری پیشنهادی، تصویر به تعدادی ناحیه مربعی کوچک تقسیم می‌شود و در هر ناحیه وجود محل برش گل زعفران تخمین زده می‌شود. همچنین، محل نسبی مناسب برای برش گل زعفران نسبت به مرکز ناحیه تخمین زده می‌شود. برای تخمین زاویه، ابتدا محدوده ۳۶۰ درجه به تعدادی قسمت تقسیم می‌شود و زاویه گل به یکی از مقادیر اختصاص می‌یابد. سپس، زاویه نسبی نسبت به مرکز ناحیه تخمین زده می‌شود. به‌منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، یک پایگاه داده شامل ۱۶۳ تصویر و ۳۰۳۵ گل جمع‌آوری‌شده است و پارامترهای هر گل توسط یک

خبره مشخص‌شده است. در الگوریتم پیشنهادی، یک شبکه همگشتی به‌صورت پنجره لغزان با گام ۸ (به دلیل استفاده از ۳ لایهPooling) بر روی تصویر لغزانده می‌شود. اگر تصویر ورودی دارای ابعاد W×H×3 باشد، خروجی شبکه دارای ابعاد W/8×H/8×4N است. در هر نقطه، احتمال وجود گل، زاویه نسبی و مختصات نسبی توسط شبکه تخمین زده می‌شوند. به دلیل قابلیت پیاده‌سازی موازی بر روی GPU، این پنجره لغزان دارای سرعت قابل قبولی است. ارزیابی الگوریتم پیشنهادی نشان می‌دهد که پارامترهای بیش از ۹۵ درصد گل‌ها به‌درستی تخمین زده شده‌اند (Mohammadi & Karami, 2021). نتایج مقایسه موارد مطروحه در جدول ۲ درج شده است.

جدول ۱. مقایسه مقالات انجام‌شده در زمینه تشخیص گل زعفران با استفاده از روش‌های مبتنی بر رنگ.

Table 1. Comparison of studies conducted on saffron flower detection using color-based methods.

رفرنس (Reference)	الگوریتم (Algorithm)	ویژگی‌های استخراج‌شده (Extracted features)	دقت تشخیص (Accuracy)
(Jafari & Bakhshipour, 2010)	الگوریتم‌های مبتنی بر مؤلفه‌های رنگ (H) و تفاوت رنگ آبی(Cb) Algorithms based on color components (H) and blue color difference (Cb).	قطعات رنگ RGB، اجزای رنگ HSI و YCbCr RGB color components, HSI and YCbCr color components.	HSI: 96.4% YCbCr: 98.7%
(Jafari et al., 2014)	الگوریتم تشخیص گل زعفران با استفاده از ویژگی رنگ Saffron flower detection algorithm using color features	روش‌های آستانه‌گیری در فضای رنگی HSI وYCbCr Thresholding methods in HSI and YCbCr color spaces	HSI: 94.5% YCbCr: 98.7%
(Mohamadzadeh Moghadam et al., 2020b)	روش مبتنی بر ماشین بینایی و ویژگی‌های رنگی Vision-based method and color features	۲۱ ویژگی رنگی با استفاده از روش‌های تحلیل تصویر 21 color features extracted using image analysis methods	میانگین دقت ۸۲/۲۳ درصد با استفاده از طبقه‌بندی کننده خطی SVM An average accuracy of 82.23% using linear SVM classifier

جدول ۲. مقایسه مقالات انجام‌شده در زمینه تشخیص گل زعفران با استفاده از روش‌های مبتنی بر شکل.

Table 2. Comparison of studies conducted on saffron flower detection using shape-based methods.

مرجع(Reference)	روش(Method)	ویژگی‌های استخراج‌شده (Extracted features)	دقت (Accuracy)
(Aliabadi & Mohammadi, 2013)	استفاده از پردازش تصویر و شبکه عصبی Using image processing and neural networks)	طول، عرض، نسبت طول به عرض، مساحت گل و ویژگی‌های دیگر Length, width, aspect ratio, area, and other features of the flower)	96%
(Aliabadi, 2013)	استفاده از پردازش تصویر و یادگیری ماشین Using image processing and machine learning)	تصویر باینری، ویژگی‌های گل و تشخیص نوع گل Binary image, flower features, and flower type recognition)	نامشخص (Unknown)
(Mohammadi & Karami, 2021)	استفاده از شبکه‌های همگشتی عمیق Using deep convolutional networks)	محل و زاویه برش گل زعفران Location and angle of saffron flower cutting)	>95%

۳-۱-۳ روش‌های ترکیبی

این روش‌ها اطلاعات رنگ و شکل را برای بهبود دقت تشخیص گل زعفران ترکیب می‌کنند. به‌عنوان‌مثال، ترکیبی از هیستوگرام‌های رنگی و توصیفگرهای شکل برای شناسایی گل زعفران در تصاویر استفاده‌شده است. بخشی و همکاران (Bakhshi, 2014)، از روش ترکیبی برای تشخص گل زعفران استفاده کردند. در این مقاله یک الگوریتم بینایی جهت تشخیص زاویه گل زعفران در زاویه‌های مختلف را بررسی کردند. از گل‌های زعفران تصاویر رنگی از ۱۰ گل در زاویه‌های ۴۰، ۹۰، ۱۸۰، ۱۴۰، ۲۲۰، ۲۷۰ و ۱۳۳۰ در اتاقک مخصوص تصویربرداری گرفته شد. تصویر رنگی پردازش گردید و الگوریتم تشخیص زاویه دم گل بر اساس تصاویر رنگی نوشته شد. الگوریتم آن در ابتدا گل را از پس‌زمینه جدا کرد و با استفاده از تصویر باینری به‌دست‌آمده زاویه گل را تشخیص داد. نتیجه الگوریتم تشخیص زاویه دم گل نشان داد، زاویه به‌دست‌آمده از تصویر گل مناسب می‌باشد. زوایای محاسبه‌شده از روی تصویر و زوایای واقعی گل‌ها با ضریب رگرسیون ۰/۹۹۳۶ مرتبط‌اند که این نشان‌دهنده دقت بالای الگوریتم در تشخیص زاویه دارد و می‌توان از این الگوریتم مبتنی بر تصویر برای اصلاح زاویه گل زعفران برای عمل ردیف کردن در فراوری گل زعفران استفاده کرد.

همچنین دهباشی و همکاران (Dehbashi, 2022)، با استفاده از تکنیک‌های پردازش تصویر به بحث و بررسی نحوه شناسایی گل زعفران در روی زمین پرداختند. در مرحله اول برای شناسایی گل زعفران از تبدیلات فضاهای رنگی استفاده نموده سپس از طریق هیستوگرام و آستانه مینیمم نسبت به بخش‌بندی و حذف پیکسل‌های اضافی اقدام شد. بدین منظور برای شناسایی گل از تبدیل فضای RGB به فضای YC_bC_r و برای تشخیص سایر اشیاء موجود در تصویر از ترکیب فضاهای رنگی HSI و YC_bC_r استفاده و از هیستوگرام مؤلفه C_b برای تشخیص اولیه گل زعفران استفاده کردند. سپس برخی از پیکسل‌هایی که به‌اشتباه تشخیص داده‌شده‌اند با کمک مقدار آستانه حذف شدند. در مرحله بعدی برگ‌های سوزنی شکل گیاه زعفران که بر روی گل‌ها قرارگرفته‌اند با استفاده از عملیات مورفولوژیک الگوریتم پیشنهادی ترمیم و روی‌هم افتادگی گل‌ها بازسازی شدند. در گام بعدی نوع گل زعفران (غنچه، شکسته، گل بازشده) تعیین گردیده و قابل‌برداشت بودن و یا مناسب نبودن گل زعفران برای برداشت تعیین شد. در انتها مرکز گل‌هایی که قابل‌برداشت تعیین‌شده‌اند، مشخص و در اختیار ربات برداشت زعفران قرار می‌گیرد. میانگین نتایج ارزیابی با معیار دقت فراخوانی F-measure، درستی و ضریب همبستگی به ترتیب ۹۹/۷۹، ۹۹/۴۲، ۹۹/۶۰، ۹۹/۹۱ و ۹۹/۵۰ برای روش پیشنهادی حاصل شد. نتایج در جدول ۳ نشان داده شده است.

