

Evaluation of the Effects of Carbon Nanotubes and GABA on Biochemical Properties and Starch Accumulation in Cucurbita Fruits

Pages
75-91

V. Alizadeh-Tazekandi¹, M. Torabi Giglou^{2*}, A. Estaji³, R. Heydarnajad Giglou⁴

1, 2, 3 & 4) Department of Horticultural Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

*Corresponding author : mtorabi@uma.ac.ir

Received date: 2025.01.29

Accepted date: 2025.04.13

Abstract

Research on the effect of nanoparticles and amino acids on the biochemical and morphological characteristics of plants is of particular importance as a key factor in improving the quality of agricultural products. This study investigates the effect of the combined treatment of GABA and carbon nanotubes on the morphological and biochemical characteristics of pumpkin fruits (Ardabil ecotype). The experiment was conducted in a split-plot design over time with three replications. The treatments studied included GABA at concentrations of 1 and 2 mg/L, carbon nanotubes at two concentrations of 1 and 2 mg/L, and a control group. Sampling of the fruits was carried out 20, 40, and 60 days after flowering, during which fruit samples were randomly selected, and the levels of carbohydrates and starch, total phenols, and total flavonoids were analyzed. The results showed that the length and diameter of the fruits increased 60 days after flowering, with the highest values of these two indices observed in plants treated with carbon nanotubes at a 1 mg/L. Additionally, the thickness of the fruit flesh increased, while the thickness of the skin decreased. The total carbohydrate and phenol content were also influenced by the treatments, with the highest total phenol content recorded in fruits treated with carbon nanotubes at a concentration of 1 mg (1.17 mg/g DW) and the lowest in the control samples (0.59 mg/g DW). Furthermore, the flavonoid content in fruits treated with GABA at a concentration of 1 mg/L reached its maximum (3.12 mg/g DW), while it decreased at a concentration of 2 mg/L of carbon nanotubes.

Keywords: Antioxidants, Carbohydrates, Fruit growth stages and Total phenol content.

بررسی اثرات نانولوله کربن و گابا بر خصوصیات بیوشیمیایی و تجمع نشاسته در میوه‌های کدو (اکوتیپ اردبیل)

شماره صفحات

۷۵-۹۱

وحید علیزاده تازه‌کندی^۱، موسی ترابی گیگلو^{۲*}، اصغر استاجی^۳ و رسول حیدرنژاد گیگلو^۴

۱، ۲، ۳ و ۴) گروه علوم باغبانی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

* نویسنده مسئول: mtorabi@uma.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۲۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۰

چکیده

پژوهش در زمینه تأثیر نانوذرات و اسید آمینه‌ها بر ویژگی‌های بیوشیمیایی و مورفولوژیک گیاهان، به عنوان یکی از ارکان کلیدی در بهبود کیفیت محصولات کشاورزی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. پژوهش حاضر به بررسی تأثیر ترکیب تیماری گابا و نانولوله کربن بر ویژگی‌های مورفولوژیک و بیوشیمیایی میوه‌های کدو (اکوتیپ اردبیل) پرداخته است. آزمایش در قالب طرح اسپلیت پلات در زمان با سه تکرار انجام شد. ترکیب‌های تیماری مورد مطالعه شامل شامل گابا در غلظت‌های ۱ و ۲ میلی‌گرم در لیتر، نانولوله کربن در دو غلظت ۱ و ۲ میلی‌گرم در لیتر و شاهد مورد مطالعه قرار گرفت. نمونه‌برداری از میوه‌ها طی ۲۰، ۴۰ و ۶۰ روز بعد از گلدهی انجام گرفت که طی هر مرحله نمونه‌های میوه به‌طور تصادفی انتخاب و میزان کربوهیدرات و نشاسته، فنل کل و فلاونوئید کل مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که طول و قطر میوه‌ها در ۶۰ روز پس از گلدهی افزایش یافته و بیشترین مقادیر این دو شاخص در گیاهان تیمار شده با نانولوله کربن در غلظت ۱ میلی‌گرم مشاهده شد. همچنین، ضخامت گوشت میوه‌ها افزایش و ضخامت پوست آنها کاهش یافت. محتوای کربوهیدرات کل و فنل نیز تحت تأثیر تیمارها قرار گرفت به‌طوری‌که بیشترین میزان فنل کل در میوه‌های تیمار شده با نانولوله کربن در غلظت ۱ میلی‌گرم (۱۷/۱ میلی‌گرم گالیک اسید بر گرم وزن خشک) و کمترین میزان آن در نمونه‌های شاهد (۹/۵ میلی‌گرم در گرم وزن خشک) ثبت گردید. همچنین، محتوای فلاونوئید در میوه‌های تیمار شده با گابا در غلظت ۱ میلی‌گرم به بیشترین میزان (۱۲/۳ میلی‌گرم در گرم وزن خشک) رسید.

