

# Design and evaluation of a rice seedling launching system based on the physical and mechanical properties of rice seedlings and analysis of the forces acting on seedlings for throwing-type rice transplanting

## Abstract

Rice is one of the most important food crops in the world, and developing new planting methods is particularly important where conventional machinery is limited. This research aimed to design and evaluate a new rice transplant launch system equipped with a protective cover and to investigate its mechanical behavior to reduce seedling damage during establishment in the soil. To this end, first, the physical and mechanical properties of the rice transplant, including mass, geometric dimensions, and Young's modulus, were determined through laboratory tests. Then, the launch system was designed and manufactured with a double-flywheel mechanism, and the seedling capsule's impact on the soil was investigated using an analytical model based on energy conservation and force balance. Additionally, to evaluate the seedling's mechanical behavior, a three-dimensional model of the system was developed in ANSYS software, and finite element analysis was performed under loading conditions resulting from launch tests. The results showed that the average wet mass, average diameter, and length of the transplant were 0.554 g, 1.657 mm, and 307.18 mm, respectively. The average Young's modulus of the rice seedlings obtained from the uniaxial tensile test was 29.36 MPa. The results of the throwing tests showed that increasing the throwing height from 1 to 2 m increased the penetration depth of the capsule containing the seedlings from 0.06 to 0.10 m, and the maximum calculated impact force was 2.457 N. The finite element simulation results showed that under critical loading conditions, the maximum von Mises equivalent stress, equivalent strain, and total deformation created in the seedlings were 0.000173 MPa,  $5.8446 \times 10^{-6}$ , and 0.00497 mm, respectively. Low values of stress and deformation showed that the designed system is capable of launching and deploying seedlings without causing significant mechanical damage. The results of this research showed that the combination of experimental, analytical, and numerical simulation methods can be used as a suitable approach for designing and evaluating new transplanting deployment systems in conditions where the use of conventional machinery is limited.

**Keywords:** *rice transplant, physical and mechanical properties, Young's modulus, transplanting launching system*

## Introduction

Rice is one of the most important crops in the world, and it is cultivated by various methods in Iran and other countries. Transplanting is the most common cultivation method for rice. Conventional transplanting methods in small and sloping fields with limited access face challenges such as high labor demand, high costs, limited mechanization, and mechanical damage to seedlings. Understanding the physical and mechanical properties of rice transplate, together with the application of numerical modeling and finite element method simulation, is essential for analyzing their mechanical behavior and optimizing transplanting system performance. To the best of the authors' knowledge, no comprehensive study has investigated the design and evaluation of a rice transplate launching system equipped with a protective capsule by integrating experimental measurements, analytical modeling, finite element method, and laboratory validation. Therefore, the present study aimed to design and evaluate a rice transplate launching system equipped with a protective capsule to reduce mechanical damage, improve transplate establishment, and enhance its applicability in areas where the use of conventional transplanting machinery is limited

## Materials and Methods

In this study, a rice transplate launching system was designed and fabricated. To develop the system, the physical and mechanical properties of the rice transplate were first measured through laboratory experiments and used as input parameters for the design and modeling processes. Several candidate launching mechanisms were evaluated, and a two-flywheel mechanism was selected as the optimal design. The launching and impact processes were then analyzed using an analytical model based on the principles of energy conservation and force equilibrium, from which the input parameters required for numerical simulation were obtained. Subsequently, finite element simulations were performed using ANSYS software. Finally, the analytical and numerical results were validated against laboratory tests.

## Results and Discussion

The physical and mechanical properties of rice transplate, including their geometric dimensions, mass, and Young's modulus, were experimentally determined and used as input parameters for the design and numerical modeling of the launching system. The average diameter, transplate length, and root length were 1.657, 307.180, and 14.595 mm, respectively. The experimental results showed that the average Young's modulus of the rice seedlings was 29.36 MPa, which was subsequently used as an input parameter in the analytical and numerical models. Based on these measured properties, a two-flywheel launching system with a flywheel diameter of 40 mm was designed and fabricated. The analytical model predicted that increasing the launching height from 1 to 2 m increased the impact velocity from 5.43 to 7.01 m/s, the kinetic energy from 0.147 to 0.245 J, and the penetration depth from 0.06 to 0.10 m, whereas the impact force remained nearly constant, ranging from 2.44 to 2.46 N. The mesh-converged finite element model predicted maximum von Mises stress, equivalent strain, and total deformation values of 0.000173 MPa,  $5.84 \times 10^{-6}$ , and 0.00497 mm, respectively, under the most critical loading conditions. Experimental validation demonstrated good agreement with both the analytical model and the numerical simulation. The results further confirmed that the predicted stresses and deformations remained well below the mechanical damage threshold of the rice seedlings, indicating that the proposed launching system can successfully launch and establish seedlings without causing significant mechanical damage.

## Conclusion

In this study, a novel rice seedling launching system equipped with a protective capsule was designed, fabricated, and evaluated to reduce mechanical damage and improve seedling establishment. The results demonstrated that incorporating the actual physical and mechanical properties of rice seedlings into the design and modeling process is essential for accurately predicting system performance.

Experimental launching tests confirmed that the proposed two-flywheel mechanism provided stable launching performance and successful capsule penetration into the simulated paddy soil. At a launching height of 2 m, the maximum penetration depth reached 0.10 m, while the impact force was 2.457 N, and no visible damage or breakage of the seedlings was observed. The analytical model and finite element simulations further showed that the induced stresses, strains, and deformations under the most critical loading conditions remained well below the mechanical damage threshold of the seedlings. Overall, the integration of experimental measurements, analytical modeling, and finite element simulation proved to be an effective approach for the design and evaluation of novel transplate launching systems. The proposed system shows considerable potential for improving the mechanization of rice transplanting in small and sloping fields where the use of conventional transplanting machinery is limited.

## طراحی و ارزیابی سامانه پرتاب نشاء برنج برای کاشت پرتابی مبتنی بر خواص فیزیکی و مکانیکی و

### تحلیل نیروهای وارده بر آن

#### چکیده

برنج یکی از مهم‌ترین محصولات غذایی جهان است و توسعه روش‌های نوین کاشت آن در شرایط محدودیت استفاده از ماشین‌آلات متداول، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. هدف از این پژوهش، طراحی و ارزیابی یک سامانه نوین پرتابی نشاء برنج مجهز به کپسول محافظ به‌منظور توسعه کاشت پرتابی نشاء و بررسی رفتار مکانیکی آن برای کاهش آسیب وارده به نشاء در فرآیند استقرار در خاک بود. در این راستا، ابتدا ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی نشاء برنج شامل جرم، ابعاد هندسی و مدول الاستیسیته با انجام آزمون‌های آزمایشگاهی تعیین شد. سپس سامانه پرتاب با مکانیزم دو فلاپویل طراحی و ساخته شد و فرآیند برخورد کپسول حامل نشاء با خاک با استفاده از یک مدل تحلیلی مبتنی بر پایداری انرژی و تعادل نیرو بررسی گردید. همچنین، به‌منظور ارزیابی رفتار مکانیکی نشاء، مدل سه بعدی سامانه در نرم‌افزار انسیس توسعه داده شد و تحلیل اجزای محدود تحت شرایط بارگذاری حاصل از آزمون‌های پرتاب انجام گرفت. نتایج نشان داد که میانگین جرم تر، متوسط قطر ساقه و طول نشاءهای مورد بررسی به ترتیب برابر با ۰/۵۵۴ گرم، ۱/۶۵۷ میلی‌متر و ۳۰۷/۱۸ میلی‌متر بود. همچنین، متوسط مدول یانگ نشاء برنج از آزمون کشش تک‌محوره برابر با ۲۹/۳۶ مگاپاسکال به‌دست آمد. نتایج آزمون‌های پرتاب نشان داد که افزایش ارتفاع پرتاب از ۱ تا ۲ متر موجب افزایش عمق نفوذ کپسول حاوی نشاء از ۰/۰۶ به ۰/۱۰ متر شد و بیشینه نیروی برخورد محاسبه شده برابر با ۲/۴۵۷ نیوتن بود. نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود نشان داد که تحت شرایط بحرانی بارگذاری، بیشینه تنش معادل فون‌مایز، کرنش معادل و تغییر شکل کل ایجادشده در نشاء به ترتیب برابر با ۰/۰۰۱۷۳ مگاپاسکال،  $1.0^{-6}$  و ۵/۸۴۴۶ میلی‌متر بود. مقادیر کم تنش و تغییر شکل نشان داد که سامانه طراحی شده قادر است فرآیند پرتاب و استقرار نشاء را بدون ایجاد آسیب مکانیکی قابل توجه انجام دهد. نتایج این پژوهش نشان داد که ترکیب روش‌های تجربی، تحلیلی و شبیه‌سازی عددی می‌تواند به‌عنوان روشی مناسب برای طراحی و ارزیابی سامانه‌های نوین استقرار نشاء در شرایطی که استفاده از نشاکارهای متداول با محدودیت مواجه است، مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: نشاء برنج، خواص فیزیکی مکانیکی، مدول یانگ، سامانه کشت پرتابی

#### مقدمه

در بین محصولات زراعی، برنج با نام علمی اوریزا ساتیوا<sup>۱</sup> از اهمیتی ویژه برخوردار است؛ زیرا به‌عنوان یکی از منابع اصلی تأمین کالری و غذای پایه برای جمعیت زیادی از جهان محسوب می‌شود، و در کشورهایی با جمعیت بالا مانند چین، هند و ایران امنیت غذایی و معیشتی

<sup>1</sup> Oryza Sativa L.

میلیون‌ها نفر به آن گره خورده است (Zhu et al., 2023; He et al., 2022; Feng et al., 2024). این محصول پس از گندم پرمصرف‌ترین محصول دنیا است (Bassuony & Zsembeli, 2019).

بر اساس گزارش‌های منتشر شده سازمان خواروبار جهانی، تولید این محصول در سال ۲۰۲۴ در جهان برابر با ۸۲۰ میلیون تن بیان شده است که نسبت به سال گذشته ۱۵ میلیون تن افزایش داشته است (FAO, 2025). بر اساس گزارش‌های رسمی وزارت جهاد کشاورزی در سال ۱۴۰۳، حدود ۶۵۰ هزار هکتار از اراضی کشاورزی به کشت برنج اختصاص دارد و تولید این محصول ۲/۵ میلیون تن برآورد شده است. لازم به ذکر است بخش عمده تولید برنج کشور در استان‌های گیلان، مازندران و گلستان انجام می‌شود که بیش از ۵۵۰ هزار هکتار از سطح زیر کشت برنج را به خود اختصاص داده‌اند (Sohrabi, 2024).

روش‌های کاشت برنج را می‌توان به دو دسته کاشت مستقیم بذر و کاشت نشاء طبقه‌بندی نمود که هر دو به روش دستی و مکانیزه قابل انجام هستند (Jin-Long et al., 2018). باوجود گسترش مکانیزاسیون، روش‌های سنتی نشاکاری برنج در بسیاری از مناطق رایج هستند که این روش نیازمند نیروی کار زیاد، زمان بر و پرهزینه و محدود به شیب زمین است (Ling et al., 2025; Feng et al., 2024). همچنین استقرار نشاء در روش‌های سنتی نشاکاری ضمن محدودیت‌های ذکر شده، امری پرمحمت و طاقت‌فرسا به‌ویژه برای زنان است (Poojitha et al., 2024).