۳-۲ ارزیابی کیفیت و درجه‌بندی زعفران با استفاده از پردازش تصویر

به‌طورکلی، در حال حاضر دو روش برای درجه‌بندی زعفران استفاده می‌شود. روش اول بر اساس تجربیات فرد خبره و با مشاهده نمونه‌ها انجام می‌شود. روش دوم تخریبی بوده و با استفاده از متدهای آزمایشگاهی انجام می‌گیرد. طبق نظر متخصصان، استفاده از تکنیک‌های یادگیری ماشین برای طبقه‌بندی زعفران به دلیل داشتن ماهیت غیر مخرب و خصوصیات بهنگام، یک هدف است. این روش همچنین می‌تواند باعث افزایش دقت فرآیند درجه‌بندی در مقیاس صنعتی شود. مطالعات متعددی استفاده از پردازش تصویر را برای ارزیابی و درجه‌بندی کیفیت زعفران بررسی کرده‌اند. این مطالعات روش‌های مختلفی مبتنی بر تصویر را برای تشخیص و تعیین کمیت ویژگی‌های کیفی مختلف زعفران مانند رنگ، عطر و ترکیب شیمیایی ایجاد کرده‌اند. در مقاله‌ای علی‌آبادی و محمدی (Aliabadi & Mohammadi, 2013) تشخیص کیفی گل زعفران و تعیین نقطه برش کلاله از گل را با استفاده از شبکه‌های عصبی مورد بررسی قراردادند. در این پژوهش از ۳۰ مورد تصویر گل داده‌شده برش مناسب در ۲۹ تصویر نقطه به درستی تشخیص داده شد. در تحقیقی دیگر علی‌آبادی و محمدی (Aliabadi & Mohammadi, 2012) از سامانه‌های بینایی ماشین و ماشین بویایی[1] به‌منظور ارزیابی کیفیت و تعیین مقدار کروسین زعفران و سافرانال استفاده نمودند همچنین سنجش میزان رنگ و بوی زعفران را مورد سنجش قراردادند.

[1] Machine Olfaction

جدول ۳. مقایسه مقالات انجام‌شده در زمینه تشخیص گل زعفران با استفاده از روش‌های ترکیبی.
Table 3. Comparison of studies conducted on saffron flower detection using hybrid methods.

مرجع (Reference)	روش (Method)	نتایج و عملکرد (Results and performance)
Bakhshi, (2014)	ترکیبی از الگوریتم بینایی و پردازش تصویر (Combination of vision algorithms and image processing)	شناسایی و تشخیص زاویه گل زعفران با استفاده از تصاویر رنگی در زوایا مختلف، جداسازی گل از پس‌زمینه و تشخیص زاویه با استفاده از تصویر باینری، دقت بالا در تشخیص زاویه گل زعفران با ضریب رگرسیون مرتبط ۰/۹۹۳۶ (Identification and detection of saffron flower angle using color images at different angles, flower separation from the background, and angle detection using binary images. High accuracy in saffron flower angle detection with a relevant regression coefficient of 0.9936)
Dehbashi, (2022)	تبدیلات فضای رنگی و پردازش تصویر (Color space transformations and image processing)	استفاده از تبدیلات فضای رنگی و هیستوگرام برای شناسایی گل زعفران، بخش‌بندی تصویر و حذف پیکسل‌های اضافی، تعیین نوع گل زعفران و تشخیص قابل‌برداشت بودن آن با دقت بر اساس معیارهای مختلف (Using color space transformations and histograms for saffron flower identification, image segmentation, and removal of extra pixels, determination of saffron flower type, and detection of its acceptability based on various criteria with high accuracy)

کیانی و مینایی (Kiani & Minae, 2016) یک سیستم خبره مبتنی بر کاربرد فناوری بینایی ماشین برای شناسایی کیفی زعفران پیشنهاد می‌کنند. آن‌ها نشان دادند که بین رنگ زعفران و موقعیت جغرافیایی تولید آن و برخی ویژگی‌های شیمیایی که می‌توان از آن‌ها برای تعیین کیفیت و تازگی زعفران به‌درستی استفاده کرد، همبستگی وجود دارد. این ممکن است با استفاده از تکنیک‌های پردازش تصویر همراه با تجزیه‌وتحلیل داده‌های چند متغیره برای تعیین کمیت خواص زعفران انجام شود. الگوریتم‌های خبره را می‌توان برای پیش‌بینی ویژگی‌های زعفران مانند رنگ و همچنین برای طبقه‌بندی محصول در دسترس قرارداد. برای دستیابی به این هدف، رویکرد پیشنهادی به سه مرحله اصلی تقسیم می‌شود: پیش پردازش تصاویر، پردازش تصویر و پس‌پردازش داده‌های به دست آمده از نمونه‌های زعفران. مرحله پیش‌پردازش شامل کالیبراسیون سیستم بینایی ماشین و استفاده از تکنیک‌های بهبود تصویر مناسب است. بخش پردازش تصویر شامل روش‌های استخراج ویژگی است. مرحله پس از پردازش شامل استفاده از محاسبات نرم مناسب و روش‌های تجزیه‌وتحلیل داده‌های چند متغیره برای پیاده‌سازی طبقه‌بندی و پیش‌بینی ترکیبات شیمیایی و ویژگی‌های خاص مطلوب زعفران است.

در یک مطالعه مینایی و همکاران (Minaei et al., 2017) یک سیستم بینایی کامپیوتری[1]را برای شناسایی غیر مخرب زعفران توسعه دادند. ۳۳ نمونه زعفران از مناطق مختلف جغرافیایی مورد آزمایش قرار گرفتند. ۱۴ ویژگی رنگی با استفاده از تحلیل تصویر استخراج شد. از آنالیز اجزای اصلی[2]برای خوشه‌بندی نمونه زعفران و برای انتخاب ویژگی‌های رنگ استفاده شد. شبکه‌های عصبی حداقل مربعات جزئی،[3] رگرسیون خطی چندگانه[4] و پرسپترون چندلایه[5]برای برقراری ارتباط بین ویژگی‌های رنگ و قدرت رنگ‌دهی زعفران بر اساس استاندارد ISO 3632مورداستفاده قرار گرفتند. یک CVS برای استخراج ویژگی‌های رنگ زعفران ایجاد شد. PCA از ویژگی‌های رنگ برای انتخاب ویژگی‌های رنگ مهم‌تر استفاده شد. مدل‌های PLS، MLR و MLP برای پیش‌بینی $E_{1cm}^{1\%}$ 440 nm درصد از نمونه‌های زعفران آزمایش‌شده توسعه و مورداستفاده قرار گرفتند. نتایج نهایی نشان داد که ترکیب CVS-MLP ابزاری قدرتمند برای اندازه‌گیری غیر مخرب، سریع و آنلاین کیفیت رنگ

[1] Computer Vision System (CVS)
[2] Principal Component Analysis (PCA)
[3] Partial Least Squares (PLS)
[4] Multiple Linear Regression (MLR)
[5] Multilayer Perceptron (MLP)

زعفران با مقادیر R^2، RMSE و CSR به ترتیب ۰/۹۹، ۴/۵ و ۹۶/۶۷ درصد است.

یک استراتژی پیش‌پردازش جدید برای تجزیه‌وتحلیل تصویر الگوی کروماتوگرافی لایه نازک[۱]زعفران در مقاله سرشتی و همکاران (Sereshti et al., 2018) معرفی‌شده است. این کار شامل انجام یک سری تکنیک‌های پیش‌پردازش تصویر بر روی تصاویر TLC مانند فشرده‌سازی، وارونگی، حذف خط پایه عمومی (با استفاده از حداقل مربع نامتقارن[۲]، حذف جابجایی نقاط و تقعر (با بهینه‌سازی همبستگی تاب برداشتن[۳] و درنهایت تبدیل به کروماتوگرام‌های RGB است. پس‌ازآن، تجزیه‌وتحلیل داده‌های چند متغیره بدون نظارت شامل تجزیه‌وتحلیل مؤلفه‌های اصلی و خوشه‌بندی k-means برای بررسی اثر شوری خاک، به‌عنوان یک پارامتر کشت، بر روی الگوهای TLC زعفران مورداستفاده قرار گرفت. این روش به‌عنوان یک تکنیک سریع و ساده برای به دست آوردن اثرانگشت شیمیایی تصاویر TLC زعفران مورداستفاده قرار گرفت. درنهایت، نقاط جداشده TLC ازنظر شیمیایی با استفاده از تشخیص آرایه دیود کروماتوگرافی مایع با عملکرد بالا[۴] شناسایی شدند. بر این اساس، کیفیت زعفران مناطق مختلف ایران ۲۵ مورد ارزیابی و طبقه‌بندی قرار گرفت.

