



Original Article

Design, Fabrication, and Mechanical Performance Evaluation of a Saffron Flower Harvesting Blade

Faraneh Khodamoradi¹, Mojtaba Jaberimoeaz¹ *

1- Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

ARTICLE INFO

Keywords:

Saffron,
Mechanized Harvesting,
Harvesting Blade,
Pulling Force,
Harvesting System
Design

Received:

November 10, 2025

Revised:

February 25, 2026

Accepted:

March 18, 2026

* Corresponding author:
m.jaberimoeaz@basu.ac.ir

ABSTRACT

Saffron (*Crocus sativus L.*) is one of the world's most valuable agricultural products, with Iran accounting for over 90% of global production. Harvesting is predominantly manual, resulting in high labor demands, significant ergonomic strain on workers, and considerable floral damage. The narrow blooming window—typically limited to 7–10 days—and the extreme mechanical fragility of the stigma-pistil complex impose stringent requirements on harvesting precision and speed. These constraints underscore the urgent need for mechanized solutions that can maintain product quality while improving operational efficiency and worker welfare.

Introduction

Saffron (*Crocus sativus L.*), renowned as “red gold,” is among the world's most valuable agricultural commodities, valued for its unique coloring, aromatic, and pharmacological properties. Iran, contributing over 90% of global production, remains heavily dependent on manual harvesting—a labor-intensive practice that imposes severe ergonomic burdens on workers, particularly repetitive stress injuries to the lumbar spine and knee joints due to prolonged bending and squatting. The harvesting window is critically narrow, typically confined to 7–10 days of synchronous blooming, during which flowers must be collected at dawn to preserve stigma quality. This time sensitivity, combined with the extreme fragility of the stigma-pistil complex, renders the process highly susceptible to quality degradation when performed manually. Despite the widespread mechanization of major field crops, saffron harvesting has resisted automation due to three primary challenges:

The delicate morphological structure of the flower, comprising three stigmas, three stamens, and six petals supported by a slender pedicel (~2 mm diameter); (ii) the high risk of mechanical damage during detachment, which directly compromises the economic value of the stigmas; and (iii) field heterogeneity, including uneven terrain, variable plant density, and inconsistent flower height. Existing prototypes—such as rotary rollers, pneumatic suction systems, and multi-tine pickers—have generally failed under real-world conditions, either causing excessive floral injury or requiring impractical power inputs. Recent research into aerodynamic separation and electrostatic harvesting has shown promise, yet these approaches often neglect the biomechanical response of saffron tissues under dynamic loading. To bridge this gap, this study proposes a biomimetic harvesting mechanism inspired by the precision of manual picking. A dedicated detachment blade was developed based on empirical characterization of saffron's physical and mechanical properties. The system was evaluated under actual field conditions with respect to harvesting efficiency, flower integrity, adaptability to terrain irregularities, and mechanical reliability. The overarching objective is to establish a scientifically grounded foundation for semi-mechanized saffron harvesting that harmonizes plant-specific fragility with engineering robustness.

Materials and Methods

How to cite:

Khodamoradi, F. Jaberimoeaz, M. (2025). *Design, Fabrication, and Mechanical Performance Evaluation of a Saffron Flower Harvesting Blade*. Journal of Agricultural Mechanization, 10 (4):41-55. <https://doi.org/10.22034/jam.2026.68067.1345>



This is an open-access article under the CC BY NC license
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)



Saffron flowers consist of a central pistil bearing three vivid red stigmas—the sole economically valuable component—surrounded by three yellow stamens and six violet petals. To inform the design of a compatible harvesting tool, key physical and biomechanical properties were quantified under field-moist conditions. Moisture content was determined using the oven-drying method yielding values of 89.5% (w.b.) in stems and 78.2% in petals. Stem diameter was measured at the detachment zone (pedicel base) using a digital caliper (± 0.01 mm), resulting in an average of 2.1 ± 0.3 mm. The force required for floral detachment was assessed via quasi-static uniaxial tensile tests conducted with a universal testing machine (Instron 3345, 10 N load cell, crosshead speed: $5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$). Flowers were gripped at the stigma base, and force was applied vertically until separation occurred. The detachment force was defined as the peak load preceding complete rupture. Based on these data, a harvesting blade was fabricated from austenitic stainless steel (AISI 304, yield strength = 220.6 MPa) using precision laser cutting (kerf width: 0.2 mm). The blade geometry featured a concave cutting edge designed to cradle the stem and guide it into the shear zone, minimizing lateral displacement and ensuring clean severance below the stigma attachment point. A polylactic acid (PLA) spacer, 3D-printed with 0.1 mm layer resolution, maintained uniform inter-blade spacing (4.5 mm) and alignment along the rotating shaft. Operational parameters were optimized through kinematic analysis. A rotational speed of 245 rpm was selected to achieve a blade tip linear velocity of $1.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ —sufficient to induce rapid detachment while avoiding inertial damage. Structural integrity was evaluated via finite element analysis (FEA) in SolidWorks Simulation 2018. A high-density mesh (element size: 0.4 mm at stress concentration zones) was applied to the blade tip, with boundary conditions replicating the measured 0.46 N detachment force. Theoretical stress was calculated using Euler–Bernoulli beam theory for cantilevered loading. Field trials were conducted in a commercial saffron field (Khorasan, Iran) during peak bloom. Performance metrics included effective field capacity, percentage of damaged flowers (classified by stigma bruising, petal tearing, or stem bending), and adaptability to micro-terrain variations. A protective elastomeric layer (Shore A 70) was tested to assess its impact-dampening efficacy.

Results and Discussion

Quasi-static testing yielded a mean detachment force of 0.46 ± 0.08 N, consistent with the low tensile strength of saffron pedicel tissues under high moisture conditions. This low force threshold dictated the necessity of a controlled, non-impact harvesting mechanism. FEA of the blade under operational loading revealed a maximum von Mises stress of 104.1 MPa at the tip root—the critical failure location. Theoretical beam-bending analysis predicted a stress of 188.3 MPa, with the discrepancy attributed to idealized assumptions in the analytical model (e.g., perfect clamping, homogeneous material). Critically, both values remained well below the yield strength of AISI 304 (220.6 MPa), confirming a safety factor of ≥ 2.1 and eliminating the risk of plastic deformation during field operation (HassanBeigi et al., 2010).

Field evaluations demonstrated an effective field capacity of $0.42 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$, markedly higher than the manual benchmark of 0.09. The inclusion of an elastomeric protective layer reduced the percentage of damaged flowers from $23.7 \pm 2.8\%$ (bare metal configuration) to $8.2 \pm 1.3\%$ —a 65.4% reduction ($p < 0.01$, two-tailed t-test).

Damage in the protected system was limited primarily to minor petal detachment, whereas the unprotected variant exhibited severe stigma bruising and style bending, directly impairing saffron quality. The sequential blade arrangement ensured uniform coverage across the row width (15 cm), eliminating flower retention in inter-blade zones—a common flaw in prior designs. These results confirm that successful saffron mechanization hinges not on brute-force automation, but on biomechanical fidelity: the precise matching of tool dynamics to plant structural response. The concave blade edge, optimized tip velocity, and elastomeric interface collectively replicate the dexterity of manual picking while offering scalable throughput.

Conclusion

This study demonstrates that a scientifically informed, plant-centric approach to tool design can overcome the longstanding barriers to saffron harvesting mechanization. By integrating empirical biomechanical data—particularly the low detachment force (0.46 N) and high tissue moisture—into the geometric and material configuration of a specialized harvesting blade, we achieved a system that simultaneously ensures flower integrity, mechanical reliability, and field-level efficiency. The blade's stress response (104.1 MPa) remains safely within elastic limits, validating the structural design under real operational loads. The 65.4% reduction in floral damage through elastomeric protection underscores the critical role of contact surface engineering in preserving stigma quality. Furthermore, the 4.7-fold increase in field capacity over manual methods highlights the system's potential to alleviate labor shortages and reduce occupational health risks. This work establishes a transferable framework for the mechanization of high-value, mechanically sensitive crops: one that prioritizes biological compatibility over mechanical dominance. Future efforts will focus on scaling the prototype to multi-row configurations and integrating real-time vision systems for selective harvesting.



طراحی، ساخت و ارزیابی عملکرد مکانیکی تیغه برداشت گل زعفران

فرانه خدامرادی¹، مجتبی جابری معز^{1*}

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۲۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۲/۰۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۱۹

۱- گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

* نویسنده مسئول: E-mail: m.jaberimoeaz@basu.ac.ir

چکیده

زعفران (*Crocus sativus L.*) به عنوان یکی از ارزشمندترین محصولات کشاورزی جهان و به ویژه ایران، عمدتاً با روش دستی برداشت می شود. این روش علاوه بر زمان بر و پرزحمت بودن، منجر به آسیب های قابل توجهی به گل ها شده و کشاورزان را با مخاطرات ارگونومیک (به ویژه در ناحیه کمر و زانو) مواجه می سازد. همچنین، محدودیت زمانی کوتاه دوره گل دهی و حساسیت بالای گل ها به آسیب فیزیکی، ضرورت استفاده از سامانه های مکانیزه مؤثر را چند برابر می کند. در این پژوهش، با بررسی ویژگی های فیزیکی و بیومکانیکی گل زعفران و تحلیل نیروهای مورد نیاز برای جداسازی گل، یک تیغه اختصاصی برای برداشت مکانیزه طراحی و بهینه سازی شد. تیغه طراحی شده با آرایش متوالی در امتداد محور، پوشش یکنواخت سطح را فراهم کرده و با تماس در ناحیه ای پایین تر از کلاله، گل را به صورت هدفمند و مؤثر جدا می نماید. نتایج آزمایش های میدانی نشان داد که استفاده از لایه محافظ، آسیب دیدگی گل را از ۲۳/۷ درصد (در سامانه بدون محافظ) به ۸/۲ درصد کاهش می دهد (کاهش معادل ۶۵/۴ درصد) که از نظر آماری معنی دار است. همزمان، ظرفیت کاری بهره وری مؤثر سامانه ۰/۴۲ نسبت به روش دستی ۰/۰۹ بهبود چشمگیری داشت. تحلیل تنش عددی در نرم افزار SolidWorks نیز نشان داد که حداکثر تنش ایجاد شده در تیغه (۱۰۴/۵۸۶ مگا پاسگال) به طور قابل توجهی پایین تر از مقاومت تسلیم ماده (۲۲۰/۶ مگا پاسگال) است، که نشان دهنده ایمنی و قابلیت اطمینان ساختاری آن است. نیروی مورد نیاز برای جداسازی گل نیز برابر با ۰/۴۶ نیوتن بر آورد گردید. در مجموع، این پژوهش گواهی بر این است که طراحی هوشمند اجزای برداشت، ترکیب مناسب مواد و بهینه سازی هندسی، می تواند پایه ای برای توسعه سامانه های نیمه مکانیزه کارآمد، پایدار و کیفیت محور در برداشت زعفران فراهم آورد.

