



## The Effect of Ultraviolet (UV-C) Irradiation On the Mechanical Properties and Storage Life of Golden Delicious Apples After Bruising

Hossine Ghayour<sup>1</sup> , Mahdi Ghasemi- Varnamkhasti<sup>2</sup> , Mojtaba Naderi-Boldaji<sup>3</sup>

1. Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

E-mail: [h.ghayour1363@yahoo.com](mailto:h.ghayour1363@yahoo.com)

2. Corresponding Author, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. E-mail: [ghasemymahdi@gmail.com](mailto:ghasemymahdi@gmail.com)

3. Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

E-mail: [m.naderi@ut.ac.ir](mailto:m.naderi@ut.ac.ir)

### Article Info

**Article type:** Research Article

**Article history:**

**Received:** March. 12, 2026

**Revised:** May. 31, 2026

**Accepted:** June. 28, 2026

**Published online:** Autumn 2026

**Keywords:**

**Punch test,**

**Sound velocity,**

**Apple,**

**Ultraviolet radiation,**

**Mechanical bruising**

### ABSTRACT

This research was conducted to investigate the effects of dynamic impact, ultraviolet (UV) light irradiation, and storage time on the mechanical and acoustic quality indices of Golden Delicious apple fruit. The experiments were performed in a completely randomized factorial design with three replications. Apples were treated with impact energy levels of 0.015, 0.075, and 0.18 Joules, UV irradiation durations of 0, 20, 40, and 60 minutes, and storage periods of 3 and 10 days. The results showed that impact energy levels, UV-C irradiation duration, and storage period significantly affected the compression force (punch force), bruise volume, and acoustic wave speed. The greatest reduction in compression force (15.36 N) and sound velocity (138.90 m/s), and the largest bruise volume (693.59 mm<sup>3</sup>) were observed under the condition of maximum impact energy (0.18 J), indicating structural tissue damage and reduced mechanical resistance at this energy level. UV irradiation, especially at 60 minutes, modulated the negative effects of impact and storage, leading to an increase in compression force (up to 21.53 N), a decrease in bruise volume (416.58 mm<sup>3</sup>), and an increase in sound velocity (up to 158.97 m/s), which suggests the preservation of tissue structural integrity. Increasing storage time also accelerated the decreasing trend in mechanical properties (compression force and sound velocity) and the increase in bruise volume. The interaction effect between impact energy and UV-C irradiation time was significant on bruise volume; the highest bruise volume was observed in the absence of UV-C and with the maximum impact energy (0.18 J). The findings indicate that UV-C irradiation can be effective as a post-harvest method in preserving the mechanical quality and reducing impact damage in apples.

Cite this article: Ghayour, H., Ghasemi-Varnamkhasti, M., Nader-Boldaji, M., (2026) The effect of ultraviolet (UV-C) irradiation on the mechanical properties and storage life of Golden Delicious apples after bruising., *Iranian Journal of Biosystem Engineering*, 57 (3), 91-110. <https://doi.org/10.22059/ijbse.2026.412209.665642>

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijbse.2026.412209.665642>



## EXTENDED ABSTRACT

### Introduction

Apple (*Malus myrus*) is one of the oldest fruits known to humankind, with its origin, according to some theories, tracing back to the Caucasus region, the Caspian Sea, and the Mediterranean. This fruit, belonging to the Rosaceae family, has been cultivated in regions such as Iran, Egypt, Rome, and Greece. Key apple cultivars in Iran include Golden Delicious, Red Delicious, Golab, Fuji, Gala, Granny Smith, and Abbas Shahi Mashhad. Statistics from 2003 indicate that the cultivation area for apples in Iran was approximately 152,000 hectares.

One of the major challenges in Iran's agricultural sector is the high rate of post-harvest losses, which reaches up to 30% in Iran, compared to the global average of 2%. Despite traditional systems still being used for planting, maintenance, and harvesting, the highest losses occur during post-harvest stages.

Various factors contribute to increased spoilage, including mechanical damage from impact during harvesting or transportation, environmental damage such as hail and wind, and harvesting at an inappropriate time. Main strategies for reducing losses include using high-quality cultivars, proper orchard management, training on correct harvesting techniques, reforming the post-harvest process structure, and increasing the number of cold storage facilities. Determining the optimal harvest time, measured by criteria such as the sugar-to-acid ratio and tissue firmness, plays a vital role in shelf life. Early harvesting reduces quality, while late harvesting shortens the storage duration. Unfortunately, in Iran, less attention is paid to harvest time standards.

To combat rapid spoilage, modern processing methods such as irradiation (the use of ionizing radiation) have been considered. This process (also known as "cold pasteurization") sterilizes the fruit by eliminating microorganisms without causing noticeable changes in the fruit's texture or sensory characteristics. Numerous studies on Ultraviolet (UV) radiation have shown that treating fruits (such as peaches and tomatoes) with these rays, especially at low doses, delays the ripening rate and reduces storage rots. However, long-term treatment with UV-C can lead to the oxidation of the fruit's natural wax and, if the epidermal cells are damaged, the loss of the wax's regenerative capacity. Furthermore, at high doses, it may cause skin burn and a reduction in beneficial compounds like anthocyanins.

The primary objective of the research mentioned previously is to investigate the effects of Ultraviolet radiation exposure on the mechanical properties and shelf life of the Golden Delicious apple cultivar, which are subject to post-harvest bruising. This investigation also includes the use of an ultrasonic measurement method to evaluate changes in the mechanical properties of the fruit tissue

### materials and methods

The present research was conducted to investigate the effects of Ultraviolet (UV-C) irradiation on the mechanical properties and storage life of export-quality Golden Delicious apples. The apples were harvested manually from orchards in Najafabad, Isfahan (year 1401 [2022/2023]), 170 days after flowering, in early Mehr (late September/early October), to ensure freshness and freedom from mechanical damage. To prevent damage during transfer to the laboratory, export cardboard boxes with shock-absorbing straw padding were used, as apples are most vulnerable to mechanical damage in the first few days post-harvest. Upon arrival, apples with visible defects were removed, and samples were weighed and measured.

Before impact application, an ultrasonic wave speed measuring device (Ultrasonic Model ELE) was used to measure the speed of transmitted acoustic waves through the tissue. This measurement was performed using the relationship  $V=L/T$  (Equation 1), where  $L$  is the probe distance and  $T$  is the wave transit time. A sonography gel was used to improve wave transmission, and the probe direction was perpendicular to the impact plane.

Dynamic impact was applied using a pendulum test at three energy levels (0.015, 0.075, and 0.18 Joules). The low energy levels correspond to transportation bumps, and the higher levels simulate mechanical harvesting impacts. A C304 stainless steel impact surface was installed beneath the pendulum stage to simulate a factory environment.

After impact application, the fruits were treated with a UV-C lamp (wavelength 254 nm) at a distance of 30 cm for control (untreated), 20, 40, and 60 minutes to delay spoilage. The apples were stored in the laboratory environment for 3 and 10 days. Subsequently, the wave transit speed was measured again using ultrasound. Additionally, a texture analyzer (Instron) was used to measure the maximum compression force (up to a depth of 6 mm). Finally, the bruise volume was calculated by peeling the skin at the damaged site and measuring the diameter and depth of the indentation, using the relationship  $BV=\pi/6 dD^2$ .

### Results and discussion

Analysis of variance (ANOVA) results indicated that all three investigated factors (Impact Energy, UV Irradiation Duration, and Storage Period) had a significant effect at the 99% confidence level on all measured

parameters (Puncture Force, Bruise Volume, and Wave Transit Velocity). Furthermore, the pairwise interaction effects of these factors (Impact Energy  $\times$  Storage Period, UV  $\times$  Storage Period, and Impact Energy  $\times$  UV) were also significant on the studied properties. The impact energy level significantly affected all measured characteristics. The highest compressive resistance (puncture force) was observed in the control treatment (no impact) at 43.31 N, while the most severe impact (0.18 J) resulted in the lowest force (15.36 N). Bruise volume also showed an inverse relationship with puncture force; the smallest bruise volume was related to the control, and the largest bruise volume (693.69 [mm]<sup>3</sup>) was observed at the 0.18 J level. This high-energy level was also associated with the lowest wave transit velocity (138.90 m/s).

Exposure to UV radiation had a significant effect on the puncture test force. The 60-minute treatment showed the most positive effect in preserving fruit firmness, which was accompanied by a decrease in the bruised area and an increase in ultrasonic wave transit velocity (indicating the preservation of internal tissue structure). These findings align with the results of researchers such as Jalili Marandi (1391 [2012/2013]), who state that UV preserves mechanical properties by reducing cell respiration, subsequently maintaining water content. The storage period (up to 10 days) significantly affected all three parameters at the 5% level. With an increase in the storage duration, the lowest puncture force (17.06 N) and wave velocity (141.08 m/s), and consequently, the highest bruise volume (909.65 [mm]<sup>3</sup>), were observed in the 10-day samples.

**Impact Energy  $\times$  UV Interaction Effect:** The highest force (33.38 N) and wave velocity (192.53 m/s) were recorded under the no-impact treatment combined with 60 minutes of UV irradiation. This suggests that UV radiation can partially mitigate the adverse effects of impact, which is consistent with the results of Mirjalili et al. (1391 [2012/2013]) regarding increased storage life. Conversely, the lowest force (15.45 N) and wave velocity (157.91 m/s) resulted from the combination of 0.18 J impact and zero UV time.

**Impact Energy  $\times$  Storage Period Interaction Effect:** A reduction in force and wave velocity was observed with the simultaneous increase in impact energy and storage duration (lowest force: 11.63 N at 0.18 J and 0 days of storage), aligning with the findings of Sarmayeh et al. (1397). Furthermore, the most severe bruising (1397.83 [mm]<sup>3</sup>) occurred in the combination of maximum impact (0.18 J) and the longest storage period (10 days).

Overall, the results emphasize that physical stresses (impact) and environmental stresses (UV and time) independently and interactively affect the mechanical quality of apples, and the optimal treatments—including no impact application or prolonged UV exposure—were most effective in preserving firmness and reducing tissue degradation.

## Conclusion

The analysis of the interaction effects showed that increasing the impact energy and the storage period continuously caused a decrease in puncture force and sound velocity, and an increase in bruise volume. The highest firmness, at 34.57 N, was achieved under the control conditions combined with 60 minutes of UV-C. UV-C irradiation aids in improving mechanical properties, reducing the rate of bruise increase, and enhancing the shelf life of damaged apples by decreasing respiration.

## Funding

This research was financially and spiritually supported by the Research Vice-Chancellery of Shahrekord University, Shahrekord, Iran. The study was conducted as part of the M.Sc. thesis of the first author at the Faculty of Agriculture, Shahrekord University.

## Authorship Contribution

Conceptualization: Mahdi Ghasemi Varnamkhasti;

Methodology: Mahdi Ghasemi Varnamkhasti, Mojtaba Naderi Boldaji;

Formal analysis: Hossine Ghayour;

Investigation: Hossine Ghayour; Mahdi Ghasemi Varnamkhasti, Mojtaba Naderi Boldaji.

Data curation: Hossine Ghayour; Mahdi Ghasemi Varnamkhasti, Mojtaba Naderi Boldaji.

Writing—original draft preparation: Hossine Ghayour;

Writing—review and editing: Mahdi Ghasemi Varnamkhasti, Mojtaba Naderi Boldaji;

Supervision: Mahdi Ghasemi Varnamkhasti, Mojtaba Naderi Boldaji.

All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

## Declaration of Generative AI and AI-assisted technologies in the writing process

No artificial intelligence tools were used in the article writing process.

## Data Availability Statement



The data that support the findings of this study are available from the authors upon reasonable request.

#### **Acknowledgements**

The authors would like to express their sincere appreciation to the Research Vice-Chancellery of Shahrekord University and the Faculty of Agriculture, Shahrekord University for supporting this research.

The authors also thank the anonymous reviewers for their constructive comments and valuable suggestions that improved the quality of this manuscript.

#### **Ethical Considerations**

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and any form of scientific misconduct.

#### **Conflict of Interest**

The authors declare no conflict of interest.