مینایی و همکاران (Minaei et al., 2017) در پژوهشی دیگر نشان دادند که ترکیب سیستم بینایی ماشینی و پرسپترون چندلایه[۵]ابزاری برای ارزیابی کیفیت زعفران بر اساس قدرت رنگی آن‌ها می‌باشد. همچنین آن‌ها نشان دادند که عملکرد پرسپترون چندلایه برای تشخیص قدرت رنگی زعفران بهتر از حداقل مربعات جزئی و MLR بوده و مقدار CSR در این پژوهش ۹۶/۶ در صد به‌دست‌آمده است . همچنین در پژوهشی که توسط کیانی و همکاران (Kiani et al., 2018) انجام‌شده است یک سیستم بویایی-چشایی و سیستم بینایی ماشین برای ارزیابی کیفیت زعفران و جایگزینی آن برای تشخیص حسی توسط افراد خبره ارائه گردید. با توجه به عدم تحقیقات مستند در مورد این موضوع، جستجوی مشروح جامع در این کار ارائه می‌شود. تقریباً تمام ویژگی‌های رنگ استخراج و در تعداد زیادی از طبقه‌بندی کننده‌ها استفاده شد. افراد خبره در ایران زعفران را بر اساس خصوصیات ظاهری به سه طبقه اصلی یعنی پوشال، نگین و سرگل طبقه‌بندی می‌کنند. در این مقاله، یک بانک اطلاعاتی متشکل از ۴۴۰ تصویر از زعفران برای سه کلاس مختلف با استفاده از دوربین تلفن همراه جمع-آوری شد. پس از اعمال تعدادی از مراحل پیش‌پردازش مانند حذف پس‌زمینه، بریدن و حذف مناطق ناخواسته تصاویر و غیره، ۲۱ ویژگی رنگی با استفاده از روش‌های مختلف تحلیل تصویر استخراج شد. برای طبقه‌بندی از ۲۲ طبقه‌بند استفاده شدند. به‌طور خاص، در این کار، میانگین دقت ۸۲/۲۳ درصد با استفاده از طبقه‌بندی کننده خطی SVM به دست آمد.

در پژوهشی که از نوع تشخیصی بوده، یثربی و همکاران از پایگاه داده‌ای مشتمل بر ۱۱۳ نمونه زعفران با ۷ ویژگی استفاده کردند. کیفی سنجی نمونه‌های این پژوهش به کمک ویژگی‌ها در چهار کلاس مختلف زعفران پوشال درجه یک (نگین) پوشال درجه دو (خوب) پوشال درجه سه (معمولی) و پوشال درجه چهار معمولی درجه (دو) انجام‌شده و به‌منظور درجه‌بندی زعفران از روش‌های مبتنی بر دو نوع شبکه عصبی پر سپترون چندلایه و شبکه عصبی بردار یادگیر، انجام پذیرفته است که بالاترین دقت کلاس‌بندی بر روی نمونه‌های آموزش و آزمون به ترتیب ۹۳/۷۵ و ۷۵/۷۵ درصد به‌دست‌آمده است (Yasrebi et al., 2019). طبقه‌بندی زعفران با استفاده از ویژگی‌های رنگی استخراج‌شده از تصویر با استفاده از یک روش مبتنی بر بینایی ماشین در مقاله‌ای توسط محمدزاده و همکاران انجام‌شده است. در این پژوهش یک بانک اطلاعاتی متشکل از ۴۴۰ تصویر از زعفران برای سه و کلاس مختلف با استفاده از دوربین تلفن همراه جمع‌آوری‌شده ۲۱ ویژگی رنگی با استفاده از روش‌های مختلف تحلیل تصویر استخراج‌شده است. در این مقاله برای طبقه‌بندی از کلاسیفایرهای مختلف استفاده‌شده است و مقایسه نتایج نشان‌دهنده این است که Linear Discriminat، Linear SVM، Bagged Trees و RUSBoost می‌توانند در هنگام استفاده از ویژگی‌های رنگی، درجه‌بندی دقیق‌تری را نسبت به سایر طبقه‌بندی کننده‌ها ایجاد نمایند. در این پژوهش

[۱] Thin Layer Chromatographic
[۲] Asymmetric Least Squares (AsLS)
[۳] Correlation Optimization Warping (COW)
[۴] High Performance Liquid Chromatography-Diode Array Detection (HPLC-DAD)
[۵] Multilayer Perceptron

میانگین دقت ۸۲/۲۳ در صد با استفاده از طبقه‌بندی کننده خطی SVM به‌دست‌آمده است (Mohamadzadeh Moghadam et al., 2020a). یک نمونه دیگر از طبقه‌بندی غیر مخرب زعفران با استفاده از تجزیه‌وتحلیل رنگ و بافت توسط محمدزاده مقدم و همکاران انجام‌شده است. در این مقاله ۴۴۰ تصویر رنگی از زعفران برای سه کلاس مختلف با استفاده از دوربین تلفن همراه به دست آمد. ۲۱ ویژگی رنگی و ۹۹ ویژگی بافتی با استفاده از تحلیل تصویر استخراج شد. ۲۲ طبقه‌بندی کننده برای طبقه‌بندی با استفاده از ویژگی‌های ذکرشده استفاده شد. دستگاه بردار پشتیبان و طبقه‌بندی کننده‌های Ensemble بهتر از سایر طبقه‌بندی کننده‌ها بودند. نتایج این تحقیق نشان داد که میانگین دقت طبقه‌بندی با استفاده از ماشین بردار پشتیبان درجه دوم و طبقه‌بندی کننده تفکیک‌کننده زیر فضا تا ۸۳/۹ درصد بود. به‌طور خلاصه، این نتایج نشان داد که بافت بصری و شاخص رنگ می‌تواند شاخص خوبی برای جداسازی زعفران پوشال، نگین و سرگل باشد (Mohamadzadeh Moghadam et al., 2020b). به‌طورکلی، این مقالات یک نمای کلی از وضعیت فعلی ارزیابی و درجه‌بندی کیفیت زعفران با استفاده از تکنیک‌های پردازش تصویر ارائه می‌دهند. این مقالات بینش‌هایی در مورد کاربردهای بالقوه این تکنیک‌ها در صنعت زعفران نیز ارائه می‌دهند و نیاز به تحقیقات بیشتر برای بهبود دقت و قابلیت اطمینان این روش‌ها را برجسته می‌کنند. جدول ۴ به مقایسه مقالات در این خصوص می پردازد.

۳-۳ بررسی اصالت زعفران با استفاده از پردازش تصویر

کنترل کیفیت و تائید اصالت مواد غذایی یک عامل مهم و چالش‌برانگیز برای صنایع غذایی و سازمان‌های ناظر بر کیفیت مواد غذایی است که به دنبال تضمین حمایت از سلامت مصرف‌کنندگان و اقتصاد صادراتی هستند. یکی از رایج‌ترین تقلب‌های زعفران، افزودن یک گیاه پایین‌تر با ویژگی‌های ظاهری مشابه زعفران است که به‌منظور حجیم شدن یا افزایش وزن و سپس فروش به همان قیمت زعفران خالص می‌باشد. چندین ماده گیاهی به‌عنوان تقلب به زعفران اضافه‌شده است. برخی از این مواد تقلبی بریده یا خشک‌شده زعفران، گلرنگ، ریزوم زردچوبه یا میوه‌های خشک‌شده گاردنیا هستند. همچنین رنگ‌های خوراکی مصنوعی مانند آزوروبین، کینولین، سانست زرد، آلورا قرمز و تارترازین طیف وسیعی از احتمالات تقلبی را برای افزایش وزن یا افزایش وزن ایجاد می‌کنند؛ بنابراین، ابزاری برای احراز هویت زعفران و تشخیص و کاهش وقوع تقلب بسیار مطلوب است. طیف‌سنجی و کروماتوگرافی تحلیلی بسیاری از روش‌های مختلف برای احراز هویت زعفران توسعه‌یافته‌اند (Sereshti et al., 2018). باوجود پتانسیل پردازش تصویر برای بررسی اصالت زعفران، محدودیت‌هایی وجود دارد که باید از آن‌ها آگاه بود. دقت نتایج می‌تواند تحت تأثیر عواملی مانند شرایط نوری، کیفیت تصویر و جهت‌گیری زعفران باشد. علاوه بر این، برخی از محصولات تقلبی ممکن است ازنظر ظاهری بسیار شبیه زعفران اصلی باشند که تشخیص این دو را با استفاده از تکنیک‌های پردازش تصویر به‌تنهایی دشوار می‌کند. در ادامه مقالاتی در مورد اصالت زعفران با استفاده از پردازش تصویر آورده شده است (جدول ۴).

جوزان و همکاران (Djozan et al., 2014) یک روش جدید مبتنی بر جداسازی کروماتوگرافی لایه نازک و تجزیه‌وتحلیل تصویر[۱] از ترکیبات رنگ زعفران برای تشخیص زعفران از منشأ مختلف ارائه دادند. در این مطالعه ترکیبات رنگی کلاله‌های خشک و آسیاب شده زعفران استخراج و با کروماتوگرافی لایه نازک در شرایط بهینه جدا و پس از توسعه کروماتوگرافی، کروماتوگرام‌ها عکسبرداری و پروفایل‌های شدت مشخصه‌های RGB توسط نرم‌افزار تجزیه‌وتحلیل تصویر ویژه طراحی‌شده تولید و پردازش شدند. این روش شامل جمع‌آوری داده‌های جدید و سریع است و به ابزارهای گران‌قیمت نیاز ندارد. این روش همچنین امکان مقایسه انواع مختلف زعفران با استفاده از مقادیر RF، محدوده رنگ و شدت اجزای رنگ جداشده را فراهم می‌کند.