کلمات کلیدی: زعفران، برداشت مکانیزه، تیغه برداشت، نیروی کندن، طراحی سامانه برداشت

۱- مقدمه

خستگی نه تنها توان جسمی کارگر را به مرور کاهش می‌دهد، بلکه با تأثیرگذاری بر تمرکز ذهنی، موجب افت دقت و افزایش زمان لازم برای انجام عملیات برداشت می‌شود. در نتیجه، کاهش بازدهی کاری و افزایش فشار فیزیکی بر نیروی انسانی از مهم‌ترین پیامدهای ادامه‌ی استفاده از این شیوه‌ی سنتی به‌شمار می‌رود (Emkani et al., 2020).

امروزه، فناوری برداشت مکانیزه محصولات کشاورزی با توجه به نوع محصول و حجم برداشت، در محصولاتی مانند ذرت و گندم به‌صورت گسترده و با استفاده از ماشین‌آلات پیشرفته انجام می‌شود. متأسفانه، با وجود پیشرفت‌های چشمگیر در فناوری‌های نوین، برداشت محصولاتی همچون زعفران همچنان عمده‌تاً به‌صورت دستی و توسط نیروی انسانی صورت می‌گیرد. فرآیند برداشت زعفران شامل چیدن گل‌ها از مزرعه و جداسازی کلاله‌ها از گل است که این روش علاوه بر افزایش هزینه‌های تولید و تأثیر منفی بر کیفیت محصول، سلامت نیروی کار را نیز به دلیل تماس مستقیم با آفت‌کش‌ها به مخاطره می‌اندازد. مطالعات نشان داده‌اند که اصلی‌ترین دلیل عدم توسعه سیستم‌های مکانیزه برداشت زعفران، پیچیدگی شکل ردیابی خودکار محصولات، نحوه برش و جمع‌آوری همزمان گل‌ها بدون آسیب رساندن به آن‌ها است. در زراعت زعفران، مرحله برداشت پس از شروع گل‌دهی، مهم‌ترین، حساس‌ترین و در عین حال دشوارترین و پرزحمت‌ترین مرحله به‌شمار می‌آید (Butts et al., 2019).

مطالعات پیشین نشان داده‌اند که بسیاری از ابزارهای موجود در شرایط ناهموار و متغیر مزارع زعفران از عملکرد مطلوبی برخوردار نیستند و در اغلب موارد، به دلیل طراحی نامناسب، موجب بروز آسیب به گل‌ها می‌شوند (Kumar et al., 2008). همچنین، در این طرح‌ها به ویژگی‌های زیستی خاص گل زعفران و شرایط واقعی حاکم بر مزرعه توجه کافی نشده است. بر این اساس، طراحی یک تیغه کندن با هندسه بهینه و مبتنی بر تحلیل‌های دقیق مکانیکی، به‌عنوان رویکردی مؤثر برای ارتقای کیفیت و کارایی فرآیند برداشت مورد توجه قرار گرفته است.

در مطالعات متعددی، از ویژگی‌های فیزیکی و آیرودینامیکی اجزای گل زعفران به‌منظور تسهیل فرآیند جداسازی مکانیزه استفاده شده است. در یکی از پژوهش‌ها، سرعت حد اجزای مختلف گل شامل کلاله، گلبرگ و پرچم، به‌همراه ضریب اصطکاک استاتیکی آن‌ها بر روی سطوح مختلفی نظیر نئوپان، لاستیک و فولاد مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاکی از آن بود که اختلاف در این ویژگی‌ها امکان بهره‌گیری برای جداسازی مؤثر کلاله از سایر اجزای گل را فراهم می‌سازد (Emadi et al., 2008).

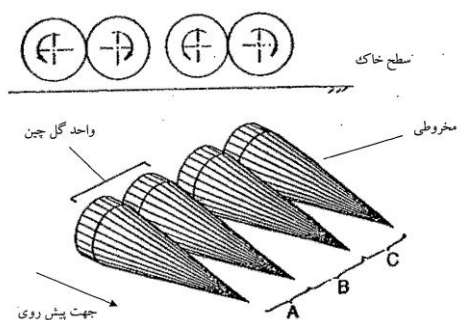
در پژوهشی دیگر، نتایج اولیه آزمایش‌های مقاومت مکانیکی کلاله زعفران در برابر جریان هوا مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه، سه مدل جداسازی هوایی با تفاوت در قطر لوله، سرعت جریان و سطح جداسازی ارزیابی شدند و همچنین سه سیستم برش

زعفران (*Crocus sativus L.*)، که به «طلای سرخ» معروف است، یکی از ارزشمندترین محصولات کشاورزی جهان محسوب می‌شود. به دلیل دارا بودن ترکیبات مؤثر دارویی، توان رنگ‌دهی بالا و ویژگی‌های عطری منحصر به فرد، از جایگاه ویژه‌ای در بازارهای جهانی برخوردار است. ایران با تولید بیش از ۹۰ درصد زعفران جهان، نقش تعیین‌کننده‌ای در تأمین این محصول راهبردی ایفا می‌کند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که روش برداشت دستی زعفران، علاوه بر زمان‌بر بودن، مستلزم به‌کارگیری نیروی انسانی قابل‌توجهی است و به علت ساختار ظریف گل، احتمال بروز خسارت مکانیکی در این روش بالا می‌باشد. همچنین، کوتاه بودن دوره گل‌دهی و حساسیت بالای زمان برداشت، ضرورت طراحی و توسعه ابزارها و سامانه‌های کارآمد و بهینه برای برداشت زعفران را بیش از پیش برجسته می‌سازد (Sanaei & Safabahr., 2010).

فرآیند استحصال زعفران از زمان شروع گل‌دهی تا مصرف نهایی، شامل سه مرحله کلیدی برداشت، جداسازی کلاله از گل و خشک کردن کلاله است که در تمامی این مراحل، عمده‌تاً کارهای مربوطه توسط نیروی انسانی و به‌صورت دستی انجام می‌شود. برداشت گل زعفران معمولاً در ساعات اولیه صبح و پیش از طلوع خورشید صورت می‌گیرد؛ زیرا تابش مستقیم نور خورشید موجب باز شدن غنچه‌ها می‌شود و برداشت در این زمان، گل‌ها را در بهترین شرایط حفظ می‌کند. عمر متوسط گل زعفران حدود سه روز است و طی این مدت کشاورزان باید نسبت به جمع‌آوری آن اقدام کنند که این محدودیت زمانی، یکی از مهم‌ترین چالش‌های برداشت محسوب می‌شود. علاوه بر این، جداسازی کلاله‌ها از گل باید بلافاصله پس از برداشت انجام شود تا از بروز آلودگی‌های قارچی جلوگیری شده و کیفیت محصول حفظ شود (Avila-Sosa et al., 2022).

از سوی دیگر، با توجه به اینکه زعفران مستقیماً در مزارع کشت می‌شود، برداشت محصول باید با سرعت و دقت بالایی انجام گیرد تا در شرایط نامساعد جوی، از آسیب دیدن گل‌ها جلوگیری شود. این امر باعث شده است که عملیات برداشت زعفران در مزرعه به کاری طاقت‌فرسا تبدیل شود که مستلزم تحمل شرایط فیزیکی سخت و وضعیت‌های نامناسب بدنی مانند خم شدن مکرر، زانو زدن و حتی خزیدن برای جمع‌آوری محصول است. این فعالیت‌های تکراری علاوه بر خستگی جسمانی، فشار روانی و استرس فیزیکی قابل‌توجهی را بر کارگران وارد می‌کند (Benos et al., 2020). در روش‌های سنتی برداشت زعفران، کشاورزان به‌واسطه‌ی قرارگیری در وضعیت‌های نامناسب بدنی و تکرار حرکات یکنواخت، با چالش‌های جسمانی قابل‌توجهی مواجه هستند. وضعیت‌هایی نظیر خم شدن طولانی‌مدت، نشست‌های مکرر بر زانو و فعالیت‌های پیوسته در حلت‌های غیرارگونومیک، منجر به بروز خستگی سریع عضلانی می‌گردد. این