باوجود پیشرفت‌های قابل توجه در مکانیزاسیون کشاورزی، بهره‌گیری از نشاکارهای متداول در تمامی اراضی زراعی امکان‌پذیر نیست. مطالعات نشان داده‌اند که عواملی نظیر کوچک و پراکنده بودن قطعات زراعی، محدودیت دسترسی، شرایط نامناسب توپوگرافی و اراضی تپه‌ای یا شیب‌دار از مهم‌ترین موانع توسعه مکانیزاسیون در بسیاری از مناطق کشاورزی محسوب می‌شوند (Daum, 2022). همچنین گزارش‌های سازمان خواروبار جهانی بیان می‌کند که نشاکارهای متداول عمدتاً برای مزارع بزرگ طراحی شده‌اند و در اراضی کوچک، نامنظم و یا شیب‌دار با محدودیت عملکرد و بهره‌وری مواجه هستند (FAO, 2022). با توجه به محدودیت‌های مکانیزاسیون در برخی اراضی دارای شیب زیاد، دسترسی دشوار و یا قطعات کوچک، استفاده از سامانه‌های متداول نشاکاری همواره با چالش‌هایی همراه است. از این رو در پژوهش حاضر، طراحی و تحلیل یک سامانه تحویل و پرتاب نشاء برنج باهدف کاهش آسیب مکانیکی به نشاء، تسهیل استقرار آن در مزرعه و امکان کاشت با پهپادهای کشاورزی با سامانه پرتاب قابل نصب روی پهپاد مورد بررسی قرار گرفت.

باوجود گسترش مکانیزاسیون در تولید برنج یکی از محورهای اصلی پژوهش‌های مهندسی، توسعه سامانه‌های انتقال و استقرار نشاء است (Zhou et al., 2023; Xue et al., 2022). در مطالعات انجام شده ضمن بررسی عملکرد سامانه‌های انتقال نشاء، نحوه انتقال نیرو و شرایط تماس میان اجزای مکانیکی مکانیزم و نشاء در طول فرآیند جابه‌جایی و استقرار مورد مطالعه قرار گرفته است؛ عواملی که می‌توانند بر تنش‌های ایجادشده، میزان آسیب مکانیکی و کیفیت استقرار نشاء تأثیرگذار باشند (Xue et al., 2022).

همان‌طور که اشاره شد روش‌های مختلفی برای کاشت برنج از جمله کاشت مستقیم، نشاکاری دستی و نشاکاری مکانیزه توسعه یافته‌اند، ولی هر یک از آن‌ها محدودیت‌هایی نظیر نیروی کار، مصرف آب، آسیب مکانیکی زیاد به نشاء یا محدودیت عملکرد در اراضی کوچک و شیب‌دار مواجه هستند. از این رو، توسعه سامانه‌های نوآورانه برای استقرار نشاء باهدف کاهش محدودیت‌های موجود و استفاده حداکثری از اراضی در شرایط مختلف مستلزم شناخت دقیق رفتار مکانیکی نشاء و برهم‌کنش آن با اجزای سامانه و خاک است.

در طراحی تجهیزات و سامانه‌های مکانیزه، شناخت و بررسی خواص فیزیکی و مکانیکی گیاهان، از جمله مدول الاستیسیته، مقاومت در برابر تنش و کرنش، خواص ضربه‌ای و رفتار نفوذ در خاک، نقش مهمی در انتخاب پارامترهای طراحی، تحلیل رفتار مکانیکی و پیش‌بینی میزان آسیب وارد شده به گیاه را دارند. از این رو در مطالعات متعددی به تعیین خواص فیزیکی و مکانیکی گیاهان پرداخته‌اند (Tomobe et al., 2023; Wanga et al., 2025; Qiu et al., 2024; Yu et al., 2025). در سال‌های اخیر، خواص مکانیکی انواع نشاءها، بسترهای کشت، دانه‌های زراعی، محصولات باغی و سایر بافت‌های گیاهی باهدف طراحی ماشین‌های کاشت، سامانه‌های رباتیک،

تجهیزات انتقال و استقرار گیاه و نیز بهبود دقت مدل‌های شبیه‌سازی مورد بررسی قرار گرفته است (Abubakar et al., 2020; Ghonimy ; Qiu et al., 2022; Ciupak et al., 2019; Joong Son, 2025; Hou et al., 2024; Jiang et al., 2024; Periasamy et al., 2022 et al., 2025). نتایج این مطالعات بیانگر آن است که شناخت دقیق ویژگی‌های مکانیکی گیاه، پیش‌نیاز طراحی مناسب تجهیزات مکانیزه، کاهش آسیب‌های مکانیکی و افزایش دقت شبیه‌سازی‌های عددی است. مجموعه این مطالعات نشان می‌دهد که تعیین خواص فیزیکی و مکانیکی گیاه، ضمن طراحی تجهیزات و ماشین‌آلات، نقش مهمی در افزایش دقت مدل‌های تحلیلی و شبیه‌سازی‌های عددی ایفا می‌کند.

با فراهم شدن اطلاعات دقیق از ویژگی‌های مکانیکی گیاهان و اجزای سامانه‌ها، استفاده از روش‌های مدل‌سازی و شبیه‌سازی عددی به یکی از ابزارهای مهم در تحلیل رفتار مکانیکی، پیش‌بینی تنش‌ها و بهینه‌سازی طراحی تجهیزات و ماشین‌های کشاورزی تبدیل شده است. در سال‌های اخیر روش‌های شبیه‌سازی عددی به طور گسترده برای بررسی دقیق فرآیندهای کشاورزی، بهینه‌سازی طراحی و پارامترهای عملکردی و کاهش آسیب‌های وارد بر گیاه مورد استفاده قرار می‌گیرد. در پژوهشی صورت گرفته توسط تعدادی از پژوهشگران از یک مدل دینامیکی با روش دینامیک سیالات محاسباتی برای تجزیه و تحلیل فرآیند نشاکاری برای بررسی تعاملات بین ماشین‌های نشاکار و خاک شالیزار استفاده شد. بر اساس نتایج پژوهش مذکور علت اصلی آسیب به نشاء برنج، ضربه در زمان نشاکاری است (Xue et al., 2022).

در یک پژوهش کاربردهای روش اجزا محدود در کشاورزی به عنوان یکی از مهم‌ترین ابزارهای شبیه‌سازی مورد بررسی واقع شد. بر اساس نتایج به دست آمده، روش اجزا محدود در سه حوزه مکانیزاسیون کشاورزی، فرآوری محصولات کشاورزی و مکانیک خاک دارای بیشترین کاربرد است (Velloso et al., 2018). در پژوهشی دیگر عوامل قابل اعتماد بودن تحلیل اجزا محدود بررسی شد. نتایج این مطالعه بیان می‌کند که دقت پیش‌بینی‌ها به انتخاب مناسب مدل، کیفیت مش‌بندی، تعریف صحیح شرایط مرزی، مدل‌سازی تماس بین اجزا و اعتبارسنجی نتایج با داده‌های تجربی وابسته است (Zulkifli et al., 2021). در پژوهشی باهدف ارزیابی ویژگی‌های ارتعاشی شاسی ماشین نشاکار برنج، از تحلیل مودال مبتنی بر روش اجزا محدود و آزمون‌های تجربی استفاده شد. در این پژوهش فرکانس‌های طبیعی و شکل مودهای ارتعاشی تعیین و سپس نتایج شبیه‌سازی روی نمونه‌های واقعی اعتبارسنجی شدند. نتایج این پژوهش نشان داد که اختلاف بین فرکانس‌های طبیعی حاصل از شبیه‌سازی و آزمایش کمتر از ۱۰ درصد بوده و مدل دارای دقت مناسبی بوده است (Chen et al., 2022). در مطالعه‌ای دیگر، از روش اجزا محدود برای ارزیابی استحکام و سختی شاسی ماشین نشاکار برنج تحت شرایط مختلف کاری استفاده شد. در این پژوهش چهار حالت اصلی ماشین به صورت استاتیکی شبیه‌سازی و توزیع تنش و کرنش در شاسی مورد بررسی واقع گردید. با بررسی نتایج مدل‌سازی پژوهشگران مقاله مدعی شدند که تحلیل اجزا محدود ابزاری مؤثر برای طراحی، اصلاح و بهینه‌سازی ساختار شاسی ماشین نشاکار طراحی شده بوده و افزایش قابلیت اطمینان را به دنبال دارد (Mo et al., 2014).

روش اجزاء گسسته برای شبیه‌سازی نفوذ بذر در خاک و پیش‌بینی عمق کاشت در سامانه‌های پهبادی مورد استفاده قرار گرفته است (Zhijun et al., 2023; Joong Son, 2025) همچنین شبیه‌سازی تماس و ضربه با رویکرد المان محدود برای تحلیل تنش‌های وارد بر بذر در لحظه پرتاب گزارش شده است (Hou et al., 2024). از سوی دیگر، مدل‌های تحلیلی مبتنی بر پایداری انرژی و تکانه برای تخمین نیروی برخورد و تنش وارده بر گیاهان در فرآیندهای مکانیزه کشاورزی توسعه یافته‌اند (Yuan et al., 2024; Yu et al., 2025).

مرور مطالعات نشان می‌دهد که پژوهش‌های پیشین عمدتاً بر طراحی نشاکارهای متداول، مدل‌سازی فرآیند انتقال نشاء، توسعه سامانه‌های پرتابی یا بررسی مستقل خواص مکانیکی گیاه متمرکز بوده‌اند. در سال‌های اخیر، استفاده از سامانه‌های پرتابی برای استقرار نشاء برنج نیز مورد توجه قرار گرفته است. به طور مثال، Yuan et al. در سال ۲۰۲۴ یک سامانه پرتاب نشاء برنج نصب شده بر پهباد را توسعه دادند که در آن انتقال نشاء به وسیله یک مکانیزم هل‌دهنده مکانیکی انجام شده و پس از آن نشاء از طریق لوله سقوط به سمت بستر بذر هدایت می‌شود. در سایر پژوهش‌های بررسی شده، تلفیق روش‌های تجربی، تحلیلی و شبیه‌سازی عددی در ارزیابی سامانه‌های

نوبین استقرار نشاء کمتر مورد توجه قرار گرفته است. همچنین، تاکنون پژوهشی که عملکرد سامانه پرتاب نشاء مجهز به کپسول محافظ را با بهره‌گیری هم‌زمان از خواص مکانیکی واقعی نشاء، مدل‌سازی تحلیلی، شبیه‌سازی اجزای محدود و اعتبارسنجی آزمایشگاهی ارزیابی کرده باشد، گزارش نشده است. رویکرد پژوهش حاضر برقراری ارتباط میان خواص مکانیکی واقعی نشاء، طراحی کپسول محافظ، مکانیزم پرتاب و پاسخ مکانیکی نشاء در این فرآیند است. تمایز اصلی پژوهش حاضر با سامانه‌های پرتابی پیشین از جمله Yuan et al. در نوع مکانیزم انتقال و پرتاب، استفاده از کپسول محافظ و بررسی هم‌زمان رفتار مکانیکی نشاء است. براین اساس، هدف پژوهش حاضر طراحی و ارزیابی یک سامانه نوبین توزیع و پرتاب نشاء برنج مجهز به کپسول محافظ و تحلیل رفتار مکانیکی آن به‌منظور کاهش آسیب مکانیکی و بهبود استقرار نشاء در خاک است.