[۱] Thin Layer Chromatography Combined with Image Analysis (TLC-IA)

جدول ۴. مقایسه مقالات از روش‌های مختلف برای ارزیابی و طبقه‌بندی کیفیت زعفران با استفاده از بینایی ماشین.

Table 4. Comparison of studies conducted using different methods for quality evaluation and classification of saffron using machine vision.

نتایج و عملکرد (Results and performance)	روش (Method)	مرجع (Reference)
تشخیص صحیح برش مناسب در ۲۹ تصویر (Correct identification of appropriate cutting in 29 images)	شبکه‌های عصبی (Neural networks)	Aliabadi & Mohammadi, 2013)
ارزیابی کیفیت و تعیین مقدار کروسین زعفران و سافرانال (Quality evaluation and determination of crocin, safranal content in saffron)	سامانه‌های بینایی ماشین و ماشین بویایی (Machine vision and machine olfaction systems)	Aliabadi & Mohammadi, 2012)
پیش‌پردازش تصاویر، پردازش تصویر و پس‌پردازش داده‌ها برای طبقه‌بندی و پیش‌بینی خواص زعفران (Image preprocessing, image processing, and data post-processing for saffron property classification and prediction)	سیستم خبره مبتنی بر بینایی ماشین (Expert system based on machine vision)	Kiani & Minaei, 2016)
پیش‌بینی قدرت رنگی زعفران با دقت بالا (High accuracy prediction of saffron color strength)	شبکه‌های عصبی، رگرسیون خطی و الگوریتم خبره (Neural networks, linear regression, and expert algorithm)	Minaei et al., 2017)
تجزیه‌وتحلیل الگوهای TLC زعفران با استفاده از شوری خاک (Analysis of saffron TLC patterns using soil salinity)	تکنیک‌های پیش‌پردازش تصویر و تجزیه‌وتحلیل داده‌های چند متغیره (Image preprocessing techniques and multivariate data analysis)	Sereshti, Poursorkh, Aliakbarzadeh, Zarre, et al., 2018)
طبقه‌بندی زعفران بر اساس ویژگی‌های ظاهری با استفاده از طبقه‌بندی‌کننده SVM (Saffron classification based on appearance features using SVM classifier)	سیستم بویایی-چشایی و سیستم بینایی ماشین (Olfactory-taste system and machine vision system)	Kiani et al., 2018)
بالاترین دقت کلاس‌بندی بر روی نمونه‌های آموزش و آزمون به ترتیب ۹۳/۷۵ و ۷۵/۷۵ درصد (The highest classification accuracy on training and testing samples are 93.75% and 75.75%, respectively)	شبکه عصبی پر سپترون چندلایه، شبکه عصبی بردار یادگیر (Multi-layer perceptron neural network, vector learning neural network)	Yasrebi et al., 2019)
میانگین دقت طبقه‌بندی: ۸۲/۲۳ درصد با استفاده از طبقه‌بندی کننده خطی SVM (The average classification accuracy is 82.23% using linear SVM classifier)	کلاسیفایرهای مختلف ازجمله (Different classifiers, including) Linear ، Linear Discriminat SVM، Bagged Trees وRUSBoost	Mohamadzadeh Moghadam et al., 2020a)
میانگین دقت طبقه‌بندی با استفاده از ماشین بردار پشتیبان درجه دوم و طبقه‌بندی کننده تفکیک‌کننده زیر فضا: ۸۳/۹ درصد (The average classification accuracy using second-degree support vector machine and sub-space discriminant classifier is 83.9%)	تجزیه‌وتحلیل رنگ و بافت، دستگاه بردار پشتیبان، طبقه‌بندی‌کننده‌های Ensemble (Color and texture analysis, support vector machine, ensemble classifiers)	Mohamadzadeh Moghadam et al., 2020b)

سرشتی و همکاران (Sereshti et al., 2018)، نیز در مقاله‌ای در مورداستفاده از TLC-IA و تکنیک‌های کمومتری برای اعتبارسنجی اصالت زعفران و شناسایی سریع نوع مواد تقلبی گزارش می‌دهند. این روش شامل چندین مرحله پیش‌پردازش است. پس از استفاده از توالی پیش‌پردازش، تجزیه‌وتحلیل داده‌های چند متغیره بدون نظارت مختلف (تجزیه‌وتحلیل مؤلفه‌های اصلی و k-means) و روش‌های کمومتری نظارت‌شده (تجزیه‌وتحلیل تفکیک حداقل مربعات جزئی[۱]، انتخاب متغیر (وزن بارگذاری و اهمیت متغیر در طرح‌ریزی[۲]و تجزیه‌وتحلیل تشخیصی خطی[۳]) برای تائید اصالت زعفران و طبقه‌بندی انواع مواد تقلبی استفاده شد. تجزیه‌وتحلیل نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که همه این روش‌ها عملکرد رضایت‌بخشی در خوشه‌بندی یا طبقه‌بندی دارند. بااین‌حال، واضح است که LDA در توانایی خود در پیش‌بینی مجموعه آزمایشی نسبتاً ضعیف است و توانایی LDA در پیش‌بینی تقلب زعفران ۱۰۰ درصد نیست. بااین‌حال، روش پیش فرآوری به کار گرفته‌شده همراه با روش‌های نظارت‌شده و بدون نظارت، می‌تواند اصالت محصولات را تائید کند و وجود مواد تقلبی را شناسایی کرده و انواع آن‌ها را دسته‌بندی کند. این روش نیاز به ابزار دقیق خاصی ندارد و با داشتن گوشی هوشمند در دسترس برای ثبت تصویر، اسکن تائید اصالت زعفران در زمان نسبتاً کوتاهی امکان‌پذیر می‌شود. این روش همچنین می‌تواند به انواع دیگر مواد (به‌ویژه مواد غذایی) برای تشخیص شخصیت و تعیین اصالت آن‌ها تعمیم داده شود (Sereshti et al., 2018). همچنین یک روش تجزیه‌وتحلیل اثرانگشت کروماتوگرافی سریع و قابل‌اعتماد بر اساس ترکیبی از تکنیک‌های کمومتری و کروماتوگرافی لایه نازک با کارایی بالا[۴]برای احراز هویت و تشخیص تقلب در نمونه‌های زعفران ایرانی توسط امیروارسی و همکاران (Amirvaresi et al., 2020) توسعه داده‌شده است. در این خصوص، احراز هویت نمونه‌های زعفران با توجه به منشأ جغرافیایی توسط PCA موردبررسی قرار گرفت و تطابق خوبی بین نتایج PCA و منشأ جغرافیایی مشاهده شد. در مرحله بعد، تقلب‌های مختلف مشتقات گیاهی (گلرنگ، گل همیشه‌بهار، یاقوت سرخ و سبک) توسط مدل PLS-DA با دقت خوب (۹۸/۰۴ درصد) شناسایی شد. درنهایت برای آزمون اعتبار و کاربرد مدل، مخلوطی از چهار ماده گیاهی و تقلب ناشناخته به مدل داده شد و دقت ۱۰۰ درصد به دست آمد؛ بنابراین، نتایج نشان می‌دهد که روش توسعه‌یافته، رویکردی مناسب برای احراز هویت و کشف تقلب‌های شناخته‌شده و ناشناخته در زعفران است.