در برخی مطالعات، از دو جفت غلتک مخروطی که در مجاور یکدیگر می‌چرخند که به‌عنوان واحد گل‌چین عمل می‌کنند، استفاده شده است (شکل ۲). این غلتک‌ها با چرخش خود، مواد اولیه را از سطح زمین جدا کرده و به داخل دستگاه هدایت می‌کنند. عملکرد دستگاه بر اساس نیروی گریز از مرکز و اصطکاک بین غلتک‌ها و گیاهان است، که جمع‌آوری مؤثر گل‌ها را امکان‌پذیر می‌سازد. شباهت این روش به شانه‌گل‌چینی سنتی موجب جداسازی آرام گل‌ها و کاهش آسیب به آن‌ها می‌شود، در حالی که دوران مخروطی‌ها سرعت و کارایی فرآیند جمع‌آوری را افزایش می‌دهد. با این حال، دستگاه دارای محدودیت‌هایی است. خم شدن بیش از حد گیاهان هنگام ورود به بخش مخروطی ممکن است موجب آسیب دیدن آن‌ها و کاهش کیفیت محصول شود. چرخش تعداد زیادی غلتک مخروطی مستلزم نیروی محرکه قوی است که تأمین آن در زمین‌های ناهموار دشوار می‌باشد. علاوه بر این، احتمال قطع شدن گل‌ها از محل اتصال به ساقه وجود دارد که ارزش محصول نهایی را کاهش می‌دهد. به‌طور کلی، استفاده از نیروی گریز از مرکز و اصطکاک با چالش‌هایی همچون خم شدن گیاهان و نیاز به نیروی محرکه قوی همراه است که می‌تواند اثر منفی بر کیفیت محصول داشته باشد. برای بهبود عملکرد دستگاه، پیشنهاد می‌شود طراحی غلتک‌ها اصلاح شود، از پوشش‌های نرم‌تر مانند لاستیک یا فوم استفاده گردد و سیستم محرکه قدرتمندتر طراحی شود. همچنین، به‌کارگیری سنسورها برای کنترل دقیق‌تر می‌تواند به کاهش آسیب به گیاهان کمک نماید. با اعمال این اصلاحات، دستگاه قابلیت تطبیق با سایر مواد اولیه گیاهی از جمله سبزیجات، میوه‌ها و گیاهان دارویی را دارد و می‌تواند در صنایع مختلف کاربردی باشد (Mehdinia, 1997).



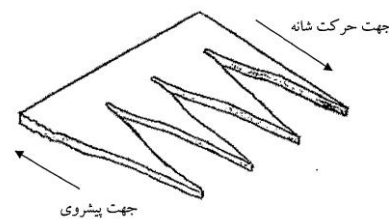
شکل ۲- شماتیک غلتک‌های مخروطی دوار
Fig 2. Schematic of Rotating Conical Rollers

برای بهبود ورود گل به فضای بین دو غلتک، طرح جدیدی ارائه شد که محور غلتک‌ها را در راستای حرکت گل‌ها قرار داده و به جای غلتک‌های دارای زلنده، از غلتک‌های خارج از مرکز استفاده کرد. با این وجود، آزمایش‌ها نشان داد که در محل تماس دو غلتک، گل‌ها دچار لهیدگی یا بریدگی می‌شوند. علت اصلی این آسیب، سطح تماس ناکافی گل با غلتک‌ها بود. همچنین، مشکل ورود گل به فضای

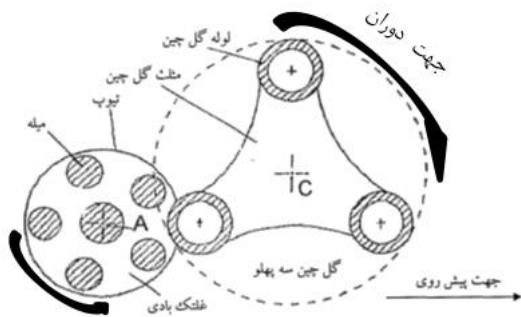
برای جداسازی گل زعفران مورد آزمایش قرار گرفتند. نیروی مورد نیاز برای جداسازی کلاله‌ها در شرایط شبیه‌سازی دستی بسیار کم و برابر با ۰/۲۱ نیوتن گزارش شد، در حالی که در برش‌های مکانیکی این نیرو بین ۷/۳۹ تا ۲۱/۳۷ نیوتن متغیر بود. از میان سه مدل سیکلون بررسی‌شده، نوع سوم با قطر لوله بهینه‌شده (کاهش ۱۴ درصدی قطر) که سرعت جریان هوا بین ۰/۶۹ تا ۱/۵ متر بر ثانیه، توانست جداسازی را با کارایی ۹۶ درصد و بدون ایجاد آسیب به کلاله انجام دهد (Paschino & Gambella, 2008).

در مطالعه‌ای دیگر، کارایی جداکننده الکترواستاتیک برای حذف ناخالصی‌ها از کلاله زعفران مورد ارزیابی قرار گرفت. در شرایط بهینه شامل فاصله نوار ۱/۵ سانتی‌متر، سرعت دورانی نوار نقاله ۶۰ دور در دقیقه و زمان جداسازی ۴ دقیقه، تا ۹۷ درصد جرم ناخالصی‌ها به‌طور مؤثر حذف گردید. همچنین، کمترین میزان جذب ناخواسته کلاله در شرایط فاصله ۳/۵ سانتی‌متر، سرعت دورانی نوار نقاله ۷۰ دور در دقیقه و زمان ۲ دقیقه ثبت شد که تنها ۲ درصد کلاله به‌طور ناخواسته جذب شد. این نتایج نشان‌دهنده ظرفیت بالای فناوری جداکننده الکترواستاتیک در ارتقای کیفیت نهایی محصول زعفران است (Mortazapour et al., 2015).

در بررسی طرح‌های برداشت مکانیکی گل زعفران، روش‌هایی نظیر شانه‌های گل‌چین با حرکت چرخشی و مکندة‌های بادی مورد ارزیابی قرار گرفتند. با این حال، به دلیل ویژگی‌های خاص گل زعفران از جمله بافت لطیف، نبود تفاوت قابل‌توجه بین ساقه و گل، تراکم بالای گیاه و ارتفاع نامنظم گل‌ها، این روش‌ها با ناکامی عملیاتی مواجه شدند. شانه‌ها توانایی جداسازی دقیق گل‌ها را نداشتند و منجر به برداشت ناقص یا آسیب دیدن گل‌ها می‌شدند، در حالی که مکندة‌ها به دلیل وارد آوردن آسیب فیزیکی، مکش ناخواسته خاک و حساسیت به تنوع طبیعی گل‌ها، کارایی محدودی نشان دادند. بنابراین، این محدودیت‌ها ضرورت طراحی مکانیزمی نوآورانه و دقیق که متناسب با ویژگی‌های زیستی و شرایط زراعی زعفران باشد را برجسته می‌سازد. (شکل ۱) نمایی از شانه گل‌چین را نشان می‌دهد (Mehdinia, 1997).



شکل ۱- شانه گل‌چین (Mehdinia, 1997)
Fig 1. Saffron harvesting comb



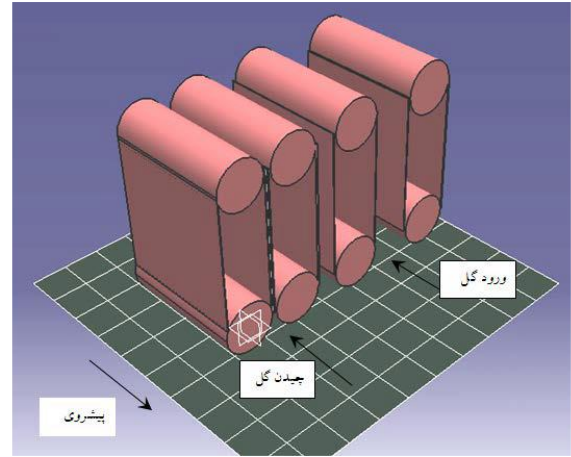
شکل ۴- نمای جانبی از گلچین سه پهلو

Fig 4. Side view of the three-sided flower picker

در فرآیند برداشت زعفران، رعایت اصول مکانیکی دقیق برای جلوگیری از آسیب به گل بسیار حائز اهمیت است. سطح تماس گیره مکانیزم با گل باید به گونه‌ای طراحی شود که تنش موضعی ایجاد نکند و دارای اصطکاک کنترل شده‌ای باشد تا در زمان بالا کشیدن گل، از آسیب دیدگی گلبرگ‌ها جلوگیری شود. فشار وارده از سوی مکانیزم برداشت نباید موجب صدمه به ساقه شود، چراکه آسیب به ساقه سبب کاهش ماندگاری و کیفیت گل پس از برداشت می‌گردد. سرعت و شتاب مناسب در فرآیند برداشت نیز ضروری است؛ بررسی‌های تجربی نشان داده‌اند که با افزایش سرعت برداشت، محل جداسازی گل به پیاز نزدیک‌تر شده و عملیات برداشت با کارایی بیشتری انجام می‌گیرد. در عین حال، گل برداشت شده باید تا لحظه انتقال به مخزن نگهدارنده، توسط گیره حفظ شده و به آرامی رها شود تا آسیب نبیند. با توجه به این نیازها، توسعه دستگاهی مکانیزه برای برداشت گل زعفران امری ضروری به نظر می‌رسد. دستگاهی که بتواند گل را بدون آسیب برداشت کرده و مراحل جمع‌آوری را با بازدهی بالا و کیفیت مناسب انجام دهد. تاکنون اکثر طرح‌های ارائه شده در این زمینه در مرحله مفهومی باقی مانده‌اند و معدود نمونه‌های ساخته شده نیز به دلیل طراحی ناکارآمد و کیفیت پایین، مورد استقبال عملی قرار نگرفته‌اند. از این رو، در این پژوهش، با بررسی دقیق طرح‌های موجود و تحلیل ساختار مورفولوژیک گل زعفران، یک مدل جدید با عنوان «ماشین برداشت گل زعفران» طراحی و ارائه می‌گردد. این دستگاه با تکیه بر اصول طراحی ارگونومیک، قابلیت اطمینان بالا و قیمت تمام شده مناسب، می‌تواند نسبت به نمونه‌های پیشین عملکرد بهتری از خود نشان دهد. همچنین به دلیل الگوبرداری از روش برداشت دستی در طراحی این دستگاه، انتظار می‌رود که کیفیت برداشت و راندمان عملکرد آن به‌طور قابل توجهی افزایش یابد. (Manuello Bertetto et al., 2016)