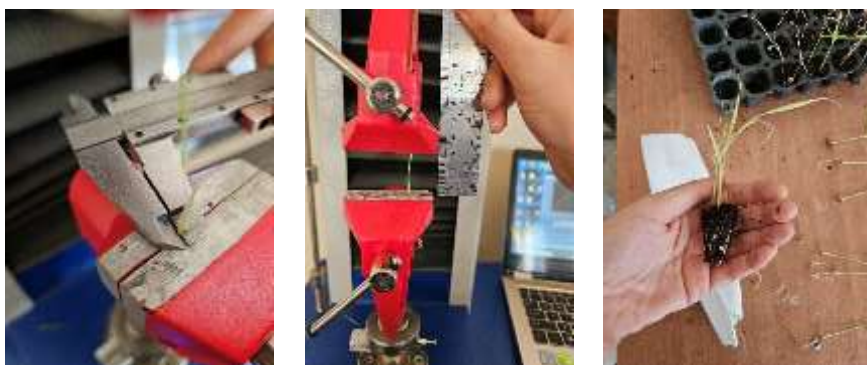
## مواد و روش‌ها

به‌منظور توسعه و ارزیابی یک سامانه کاشت پرتابی نشاء برنج برای اراضی با محدودیت استفاده از ماشین‌های متداول، در این پژوهش از ترکیب روش‌های طراحی مهندسی، آزمایشگاهی، تحلیلی و شبیه‌سازی عددی استفاده شد. ابتدا ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی نشاء برنج به‌عنوان پارامترهای ورودی طراحی و مدل‌سازی تعیین گردید. سپس سامانه کاشت پرتابی با در نظر گرفتن الزامات عملکردی شامل کاهش آسیب مکانیکی به نشاء، دستیابی به سرعت پرتاب مناسب و استقرار مطلوب در خاک طراحی و نمونه آزمایشگاهی آن ساخته شد. در ادامه، فرآیند پرتاب و برخورد کپسول حامل نشاء که از خمیر کاغذ تشکیل شده است و بعد از مدت کوتاهی در بستر کشت تجزیه شده و رشد ریشه نشاء انجام می‌شود، با استفاده از مدل تحلیلی مبتنی بر قوانین پایستگی انرژی و تعادل نیرو بررسی شد. همچنین رفتار مکانیکی سامانه با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود در نرم‌افزار انسیس تحلیل گردید. در نهایت، نتایج مدل‌های تحلیلی و عددی با آزمون‌های پرتاب آزمایشگاهی اعتبارسنجی شدند.

## تعیین ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی نشاء به‌عنوان پارامترهای ورودی مدل

به‌منظور استخراج پارامترهای ورودی مورد نیاز برای طراحی سامانه و مدل‌سازی، ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی نشاء برنج اندازه‌گیری شد. برای تعیین ویژگی‌های فیزیکی، ۵۰ نشاء برنج تهیه شده از مزارع شهرستان سلمی (استان مازندران) به‌صورت تصادفی انتخاب شدند. وزن نمونه‌ها با ترازوی دیجیتال (دقت ۰/۰۱ گرم) و ابعاد هندسی شامل طول کل نشاء، طول ریشه و قطر ساقه با کولیس دیجیتال (دقت ۰/۰۱ میلی‌متر) اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری‌ها در دمای محیط و رطوبت بافتی ۷۲ تا ۷۵ درصد انجام شد. تمامی اندازه‌گیری‌ها در سه تکرار انجام شد و مقادیر میانگین به‌عنوان نتایج نهایی مورد استفاده قرار گرفت. مقادیر میانگین و انحراف معیار پارامترهای اندازه‌گیری شده در بخش نتایج و بحث ارائه شده است.

به‌منظور تعیین خواص مکانیکی، آزمون کشش تک‌محوره بر روی شش نمونه سالم با استفاده از دستگاه آزمون یونیورسال مجهز به لودسل با ظرفیت اسمی ۵ کیلوگرم نیرو انجام شد. برای انجام آزمایش، نشاء به صورتی در دستگاه قرار گرفت که قسمت کمی بالاتر از ریشه در گیره ثابت و از قسمت ساقه درون فک متحرک باشد. فاصله اولیه بین فک‌های ثابت و متغیر ۳۰ میلی‌متر و سرعت بارگذاری ۵ میلی‌متر بر ثانیه در نظر گرفته شد (شکل ۱) و آزمون‌ها در دمای محیط و رطوبت بافتی ۷۲ تا ۷۵ درصد انجام گرفت. بر اساس داده‌های نیرو - جابجایی و قطر اندازه‌گیری شده هر نشاء تحت بار، منحنی‌های تنش - کرنش ترسیم و مدول یانگ از شیب بخش خطی منحنی با استفاده از برازش خطی محاسبه شد. مقادیر به‌دست‌آمده به‌عنوان پارامترهای ورودی در مدل تحلیلی و شبیه‌سازی اجزای محدود مورد استفاده قرار گرفتند. به‌منظور بررسی حساسیت مدل عددی نسبت به تغییرات خواص مکانیکی، سه مقدار مدول یانگ حاصل از آزمون‌های کشش در شبیه‌سازی اجزای محدود مورد استفاده قرار گرفت.



ج

ب

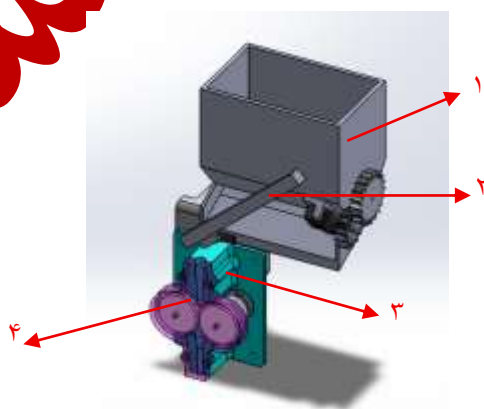
الف

شکل ۱. نحوه اندازه‌گیری تا انجام تست کشش نمونه مورد نظر در آزمایشگاه (الف. نشاء تهیه شده برای انجام آزمایش، ب. تنظیم فاصله فک محرک با خط‌کش، ج. اندازه‌گیری قطر هر نمونه برای استفاده در روابط و محاسبات مربوطه)

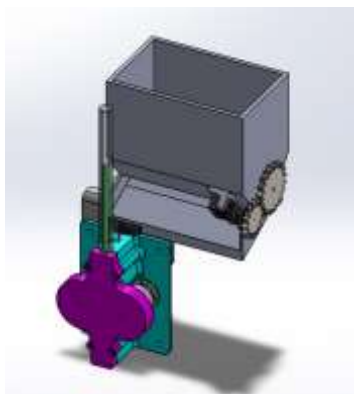
### طراحی و ساخت سامانه کاشت پرتابی نشاء برنج

به‌منظور طراحی و ساخت سامانه کاشت پرتابی نشاء برنج، ابتدا مدل سه‌بعدی سامانه شامل مکانیزم پرتاب و سایر اجزا در نرم‌افزار سالیدورکس نسخه ۲۰۲۱ طراحی و یک نمونه آزمایشگاهی از آن با چاپگر سه بعدی تولید شد. برای طراحی سامانه مذکور چندین مکانیزم پرتاب بر اساس معیارهای طراحی مورد ارزیابی قرار گرفتند و در نهایت مکانیزم دو فلاپیول به دلیل سادگی ساخت، قابلیت کنترل سرعت خروجی و یکنواختی پرتاب انتخاب شد. در مدل‌سازی مکانیزم، فلاپیول‌ها به‌صورت اجسام صلب با دوران حول محور مرکزی فرض شدند.

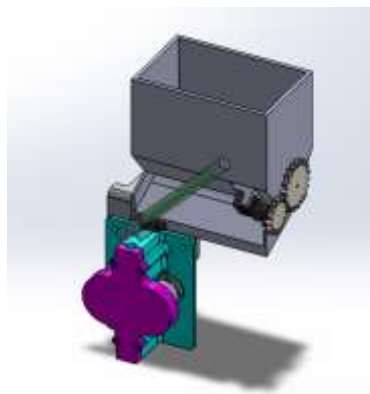
با در نظر داشتن ویژگی‌های فیزیکی اندازه‌گیری شده و همچنین فرض یک سرعت دورانی ثابت و چند قطر پیشنهادی مختلف برای فلاپیول، سرعت پرتاب خطی کپسول حاوی نشاء برنج محاسبه گردید و با مقایسه بین سرعت‌های خطی به‌دست‌آمده، قطر ۴۰ میلی‌متر برای مدل‌سازی موزع پرتابی انتخاب شد. ابعاد نهایی سامانه بر اساس نتایج اندازه‌گیری‌های فیزیکی نشاء و محاسبات مربوط به سرعت خروج نشاء درون کپسول تعیین گردید. در شکل ۲ اجزای مختلف سامانه و در شکل ۳ سامانه کاشت پرتابی نشاء برنج در سه مرحله گرفتن نشاء، دوران تا رسیدن به قسمت پرتاب‌کننده و نحوه انتقال به پرتاب‌کننده ارائه شده است.



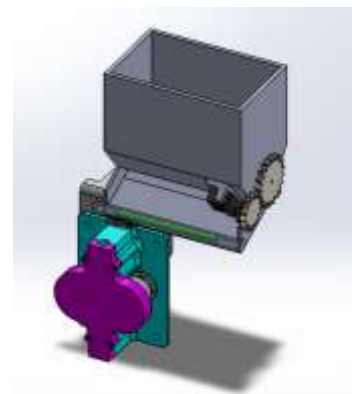
شکل ۲. سامانه پرتاب نشاء برنج (۱: مخزن نگهداری کپسول نشاء، ۲: سیستم انتقال کپسول حاوی نشاء برنج از مخزن به بخش پرتاب نشاء، ۳: نگهدارنده و اتصال‌دهنده مخزن و سیستم پرتاب، ۴: بخش پرتاب‌کننده کپسول نشاء شامل مکانیزم دو فلاپیول)



الف



ب



ج

شکل ۳. تصویر سامانه کاشت پهنپای در سه مرحله مختلف؛ الف) دریافت نشاء از مخزن، ب) دوران تا رسیدن به قسمت پرتاب‌کننده و ج) انتقال به واحد پرتاب

(نشاء از مخزن تحویل گرفته شده و درون لوله انتقال قرار داد)

### مدل‌سازی تحلیلی فرآیند پرتاب

به منظور تحلیل رفتار مکانیکی سامانه کاشت پرتابی و برآورد نیرو و تنش وارده بر نشاء در هنگام برخورد کپسول با خاک، یک مدل تحلیلی بر پایه قوانین پایستگی انرژی مکانیکی و تعادل نیرو توسعه داده شد. در این مدل، مجموعه کپسول و نشاء به عنوان یک جسم واحد در نظر گرفته شد که پس از خروج از سامانه پرتاب، تحت تأثیر نیروی گرانش و سرعت اولیه حرکت کرده و با سطح خاک برخورد می‌کند. از آنجاکه هدف اصلی پژوهش، ارزیابی احتمال آسیب مکانیکی وارد بر نشاء است، نیروی ایجاد شده در اثر توقف کپسول به عنوان نیروی منتقل شده به نشاء در نظر گرفته شد.

به منظور ساده‌سازی مدل، چند فرض اساسی در نظر گرفته شد. حرکت کپسول کاملاً در راستای قائم فرض شد و اثر مؤلفه‌های افقی و دوران آن نادیده گرفته شد. همچنین مقاومت هوا در طول مسیر پرتاب و اتلاف انرژی ناشی از اصطکاک صرف نظر گردید. خاک به صورت محیطی همگن با رفتار خطی در مرحله نفوذ اولیه مدل شد و فرض گردید نیروی مقاوم خاک در طول عمق نفوذ تقریباً ثابت است. علاوه بر این، تغییر شکل کپسول در مقایسه با تغییر شکل نشاء ناچیز فرض شد؛ بنابراین نیروی توقف ایجاد شده در اثر برخورد بدون اتلاف قابل توجه به نشاء منتقل می‌شود. همچنین ماده نشاء همگن، ایزوتروپ و دارای رفتار الاستیک خطی در محدوده بارگذاری مورد بررسی فرض شد.