مطالعات نشان داده‌اند که تکنیک‌های پردازش تصویر می‌توانند به‌طور مؤثری بین زعفران اصل و تقلبی بر اساس ویژگی‌هایی مانند رنگ، بافت، شکل و سایر ویژگی‌ها تمایز قائل شوند. به‌عنوان‌مثال، برخی از مطالعات از تجزیه‌وتحلیل رنگ برای تعیین وجود رنگ‌دانه خاصی استفاده کرده‌اند که منحصر به زعفران اصلی است، همان‌طور که علیقله و همکاران، با استفاده از یک شبکه عصبی عمیق و عکس‌های RGB که در شرایط کنترل‌نشده/بدون ساختار گرفته‌شده‌اند، عوامل تقلبی زعفران شناسایی شدند. زعفران تقلبی شامل پنج دسته زعفران مخلوط برچشم و کاه رنگ‌شده، کلاله و پرچم مخلوط، شکوفه پرتقال رنگ‌شده، گلرنگ و پرچم‌های رنگ‌شده و دو دسته زعفران اصل شامل زعفران انجمادی و ماکروویو خشک می‌شود که برای طراحی، توسعه و بهینه‌سازی یک شبکه عصبی کانولوشن[۵]استفاده می‌شود. ۶۰ درصد از تصاویر برای آموزش و بهینه‌سازی مدل شبکه عصبی استفاده شد. برای جلوگیری از تمرین بیش‌ازحد، تعداد تصاویر استفاده‌شده در مرحله تمرین با اعمال روش افزایش یافت. ساختار کلی مدل برای تشخیص تقلبات زعفران به ترتیب شامل چندلایه کانولوشن (لایه ورودی)، لایه‌های ترکیبی و لایه‌های کاملاً متصل بود. در این مطالعه، پنج ساختار (S1، S2، S3، S4 و S5) برای CNN با استفاده از روش‌های نرمال‌سازی دسته‌ای پیشنهاد شد. علاوه بر این، این مقاله این پنج ساختار را با شبکه‌های کانولوشن محبوب متشکل از VGG11، ResNet18، ResNet50، Inception V3 و DarkNet53 مقایسه کرد. با توجه به نتایج، بهترین پیکربندی S5 بود که به‌دقت ۹۹/۸ درصد و افت آنتروپی متقاطع ۰/۰۱۹ دست‌یافت. اگرچه روند زمانی این ساختار ۳۶/۲۶ میلی‌ثانیه بود، اما کوتاه‌ترین فرآیند زمانی ۱۹/۳۸ میلی‌ثانیه مربوط به S1 بود. این عدد برای Popular CNN بیش از ۳۰۰ میلی‌ثانیه بود. بر اساس نتایج این مطالعه، تصویربرداری بدون محدودیت با CNN می‌تواند مواد تقلبی زعفران را شناسایی کند. نتایج این مطالعه نشان داد که استفاده از تصویربرداری و شبکه عصبی عمیق می‌تواند ابزاری بسیار ساده و در دسترس برای تشخیص مواد تقلبی زعفران ارائه دهد (Alighaleh et al., 2022).

درحالی‌که برخی دیگر از تجزیه‌وتحلیل بافت برای تعیین وجود الگوهای خاصی استفاده کرده‌اند که نشان‌دهنده زعفران اصیل است. به‌عنوان‌مثال اکبری آدرگانی و همکاران، از ترکیب

---

[۱] Partial Least Squares Discrimination Analysis (PLS-DA)

[۲] Variable Importance in Projection (VIP)

[۳] Linear Discriminant Analysis (LDA)

[۴] High-Performance Thin-Layer Chromatography (HPTLC)

[۵] Convolutional Neural Network (CNN)

پردازش تصویر و روش ماشین بردار پشتیبان[۱] برای ارزیابی سریع و غیر مخرب تشخیص زعفران واقعی از زعفران تقلبی استفاده کردند. پس از تهیه تصاویر از توده زعفران خالص و تقلبی و کلاله‌های مجزا، تصاویر وارد مراحل پیش‌پردازش شدند و درنهایت، ویژگی‌های آماری مرتبط با بافت تصاویر و ویژگی‌های مورفولوژی شامل ۱۰۵ ویژگی استخراج شدند. به‌منظور افزایش سرعت و دقت طبقه‌بندی، از روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی PCA برای کاهش ابعاد ماتریس ویژگی استفاده شد. همچنین طبقه‌بندی تصاویر به کمک توابع کرنل مختلف SVM، به‌صورت دو کلاس انجام شد. سپس شاخص‌های آماری نظیر دقت، صحت، حساسیت، اختصاصی بودن و سطح زیر منحنی به‌منظور ارزیابی طبقه‌بند محاسبه شدند که مقادیر این شاخص‌ها برای طبقه‌بندی با کرنل کوبیک SVM برای تشخیص زعفران تقلبی از زعفران واقعی به ترتیب ۹۷/۹۷،۹۳،۸۳،۵ و ۹۷ درصد به دست آمد. نتایج حاصل از این طبقه‌بندی نشان داد که این سیستم به‌عنوان یک روش هوشمند، سریع، غیر مخرب و دقیق، قابلیت تشخیص زعفران واقعی را از تقلبی دارد (Akbari-Ardagani et al., 1400).

در مطالعه‌ای دیگر فوشی و همکاران (Foschi et al., 2023)، یک راه‌حل جدید کمومتری مبتنی بر FTIR برای ارزیابی تقلب زعفران با کلاله‌های غیر تازه ارائه دادند. در این مقاله تعداد ۳۳۴ نمونه با استفاده از طیف‌سنجی فروسرخ تبدیل فوریه با بازتاب کلی ضعیف[۲] مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفت. طیف‌های جمع‌آوری‌شده توسط تجزیه‌وتحلیل تفکیک حداقل مربعات جزئی[۳] برای ارزیابی امکان‌سنجی این مطالعه برای تمایز بین زعفران سازگار (نمونه‌های تازه تولیدشده در سال ۲۰۲۰) و نمونه‌های زعفران تقلبی با کلاله‌های غیر تازه تولیدشده در سال ۲۰۱۶ و ۲۰۱۸ پردازش شدند. PLS-DA توانست نمونه‌های زعفران را مطابق بازمان پیری طبقه‌بندی کند و نمونه‌های تازه را از نمونه‌های تقلبی با کلاله‌های غیر تازه متمایز کند. علاوه بر این، رگرسیون PLS قادر به پیش‌بینی سطح تقلب با دقت کافی بود. همچنین مومنی و همکاران (Momeny et al., 2023) در مطالعه‌ای از سیستم بینایی ماشین مبتنی بر یادگیری عمیق برای تشخیص تقلب و کیفیت زعفران استفاده شد. مجموعه داده‌ای از ۱۸۶۹ تصویر ایجاد و در ۶ کلاس طبقه‌بندی شد که عبارت‌اند از: کلاله زعفران خشک با استفاده از خشک‌کن. یک شبکه عصبی کانولوشنال Inception-v4[۴] برای درجه‌بندی و تشخیص تقلب زعفران در تصاویر گرفته‌شده توسط تلفن‌های هوشمند توسعه‌یافته است. بهترین سیاست‌های تقویت داده‌ها با CNN پیشنهادی LAII-v4 با استفاده از تصاویر خراب‌شده توسط گاوسی، لکه‌ها و نویز ضربه‌ای برای رسیدگی به بیش‌ازحد برازش مدل انتخاب شدند. در این مقاله CNN پیشنهادی LAII-v4 با روش‌های معمولی مبتنی بر CNN و طبقه‌بندی کننده‌های سنتی مقایسه شد. تجزیه‌وتحلیل مؤلفه‌های اصلی نتایج نشان داد که CNN پیشنهادی LAII-v4 با دقت ۹۹/۵ درصد بهترین عملکرد را به دست آورده است. به‌طورکلی، این مقالات از تکنیک‌های مختلفی مانند طیف‌سنجی، تصویربرداری فرا طیفی و ابزارهای کمومتری برای ارزیابی اصالت زعفران استفاده می‌کنند. آن‌ها همچنین از الگوریتم‌های یادگیری ماشین و شبکه‌های عصبی مصنوعی برای تجزیه‌وتحلیل داده‌ها و طبقه‌بندی نمونه‌ها استفاده می‌کنند. این مطالعات اهمیت استفاده از تکنیک‌های متعدد برای بهبود دقت و قابلیت اطمینان در تشخیص اصالت زعفران را برجسته می‌کنند. در زیر (جدول ۵) مقایسه‌ای از روش‌های مختلف برای تشخیص و شناسایی تقلب در زعفران با استفاده از بینایی ماشین آورده شده است.

۳-۴ پردازش تصویر کلاله زعفران

یکی از فرآیندهای مهم در فرآوری زعفران، جدا کردن قسمت ارزشمند گیاه، یعنی کلاله، از سایر اجزای گل است. کلاله به دو روش از گل جدا می‌گردد و هرکدام از این روش‌ها ازنظر کیفیت، محصول متفاوتی تولید می‌کنند. بررسی کلاله زعفران با استفاده از پردازش تصویر زمینه‌ای از تحقیقات است که در سال‌های اخیر به دلیل افزایش تقاضا برای زعفران مرغوب و اصیل و نیاز به روش‌های کارآمد برای ارزیابی کیفیت و اصالت آن موردتوجه قرارگرفته است. مطالعات در این زمینه بر استفاده از تکنیک‌های بینایی کامپیوتری برای تجزیه‌وتحلیل تصاویر کلاله زعفران و استخراج اطلاعات در مورد کیفیت و اصالت آن متمرکزشده است. این کار را می‌توان با استخراج ویژگی‌هایی از تصاویر مانند رنگ، بافت، شکل و طول و مقایسه این ویژگی‌ها با پایگاه داده‌ای از ویژگی‌های شناخته‌شده کلاله زعفران انجام داد (Jamshidi, 2021).