یکی از چالش‌های اساسی در فرآیند برداشت زعفران، جداسازی گل از روی خاک و پایه گیاه گزارش شده است؛ فرآیندی که مستلزم دقت و ظرافت بالایی است تا گل بدون ایجاد آسیب به کلاله و گلبرگ‌ها جدا شود. در جریان بازدیدها و آزمون‌های میدانی، مشاهده

میان غلتک‌ها همچنان باقی‌مانده. افزایش فاصله بین غلتک‌ها نیز منجر به عبور بدون برداشت گل‌ها شد و بهبود قابل توجهی ایجاد نشد (شکل ۳) شماتیک این طرح را به خوبی نمایش می‌دهد (Mirzaei et al., 2008).



شکل ۳- شماتیک غلطک دوار

Fig 3. Schematic of the rotary roller

دستگاه گل‌چین سه‌پهلو شامل دو بخش اصلی است: یک سیستم گل‌چین سه‌پهلو و یک غلتک بادی که به‌صورت یکپارچه با هم عمل می‌کنند (شکل ۴). ساختار سیستم گل‌چین سه‌پهلو از سه لوله گل‌چین تشکیل شده که هر کدام به رئوس دو صفحه مثلثی شکل متصل و جوش داده شده‌اند. این لوله‌ها حول مرکز دایره محیطی مثلث‌ها (محور گل‌چین سه‌پهلو) در جهت عقربه‌های ساعت دوران می‌کنند. غلتک بادی این سیستم از لوله‌های توپر ساخته شده که داخل آن‌ها پنج میله قرار دارد و با هوای فشرده پر شده‌اند. این میله‌ها از حرکت جانبی اضافی، عقب‌نشینی یا جابه‌جایی ناخواسته لوله‌ها جلوگیری می‌کنند. برای ممانعت از برخورد لوله‌های گل‌چین با میله‌های غلتک بادی و همچنین تضمین حرکت روان و یکنواخت غلتک، جهت حرکت غلتک بادی برخلاف جهت دوران گل‌چین سه‌پهلو تنظیم شده است. لازم به ذکر است که غلتک بادی هرزگرد نیست و سرعت چرخش آن به سرعت دوران گل‌چین سه‌پهلو وابسته است (Rouhi, 2001).

در این پژوهش، به منظور طراحی بهینه سامانه برداشت گل زعفران، مطالعه ویژگی‌های فیزیکی و بیومکانیکی گل زعفران در اولویت قرار گرفت. یکی از عوامل کلیدی تأثیرگذار بر رفتار مکانیکی گل، میزان رطوبت آن در زمان برداشت است؛ چرا که رطوبت نقش تعیین‌کننده‌ای در مقاومت بافت گیاه در برابر نیروی برشی دارد. به همین منظور، رطوبت نسبی نمونه‌های گل برداشت شده از مزرعه، در بازه زمانی مشخص و تحت شرایط محیطی کنترل‌شده اندازه‌گیری شد. نتایج حاصل در (جدول ۱) ارائه شده و در طراحی تیغه‌های برش برای شرایط واقعی برداشت مورد استفاده قرار گرفتند. رطوبت بالای گل می‌تواند خواص مکانیکی بافت گیاه را تغییر داده و با کاهش مقاومت آن در برابر برش، فرآیند برداشت را تحت تأثیر قرار دهد (Mollafilabi et al., 2014).

جدول ۱- محتوای رطوبتی اجزای گل زعفران

Table 1. Moisture content of different parts of the saffron flower

رطوبت اولیه (Initial Moisture Content (IMC, %))	جزء گیاه (Plant Part)
87.2	گلبرگ (Petal)
77.4	کلاله (Stigma)
66.7	پرچم (Stamen)
56.0	برگ (Leaf)
89.5	ساقه (Stem)

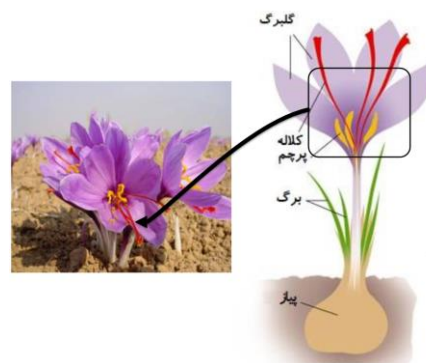
به منظور تعیین نیروی لازم برای جدا کردن گل زعفران از ناحیه اتصال به پیاز، آزمایش‌هایی تحت بارگذاری تک‌محوری شبه‌استاتیک انجام شد. نمونه‌های برداشت شده با شرایط یکنواخت، در دستگاه آزمون کشش قرار گرفتند و نیروی لازم تا نقطه انقطاع ثبت گردید. میانگین نیروهای ثبت‌شده در (جدول ۲) گزارش شده‌اند. این داده‌ها نقش اساسی در تعیین نیروی مؤثر طراحی تیغه‌ها ایفا کردند، به طوری که تیغه‌ها می‌بایست حداقل نیروی برشی معادل یا بیشتر از این مقدار را اعمال کنند تا بدون آسیب به سایر بخش‌های گیاه، گل به طور کامل جدا شود (Emadi et al., 2008).

شد که ناهمواری سطح زمین، تنوع ارتفاع گل‌ها و تراکم بالای مزرعه، فرآیند طراحی ابزار مناسب برای کندن گل را با پیچیدگی‌های قابل توجهی مواجه می‌سازد. اگرچه در برخی مطالعات به طراحی ماشین‌آلات برداشت زعفران پرداخته شده است، اما بهینه‌سازی ابزار کندن به‌عنوان یکی از اجزای کلیدی این فرآیند، کمتر مورد توجه قرار گرفته است (Denarda et al., 2021).

در پژوهش حاضر، تیغه‌ای اختصاصی برای کندن گل زعفران طراحی و ساخته شد که با توجه به ابعاد و ویژگی‌های گیاه، عملکرد هدفمند و دقیقی ارائه می‌دهد. طراحی این تیغه با بهره‌گیری از نرم‌افزارهای مهندسی انجام گرفت و نمونه اولیه آن تحت شرایط واقعی مزرعه مورد آزمایش قرار گرفت. عملکرد تیغه بر اساس معیارهایی از جمله درصد گل‌های سالم جدا شده، میزان آسیب به کلاله‌ها و گلبرگ‌ها، سرعت عملیات و سازگاری با ناهمواری زمین ارزیابی گردید. یافته‌ها نشان داد که استفاده از این تیغه می‌تواند نقش مؤثری در توسعه سیستم‌های نیمه‌مکانیزه برداشت گل زعفران با کارایی بالا و حداقل آسیب ایفا کند. با توجه به چالش‌های متعدد برداشت دستی و جایگاه استراتژیک محصول، نیاز به توسعه ابزارهای مکانیزه آشکار شد. مطالعات پیشین نیز نشان داده‌اند که اغلب ابزارهای موجود در شرایط واقعی مزرعه، عملکرد مطلوبی ندارند و موجب آسیب به گل‌ها می‌شوند. بر این اساس، هدف این پژوهش، طراحی و بهینه‌سازی تیغه‌ای بود که ضمن کاهش نیروی لازم، سرعت و دقت برداشت را افزایش داده و حداقل آسیب را به گل‌ها وارد نماید.

۲- مواد و روش‌ها

اجزای گل زعفران در (شکل ۵) نمایش داده شده است. گل زعفران شامل شش گلبرگ ۱، سه پرچم ۲ و یک مادگی با سه کلاله قرمز رنگ ۳ است که به‌عنوان بخش اصلی گل شناخته می‌شود (Ruggieri et al., 2023).