واژه‌های کلیدی: آنتی‌اکسیدان کل، کربوهیدرات کل، محتوای فنل کل و مراحل رشد میوه.

مقدمه

کدو (Cucurbita) متعلق به خانواده Cucurbitaceae به طور گسترده در سراسر جهان رشد می‌کند. در میان سبزیجات، کدو به دلیل عملکرد بالا، ماندگاری طولانی مدت و ارزش غذایی بالا مورد توجه قرار گرفته است. در هند، تحت طیف وسیعی از شرایط اقلیمی کشاورزی، هم برای میوه‌های نابالغ و هم برای میوه‌های بالغ کشت می‌شود. میوه‌های کدو دارای گوشت زرد یا نارنجی غنی از بتاکاروتن، پیش‌ساز ویتامین A هستند. کدو منبع غنی از اجزای غذایی کاربردی مانند ویتامین‌ها، مواد معدنی و فیبرهای غذایی است. کدو را می‌توان به طور سودآوری به انواع محصولات با ارزش افزوده مانند مربا، ژله، مارمالاد، آب نبات، پوره، سس، چاشنی، ترشی و حلوا تبدیل کرد. آرد کدو تنبل را می‌توان برای مکمل آرد غلات در محصولات نانویی، سوپ‌ها، نودل‌های فوری و عامل رنگ دهنده طبیعی در مخلوط آرد و پاستا استفاده کرد. دانه‌های کدو که معمولاً دور ریخته می‌شوند منبع غنی روغن و مواد مغذی هستند و می‌توانند به عنوان غذا مصرف شوند. آرد دانه به عنوان مکمل پروتئین در نان و کلوچه استفاده می‌شود. تخمه کدو به دلیل کاهش کلسترول و خواص ضد افسردگی فواید زیادی برای سلامتی دارد (2009, *et al.* Anju). گاما آمینو بوتیریک اسید، به عنوان یک محصول زیستی در 1910 بوسیله آکرمن و کوشر شناسایی شد (Cagno *et al.* 2010). اسید گاما: آمینوبوتیریک (aminobutyric: Gamma acid (GABA)) یک آمینواسید چهار کربنه غیر پروتئینی است که در پروکاریوت‌ها و یوکاریوت‌ها وجود دارد که تقریباً در بافت‌های اغلب میکروارگانیسم‌ها، گیاهان، جانوران و انسان‌ها یافت می‌شود. در گیاهان، چند نقش پیام‌رسانی از جمله دخالت در تنظیم pH، ذخیره‌سازی نیتروژن، رشد گیاه و دفاع در برابر تنش‌های غیرزیستی مانند خشکی، تنش اکسایشی، شوری و تنش سرمایی به اسید گاما: آمینوبوتیریک (گابا) نسبت داده شده است. گاما آمینوبوتیریک اسید یا GABA به عنوان یک انتقال‌دهنده عصبی مهاری عمل می‌کند که در تنظیم عملکردهای قلبی عروقی مانند فشار خون و ضربان قلب نقش دارد و همچنین در احساس درد، اضطراب، تحریک ترشح انسولین از پانکراس و پیشگیری از دیابت نقش دارد. کاهش فشارخون، درمان بی‌خوابی، اضطراب، افسردگی و ادرار آور بودن، از جمله ویژگی‌های فیزیولوژیکی گاما آمینوبوتیریک اسید است. به دلیل افزایش تقاضا برای مصرف گابا، روش‌های مختلف شیمیایی و زیستی به منظور تولید آن در دست مطالعه است. در میان همه این تلاش‌ها به نظر می‌رسد که بیوسنتز گابا امید بخش‌ترین و ساده‌ترین متد تولید آن باشد. (Shelp *et al.*, 2012). سیب زمینی اولین گیاهی بود که گابا به صورت طبیعی در آن کشف شد (Dhakal *et al.*, 2012). مصرف گابا مقاومت به سرما را در هلو (*Persica Prunus*) مقاومت به شوری را در تنباکوی زینتی (*Sylvestris Nicotiana*) و مقاومت به خشکی را در چچم چندساله (*perenne Lolium*) (Krishnan *et al.*, 2013) افزایش داده است. همچنین، رشد لوله‌گرده و جهت آن به مقدار گابا در گیاهان توتون (*tabaccum Nicotiana*) بستگی دارد (Yu and Sun, 2007). مقدار گابا در گیاهان بسیار اندک است ولی در شرایط تنش، گیاهان جهت افزایش مقاومت خود، به سرعت مقدار آن را در بافت‌های رویشی افزایش می‌دهند (Kinnersley and Turano, 2000). مصرف آن رشد رویشی، فتوسنتز و