در این مدل، جرم مؤثر برابر مجموع جرم کپسول و نشاء در نظر گرفته شد. جرم نشاء از مقادیر اندازه‌گیری شده به دست آمد. همچنین، جرم کپسول کاغذی با ضخامت ۰/۵ میلی‌متر و چگالی ۰/۷۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب، به صورت تقریبی ۰/۶ گرم محاسبه شد؛ باین حال، در محاسبات، جرم کپسول کاغذی برابر با ۱ گرم در نظر گرفته شد. با در نظر گرفتن مجموع جرم نشاء بدنه کاغذی کپسول و خاک اطراف ریشه نشاء، جرم کل کپسول حاوی نشاء برابر با ۱۱ گرم در نظر گرفته شد. با استفاده از قانون پایستگی انرژی، سرعت برخورد کپسول با خاک از رابطه (۱) محاسبه شد. همچنین انرژی جنبشی مجموعه در لحظه برخورد نیز از رابطه (۲) به دست آمد. در روابط ۱ و ۲،  $m$  جرم کل مجموعه کپسول و نشاء،  $v_0$  سرعت اولیه خروج از سامانه پرتاب،  $v_i$  سرعت برخورد،  $g$  شتاب گرانش و  $h$  ارتفاع پرتاب است.

$$\frac{1}{2}mv_i^2 = \frac{1}{2}mv_0^2 + mgh \rightarrow v_i = \sqrt{v_0^2 + 2gh} \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$E_k = \frac{1}{2}mv_i^2 = \frac{1}{2}mv_0^2 + mgh \quad (\text{رابطه ۲})$$

با فرض ثابت بودن نیروی مقاومت خاک در طول عمق فرو رفتگی، نیروی لازم برای متوقف کردن کپسول برابر با انرژی جنبشی اولیه در لحظه برخورد است. همچنین با محاسبه این نیرو (رابطه ۳)، تنش وارد بر نشاء با استفاده از تعریف تنش محاسبه می‌شود که در آن  $\delta$  عمق نفوذ اندازه‌گیری شده در آزمایش‌های پرتاب است. با جاگذاری موارد مربوط به این مسئله، تنش از رابطه ۴ به دست می‌آید. تنش به دست آمده از رابطه ۴، معیاری برای ارزیابی احتمال گسیختگی نشاء در اثر ضربه است.

$$F_{avg} \cdot \delta = E_k \rightarrow F_{avg} = \frac{E_k}{\delta} \quad \text{رابطه ۳}$$

$$\sigma_{impact} = \frac{F_{avg}}{A} = \frac{\frac{1}{2}mv_0^2 + mgh}{\pi R^2 \delta} \quad \text{رابطه ۴}$$

در رابطه ۴،  $A$  سطح مقطع مؤثر نشاء و  $R$  شعاع سطح تماس در نظر گرفته شده است. مقادیر حاصل از این مدل تحلیلی علاوه بر ارزیابی اولیه احتمال آسیب مکانیکی نشاء، به عنوان مبنای اعمال بار در شبیه سازی اجزای محدود نیز مورد استفاده قرار گرفتند و نتایج آن‌ها در بخش نتایج با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه و اعتبارسنجی شد.

به منظور تعیین شرایط واقعی توقف کپسول پس از برخورد با خاک، شتاب منفی از نتایج آزمون‌های پرتاب محاسبه شد. در این راستا، پس از اندازه‌گیری عمق نفوذ کپسول در سه ارتفاع مختلف، با استفاده از روابط سینماتیکی حرکت با شتاب ثابت، مقدار شتاب منفی متوسط در مرحله توقف تعیین گردید. سپس با استفاده از قانون دوم نیوتن، نیروی متوسط وارد بر مجموعه کپسول - نشاء محاسبه و در مدل تحلیلی و همچنین به عنوان ورودی بارگذاری در شبیه سازی اجزای محدود مورد استفاده قرار گرفت.

#### ارزیابی آزمایشگاهی و محاسبه نیروی برخورد

به منظور ارزیابی آزمایشگاهی عملکرد سامانه و بررسی شرایط واقعی کپسول با بستر کشت، آزمون پرتاب کپسول‌ها در سه ارتفاع ۱، ۱/۵ و ۲ متر و با سرعت دورانی ۱۵۰۰ دور در دقیقه فلیپویل در شرایط کنترل شده آزمایشگاهی مطابق شکل ۴ انجام شد.



شکل ۴. نمایی از انجام ارزیابی آزمایشگاهی سامانه ساخته شده

در هر ارتفاع سه تکرار مستقل انجام گرفت تا تغییرپذیری داده‌ها کاهش یابد و مقادیر میانگین به عنوان داده‌های مورد نظر ثبت گردید. کپسول‌ها توسط مکانیزم طراحی شده به سمت بستر گل اشباع شده با رطوبت مشابه شالیزار پرتاب شدند. بستر کاشت مناسب برنج دارای بافت ریز و محتوای رس بالاتر است که ظرفیت نگهداری بالای آب را دارد و می‌تواند شرایط اشباع مورد نیاز برای رشد برنج را فراهم کند (Ye et al., 2024). لازم به ذکر است برنج در محدوده PH حدود ۵/۵ الی ۶/۵ دارای بهترین عملکرد است (Wanga et al., 2025). برای شبیه سازی بستر شالیزار در آزمایشگاه، خاک با بافت رسی - سیلتی ابتدا در حالت خشک ذرات درشت آن جدا شد. سپس خاک با افزودن آب به حالت خمیری مرطوب شد تا چسبندگی کافی برای نگهداشتن ریشه‌ها فراهم گردد. پیش از انجام آزمایش، با یک

آزمون فشاری ساده اطمینان حاصل شد که خاک از نظر کیفی شبیه به خاک شالیزار باشد. با توجه به این که هدف اصلی این پژوهش، طراحی و ارزیابی سامانه پرتاب کپسول نشاء و بررسی رفتار کپسول و نشاء هنگام برخورد با بستر کشت است؛ از این رو، خواص ژئوتکنیکی بستر کشت از جمله پارامترهایی نظیر رطوبت، چگالی ظاهری و مقاومت نفوذ خاک به عنوان متغیرهای مستقل به صورت کمی مورد بررسی قرار نگرفتند. پس از هر پرتاب، عمق نفوذ کپسول در خاک با استفاده از خط کش اندازه گیری شد. میانگین سه تکرار برای هر ارتفاع به عنوان مقدار نهایی به منظور محاسبه نیرو به کار گرفته شد.

بر اساس اندازه گیری عمق نفوذ در آزمایش های پرتاب و سرعت برخورد حاصل از مدل تحلیلی، شتاب منفی میانگین محاسبه گردید. سپس نیروی میانگین توقف از قانون دوم نیوتن به دست آمد و به عنوان بارگذاری ورودی در تحلیل اجزای محدود مورد استفاده قرار گرفت. بنابراین عمق نفوذ اندازه گیری شد در آزمون های آزمایشگاهی به عنوان داده ورودی برای برآورد شتاب کاهش سرعت و نیروی برخورد مورد استفاده قرار گرفت و نیروی حاصل به عنوان بارگذاری متناظر با شرایط واقعی آزمون در تحلیل اجزا محدود اعمال شد. در نهایت، نتایج حاصل از مدل تحلیلی و شبیه سازی اجزای محدود با مشاهدات و شرایط حاصل از آزمون های آزمایشگاهی مقایسه شد تا عملکرد سامانه و سازگاری نتایج مدل با شرایط واقعی ارزیابی شود.

#### شبیه سازی نیروی وارده بر نشاء در زمان پرتاب در نرم افزار انسیس

به منظور ارزیابی رفتار مکانیکی کپسول و نشاء در برابر نیروهای حاصل از پرتاب و بررسی احتمال آسیب پذیری آن، یک مدل عددی سه بعدی در نرم افزار ANSYS Workbench 2018 توسعه داده شد. مدل شامل کپسول حامل نشاء و بخش داخلی نماینده نشاء بود که بر اساس ابعاد نمونه طراحی شده مدل سازی گردید. خواص مکانیکی نشاء شامل مدول یانگ حاصل از آزمون کشش به عنوان ورودی مدل تعریف شد. ضریب پواسون نشاء برنج در منابع اشاره نشده است، بنابراین سایر مواد گیاهی مورد بررسی قرار گرفت. در منابع مختلف ضریب پواسون برخی مواد گیاهی از جمله سلول های اپیدرمی پیاز، ۰/۱۸ تا ۰/۳ گزارش شده است (Wei et al., 2001)، همچنین در بسیاری از بافت های زیستی نرم، مقادیر ضریب پواسون بین ۰/۳ تا ۰/۵ گزارش شده اند (Liu et al., 2006)، بر همین اساس ضریب پواسون برای نشاء برنج ۰/۴۰ در نظر گرفته شد. خواص ماده پوسته کپسول نیز مطابق خواص مرجع مواد کاغذی فشرده وارد شد.

به منظور شبیه سازی انتقال نیرو بین اجزای مدل، تماس بین کپسول و نشاء به صورت Bonded Contact تعریف گردید. به منظور بررسی پاسخ مکانیکی نشاء تحت تاثیر نیروی معادل برخورد که از روابط تحلیلی استخراج گردید، تحلیل ها در محیط Static Structural انجام شد و شرایط مرزی به گونه ای تعریف شد که سطح پایینی مدل به صورت تکیه گاه ثابت در نظر گرفته شود. سپس نیروی برخورد حاصل از مدل تحلیلی و آزمایش های پرتاب به عنوان نیروی بحرانی در استخراج توزیع تنش و کرنش بر سطح فوقانی کپسول اعمال گردید. برای بررسی اثر شدت بارگذاری، تحلیل ها تحت پنج مقدار مختلف نیروی اعمالی انجام شد.

هندسه مدل با استفاده از المان های سه بعدی مرتبه دوم مش بندی گردید. به منظور اطمینان از استقلال نتایج از اندازه المان، مطالعه همگرایی مش انجام شد. بدین منظور مدل با پنج اندازه المان شامل ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ و ۳ میلی متر مش بندی و برای تمامی حالات، یک نیروی ثابت برابر با ۲/۴۵۷ نیوتن که از روش آزمایشگاهی محاسبه شده بود، اعمال گردید. در هر مرحله، تعداد المان ها و گره ها، تنش معادل ون مایرز، تنش اصلی بیشینه و تغییر شکل کل استخراج و با یکدیگر مقایسه شدند. باتوجه به اینکه تغییرات نتایج بین دو مش ریزتر ناچیز بود، اندازه المان ۱ میلی متر به عنوان مش نهایی انتخاب و تمامی تحلیل های عددی با این اندازه مش انجام شد. در جدول ۱ مشخصات مش های بررسی شده ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات مش های بررسی شده

| ردیف | اندازه المان (میلی متر) | تعداد المان | تعداد گره |
|------|-------------------------|-------------|-----------|
|------|-------------------------|-------------|-----------|

|   |     |        |        |
|---|-----|--------|--------|
| ۱ | ۰/۵ | ۲۳۲۶۶۹ | ۳۸۹۸۱۲ |
| ۲ | ۱   | ۷۴۱۳۷  | ۱۳۴۶۵۰ |
| ۳ | ۱/۵ | ۷۲۹۸۲  | ۱۳۲۶۳۶ |
| ۴ | ۲   | ۷۲۷۷۳  | ۱۳۲۳۷۸ |
| ۵ | ۳   | ۷۲۶۶۲  | ۱۳۲۲۳۳ |

## نتایج و بحث

در این بخش، نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی، مدل سازی تحلیلی، شبیه سازی اجزای محدود و آزمون‌های اعتبار سنجی به ترتیب مراحل پژوهش ارائه و تحلیل می‌شوند. ابتدا ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی نشاء برنج به عنوان پارامترهای ورودی معرفی می‌شوند. سپس نتایج طراحی سامانه کاشت پرتابی و مدل تحلیلی فرآیند پرتاب ارائه شده و در ادامه عملکرد مدل اجزای محدود از طریق بررسی همگرایی مش و تحلیل تنش، کرنش و تغییر شکل در شرایط مختلف بارگذاری ارزیابی می‌شود. در نهایت، نتایج آزمایش‌های پرتاب عملکرد سامانه ارزیابی و نیروی برخورد متناظر با شرایط واقعی آزمون محاسبه شد.

