

Design and Dynamic Analysis of a Bio-Inspired Three-Finger Gripper for Mechanized Saffron Flowers Harvesting

Shima Shademani¹, Shahriar Kouravand^{2*}, Payam Zarafshan³, Majid Ghorbani Javid⁴

1- Department of Agricultural Engineering, Faculty of New Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran. <https://orcid.org/0009-0004-6276-9293>

sh.shademani@ut.ac.ir

2- Department of Agricultural Engineering, Faculty of New Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran. <https://orcid.org/0000-0003-1685-0440>

skouravand@ut.ac.ir

3- Department of Mechatronics Engineering, School of Intelligent Systems Engineering, College of Interdisciplinary Science and Technology, University of Tehran, Tehran, Iran. <https://orcid.org/0000-0003-2462-8217>

p.zarafshan@ut.ac.ir

4- Department of Agronomy and Plant Breeding Sciences, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Tehran, Iran. <https://orcid.org/0000-0002-1273-2079>

mjavid@ut.ac.ir

Corresponding author: skouravand@ut.ac.ir*

Extended Abstract

Introduction: Saffron (*Crocus sativus* L.) is one of the most valuable agricultural products in Iran, contributing over 90% of the world's total production. Despite its economic importance, the harvesting process remains fully manual, labor-intensive, and time-consuming, leading to high labor costs and potential contamination. Mechanization of saffron harvesting has been hindered by the flower's fragility, irregular planting patterns, and short harvesting period. In recent years, robotic systems equipped with intelligent end-effectors have shown promise for delicate crop harvesting. However, no practical gripper specifically designed for saffron flowers has been successfully implemented. Therefore, this study aimed to design, model, and analyze the dynamic behavior of a three-finger robotic gripper inspired by the natural hand motion used in manual saffron picking, in order to provide a feasible solution for the mechanized harvesting of saffron flowers.

Materials and Methods: In this study, a three-finger mechanical gripper inspired by the manual harvesting of saffron flowers was designed and modeled. The design, developed in SolidWorks, replicated the natural motion of human fingers to enable accurate flower picking without damage. Since manual harvesting involves holding the flower with three fingers to separate it from its sheath, the gripper was equipped with three fingers arranged 120° apart to mimic this action. The system is driven by a single electric motor connected to a cam-follower mechanism that converts rotary motion into linear movement. This motion is transmitted through prismatic joints to the fingers, causing them to open and close simultaneously. Two parallel springs between the slider and finger links ensure continuous contact between the cam and follower, allowing smooth and synchronized finger motion. The mechanism's single degree of freedom enables all three fingers to move together, simplifying control while maintaining stability and precision. A complete 3D model of the gripper, including fingers, cam-follower, and springs, was created in SolidWorks and analyzed dynamically in MSC ADAMS. All parts were modeled as rigid bodies with appropriate joints and constraints, the cam motion was defined as a time-dependent displacement to simulate constant-speed rotation, instead of applying a real motor torque. The spring stiffness and contact parameters were defined based on saffron flower characteristics.

Results and Discussion: The simulation results demonstrated that the designed three-finger gripper performed efficiently and consistently. The maximum displacement of each finger was about 8 cm, providing a suitable workspace corresponding to the typical dimensions of saffron flowers. This confirms that the gripper can easily encompass the flower during the harvesting process. The velocity analysis indicated that the finger speed upon contact with the flower stem was less than 10 mm/s, a level low enough that the resulting force is minimal and prevents mechanical impact or damage to the delicate flower structure. Furthermore, the contact forces generated by the fingers were very close to the target value (0.9 N to 1.2 N), remaining within the safe range for handling the flower without deformation or detachment. Minor variations between the forces applied by individual fingers (less than 5%) were attributed to small geometric asymmetries in the model or numerical effects from the dynamic simulation, both negligible in practice. Overall, the obtained results confirm that the designed gripper provides smooth and synchronized motion, appropriate workspace, and safe interaction forces. These findings validate the effectiveness of the proposed design for mechanical harvesting of saffron flowers, ensuring stable and gentle operation consistent with the natural hand motion observed in manual picking.

Conclusion: The results confirm that the bio-inspired three-finger gripper developed in this study can effectively replicate manual saffron harvesting, maintaining both structural stability and gentle contact with the flower. Dynamic analysis results demonstrate its potential for use in mechanized saffron harvesting systems, reducing labor requirements and improving operational efficiency. Future research will focus on prototyping and field testing to evaluate real-world performance and further optimize the actuation mechanism for integration with autonomous or semi-automatic harvesting systems.

Conflict of Interest: The authors declare no potential conflict of interest related to the work.

Keywords: Cam-follower, Force, Mechanism, Prismatic joints, Robotics, Software.

طراحی و تحلیل دینامیکی گریپر سه‌انگشتی الهام گرفته از برداشت دستی برای برداشت

مکانیزه‌ی گل زعفران

شیما شادمانی^۱، شهریار کوراوند^{۲*}، پیام زرافشان^۳، مجید قربانی جاوید^۴

۱- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده فناوری ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران،

<https://orcid.org/0009-0004-6276-9293>

sh.shademani@ut.ac.ir

۲- دانشیار، مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده فناوری ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران،

<https://orcid.org/0000-0003-1685-0440>

skouravand@ut.ac.ir

۳- دانشیار، مکانیک سامانه‌های هوشمند، دانشکده علوم و فناوری‌های میان رشته‌ای، دانشگاه تهران، تهران، ایران،

<https://orcid.org/0000-0003-2462-8217>

p.zarafshan@ut.ac.ir

۴- دانشیار، گروه علوم زراعی و اصلاح نباتات، دانشکده فناوری ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران،

<https://orcid.org/0000-0002-1273-2079>

mjavid@ut.ac.ir

* نویسنده مسئول: skouravand@ut.ac.ir

چکیده

زعفران یکی از ارزشمندترین محصولات کشاورزی ایران است و برداشت آن همچنان به صورت سنتی و دستی انجام می‌شود. این روش، علاوه بر نیاز به نیروی انسانی زیاد و زمان‌بر بودن، خطر انتقال آلودگی و کاهش کیفیت محصول را نیز به همراه دارد. در این پژوهش، یک گریپر سه‌انگشتی با الهام از برداشت دستی زعفران طراحی و مدل‌سازی شده است. طراحی اولیه در محیط نرم‌افزار SolidWorks انجام گرفت و پارامترهای حرکتی و هندسه‌ی انگشت‌ها متناسب با ساختار ظریف و حساس گل زعفران بهینه‌سازی شد. همچنین، عملکرد گریپر در محیط نرم‌افزار MSC ADAMS با هدف تحلیل دینامیکی نیروهای وارد بر گل و ارزیابی حرکت انگشت‌ها شبیه‌سازی شد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که گریپر با اعمال نیرویی بین ۰/۹ تا ۱/۲ نیوتون به ساقه، که با محاسبات تئوریک نیز همخوانی دارد، قادر است گل زعفران را با حداقل فشار و بدون ایجاد آسیب برداشت کند. این طراحی می‌تواند گامی مؤثر در جهت مکانیزه‌سازی فرآیند برداشت زعفران و افزایش چشمگیر بهره‌وری تولید باشد.

واژه‌های کلیدی: اتصالات کشویی، بادامک-پیرو، رباتیک، مکانیزم، نیرو، نرم‌افزار.

زعفران (*Crocus sativus L.*) یکی از گران‌ترین و ارزشمندترین محصولات کشاورزی جهان است و به دلیل خواص دارویی، غذایی، رنگ‌زایی و آرایشی، جایگاه ویژه‌ای در بازار جهانی دارد (Lachguer et al., 2025). ایران با تولید بیش از ۹۰ درصد از زعفران دنیا، بزرگ‌ترین تولیدکننده و صادرکننده‌ی این محصول در سطح جهان به شمار می‌رود (Koocheki et al., 2006; Modarres & Karimzadeh, 2020). اهمیت اقتصادی این محصول سبب شده است هرگونه بهبود در فرآیند تولید و برداشت آن تأثیر مستقیمی بر درآمد کشاورزان و توسعه‌ی پایدار مناطق زعفران‌خیز داشته باشد (Behdani & Maleki, 2022).

فرآیند برداشت زعفران هنوز عمدتاً به‌صورت دستی انجام می‌شود. این روش اگرچه از دقت بالایی برخوردار است، اما زمان‌بر، پرهزینه و به‌شدت وابسته به نیروی انسانی است. افزون بر خستگی و بروز آسیب‌های اسکلتی-عضلانی برای کارگران، برداشت دستی می‌تواند موجب انتقال آلودگی و کاهش کیفیت گل شود (Ghasemi & Rezaei-Moghaddam, 2023; Kumar et al., 2019). با توجه به محدودیت نیروی کار و افزایش هزینه‌های مزدی، مکانیزه‌سازی فرآیند برداشت زعفران از ضرورت‌های تولید مدرن محسوب می‌شود (Ghasemi & Armin, 2021; Denarda et al., 2021). بر همین اساس، تحلیل جهت‌گیری‌های علمی، مکانیزاسیون برداشت زعفران را به عنوان یک شکاف تحقیقاتی کلیدی در نظر گرفته است (Fallahi et al., 2025). توسعه یک سیستم رباتیک موفق، ابتدا مستلزم درک دقیق از هدف برداشت است. در این راستا، تحقیقاتی برای دستیابی به پارامترهای هندسی و مدل سه‌بعدی اجزای گل زعفران صورت پذیرفته است (Zeraatkar et al., 2016) که مبنای طراحی عملگرهای نهایی را فراهم می‌کند. هدف از این نوع مطالعه‌ها، حرکت به سوی سیستم‌های برداشت هوشمند است که نیازمند ادغام فناوری‌های نوینی چون ماشین بینایی و رباتیک هستند (Movahed Ghodsianya, 2023).