## تأثیر تابش فرابنفش (UV-C) بر خصوصیات مکانیکی و عمر انبارمانی سیب رقم گلدن دلشیز پس از کوفتگی

حسین غیور نجف‌آبادی<sup>۱</sup>، مهدی قاسمی ورنامخواستی<sup>۲</sup>، مجتبی نادری بلداجی<sup>۳</sup>

۱. گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران، رایانامه: [h.ghayour1363@yahoo.com](mailto:h.ghayour1363@yahoo.com)

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران، رایانامه:

[ghasemymahdi@gmail.com](mailto:ghasemymahdi@gmail.com)

۳. گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران، رایانامه: [m.naderi@ut.ac.ir](mailto:m.naderi@ut.ac.ir)

| اطلاعات مقاله                                                                               | چکیده                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| نوع مقاله: مقاله پژوهشی                                                                     | این پژوهش به منظور بررسی اثرات ضربه دینامیکی، تابش پرتو فرابنفش و زمان انبارمانی بر شاخص‌های کیفیت مکانیکی و آکوستیکی میوه سیب رقم گلدن دلشیز انجام شد. آزمون‌ها به صورت فاکتوریل در طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار، بر روی سیب‌های تیمار شده با سطوح انرژی ضربه ۰/۱۵، ۰/۰۷۵، ۰/۱۸ ژول، مدت زمان تابش پرتو (۰، ۲۰، ۴۰، ۶۰ دقیقه) و دوره‌های نگهداری (۳ و ۱۰ روزه) اجرا گردید. نتایج نشان داد که سطوح انرژی ضربه، مدت‌زمان تابش UV-C و دوره انبارمانی به‌طور معنی‌داری بر نیروی فشاری پانچ، حجم کوفتگی و سرعت گذر موج صوتی تأثیر گذاشتند. بیشترین کاهش نیروی فشاری (۱۵/۳۶ نیوتن) و سرعت صوت (۱۳۸/۹۰ متر بر ثانیه) و بیشترین حجم کوفتگی (۶۹۳/۵۹ میلی‌متر مکعب) در شرایط اعمال بیشترین انرژی ضربه (۰/۱۸ ژول) مشاهده شد که بیانگر تخریب ساختار بافتی و کاهش مقاومت مکانیکی در این سطح انرژی است. تابش پرتو فرابنفش، به‌ویژه در مدت زمان ۶۰ دقیقه، اثرات منفی ضربه و نگهداری را تعدیل کرده و منجر به افزایش نیروی فشاری (تا ۲۱/۵۳ نیوتن)، کاهش حجم کوفتگی (۴۱۶/۵۸ میلی‌متر مکعب) و افزایش سرعت صوت (تا ۱۵۸/۹۷ متر بر ثانیه) گردید، که نشان‌دهنده حفظ یکپارچگی ساختاری بافت است. افزایش زمان انبارمانی نیز روند کاهشی خواص مکانیکی (نیروی فشاری و سرعت صوت) و افزایش حجم کوفتگی را تسریع نمود. اثر متقابل بین انرژی ضربه و زمان تابش UV-C بر حجم کوفتگی معنی‌دار بود؛ در حالی که بیشترین حجم کوفتگی در نبود UV-C و با حداکثر انرژی ضربه (۰/۱۸ ژول) مشاهده شد. یافته‌ها حاکی از آن است که تابش UV-C می‌تواند به عنوان یک روش پس از برداشت، در حفظ کیفیت مکانیکی و کاهش خسارت ناشی از ضربه در سیب مؤثر باشد. |
| واژه‌های کلیدی:<br>آزمون پانچ،<br>اشعه فرابنفش،<br>سرعت گذر صوت،<br>سیب،<br>کوفتگی مکانیکی. |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |

استناد: غیور نجف‌آبادی؛ حسین، قاسمی ورنامخواستی؛ مهدی، نادری بلداجی؛ مجتبی، (۱۴۰۵) تأثیر تابش فرابنفش (UV-C) بر خصوصیات مکانیکی و عمر انبارمانی سیب رقم گلدن دلشیز پس از کوفتگی، مجله مهندسی بیوسیستم ایران/ایران، ۵۷ (۳)، ۹۱-۱۱۰.



<https://doi.org/10.22059/ijbse.2026.412209.665642>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijbse.2026.412209.665642>

## مقدمه

سیب یکی از قدیمی‌ترین میوه‌هایی است که بشر آن را شناخته و جهت تغذیه به پرورش آن اقدام نموده است. نام انگلیسی آن Apple و نام علمی آن *Malus myrus* است. سیب از اعضای زیرخانواده پوموئید و میوه‌های دانه‌دار می‌باشد که متعلق به خانواده گل‌سرخیان است و طبق نظر عده‌ای از کارشناسان، موطن اصلی درخت سیب حوالی قفقاز، دریای خزر و سواحل مدیترانه می‌باشد و با گذشت زمان توسط جهانگردان به سایر نقاط جهان منتقل شده است و این میوه برای اولین بار در کشورهای ایران، مصر، روم و یونان یافت شده است (Morgan & Alison, 2002). سیب یکی از عمده‌ترین محصولات مناطق معتدله ایران است و از نظر ارقام در جهان و ایران دارای تنوع بسیاری است که برخی از مهم‌ترین ارقام آن گلدن دلشیز، رد دلشیز، گلاب، فوجی، گالا، گرانی اسمیت، و عباس شاهی مشهود است. این محصول به عنوان یکی از راهبردی‌ترین محصولات باغبانی، جایگاه ویژه‌ای در اقتصاد کشاورزی ایران دارد. بر اساس داده‌های آماری سال ۱۴۰۳، ایران با سطح زیرکشتی معادل ۲۵۴۶۰۸ هکتار و تولید سالانه بالغ بر ۴/۴۱۲ میلیون تن، در رتبه چهارم تولیدکنندگان برتر سیب در جهان قرار گرفته است. بررسی روند تولید در دو دهه اخیر نشان‌دهنده جهشی خیره‌کننده، یعنی افزایش ۱/۶ برابری از ۲/۷۷۸ میلیون تن در سال ۱۳۸۷ به ۴/۴۱۲ میلیون تن در سال ۱۴۰۳ است. این رشد کمی در مقیاس تولید جهانی، که در آن کشورهایی نظیر چین با ۴۸ میلیون تن پیش‌تاز هستند، ایران را به یکی از بازیگران کلیدی در بازارهای هدف تبدیل کرده است. در این میان، رقابت فشرده با تولیدکنندگانی نظیر ترکیه (با ۴/۱ میلیون تن تولید سالانه) در بازارهای منطقه‌ای، لزوم ارتقای استانداردهای پس‌از برداشت را بیش از پیش نمایان می‌سازد. با توجه به سهم عمده سیب در سبد صادرات محصولات باغبانی کشور، بهره‌گیری از فناوری‌های نوین پایش کیفیت و کاهش ضایعات، نه تنها یک اولویت مدیریتی، بلکه راهکاری تعیین‌کننده برای حفظ سهم بازار و افزایش توان رقابتی ایران در برابر سایر رقبای جهانی است. در همین راستا، پایش غیرتهاجمی با هدف کاهش تلفات ناشی از ضربات مکانیکی و بهبود عمر انبارمانی، گامی ضروری در جهت ارتقای بهره‌وری و پایداری زنجیره تأمین این محصول استراتژیک محسوب می‌شود (شکر بیگی و همکاران، ۱۳۹۰، فائو، ۲۰۲۴). ایجاد هر نوع تغییر در کیفیت محصولات کشاورزی منجر به غیر قابل مصرف شدن یا از بین رفتن سلامت محصول می‌گردد. در حال حاضر متوسط ضایعات میوه‌ها در کشورهای جهان دو درصد اعلام شده است و در ایران این میزان ۳۰ درصد می‌باشد که این میزان ضایعات در مراحل مختلف تولید تا توزیع ایجاد می‌شود. حدود ۱۵ درصد از محصولات کشاورزی خریداری شده در مرحله مصرف خانگی به ضایعات تبدیل می‌شود (میرزایی گرجی و همکاران، ۱۴۰۳، مطالعات کارآفرینی و توسعه پایدار کشاورزی، ۱۴۰۳، پیکار پراسان و همکاران، ۱۳۹۲).

پس از برداشت، محصولات کشاورزی می‌توانند به حیات خود ادامه داده این زندگی تا زمانی است که میزان اندوخته‌های غذایی آن در داخل محصول به پایان برسد که عوامل مختلفی می‌تواند سرعت کاهش این اندوخته‌ها را افزایش دهد و به تبع آن موجب افزایش میزان ضایعات شود (آزاد شهرکی و همکاران، ۱۳۹۶).

با توجه به اینکه هنوز سامانه‌های کاشت داشت و برداشت سیب به صورت سنتی است و انتظار است که بیشترین میزان تلفات مربوط به این مراحل باشد، اما مشاهده می‌شود که بیشترین درصد ضایعات مربوط به مراحل پس از برداشت است که می‌توان با در نظر گرفتن تمهیدات لازم میزان این تلفات را به حداقل رساند. برای کاهش میزان ضایعات محصولات کشاورزی برخی از مهمترین راهکارها عبارت‌اند از: استفاده از ارقام تجاری باکیفیت بالا، مدیریت صحیح نگهداری باغات، آموزش روش برداشت صحیح و به‌موقع، اصلاح ساختار مراحل پس از برداشت، و افزایش تعداد سردخانه‌ها (میرمحمدی و همکاران، ۱۳۹۲).

آسیب‌های مکانیکی که به محصولات کشاورزی قبل و در هنگام و پس از برداشت وارد می‌شود با یکدیگر متفاوت است. قبل از برداشت و در زمانی که میوه هنوز روی درخت و به شکل یک اندام گیاهی است و سپس در مراحل مختلف رشد به طرق مختلف دچار آسیب می‌شود. در اثر برخورد میوه‌ها با یکدیگر یا برخورد با شاخه‌ها دچار سوراخ شدن، کوفته شدن و خراشیدگی شده همچنین پرندگان یا حیوانات گیاه‌خوار از راه پوست به میوه نفوذ کرده و میوه را مصرف می‌کنند. همچنین قبل از برداشت، شرایط آب‌وهوا یکی دیگر از علل ایجاد آسیب است. تگرگ و بادهای فصلی شدید نیز باعث ایجاد و تشدید آسیب به محصولات می‌شود. آسیب‌های وارد به میوه‌ها قبل از برداشت به صورت پراکنده روی داده و کنترل آن تقریباً غیرممکن است. دسته دیگری از آسیب‌ها در هنگام برداشت میوه با دست روی می‌دهد. بیشترین آسیب وارد شده به میوه‌ها توسط عوامل انسانی و در هنگام برداشت ایجاد می‌گردد (افکاری سیاح و همکاران، ۱۳۸۷).

عوامل متعددی بر آسیب‌های ضربه‌ای وارد بر سیب دخیل می‌باشد که می‌توان آنها را به موارد زیر تقسیم‌بندی کرد: تأثیر نوع جنس مواد بسته‌بندی نوع کابین حمل بار و سطوح درگیر با سطح میوه در هنگام حمل‌ونقل، حساسیت میوه نسبت به ضربه که می‌تواند تابعی از میزان رسیدگی، دمای هوا و نوع رقم سیب باشد، و مقدار و ماهیت ارتعاش در فرایند انتقال و ضربه حاصل بر میوه. مجموعه این عوامل به یکدیگر وابسته بوده و بر کیفیت میوه در پایان زنجیره انتقال مؤثر می‌باشد. تعیین اینکه زمان مناسب برای برداشت چه موقع باشد نقش مهمی در میزان انبارمانی و کاهش ضایعات میوه‌ها دارد (Opara et al., 2014). در طی فرایند تکامل فیزیولوژیک میوه‌ها، تغییرات قابل توجه فیزیکی و شیمیایی در محصول اتفاق می‌افتد که با توجه به این تغییرات، زمان برداشت میوه تعیین می‌شود. در صورتیکه که محصول دیرتر از زمان مناسب برداشت شود، علاوه بر کاهش عمر انبارمانی باعث افزایش ضایعات میوه در فرایندهای حمل‌ونقل می‌شود. در صورت برداشت محصول به صورت نارس کیفیت مناسبی نخواهد داشت. برداشت به موقع محصولات باغی یکی از مهمترین فاکتورها در کاهش میزان ضایعات می‌باشد.

زمان برداشت را می‌توان با آزمایش‌هایی مانند نسبت قند به اسید، اندازه‌گیری سفتی بافت میوه و تعداد روزهای بعد از گلدهی تعیین نمود. برای تعیین زمان دقیق برداشت هر میوه استانداردهایی تعریف شده است. متأسفانه در کشور ایران کمتر به این استانداردها توجه شده است درحالی‌که در اکثر کشورها چنانچه محصولی زودتر یا دیرتر از موقع برداشت شود علاوه بر اینکه کشاورز را جریمه نموده اجازه فروش محصول داده نمی‌شود (منبعی، ۱۳۸۲). یکی دیگر از چالش‌های مهم در کشاورزی، فساد سریع محصولات پس از برداشت است. به‌طور کلی هرساله حجم بالایی از مواد غذایی به علت هجوم حشرات و فاسدشدن از بین می‌رود. در سال ۱۹۵۰ دانشمندان بر آن شدند جهت کاهش خسارات وارد بر مواد غذایی از روش‌های جدید جهت فرآوری مواد غذایی استفاده کنند. پرتودهی یکی از روش‌های مؤثر در این زمینه است. در این فرایند اشعه یونیزه‌کننده باعث از بین رفتن میکروارگانیسم‌های مخرب مواد غذایی می‌شود. پرتودهی جز فرایندهای سرد است که دما در این فرایند افزایش قابل توجهی نداشته و در بافت محصولات تغییرات فیزیکی یا مشخصات حسی خاصی به جا نمی‌ماند. به طور مثال یک سیب قرار گرفته در معرض اشعه همچنان ترد و آبدار است (محمدرزادری و همکاران، ۱۳۹۲).