شکل ۵- اجزای گل زعفران

Fig 5. Components of the saffron flower

3 - stigmas

1 - tepals

2 - stamens

جدول ۲- نتایج بررسی اثر سرعت کشش و سن گیاه بر نیروی لازم برای کندن مصرفی به ازای واحد سطح ساقه، مقاومت کششی و انرژی

Table 2. Analysis of the effects of pulling speed and plant age on pulling force, tensile strength, and energy consumption per unit stem surface area

خطا (Error)	سن گیاه × سرعت کندن (Interaction: Age × Speed)	سرعت کندن (Detachment Speed)	سن گیاه (Plant Age)	پارامتر (Parameter)
48	6	3	2	درجه آزادی (Degree of Freedom (df))
—	0.00110 ^{ns}	0.0434 ^{**}	0.00064 ^{ns}	نیروی لازم برای کندن (N) (Detachment Force, N)
—	0.0002774 ^{ns}	0.010855 ^{**}	0.000162 ^{ns}	مقاومت کششی (MPa) (Tensile Strength, MPa)
—	0.0658162 ^{ns}	6.155308 ^{**}	0.04954 ^{ns}	انرژی مصرفی به ازای واحد سطح (Energy per Unit Area, mJ/mm ²)

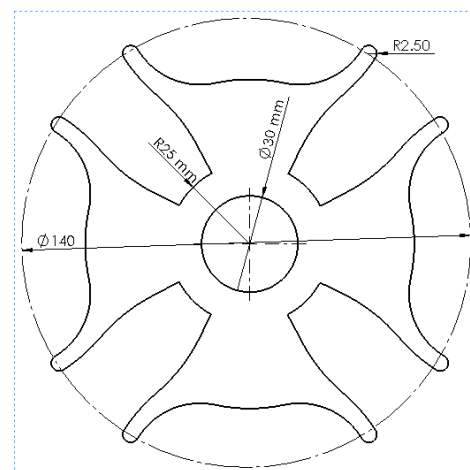
پایداری حرارتی، گزینه‌ای مناسب برای کار در شرایط مزرعه به‌شمار می‌روند

(Callister & Rethwisch, 2020). ضخامت تیغه‌ها به صورت بهینه در نظر گرفته شد تا ضمن تضمین استحکام کافی، حداقل تماس اصطکاکی با سطح گیاه ایجاد شود. فاصله بین دو تیغه کمی کمتر از حداکثر قطر ساقه در نظر گرفته شد تا فرآیند جداسازی به‌صورت کامل و بدون درگیری یا گیرکردگی گل صورت پذیرد. قطعات تیغه‌ها با استفاده از فناوری برش لیزری فلزات با دقت بالا تولید شدند تا کیفیت لبه‌ها و ابعاد هندسی به‌درستی حفظ شود. جهت حفظ موقعیت تیغه‌ها و جلوگیری از تغییر فاصله عملکردی آن‌ها، قطعه حائلی از جنس پلی‌لاکتیک اسید^۲ (PLA) طراحی شد که با توجه به فرم پیچیده هندسی آن، از فناوری چاپ سه‌بعدی برای ساخت بهره گرفته شد. این روش تولید امکان ساخت دقیق و سبک‌سازی سازه را نیز فراهم نمود. شکل هندسی لبه‌های تیغه‌ها با الگوبرداری از فرم مقعر طراحی شد تا هدایت تدریجی ساقه گل به درون ناحیه تیغه‌ها و در نهایت جداسازی گل امکان‌پذیر گردد (Gomez & Gomez, 1984).

مدل مش‌بندی تیغه برداشت در (شکل ۷) الف ارائه شده است. به منظور افزایش دقت تحلیل، اندازه المان‌ها در نواحی با تمرکز تنش به صورت دقیق‌تر و با ابعاد کوچک‌تر تعیین شده است (Naderlou et al., 2018). همچنین، مدل مش‌بندی حائلی که بین دو تیغه قرار می‌گیرد، به گونه‌ای طراحی شده که فاصله بین تیغه‌ها در حالت بدون بار کمتر از ۲ میلی‌متر نشود؛ جهت جلوگیری از آسیب احتمالی نیز یک لایه نازک از پلاستیک استفاده خواهد شد. این طراحی در شکل ۶ قابل مشاهده است. این اقدام به منظور حفظ دقت در شبیه‌سازی و جلوگیری از خطاهای عددی انجام گرفته است. مشخصات قطعات در جدول ۳ بیان شده است.

پارامترهای مؤثر بر طراحی و توسعه مکانیزم‌های برداشت گل زعفران مورد بررسی قرار گرفته شد. از جمله این پارامترها می‌توان به مقاومت برشی ساقه، انرژی لازم برای کندن به ازای واحد سطح، نیروی مورد نیاز برای کندن گل و انرژی مصرفی اشاره کرد. به‌منظور تحلیل این عوامل، تأثیر سرعت برش، زاویه تیغه، سرعت کندن گل و سن گیاه بر این متغیرها بررسی گردید (Chegini et al., 2008).

با توجه به قطر ساقه گل زعفران که کمتر از ۳ میلی‌متر است، طراحی تیغه‌های برش به‌گونه‌ای انجام گرفت که امکان جداسازی دقیق گل از ناحیه اتصال به پیاز، بدون ایجاد آسیب مکانیکی مانند لهیدگی یا برش ناقص، فراهم گردد. ابعاد و اندازه یکی از مجموعه تیغه برداشت در (شکل ۶) نشان داده شد.



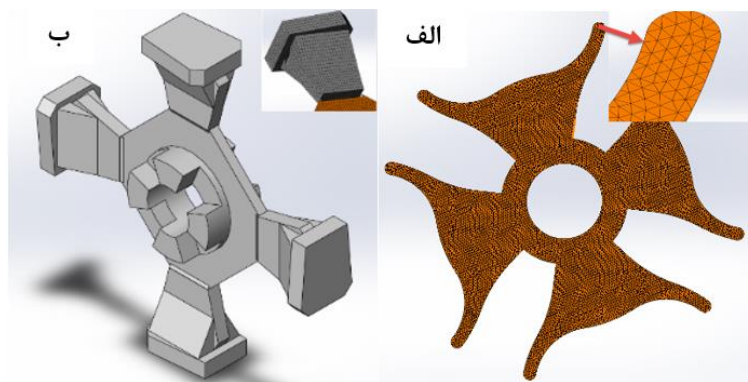
شکل ۶- ابعاد تیغه برداشت

Fig 6. Dimensions of the harvesting blade

تیغه‌ها از جنس فولاد ساده‌کربنی ضدزنگ ۱ انتخاب شدند که با برخورداری از خواص مکانیکی مطلوب نظیر مقاومت کششی بالا و

² -Polylactic Acid

¹ - Plain Carbon Steel



شکل ۷- الف) مدل مش بندی تیغه برداشت ب) قطعه حائل
 Fig 7. (a) Meshed model of the harvesting blade (b) Spacer component

جدول ۳- مشخصات قطعات الف (Plain Carbon Steel) ، قطعه ب (PLA)

Table 3. Mechanical properties of part A (Plain Carbon Steel) and part B (PLA)

توضیح (Description)	واحد (Unit)	Plain Carbon Steel	PLA	ویژگی (Property)
جرم واحد حجم ماده (Mass per unit volume)	kg/m ³	7800	1250	چگالی (Density)
نسبت تنش به کرنش در ناحیه الاستیک (Ratio of stress to strain in elastic range)	N/m ²	2.1×10 ¹¹	3.5×10 ⁸	مدول الاستیسیته (Elastic Modulus)
نسبت کرنش جانبی به کرنش محوری (Ratio of lateral to axial strain)	-	0.28	0.36	ضریب پواسون (Poisson's Ratio)
حداکثر تنش قبل از شکست در کشش (Maximum stress before fracture in tension)	N/m ²	399.8×10 ⁶	50×10 ⁶	استحکام کششی (Tensile Strength)
حد آغاز تغییر شکل پلاستیک (Stress at onset of plastic deformation)	N/m ²	220.6×10 ⁶	45×10 ⁶	حد تسلیم (Yield Strength)
تغییر نسبی طول در اثر گرما (Relative length change per °C)	°C ⁻¹	12×10 ⁻⁶	68×10 ⁻⁶	ضریب انبساط حرارتی (Thermal Expansion Coefficient)
میزان انتقال حرارت در واحد زمان و ضخامت (Heat transfer rate per unit thickness)	W/m·K	43	0.13	ضریب هدایت حرارتی (Thermal Conductivity)

مبنای محاسبات انتخاب شد. باتوجه به سرعت حد بین ۱/۵ تا ۲/۲ متر بر ثانیه است (Emadi et al., 2010). این نیرو را در فاصله ۷۰ میلیمتر و در نوک یکی از پرها تحلیل صورت گرفت و محاسبات تنش در (جدول ۴) ارائه شده است.

در طراحی تیغه‌ها، نیروی لازم جهت جداسازی گل زعفران از پیازچه بر اساس نتایج گزارش شده توسط پژوهشگرانی در بازه ۰/۳۳۹ تا ۰/۴۶ نیوتن اندازه‌گیری شده است. در این مطالعه، جهت طراحی محافظه‌کارانه و تأمین حاشیه ایمنی کافی، مقدار ۰/۴۶ نیوتن به‌عنوان

جدول ۴- محاسبات ریاضی تحلیل تنش نوک پره

Table 4. Mathematical Calculations of Blade Tip Stress Analysis

توضیح (Description)	واحد (Unit)	مقدار (Value)	رابطه ریاضی (Mathematical Relation)	پارامتر (Parameter)
قطر سطح مقطع نیم‌دایره (Diameter of the semicircle)	متر (m)	0.005	-	قطر (Diameter, d)
ضخامت پره (Thickness of the blade)	متر (m)	0.0015	-	ضخامت پره (Blade Thickness, t)
فاصله مرکز پره تا محل اعمال نیرو (Distance from blade center to force point)	متر (m)	0.07	-	فاصله نیرو تا تکیه‌گاه (Distance from Force to Support, L)
نیروی اعمال شده بر پره (Applied load on the blade)	نیوتن (N)	0.46	-	نیروی وارد شده (Applied Force, F)
محاسبه شده از رابطه $(F \times L)$	نیوتن‌متر (N·m)	0.0322	$(M = F \cdot L)$	ممان خمشی (Bending Moment, M)
برای سطح مقطع نیم‌دایره (For semicircular cross-section)	متر ⁴ (m ⁴)	4.28×10^{-13}	$I = (\pi r^4 / 8) - (8r^4 / 9\pi)$	ممان دوم سطح مقطع (Moment of Inertia, I)
فاصله محور خنثی تا لبه خارجی (Distance from neutral axis to outer edge)	متر (m)	0.0025	-	فاصله تا لبه بیرونی (Distance to Outer Edge, c)
مقدار محاسبه شده از رابطه تئوری	مگا پاسگال (MPa)	188.318	$\sigma = M \cdot c / I$	تنش خمشی تئوری (Theoretical Bending Stress, σ_t)
مقدار به دست آمده از شبیه‌سازی SolidWorks	مگا پاسگال (MPa)	104.058 6	-	تنش خمشی عددی (Bending Stress in SolidWorks, σ_s)



شکل ۸- آرایش و پیکربندی تیغه‌های برداشت

Fig 8. Arrangement and configuration of harvesting blades

با نصب متوالی مجموعه‌های تیغه بر روی محور چرخان (شکل ۹)، محدوده مؤثر برداشت افزایش یافته و پوشش کامل عرض ردیف کشت زعفران تضمین می‌شود. این آرایش امکان برداشت یکنواخت گل‌ها را حتی در تراکم بالا فراهم می‌کند.