چندین مطالعه نشان داده‌اند که می‌توان از تکنیک‌های پردازش تصویر برای ارزیابی دقیق کیفیت کلاله زعفران استفاده کرد. به‌عنوان‌مثال گراسیا و همکاران (Gracia et al., 2009) سیستم برش خودکار برای به دست آوردن کلاله‌های

[۱] Support Vector Machine (SVM)

[۲] Attenuated-Total-Reflectance Fourier-Transform Infrared (ATR-FTIR)

[۳] Partial-Least-Squares Discriminant Analysis (PLS-DA)

[۴] Learning-to-Augment incorporated Inception-v4 Convolutional Neural Network (LAII-v4 CNN)

گل زعفران ارائه می‌کند. نکته کلیدی آن استفاده از سیستم بینایی برای به دست آوردن نقطه برش بهینه با استفاده از تجزیه‌وتحلیل تصویر است. یک برنامه کامپیوتری مؤثر و منعطف، تصویر گل را پردازش می‌کند و مقدار محاسبه‌شده را به راننده‌ای ارسال می‌کند که یک سیستم برش مکانیکی ساده را برای ایجاد برش تمیز از گل زعفران قرار می‌دهد. یک ماشین نمونه اولیه برای آزمایش به‌منظور اعتبار سنجی روش پیشنهادی استفاده می‌شود. به‌طور خاص، آزمایش‌ها نشان می‌دهند که این روش با درصد موفقیت بالایی در برش گل بدون توجه به شکل و اندازه گل، سرعت انتقال گل، جهت گل (بالا/پایین) و غیره قوی بوده است. یک مزیت مهم از سیستم برش خودکار پیشنهادی به این صورت است که نرخ برش گل تقریباً هشت برابر نسبت به روش سنتی دستی افزایش می‌یابد.

جدول ۵. مقایسه مقالات، از روش‌های مختلف برای تشخیص و شناسایی تقلب در زعفران با استفاده از بینایی ماشین.

Table 5. Comparison of studies conducted using different methods for fraud detection and identification in saffron using machine vision.

مرجع (Reference)	روش (Method)	نتایج و عملکرد (Results and performance)
Djozan et al., (2014)	جداسازی کروماتوگرافی لایه نازک و تحلیل تصویر Thin layer chromatography separation and image analysis	امکان جمع‌آوری داده‌های جدید و سریع، بدون نیاز به ابزارهای گران‌قیمت، قابلیت مقایسه انواع زعفران The possibility of collecting new and fast data without the need for expensive tools, the ability to compare different types of saffron
Sereshti, Poursorkh, Aliakbarzadeh, & Zarre, 2018)	TLC-IA، تجزیه‌وتحلیل چند متغیره، LDA TLC-IA, multivariate analysis, LDA	تائید اصالت زعفران و شناسایی مواد تقلبی، قابلیت طبقه‌بندی انواع مواد تقلبی Confirmation of saffron authenticity and identification of fraudulent substances, ability to classify different types of fraudulent substances
Amirvaresi et al., 2020)	تجزیه‌وتحلیل اثرانگشت کروماتوگرافی و PCA Chromatographic fingerprint analysis and PCA	احراز هویت نمونه‌های زعفران بر اساس منشأ جغرافیایی، شناسایی مواد تقلبی با دقت بالا Identification of saffron samples based on geographical origin, high accuracy detection of fraudulent substances
Alighaleh et al., 2022)	شبکه عصبی عمیق و عکس‌هایRGB Deep neural network and RGB images	شناسایی عوامل تقلبی زعفران، دقت تشخیص تقلبات بالا Identification of saffron adulterants, high accuracy in detecting adulterations
Akbari-Ardagani et al., (1400	پردازش تصویر و ماشین بردار پشتیبان Image processing and support vector machine	تشخیص سریع و غیرمخرب زعفران واقعی از زعفران تقلبی، استفاده از ویژگی‌های آماری و مورفولوژی Rapid and non-destructive detection of genuine saffron from adulterated saffron, use of statistical and morphological features
Foschi et al., (2023	روش کمومتری مبتنی برFTIR Chemometrics method based on FTIR	توانایی طبقه‌بندی نمونه‌های زعفران بر اساس زمان پیری و تمایز نمونه‌های تازه از نمونه‌های تقلبی با کلاله‌های غیرتازه، قابلیت پیش‌بینی سطح تقلب با دقت کافی Ability to classify saffron samples based on maturity time and distinguish fresh samples from adulterated samples with non-fresh stigmas, ability to predict the level of adulteration with sufficient accuracy
Momeny et al., (2023	سیستم بینایی ماشین مبتنی بر یادگیری عمیق Machine vision system based on deep learning	استفاده از شبکه عصبی کانولوشنال Inception-v4، انتخاب بهترین سیاست‌های تقویت داده‌ها با استفاده از CNN پیشنهادی LAII-v4، دقت بالای ۹۹/۵ درصد در تشخیص تقلب زعفران Using Inception-v4 convolutional neural network, selection of the best data augmentation policies using the proposed LAII-v4 CNN, achieving an accuracy of 99.5% in saffron fraud detection

جدول ۶. مقایسه مقالات انجام‌شده از روش‌های مختلف در ارزیابی کلاله زعفران با استفاده از بینایی ماشین.

Table 6. Comparison of studies conducted using different methods for evaluating saffron stigma using machine vision.

مرجع (Reference)	روش (Method)	نتایج و عملکرد (Results and performance)
Gracia et al., (2009)	سیستم برش خودکار با سیستم بینایی (Automated cutting system with machine vision)	به دست آوردن نقطه برش بهینه برای برش تمیز گل زعفران با استفاده از سیستم بینایی و تحلیل تصویر، افزایش نرخ برش گل تا ۸ برابر نسبت به روش سنتی دستی (Obtaining the optimal cutting point for clean cutting of saffron flowers using machine vision system and image analysis, increasing the flower cutting rate up to 8 times compared to the traditional manual method)
(Beiki, 2014)	استفاده از ابزارهای آماری یادگیری ماشین بدون نظارت (Using unsupervised machine learning statistical tools)	شناسایی و پیش‌بینی گونه‌های دارای کلاله سه و چند شاخه بر اساس DNA، استفاده از الگوریتم‌های بیوانفورماتیکی و K-Means و K-Medios برای دسته‌بندی کلاله‌ها (Identification and prediction of three- and multi-branched stigmas species based on DNA, using bioinformatics algorithms and K-Means and K-Medoids for stigma classification)
Pittenauer et al., 2016)	رویکرد تصویربرداری طیف‌سنجی جرمی مبتنی بر MALDI (MALDI-based mass spectrometry imaging approach)	استفاده از تصویربرداری طیف‌سنجی جرمی برای شناسایی کلاله‌ها و گونه‌های مختلف کروسین، امکان مطالعه جزئیات فرآوری و تلاش‌های تقلبی در کلاله‌ها با دقت بالا (Using mass spectrometry imaging for identification of saffron stigmas and different crocin species, possibility of studying the processing details and adulteration attempts in stigmas with high accuracy)
Chaker-alhoseini, (2018)	پردازش تصویر (Image processing)	استفاده از الگوریتم پیشنهادی برای تشخیص تقلبی بودن کلاله زعفران با استفاده از پردازش تصویر، تمایز ژنتیکی کلاله سه شاخه از چند شاخه با دقت و صحت بالا (Using proposed algorithm for saffron stigma fraud detection based on image processing, high accuracy and precision in distinguishing genetic differences between three-branched and multi-branched stigmas)

در مقاله‌ای دیگر بیکی (Beiki, 2014) برای دسته‌بندی و پیش‌بینی کلاله سه شاخه و چند شاخه زعفران از ابزارهای آماری یادگیری ماشین بدون نظارت استفاده کرد. در این مقاله بر اساس نشانگرهای مولکولی چند شکلی توالی مربوط تکثیر یافته و با استفاده از الگوریتم-های بیوانفورماتیکی مختلف روش جدیدی برای شناسایی و پیش‌بینی گونه‌های دارای کلاله سه و چند شاخه بر اساس DNA ارائه گردید. سپس K-Means و K-Medios برای دسته‌بندی صحیح کلاله مورداستفاده قرار گرفت. نهایتاً با دقت و صحت بالای ۹۰ درصد به‌منظور تمایز ژنتیکی کلاله سه شاخه از چند شاخه دست‌یافتند.