پرتودهی فرآیندی است که در آن ماده (بیولوژیکی و غیر بیولوژیکی) در معرض تابش اشعه‌های مختلف قرار گرفته و انرژی این اشعه‌ها را جذب می‌کند. به میزان انرژی جذب شده دز گویند و با واحد (GY) نشان داده می‌شود پرتوهای اتمی از طریق فرایند یونیزاسیون، مولکول‌های ماده را برانگیخته یا یونیزه کرده و در نتیجه باعث شکسته‌شدن پیوندهای شیمیایی و تشکیل یون‌ها و رادیکال‌های آزاد در محیط می‌شوند. این فرایند باعث شکستن ساختار DNA میکروارگانیسم‌ها شده که منجر به از بین رفتن آن می‌شود و به‌نوعی باعث استریلیزه کردن محصولات و از بین بردن قارچ‌ها می‌شود (Sommers & Fan, 2006).

تاکنون تحقیقاتی زیادی بر روی سرعت رسیدگی محصولات که با پرتوهای فرابنفش تیمار شده‌اند انجام شده است. در اکثر این تحقیقات نشان داده شده که میوه‌هایی که با استفاده از پرتوهای فرابنفش تیمار شده است دیرتر دچار رسیدگی و دچار پوسیده شدن می‌شود. (Stevens et al. 1998) نشان دادند میوه هلوی تیمار شده با پرتو فرابنفش به علت افزایش فعالیت آنزیم‌های فنیل آلانین آمونیا لایز دیرتر می‌رسند. این نتایج در تحقیقات (Wilson et al. 1994) بر روی میوه گوجه نیز اثبات شده است. مشابه این تحقیقات توسط (Lui ۲۰۱۲ et al. همچنین (خالقی و همکاران، ۱۳۹۸) انجام شد و نشان داده شد که در دزهای پایین پرتوهای فرابنفش علاوه بر تأخیر در میزان رسیدگی میوه شاهد، میزان پوسیدگی‌های انباری میوه نیز کاهش می‌یابد.

تیمار نمودن بلند مدت میوه‌ها با پرتوهای UV-C سبب می‌شود واکس روی میوه‌ها اکسید شده و از بین برود. تولید دوباره واکس میوه توسط سلول‌های اپیدرم جوان انجام می‌شود. در صورتی که این تیمار به صورت بلند مدت باشد سلول‌های اپیدرم آسیب‌دیده و توان تولید واکس را در خود از دست می‌دهند (Charles et al., 2008). همچنین (Pan et al. 2004) نشان دادند تیمار نمودن میوه با پرتوهای فرابنفش سبب ایجاد سوختگی روی پوست میوه و ایجاد لکه‌های نرم و شل شده، همچنین میزان آنتوسیانین و اسید فنولی کاهش می‌یابد.

با وجود مطالعات متعدد پیرامون اثرات تابش پرتو فرابنفش بر تعویق رسیدگی و کنترل پوسیدگی‌های میکروبی در محصولات باغی، همچنان یک خلأ پژوهشی مشهود در زمینه تلفیق مدیریت آسیب‌های مکانیکی (کوفتگی) و استفاده از پرتو فرابنفش به عنوان ابزاری برای تثبیت کیفیت ساختاری وجود دارد. در واقع، تاکنون تأثیر این تیمار بر ترمیم یا تعدیل روند تخریب بافت‌هایی که به‌طور فیزیکی دچار آسیب (کوفتگی) شده‌اند، کمتر مورد توجه قرار گرفته و مکانیسم‌های محافظتی بافت آسیب‌دیده در پاسخ به تابش پرتو فرابنفش به درستی تبیین

نشده است. از این رو، پژوهش حاضر با هدف بررسی اثرات کاربردی پرتو فرابنفش بر تغییرات خصوصیات مکانیکی و عمر انبارمانی سیب رقم گلدن دلشیز به عنوان یکی از ارقام تجاری استراتژیک در ایران طراحی شده است. نوآوری اصلی این پژوهش، تحلیل اثرات تقابلی تابش پرتو فرابنفش بر پایداری بافت‌های آسیب‌دیده و بهره‌گیری از تکنیک غیرمخرب سنجش سرعت فراصوت جهت ارزیابی دقیق دگرگونی‌های خواص مکانیکی است. این رویکرد نوین، ضمن روشن ساختن چگونگی پاسخ بافت کوفته به تیمار فرابنفش، ابزاری علمی و کاربردی را برای کاهش ضایعات در مراحل پس از برداشت و ارتقای مدیریت کیفیت در سردخانه‌ها ارائه می‌دهد.

## مواد و روش‌ها

در این پژوهش از سیب‌درختی گلدن دلشیز که از ارقام صادراتی سیب‌های تولیدی در کشور می‌باشد، استفاده شد. به منظور اطمینان از تازه بودن سیب‌ها و عدم وجود هرگونه آسیب مکانیکی در طی فرآیند برداشت تا انتقال به فروشگاه، سیب مورد استفاده از باغات میوه نجف‌آباد از شهرستان‌های استان اصفهان در سال ۱۴۰۱ به صورتی دستی پس از ۱۷۰ روز گذشتن از زمان گلدهی و در اوایل مهر برداشت انجام شد (Hemmaty et al., 2007).

همچنین به منظور جلوگیری از اعمال ضربه‌های دینامیکی و استاتیکی به میوه‌ها که باعث ایجاد کوفتگی در فرآیند انتقال به آزمایشگاه می‌شود، از جعبه‌های مقوایی صادراتی و در بین نمونه‌ها از سطوح ضربه‌گیر پوشالی استفاده شد. از آنجایی که میوه سیب در روزهای اولیه پس از برداشت بیشترین آسیب‌پذیری مکانیکی را دارد و با گذشت زمان حساسیت به کوفتگی در آن کاهش می‌یابد، در مراحل برداشت تا انتقال به آزمایشگاه دقت لازم به عمل آمد تا به سیب‌ها آسیبی وارد نشود (Mohsenin, 1995).

پس از برداشت سیب‌ها و انتقال به آزمایشگاه ابتدا سیب‌های دارای عیوب ظاهری و شکل‌های نامنظم از بین نمونه‌ها حذف گردید. سپس با استفاده از ترازو بادقت دهم گرم، سیب‌ها توزین شد و با استفاده از کولیس دیجیتالی ابعاد سیب‌ها در سه جهت اندازه‌گیری گردید. به منظور انجام دقیق آزمایش‌های بعدی قبل از اعمال ضربه، محل ضربه علامت‌گذاری گردید.

سپس با استفاده از دستگاه سنجش سرعت فراصوت (شکل ۱-الف)، با نام تجاری آلتراسونیک (مدل ELE ساخت کشور آلمان) جهت اندازه‌گیری سرعت گذر موج صوتی عبوری از داخل میوه سیب اندازه‌گیری شد. این دستگاه قابلیت تولید امواج فراصوت که بتواند از میان بافت میوه عبور نماید و از طرف مقابل میوه خارج شده و توسط یک دریافت‌کننده دریافت گردد را داشت. برخی از مشخصات پروب‌های دستگاه در جدول (۱) شده است.

اندازه‌گیری سرعت عبور امواج فراصوت با استفاده از پروب‌های دستگاه با فرکانس کاری ۴۰ کیلوهرتز انجام شد. انتخاب این فرکانس بر اساس مشخصات فنی دستگاه و نیز مناسب بودن آن برای عبور موج از میان بافت نسبتاً ناهمگن و جاذب میوه سیب صورت گرفت. در مواد زیستی نظیر میوه‌ها، با افزایش فرکانس، میزان تضعیف موج در اثر جذب و پراکندگی در بافت افزایش می‌یابد؛ از این رو استفاده از فرکانس‌های نسبتاً پایین‌تر، مانند ۴۰ کیلوهرتز، امکان نفوذ بهتر موج، دریافت سیگنال عبوری از سمت مقابل نمونه، و پایداری بیشتر در اندازه‌گیری زمان عبور موج را فراهم می‌کند.

جدول ۱. مشخصات پروب‌های دستگاه آلتراسونیک

| تعداد و نوع پروب | محدوده بسامد | دمای کاری  | ولتاژ تحریک      | توان موج           | تعداد تب | روش کارکرد |
|------------------|--------------|------------|------------------|--------------------|----------|------------|
| ۲-۰              | ۵۰-۹۰        | ۲۵-۳۵ درجه | بیشتر از ۲۵۰ ولت | کمتر از ۳ میلی‌وات | دو موج   | تحریک      |
| پیزوالکتریک      | کیلوهرتز     | سانتی‌گراد |                  | ۰٫۳ میلی‌وات       | مربعی    | مبدل       |

به منظور عبور بهتر امواج فراصوت از میان پراپ‌ها و پوست میوه از ژل سونوگرافی استفاده می‌گردد. راستای قرار گرفتن پراپ‌ها عمود بر صفحه‌ای که میوه تخت ضربه قرار گرفت بود. برای اندازه‌گیری سرعت گذر امواج، مدت زمان عبور موج از بافت میوه بدست آورده و با توجه به فاصله بین دو پراپ سرعت گذر موج محاسبه شد. عامل مهمی که در اندازه‌گیری خواص محصولات کشاورزی دارای اهمیت فراوان می‌باشد سرعت گذر امواج فراصوت است که به وسیله رابطه (۱) تعیین می‌شود.

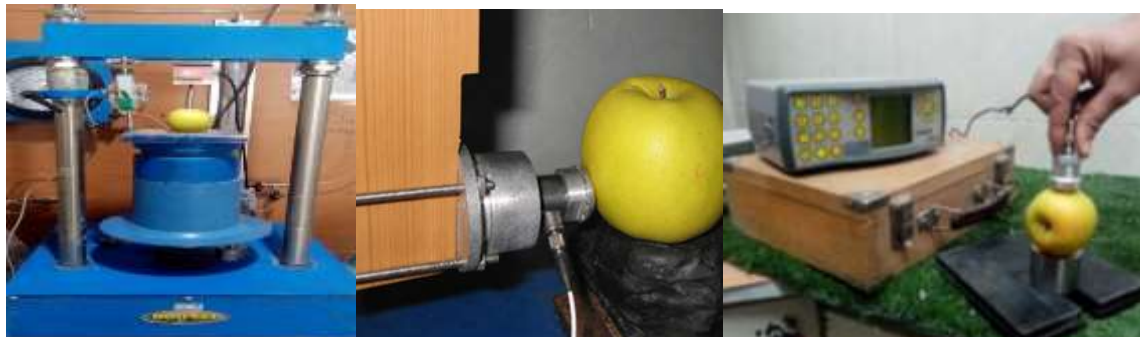
$$V = \frac{L}{T}$$

رابطه (۱)

که در آن  $V$  سرعت امواج فراصوت ( $\frac{m}{s}$ )،  $L$  فاصله پروپ‌ها ( $m$ )، و  $T$  زمان عبور موج فراصوت ( $s$ ) می‌باشد. به‌منظور ارزیابی تکرارپذیری، اندازه‌گیری سرعت عبور موج برای هر میوه در چهار نقطه مشخص از سطح میوه تکرار شد و برای هر نقطه نیز اندازه‌گیری‌ها حداقل در سه تکرار انجام گرفت. شاخص‌های آماری شامل میانگین، انحراف معیار، جهت گزارش تکرارپذیری ارائه گردید (پیوست ۱).

به منظور اعمال ضربه دینامیکی از آزمون پاندول (شکل ۱-ب) با سه سطح اسمی ضربه ۰/۰۱۵، ۰/۰۲۵، و ۰/۱۸ ژول که توسط (Van Zeebroeck et al. 2007) ارائه شد بکار گرفته شد. این سطوح ضربه به ترتیب سطح اول ضربه نزدیک به حد تسلیم و تشخیص آسیب کوفتگی سبب است و سطوح دوم و سوم سطوحی هستند که کوفتگی واضح در میوه پدیدار می‌شود. سطح ضربه‌ی پایین نمایانگر انرژی واردشده به میوه در طول حمل‌ونقل و جابجایی بوده که به کمک میوه‌ی الکترونیکی اندازه‌گیری شده است، در حالی که سطح ضربه‌ی بالا حاصل ضربات واردشده در مرحله‌ی برداشت مکانیکی و جداسازی میوه می‌باشد. به منظور بررسی بهتر میزان ضربه وارد بر میوه‌های سبب در کارخانه‌های بسته‌بندی و فراوری میوه از سطح ضربه‌گیر استیل C304 زیر سکو دستگاه پاندول استفاده شد. پس از اعمال ضربه به منظور انجام تیمار، از لامپ‌های UV-C با طول موج ۲۵۴ نانومتر در یک محفظه ایزوله استفاده شد و فاصله منبع تابش تا سطح میوه به‌طور ثابت ۳۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. مدت قرارگیری زیر لامپ UV در چهار سطح شاهد، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ دقیقه در نظر گرفته شد (جلیلی‌مرندی و همکاران، ۱۳۹۱).