در سال‌های اخیر، پژوهش‌ها و نمونه‌های متعددی از دستگاه‌ها و سامانه‌های مکانیزه‌ی برداشت گل زعفران توسعه یافته‌اند. نمونه‌هایی از این دستگاه‌ها شامل مدل خودران برداشت زعفران، نمونه قابل حمل با مکش و طرح نیمه‌خودکار با مکانیزم لرزشی هستند که در مطالعات مختلف معرفی شده‌اند (Asimopoulos et al., 2013; Bertetto et al., 2014; Denarda et al., 2021). در ایران نیز چند طرح، از جمله دستگاه برداشت گل زعفران و برخی نمونه‌های تحقیقاتی گزارش شده در سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ارائه شده است (Asadian, 2018; AREEO, 2022).

در سال‌های اخیر پژوهش‌های متعددی برای توسعه ماشین‌ها و سامانه‌های نیمه‌مکانیزه و هوشمند برداشت زعفران انجام شده است. استفاده از فناوری‌های نوین مانند سامانه‌های رباتیکی، بینایی ماشین و گریپرهای تطبیق‌پذیر، کاهش آسیب به گل و افزایش راندمان برداشت را ممکن ساخته است (Rajendran et al., 2023; Gursoy et al., 2023; Shoushtari, 2023).

با این حال، ویژگی‌های خاص گل زعفران، از جمله شکنندگی ساقه، لغزندگی سطح و حساسیت بالای کلاله‌ها، طراحی دستگاه‌های برداشت را با چالش‌های جدی روبه‌رو می‌سازد (Kumar et al., 2019; Ghasemi & Rezaei-Moghaddam, 2023).

یکی از نویدبخش‌ترین رویکردها در این زمینه، استفاده از گریپرها نرم و چندانگشتی است. این گریپرها عملکردی مشابه دست انسان دارند و امکان اعمال نیروی کنترل‌شده را فراهم می‌کنند (Hughes et al., 2016; Dollar & Howe, 2010; Siciliano & Khatib, 2016). این گریپرها با الهام از بیومکانیک حرکت انگشتان انسان طراحی می‌شوند تا بتوانند اشیای ظریف را بدون آسیب فشاری گرفته و جابه‌جا کنند (Cutkosky, 1989). مطالعات اخیر در رباتیک کشاورزی نیز بر توسعه گریپرهای انعطاف‌پذیر با حسگر نیرو و کنترل فشار متمرکز است تا عملکردی ایمن و قابل اعتماد در برداشت میوه‌های کوچک تضمین شود (Visentin et al., 2023).

افزون بر توسعه سخت‌افزار، تحلیل نیروهای تماس و رفتار دینامیکی گریپرها نیز برای طراحی بهینه در محصولات حساس اهمیت دارد. در محصولاتی مانند توت‌فرنگی و تمشک، استفاده از گریپرهای نرم منجر به کاهش آسیب مکانیکی و افزایش سرعت برداشت شده است (Gunderman et al., 2021; Qiu et al., 2023). همچنین مطالعات فیزیکی بر ویژگی‌های مکانیکی گل زعفران، از جمله استحکام کششی ساقه و ضخامت بافت در زمان برداشت، معیارهای علمی لازم برای طراحی مکانیزم‌های برداشت بدون آسیب را فراهم کرده‌اند (Hante et al., 2018). پژوهش‌های پایه‌ای در طراحی دست‌های رباتیکی نشان می‌دهد که افزایش تعداد انگشت‌ها و بهره‌گیری از سازوکارهای هماهنگ‌کننده حرکت موجب پایداری و انطباق‌پذیری بیشتر در گرفتن اجسام ظریف می‌شود (Cutkosky, 1989; Dollar & Howe, 2010). در یکی از مطالعات پیشین، گریپر دوانگشتی با ساختار شانه‌ای برای برداشت گل زعفران طراحی شد (Shademani et al., 2023). اگرچه آن طرح سرعت برداشت را افزایش داد، اما در دقت گرفتن گل‌های منفرد محدودیت‌هایی نشان داد.

به‌منظور درک بهتر تنوع سازوکارهای به‌کاررفته در پژوهش‌های پیشین مربوط به دستگاه‌های برداشت گل زعفران، نمونه‌هایی از این مکانیزم‌ها در شکل ۱ نشان داده شده‌اند.



(Shademani et al., 2023)



(Denarda et al., 2021)



(Bertetto et al., 2014)

شکل ۱- نمونه‌ای از مکانیزم‌های به کار رفته در مطالعات پیشین برداشت گل زعفران
Fig 1. Representative mechanisms utilized in prior research on saffron flower harvesting

مکانیزم‌های بادامک-پیرو (Cam-follower) در برخی کاربردهای صنعتی و رباتیک برای ایجاد حرکتهای تکرارشونده مورد استفاده قرار گرفته‌اند، اما در حوزه‌ی برداشت محصولات کشاورزی ظریف، به‌ویژه برای طراحی یک گریپر سه‌انگشتی، سابقه‌ی قابل‌توجهی گزارش نشده است. در مطالعات پیشین مربوط به برداشت گل زعفران، مکانیزم‌های دوانگشتی یا سامانه‌های چندمحركه الکترومکانیکی معرفی شده‌اند، اما هیچ‌یک از آنها از مکانیزم کاملاً مکانیکی بادامک-پیرو برای کنترل هم‌زمان سه انگشت استفاده نکرده‌اند. بر این اساس، پژوهش حاضر به طراحی و تحلیل دینامیکی گریپر سه‌انگشتی الهام‌گرفته از دست انسان می‌پردازد. نوآوری کلیدی این طرح، سنتز مکانیزمی است که برای نخستین بار در این حوزه از ترکیب بادامک-پیرو و اتصالات کشویی (Prismatic joints) بهره می‌گیرد. این ترکیب امکان کنترل هم‌زمان و دقیق سه انگشت را تنها با استفاده از یک محرك واحد فراهم می‌کند. این رویکرد، در مقایسه با سیستم‌های چندمحركه (همان‌طور که در جدول ۱ مقایسه شده است)، پیچیدگی کنترل نرم‌افزاری و هزینه ساخت را به شکل چشمگیری کاهش می‌دهد. در این مکانیزم، سه انگشت با یک محرك واحد به‌صورت هماهنگ حرکت می‌کنند و نیروی تماس یکنواختی به ساقه‌ی گل وارد می‌نمایند تا فرایند برداشت با حداقل آسیب مکانیکی انجام شود. ساختار کاملاً مکانیکی گریپر سبب کاهش هزینه‌ی تولید و نگهداری نسبت به انواع چندمحركه‌ی پنوماتیکی یا الکتریکی می‌شود. طرح حاضر در راستای تکمیل طرح پیشین، با هدف افزایش دقت در گرفتن گل‌های منفرد پیشنهاد شده است (Shademani et al., 2023). این تحقیق بر طراحی مفهومی و تحلیل نرم‌افزاری رفتار دینامیکی گریپر متمرکز است. در مراحل آتی، نمونه‌ی فیزیکی آن ساخته و ارزیابی تجربی خواهد شد تا به‌عنوان بخش اصلی یک سامانه‌ی رباتیکی کامل برای برداشت گل زعفران به کار رود. همچنین، با افزودن کنترلر هوشمند و استفاده از پردازش تصویر و بینایی ماشین، امکان توسعه‌ی عملکرد خودکار و خودمختار گریپر در شرایط واقعی مزرعه فراهم می‌شود. همانطور که ذکر شد، یکی از مزایای کلیدی طرح پیشنهادی، کاهش چشمگیر پیچیدگی کنترلی و هزینه ساخت در مقایسه با سیستم‌های

چندمحركه است. برای ارزیابی کمی و کیفی این مزیت، جدول ۱ طرح پیشنهادی تک‌محركه را با یک طرح جایگزین سه‌انگشتی مبتنی بر سه محرك مجزا مقایسه می‌کند. نتایج این مقایسه نشان می‌دهد که طرح حاضر از نظر تعداد محرك، پیچیدگی کنترل نرم‌افزاری و هزینه تخمینی ساخت برتری دارد.