پیتناور و همکاران (Pittenauer et al., 2016) یک رویکرد تصویربرداری طیف‌سنجی جرمی مبتنی بر MALDI[1] را برای کلاله‌ها نسبت به گونه‌های مختلف کروسین با موفقیت نشان دادند. MSI بررسی مواد

[1] MALDI-based mass spectrometric imaging (MSI)

گیاهی فرآوری شده را در زمینه‌های مختلف باز می‌کند و امکان مطالعه جزئیات فرآوری و همچنین تلاش‌های تقلبی (که به دلیل قیمت مواد بسیار متداول است) را فراهم می‌کند. علاوه بر این، ما می‌توان نشان داد که تعداد مشابهی از کروسین‌های موجود در کلاله‌ها می‌تواند توسط MALDI MSI در مقایسه با رویکرد کلاسیک تجزیه‌وتحلیل عصاره حلال کلاله‌ها شناسایی شود. چاکرالحسینی (Chaker-alhoseini, 2018) روشی برای تشخیص تقلبی بودن محصول کلاله زعفران با استفاده از پردازش تصویر ارائه داد. در این مطالعه، یک مجموعه تشکیل‌شده از ۱۰۰ تصویر از انواع (رندهای مختلف) از کلاله زعفران به‌عنوان مجموعه‌ای از داده‌ها در نظر گرفته و الگوریتم پیشنهادی تشخیص اصل یا تقلبی بودن را بر روی این تصاویر پیاده‌سازی نمود. سپس بعد از جداسازی رنگ‌ها و به‌کارگیری روش پیشنهادی ویژگی‌های آن به دست آمدند. این نتایج توسط یک سیستم فازی سنجیده شد و با توجه به توابع و شرایط، نوع کلاله زعفران به دست آمد. به‌طورکلی، استفاده از تکنیک‌های تجزیه‌وتحلیل تصویر دیجیتال پتانسیل زیادی برای بهبود دقت و کارایی ارزیابی و درجه‌بندی کیفیت زعفران و همچنین برای تشخیص تقلب و مطالعه شیمی زعفران نشان داده است. در جدول۶ مقالات و محققان مرتبط با روش‌ها و نتایج در ارزیابی کلاله زعفران با استفاده از بینایی ماشین ارائه‌شده است.

نتیجه‌گیری

زعفران یک ادویه بسیار باارزش است که در محصولات غذایی و دارویی مختلف استفاده می‌شود. کیفیت و اصالت زعفران عوامل مهمی هستند که ارزش بازار آن را تعیین می‌کنند و کیفیت و ایمنی کلی آن را تحت تأثیر قرار می‌دهند. روش‌های سنتی ارزیابی کیفیت زعفران مانند بازرسی چشمی، ذهنی و مستعد خطا هستند که منجر به توسعه روش‌های جایگزین ازجمله پردازش تصویر شده است. پردازش تصویر رشته‌ای از علوم کامپیوتر است که بر تجزیه‌وتحلیل تصاویر دیجیتال و استخراج اطلاعات مفید از آن‌ها تمرکز دارد. در مورد آنالیز زعفران، از تکنیک‌های پردازش تصویر برای ارزیابی جنبه‌های مختلف کلاله زعفران ازجمله رنگ و بافت آن استفاده‌شده است.

در سال‌های اخیر مقالات متعددی در مورداستفاده از پردازش تصویر برای تشخیص گل زعفران منتشرشده است. این مقالات استفاده از تکنیک‌های بینایی کامپیوتری را برای تجزیه‌وتحلیل تصاویر گل زعفران و استخراج اطلاعات در مورد کیفیت و اصالت آن‌ها موردبررسی قرار داده‌اند. یکی از زمینه‌های موردتوجه، استفاده از تکنیک‌های آنالیز رنگ برای ارزیابی شدت و رنگ قرمز کلاله زعفران است که عامل مهمی در تعیین کیفیت آن است. یکی دیگر از زمینه‌های موردتوجه استفاده از تکنیک‌های تحلیل بافت برای ارزیابی یکنواختی و درشتی کلاله زعفران بوده است که می‌تواند نشان‌دهنده تازگی و اصالت آن باشد. در این مقاله کارهای انجام‌شده در زمینه تشخیص گل زعفران، ارزیابی کیفیت و درجه‌بندی زعفران، اصالت زعفران و همچنین کلاله زعفران با استفاده از پردازش تصویر را بررسی و مقایسه شد. با توجه به مقالات موردبررسی برای مرحله شناسایی پیکسل‌های مربوط به گل زعفران روش‌های جدیدی پیشنهادشده است. ازآنجاکه عبور برگ از روی گل زعفران یک اثر نامطلوب بر شناسایی گل زعفران دارد، درنتیجه این اثر باید از روی گل حذف شود که در مقاله دهباشی و همکاران (۱۴۰۱) این مشکل برطرف شده است. تعیین مناسب بودن گل زعفران برای برداشت نیز یک مقوله بسیار مهم در برداشت گل زعفران است که در صورت رعایت نشدن، موجب خسارت به محصول کشاورز می شود. در مرحله نهایی برای اینکه ربات برداشت زعفران بتواند گل موردنظر را برداشت کند، باید مرکز گل برای ربات مشخص شود. برای این کار نیز یک راه‌حل جدید پیشنهادشده تا فرآیند برداشت با روند بهتری بتواند انجام گیرد.

به‌طورکلی، نتایج این مطالعات نشان داده است که ترکیبی از اطلاعات رنگ و شکل می‌تواند نتایج بهتری را برای تشخیص گل زعفران در مقایسه با استفاده از هر یک از ویژگی‌ها به‌تنهایی ارائه دهد. بااین‌حال، عملکرد این روش‌ها همچنان می‌تواند تحت تأثیر عواملی مانند شرایط نور، کیفیت تصویر و وجود اشیا دیگر در تصویر باشد. توجه به این نکته ضروری است که تشخیص گل زعفران به دلیل پیچیدگی تصاویر و تنوع گل‌ها همچنان یک کار چالش‌برانگیز است. تحقیقات بیشتری برای توسعه تکنیک‌های پردازش تصویر قوی‌تر و دقیق‌تر برای تشخیص گل زعفران موردنیاز است.

پیشرفت‌ها در فناوری بینایی ماشین، سیستم‌های بینایی را دقیق، مستحکم و کم‌هزینه کرده است که آن‌ها را برای توصیف کیفیت غذا مناسب می‌کند؛ بنابراین می‌توان فناوری بینایی ماشین را برای شناسایی زعفران در آینده نزدیک پیش‌بینی کرد. استفاده از تجزیه‌وتحلیل تصویر می‌تواند بلافاصله اطلاعات کمی را در مورد ترکیبات رنگی اصلی زعفران ارائه دهد. سپس با توسعه یک سیستم خبره و با استفاده از سنجش‌های شیمیایی، می‌توان زعفران را مشخص کرد و ویژگی‌های دیگری مانند منشأ و تازگی آن را مشخص کرد. ازآنجایی‌که ویژگی‌های کیفی زعفران علاوه بر رنگ، شامل عطر و طعم نیز می‌شود، لازم به ذکر است که فناوری بینایی ماشین باید با سیستم خودکار تشخیص عطر و طعم تکمیل شود. چنین سیستمی شامل فناوری بینی و زبان الکترونیکی می‌شود که اطلاعات جامعی در مورد کیفیت زعفران مناسب برای نظارت و طبقه‌بندی بلادرنگ ارائه می‌دهد. با توجه به مزیت‌های بینایی ماشین و فناوری زبان الکترونیکی، پیش‌بینی می‌شود که این سیستم‌ها در رویکرد تلفیقی به کار گرفته شوند و ابزاری جدید و قوی تر برای شناسایی زعفران و بهبود سطح اطمینان ارائه کنند. این ایده در یک پروژه تحقیقاتی در حال انجام برای ارزیابی و پایش کیفیت زعفران به‌عنوان یک تکنیک قوی در زمان واقعی اجرا می‌شود.

چندین مطالعه نشان داده است که از تکنیک‌های پردازش تصویر می‌توان برای ارزیابی دقیق کیفیت کلاله زعفران و تمایز بین زعفران اصلی و محصولات تقلبی یا تقلبی استفاده کرد. بااین‌حال، توجه به این نکته مهم است که دقت نتایج می‌تواند تحت تأثیر عوامل متعددی ازجمله شرایط نوری، کیفیت تصویر و جهت-گیری کلاله زعفران قرار گیرد. برای مقابله با این چالش‌ها، محققان الگوریتم‌های قوی و پایگاه داده بزرگی از تصاویر کلاله زعفران را برای اطمینان از نتایج دقیق ایجاد کرده‌اند. این تکنیک‌ها با استفاده از مجموعه داده-های دنیای واقعی تائید شده‌اند و نتایج امیدوارکننده‌ای را در ارزیابی کیفیت و اصالت زعفران نشان داده‌اند. به‌طورکلی، مقالات بررسی‌شده نشان می‌دهند که پردازش تصویر ابزاری امیدوارکننده برای تشخیص گل زعفران است و تحقیقات در حال انجام در این زمینه پتانسیل بهبود بیشتر دقت و کارایی پردازش تصویر کلاله زعفران را دارد. به‌طورکلی، پردازش تصویر ابزار ارزشمندی برای تجزیه‌وتحلیل زعفران است و پتانسیل بهبود قابل‌توجهی در دقت و کارایی ارزیابی و درجه‌بندی زعفران دارد. ادامه تحقیق و توسعه در این زمینه برای اطمینان از توسعه تکنیک‌های پیشرفته‌تر و قابل‌اعتمادتر برای تجزیه‌وتحلیل زعفران بسیار مهم است.