با توجه به هندسه باکس و رفلکتور تعبیه‌شده، شدت تابش در سطح میوه به‌طور میانگین  $0.36 \text{ mW/cm}^2$  تعیین گردید. دوزهای تابشی بر اساس بازه پیشنهادی در منابع علمی (۰/۱۲۵ تا ۹ کیلوژول بر متر مربع) و با هدف بهره‌گیری از اثر کنترل میکروبی و در عین حال پیشگیری از آسیب‌های احتمالی ناشی از دوزهای بالا، در مقادیر ۰/۴۳، ۰/۸۶ و ۱/۲۹ کیلوژول بر متر مربع طراحی و اعمال شد. این دوزها به‌صورت آگاهانه در بخش میانی و مطلوب این بازه انتخاب شدند تا ضمن حفظ غیرتهاجمی بودن فرآیند، از بروز عوارضی مانند ایجاد لکه‌های قهوه‌ای یا آسیب به بافت میوه جلوگیری شود (Erkan et al., 2008 و Alderson & Shama., 2005).



شکل ۱. الف- دستگاه سنجش سرعت فراصوت وب- دستگاه آزمون پاندول ج- دستگاه سفتی سنج با آزمون پانچ

پس از اعمال پرتوهای میوه‌ها به مدت سه روز و ۱۰ روز در محیط آزمایشگاه نگهداری گردید. سپس مجدداً با استفاده از دستگاه آلتراسونیک سرعت گذر موج در میوه اندازه‌گیری گردید و درصد تغییرات سرعت گذر امواج محاسبه گردید و سپس با استفاده از دستگاه بافت‌سنج (شکل ۱-ج) با نام تجاری اینستران (Matest مدل C305 کشور ایتالیا) با قطر پراب ۱۰ میلی‌متر و ظرفیت لودسل انتخاب‌شده برای این منظور ۲۵ کیلوگرم، نیرو بود، اقدام به اندازه‌گیری نیروی فشار بیشینه محصول گردید و نفوذ تا عمق ۶ میلی‌متر در بافت سبب انجام گرفت تا بافت سبب دچار گسیختگی می‌شد. برای انجام آزمون نفوذ، سعی بر این بود که سطح سبب کاملاً عمود بر پروپ باشد تا نیروهای مماسی در سطح پروپ به حداقل برسد (خوشنام و قاسم‌خانی، ۱۳۹۷). به منظور تعیین میزان حجم کوفتگی میوه با یک چاقوی تیز پوست میوه سبب در محل کوفتگی برداشته شد و اقطار کوچک و بزرگ سطح لهیده اندازه‌گیری شد. سپس برشی عمود بر سطح کوفتگی ایجاد و عمق کوفتگی تعیین گردید و با استفاده از رابطه (۲) حجم کوفتگی محاسبه شد (رضائی‌فر و همکاران، ۱۳۹۵):

$$BV = \frac{\pi}{6} d D^2 \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در آن  $BV$  حجم کوفتگی به  $(\text{mm}^3)$ ،  $d$  عمق کوفتگی و  $D$  قطر کوفتگی هر دو بر حسب  $(\text{mm})$  می‌باشد.

## یافته‌های پژوهش

جدول (۲) نتایج تجزیه واریانس تغییرات پارامترهای نیروی فشاری آزمون پانچ، میزان کوفتگی میوه سیب، و سرعت گذر موج را تحت آزمون ضربه پاندولی، مدت زمان قرارگیری در برابر پرتو فرابنفش و مدت انبارمانی نشان می‌دهد. تجزیه واریانس میزان انرژی ضربه، مدت زمان پرتو فرابنفش و مدت زمان انبارمانی نشان از تأثیر معنی‌دار (در سطح ۹۹٪) بر روی کلیه خصوصیات اندازه‌گیری شده شامل نیروی فشاری آزمون پانچ (نیوتن)، حجم کوفتگی (میلی متر مکعب) و سرعت گذر موج (متر/ثانیه) دارد. همچنین اثرات متقابل انرژی ضربه در مدت انبارمانی، مدت تابش پرتو فرابنفش در انبارمانی، و میزان انرژی در مدت تابش فرابنفش در مدت انبارمانی نیز معنی‌دار بوده‌اند.

جدول ۲. نتایج تجزیه واریانس اثر ساده و متقابل فاکتورها بر خصوصیات اندازه‌گیری شده

| میانگین مربعات                   |            |                                |                                |                          |
|----------------------------------|------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------|
| منابع تغییرات                    | درجه آزادی | نیروی فشاری آزمون پانچ (نیوتن) | حجم کوفتگی سیب (میلی متر مکعب) | سرعت گذر موج (متر/ثانیه) |
| انرژی ضربه                       | ۳          | ۱۹۰۷/۶۴۳ **                    | ۳۵۱۶۰۲۴/۵۸۹ **                 | ۱۵۹۰۲/۶۸۰ **             |
| مدت زمان پرتو فرابنفش            | ۳          | ۴/۸۷۱ **                       | ۴۷۵۸۰ /۳۴۴ **                  | ۳۳۲/۳۳۵ **               |
| فرابنفش × انرژی ضربه             | ۹          | ۶/۱۷۸ **                       | ۶۱۳۷/۴۰۴ **                    | ۴۳/۶۰۴ **                |
| مدت انبارمانی                    | ۲          | ۵۷۶/۴۸۴ **                     | ۷۸۱۸۵۲۸/۳۵۷ **                 | ۷۸۷۹/۶۰۸ **              |
| انرژی ضربه × انبارمانی           | ۶          | ۸/۸۰۵ **                       | ۹۵۵۵۸۱/۴۰۳ **                  | ۷۰/۰۰۸ **                |
| پرتو فرابنفش × انبارمانی         | ۶          | ۶/۹۳۱ **                       | ۱۹۴۲۰/۴۴۰ **                   | ۲۳۶/۹۱۱ **               |
| انرژی × پرتو فرابنفش × انبارمانی | ۱۸         | ۱/۷۰۷ **                       | ۳۰۷۲/۲۴۹ **                    | ۳۱/۲۵۲ **                |
| خطا                              | ۹۶         | ۰/۳۰۶                          | ۱۰۲۲/۹۷۱                       | ۲/۹۷۲                    |
| ضریب تغییرات                     |            | ۲/۶۳                           | ۷/۰۰                           | ۱/۱۲                     |

\*\* غیر معنی‌دار، \* و \*\* به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

جدول (۳) نتایج مقایسه میانگین اثرات ساده تیمارهای آزمایشی بر صفات اندازه‌گیری شده شامل نیروی فشاری آزمون پانچ، حجم کوفتگی میوه سیب و سرعت گذر موج را تحت اثر ضربه پاندولی، مدت زمان قرارگیری در معرض اشعه فرابنفش و مدت نگهداری نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که انرژی ضربه بر تمامی صفات اندازه‌گیری شده در سطح ۵ درصد معنی‌دار بود. به‌طوری‌که بیشترین نیروی فشاری آزمون پانچ (۳۱/۴۳ نیوتن) در تیمار شاهد مشاهده شد، در حالی که کمترین مقدار آن (۱۵/۳۶ نیوتن) در انرژی ضربه ۰/۱۸ ژول به‌دست آمد. این موضوع بیانگر آن است که افزایش شدت ضربه موجب آسیب بیشتر به ساختار بافتی میوه و در نتیجه کاهش مقاومت مکانیکی آن می‌شود. از سوی دیگر، کمترین حجم کوفتگی نیز در نمونه شاهد و بیشترین آن در تیمار ۰/۱۸ ژول با مقدار ۶۹۳/۵۹ میلی متر مکعب مشاهده شد. همچنین در همین سطح، کمترین سرعت گذر موج (۱۳۸/۹۰ متر بر ثانیه) ثبت شد که نشان‌دهنده کاهش انسجام و سفتی بافت در اثر افزایش انرژی ضربه است. این نتایج با گزارش‌های پیشین همخوانی دارد؛ به‌گونه‌ای که پژوهشگران نیز نشان داده‌اند افزایش شدت ضربه یا اعمال تنش مکانیکی، موجب تخریب دیواره‌های سلولی، کاهش پیوستگی بافت و افزایش کوفتگی در محصولات باغی می‌شود (افکاری سیاح و همکاران، ۱۳۸۷).

مدت زمان قرارگیری میوه در معرض اشعه فرابنفش نیز تأثیر معنی‌داری بر نیروی فشاری آزمون پانچ، حجم کوفتگی و سرعت گذر موج نشان داد. در این میان، تیمار ۶۰ دقیقه‌ای بیشترین اثر را در بهبود ویژگی‌های مکانیکی میوه داشت؛ به‌طوری‌که سبب افزایش نیروی فشاری، کاهش حجم کوفتگی و افزایش سرعت گذر موج اولتراسونیک شد. این نتایج نشان می‌دهد که تابش فرابنفش احتمالاً با کاهش شدت تنفس، بهبود پایداری غشاهای سلولی و حفظ آب بافتی، از افت کیفیت مکانیکی میوه جلوگیری کرده است. نتایج به‌دست‌آمده با گزارش‌های جلیلی مرندي (۱۳۹۱)، استونس و همکاران (۲۰۰۴)، وینسنت و همکاران (۲۰۰۵) و لوتریا و همکاران (۲۰۰۶) مطابقت دارد که نشان داده‌اند تابش فرابنفش می‌تواند با کاهش نرخ تنفس و تأخیر در فرآیندهای پیری، باعث حفظ سفتی بافت و کاهش آسیب‌های فیزیکی میوه شود.

همچنین مدت نگهداری تأثیر معنی‌داری در سطح ۵ درصد بر تمامی صفات اندازه‌گیری شده داشت. با افزایش زمان انبارمانی، نیروی فشاری آزمون پانچ و سرعت گذر موج کاهش یافت و در مقابل، حجم کوفتگی افزایش پیدا کرد. به‌ویژه در روز دهم نگهداری، کمترین

نیروی فشاری آزمون پانچ (۱۷/۶ نیوتن) و کمترین سرعت گذر موج (۱۴۱/۰۸ متر بر ثانیه) و همچنین بیشترین میزان کوفتگی (۹۰۹/۶۵ میلی‌متر مکعب) مشاهده شد. این روند نشان می‌دهد که با طولانی شدن دوره انبارمانی، به دلیل استمرار فعالیت‌های متابولیکی، تجزیه ترکیبات دیواره سلولی و کاهش آب بافتی، مقاومت مکانیکی میوه کاهش می‌یابد. چنین الگویی با نتایج بسیاری از پژوهش‌های پیشین در مورد کاهش تدریجی سفتی و افزایش حساسیت به کوفتگی در طول نگهداری هم‌راستا است (رضایی فر و همکاران، ۱۳۹۵). در مجموع، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که تابش فرابنفش می‌تواند تا حدی اثرات منفی ضربه و نگهداری را تعدیل کرده و کیفیت مکانیکی میوه سیب را در طول انبارمانی حفظ کند.