جدول ۱ - مقایسه‌ی طرح پیشنهادی با یک طراحی چند محركه

Table 1. Comparison of the Proposed Design with a Multi-Actuator Design

ویژگی مقایسه Comparison Feature	طرح پیشنهادی (سه‌انگشتی تک‌محركه بادامکی) Proposed Design (Single-Actuator Cam-Driven Three-Finger Gripper)	طرح جایگزین (سه‌انگشتی سه‌محركه مستقل) Alternative Design (Three-Actuator Independent Three-Finger Gripper)
تعداد محرك فعال Number of Active Actuators	۱ (۱ موتور الکتریکی) 1 (one electric motor)	۳ (۳ موتور الکتریکی مجزا) 3 (three independent electric motors)
نحوه هماهنگی انگشتان Finger Synchronization Method	مکانیکی، ذاتی در مکانیزم (سنتز بادامک) Mechanical, inherent in mechanism (cam synthesis)	الکترونیکی، فعال (نیاز به الگوریتم کنترلی) Electronic, active (requires control algorithm)
تعداد قطعات کنترلی (درایور/سنسور) Number of Control Components (Drivers/Sensors)	۱ (۱ درایور و انکودر موتور اصلی) 1 (one driver and encoder of main motor)	۳ یا بیشتر (درایور، سنسور نیرو/موقعیت برای هر انگشت) 3 or more (driver + force/position sensor for each finger)
پیچیدگی کنترل نرم‌افزاری Software Control Complexity	پایین (فقط کنترل موقعیت/سرعت یک محور) Low (only position/speed control of one axis)	بالا (نیاز به هماهنگی سینماتیکی همزمان ۳ محور) High (requires simultaneous kinematic coordination of 3 axes)
وزن و حجم سیستم System Weight and Volume	پایین‌تر Lower	بالا‌تر Higher
هزینه تقریبی ساخت Approximate Manufacturing Cost	متوسط (هزینه طراحی مکانیکی بالا) Medium (high mechanical design cost)	بالا (هزینه قطعات الکترونیکی گران) High (expensive electronic components)

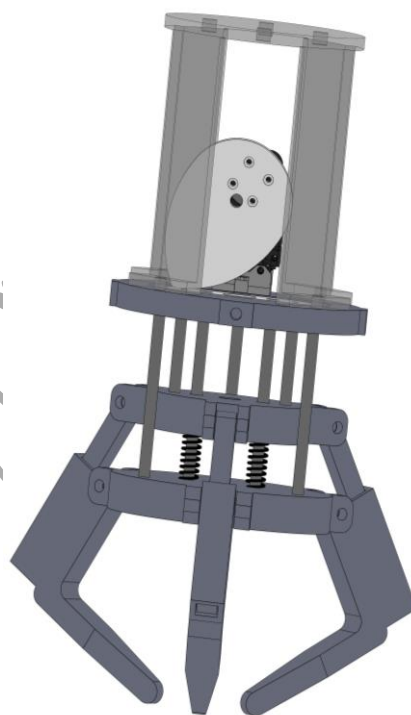
مواد و روش‌ها

در این پژوهش، یک گریپر مکانیکی سه‌انگشتی با الهام از فرآیند برداشت دستی گل زعفران طراحی و مدل‌سازی شده است. در فرآیند برداشت دستی، کارگر با سه انگشت گل زعفران را می‌گیرد و آن را از غلافش بیرون می‌آورد (شکل ۲)، به همین دلیل، در طراحی گریپر، سه انگشت در نظر گرفته شده است. طراحی در محیط نرم‌افزار SolidWorks انجام شده (شکل ۳) و

در آن از اصول بیومکانیکی حرکت انگشت‌های دست انسان استفاده شده است تا گریپر قادر باشد گل زعفران را با دقت بالا و بدون آسیب به آن برداشت کند.



شکل ۲- برداشت دستی گل زعفران
Fig 2. Manual Harvesting of Saffron Flower



شکل ۳- گریپر طراحی شده در نرم‌افزار SolidWorks
Fig 3. Gripper designed in SolidWorks software

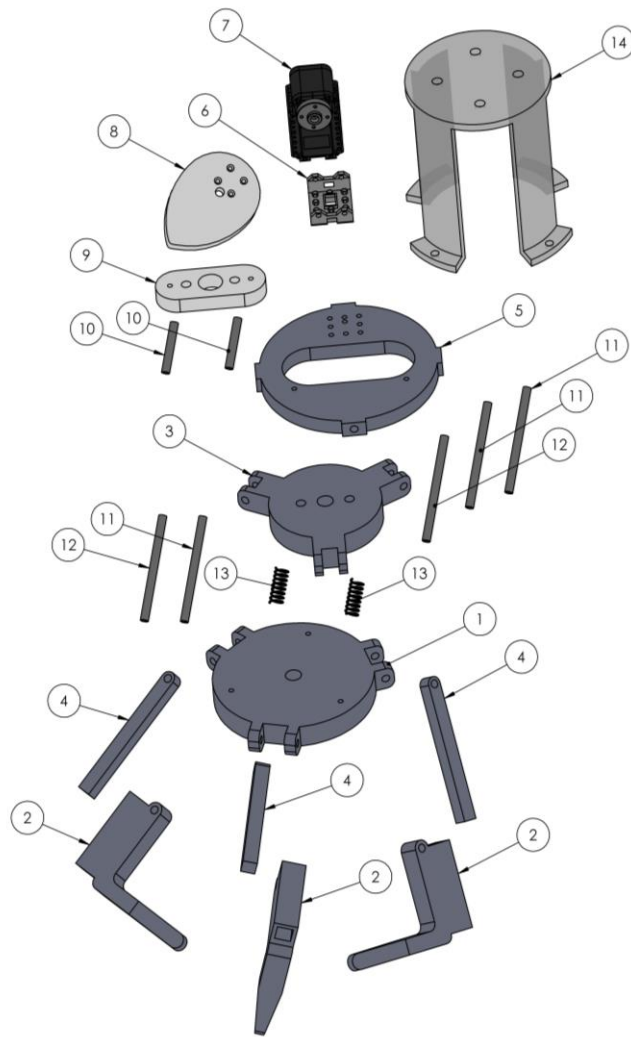
مکانیزم حرکتی گریپر سه‌انگشتی

شکل ۴ نمای انفجاری گریپر سه‌انگشتی طراحی شده در نرم‌افزار SolidWorks و شماره‌گذاری کامل اجزای آن را نشان می‌دهد. در جدول ۲، نام‌گذاری کامل اجزای آن متناسب با شماره‌گذاری‌های انجام شده در شکل ۴ آمده است. همچنین،

شکل ۵ اتصال گریپر به بازوی رباتیکی برای انجام عملیات برداشت گل را نمایش می‌دهد. در ادامه، نحوه مونتاژ و عملکرد مکانیزم با ارجاع به شماره قطعات توضیح داده می‌شود.

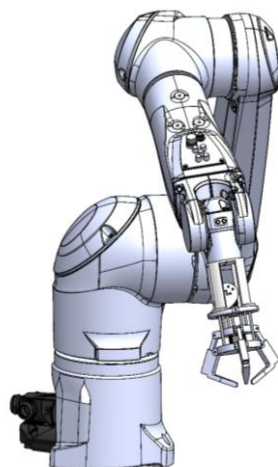
گریپر شامل سه انگشت مکانیکی (شماره ۲) است که بر روی قطعه رابط انگشت‌ها (شماره ۱) به صورت لولایی نصب شده‌اند. این سه انگشت با آرایش ۱۲۰ درجه نسبت به یکدیگر قرار دارند. رابط انگشت‌ها نیز از طریق رابط پایه-انگشت (شماره ۱۱) به بدنه اصلی گریپر (شماره ۵) متصل شده است و وظیفه انتقال بار و پایداری ساختار را بر عهده دارد. نیروی محرک توسط یک موتور الکتریکی (شماره ۷) تأمین می‌شود که به کمک پایه موتور (شماره ۶) روی بدنه گریپر نصب شده است. شفت موتور مستقیماً به بادامک (شماره ۸) متصل است. دوران بادامک باعث اعمال حرکت به قطعه پیرو (شماره ۹) می‌شود و حرکت دورانی بادامک را به حرکت خطی پیرو تبدیل می‌کند. پیرو از طریق رابط پیرو-لغزنده (شماره ۱۰) به قطعه رابط لغزنده‌ها (شماره ۳) متصل است. این رابط سه پره دارد که با زاویه ۱۲۰ درجه نسبت به هم قرار گرفته‌اند. در انتهای هر پره، یک لغزنده (شماره ۴) به صورت لولایی وصل شده است. لغزنده‌ها از طریق اتصال کشویی با انگشت‌ها در ارتباط هستند؛ به این معنی که جابه‌جایی رابط لغزنده‌ها باعث دوران لغزنده‌ها می‌شود و این دوران از طریق اتصال کشویی-لولایی به انگشت‌ها منتقل و موجب باز و بسته شدن آنها می‌شود. برای حفظ تماس دائمی بین بادامک و پیرو و جلوگیری از جدا شدن پیرو در هنگام چرخش بادامک، دو فنر فشاری (شماره ۱۳) بین رابط انگشت‌ها (شماره ۱) و رابط لغزنده‌ها (شماره ۳) نصب شده‌اند. این فنرها به کمک راهنمای فنر (شماره ۱۲) در مسیر صحیح قرار گرفته و از خم‌شدگی یا انحراف آنها جلوگیری می‌شود. در نهایت، با استفاده از رابط اتصال بازوی رباتیکی (شماره ۱۴) کل مجموعه گریپر به بازوی ربات ردیاب گل متصل می‌شود.

در این مکانیزم، تنها ورودی سیستم، زاویه دوران بادامک است و در نتیجه سیستم دارای یک درجه آزادی است. حرکت دورانی بادامک ابتدا موجب پایین آمدن پیرو و سپس جابه‌جایی عمودی و پایین آمدن رابط لغزنده‌ها می‌شود. از آنجایی که رابط انگشت‌ها توسط رابط پایه-انگشت به پایه‌ی اصلی گریپر متصل شده و موقعیت و فاصله‌ی آن ثابت باقی می‌ماند، پایین آمدن رابط لغزنده‌ها سبب می‌شود فاصله‌ی بین رابط لغزنده‌ها و رابط انگشت‌ها کم شود و فنرها فشرده شوند. این جابه‌جایی موجب دوران و حرکت کشویی لغزنده‌ها در شیار انگشت‌ها و در نهایت باز شدن تدریجی انگشت‌ها می‌شود. با ادامه دوران بادامک و برگشت آن به وضعیت اولیه، فاصله‌ی رابط لغزنده‌ها و رابط انگشت‌ها افزایش یافته، فنرها آزاد شده و انگشت‌ها دوران کرده و بسته می‌شوند. به این ترتیب، یک موتور واحد، حرکت هماهنگ هر سه انگشت را بدون نیاز به کنترل مستقل برای هر انگشت ایجاد می‌کند. این روش باعث ساده‌سازی مکانیزم کنترل و افزایش دقت در برداشت گل زعفران می‌شود.