### تعیین ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی نشاء به عنوان پارامترهای ورودی مدل

جرم و ابعاد هندسی نشاء از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در طراحی کپسول و مکانیزم پرتاب هستند، زیرا نیروی پرتاب باید به گونه‌ای انتخاب شود که ضمن تأمین نفوذ مناسب در خاک، از آسیب مکانیکی و شکست ساقه جلوگیری کند. مقادیر حداقل، حداکثر، میانگین و شاخص‌های آماری ویژگی‌های فیزیکی در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. نتایج اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی نشاء برنج

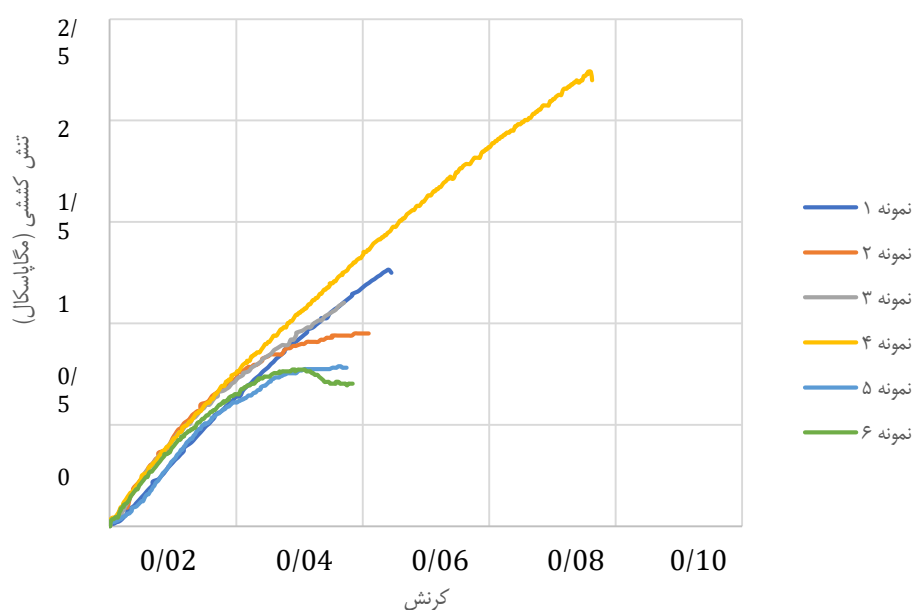
| پارامترها          | داده‌های وزنی |               | داده‌های ابعادی |                |
|--------------------|---------------|---------------|-----------------|----------------|
|                    | وزن تر (گرم)  | وزن خشک (گرم) | قطر (میلی‌متر)  | طول (میلی‌متر) |
| تعداد نمونه        | ۵۰            | ۵۰            | ۵۰              | ۵۰             |
| حداقل مقدار        | ۰/۱۸۰         | ۰/۰۴۸         | ۰/۸۵۰           | ۲۹۵            |
| حداکثر مقدار       | ۰/۹۲۰         | ۰/۲۴۴         | ۲/۸۰۰           | ۲۲۰            |
| میانگین داده       | ۰/۵۵۴         | ۰/۱۴۷         | ۱/۶۵۷           | ۲۰۷/۱۸۰        |
| انحراف معیار نمونه | ۰/۱۹۵         | ۰/۰۵۲         | ۰/۴۷۹           | ۵/۱۶۹          |
| انحراف معیار جامعه | ۰/۱۹۳         | ۰/۰۵۱         | ۰/۴۷۴           | ۵/۱۱۷          |

نتایج جدول ۲ نشان می‌دهد که نشاءهای مورد بررسی دارای جرم کم، ابعاد کوچک و رطوبت نسبتاً بالا بودند. این ویژگی‌ها به طور مستقیم در تعیین ابعاد کپسول، انتخاب مکانیزم پرتاب و برآورد نیروی لازم برای استقرار نشاء در خاک مورد استفاده قرار گرفتند. همچنین یکنواختی نسبی داده‌ها، قابلیت استفاده از مقادیر میانگین به عنوان پارامترهای ورودی مدل‌های تحلیلی و شبیه‌سازی اجزای محدود را تأیید می‌کند. این مقدار با گزارش‌های مشابه درباره نشاءهای جوان برنج توسط سایر پژوهشگران نیز منطبق است که جرم نشاءهای ۲۱-۳۰ روزه را کمتر از ۱/۲ گرم گزارش کرده‌اند (Jiang et al., 2024; Periasamy et al., 2022). از نظر ابعاد هندسی، نتایج نشان می‌دهد که قطر بخش میان ساقه نشاء در محدوده ۰/۸۵ تا ۲/۸ میلی‌متر قرار دارد. این مقادیر با اندازه‌گیری‌های انجام شده برای نشاءهای گوجه (Abubakar et

al., 2020) و نشاء‌های سایر گیاهان علفی مشابه است و نشان می‌دهد که بافت ساقه در این سن رشد، ساختار مکانیکی ضعیف و الاستیک دارد.

نتایج اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی نشاء نشان داد که جرم و ابعاد نشاء در محدوده‌ای قرار دارند که می‌تواند بر نحوه انتقال، شتاب‌گیری و استقرار آن در سامانه پرتاب اثرگذار باشد. به‌ویژه، جرم کم نشاء موجب می‌شود که تغییرات سرعت خروج و شرایط برخورد بتواند بر پاسخ مکانیکی آن اثر قابل توجهی داشته باشد.

منحنی‌های تنش - کرنش حاصل از تعیین خواص مکانیکی نشاء برنج توسط آزمون کشش تک‌محوره بر روی شش نمونه انجام شده در ناحیه خطی و الاستیک در شکل ۵ ارائه شده است. تمامی نمونه‌ها در ابتدا بارگذاری رفتار تقریباً خطی از خود نشان دادند که بیانگر رفتار الاستیک بافت نشاء در این ناحیه است. بر اساس تعریف مدول یانگ، این پارامتر از شیب منحنی تنش - کرنش در ناحیه خطی و الاستیک می‌آید؛ از این‌رو، در این پژوهش بخش ابتدایی و تقریباً خطی منحنی هر نمونه به عنوان ناحیه مینا برای تعیین مدول یانگ انتخاب شد. سپس با انجام برازش خطی بر این ناحیه، شیب خط برازش شده به عنوان مدول یانگ نمونه در نظر گرفته شد. ضریب تبیین نیز به منظور ارزیابی کیفیت برازش محاسبه گردید. در جدول ۳ مقادیر اندازه‌گیری و محاسبه شده شش نمونه مورد بررسی ارائه شده است. با افزایش کرنش، منحنی‌ها به تدریج وارد ناحیه غیرخطی شده و در نهایت شکست نمونه رخ داده است.



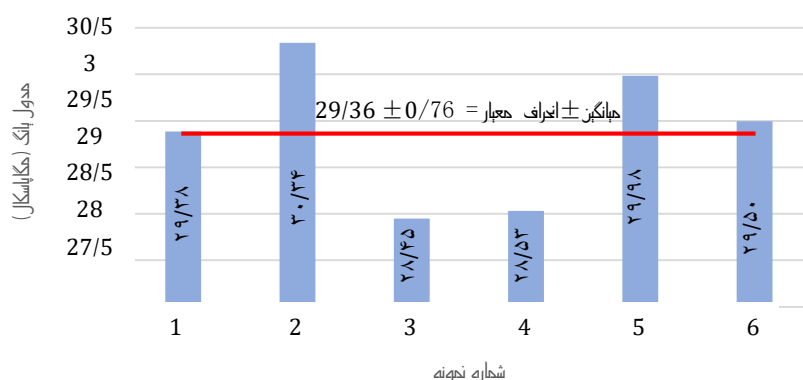
شکل ۵. منحنی تنش - کرنش شش نمونه نشاء برنج

جدول ۳. مقادیر اندازه‌گیری و محاسبه شده برای شش نمونه تحت آزمایش کشش در آزمایشگاه

| شماره نمونه   | قطر نمونه<br>(میلی‌متر) | سطح مقطع<br>(میلی‌متر<br>مربع) | ضریب تبیین | مدول یانگ<br>(مگاپاسکال) | تنش شکست<br>(مگاپاسکال) | کرنش شکست |
|---------------|-------------------------|--------------------------------|------------|--------------------------|-------------------------|-----------|
| نمونه شماره ۱ | ۱/۸                     | ۲/۵۴                           | ۱/۰۰       | ۲۹/۳۸                    | ۱/۲۵                    | ۰/۰۴۴     |
| نمونه شماره ۲ | ۱/۱                     | ۰/۹۵                           | ۰/۹۷       | ۳۰/۳۴                    | ۰/۸۹                    | ۰/۰۲۹     |

|               |      |      |      |       |       |       |
|---------------|------|------|------|-------|-------|-------|
| نمونه شماره ۳ | ۱/۲  | ۱/۱۳ | ۰/۹۸ | ۲۸/۴۵ | ۱/۱۰  | ۰/۰۳۷ |
| نمونه شماره ۴ | ۱/۱  | ۰/۹۵ | ۰/۹۹ | ۲۸/۵۳ | ۲/۲۳  | ۰/۰۷۵ |
| نمونه شماره ۵ | ۱/۳۵ | ۱/۴۳ | ۰/۹۸ | ۲۹/۹۸ | ۰/۷۲  | ۰/۰۲۵ |
| نمونه شماره ۶ | ۱/۲  | ۱/۱۳ | ۰/۹۸ | ۲۹/۵۰ | ۰/۷۴  | ۰/۰۲۵ |
| میانگین       |      |      |      | ۲۹/۳۶ | ۱/۱۵۵ | ۰/۰۳۹ |

مدول یانگ استخراج شده برای شش نمونه ارزیابی شده به همراه مقدار میانگین در شکل ۶ ارائه شده است. میانگین مدول یانگ محاسبه شده برابر با ۲۹/۳۶ مگاپاسکال با انحراف معیار ۰/۷۶ مگاپاسکال است.



شکل ۶. مدول یانگ اندازه‌گیری شده برای شش نمونه نشاء برنج و مقدار میانگین و انحراف معیار آن‌ها

در بررسی خواص مکانیکی ساقه ذرت مقادیر مدول یانگ در بازه ۶ تا ۱۶ گیگاپاسکال گزارش شده است که بزرگ‌تر از مقادیر به‌دست‌آمده برای نشاء برنج است و نشان‌دهنده ساختار سخت‌تر و بالغ‌تر بافت ساقه ذرت است (Al-Zube et al., 2018). در مطالعات دیگر در مورد ریشه گیاهان نیز گزارش شده است به‌عنوان نمونه، مدول یانگ ریشه نخود در حدود ۲ مگاپاسکال در شرایط اشباع گزارش شده است، اما با خشک شدن ریشه تا چندین برابر افزایش می‌یابد (Kurowski et al., 2018).

مدول یانگ اندازه‌گیری شده نشان‌دهنده در پژوهش حاضر نشان‌دهنده انعطاف‌پذیری نسبتاً بالای بافت نشاء در مقایسه با ساقه گیاهان بالغ است. با توجه به این که یکی از هدف‌های پژوهش حاضر طراحی یک سامانه کاشت پرتابی است، استفاده از ویژگی‌های واقعی نشاء به‌عنوان ورودی طراحی کپسول و مدل اجزای محدود، امکان ارتباط مستقیم میان مشخصات مکانیکی نشاء و طراحی سامانه پرتاب را فراهم می‌کند.