به‌منظور کاهش برخورد مستقیم تیغه‌ها با گل و جلوگیری از آسیب‌های مکانیکی نظیر له‌شدگی یا پارگی، یک لایه نازک لاستیکی در ناحیه تماس تعبیه شده است. این لایه به‌دلیل خواص الاستیک، ضربه را جذب کرده و تنش‌های موضعی را مستهلک می‌نماید. در

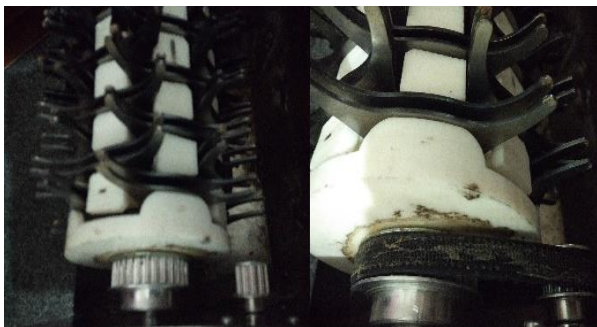
تیغه‌های فلزی با شکل ستاره‌ای و لبه‌های منحنی، وظیفه اصلی جداسازی مکانیکی گل از بوته را بر عهده دارند. این طراحی ضمن افزایش سطح تماس مؤثر، از تمرکز تنش و له‌شدگی گل جلوگیری می‌کند. استفاده از دو تیغه روبه‌روی یکدیگر موجب توزیع یکنواخت نیرو و افزایش پایداری عملکرد سیستم می‌شود.

حائل سفیدرنگ که بین دو تیغه قرار گرفته است، چندین نقش مهم ایفا می‌کند:

اول، ایجاد فاصله دقیق و کنترل شده بین تیغه‌ها به‌منظور تنظیم عمق و شدت برش؛ دوم، جلوگیری از تماس مستقیم فلز با فلز که موجب کاهش اصطکاک، سایش و افزایش عمر کاری تیغه‌ها می‌شود؛ و سوم، کمک به کاهش انتقال ارتعاش و ضربه‌های ناگهانی به گل زعفران، که برای محصولی با حساسیت بالا اهمیت زیادی دارد. این قطعه سبک ساخته شده تا هم وزن مجموعه کاهش یابد و هم خاصیت ضربه‌گیری فراهم گردد.

با توجه به نشانه‌گذاری (شکل ۸) به ترتیب A، B و C تغییر در نحوه مونتاژ تیغه‌ها و حائل قابل مشاهده است که نشان‌دهنده بررسی پیکربندی‌های مختلف طراحی می‌باشد. این تغییرات می‌تواند با هدف مقایسه عملکرد برداشت، میزان آسیب مکانیکی به گل و پایداری سیستم در شرایط کاری مختلف انجام شده باشد. به‌طور کلی، این تصویر بیانگر یک طراحی ماژولار و قابل بهینه‌سازی برای تیغه برداشت است که امکان تنظیم فاصله، هم‌محوری و رفتار مکانیکی مجموعه را فراهم می‌کند و نقش مهمی در بهبود کارایی و کیفیت برداشت زعفران دارد.

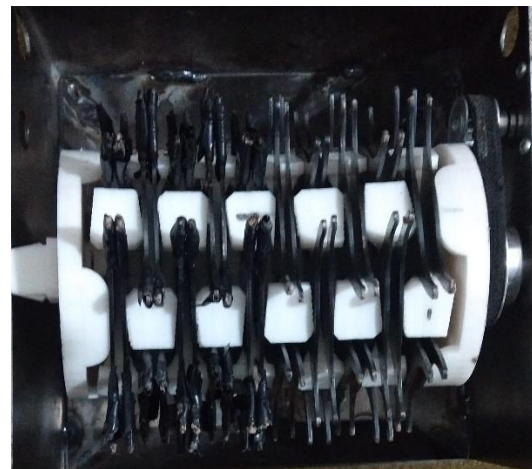
دوران توسط سیستم تسمه و پولی با نسبت ۲ به ۱ انتقال پیدا می‌کند. (شکل ۱۰) مجموعه تسمه و پولی نمایش داده شد.



شکل ۱۰- مجموعه تسمه و پولی
Fig 10. Belt and pulley set

در طراحی دیسک کندن گل، نیروی کندن گل یکی از پارامترهای کلیدی است که مستقیماً بر گشتاور مورد نیاز تأثیر می‌گذارد. (جدول ۵) پارامترهای لازم موتور مورد نظر جهت تأمین گشتاور مورد نیاز بیان شد.

نتیجه، ایمنی فرآیند برداشت افزایش یافته و کیفیت گل‌های برداشت‌شده حفظ می‌شود.



شکل ۹- آرایش مجموعه تیغه‌های برداشت بر روی محور با لایه محافظ لاستیکی
Fig 9. Schematic view of the harvesting blade assembly equipped with a rubber protective layer

در این سیستم مجموعه تیغه‌ها توسط موتوری با سرعت ۱۲ دور در دقیقه به حرکت در می‌آید. انتقال گشتاور از سر موتور به محور

جدول ۵- پارامترهای عملکردی موتور
Table 5. Motor Performance Parameters

توضیح (Description)	مقدار محاسبه شده (Calculated/Value)	پارامتر (Parameter)
فرض طراحی (Design Assumption)	2	ضریب اطمینان (Safety Factor)
قطر دیسک (Disk Diameter)	0.07 m	شعاع دیسک برداشت (r) Harvesting Disk Radius (r)
فرض طراحی (Design Assumption)	0.46 N	نیروی لازم برای کندن گل (F) Required Force to Pick Flower (F)
محاسبه شده (Calculated)	0.056 N·m	گشتاور لازم (T = F × r) Required Torque (T = F × r)
مقدار طراحی (Design Value)	0.112 N·m	گشتاور طراحی با ضریب اطمینان (T _m = 2 × T) Design Torque with Safety Factor (T _m = 2 × T)
سرعت مورد نیاز برای برداشت (Required Harvesting Speed)	6.82 rpm	دور لازم موتور (rpm) Required Motor Speed (rpm)
مقدار واقعی گشتاور موتور (Actual Targe Value of Motor)	2.00 kg·cm ≈ 0.196 N·m	گشتاور موتور موجود (Available Motor Torque)
موتور قوی‌تر از مقدار لازم است (Motor is stronger than required)	1.75 برابر (1.75 times)	نسبت گشتاور موتور به نیاز طراحی (Motor Torque Ratio to Design Requirement)
سرعتی که موتور با این گشتاور می‌تواند تأمین کند (Speed that the motor can provide with this torque)	≈ 11.93 rpm	دور قابل دستیابی با این موتور (Achievable Speed with This Motor)

بادامک موجود در هنگام دوران فشار لازم را به تیغه‌ها وارد می‌کند. که در لحظه برداشت تیغه‌ها بسته شود.

باز و بسته شدن تیغه‌ها برای برداشت گل زعفران توسط انحنای تعبیه شده در محور دوران و بادامک موجود (شکل ۱۱) انجام می‌شود.



شکل ۱۲- برداشت گل با استفاده از تیغه

Fig 12. Saffron Flower Harvesting Using a Blade



شکل ۱۱- بادامک مجموعه برداشت

Fig 11. Cam collection harvest

۳- نتایج و بحث

از آنجا که کیفیت زعفران برداشت شده به طور مستقیم تحت تأثیر سلامت کلاله‌ها قرار دارد، این بهبود، نه تنها ارزش تجاری محصول نهایی را ارتقا می‌دهد، بلکه کاهش ضایعات در مراحل بعدی فرآوری را نیز در پی دارد.

نتایج نشان داد که استفاده از لایه محافظ در سامانه برداشت مکانیزه، تأثیر آماری معنی‌داری در کاهش آسیب‌های فیزیکی گل زعفران دارد. در این روش، میانگین درصد گل‌های آسیب‌دیده ۸/۲ درصد رسید، در حالی که این مقدار در قسمت بدون پوشش محافظ به ۲۳/۷ درصد رسید. این تفاوت معادل کاهش ۶۵/۴ درصد در میزان آسیب است که با توجه به آزمون t در سطح ۱ درصد، از نظر آماری معنی‌دار محسوب می‌شود. روش دستی نیز با ۴/۱ درصد آسیب، همچنان به‌عنوان معیار مبنای کیفیت در نظر گرفته شد؛ هرچند از نظر بهره‌وری کاری، عملیات مکانیزه حتی با همین سطح کمی آسیب، کارایی بیشتری نسبت به برداشت دستی دارد. (جدول ۶) خلاصه‌ای از شاخص‌های کلیدی در روش‌های مختلف برداشت را نشان می‌دهد.