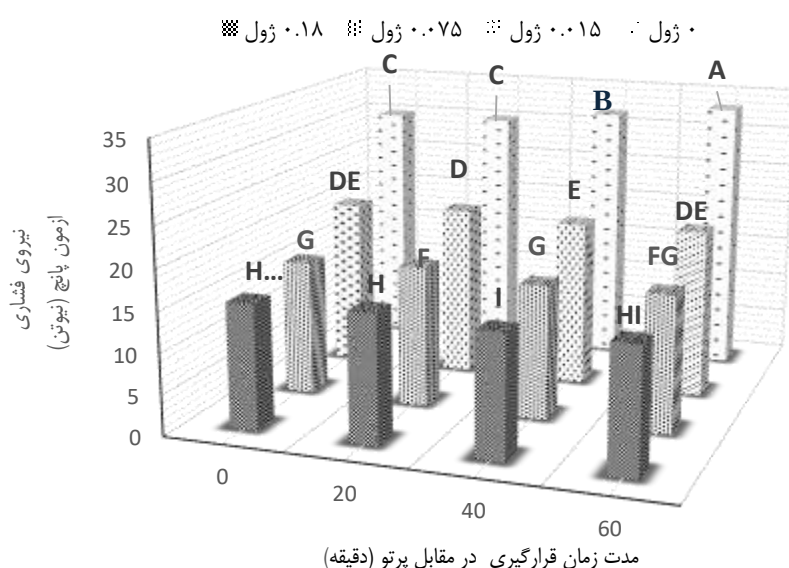
جدول (۳). نتایج مقایسه میانگین اثرات ساده تیمارهای آزمایشی بر خصوصیات اندازه‌گیری شده

| میانگین مربعات    |                                   |                                   |                             |
|-------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| تیمار             | نیروی فشاری بیشینه سبب<br>(نیوتن) | حجم کوفتگی سبب<br>(میلی‌متر مکعب) | سرعت گذر موج<br>(متر/ثانیه) |
| انرژی ضربه (ژول)  |                                   |                                   |                             |
| بدون ضربه         | ۳۱/۴۳a                            | ۰d                                | ۱۸۵/۱۲a                     |
| ۰/۰۱۵             | ۲۰/۶۸b                            | ۵۲۰/۸۵c                           | ۱۴۹/۳۸b                     |
| ۰/۷۵              | ۱۶/۷۴c                            | ۶۱۷/۳۱b                           | ۱۴۳/۵۴c                     |
| ۰/۱۸              | ۱۵/۳۶b                            | ۶۹۳/۵۹a                           | ۱۳۸/۹d                      |
| زمان پرتو (دقیقه) |                                   |                                   |                             |
| بدون پرتو دهی     | ۲۰/۶۴c                            | ۵۰۳/۱۸a                           | ۱۵۱/۰۵d                     |
| ۲۰                | ۲۱/۰۸b                            | ۴۶۴/۲۹c                           | ۱۵۲/۷۶c                     |
| ۴۰                | ۲۰/۹۶b                            | ۴۷۴/۴۳b                           | ۱۵۵/۱۹b                     |
| ۶۰                | ۲۱/۵۳a                            | ۴۱۶/۸۶d                           | ۱۵۸/۹۷a                     |
| انبارمانی (روز)   |                                   |                                   |                             |
| بدون انبارمانی    | ۲۴/۵۳a                            | ۱۲۷/۱۸c                           | ۱۶۶/۷۷a                     |
| ۳                 | ۲۱/۰۴b                            | ۳۳۶/۹۹b                           | ۱۵۴/۸۸b                     |
| ۱۰                | ۱۷/۶c                             | ۹۰۹/۶۵a                           | ۱۴۱/۰۸c                     |

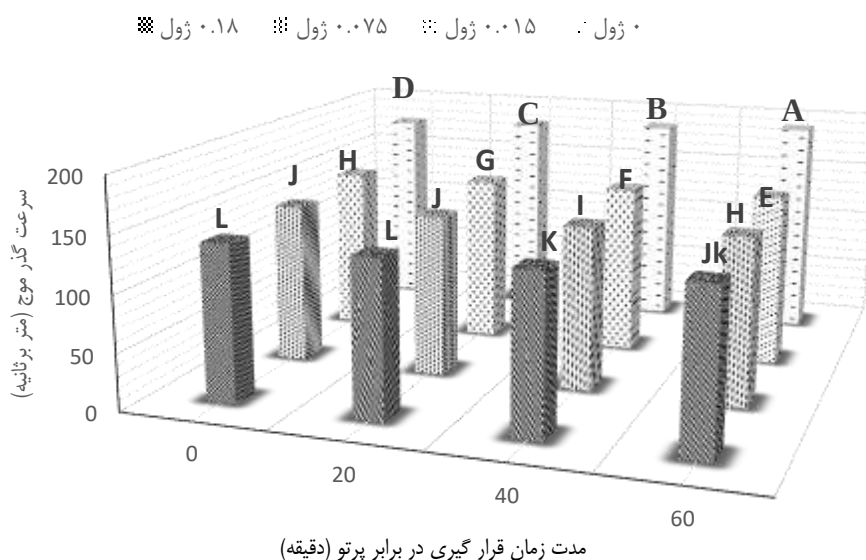
اختلاف اعداد دارای حداقل یک حرف مشترک در هر ستون و تیمار طبق آزمون دانکن در سطح ۵ درصد معنی‌دار نیست.

اثر متقابل انرژی ضربه و زمان تابش پرتو فرابنفش بر نیروی فشاری آزمون پانچ سبب (شکل ۲) و سرعت گذر موج (شکل ۳) در آزمون دانکن معنی‌دار بود؛ به عبارت دیگر، پاسخ مکانیکی و آکوستیکی بافت سبب به ضربه، به مدت تابش UV نیز وابسته است. با این حال، در مقایسه سطوح مختلف تابش فرابنفش با یکدیگر اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد که می‌تواند نشان‌دهنده رسیدن اثر UV به یک حد آستانه و پایداری عملکرد آن در بازه‌های بررسی شده باشد. بیشترین مقدار نیروی فشاری (۳۳/۳۸ نیوتن) و سرعت گذر موج (۱۹۲/۵۳ متر بر ثانیه) مربوط به تیمار بدون ضربه و ۶۰ دقیقه تابش فرابنفش بود، در حالی که کمترین نیرو (۱۵/۴۵ نیوتن) و سرعت موج (۱۵۷/۹۱ متر بر ثانیه) در انرژی ضربه ۰/۱۸ ژول و بدون قرارگیری در برابر پرتو فرابنفش ثبت شد؛ کاهش هم‌زمان این دو شاخص در تیمارهای ضربه‌خورده، بیانگر تخریب دیواره سلولی، کاهش پیوستگی بافت و افت سختی است، در حالی که افزایش آن‌ها در تیمارهای تحت تابش، نشان‌دهنده حفظ یکپارچگی ساختاری و مقاومت بیشتر بافت در برابر آسیب مکانیکی است. این یافته‌ها حاکی از آن است که تیمار UV-C می‌تواند با کاهش سرعت نرم‌شدگی و تضعیف بافت، به افزایش عمر انبارمانی سبب کمک کند و با نتایج میرجیلی و همکاران (۱۳۹۱) هم‌خوانی دارد. همچنین، این نتیجه با گزارش پاترو و همکاران (۲۰۱۵) نیز قابل تبیین است؛ آن‌ها نشان دادند که تابش UV-C (و نور پالسی) با ایجاد یک تنش کنترل‌شده در بافت گیاهی، سنتز متابولیت‌های ثانویه دفاعی با فعالیت آن‌تی‌اکسیدانی و ضد میکروبی را تحریک کرده و بدون ایجاد تغییرات نامطلوب محسوس در برخی ویژگی‌های فیزیکی، وضعیت تازگی محصول را طی دوره نگهداری حفظ می‌کند. علاوه بر نتایج مقایسه میانگین‌ها، بررسی درصد تغییرات سرعت گذر موج قبل و بعد از اعمال تیمارها (شکل ۴) نشان داد که این شاخص در تمامی تیمارها تحت تأثیر مدت قرارگیری در معرض UV دچار تغییر معنی‌دار می‌شود؛ با این حال، دامنه و شدت این تغییرات به سطح

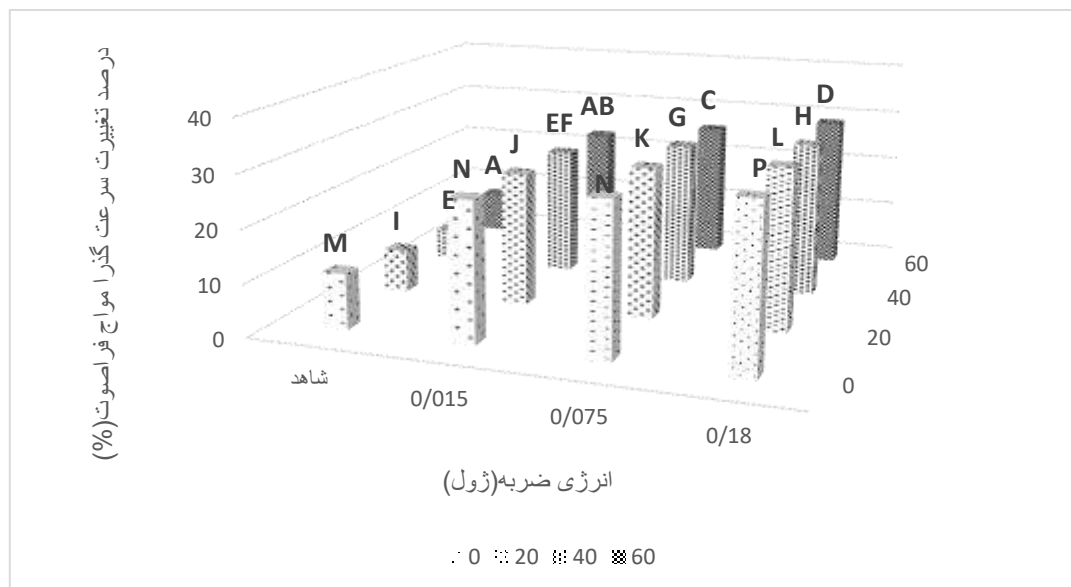
انرژی ضربه وابسته است. به طور مشخص، در سطح شاهد، درصد تغییرات سرعت گذر امواج فراصوت از ۱۰/۵۵ در تیمار بدون قرارگیری در برابر پرتو فرابنفش به ۷/۹۹ درصد در ۶۰ دقیقه قرارگیری در برابر پرتو کاهش یافت که بیانگر افت محسوس در کیفیت آکوستیکی بافت است. در مقابل، در نمونه‌های تحت انرژی ضربه ۰، ۰،۱۵، ۰،۰۷۵ و ۰،۱۸ ژول، سرعت گذر موج در کل دوره تابش در مقادیر بالاتری حفظ شد و روند کاهش آن نسبت به شاهد ملایم‌تر بود. این الگو نشان می‌دهد که تابش UV-C احتمالاً با القای پاسخ‌های دفاعی و کمک به حفظ نسبی یکپارچگی ساختاری بافت، از افت شدید سرعت انتشار موج جلوگیری کرده است. از آنجا که درصد تغییرات سرعت گذر موج با ویژگی‌هایی نظیر سفتی، تراکم و پیوستگی بافت ارتباط مستقیم دارد، کاهش کمتر آن را می‌توان به عنوان نشانه‌ای از حفظ بهتر پیوستگی دیواره‌های سلولی و تأخیر در نرم‌شدگی سبب تفسیر کرد. بنابراین، مجموعه شواهد حاصل از نیروی پانچ و رفتار سرعت گذر موج در طول زمان تابش تأیید می‌کند که UV-C، در تعامل با انرژی ضربه، بر پایداری مکانیکی-آکوستیکی بافت سبب اثر گذار بوده و می‌تواند در بهبود مقاومت بافت در برابر تنش‌های مکانیکی و افزایش ماندگاری محصول نقش داشته باشد.