ظرفیت تبادل گازها را افزایش می‌دهد، بیوسنتز کلروفیل، پاسخ‌های آنزیمی غیر آنتی‌اکسیدانی و پایداری غشاء را تحریک می‌کند (Luo *et al.*, 2011). تأثیر نانومواد بر گیاهان بسته به گیاه، مراحل رویشی آن، نوع مواد، اندازه ذرات، حلالیت و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نانومواد متغیر است (Ma *et al.*, 2010; Fazeli-Nasab *et al.*, 2021). یکی از نانومواد که در علوم گیاهی بسیار مورد توجه پژوهشگران می‌باشد، نانولوله‌های کربنی هستند، زیرا ویژگی‌های منحصر به فردی مانند ساختار شیمیایی، ابعاد ویژه و انعطاف‌پذیری زیاد دارند (Giglou *et al.*, 2022; Tiwari *et al.*, 2014). اعتقاد بر این است که نانولوله کربن‌ها قادرند ویژگی‌های ریخت‌شناسی و فیزیولوژی سلول‌های گیاهی را تغییر دهند و (Pourkhaloee *et al.*, 2011) در نهایت سبب تنظیم رشد گیاه و نهال و نیز افزایش رشد محصول شوند (Lahiani *et al.*, 2013; Padash *et al.*, 2023). یکی از اثرات مثبت نانولوله‌های کربن در راستای افزایش محصول، بهبود انتقال آب در گیاه است (Fathi *et al.*, 2017)، همچنین حضور نانولوله‌های کربنی می‌تواند موجب جذب بهتر کلسیم و آهن و در نهایت افزایش زیست توده گیاهی شود. نکته مهم در کاربرد نانومواد این است که چه غلظتی از آن‌ها می‌تواند سبب بیشترین عملکرد در گیاه مورد نظر شود. چه بسا که غلظت‌های زیاد از یک نانومواد نه تنها اثر مثبتی بر گیاه نداشته باشد، بلکه باعث سمی شدن گیاه نیز بشود. (Tiwari *et al.*, 2014). نشاسته پلیمری متشکل از مولکول‌های گلوکز است که از دو نوع مولکول پلیمری شامل پلیمر خطی و فاقد انشعاب موسوم به آمیلوز و پلیمر دارای انشعاب موسوم به آمیلوپکتین تشکیل شده است که معمولاً حدود 75:80 درصد نشاسته را آمیلوپکتین و مابقی آن را آمیلوز تشکیل داده است.