برداشت دستی زعفران همراه با آسیب‌های ارگونومی برای کشاورزان بخصوص در ناحیه کم و زانو است (Beheshti et al., 2025). برداشت مکانیکی علاوه بر کاهش این آسیب‌ها تمایل برای کشت در مساحت بالاتر را برای کشاورزان افزایش می‌دهد. نتایج میدان نشان داد که دستگاه برداشت زعفران از نظر شاخص‌های عملکردی، بهبود قابل توجهی نسبت به برداشت دستی ارائه می‌دهد. آرایش متوالی مجموعه تیغه‌های برداشت در امتداد محور کار، منجر به پوشش یکنواخت سطح در عرض ردیف گیاهان می‌شود که می‌تواند از باقی ماندن گل‌های زعفران در قسمت‌های میانی جلوگیری می‌کند. این سازمان‌دهی هندسی، نقش تعیین‌کننده‌ای در بهبود دقت برداشت و کاهش نیاز به عملیات تکمیلی دستی ایفا می‌نماید و بیانگر تأثیر مستقیم طراحی ساختاری و نحوه توزیع فضایی تیغه‌ها در ارتقای کارایی سامانه‌های مکانیزه برداشت گل زعفران است. (شکل ۱۲) نمایی از مکانیزم گیر افتادن گل زعفران در میان تیغه‌ها را نشان می‌دهد. تیغه‌ها با برقراری تماس در ناحیه‌ای پایین‌تر از کلاله‌های گل، توانسته‌اند گل را به‌صورت مؤثری گیر انداخته و آن را از پایه جدا نمایند. این عملکرد نشان‌دهنده توانایی سامانه در انجام برداشت هدفمند با حفظ سازوکار در محدوده مطلوب است.

جدول ۶- مقایسه شاخص‌های عملکردی و کیفیت برداشت گل زعفران در روش‌های مختلف

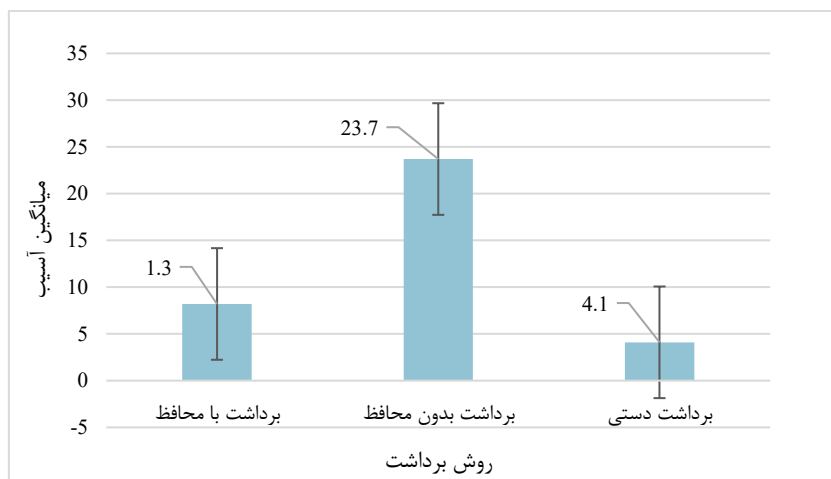
Table 6. Comparison of performance and quality indicators for saffron flower harvesting methods

نوع آسیب غالب	درصد گل‌های آسیب‌دیده (Percentage of Damaged Flowers)	انحراف معیار (Standard deviation)	بهره‌وری (Productivity)	روش برداشت (Harvesting Method)
جداشدگی جزئی گلبرگ‌ها (Partial Petal Detachment)	8.2%	1.3	0.42	برداشت با محافظ (Harvesting with Protector)
له‌شدگی کلاله و خمیدگی ساقه (Stigma Bruising and Style Bending)	23.7%	2.8	0.45	برداشت بدون محافظ (Harvesting without Protector)
پارگی گلبرگ ناشی از ناخن (Petal Tearing Caused by Nail)	4.1%	0.9	0.09	برداشت دستی (Manual Harvesting)

زعفران وارد می‌کند. در مقابل، استفاده از محافظ در سامانه برداشت مکانیزه، منجر به کاهش معنی‌داری در میزان آسیب‌دیدگی گل‌ها شد. این یافته بیانگر آن است که به‌کارگیری محافظ نه‌تنها کیفیت محصول برداشت‌شده را بهبود می‌بخشد، بلکه امکان اجرای پایدارتر و کارآمدتر عملیات برداشت مکانیکی را فراهم می‌سازد.

نتایج تأکید می‌کنند که طراحی هوشمند سطوح تماس عامل کلیدی در حفظ سلامت گل برداشت شده است. لایه محافظ به‌کار رفته، نیروی ضربه‌ای ناشی از تماس سریع تیغه با گل را دفع کرده و از انتقال ناگهانی بار به بافت‌های ظریف گل جلوگیری می‌کند. این امر به‌ویژه در شرایط تراکم بالای گیاه که فرکانس برخورد افزایش می‌یابد، نقش حیاتی ایفا می‌کند.

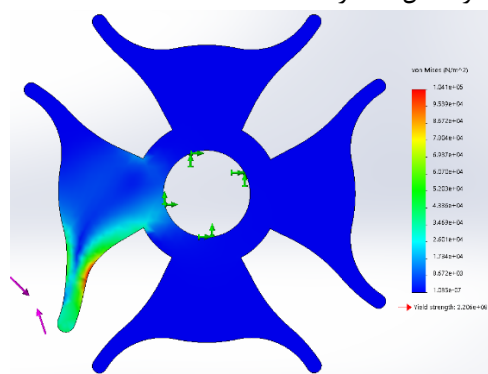
نتایج ارائه شده در (شکل ۱۳) به‌وضوح نشان می‌دهد که روش برداشت بدون محافظ بیشترین درصد آسیب‌های فیزیکی را به گل‌های



شکل ۱۳- مقایسه درصد آسیب‌دیدگی گل زعفران در روش‌های برداشت

Fig 13. Comparison of saffron flower damage percentage in harvesting methods

می‌تواند پاسخ گو باشد. نمای شماتیک تحلیل تنش انجام‌شده در نرم‌افزار در (شکل ۱۴) ارائه شده است.



شکل ۱۴- تحلیل تنش تیغه در نرم‌افزار SolidWorks2018

Fig 14. Blade Stress Analysis in SolidWorks 2018

علاوه بر این، با در نظر گرفتن مقدار مقاومت تسلیم ماده که برابر با ۲۲۰/۶ مگاپاسکال می‌باشد، مشخص شد که تنش‌های حاصل از تحلیل تئوری و شبیه‌سازی عددی در محدوده‌ای پایین‌تر از حد تسلیم قرار دارند. بنابراین، تنش‌های ایجادشده در ساختار پره از منظر مهندسی قابل قبول بوده و قطعه دارای ضریب اطمینان کافی و قابلیت اطمینان عملکردی مناسب می‌باشد (HassanBeigi et al., 2010). این نتایج مستقیماً در انتخاب توان موتور، طراحی سیستم انتقال نیرو

ظرفیت کاری مؤثر دستگاه نشان داد که برداشت مکانیزه قادر است سطح قابل توجهی از مزرعه را در زمان کوتاه‌تری نسبت به برداشت دستی پوشش دهد. هرچند راندمان میدانی تحت تأثیر عواملی نظیر توقف‌های کوتاه، تنظیمات اولیه و ناهمگنی مزرعه کاهش یافت، اما مقادیر به‌دست‌آمده همچنان بیانگر کارایی عملی مناسب دستگاه در شرایط واقعی بهره‌برداری است. همچنین، بررسی مصرف انرژی ویژه نشان داد که علی‌رغم نیاز دستگاه به توان مکانیکی، مصرف انرژی به ازای واحد سطح برداشت‌شده در مقایسه با انرژی انسانی صرف‌شده در برداشت دستی، قابل توجیه بوده و با افزایش سطح زیر کشت، مزیت نسبی سیستم مکانیزه افزایش می‌یابد (Nazarian et al., 2025).

در تکمیل تحلیل‌های عملکردی، نتایج تحلیل مکانیکی اجزای برداشت نیز مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به طراحی سه‌بعدی قطعه و تحلیل تنش انجام‌شده در نرم‌افزار SolidWorks 2018 و با در نظر گرفتن مش‌بندی دقیق و تحلیل کامل توزیع تنش در ناحیه نوک پره، مقدار تنش بیشینه در این ناحیه برابر با ۱۰۴/۵۸۶ مگاپاسکال به‌دست آمد. از سوی دیگر، محاسبات تنش مقدار ۱۸۸/۳۱۸ مگاپاسکال را نشان داد. مقایسه این دو مقدار، با وجود اختلاف نسبی، تطابق قابل قبولی را نشان می‌دهد که مؤید دقت مدل‌سازی عددی و صحت روش تحلیل می‌باشد. بر این اساس، می‌توان نتیجه گرفت که نوک پره تحت نیروی اعمال‌شده، که معادل نیروی لازم جهت برداشت گل زعفران است، از نظر مکانیکی عملکرد مناسبی داشته و شرایط بهره‌برداری را