شکل ۲. اثر متقابل انرژی ضربه و تیمار پرتو فرابنفش بر نیروی پانچ

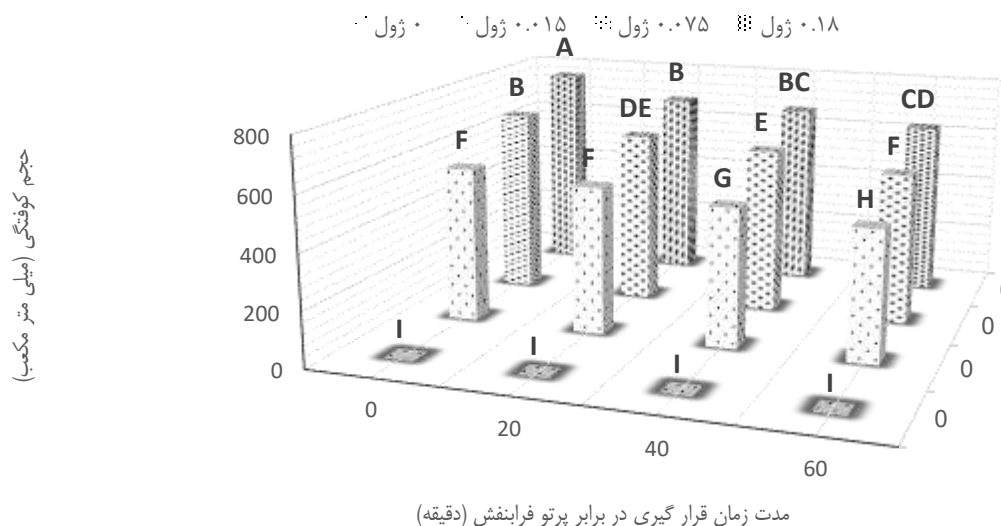


شکل ۳. اثر متقابل انرژی ضربه و تیمار با پرتو بر سرعت گذر موج



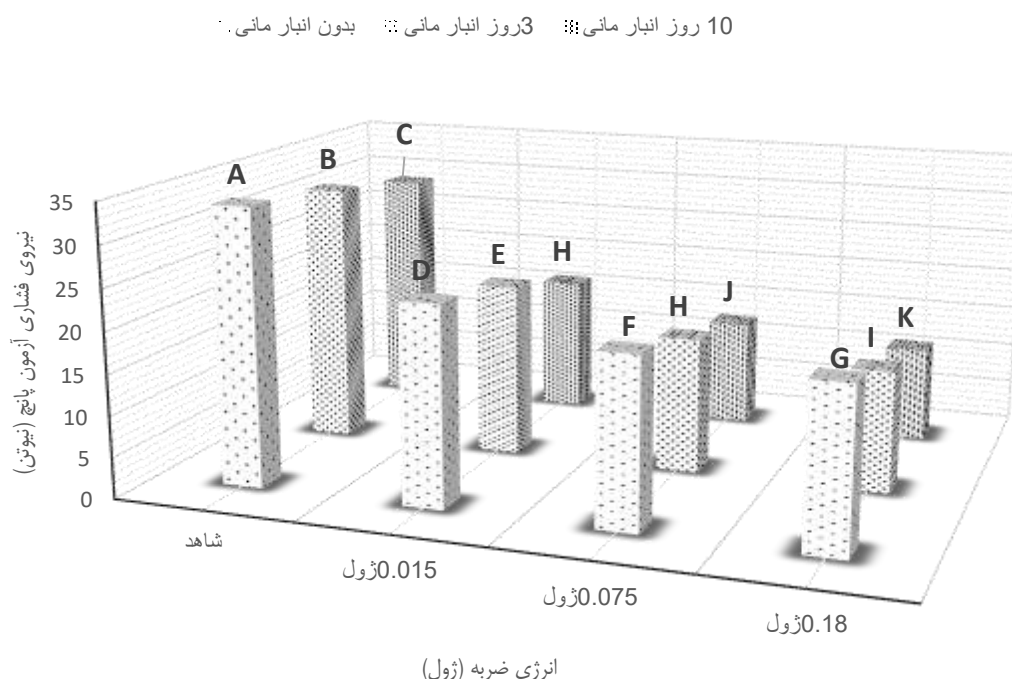
شکل ۴. اثر متقابل انرژی ضربه و تیمار پرتو فرابنفش بر درصد تغییرات سرعت امواج فراصوت

نتایج حاصل از آزمون کوفتگی با توجه به شکل (۵) سیب نشان داد که اثر متقابل بین انرژی ضربه و زمان اعمال تابش فرابنفش (UV-C) بر حجم کوفتگی در هر سطح از تابش پرتو، از نظر آماری معنی‌دار بود. با این حال، تفاوت قابل توجهی بین سطوح مختلف انرژی ضربه مشاهده نشد. کمترین حجم کوفتگی به گروه شاهد (بدون تابش UV-C و بدون ضربه) اختصاص داشت. در مقابل، بیشترین حجم کوفتگی (۷۶۶/۴۵ میلی‌متر مکعب) در شرایط اعمال ضربه با انرژی ۰/۱۸ ژول و بدون هیچ‌گونه تابش UV-C (زمان صفر) به دست آمد. این یافته‌ها با مطالعات انجام شده بر روی سایر میوه‌ها، مانند توت‌فرنگی (Araque et al., 2019)، که نشان‌دهنده تأثیر UV-C بر خواص مکانیکی و تأخیر در نرم‌شدگی است، تطابق داشته است. اثر متقابل مشاهده شده بین انرژی ضربه و زمان قرارگیری در برابر پرتو UV-C حاکی از آن است که تابش فرابنفش می‌تواند مقاومت سیب به آسیب ناشی از ضربه را تحت تأثیر قرار دهد، به طوری که در شرایط خاصی (مثلاً انرژی ضربه پایین یا رژیم تابشی مشخص)، ممکن است اثر محافظتی داشته باشد. عدم مشاهده تفاوت معنی‌دار بین سطوح مختلف انرژی ضربه، این احتمال را مطرح می‌کند که یا تأثیر UV-C بر تمام سطوح انرژی ضربه مشابه بوده، یا اینکه سطوح ضربه آزمون شده در محدوده آستانه تحمل بافت سیب قرار داشته‌اند. بیشترین حجم کوفتگی در غیاب UV-C و در انرژی ضربه مشخص، نشان‌دهنده آسیب‌پذیری طبیعی سیب در برابر ضربه است که تابش UV-C احتمالاً قادر به تعدیل آن می‌باشد.

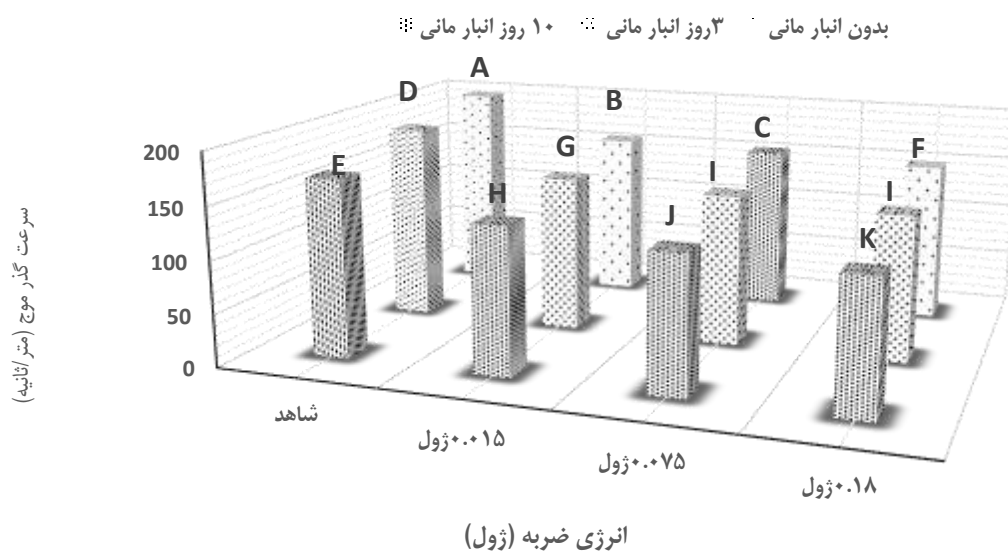


شکل ۵. اثر متقابل انرژی ضربه - تابش فرابنفش بر حجم کوفتگی سیب

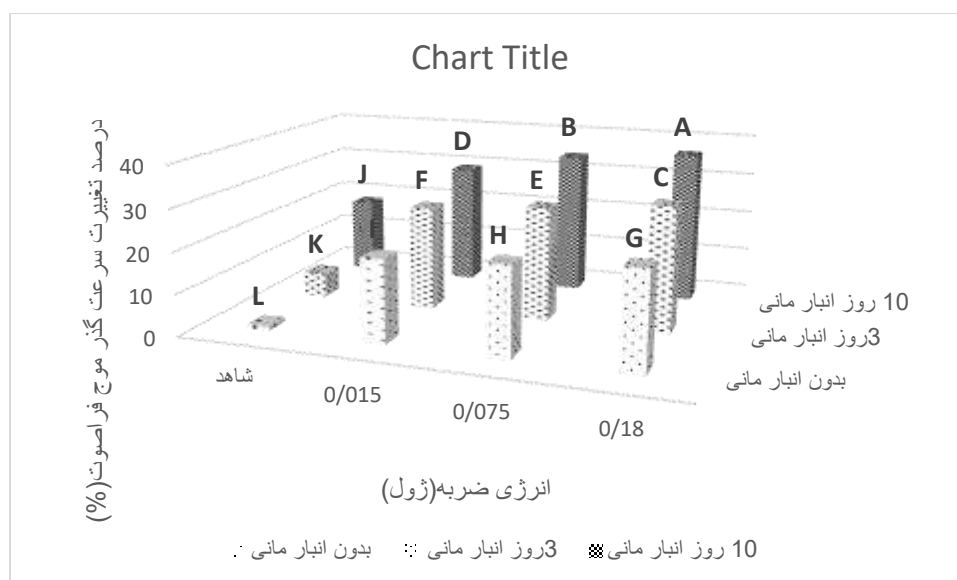
اثر متقابل انرژی ضربه و مدت انبارمانی بر نیروی فشاری آزمون پانچ سیب شکل (۶) و سرعت گذر موج شکل (۷) معنی دار بود. کمترین مقدار نیروی فشاری (۱۱/۶۳ نیوتن) و سرعت گذر موج (۱۲۵/۲۹ متر بر ثانیه) در تیمار ۱۸ میلی ژول و بدون انبارمانی مشاهده شد. بررسی روند تغییرات نشان داد که با افزایش انرژی ضربه و افزایش مدت انبارمانی، مقدار هر دو شاخص کاهش پیدا می کند؛ این نتیجه با یافته های سرمایه و همکاران (۱۳۹۷) مطابقت دارد. علت این روند را می توان در تغییرات تدریجی بافت میوه در طول نگهداری و نیز اثرات مستقیم ضربه جستجو کرد. در دوره انبارمانی، بافت سیب به تدریج نرم تر شده و سفتی و مقاومت مکانیکی آن افت می کند. این تغییرات باعث می شود میوه در برابر نیروی فشاری وارد شده حساس تر شده و نیروی کمتری برای نفوذ آزمون پانچ لازم باشد. از سوی دیگر، وارد شدن ضربه با انرژی بیشتر موجب ایجاد آسیب های داخلی، میکروتَرَک ها و به هم ریختگی ساختار سلولی می شود. این آسیب ها با کاهش یکپارچگی بافت، توان انتقال موج و مقاومت در برابر فشار را تقلیل می دهند. علاوه بر این، تحلیل درصد تغییرات سرعت گذر موج قبل و بعد از اعمال تیمارها شکل (۸) ابعاد دقیق تری از تخریب بافت را آشکار کرد. نتایج نشان داد که با افزایش سطح انرژی ضربه و طولانی تر شدن دوره انبارمانی، درصد افت سرعت گذر موج به طور چشم گیری افزایش می یابد. در تیمار شاهد، میزان تغییرات در بازه بدون انبارمانی تا ۱۰ روز انبارمانی از ۱ درصد به ۱۸/۵ درصد رسید. این در حالی است که در سطوح بالای انرژی ضربه (۱۸ میلی ژول)، درصد افت سرعت گذر امواج فراصوت در حالت بدون انبارمانی برابر با ۲۳/۴ درصد بود و با گذشت ۱۰ روز انبارمانی به ۳۶/۸ درصد افزایش یافت. این افزایش در درصد تغییرات سرعت موج، بازتابی از تشدید تخریب دیواره های سلولی و کاهش پیوستگی میان سلولی است که در اثر متقابل بین آسیب مکانیکی ضربه و فرآیندهای فیزیولوژیک پیری بافت در انبار رخ می دهد. مطالعات پیشین نیز این موضوع را تأیید می کنند؛ به طوری که گورتو و همکاران (۲۰۰۱) گزارش کردند ویژگی های مکانیکی سیب نظیر سفتی و چقرمگی در طی نگهداری کاهش یافته و بافت میوه نرم تر می شود. همچنین استروپک و گولاکی (۲۰۱۶) نشان دادند که افزایش شدت ضربه باعث افزایش میزان آسیب دیدگی و تغییر شکل دائمی بافت می شود. با توجه به این شواهد، نتایج پژوهش حاضر نشان می دهد که ترکیب اثرات ضربه و انبارمانی نه تنها مقادیر مطلق شاخص های فیزیکی را کاهش می دهد، بلکه نرخ تخریب آکوستیکی بافت را (که در قالب درصد تغییرات سرعت موج مشاهده شد) به شدت تسریع می کند.