بسته به منبع نشاسته نسبت آمیلوز و آمیلوپکتین متفاوت است. نشاسته، یک پلی ساکارید، یکی از فراوان‌ترین منابع بیوپلیمری است که معمولاً در غلات (گندم، ذرت و برنج) و غده (تاپیوکا، سیب‌زمینی و سیب‌زمینی شیرین) گیاهان یافت می‌شود. (Bader. and Göritz, 1994) نشاسته یکی از رایج‌ترین مواد ذخیره‌سازی در طبیعت است. در شکل اصلی خود، نشاسته به دلیل خواصی که همیشه برای انواع خاصی از فرآوری مطلوب نیستند، کاربردهای محدودی دارد. نمونه‌هایی از این کاستی‌ها عبارتند از ناتوانی آن در تحمل دمای بالا، فشار و برخی از معرف‌های شیمیایی قوی که در اکثر فرآیندهای غذایی و دارویی صنعتی استفاده می‌شود (Tian *et al.*, 2018). این پروژه با هدف بررسی تأثیر ترکیب گابا (اسید گاما: آمینو بوتیریک) و نانولوله‌های کربن بر بهبود کیفیت و ویژگی‌های بیوشیمیایی میوه‌های کدو اکوتیپ اردبیل طراحی شده است. با توجه به اهمیت کدو به‌عنوان یک محصول غذایی غنی و ارزشمند، این مطالعه به شناسایی بهترین غلظت‌های این ترکیبات می‌پردازد تا عملکرد، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی میوه‌ها افزایش یابد و ارزش تغذیه‌ای آنها بهبود یابد. همچنین، تحلیل اثرات مثبت این ترکیبات بر رشد گیاه و مقاومت در برابر تنش‌های محیطی نیز از دیگر اهداف این تحقیق به شمار می‌آید. نتایج این پروژه می‌تواند به توسعه روش‌های نوین کشت و بهبود کیفیت محصولات کشاورزی کمک کند و در نهایت به افزایش تولید و بهبود سلامت مصرف‌کنندگان منجر شود.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر در مزرعه تحقیقاتی گروه علوم باغبانی دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی انجام شد. برای انجام این تحقیق بذور کدو تهیه و در سینی‌های کشت نشاء کشت شد. سپس به زمین اصلی منتقل شد در هر تکرار، سه بوته کدو اکوتیپ اردبیل مورد بررسی قرار گرفت، که تحت تأثیر ترکیب تیماری در پنج سطح مختلف قرار گرفتند. این سطوح تیماری شامل گابا (۱ و ۲ میلی‌گرم در لیتر) و نانولوله کربن (ساخته شده توسط US: NANO) با اندازه‌های ۱۰: ۲۰ نانومتر (۱ و ۲ میلی‌گرم در لیتر) بودند، همچنین یک تیمار به عنوان شاهد در نظر گرفته شد. برای آماده‌سازی آزمایش، بذرها کدو (اکوتیپ اردبیل) در سینی‌های ۱۲×۱۲ با بستر کوکوپیت و پیت‌ماس کشت شدند و در گلخانه نگهداری شدند. پس از تولید نشاءها، گیاهان در مرحله ۴: ۶ برگی به مزرعه اصلی با فواصل ۱۵۰×۲۰۰ سانتی‌متر منتقل شدند. ۲۰ روز پس از انتقال و استقرار گیاهان، محلول‌پاشی با گابا و نانولوله کربن در سه مرحله و هر دو هفته یکبار انجام گرفت. نمونه‌برداری از میوه‌ها در ۲۰، ۴۰ و ۶۰ روز پس از گلدهی صورت گرفت. در هر مرحله، میوه‌ها به‌طور تصادفی انتخاب و به آزمایشگاه فیزیولوژی پس از برداشت گروه علوم باغبانی منتقل شدند. برای اندازه‌گیری شاخص‌های بیوشیمیایی، میوه‌های نمونه‌برداری شده به دمای منفی ۸۰ درجه سانتی‌گراد منتقل شدند و از این نمونه‌های فریز شده برای بررسی شاخص‌هایی مانند فنل کل، فلاونوئید کل و کربوهیدرات کل استفاده شد.

صفات مورفولوژیک

برای اندازه‌گیری صفات مورفولوژیک صفات طول و قطر میوه، ضخامت گوشت و پوست میوه با استفاده از کولیس دیجیتالی اندازه‌گیری گردید.

فنل کل

برای اندازه‌گیری فنل کل، ۰/۲ گرم بافت برگ در ۳ میلی‌لیتر متانول خالص هموژنیزه شد. سپس محلول به‌دست‌آمده به مدت ۱۰ دقیقه در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و با سرعت ۵۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفوژ شد و مایع رویی برای آزمایش استفاده گردید. ابتدا ۱۰۰ میکرولیتر از عصاره استخراج‌شده به لوله آزمایش اضافه شده و سپس با ۱۰۰ میکرولیتر و ۲ میلی‌لیتر کربنات سدیم ۱۵ درصد مخلوط شد. پس از مخلوط کردن، ۱۰۰ میکرولیتر معرف فولین به آن افزوده و دوباره مخلوط گردید. این مخلوط به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۴۵ درجه قرار گرفت و سپس به مدت ۱ ساعت در دمای اتاق و در تاریکی نگهداری شد. در نهایت، جذب نمونه‌ها در طول موج ۷۵۰ نانومتر با دستگاه طیف‌سنج اندازه‌گیری شد (Meda *et al.*, 2006). برای رسم منحنی استاندارد از غلظت‌های مختلف گالیک اسید استفاده شده و میزان فلاونوئید کل به‌صورت میلی‌گرم گالیک اسید بر گرم وزن خشک گزارش گردید.