منابع

- Avila-Sosa, R., Nevárez-Moorillón, G. V., Ochoa-Velasco, C. E., Navarro-Cruz, A. R., Hernández-Carranza, P., & Cid-Pérez, T. S. (2022). *Detection of saffron's main bioactive compounds and their relationship with commercial quality*. *Foods*, 11(20), 3245. <https://doi.org/10.3390/foods11203245>
- Beheshti, M., Borhani Jebeli, M., Ghasemian, M., Tabrizi, A. (2025). *Innovative Ergonomic Solutions for Saffron Flower Processing: Design of Ergonomic Table*. *Journal of Research & Health*. 2025; 15(5):483-492. <http://dx.doi.org/10.32598/>
- Benos, L., Tsaopoulos, D., & Bochtis, D. (2020). *A review on ergonomics in agriculture. Part I: Manual operations*. *Applied Sciences*, 10(6), 1905. <https://doi.org/10.3390/app10061905>
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2020). *Materials science and engineering*. An introduction (10th ed.). Wiley
- Cheghini, G. R., Hashemi-Fard, S. H., Kianmehr, M. H., & Khodabakhsh, H. (2008). *Study of Mechanical Properties of Chrysanthemum Flower Stem*. *Proceedings of the 5th National Congress on Agricultural Machinery Engineering and Mechanization, Mashhad, Iran*. (In Persian) <https://civilica.com/doc/52882>
- Denarda, A. R., Bertetto, A. M., & Carbone, G. (2021). *Designing a low-cost mechatronic device for semi-automatic saffron harvesting*. *Machines*, 9(5), 94. <https://doi.org/10.3390/machines9050094>
- Emadi, B., Aghkhani, M. H., & Aboonajmi, M. (2008). *Determination of detachment force and cutting point of saffron (Crocus sativus) flower under quasi-static uniaxial force*. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 58(4), 123–130. (in Persian)
- Emadi, B., Omid, M., Tabatabaefar, A., & Kalantari, D. (2010). *Separating saffron flower parts using vertical air column*. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 12, 217–229.
- Emkani M, Jafari M, Mafakheri Lale Z, Tabrizi A. (2022). *Evaluation of Muscle Fatigue and Determination of Risk Factors of Musculoskeletal Disorders Among Saffron Harvesters in Gonabad in 2017*. *Intern Med Today* 2022; 28 (2) :186-201. <https://doi.org/10.32598/hms.28.2.3581.1>
- Gomez, K. A., & Gomez, A. A. (1984). *Statistical procedures for agricultural research*. 2nd Ed. John Wiley & Sons.
- HassanBeigi, S. R., Ghozhdi, H. V., & Khazaei, J. (2010). *Picking force of saffron flower and shear strength of saffron stalk*. Retrieved from *strength of saffron stalk*. Retrieved from *Forestry*, 34(4), 265-274. <https://doi.org/10.3906/tar-0905-32>
- و تحلیل مقاومت مکانیکی تیغه‌ها و شفت مرکزی کاربرد داشته و در مرحله تحلیل اجزای سامانه از تب Simulation نرم‌افزار SolidWorks 2018 مورد استفاده قرار گرفته است.
- #### ۴- نتیجه‌گیری نهایی
- یافته‌های این پژوهش نشان داد که سامانه مکانیزه پیشنهادی برای برداشت گل زعفران، با بهره‌گیری از طراحی هوشمند سازه‌ای و به‌کارگیری اجزای بهینه‌شده، توانسته است تعادل مؤثری میان کارایی عملیاتی، حفظ کیفیت محصول و سلامت انسانی ایجاد کند. آرایش متوالی تیغه‌ها در امتداد محور کار، منجر به پوشش یکنواخت سطح عمل و کاهش باقی‌ماندن گل در نوارهای میانی شد، در حالی که مکانیزم گیر افتادن گل در ناحیه پایین‌تر از کلاله، امکان برداشت هدفمند و مؤثر را فراهم ساخت. نتایج آزمایش‌های میدانی بیانگر کاهش ۶۵/۴ درصدی در میزان آسیب‌دیدگی گل‌ها در سیستم مجهز به لایه محافظ (۸/۲ درصد) در مقایسه با بدون محافظ (۲۳/۷ درصد) بود؛ در حالی که این عملکرد کیفی، در کنار ظرفیت کاری مؤثر بالای ۴۲/، کارایی سامانه را به‌طور چشمگیری فراتر از روش دستی قرار داد. همچنین، بررسی ارگونومیک تأیید کرد که مکانیزاسیون نه تنها آسیب‌های اسکلتی-عضلانی کشاورزان (به‌ویژه در ناحیه کمر و زانو) را کاهش می‌دهد، بلکه انگیزه کشت در مقیاس‌های بالاتر را نیز تقویت می‌کند. از دیدگاه مهندسی مکانیک، تحلیل تنش عددی و تئوری تیغه‌ها در نرم‌افزار SolidWorks 2018 نشان داد که حداکثر تنش ایجادشده ۱۰۴/۵۸۶ مگا پاسگال در محدوده ایمن و پایین‌تر از مقاومت تسلیم ماده ۲۲۰/۶ مگا پاسگال قرار دارد، که این امر ضریب اطمینان کافی و قابلیت اطمینان ساختاری قطعه را تأیید می‌کند. همچنین، تحلیل انرژی ویژه بیانگر آن است که علی‌رغم مصرف توان مکانیکی، سیستم مکانیزه در مقایسه با انرژی انسانی مصرفی در روش دستی، از نظر مصرف انرژی به ازای واحد سطح، کارآمدتر عمل می‌کند؛ به‌طوری که این مزیت با افزایش سطح زیر کشت، به‌صورت تصاعدی افزایش می‌یابد.
- در مجموع، این پژوهش گواهی بر این است که ادغام اصول طراحی مکانیکی هوشمند، انتخاب مناسب مواد و بهینه‌سازی هندسی سازه‌ها می‌تواند پایه‌ای را برای توسعه سامانه‌های برداشت مکانیزه کارآمد، پایدار و کیفیت‌محور در محصولات حساس کشاورزی مانند زعفران فراهم آورد. این رویکرد نه تنها به‌عنوان یک راهکار فنی، بلکه به‌عنوان یک راهبرد اجتماعی-اقتصادی برای کاهش وابستگی به نیروی کار دستی و ارتقای رفاه کشاورزان قابل تلقی است.

- Rezaei, A., Loghavi, M., Kamgar S., & Mehdipour, Y. (2015). *Determination of the optimal frequency and duration of vibration for a pneumatic olive branch shaker*. *Agricultural Machinery*, 6(2), 417–428. (In Persian) <https://doi.org/10.22067/jam.v6i2.33205>
- Rouhi, R. (2001). *A study of existing designs and proposing a suitable design for saffron harvesting (Master's thesis)*. Faculty of Agriculture, Pardis Karaj University, Iran.
- Ruggieri, F., Maggi, MA., Rossi, M., Consonni, R. (2023). *Comprehensive Extraction and Chemical Characterization of Bioactive Compounds in Tepals of Crocus sativus L.* *Molecules*. 2023; 28(16):5976. <https://doi.org/10.3390/molecules28165976>
- Sanaei, A., & Safabahr, B. (2010). *Design, development and evaluation of a semi-automatic hauled wheeled saffron harvester*. [cabidigitalibrary.org].
- JRHButts, T. R., Butts, L. E., Luck, J. D., Fritz, B. K., Hoffmann, W. C., & Kruger, G. R. (2019). *Droplet size and nozzle tip pressure from a pulse-width modulation sprayer*. *Biosystems engineering*, 178, 52-69. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.11.004>
- Kiliçkan, A., & Güner, M. (2010). *The determination of pneumatic conveying characteristics of chickpea*. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 34(4), 265-274. <https://doi.org/10.3906/tar-0905-3>
- Kumar, R., Singh, V., Devi, K., Sharma, M., Singh, M. K., & Ahuja, P. S. (2008). *State of art of saffron (Crocus sativus L.) agronomy: A comprehensive review*. *Food Reviews International*, 25(1), 44-85. <https://doi.org/10.1080/87559120802458503>
- Manuello Bertetto, A., Ricciu, R., & Badas, M. G. (2014). *A mechanical saffron flower harvesting system*. *Meccanica*, 49(12), 2785-2796.
- Mehdinia, A. (1997). *Design and construction method of saffron harvesting machine*. [Unpublished master's thesis]. University of Tehran. (In Persian)
- Mirzaei, E., Abdolapour, S., Ramazani, A., & Sheibani, R. H. (2008). *Design and Development of Saffron Harvesting Machine*. Conference: 10th International Congress on Mechanization and Energy in Agriculture .
- Mollafilabi, A., Koocheki, A. , Rezvani Moghaddam, P. and Nassiri Mahallati2, M. (2014). *Effect of plant density and corm weight on yield and yield components of saffron (Crocus sativus L.) under soil, hydroponic and plastic tunnel cultivation*. *Saffron Agronomy and Technology*, 1(2), 14-28. (In Persian). <https://doi:10.22048/jsat.2014.4815>
- Mortazapour, H., Moshirirad, S., & Akhbari, M. (2015). *Investigating the potential for separating impurities from saffron stigmas using an electrostatic separator*. *Agricultural Machinery*, 5(1), 44–51. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/jam.v5i1.24900>
- Naderlou, L., Khodamoradi, F., & Javadi Kia, H. (2018). *Finite element analysis of the middle arm of MF-285 tractor during carrying a 4-bottom plow*. 9th National Conference on Sustainable Agriculture and Natural Resources, Tehran, Iran. Retrieved from. (In Persian). <https://civilica.com/doc/918739>
- Nazarian, R., Nassiri Mahallati, M., & Khorramdel, S. (2025). *Evaluation of production status, energy efficiency indicators and plant knowledge management for saffron systems in Herat Province, Afghanistan*. *Journal of Saffron Research*. <https://10.22077/JSR.2025.10018.1287>
- Paschino, F., & Gambella, F. (2008). *First contribute to the mechanization string of saffron flowers (Crocus sativus L.)*. *Innovation Technology to Empower Safety, Health and Welfare in Agriculture and Agro-food Systems*. September 15-17. Ital