#### طراحی سامانه کاشت پرتابی نشاء برنج

سامانه پرتاب نشاء طراحی شده با استفاده از مکانیزم دو فلاپیول و مطابق مشخصات ارائه شده در جدول ۴ با بهره‌گیری از پریتر سب‌بعدی و از جنس ABS ساخته شد. سامانه طراحی شده دارای ساختاری مناسب برای نصب روی یک پلتفرم آزمایشگاهی است. در شکل ۷ اجزای مختلف سامانه ساخته شده ارائه شده است. باتوجه به این که در این سامانه پرتاب یک بافت گیاهی صورت می‌پذیرد، سامانه به‌گونه‌ای طراحی شده است که از اعمال نیروهای ضربه‌ای شدید به نشاء جلوگیری شود. به همین دلیل، مکانیزم پرتاب دو فلاپیول به دلیل قابلیت کنترل سرعت خروجی، اعمال نیروی یکنواخت و کاهش تمرکز تنش در هنگام پرتاب انتخاب گردید. همچنین ابعاد کپسول پرتاب شونده بر اساس میانگین ویژگی‌های فیزیکی نشاء تعیین شد تا ضمن تثبیت مناسب نشاء، توزیع یکنواخت تنش در حین پرتاب و نفوذ در بستر گل فراهم شود.



شکل ۷. اجزای مکانیزم ساخته شده توسط پرینتر ۳ بعدی که اجزای مختلف در مدل سه بعدی در موادوروش ها به تفکیک مشخص شده است.

جدول ۴. مشخصات فنی سامانه پرتاب نشاء برنج

| مشخصات                                | پارامتر                                |
|---------------------------------------|----------------------------------------|
| ۱۹۸/۷۰×۱۳۹/۱×۲۸۹/۸                    | ابعاد (طول × عرض × ارتفاع) به میلی متر |
| Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) | جنس                                    |
| ۴۰                                    | قطر فلاپویل (میلی متر)                 |
| ۶                                     | قطر لوله سقوط (میلی متر)               |
| ۱/۹۰۹۴                                | وزن کلی سامانه (کیلوگرم)               |

سامانه ساخته شده امکان انجام آزمون های پرتاب در شرایط کنترل شده آزمایشگاهی را فراهم کرد و مبنای انجام مطالعات تحلیلی، شبیه سازی عددی و اعتبارسنجی تجربی در ادامه پژوهش قرار گرفت.

در سامانه حاضر، کپسول حاوی نشاء مستقیماً توسط دو فلاپویل شتاب گرفته و به سمت بستر کشت پرتاب می شود. بنابراین، در سامانه حاضر انتقال سرعت به مجموعه کپسول-نشاء از طریق تماس چرخشی فلاپویل ها انجام می شود، در حالی که در سایر سامانه ها انتقال اولیه نشاء بر مبنای حرکت هل دهنده و هدایت آن در یک مسیر مشخص صورت می گیرد. همچنین، استفاده از کپسول محافظ در سامانه حاضر است که علاوه بر تسهیل انتقال نشاء، به عنوان واسطه مکانیکی بین نشاء و محیط بیرونی در فرآیند پرتاب و برخورد عمل می کند. از این منظر، سامانه حاضر علاوه بر مسئله انتقال و استقرار نشاء، رفتار مکانیکی نشاء و شرایط بارگذاری ناشی از پرتاب و برخورد را نیز مورد توجه قرار می دهد.

#### مدل سازی تحلیلی فرآیند پرتاب

به منظور بررسی رفتار مکانیکی سامانه کاشت پرتابی در هنگام برخورد کپسول با بستر گل، مدل تحلیلی ارائه شده در بخش مواد و روش ها برای شرایط آزمایشگاهی و در سرعت دورانی ۱۵۰۰ دور در دقیقه مورد استفاده قرار گرفت. با استفاده از سرعت اولیه خروج کپسول، ارتفاع

پرتاب و عمق نفوذ اندازه‌گیری شده در آزمایش‌ها، سرعت برخورد، انرژی جنبشی، شتاب منفی و نیروی برخورد محاسبه شد. نتایج حاصل از محاسبات در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵. نتایج به‌دست آمده از مدل‌سازی تحلیلی فرآیند پرتاب با استفاده از روابط ذکر شده

| ارتفاع پرتاب<br>(متر) | سرعت برخورد<br>(متر بر ثانیه) | انرژی جنبشی<br>(ژول) | عمق نفوذ<br>(متر) | نیروی برخورد<br>(نیوتن) |
|-----------------------|-------------------------------|----------------------|-------------------|-------------------------|
| ۱                     | ۵/۴۳                          | ۰/۱۴۷                | ۰/۰۶              | ۲/۴۵۰                   |
| ۱/۵                   | ۶/۲۷                          | ۰/۱۹۶                | ۰/۰۸              | ۲/۴۵۰                   |
| ۲                     | ۷/۰۱                          | ۰/۲۴۵                | ۰/۱۰              | ۲/۴۵۰                   |

نتایج نشان داد که با افزایش ارتفاع پرتاب از ۱ به ۲ متر، انرژی جنبشی مجموعه کپسول - ن‌شاء از ۰/۱۴۷ تا ۰/۲۴۵ ژول افزایش یافت که ناشی از افزایش سرعت برخورد در اثر تبدیل انرژی پتانسیل گرانشی به انرژی جنبشی است. همچنین عمق نفوذ کپسول در بستر گل از ۰/۰۶ به ۰/۱۰ متر افزایش یافت که بیانگر جذب بخش عمده انرژی برخورد توسط بستر خاک از طریق افزایش عمق نفوذ است. در ادامه با استفاده از نتایج آزمون‌های پرتاب، عملکرد سامانه ارزیابی و نیروی برخورد متناظر با شرایط واقعی آزمون محاسبه شد.

به عبارت دیگر افزایش ارتفاع پرتاب تنها موجب افزایش سرعت برخورد نمی‌شود، بلکه نحوه استهلاک انرژی در بستر را نیز تغییر می‌دهد. این موضوع در تفسیر نتایج نیروی برخورد اهمیت دارد، زیرا نیروی متوسط توقف به نحوه توزیع انرژی در طول مسیر نفوذ وابسته است.

شایان ذکر است که در پژوهش حاضر، سرعت خروج کپسول به صورت نظری و بر اساس سرعت دورانی و قطر فلاپویل تعیین شد و اندازه‌گیری مستقیم آن انجام نشد. احتمال لغزش بین کپسول و فلاپویل می‌تواند موجب اختلاف بین سرعت نظری و سرعت واقعی خروج شود. بنابراین، اندازه‌گیری مستقیم سرعت خروج با استفاده از دوربین پرسرعت یا حسگر مناسب و مقایسه آن با مقدار نظری، از جمله موارد پیشنهادی نویسندگان برای مطالعات آتی است.

#### ارزیابی آزمایشگاهی و محاسبه نیروی برخورد

نتایج آزمایش‌های پرتاب کپسول ن‌شاء از سه ارتفاع ۱، ۱/۵ و ۲ متر در جدول ۶ ارائه شده است. نتایج نشان داد که با افزایش ارتفاع پرتاب، عمق نفوذ کپسول در بستر گل اشباع دارای روند افزایشی است. این رفتار بیانگر افزایش انرژی جنبشی کپسول در لحظه برخورد و در نتیجه افزایش شتاب منفی (کاهش سرعت) در حین نفوذ در بستر نرم شبیه‌سازی شده شالیزار است. اندازه‌گیری عمق نفوذ کپسول‌ها نشان داد که نفوذ به صورت پایدار و بدون واژگونی یا انحراف جانبی انجام شده است که حاکی از پایداری مناسب طراحی کپسول و هم‌راستایی مناسب آن در لحظه برخورد با سطح گل است. همچنین در هیچ‌یک از آزمایش‌ها، شکست یا تغییر شکل مخرب در کپسول و ن‌شاء مشاهده نشد که نشان‌دهنده مناسب بودن شرایط پرتاب انتخاب شده از نظر مکانیکی است.

جدول ۶. نتایج محاسبه نیروی برخورد در سه ارتفاع مختلف در سرعت ۱۵۰۰ دور در دقیقه فلاپویل

| ارتفاع پرتاب<br>(متر) | عمق نفوذ<br>(متر) | شتاب نفوذ<br>(متر بر ثانیه) | نیروی برخورد<br>(نیوتن) |
|-----------------------|-------------------|-----------------------------|-------------------------|
| ۱                     | ۰/۰۶              | -۲۴۳/۵                      | ۲/۴۳۵                   |
| ۱/۵                   | ۰/۰۸              | -۲۴۴/۰                      | ۲/۴۴۰                   |
| ۲                     | ۰/۱۰              | -۲۴۵/۷                      | ۲/۴۵۷                   |

بر اساس نتایج به دست آمده، بیشینه شتاب منفی کپسول در شرایط حداکثری پرتاب برابر با ۲۴۵ متر بر مجذور ثانیه بدست آمد. با در نظر گرفتن جرم مؤثر کپسول، نیروی متناظر با این شتاب از قانون دوم نیوتن محاسبه شد که مقدار آن برابر با ۲/۴۵۷- بود. از آنجاکه این مقدار بیانگر بحرانی ترین شرایط بارگذاری در فرایند پرتاب بود، به عنوان نیروی ورودی در تحلیل اجزای محدود انتخاب شد.

با وجود افزایش انرژی جنبشی از ۰/۱۴۷ به ۰/۲۴۵ ژول، نیروی برخورد تنها از ۲/۴۳۵ به ۲/۴۵۷ نیوتن افزایش یافت و در محدوده نسبتاً ثابتی باقی مانده است. این رفتار را می توان با افزایش همزمان عمق نفوذ تو ضیح داد. در مدل حاضر، نیروی توقف بر مبنای انرژی جنبشی و مسیر توقف کپسول در بستر کشت تعیین می شود؛ بنابراین، هنگامی که ارتفاع پرتاب افزایش می یابد، انرژی جنبشی بیشتری که در لحظه برخورد وجود دارد با افزایش عمق در خاک مستهلک می شود. در نتیجه، افزایش انرژی برخورد به افزایش متناسب نیروی متوسط توقف منجر نمی شود. به بیان دیگر، بستر گل در شرایط مورد بررسی با افزایش مسیر نفوذ، بخشی از افزایش انرژی ناشی از ارتفاع بیشتر را جذب کرده و همین امر موجب محدود ماندن تغییرات نیروی برخورد شده است.

### مدل سازی و شبیه سازی اجزا محدود

پس از تعیین نیروی برخورد به عنوان نیروی بحرانی از طریق مدل تحلیلی و اعتبارسنجی آزمایشگاهی، تحلیل اجزای محدود به منظور بررسی توزیع تنش، کرنش و تغییر شکل در مجموعه کپسول-نشاء انجام شد. بر اساس نتایج بخش قبل، بیشترین نیروی متوسط برخورد به عنوان حالت بحرانی انتخاب و به صورت بارگذاری استاتیکی به مدل اعمال گردید. خواص مکانیکی اجزای مدل مطابق مقادیر ارائه شده در بخش مواد و روش ها تعریف شد و تحلیل در نرم افزار انسیس انجام گرفت.

به منظور اطمینان از مستقل بودن نتایج تحلیل از اندازه مدل، تحلیل همگرایی مش با استفاده از پنج اندازه المان شامل ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ و ۳ میلی متر انجام شد. برای تمامی حالات، شرایط مرزی و مقدار نیروی اعمالی ثابت نگه داشته شد و تنها اندازه شبکه تغییر یافت. بیشینه تنش معادل فون مایز و بیشینه تغییر شکل کل به عنوان شاخص های اصلی ارزیابی انتخاب شدند. نمودار همگرایی مش بر اساس حداکثر تنش در شکل ۸ ارائه شده است.