شکل ۴- نمای انفجاری و نام گذاری کامل اجزای گریپر سه انگشتی

Fig 4. Exploded view with complete labeling of the components of the three-finger gripper



شکل ۵- اتصال گریپر سه انگشتی طراحی شده به یک بازوی رباتیکی

Fig 5. Three-finger gripper connected to a robotic arm

جدول ۲- نام و عملکرد اجزای گریپر سه انگشتی

Table 2. Names and functions of the components of the three-finger gripper

شماره Number	نام Name	عملکرد Function
۱	رابط انگشتها Fingers Connector	ایجاد ارتباط بین انگشتها برای حرکت یکنواخت Establishing connection between the fingers for uniform movement
۲	انگشت Finger	گرفتن گل gripping the flower
۳	رابط لغزندهها Slider Connector	ایجاد ارتباط بین لغزندهها برای حرکت یکنواخت Establishing connection between the sliders for uniform motion
۴	لغزنده Slider	باز و بسته کردن انگشتها Opening and closing the fingers
۵	پایه Base	پایه نگهدارنده اصلی اجزای گریپر Main support base of the gripper components
۶	پایه موتور Motor Base	اتصال موتور به پایه نگهدارنده اصلی گریپر Motor connection to the main support base of the gripper
۷	موتور Motor	محرك اصلی گریپر Main actuator of the gripper
۸	بادامک Cam	باز و بسته شدن انگشتها در زمان خاص Opening and closing of the fingers at a specific time
۹	پیروی بادامک Cam Follower	تبدیل حرکت دورانی بادامک به حرکت خطی در مکانیزم گریپر برای باز و بسته شدن انگشتها Conversion of the cam's rotary motion into linear motion in the gripper mechanism for opening and closing
۱۰	رابط پیرو-لغزنده Follower-Slider Connector	اتصال دهنده پیروی بادامک به رابط لغزندهها Connects the cam follower to the slider connector
۱۱	رابط پایه-انگشت Base-Finger Connector	اتصال دهنده پایه نگهدارنده اصلی به رابط انگشتها Connects the main support base to the finger connector
۱۲	راهنمای فنر Spring Guide	جلوگیری از انحراف فنر Prevents spring deflection
۱۳	فنر Spring	ایجاد تماس دائمی بین بادامک و پیرو Maintains continuous contact between the cam and the follower
۱۴	رابط بازوی رباتیکی Robotic Arm Connector	کمک به اتصال گریپر به بازوی رباتیکی Assists in connecting the gripper to the robotic arm

در این طرح، پروفایل بادامک با استفاده از نرم افزار CamTrax طراحی شد. در ابتدا نقاط کلیدی حرکت انگشتها شامل فازهای باز شدن، تماس و بسته شدن تعیین شد و نرم افزار بر اساس این نقاط، منحنی حرکت پیرو را به صورت یک تابع Spline

با پیوستگی مشتقات مرتبه دوم تولید کرد. استفاده از توابع Spline موجب حذف ناپیوستگی در سرعت و شتاب و در نتیجه ایجاد حرکت نرم و بدون گیرکردن در پیرو می‌شود. پس از تولید پروفایل اولیه، پارامترهای هندسی بادامک شامل شعاع انحنا و زاویه فشار بررسی شدند تا از وقوع حالت تحت‌برش جلوگیری و حرکت پیوسته حفظ شود. پروفایل خروجی CamTrax به محیط SolidWorks منتقل و قطعه‌ی بادامک بر اساس آن مدل‌سازی شد. سپس همین پروفایل حرکتی به‌عنوان ورودی محرک در مدل دینامیکی مکانیزم در نرم‌افزار ADAMS اعمال شد. نتایج تحلیل دینامیکی نشان دادند که حرکت پیرو بدون ضربه و با نیروی تماس کنترل‌شده در محدوده‌ی موردنیاز برای برداشت گل زعفران انجام می‌شود.

طراحی نرم‌افزاری و تحلیل عملکرد گریپر سه‌انگشتی

مدل‌سازی کامل مکانیزم در نرم‌افزار SolidWorks انجام شد (شکل ۳). در این محیط، کلیه اجزای مکانیکی از جمله انگشت‌ها، بادامک-پیرو و اتصالات کشویی طراحی و مونتاژ شد. مدل سه‌بعدی به محیط نرم‌افزار MSC ADAMS منتقل شد و در محیط این نرم‌افزار مورد تحلیل دینامیکی قرار گرفت (شکل ۴). در این محیط، کلیه اجزای مکانیکی از جمله انگشت‌ها، بادامک، پیرو، رابط‌های لغزنده، فنرها و اتصالات به‌صورت اجسام صلب و مفصل‌های مناسب مدل‌سازی شدند. در شبیه‌سازی، حرکت بادامک به‌صورت تابعی از زمان تعیین شد؛ به این معنا که بادامک با سرعتی ثابت حرکت می‌کرد و نرم‌افزار بر اساس این حرکت، واکنش انگشت‌ها و نیروهای تماس آنها با ساقه را محاسبه می‌کرد. به عبارت دیگر، حرکت بادامک به جای اعمال گشتاور واقعی موتور، به عنوان ورودی ساده‌سازی شده در نظر گرفته شد. این روش اجازه می‌دهد تا رفتار دینامیکی انگشت‌ها و نیروهای وارد شده به گل، بدون نیاز به در نظر گرفتن پیچیدگی‌های موتور و کنترل واقعی بررسی شود. پارامترهای ورودی مدل‌سازی مکانیزم (جدول ۳)، شامل جرم انگشت، سختی فنرها و سرعت دورانی موتور، بر اساس داده‌های طراحی به کمک رایانه و همچنین بر اساس مشخصات فیزیکی و مکانیکی گیاه زعفران (جدول ۴) تعریف شدند. در شبیه‌سازی‌ها، برای سادگی و تمرکز بر نیروی گرفتن، از مدل مفاصل ایده‌آل استفاده شد و پارامترهایی مانند اصطکاک و میرایی داخلی مکانیزم در نظر گرفته نشد. تنها عضوی از گریپر که با ساقه‌ی زعفران برخورد می‌کند، انگشت‌های گریپر هستند؛ به همین علت، در شبیه‌سازی‌ها تنها جرم انگشت در نظر گرفته شد. پس از شبیه‌سازی، نمودارهای جابجایی، سرعت و شتاب انگشت‌ها و نیروی وارد شده به گل توسط هر انگشت استخراج و عملکرد گریپر از نظر کنترل نیرو و ایمنی گل بررسی شد. نتایج نشان داد که مکانیزم طراحی‌شده قادر است حرکتی هم‌زمان، پیوسته و بدون برخورد ایجاد کند و نیروی وارد بر گل زعفران در محدوده‌ی قابل‌قبولی قرار دارد.

جدول ۳- پارامترهای ورودی مدل سازی مکانیزم گریپر

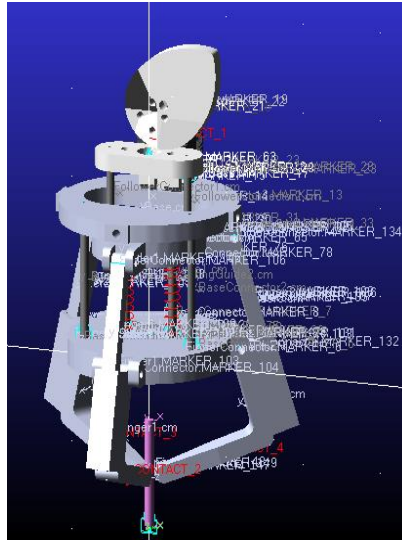
Table 3. Input Parameters for Gripper Mechanism Modeling

ویژگی Property	نماد Symbol	مقدار Value	واحد Unit	منبع Reference
جرم انگشتها Finger Mass	m_{finger}	0.02	کیلوگرم kg	ورودی طراحی CAD / Design Input
سختی فنر Spring Stiffness	k	245	نیوتن بر متر N/m	ورودی طراحی Design Input
سرعت دورانی موتور Motor Rotational Velocity	ω	1	رادیان بر ثانیه Rad/s	ورودی طراحی Design Input

جدول ۴- خواص فیزیکی و مکانیکی گل زعفران

Table 4. The physical and mechanical properties of the saffron flower

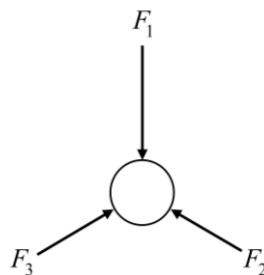
ویژگی Property	نماد Symbol	مقدار Value	واحد Unit	منبع Reference
جرم متوسط گل Average Flower Mass	m_{flower}	4.69×10^{-4}	کیلوگرم kg	میانگین از مراجع Average from literature
قطر بحرانی ساقه Critical Stem Diameter	d_{stem}	2	میلی متر mm	Hante et al. (2018)
نیروی لازم برای کندن گل Flower Detachment Force	$F_{detachment}$	2.3	نیوتن N	Hante et al. (2018)
چگالی ساقه Stem Density	ρ_{stem}	154	کیلوگرم بر متر مکعب kg/m ³	Emadi & Saiedirad (2011)
مدول الاستیسیته ساقه Stem Young's Modulus	E_{stem}	12	مگاپاسکال MPa	Calibrated (based on Hante et al. (2018)
ضریب پواسون ساقه Stem Poisson's Ratio	ν_{stem}	0.49	-	فرض Assumption
ضریب اصطکاک دینامیکی (گریپر-گل) Dynamic Friction Coefficient	μ	0.65	-	Emadi & Saiedirad (2011)