شکل ۶. اثر متقابل انرژی ضربه و انبارمانی بر نیروی فشاری آزمون پانچ



شکل ۷. اثر متقابل انرژی ضربه و مدت انبارمانی بر سرعت گذر موج

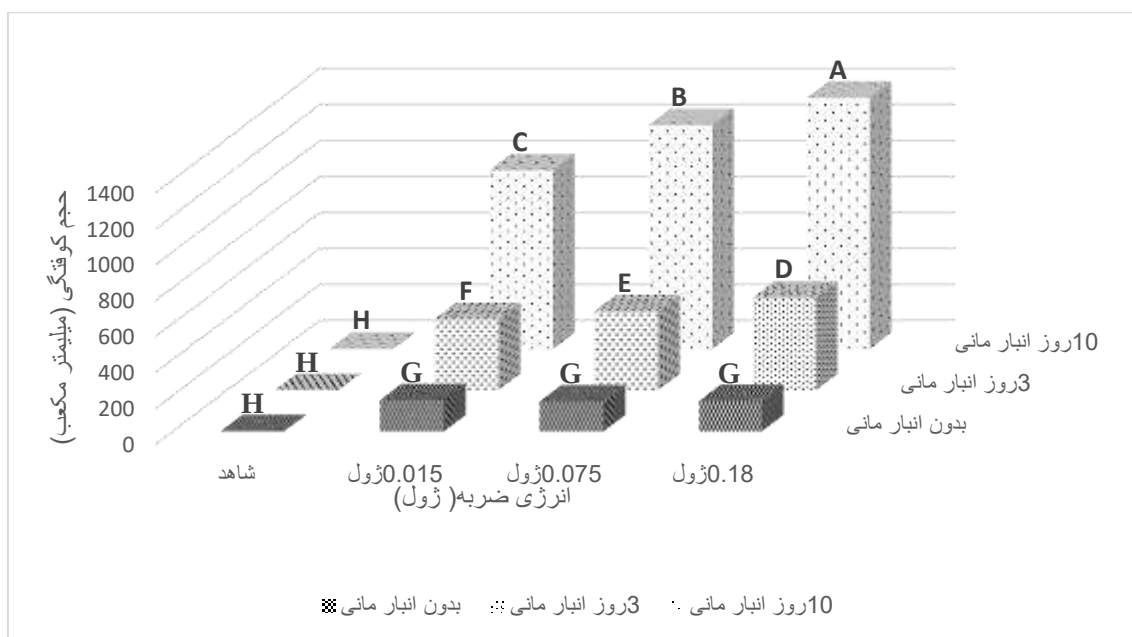


شکل ۸. اثر متقابل انرژی ضربه و مدت انبارمانی بر سرعت گذر موج

همان‌طور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود، اثر متقابل انرژی ضربه و مدت زمان انبارمانی بر حجم کوفتگی سیب در تمامی سطوح (به جز تیمار شاهد) معنی‌دار بود. بیشترین حجم کوفتگی (۱۳۹۷/۸۳ میلی‌متر مکعب) در بالاترین انرژی ضربه (۰/۱۸ ژول) پس از ۱۰ روز انبارمانی ثبت گردید که با نتایج پژوهش زیارتیان و همکاران (۱۳۹۷) مطابقت دارد. تحلیل این یافته‌ها نشان می‌دهد که فرآیند توسعه کوفتگی تنها به لحظه برخورد محدود نمی‌شود، بلکه پدیده‌ای وابسته به زمان است (Celik et al., 2021).

از منظر مکانیسم‌های فیزیولوژیک، ضربه پاندولی در لحظه برخورد باعث تخریب فیزیکی غشاهای سلولی در ناحیه ضربه می‌شود. مطابق با مدل ارائه‌شده توسط هولت و اسکورل (۱۹۷۷)، بافت سیب از سلول‌های مایع‌مانند محصور در غشاهای ویسکوالاستیک تشکیل شده است؛ در لحظه ضربه، تغییر شکل شدید باعث پارگی دیواره سلولی و شکست برشی می‌شود که آغازگر اصلی کوفتگی است. با این حال، افزایش حجم کوفتگی در طی ۱۰ روز انبارمانی را می‌توان به تنش‌های ثانویه نسبت داد. پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که بلافاصله پس از آسیب مکانیکی، نرخ تنفس و تولید اتیلن در میوه به شدت افزایش می‌یابد این واکنش متابولیک، سرعت تخریب بافت‌های مجاور و نرم‌شدن پکتیکی را در طول دوره نگهداری افزایش داده و باعث می‌شود ناحیه کوفتگی به مرور زمان گسترش یابد.

علاوه بر این، نتایج پژوهش یورتلو و اردوغان (۲۰۰۵) تأیید می‌کند که با گذشت زمان انبارمانی، خواص مکانیکی بافت میوه (مانند مدول الاستیسیته و نیروی نقطه تسلیم زیستی) تغییر کرده و حساسیت بافت به ضربه به‌طور مستقیم با تغییرات بافتی در طول انبارداری مرتبط است. این کاهش پایداری بافتی در طول دوره نگهداری، باعث می‌شود که حتی انرژی‌های یکسان ضربه در روز دهم، منجر به حجم کوفتگی بزرگ‌تری نسبت به روزهای ابتدایی شوند. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که در طول دوره انبارمانی، ترکیب «تخریب دیواره سلولی ناشی از ضربه اولیه» و «فعالیت‌های آنزیمی و متابولیکی تشدید شده در بافت‌های آسیب‌دیده»، عامل اصلی افزایش معنادار حجم کوفتگی در پایان دوره انبارداری است.



شکل ۹. اثر متقابل انرژی ضربه - مدت انبارمانی بر حجم کوفتگی

## نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که تغییرات شاخص‌های مکانیکی و آکوستیکی میوه سیب به‌طور مستقیم و معنی‌داری تحت تأثیر انرژی ضربه، مدت تابش UV-C و زمان انبارمانی قرار دارد و این تغییرات دارای یک روند مشخص و قابل پیش‌بینی هستند. با افزایش انرژی ضربه از ۰/۱۵ به ۰/۱۸ ژول، سفتی میوه یا همان نیروی فشاری آزمون پانچ و سرعت گذر موج اولتراسونیک به‌صورت تدریجی کاهش یافتند، در حالی که حجم کوفتگی به‌صورت تدریجی افزایش پیدا کرد؛ به این معنا که هرچه شدت ضربه بیشتر شد، بافت داخلی بیشتر آسیب دید، میوه نرم‌تر شد و عبور موج از بافت دشوارتر گردید. همین روند در مورد زمان انبارمانی نیز مشاهده شد، به‌طوری‌که با افزایش زمان نگهداری از ۳ به ۱۰ روز، سفتی و سرعت موج کاهش و حجم کوفتگی افزایش یافت، که نشان می‌دهد اثر آسیب مکانیکی در طول نگهداری تشدید شده و به مرور زمان واضح‌تر می‌شود. در مقابل، تابش UV-C روند تغییرات را تا حدی در جهت عکس قرار داد؛ به این صورت که با افزایش مدت تابش، به‌ویژه تا ۶۰ دقیقه، کاهش سفتی و سرعت موج کندتر شد و گسترش کوفتگی کمتر گردید، بنابراین UV-C توانست بخشی از افت کیفیت ناشی از ضربه و نگهداری را جبران یا تعدیل کند. همچنین نتایج اثرات متقابل نشان داد که در شرایط ضربه‌خورده و در زمان نگهداری طولانی‌تر، نقش UV-C پررنگ‌تر بوده و به‌ویژه در سطح ۶۰ دقیقه، توانسته است با حفظ بهتر یکپارچگی ساختار بافتی، شدت آسیب و میزان کوفتگی را کاهش دهد. در بررسی اثرات متقابل، یافته‌ها نشان داد که نوعی هم‌افزایی مثبت بین تیمار UV-C و حفظ کیفیت وجود دارد؛ به گونه‌ای که در شرایط بحرانی (یعنی ترکیب ضربه شدید و نگهداری طولانی‌مدت)، نقش محافظتی UV-C پررنگ‌تر شد و توانست به عنوان یک عامل تعدیل‌کننده، مانع از سقوط شدید شاخص‌های مکانیکی شود. در واقع، تحلیل اثرات متقابل بیانگر آن است که پتانسیل حفاظتی UV-C در مواجهه با شدیدترین آسیب‌های مکانیکی بیشترین کارایی را داشته و توانسته است اثرات تخریبی همزمان ضربه و انبارمانی را تا حد زیادی خنثی کند. در مجموع، یافته‌ها نشان می‌دهد که سرعت گذر موج اولتراسونیک در کنار

آزمون پانچ می‌تواند شاخص حساس برای بررسی تغییرات بافتی سیب باشد و تابش UV-C به‌خصوص در زمان ۶۰ دقیقه، به‌عنوان یک راهکار مؤثر پس از برداشت برای افزایش مقاومت مکانیکی و کاهش ضایعات ناشی از کوفتگی در میوه سیب قابل توصیه است.

## ملاحظات اخلاقی

### حامی مالی

مقاله حاضر با حمایت مالی و معنوی معاونت پژوهشی دانشگاه شهرکرد انجام شد. این پژوهش در قالب پایان‌نامه کارشناسی ارشد نویسنده اول در دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد انجام شده است.

### مشارکت نویسندگان

جمع‌آوری داده‌ها: حسین غیور

تهیه گزارش پژوهش: حسین غیور، دکتر مهدی قاسمی و رنامخواستی، دکتر مجتبی نادری بلداجی

تحلیل داده‌ها: حسین غیور، دکتر مهدی قاسمی و رنامخواستی، دکتر مجتبی نادری بلداجی

نویسندگان به طور مساوی در مراحل طراحی و اجرای پژوهش، تجزیه و تحلیل داده‌ها، تحلیل و تفسیر نتایج، تهیه پیش‌نویس مقاله، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله مشارکت داشتند.

مشارکت نویسندگان در مقاله مستخرج از پایان‌نامه به شرح زیر است:

نویسنده اول (حسین غیور - دانشجو):

تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها، انجام آزمایش‌ها و گردآوری داده‌ها، انجام محاسبات، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر نتایج، تهیه پیش‌نویس مقاله.

نویسنده دوم (دکتر مهدی قاسمی و رنامخواستی - استاد راهنما):

طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح و بازبینی مقاله.

نویسنده سوم (دکتر مجتبی نادری بلداجی - استاد راهنما):

مشارکت در طراحی پژوهش، نظارت بر پژوهش، مطالعه و بازبینی مقاله.

### اعلامیه هوش مصنوعی مولد و فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در فرایند نگارش

نویسندگان از هیچ نوع فناوری مبتنی بر هوش مصنوعی در فرایند نگارش این مقاله استفاده نکرده‌اند.

### بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌های پژوهش حاضر در اختیار نویسندگان است و در صورت درخواست قابل ارائه می‌باشد.

### سپاسگزاری

از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه شهرکرد و دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد به خاطر حمایت مالی و معنوی و همکاری در اجرای پژوهش حاضر سپاسگزاری می‌شود.

از داوران محترم مجله به خاطر ارائه نظرهای علمی و ساختاری که موجب بهبود کیفیت مقاله شد تشکر و قدردانی می‌شود.

### پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش رعایت نموده‌اند.

### تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان، این مقاله تعارض منافع ندارد.

## منابع

آزادشهرکی، فرزاد و کفاشان، جلال. (۱۳۹۶). شاخص‌های کیفی محصولات باغی و روش‌های اندازه‌گیری آن‌ها. تهران: آموزش کشاورزی وابسته به معاونت آموزش و ترویج کشاورزی (دفتر خدمات تکنولوژی آموزشی وزارت جهاد کشاورزی).



- افکاری سیاح، امیرحسین؛ اسماعیلیان، مهدی؛ مینایی، سعید و پیرایش، عادل. (۱۳۸۷). تأثیر بارهای مکانیکی بر آسیب‌های وارد بر سیب پس از مرحله انبارداری. *فصلنامه علوم و صنایع غذایی*، ۵(۳)، ۳۷-۴۴.
- پیکار پارسان، شعبانعلی فمی؛ حسین، دانشور عامری؛ ژایلا خدابخشی؛ آزاده. (۱۳۹۲). عوامل مؤثر بر به‌کارگیری عملیات مدیریت ضایعات در تولید سیب در شهرستان ابهر. *تحقیقات اقتصاد و توسعه کشاورزی ایران* ۴۴(۲)، ۳۲۹-۳۴۱.
- جلیلی مرندي، رسول؛ ناصری، لطفعلی؛ حاجی تقی‌لو، رامین و خرسندی، علی‌رضا. (۱۳۹۱). اثر پرتو فرابنفش بر کیفیت میوه و عمر انباری دو رقم سیب. *تولیدات گیاهی*، ۳۵(۲)، ۵۳-۶۳.
- خالقی، علی‌رضا؛ دادبین، الهه و اصغری مرجان‌لو، ابوالفضل. (۱۳۹۸). اثر پرتوتابی با C-UV بر کنترل پوسیدگی و کیفیت پس از برداشت گوجه‌فرنگی گلخانه‌ای رقم نیوتن. *علوم و فنون کشت‌های گلخانه‌ای*، ۱۰(۳)، ۱-۱۰.
- خوشنام، فرهاد؛ قاسم‌خانی، حمیدرضا و کماندار، محمدرضا. (۱۳۹۷). تأثیر سرعت بارگذاری و قطر پراپ بر مقادیر آزمون پانچ. *یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم و مکانیزاسیون ایران*، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد.
- رضائی‌فر، جواد؛ صدرنیا، حسن و رحیمی، علی. (۱۳۹۵). مروری بر روش‌های اندازه‌گیری کوفتگی در میوه‌ها. *دهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم (ماشین‌های کشاورزی) و مکانیزاسیون ایران*، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد.
- زیارتیان، آرمین؛ آزادبخت، محسن و قاسم‌نژاد، عظیم. (۱۳۹۷). مطالعه اثرات ضربه‌های استاتیکی و دینامیکی بر سطح کوفتگی و تغییر پارامترهای فیزیولوژیک میوه سیب. *مهندسی زراعی*، ۴۱(۳)، ۹۷-۱۱۱.
- سرمایه، نسیم؛ ساردوئی، محمد؛ کماندار، محمدرضا؛ قاسم‌خانی، حمیدرضا و خوشنام، فرهاد. (۱۳۹۷). بررسی تأثیر ارتفاع سقوط و جنس سطح برخورد بر پارامترهای کوفتگی سیب رقم ردلشیز. *دومین همایش بین‌المللی و سومین همایش ملی کشاورزی، محیط‌زیست و امنیت غذایی*، دانشگاه جیرفت، جیرفت.
- میرزایی گرچی، شعبانعلی فمی اسدی، براتی &، عسگری سرچشمه. (۱۴۰۳). راهکارهای بهبود مدیریت ضایعات درزنجیره تامین سیب از دیدگاه باغداران: مورد مطالعه استان تهران. *مطالعات کارآفرینی و توسعه پایدار کشاورزی*، ۱۱(۴)، ۸۵-۱۰۴. <https://doi.org/10.22069/jead.2024.22602.1838>
- میرمحمدی، فرهاد و رسولی، مسعود. (۱۳۹۲). مدیریت برداشت و تأثیر آن بر کاهش ضایعات سیب در ایران. *مجله علوم و صنایع غذایی ایران*، ۹(۳)، ۱۲۱-۱۳۰.
- شکریگی، صدیقه؛ افکاری سیاح، امیرحسین؛ شایقی مغالو، حسین و شکوهیان، علی‌اکبر. (۱۳۹۰). اثر دما و سطح ضربه‌گیر بر حجم کوفتگی سیب در اثر ضربه و پیش‌بینی آن به روش شبکه عصبی مصنوعی. *فصلنامه علوم و صنایع غذایی*، ۸(۳۱)، ۸۵-۹۴.
- محمدزرداری، آیت؛ رئیس، مرتضی؛ ابراهیمی، رحیم و کیانی، حسن. (۱۳۹۲). اثر پرتودهی در افزایش ماندگاری مواد غذایی. *همایش ملی پدافند غیر عامل در بخش کشاورزی*، قشم.
- منیعی، عباسعلی. (۱۳۸۲). سیب و پرورش آن در ایران. چاپ دوم. تهران: شرکت انتشارات فنی ایران.