شکل ۸. اثر اندازه مش بر حداکثر تنش معادل در کل مجموعه مدل شامل کپسول، نشاء و خاک درون کپسول نشاء

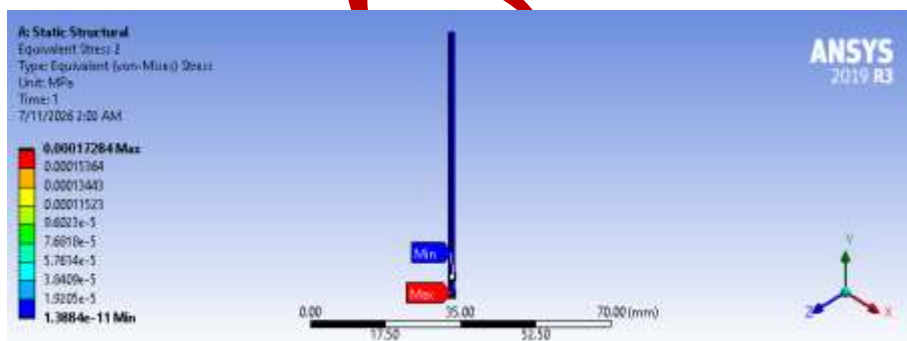
نتایج مطالعه همگرایی مش بر اساس حداکثر تنش معادل در کل مجموعه مدل شامل کپسول، نشاء و خاک درون کپسول نشان داد که مقدار حداکثر تنش معادل از ۰/۴۳۷ مگاپاسکال در اندازه مش ۰/۵ میلی متر به حدود ۰/۴۰۳ مگاپاسکال در اندازه های ۲ و ۳ میلی متر

کاهش یافته و از این مقدار به بعد تغییر محسوسی مشاهده نمی شود. همچنین اختلاف نتایج بین اندازه‌های ۲ و ۳ میلی‌متر کمتر از ۰/۱ درصد بود که بیانگر دستیابی به استقلال مش است. باتوجه به کاهش قابل توجه تعداد المان‌ها و زمان محاسبات، اندازه مش ۱ میلی‌متر به عنوان اندازه مش بهینه برای ادامه شبیه‌سازی انتخاب شد.

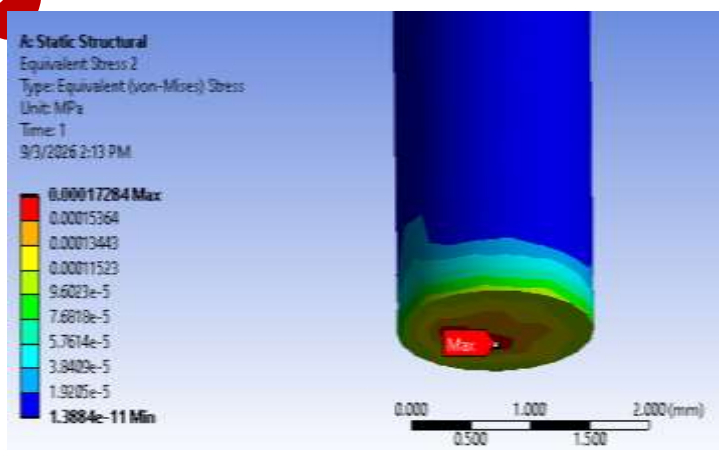
نتایج تحلیل اجزای محدود نشان داد که با اعمال نیروی برخورد ۲/۴۵۷ نیوتن، بیشینه تنش معادل فون مایزس ایجاد شده در نشاء برابر با ۰/۰۰۰۱۷۳ مگاپاسکال، بیشینه کرنش معادل  $5/8446 \times 10^{-6}$  و بیشینه تغییر شکل کل ۰/۰۰۴۹۷ میلی‌متر به دست آمد. همچنین بیشینه مقادیر تنش و کرنش در ناحیه تماس نشاء با خاک درون کپسول و در قسمت بالایی و انتهای آزاد نشاء و در واقع محلی که به بدنه کپسول نیرو اعمال شده مشاهده گردید، درحالی که سایر نواحی نشاء تحت تنش و کرنش بسیار ناچیزی قرار گرفتند. توزیع نتایج نشان می‌دهد که تغییر شکل در طول ساقه به صورت تدریجی افزایش یافته و بیشترین مقدار آن در انتهای آزاد نشاء رخ داده است.

در مدل اجزای محدود پژوهش حاضر، نیروی برخورد به صورت مستقیم به ساقه نشاء اعمال نشد، بلکه بر بدنه کپسول وارد شد و به واسطه تماس مکانیکی تعریف شده بین کپسول و نشاء، بار به ساقه منتقل گردید. بنابراین، تمرکز تنش در ناحیه تماس و انتقال بار، ناشی از نحوه انتقال بار از کپسول به نشاء است. با فاصله گرفتن از این ناحیه، مقدار تنش در طول ساقه کاهش می‌یابد. این الگوی توزیع تنش با شرایط بارگذاری و نحوه تعریف تماس در مدل سازگار است.

توزیع تنش معادل فون مایزس در شکل ۹ ارائه شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود، بیشترین تنش در ناحیه تماس و انتقال بار از خاک درون کپسول به نشاء ایجاد شده و با فاصله گرفتن از این ناحیه، مقدار تنش به سرعت کاهش می‌یابد. به منظور نمایش واضح تر ناحیه بحرانی، نمای بزرگ‌نمایی شده این ناحیه نیز در شکل ارائه شده است.



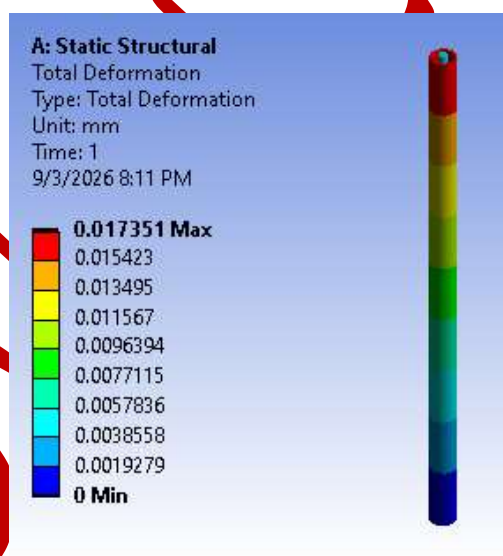
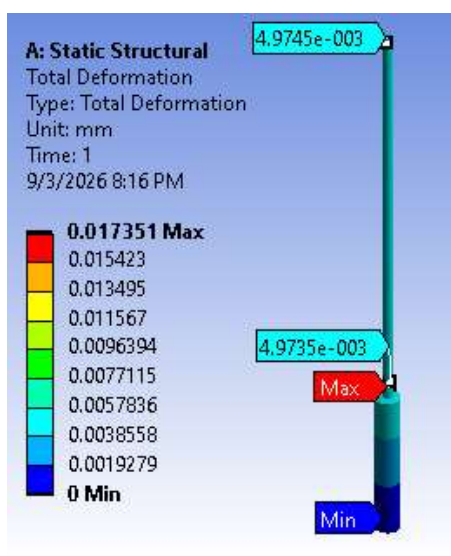
الف) تصویر کلی و نمای از دور نشاء توزیع تنش در نشاء



ب) نمای بزرگ شده قسمتی که تنش در آن توزیع شده است (این قسمت قسمتی از نشاء است که بالای ریشه قرار دارد و روی سطح خاک درون کپسول قرار می گیرد)

شکل ۹. توزیع تنش معادل فون مایز در نشاء برنج مدل سازی شده

توزیع تغییر شکل کل در شکل ۱۰ نشان داده شده است. بیشترین تغییر شکل در قسمت بالایی کپسول حاوی نشاء که بار بر آن اعمال شد اتفاق افتاد. با توجه به این که هدف بررسی ساقه نشاء است، بدنه کپسول در قسمت ب شکل ۹ پنهان شد تا تغییر شکل ناشی از اعمال بار بر نشاء بررسی شود. همان طور که در شکل مشاهده می شود بیشترین جابجایی در قسمت آزاد نشاء که درون خاک نیست مشاهده شد، در حالی که ناحیه مقید تقریباً بدون جابه جایی باقی ماند. این الگو با شرایط مرزی مدل قابل توضیح است؛ به طوری که یک انتهای نشاء که شامل ریشه آن است و درون خاک موجود در کپسول قرار دارد و انتهای مقابل آن آزاد است. با توجه به طول نسبتاً زیاد ساقه، جابه جایی ناشی از بارگذاری در امتداد ساقه افزایش یافته و در فاصله دورتر از محل قید، یعنی در انتهای آزاد، به بیشینه می رسد.



الف) توزیع تغییر شکل در مجموعه مدل شامل بدنه کپسول، نشاء و خاک درون آن

ب) توزیع تغییر شکل در ساقه نشاء ناشی از اعمال نیرو به بدنه کپسول حاوی نشاء

شکل ۱۰. توزیع تغییر شکل کل در نشاء برنج مدل سازی شده

لازم به ذکر است که بیشینه تغییر شکل و بیشینه تنش الزاماً در یک موقعیت مکانی قرار نمی گیرند. تنش معادل ون مایز بیانگر وضعیت موضعی تنش در ماده است و در مدل حاضر حداکثر مقدار آن در قسمت بالای ریشه یعنی بدنه ساقه نشاء همان قسمتی که تحت بار کششی دچار آسیب گردید، اتفاق افتاد. در حالی که تغییر شکل کل بیانگر جابه جایی حاصل از پاسخ کلی ساقه تحت بارگذاری و شرایط مرزی است. از این رو، افزایش تغییر شکل در جهت انتهای آزاد، در حالی که بیشینه تنش در نزدیکی ناحیه انتقال بار قرار دارد، با رفتار مکانیکی مدل حاضر سازگار است.

مقادیر بسیار پایین تنش، کرنش و تغییر شکل نسبت به مقدار به دست آمده از آزمایش تجربی نشان می دهد که نیروی وارد بر نشاء در شرایط طراحی سامانه، فاصله قابل توجهی با محدوده آسیب مکانیکی بافت گیاهی دارد. از آنجاکه میانگین تنش شکست برابر با ۱/۱۵ مگاپاسکال محاسبه شد و تنش ایجاد شده در شبیه سازی حدود ۰/۱۷۳ کیلو پاسکال است. از آنجایی که تنش شکست در آزمایش عملی بسیار بیشتر از مقدار شبیه سازی شده است، نشان می دهد نشاء در محدوده رفتار الاستیک باقی می ماند. همچنین تغییر شکل کمتر از ۰/۰۰۵ میلی متر بیانگر آن است که نیروی حاصل از پرتاب موجب تغییر شکل قابل ملاحظه در بافت نشاء نشده و احتمال آسیب مکانیکی

در شرایط طراحی حاضر بسیار پایین است؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مکانیزم پرتاب طراحی شده، از نظر مکانیکی برای انتقال نشاء مناسب بوده و قادر است عملیات پرتاب را بدون ایجاد تنش‌های مخرب انجام دهد.

در مجموع، نتایج شبیه‌سازی عددی در کنار داده‌های تجربی نشان می‌دهد که شرایط پرتاب انتخاب شده منجر به اعمال تنش‌های مخرب بر نشاء نشده و سلامت بصری آن حفظ می‌شود. در ارزیابی‌های بصری بلافاصله پس از پرتاب، شکست یا آسیب مکانیکی ظاهری در کپسول‌های حاوی نشاء و خود نشاء مشاهده نشد. این یافته اهمیت تطبیق طراحی سامانه پرتاب با خواص مکانیکی واقعی نشاء را تأیید کرده و نشان می‌دهد که سامانه پیشنهادی می‌تواند زمینه‌ای برای طراحی سامانه قابل نصب بر روی پهپاد جهت کاشت پهپادی نشاء برنج باشد.

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک سامانه نوین کاشت پرتابی نشاء برنج مجهز به کپسول محافظ باهدف کاهش آسیب مکانیکی و بهبود استقرار نشاء در خاک طراحی، ساخته و ارزیابی شد. نتایج نشان داد که استفاده از ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی واقعی نشاء در طراحی و مدل‌سازی، نقش مؤثری در تعیین شرایط عملکردی سامانه دارد. آزمون‌های پرتاب نشان داد که مکانیزم دو فلاپیول قادر به ایجاد پرتاب پایدار و نفوذ مناسب کپسول در بستر شبیه‌سازی شده شالیزار است؛ به‌طوری که در ارتفاع ۲ متر، بیشترین عمق نفوذ ۰/۱۰ متر و نیروی برخورد ۲/۴۵۷ نیوتن به‌دست آمد و هیچ‌گونه شکست یا آسیب ظاهری در نشاء مشاهده نشد.