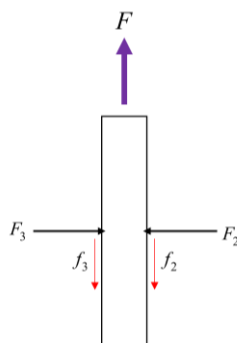
شکل ۶- گریپر طراحی شده در محیط نرم افزار ADAMS برای تحلیل دینامیکی

پارامترهای مهم طراحی

گریپر طراحی شده در آینده می‌تواند بخشی از سیستم برداشت رباتیکی گل زعفران باشد. یکی از پارامترهای مهم در طراحی، مقدار نیروی عمودی وارد شده توسط انگشت‌ها به ساقه‌ی گل است، به‌گونه‌ای که ساقه آسیب نبیند یا له نشود. همچنین، هنگام کشیدن گل توسط بازوی رباتیکی، گل نباید بین انگشت‌ها لغزش کند تا بازو بتواند آن را به راحتی از غلاف جدا کند. اگرچه نیروی فشاری قابل تحمل برای ساقه‌ی گل زعفران تاکنون بررسی نشده است، در مطالعه‌های مربوط به گریپرهای برداشت میوه‌ها، محدوده‌هایی از نیروی تماس یا نیروی نگهداری گزارش شده است. این نیروها بسته به نوع میوه بین حدود ۰/۵ تا ۶ نیوتون بوده‌اند (Gunderman et al., 2021; Qiu et al., 2023). شکل‌های ۷ و ۸ نیروهای وارد به ساقه را نشان می‌دهند. F_1 ، F_2 و F_3 نیروهای وارد شده به ساقه توسط انگشت‌ها و F نیرویی است که توسط بازوی رباتیکی به ساقه وارد می‌شود. f_1 ، f_2 و f_3 نیروی اصطکاک بین انگشت‌ها و ساقه را نشان می‌دهند. در صورتی که نیروی وارد شده به ساقه از طرف دستگاه برای کندن گل حدود ۲/۳ نیوتون باشد، عملکرد بهینه حاصل می‌شود (Hante et al., 2018).



شکل ۷- نیروی وارد شده به ساقه‌ی گل توسط هر انگشت



شکل ۸- کل نیروهای وارد شده به ساقه گل
Fig 8. Total forces applied to the flower stem

معادله‌های ۱ تا ۳ محاسبه‌های مربوط به نیروهای وارد بر ساقه را نشان می‌دهند. مطابق این معادله‌ها، مجموع نیروهای اصطکاک باید برابر یا بزرگ‌تر از نیروی وارد شده از سوی بازوی رباتیکی باشد تا ساقه میان انگشت‌ها نلغزد و بازو بتواند آن را از غلاف جدا کند. بر اساس جدول ۴، ضریب اصطکاک بین گل و گریپر ۰/۶۵ است اما برای تماس نرم و افزایش اصطکاک برای جلوگیری از لغزش ساقه میان انگشت‌ها، فرض می‌کنیم نوک انگشت‌ها با لاستیک نرم پوشانده شده و ضریب اصطکاک را ۰/۸ در نظر می‌گیریم. با فرض برابر بودن نیروهای اعمالی هر انگشت، با جایگذاری در معادله‌ها، نیروی وارد شده به ساقه توسط هر انگشت ۰/۹۶ نیوتون به دست می‌آید. اگر اصطکاک بین گل و گریپر همان مقدار ۰/۶۵ در نظر گرفته شود، با جایگذاری در معادله‌ها، نیروی وارد شده به ساقه توسط هر انگشت ۱/۱۸ نیوتون به دست می‌آید.

با توجه به قطر کم و شکننده بودن ساقه‌ی زعفران، ویژگی‌های مکانیکی آن، مطالعه‌های پیشین درباره‌ی نیروی تماسی گریپرهای نرم برای میوه‌های کوچک، و همچنین نتایج معادله‌های ۱ تا ۳، مقدار تقریبی نیرو بین ۰/۹۶ تا ۱/۱۸ نیوتون به‌عنوان نیروی تماس اولیه در نظر گرفته می‌شود. این نیرو هم به ساقه آسیبی وارد نمی‌کند و هم نیروی لازم برای کندن گل توسط بازوی رباتیکی فراهم می‌شود.

از دیگر پارامترهای مهم طراحی، سرعت برخورد لحظه‌ای انگشت‌های گریپر به ساقه است. طبق معادله‌ی ۴ سرعت لحظه‌ای برخورد انگشت به ساقه سبب ایجاد نیروی ضربه‌ای F_{imp} می‌شود؛ اگر مقدار این نیرو زیاد باشد به گیاه آسیب خواهد رسید (فرض استاندارد برای تماس کوتاه ۰/۰۱ ثانیه است). معادله‌ی ۵ نیروی ناشی از شتاب انگشت‌ها و جدول ۵، نمادهای مورد استفاده در فرمول‌ها و توضیح هر نماد را نشان می‌دهد.

$$\begin{aligned} f_1 &= \mu F_1 \\ f_2 &= \mu F_2 \\ f_3 &= \mu F_3 \end{aligned} \quad \text{(معادله ۱)}$$

$$f_{total} = f_1 + f_2 + f_3 \quad (معادله ۲)$$

$$f_{total} = \mu(F_1 + F_2 + F_3) \xrightarrow{F_1=F_2=F_3} f_{total} = 3F_1\mu$$

$$f_{total} \geq F \quad (معادله ۳)$$

$$3F_1\mu \geq F \rightarrow \begin{cases} \mu=0.8 \rightarrow 3 \times F_1 \times 0.8 \geq 2.3 \rightarrow F_1 \geq 0.96 \\ \mu=0.65 \rightarrow 3 \times F_1 \times 0.65 \geq 2.3 \rightarrow F_1 \geq 1.18 \end{cases}$$

$$m\Delta v = F_{imp}\Delta t \rightarrow F_{imp} = \frac{0.02 \times 0.01}{0.01} = 0.02 N \quad (معادله ۴)$$

$$F = ma \quad (معادله ۵)$$

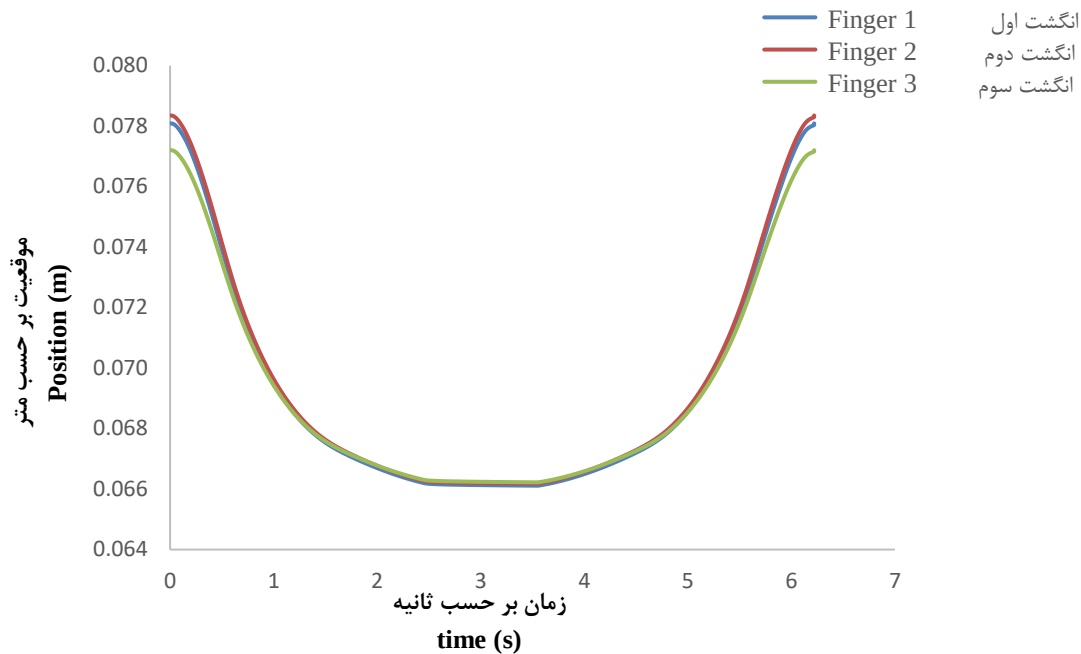
جدول ۵- نمادها و توضیح کمیت‌های مورد استفاده در فرمول‌ها
Table 5. Symbols and Descriptions of Quantities Used in the Equations

توضیح Description / Definition / Meaning	نماد Symbol / Notation
نیروی وارد شده به ساقه‌ی گل توسط بازوی رباتیکی The force applied to the flower stem by the robotic arm	F
نیروی اصطکاک بین انگشت اول و ساقه‌ی گل The friction force between the first finger and the flower stem	f_1
نیروی اصطکاک بین انگشت دوم و ساقه‌ی گل The friction force between the second finger and the flower stem	f_2
نیروی اصطکاک بین انگشت سوم و ساقه‌ی گل The friction force between the third finger and the flower stem	f_3
نیروی وارد شده توسط انگشت اول به ساقه‌ی گل The force exerted by the first finger on the flower stem	F_1
نیروی وارد شده توسط انگشت دوم به ساقه‌ی گل The force exerted by the second finger on the flower stem	F_2
نیروی وارد شده توسط انگشت سوم به ساقه‌ی گل The force exerted by the third finger on the flower stem	F_3
ضریب اصطکاک بین انگشت و ساقه‌ی گل The coefficient of friction between the finger and the flower stem	μ
نیروی ضربه‌ای وارد شده به ساقه از طرف انگشت‌ها The impact force applied to the flower stem by the fingers	F_{imp}
فرض استاندارد برای تماس کوتاه Standard assumption for brief contact	Δt
تغییرات سرعت حرکت انگشت‌ها Changes in finger movement velocity	Δv
شتاب حرکت انگشت‌ها Finger movement acceleration	a

نتایج و بحث

در این بخش نتایج حاصل از شبیه‌سازی گریپر سه‌انگشتی در محیط نرم‌افزار ADAMS بررسی می‌شود. شبیه‌سازی در حالتی انجام شد که در لحظه‌ی شروع حرکت، نوک بادامک به سمت پایین قرار دارد و انگشت‌های گریپر کاملاً باز هستند. شبیه‌سازی در یک دور کامل حرکت گریپر که بادامک 360° درجه می‌چرخد، انجام شد. نمودارهای جابه‌جایی کلی انگشت‌ها بر حسب زمان (شکل ۹)، سرعت انگشت‌ها بر حسب زمان (شکل ۱۰)، شتاب انگشت‌ها بر حسب زمان (شکل ۱۱) و نیروی وارد شده به گل توسط هر انگشت (شکل ۱۲) استخراج شد.