## REFERENCES

- Afkari-Sayyah, A. H., Esmaeilyan, M., Minaei, S., & Piraeesh, A. (2008). The effect of mechanical loads on damage to apples after the storage stage. *Journal of Food Science and Industries*, 5(3), 37-44. (In Persian).
- Araque, L. C. O., Ortiz, C. M., Darré, M., Rodoni, L. M., Civello, P. M., & Vicente, A. R. (2019). Role of UV-C irradiation scheme on cell wall disassembly and surface mechanical properties in strawberry fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 150, 122-128. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2019.01.002>.
- Azadashahraki, F., & Kafashan, J. (2017). Quality indices of horticultural products and their measurement methods. Tehran: Agricultural Education, affiliated with the Deputy of Education and Agricultural Extension (Educational Technology Services Office, Ministry of Agriculture Jihad). (In Persian).
- Celik, H. K., Ustun, H., Erkan, M., Rennie, A. E., & Akinci, I. (2021). Effects of bruising of 'Pink Lady' apple under impact loading in drop test on firmness, colour and gas exchange of fruit during long term storage. *Postharvest Biology and Technology*, 179, 111561.
- Charles, M. T., Benhmon, N., & Arul, J. (2008a). Physiological basis of UV-C induced resistance to Botrytis cinerea in tomato fruit. II. Modification of fruit surface and changes in fungal colonization. *Postharvest Biology and Technology*, 47(1), 21-26. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2007.05.014>.
- Erkan, M., Wang, S. Y., & Wang, C. Y. (2008). Effect of UV-C treatment on antioxidant capacity and quality of strawberries. *Postharvest Biology and Technology*, 48(1), 124-131.

- <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2007.09.028>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2024). FAOSTAT statistical database: Horticultural production. FAO. <https://www.fao.org/faostat/>.
- Grotte, M., Duprat, F., Loonis, D., & Piétri, E. (2001). Mechanical properties of the skin and the flesh of apples. *International Journal of Food Properties*, 4(1), 149-161. <https://doi.org/10.1081/JFP-100002193>
- Hemmaty, S., Moallemi, N., & Naseri, L. (2007). Effect of UV-C radiation and hot water on the calcium content and postharvest quality of apples. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 5(4), 559-568. <https://doi.org/10.5424/sjar/2007054-277>.
- Holt, J. E., & Schoorl, D. (1977). Bruising and energy dissipation in apples. *Journal of texture studies*, 7(4), 421-432. DOI: [10.1111/j.1745-4603.1977.tb01149.x](https://doi.org/10.1111/j.1745-4603.1977.tb01149.x).
- Jalili Marandi, R., Naser i, L., Haji-Taghilou, R., & Khorsandi, A. R. (2012). Effect of ultraviolet radiation on fruit quality and storage life of two apple cultivars. *Plant Productions*, 35(2), 53-63. (In Persian).
- Khaleghi, A. R., Dadbin, E., & Asghari-Marjanlou, A. (2019). Effect of UV-C irradiation on decay control and postharvest quality of greenhouse tomato (Newton cultivar). *Greenhouse Crops Science and Technology*, 10(3), 1-10. (In Persian).
- Khoshnam, F., Ghasemkhani, H. R., & Kamandar, M. R. (2018). Effect of loading rate and probe diameter on punch test parameters. *Proceedings of the 11th National Congress on Biosystems Mechanical Engineering and Mechanization of Iran*, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad. (In Persian)
- Liu, C., Cai, L., Han, X., & Ying, T. (2012). Temporary effect of postharvest UV-C irradiation on gene expression profile in tomato fruit. *Gene*, 486(1-2), 56-64. <https://doi.org/10.1016/j.gene.2011.07.001>.
- Luthria, D. L., Mukhopadhyay, S., & Krizek, D. T. (2006). Content of total phenolics and phenolic acids in tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) fruits as influenced by cultivar and solar UV radiation. *Journal of Food Composition and Analysis*, 19(8), 771-777. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2006.04.005>.
- Meniae i, A. (2003). *Apple and its cultivation in Iran* (2nd ed.). Tehran: Iranian Technical Publishing Company. (In Persian).
- Mirmohammadi, F., & Rasouli, M. (2013). Harvest management and its effect on reducing apple losses in Iran. *Iranian Journal of Food Science and Industry*, 9(3), 121-130. (In Persian)
- Mirzaei Gorji, S., Fam-i, S. A., Asadi, A., Barati, M., & Asgari Sarcheshmeh, M. (2024). Improving Waste Management Strategies in the Apple Supply Chain from Growers' Perspective: A Case Study in Tehran Province. *Journal of Entrepreneurship and Sustainable Development of Agriculture*, 11(4), 85-104. (In Persian) <https://doi.org/10.22069/JEAD.2024.22602.1838>.
- Mohsenin, N. N. (1986). *Physical properties of plant and animal materials* (2nd ed.). Gordon and Breach Science Publishers, New York.
- Mohammadrzadhari, A., Raeisi, M., Ebrahimi, R., & Kiani, H. (2013). Effect of irradiation on increasing the shelf life of food products. *Proceedings of the National Conference on Passive Defense in the Agricultural Sector*, Qeshm. (In Persian).
- Morgan, J., & Alison, R. (2002). *The new book of apples*. Ebury Press.
- Opara, L. U., Pathare, P. B., & Bruwer, B. (2014). Mechanical damage to fresh fruits and vegetables. *Food and Bioprocess Technology*, 7, 347-366.
- Pataro, G., Donsi, G., & Ferrari, G. (2015). Post-harvest UV-C and PL irradiation of fruits and vegetables. *Chemical engineering transactions*, 44, 31-36. <https://doi.org/10.3303/CET1544006>.
- Peykar Porsan, S., Fam-i, S. A., Daneshvar Ameri, Z., Khodabakhshi, A., & Azadeh, K. (2013). Factors affecting the implementation of waste management operations in apple production in Abhar county. *Iranian Journal of Agricultural Economics and Development Research*, 44(2), 329-341. <https://doi.org/10.22059/ijaedr.2013.36729>. (In Persian).
- Rezaeifar, J., Sadrnia, H., & Rahimi, A. (2016). A review of methods for measuring bruising in fruits. *Proceedings of the 10th National Congress of Biosystems Mechanical Engineering (Agricultural Machinery) and Mechanization of Iran*, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad. (In Persian).
- Sarmaye, N., Sardouei, M., Kamandar, M. R., Ghasemkhani, H. R., & Khoshnam, F. (2018). Investigation of the effect of drop height and impact surface material on bruising parameters of Red Delicious apple. *Proceedings of the 2nd International and 3rd National Conference on Agriculture, Environment, and Food Security*, University of Jiroft, Jiroft. (In Persian).
- Shakerbeigi, S., Afkari-Sayyah, A. H., Shayegi-Moghanlou, H., & Shokoohiyan, A. A. (2011). Effect of temperature and padding surface on bruise volume of apple caused by impact and its prediction using artificial neural network method. *Journal of Food Science and Industries*, 8(31), 85-94. (In Persian).



- Shama, G., & Alderson, P. (2005). UV-C: an alternative to chemical treatments for fresh produce. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85(13), 2165-2175. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2019.110945>.
- Sommers, C. H., & Fan, X. (Eds.). (2006). *Food irradiation research and technology*. Blackwell Publishing.
- Stevens, C., Khan, V. A., Lu, J. Y., Wilson, C. L., Pusey, P. L., Kabwe, M. K., Igwegbe, E. C. K., Chalutz, E., & Droby, S. (1998). The germicidal and hormetic effects of UV-C light on reducing brown rot disease and yeast microflora of peaches. *Crop Protection*, 17(1), 75-84. [https://doi.org/10.1016/S0261-2194\(98\)80015-X](https://doi.org/10.1016/S0261-2194(98)80015-X).
- Stropek, Z., & Gołacki, K. (2016). Quantity assessment of plastic deformation energy under impact loading conditions of selected apple cultivars. *Postharvest Biology and Technology*, 115, 9-17. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.12.011>.
- Stevens, C., Khan, V. A., Wilson, G. L., Lu, J. Y., Chalutz, E., & Droby, S. (2004). The effect of low-dose ultraviolet light-C treatment on polygalacturonase activity, delay ripening and Rhizopus soft rot development of tomatoes. *Crop Protection*, 23(6), 551-554. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2003.10.007>.
- Van Zeebroeck, M., Van Linden, V., Ramon, H., De Baerdemaeker, J., Nicolaï, B. M., & Tijskens, E. (2007). Impact damage of apples during transport and handling. *Postharvest Biology and Technology*, 45(2), 157-167. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2007.01.015>.
- Van Zeebroeck, M., Van Linden, V., Porumb, D., De Ketelaere, B., Ramon, H., & Tijskens, E. (2007). The effect of fruit factors on the bruise susceptibility of apples. *Postharvest Biology and Technology*, 46(1), 10-19. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2007.03.017>.
- Van Zeebroeck, M., Van Linden, V., Darius, P., De Ketelaere, B., Ramon, H., & Tijskens, E. (2007). The effect of fruit properties on the bruise susceptibility of tomatoes. *Postharvest Biology and Technology*, 45(2), 168-175. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2006.12.022>.
- Vicente, A. R., Pineda, C., Lemoine, L., Civello, P. M., Martínez, G. A., & Chaves, A. R. (2004). Combined use of UV-C irradiation and heat treatment to improve postharvest life of strawberry fruit. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 84(14), 1831-1838. <https://doi.org/10.1002/jsfa.1894>.
- Vicente, A. R., Pineda, C., Lemoine, L., Civello, P. M., Martínez, G. A., & Chaves, A. R. (2005). UV-C treatments reduce decay, retain quality and alleviate chilling injury in pepper. *Postharvest Biology and Technology*, 35(1), 69-78. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2004.06.001>.
- Wilson, C. L., El Ghaouth, A., Chalutz, E., Droby, S., Stevens, C., Lu, J. Y., Khan, V., & Arul, J. (1994). Potential of induced resistance to control postharvest diseases of fruits and vegetables. *Plant Disease*, 78(9), 837-844. <https://doi.org/10.1094/PD-78-0837>.
- Yurtlu, Y. B., & Erdoğan, D. (2005). Effect of storage time on some mechanical properties and bruise susceptibility of pears and apples. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 29(6), 469-482.
- Ziyaratban, A., Azadbakht, M., & Ghasemnejad, A. (2018). Study of the effects of static and dynamic impacts on bruise area and changes in physiological parameters of apple fruit. *Agricultural Engineering*, 41(3), 97-111. doi: 10.22055/agen.2018.21941.1349. (In Persian).