منابع

Alighaleh, P., Khosravi, H., Rohani, A., Saeidirad, M. H., & Einafshar, S. (2022). The detection of saffron adulterants using a deep neural network approach based on RGB images taken under uncontrolled conditions. *Expert Systems with Applications*, *198*(2), 116-128 .

Amirvaresi, A., Rashidi, M., Kamyar, M., Amirahmadi, M., Daraei, B., & Parastar, H. (2020). Combining multivariate image analysis with high-performance thin-layer chromatography for development of a reliable tool for saffron authentication and adulteration detection. *Journal of Chromatography A*, *1628*(2), 461-467. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chroma.2020.461461

Azarabadi, N., & Özdemir, F. (2018). determination of crocin content and volatile components in different qualities of iranian saffron. *Gıda*, *43*(3), 476-489 .

Bakhshi, H. G., Mahmoodreza; Abaspour, Mohammadhosein;. (2014). Computer

Akbari-Ardagani, B., Mohammadzadeh-Moghadam, M., Karimi-Noghabi, M., Mohammad pour, M., & Khalilyan-Movahhed, M. (1400). Using computer vision in non-destructive detection of real and fake saffron. *Agriculture and technology of saffron*, *9*(4), 409-429 .

Aliabadi, R. (2013). *Using smart techniques to check the quality of saffron flower* Kerman Shahid Bahonar University]. Kerman .

Aliabadi, R., & Mohammadi, M. (2012). *Quality control of saffron flower using smart techniques* National Computer and Information Technology Conference, https://civilica.com/doc/141977

Aliabadi, R., & Mohammadi, M. (2013). *Presenting a new method for the automation of saffron flower cutting using smart techniques* The second national conference of computer, electricity and information technology, https://civilica.com/doc/153096/

vision algorithm for saffron flower alignment. 8th National Congress of Agricultural Machinery Engineering (Biosystem) and Mechanization ,

Beiki, A. (2014). Classification and prediction of three-branched and multi-branched saffron stigma using unsupervised machine learning statistical tools. *Saffron agronomy and technology*, *2*(3), 199-204. https://doi.org/https://doi.org/10.22048/jsat.2014.7810

Chaker-alhoseini, M. (2018). *Presenting a method to detect the fakeness of saffron stigma product using image processing* University of Science and Art .[

Cusano, E., Consonni, R., Petrakis, E. A., Astraka, K ,.Cagliani, L. R., & Polissiou, M. G. (2018). Integrated analytical methodology to investigate bioactive compounds in Crocus sativus L. flowers. *Phytochemical Analysis*, *29*(5), 476-486 .

Dehbashi, M. R., Amir; Kardan Moghadam, Hosein;. (2022). Locating and detecting saffron flower using image processing techniques. *Saffron agronomy and technology*, *10*(3), 227-260. https://doi.org/10.22048/jsat.2022.290185.1427

Djozan, D., Karimian, G., Jouyban, A., Iranmanesh, F., Gorbanpour, H., & Alizadeh-Nabil, A. (2014 .(Discrimination of saffron based on thin-layer chromatography and image analysis. *JPC-Journal of Planar Chromatography-Modern TLC*, *27*(4), 274-280. https://doi.org/https://doi.org/10.1556/JPC.27.2014.4.7

Foschi, M., Tozzi, L., Di Donato, F., Biancolillo , A., & D'Archivio, A. A. (2023). A Novel FTIR-Based Chemometric Solution for the Assessment of Saffron Adulteration with Non-Fresh Stigmas. *Molecules*, *28*(1), 33. https://doi.org/https://doi.org/10.3390/molecules28010033

Gracia, L., Perez-Vidal, C., & Gracia-López, C. (2009). Automated cutting system to obtain the stigmas of the saffron flower. *biosystems engineering*, *104*(1), 8-17. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.06.003

Jafari, A., & Bakhshipour, A. (2010). *Development of suitable algorithm for recognition and locating saffron flower using machine vision* International Conference on Agricultural Engineering-AgEng ,

Jafari, A., Bakhshipour, A., & Hemmatian, R. (2014). Integration of Color Features and Artificial Neural Networks for In-field Recognition of Saffron Flower. *Iran Agricultural Research*, *33*(1), 1-14. https://doi.org/10.22099/IAR.2014.2376

Jamshidi, B. S., Mohammad-Hossein; Zarif-Neshat, Saeed; Azad-Shahraki, Farzad; . (2021). Appropriate and modern technologies to separate stigma from saffron flower. *Saffron promotional magazine*, *3*(1), 8-16 .

Kiani, S., & Minaei, S. (2016). Potential application of machine vision technology to saffron (Crocus sativus L.) quality characterization. *Food chemistry*, *212*, 392-394. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.04.132

Kiani, S., Minaei, S., & Ghasemi-Varnamkhasti, M. (2018). Instrumental approaches and innovative systems for saffron quality assessment. *Journal of Food Engineering*, *216*, 1-10. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.06.022

Maggi, M. A., Bisti, S., & Picco, C. (2020). Saffron: Chemical composition and neuroprotective activity. *Molecules*, *25*(23), 5618-5626. https://doi.org/10.3390/molecules25235618

Minaei, S., Kiani, S., Ayyari ,M., & Ghasemi-Varnamkhasti, M. (2017). A portable computer-vision-based expert system for saffron color quality characterization. *Journal of applied research on medicinal and aromatic plants*, *7*, 124-130. https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2017.07.004

Moghadamzadeh-Moghadam, M., Taghizadeh, M., Sadrnia, H., & Pourreza, H.-R. (2020). Classification of saffron using color features extracted from the image. *Saffron agronomy and technology*, *8*(3), 319-329. https://doi.org/https://doi.org/10.22048/jsat.2020.206278.1362

Moghaddasi, M. S. (2010). Saffron chemicals and medicine usage. *J Med Plants Res*, *4*(6), 427-430 .

Mohamadzadeh Moghadam, M., Taghizadeh, M., Sadrnia, H., & Pourreza, H. R. (2020a). Classification of saffron using color features extracted from the image. *Saffron agronomy and technology*, *8*(3), 319-399 .

Mohamadzadeh Moghadam, M., Taghizadeh, M., Sadrnia, H., & Pourreza, H. R. (2020b). Nondestructive classification of saffron using color and textural analysis. *Food Science & Nutrition* .۱۹۲۳-۱۹۳۲ ,(۴)۸ , https://doi.org/https://doi.org/10.1002/fsn3.1478

Mohammadi, M., & Karami, M. (2021). Detecting the location and angle of saffron flowers in the image using deep convolutional networks. *Journal of Machine Vision and Image Processing*, 8(3), 45-55. https://doi.org/20.1001.1.23831197.1400.8.3.4.2

Mohammadzadeh-Moghadam, M. (2016). *Investigating the effect of various drying methods on the quality of saffron and classification of dried saffron using digital image processing and different classification algorithms* Mashhad Ferdowsi University .[

Momeny, M., Neshat, A. A., Jahanbakhshi, A., Mahmoudi, M., Ampatzidis, Y., & Radeva, P. (2023). Grading and fraud detection of saffron via learning-to-augment incorporated Inception-v4 CNN. *Food control*, *147*, 1-11. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.109554

Pittenauer, E., Rados, E., Koulakiotis, N. S., Tsarbopoulos, A., & Allmaier, G. (2016). Processed stigmas of *Crocus sativus* L. imaged by MALDI-based MS. *Proteomics*, *16*(11),1726-1730. https://doi.org/10.1002/pmic.201500534

Poramini, A. (2017). *Basics of machine learning* (Vol. 1). Naghoos Publications .

Rozegar, M., & Golzarian, M. (2015). *Application of image processing in the diagnosis and classification of plant and fruit diseases* Second National Conference on Novel Topics in Agriculture, Tehran .

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

Sereshti, H., Poursorkh, Z., Aliakbarzadeh, G., & Zarre, S. (2018). Quality control of saffron and evaluation of potential adulteration by means of thin layer chromatography-image analysis and chemometrics methods. *Food control*, *90*, 48-57 .

Sereshti, H., Poursorkh, Z., Aliakbarzadeh, G., Zarre, S., & Ataolahi, S. (2018). An image analysis of TLC patterns for quality control of saffron based on soil salinity effect: A strategy for data (pre)-processing. *Food chemistry*, *239*, 831-839 .

Yasrebi, S. E., Zabah, I., Behzadian, B., Marousi, A., & Rezaei, R. (2019). Classification of saffron based on its apparent characteristics using artificial neural networks. *Saffron agronomy and technology*, *7*(4), 521-535. https://doi.org/https://doi.org/10.22048/jsat.2019.149440.1316

Zeraatkar, M., Khalili, K., & Foorginejad, A. (2016). High-Precision Laser Scanning System for Three-Dimensional Modeling of Saffron Flower. *Journal of Food Process Engineering*, *39*(6), 553-563 .

COPYRIGHTS

© 2023 by the authors. Published by University of Birjand – Saffron Research Group. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)