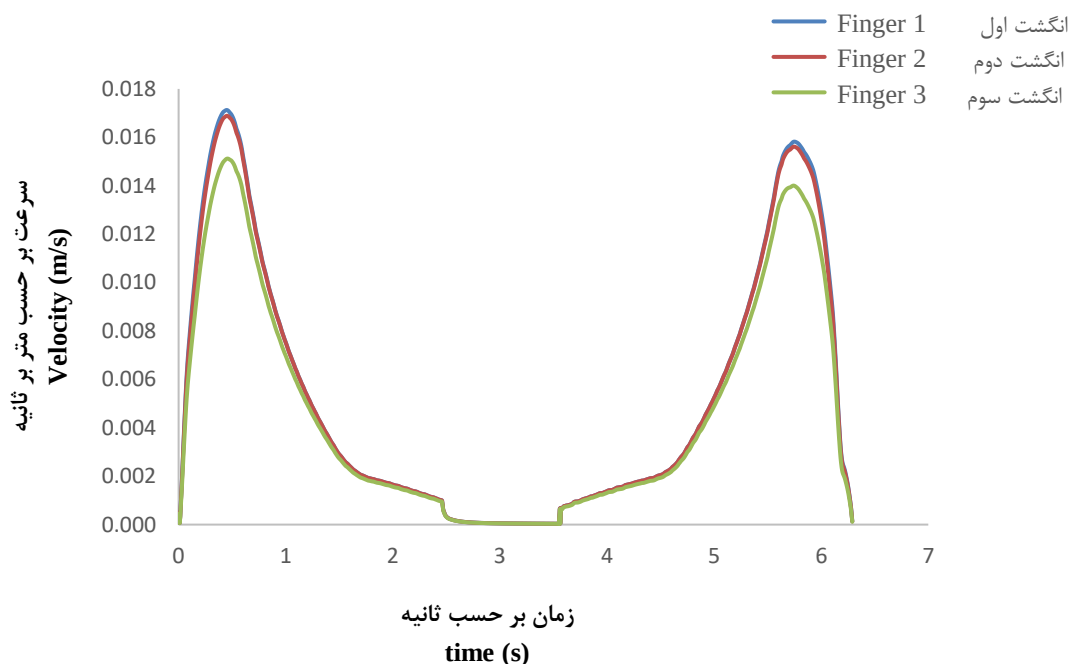
طبق شکل ۹، در لحظه‌ی آغاز حرکت و در بیشترین حالت بازشدگی انگشت‌ها، فاصله‌ی مرکز جرم انگشت‌ها تا محور تقارن گریپر حدود $0/078$ متر است. این فاصله در حالت بسته‌بودن کامل حدود $0/066$ متر است. با توجه به نحوه‌ی چرخش و بازشدن انگشت‌ها، منطقه‌ی کاری گریپر در حالت بازشدگی کامل به‌صورت دایره‌ای با شعاع حدود $7/8$ سانتی‌متر (حدود ۸ سانتی‌متر) قابل تخمین است. این مقدار برای ابعاد گل زعفران مناسب است و فضای کافی برای احاطه‌کردن گل را فراهم می‌کند. علاوه بر این، به دلیل ساده بودن ساختار رابط پیرو-لغزنده و رابط پایه-انگشت، می‌توان با تغییر چند میلی‌متری طول این قطعات، فضای کاری را کوچک‌تر یا بزرگ‌تر تنظیم کرد. در شکل ۹ سه منحنی رسم شده که هر منحنی مربوط به یکی از انگشت‌های گریپر است. در لحظه‌ی آغاز حرکت، فاصله‌ی مرکز جرم هر انگشت از محور تقارن گریپر بیشترین مقدار خود را دارد زیرا انگشت‌ها کاملاً باز هستند. با گذشت زمان انگشت‌ها به آهستگی بسته می‌شوند و فاصله‌ی مرکز جرم آنها از محور تقارن گریپر به کمترین مقدار خود می‌رسد سپس دوباره به آهستگی باز می‌شوند تا به حالت اولیه‌ی خود باز گردند و یک سیکل حرکتی گریپر کامل شود. علت اختلاف جزئی بین منحنی‌های هر انگشت مربوط به دقت قرارگیری انگشت‌ها در نرم‌افزار است و تأثیری در عملکرد واقعی گریپر ندارد.



شکل ۹- جابه‌جایی کلی انگشت‌ها بر حسب زمان
Fig 9. Overall displacement of the fingers over time

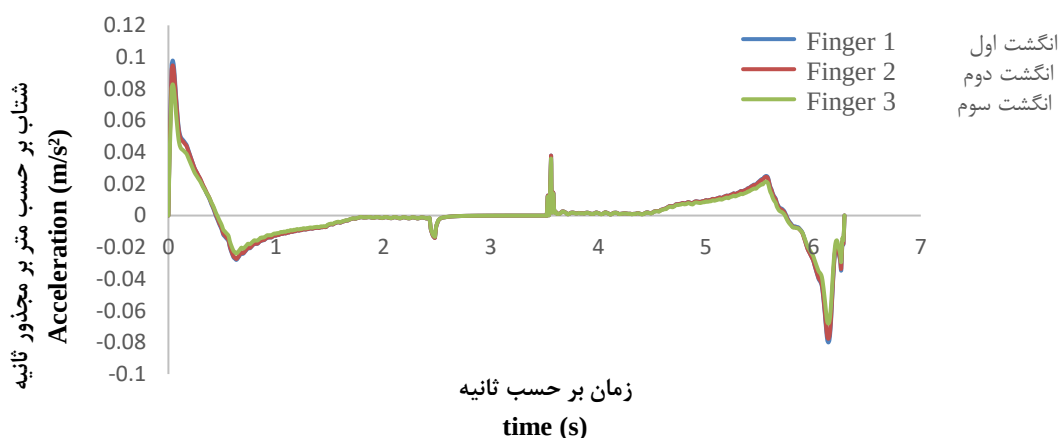
شکل ۱۰ سرعت حرکت انگشت‌ها را نشان می‌دهد. اهمیت این پارامتر از آن جهت است که سرعت بالای انگشت‌ها در لحظه‌ی تماس می‌تواند نیروی ضربه‌ای اولیه را افزایش دهد و به ساقه‌ی ظریف گیاه آسیب برساند. سرعت، پیش از تماس، به‌تنهایی تعیین‌کننده‌ی آسیب نیست؛ نیروی ضربه‌ای در واقع از تغییر تکانه‌ی انگشت در مدت‌زمان بسیار کوتاه تماس (فرض استاندارد برای تماس کوتاه 0.01 ثانیه است). به‌وجود می‌آید (معادله ۴)، بنابراین سرعت اولیه رابطه‌ی مستقیمی با مقدار نیروی برخورد دارد. به همین دلیل ابتدا سرعت حرکت انگشت‌ها بررسی شد و مشخص شد که سرعت انگشت‌ها هنگام رسیدن به ساقه‌ی گل کمتر از 10 میلی‌متر بر ثانیه است؛ طبق جدول ۳، با توجه به وزن انگشت و معادله‌ی ۴ که مربوط به نیروی ضربه‌ای انگشت‌ها است، مقدار نیروی حاصل از این سرعت 0.02 نیوتون است که در مقایسه با نیروی هدف (بین 0.096 تا 1.18 نیوتون) مقداری کم است و به ساقه آسیبی وارد نمی‌کند. در شکل ۱۰ سه منحنی رسم شده که هر منحنی مربوط به یکی از انگشت‌های گریپر است. در لحظه‌ی شروع حرکت سرعت انگشت‌ها صفر است. سپس سرعت زیاد شده تا به بیشترین مقدار خود برسد. پس از آن به دلیل وجود فنر در مکانیزم گریپر، سرعت انگشت‌ها کاهش می‌یابد. طبق منحنی‌های نمودار بین ثانیه‌ی ۲ و ثانیه‌ی ۳، مقدار سرعت با شیب بیشتری کاهش می‌یابد تا به صفر نزدیک شود که این لحظه‌ی برخورد انگشت‌ها با ساقه است. این تماس طبق منحنی‌های نمودار حدود 1 ثانیه طول می‌کشد. پس از آن بین ثانیه‌ی ۳ و ثانیه‌ی ۴، دوباره سرعت انگشت‌ها با شیب بیشتری افزایش می‌یابد که معادل با جدا شدن انگشت‌ها از ساقه است. بین ثانیه‌ی $2/5$ تا ثانیه‌ی $3/5$ ، مدت زمانی است که انگشت‌ها با ساقه تماس دارند و سرعت حرکت انگشت‌ها بسیار نزدیک به صفر است. بعد

از آن، سرعت حرکت انگشت‌ها با شیب کمتری افزایش می‌یابد تا دوباره به بیشترین مقدار خود برسد و در نهایت سرعت دوباره کاهش می‌یابد و به صفر می‌رسد؛ این اتفاق زمانی رخ می‌دهد که انگشت‌ها دوباره کاملاً باز شده‌اند. علت اختلاف جزئی بین منحنی‌های هر انگشت مربوط به دقت قرارگیری انگشت‌ها در نرم‌افزار است و تأثیری در عملکرد واقعی گریپر ندارد.