از نظر عملکرد مکانیکی سامانه، عمق نفوذ ۰/۱۰ متر، نشان داد که کپسول توانایی نفوذ و استقرار پایدار در بستر گل را دارد. در آزمون‌های انجام‌شده، نفوذ کپسول بدون واژگونی یا انحراف جانبی محسوس انجام شد و شکست یا تغییر شکل مخرب در نشاء نیز مشاهده نشد. با این حال، مناسب بودن عمق ۱۰ سانتی‌متر از دیدگاه زراعی را نمی‌توان صرفاً بر اساس نتایج حاضر به‌عنوان عمق بهینه تعیین کرد؛ زیرا در این پژوهش رشد ریشه، استقرار زیستی نشاء و عملکرد گیاه در عمق‌های مختلف ارزیابی نشده است. بنابراین، مقدار ۱۰ سانتی‌متر را می‌توان در شرایط آزمایشگاهی حاضر به‌عنوان یک عمق نفوذ قابل قبول از نظر عملکرد مکانیکی سامانه در نظر گرفت، در حالی که تعیین عمق بهینه زراعی نیازمند آزمون‌های مزرعه‌ای و بررسی شاخص‌های رشد و استقرار نشاء است.

نتایج مدل تحلیلی و شبیه‌سازی اجزای محدود نیز نشان داد که تنش، کرنش و تغییر شکل ایجادشده در نشاء تحت شرایط بحرانی بارگذاری بسیار کمتر از محدوده آسیب مکانیکی قرار دارد. به‌طور کلی، ترکیب روش‌های تجربی، تحلیلی و عددی، رویکردی مناسب برای ارزیابی و توسعه سامانه‌های نوین استقرار نشاء بوده و سامانه پیشنهادی می‌تواند به‌عنوان راهکاری برای افزایش قابلیت مکانیزاسیون کاشت برنج در اراضی کوچک، شیب‌دار و دارای محدودیت دسترسی به ماشین‌های متداول مورد توجه قرار گیرد.

### REFERENCES

- Abubakar A.J., Iya S.A., Aliyu B, and Tashiwa Y.I. (2020). Determination of physico-mechanical properties of tomato seedling for design of a tomato transplanter. *Journal of agriculture engineering and technology*, 25(1), 106 - 122.
- Al-Zube, L., Sun, W., Robertson, D., and Cook, D. (2018). The elastic modulus for maize stems. *BioMed central*. 14, 11. DOI: 10.1186/s13007-018-0279-6.
- Bassuony, N.N., and Zsembeli, J. (2019). Effect of planting method on the quality of three Egyptian rice varieties. *Agriculture*, 65 (3), 119 – 127. DOI: 10.2478/agri-2019-0012.

Chen, K., Yuan, Y., Zhao, B., Jin, X., Lin, y., and Zheng, Y. (2022). Finite element modal analysis and experiment of rice transplanter chassis. *Power and machinery system*. 15 (5). DOI: 10.25165/j.ijabe.20221505.6230.

Ciupak A., Dziwulska-Hunek A., Gladyszewska B., and Kwasniewska A. (2019). The relationship between physiological and mechanical properties of *Acer plantanoides* L. and *Tilia cordata* Mill. Leaves and their seasonal senescence. *Scientific Reports*. DOI: 10.1038/s41598-019-40645-z.

Daum, Th. (2022). Agricultural mechanization and sustainable agrifood system transformation in the Global South. *FAO Agricultural Development Economics Working Paper*. DOI: 10.4060/cc2625en.

FAO. (2022). The state of food and agriculture. Leveraging automation in agriculture for transforming agrifood systems. DOI: 10.4060/cb9479en.

FAO. (2025). Agricultural production statistics 2010-2024. *FAOSTAT analytical brief* 121.

Feng, Y., Liu, M., Wang, K., Ling, Y., Hu, Q., Zhang, H., and Zhang, H. (2024). Optimal seeding rate enhances seedling quality, mechanical transplanting quality, and yield in hybrid rice. *Frontiers in Plant Science*. DOI: 10.3389/fpls.2024.1427972.

Ghonimy M., Alayouni R., Alshehry G., Barakat H., and M. Ibrahim M. (2025). Integrated physical-mechanical characterization of fruits for enhancing post-harvest quality and handling efficiency. *Foods*, 14, 2521. DOI: 10.3390/foods14142521

He, L., Luo, H., Duan, M., Kong, L., and Tang, X. (2022). Mechanized hybrid rice seed production: planting density, the flight height of an unmanned aerial vehicle, fertilizer application, and the row-ratio of parents. *Agronomy*, 12, 1572. DOI: 10.3390/agronomy12071572.

Hou, L., Han, X., Fan, Y., Bai, J., Ding, Zh., Zhang, X., Song, M., and Wang, K. (2024). Design and testing of a sowing drone based on rice precision strip seeding. *Agricultural engineering*, 73 (2). 351 – 363. DOI: 10.35633/inmateh-73-29.

Hieu Luu, T., Nguyen, T.T., Hieu Ngo, Q., Cuong Nguyen, C., and Ky Phuc, Ph. N. (2025). UAV-based estimation of post-sowing rice plant density using RGB imagery and deep learning across multiple altitudes. *Frontiers in computer science*. DOI: 10.3389/fcomp.2025.1551326.

Jiang, L., Zhu, T., Tang, Q., Wu., J., Jiang, D., and Huang, M. (2024). Mechanical characteristic testing and parameter optimization of Rapeseed blanket seedling conveying for transplanters. *Agriculture*. 14 (5): 699. DOI: 10.3390/agriculture14050699.

Jin-Long B., Fanf-fu X., Chao H., Shi Q., Jia-lin G., Jing X., Hong-cheng Zh., and Hai-yan W. (2018). Effect of planting methods on yield and quality of different types of japonica rice in northern Jiangsu plain, China. *Journal of Integrative Agriculture*, 17 (12), 2624-2635. DOI: 10.1016/S2095-3119(18)62141-0.

Joong Son, k. (2025). Discrete element method analysis of soil penetration depth affected by spreading speed in drone-seeded rice. *Agriculture*, 15, 422. DOI: 10.3390/agriculture15040422.

Kurowski, P., Vautrin, Ch., Genet, P., Hattali, L., Fabi, R.P., and Kolb, E. (2018). Mechanical properties of drying plant roots: evolution of the longitudinal Young's modulus of chick-pea roots with desiccation. *arXiv preprint. arXiv: 1804.08879*.

Ling, Y., Liu, M., Feng, Y., Xing, Zh., Gao, H., Wei, H., Hu, Q., and Zhang, H. (2025). Effects of increased seeding density on seedling characteristics, mechanical transplantation quality, and yield of rice with crop straw boards for seedling cultivation. *Journal of integrative agriculture*, 24 (1), 101-113. DOI: 10.1016/j.jia.2023.12.018.

Liu, B., Lixian, Z., and Gao, H. (2006). Poisson ratio can play a crucial role in mechanical properties of bio composites. *Mechanical of materials*, 38 (12), 1128-1142. DOI: 10.1016/j.mechmat.2006.02.002.

Mo, Ch., Guan, W., Huang, G., Lu, Y., and Zhong, W. (2014). Finite element analysis on frame of ricetransplanting mechanism at different operation conditions. *Applied mechanics and materials*. 455, 202-206. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.455.202

Poojitha, K., Parvalika, K.M. Theerthana, T., and Prashanth, D.V. (2024). Transplate V/S direct-seeded method of rice: A review. *Journal of experimental agriculture international*, 46 (5), 681-685. DOI: 10.9734/jeai/2024/v46i52422.

Periasamy V., Veppangadu Marrapa Gounder D., Ramasamy K. (2022). Factors influencing the performance of mechanical and effectors during automatic transplanting of tomato seedling. *Journal of applied and natural science*, 14, 227-231. DOI: 10.31018/jans.v14iSI.3613.

Qiu, Sh., Pan, B., Wang, Z., Fang, Sh., Hu, J., Yang, Sh., Wang, W., Cui, Q., and Yuan, X. (2024). Research on the tensile and impact mechanical properties of millet ear petals. *14 (1925)*.

Sohrabi, S. (2024). Rice cultivation in Iran expands to 650,000 hectares. *Tehran Times*.

Tomobe, H., Tsugawa, S., Yoshida, Y., Arita, T., Yi-Lun Tsai, A., Kubo, M., Demura, T., and Sawa, Sh. (2023). A mechanical theory of competition between plant root growth and soil pressure reveals a potential mechanism of root penetration. *Scientific reports*, 13, 7473. DOI: 10.1038/s41598-023-34025-x.

- Velloso, N. S., Goncalves, A. L., Magalhaes, R. R., Santos, F. L., and Andrade, E. T. (2018). The finite element method applied to agricultural engineering: A review. *Current agriculture research journal*, 6 (3). DOI: 10.12944/CARJ.6.3.08.
- Wanga, M. A., Watanabe, Y., Kamati, N. N., Hukununa, R. M. K., Alweendo, B. N., Nangula, M. N., Nanhapo, P. I., Awala, S. K., Fujisawa, M. (2025). Impact of paddy fields on soil salinity and sodicity at Kalimbeza rice project, Namibia. *Journal of soil science*, 15 (7). DOI: 10.4236/ojss.2025.157020.
- Wei, Ch., M. Lintilhac, Ph., and J. Tanguay, J. (2001). An insight into cell elasticity and load-bearing ability. Measurement and theory. *Plant physiology*, 126, 1129-1138. DOI: 10.1104/pp.126.3.1129.
- Xue, K., Gao, K., Kuang, F., Zhang, Sh., Liao, J., and Zhu, D. (2022). Machinery-plant-paddy soil coupling model based numerical simulation method of mechanical transplanting process of big rice seedling. *Computers and electronics in agriculture*. DOI: 10.1016/j.compag.2022.107053
- Ye, Ch., Zheng, G., Tao, Y., Xu, Y., Chu, G., Xu, Ch., Chen, S., Liu, Y., Zhang, X., and Wang, D. (2024). Effect of soil texture on soil nutrient status and rice nutrient absorption in paddy soils. *Agronomy*, 14 (6). DOI: 10.3390/agronomy14061339.
- Yuan, P., Yang, Y., Wei, Y., Zhnag, W., and Ji, Y. (2024). Design and experimentation of rice seedling throwing apparatus mounted on unmanned aerial vehicle. *Agriculture*, 14, 847. DOI: 10.3390/agriculture14060847.
- Yu. Q., Wan., Y., Gong, Y., Chen, X., Wang, Zh., and Hu, J. (2025). Experimental study on basic physical parameters and mechanical properties of *Codonopsis pilosula* seedlings. *AgriEngineering*, 7, 283. DOI: 10.3390/agriengineering7090283.
- Zulkifli, N., Hashim, N., Harith, H. H., Firdza, M., Shukery, M., Onwude, D. I., and Sairi, M. (2021). Reliability of finite element analysis to determine the mechanical responses in fruits and root-vegetables. *Advances in agricultural and food research journal*. 2 (1). DOI: 10.36877/aafjr.a0000205.
- Zhijun, W., Yu, Ch., Shengcai, Sh., Hao, D., Xiaobing, L., and Lijia, X. (2023). Design and experimental analysis of drone rice direct seeding device. *Journal of engineering science and technology review*, 16, 5, 132-139.
- Zhu, H., Lu, X., Zhang, K., Xing, Zh., Wei, H., Hu, Q., and Zhang, H. (2023). Optimum basics seedling density and yield and quality characteristics of unmanned aerial seeding rice. *Agronomy*, 13, 1980. DOI: 10.3390/agronomy13081980