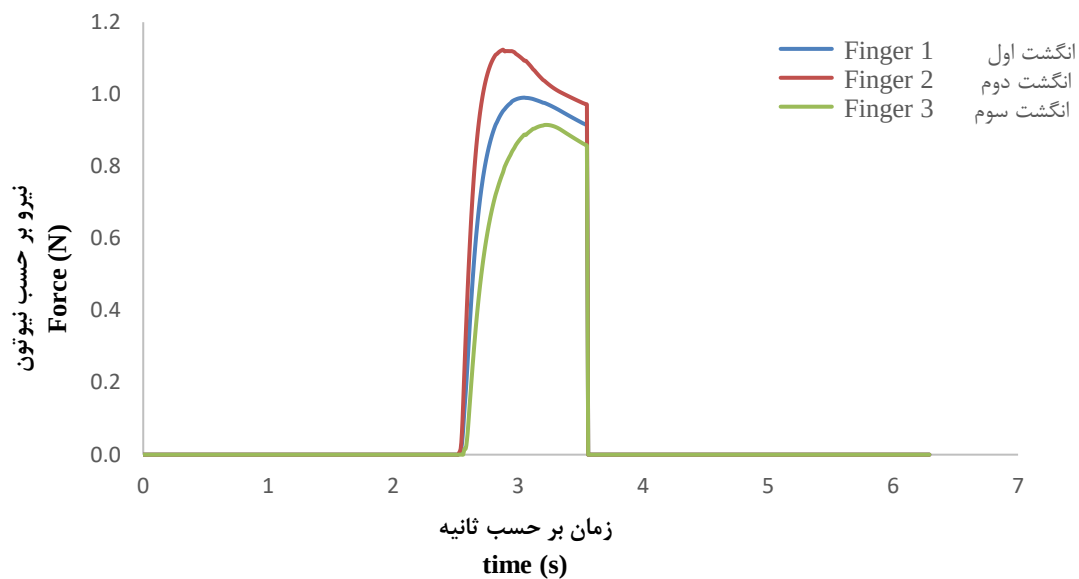
شکل ۱۰- سرعت حرکت انگشت‌ها بر حسب زمان
Fig 10. Finger velocity over time

شکل ۱۱ شتاب حرکت انگشت‌ها را نشان می‌دهد. این پارامتر که مشتق سرعت حرکت انگشت‌های گریپر در طول زمان است عامل مهمی در تعیین مقدار نیروی وارد شده از طرف انگشت‌ها به ساقه‌ی گل است. همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، هر سه منحنی انگشت‌ها کاملاً بر یکدیگر منطبق هستند و ناپیوستگی یا ضربه شدید مشاهده نمی‌شود. علت انطباق و پیوستگی منحنی‌ها استفاده از منحنی Spline در طراحی بادامک است. علت وجود بیشینه و کمینه در نمودار پیش از ثانیه‌ی ۱ و پس از ثانیه‌ی ۵ دقیقاً به دلیل شروع حرکت و توقف انگشت‌ها و همچنین نیروی فنرها در مکانیزم است. در محدوده‌ی زمانی بین ثانیه‌ی ۲/۵ تا ثانیه‌ی ۳/۵ که فاز تماس اتفاق می‌افتد، نوسانات جزئی در نمودار مشاهده می‌شود که ناشی از خطاهای عددی روش حل شبیه‌سازی و همچنین برخورد انگشت‌ها به ساقه و قطع تماس است. هنگام برخورد انگشت‌ها به ساقه شتاب آنها حدود ۰/۰۲ متر بر مجذور ثانیه است که طبق وزن انگشت‌ها که در جدول ۳ ذکر شد و معادله‌ی ۵، نیروی حاصل ۰/۰۰۰۴ نیوتون است. این مقدار نیرو در مقایسه با نیروی هدف (بین ۰/۹۶ تا ۱/۱۸ نیوتون) و نیروی بهینه‌ی گل هنگام کندن (۲/۳ نیوتون)، بسیار ناچیز است و هیچ آسیبی به گل نخواهد زد و ایمنی عملکرد گریپر را تضمین می‌کند.



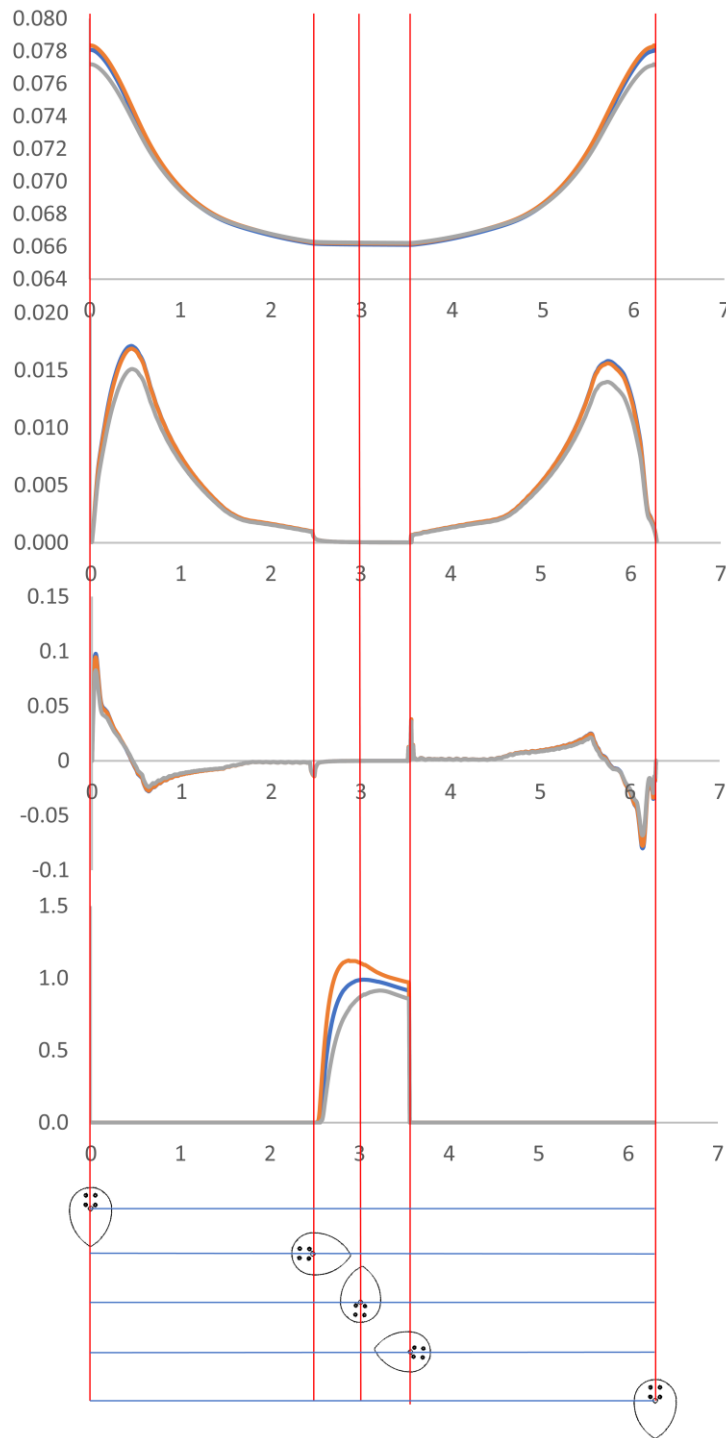
شکل ۱۱- شتاب حرکت انگشت‌ها بر حسب زمان
Fig 11. Finger acceleration over time

شکل ۱۲ نمودار نیروی وارد شده به ساقه توسط هر انگشت را نشان می‌دهد. نتیجه‌ی نمودارهای سرعت و نیرو نشان می‌دهد که سرعت پایین انگشت‌ها هنگام برخورد با ساقه، منجر به نیروی برخورد کم شده و این موضوع برای جلوگیری از آسیب به ساقه ضروری است. همانطور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، نیروی هر سه انگشت بسیار نزدیک به مقدار هدف (حداقل ۰/۹۶ نیوتون) بوده و در محدوده‌ی ایمن قرار دارد. اختلاف جزئی بین نمودارها (کمتر از ۰/۵٪) ناشی از عدم تقارن‌های کوچک در مدل‌سازی یا خطاهای ذاتی روش حل عددی در شبیه‌سازی دینامیکی است که در عمل قابل چشم‌پوشی بوده و بر عملکرد واقعی گریپر تأثیر قابل توجهی نخواهد داشت. در شکل ۱۲ سه منحنی رسم شده که هر منحنی مربوط به یکی از انگشت‌های گریپر است. بین ثانیه‌ی ۲/۵ تا ثانیه‌ی ۳/۵، تماس انگشت‌ها با ساقه اتفاق می‌افتد. خارج از این بازه یعنی قبل از ثانیه‌ی ۲/۵ و پس از ثانیه‌ی ۳/۵ مقدار نیرو صفر است. این مقدار کاملاً منطقی و طبیعی است زیرا انگشت‌های گریپر در این مدت زمان با ساقه هیچ تماسی ندارند. در ابتدای تماس، نیرو به یکباره افزایش می‌یابد؛ پس از گذشت زمان و کاهش تماس انگشت‌ها، دوباره مقدار آن به صفر می‌رسد.



شکل ۱۲- نیروی وارد شده به گل توسط هر انگشت بر حسب زمان
Fig 12. Force applied to the flower by each finger over time

برای درک بهتر عملکرد گریپر و تطبیق نمودارهای جابه‌جایی انگشت‌ها، سرعت و شتاب حرکت انگشت‌ها و نیروی وارد شده به ساقه از طرف انگشت‌ها، شکل ۱۳ رسم شده است. در شکل ۱۳ علاوه بر نمودارهای رسم شده، موقعیت قرارگیری بادامک در لحظه‌های مهم نیز نشان داده شده است. در لحظه‌ی صفر، نوک بادامک رو به پایین است. سپس در جهت مثلثاتی و خلاف جهت عقربه‌های ساعت شروع به دوران می‌کند. وقتی بادامک ۹۰ درجه می‌چرخد در این حالت انگشت‌ها بسته می‌شوند و تماس انگشت‌ها با ساقه آغاز می‌شود. بعد از آن وقتی بادامک ۱۸۰ درجه‌ی دیگر دوران می‌کند انگشت‌ها دوباره شروع به باز شدن می‌کنند و تماس انگشت‌ها با ساقه کاملاً قطع می‌شود. در نهایت با چرخش ۹۰ درجه‌ی دیگر بادامک به حالت اولیه‌ی خود می‌رسد که در این حالت انگشت‌ها کاملاً باز می‌شوند.



شکل ۱۳- تطبیق زمانی بین جابه‌جایی، سرعت، شتاب و نیروی تماس انگشت‌ها با موقعیت لحظه‌ای بادامک
Fig 13. Temporal alignment between the fingers' displacement, velocity, acceleration and contact force with the instantaneous cam position

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک گریپر سه‌انگشتی با مکانیزم ساده و الهام‌گرفته از برداشت دستی گل زعفران، طراحی، مدل‌سازی و شبیه‌سازی شد. طراحی مکانیزم مبتنی بر سامانه‌ی بادامک-پیرو و اتصال کشویی، امکان کنترل هم‌زمان سه انگشت تنها با

یک موتور را فراهم ساخت. هدف اصلی از این طراحی، گرفتن گل زعفران بدون آسیب‌رسانی به ساختار ظریف آن و تسهیل فرآیند برداشت مکانیزه بود. شبیه‌سازی دینامیکی مدل در محیط نرم‌افزار ADAMS نشان داد که انگشت‌ها قادر هستند با سرعتی مناسب و نیرویی کنترل‌شده گل را گرفته و بدون له‌کردن یا آسیب فیزیکی به ساقه‌ی آن، عملیات کندن را انجام دهند. نیروی تماس متوسط هر انگشت بین ۰/۹ تا ۱/۲ نیوتون ثبت شد که با آستانه‌ی تحمل ساقه‌ی گل زعفران هم‌خوانی دارد و از بروز آسیب جلوگیری می‌کند. همچنین، جابجایی و سرعت حرکت انگشت‌ها در محدوده‌ای قرار دارند که موجب امنیت عملکرد و قابلیت اطمینان گریپر در شرایط واقعی است. با توجه به سادگی ساخت، هزینه‌ی پایین و دقت قابل قبول، این گریپر می‌تواند به عنوان یکی از اجزای کلیدی سامانه‌های رباتیکی برداشت زعفران مورد استفاده قرار گیرد. توسعه‌ی آینده این طرح شامل ساخت، ترکیب گریپر با بازوی رباتیکی، بینایی ماشین برای تشخیص گل و تحلیل‌های تجربی جهت اعتبارسنجی عملکرد خواهد بود. نتایج این پژوهش می‌تواند مبنایی برای توسعه گریپرهای دقیق‌تر در برداشت گل زعفران با حداقل آسیب باشد.

منابع

- Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO). (2022). *Report on saffron mechanization projects in Iran*. Tehran, Iran: Ministry of Jihad Agriculture [in Persian].
- Asadian, M., Khosravi, H., & Rahimi, S. (2018). Design and fabrication of a saffron flower harvesting device. In *Proceedings of the 10th National Congress on Agricultural Mechanization* (pp. 45–51). Mashhad, Iran. [in Persian].
- Asimopoulos, N., Parissesa, C., Smyrniotis, A., & Germanidis, N. (2013). Autonomous vehicle for saffron harvesting. In *6th International Conference on Information and Communication Technologies in Agriculture, Food and Environment*.
- Behdani, M., & Maleki, M. (2022). Investigation of the challenges of saffron harvesting mechanization. *Iranian Journal of Agricultural Mechanization*, 13(2), 45–56 [in Persian].
- Bertetto, M., Niccolini, G., & Ricciu, R. (2014). A portable light weight system for saffron harvesting. In *Proceedings of the RAAD 2014, 23rd International Conference on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region* (pp. 3–5). Smolenice Castle, Slovakia.
- Cutkosky, M. R. (1989). On grasp choice, grasp models, and the design of hands for manufacturing tasks. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 5(3), 269–279.
- Denarda, A. R., Bertetto, A. M., & Carbone, G. (2021). Designing a low-cost mechatronic device for semi-automatic saffron harvesting. *Machines*, 9(5), 94.
- Dollar, A. M., & Howe, R. D. (2010). The highly adaptive SDM hand: Design and performance evaluation. *The International Journal of Robotics Research*, 29(5), 585–597.
- Emadi, B., & Saiedirad, M. H. (2011). Moisture-dependent physical properties of saffron flower. *International Journal of Food Engineering*, 7(2).

- Fallahi, H. R., Aghhavan Shajari, M., & Hemmati Kahkaki, A. (2025). Evaluating research directions and identifying research gaps and emerging new topics in Iranian national conferences of saffron. *Journal of Saffron Research*, 13(2). [In Persian]
- Ghasemi, M., & Armin, M. (2021). Design and evaluation of a novel semi-mechanized harvester for saffron flower. *Machines*, 9(5), 94.
- Ghasemi, M., & Rezaei-Moghaddam, K. (2023). The potential of mechanization in saffron harvesting: Challenges and opportunities. *Sensors*, 23(7), 3257.
- Gunderman, A. L., Collins, J., Myer, A., Threlfall, R., & Chen, Y. (2021). Tendon-driven soft robotic gripper for berry harvesting. *arXiv:2103.04270*.
- Gursoy, E., Navarro, B., Cosgun, A., Kulić, D., & Cherubini, A. (2023). Towards vision-based dual arm robotic fruit harvesting. *arXiv:2306.08729*.
- Hante, M. A., Kianmehr, M. H., Arab Hosseini, A., & Ghorbani Javid, M. (2018). Investigation of tensile strength and frequency of saffron flowers based on stem thickness at harvest time. In *The 11th National Congress on Biosystems Engineering and Agricultural Mechanization of Iran* [in Persian].
- Hughes, J., Culha, U., Giardina, F., Guenther, F., Rosendo, A., & Iida, F. (2016). Soft manipulators and grippers: A review. *Frontiers in Robotics and AI*, 3, 23.
- Koocheki, A., Rezvani Moghaddam, P., & Fallahi, H. R. (2006). *Saffron (Crocus sativus) Production and Processing*. Science Publishers [in Persian].
- Kumar, V., Nirbhavane, S., & Parihar, N. S. (2019). Scope of mechanical harvesting of saffron for economic development of farmers in Kashmir Region of Jammu & Kashmir, India. *Indian Journal of Hill Farming*, 32(2), 62–67.
- Lachguer, Kh., Boudadi, I., Lachheb, M., Beraouz, I., El Merzougui, S., Ben El Caid, M., Lagram, K., & Serghini, M. A. (2025). Saffron cultivation and properties: A review. *International Journal of Horticultural Science and Technology*, 12(2), 627–646.
- Modarres, M., & Karimzadeh, R. (2020). Economic significance of saffron and role of mechanization. *Iranian Journal of Horticultural Science and Technology*, 21(3), 125–135.
- Movahed Ghodsianya, S. R. (2023). Machine Vision Applications in Saffron Plant Field (Review Article). *Journal of Saffron Research*, 12(1), 177-191. [In Persian]
- Qiu, A., Young, C., Gunderman, A., Azizkhani, M., Chen, Y., & Hu, A.-P. (2023). Tendon-driven soft robotic gripper with integrated ripeness sensing for blackberry harvesting. *arXiv:2302.03099*.
- Rajendran, V., Debnath, B., Mghames, S., Mandil, W., Parsa, S., Parsons, S., & Ghalamzan-E, A. (2023). Towards autonomous selective harvesting: A review. *arXiv:2304.09617*.
- Shademani, Sh., Kouravand, Sh., Zarafshan, P., Alipour, Kh., Ghalamzan Esfahani, A. (2023). Design and Analysis of the Comb Gripper of the Saffron Flowers Harvesting Robot. *2023 11th RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM)*. Tehran, Iran.
- Shoushtari, A. L. (2023). Advances in soft grasping in agriculture. *arXiv:2312.00175*.
- Siciliano, B., & Khatib, O. (Eds.). (2016). *Springer Handbook of Robotics*. Springer.
- Visentin, F., Castellini, F., & Muradore, R. (2023). A soft, sensorized gripper for delicate harvesting of small fruits. *Computers and Electronics in Agriculture*, 213, 108202.

Zeraatkar, M., Khalili, Kh., & Foorginejad, A. (2016). 3D model of different saffron flower components.
Journal of Saffron Research, 4(1), 133-151. [In Persian]

پذیرفته شده نهایی - قبیل از چاپ