فلاونوئید کل

برای اندازه‌گیری فلاونوئید کل، به ۵۰۰ میکرولیتر از هر عصاره ۱.۵ میلی‌لیتر متانول (۸۰ درصد)، ۱۰۰ میکرولیتر محلول آلومینیوم کلراید (۱۰ درصد)، ۱۰۰ میکرولیتر محلول استات سدیم ۱ مولار و ۲.۸ میلی‌لیتر آب مقطر اضافه شد. جذب محلول پس از ۴۰ دقیقه در طول موج ۴۱۵ نانومتر نسبت به بلانک اندازه‌گیری شد. بلانک شامل تمامی ترکیبات ذکر شده بود، اما به‌جای عصاره، همان حجم متانول ۸۰ درصد به آن افزوده شد. برای رسم منحنی استاندارد از کوئرستین استفاده گردید و میزان فلاونوئید کل به‌صورت میلی‌گرم کوئرستین بر گرم وزن خشک گزارش شد (Mita *et al.*, 1997).

آنتی‌اکسیدان کل

برای اندازه‌گیری آنتی‌اکسیدان کل بر اساس روش DPPH (Miliauskas *et al.*, 2004) غلظت‌های مختلف عصاره، با ۲ میلی‌لیتر محلول متانولی ۰/۰۰۴ درصد DPPH مخلوط گردید. محلول کنترل شامل ۲ میلی‌لیتر DPPH و ۲ میلی‌لیتر متانول است. محلول‌ها به مدت ۳۰ دقیقه و در تاریکی و در دمای اتاق نگه‌داری شد. جذب نمونه‌ها در ۵۱۷ نانومتر در مقابل شاهد متانول خوانده شد. درصد مهار رادیکال آزاد (I %) هر عصاره به کمک فرمول محاسبه شد:

$$I = \frac{A_{\text{CONTROL}} - A_{\text{SAMPL}}}{A_{\text{CONTROL}}} \times 100 \%$$

رابطه ۱:

کربوهیدرات‌های کل

محتوای کربوهیدرات کل بر اساس روش Irigoyen و همکاران (۱۹۹۲) با استفاده از معرف آنترون اندازه‌گیری شد. برای استخراج کربوهیدرات، ۰.۱ گرم بافت تر در ۵ میلی‌لیتر اتانول ۸۰ درصد هموزن گردید. سپس محلول به مدت ۱۰ دقیقه در بن‌ماری در دمای ۹۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. عصاره رویی جدا شده و قسمت پایینی دوباره با ۵ میلی‌لیتر اتانول ۸۰ درصد مخلوط شد و دوباره در بن‌ماری به مدت ۱۰ دقیقه قرار گرفت. پس از جمع‌آوری محلول رویی، با استفاده از کاغذ صافی واتمن، محلول صاف گردید. برای تبخیر الکل، نمونه‌ها در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند تا حجم محلول به یک‌پنجم مقدار اولیه برسد. سپس پس از ورتکس، نمونه‌ها به مدت ۵ دقیقه به حال سکون قرار گرفتند و در نهایت در سانتریفیوژ با سرعت ۱۰۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۰ دقیقه در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند و قسمت شفاف بالایی برای اندازه‌گیری کربوهیدرات‌های محلول استفاده شد.

نشاسته

نمونه‌های کدو را به‌وسیله دستگاه خردکن کاملاً خرد کرده، سپس به میزان ۳ برابر وزن پالپ با آب مخلوط شده، ۲۰ میلی‌لیتر محلول متابیسولفیت ۰/۱ درصد اضافه نموده و به‌وسیله پارچه توری صاف گردید. پس از دو فاز شدن محلول، توسط کاغذ صافی و قیف بوخنر نشاسته جدا گردید. نشاسته به‌دست آمده چندین بار با آب شسته شده و نهایتاً در 30°C خشک شد (Takahiro *et al.*, 2004).

آنالیز آماری داده‌ها

داده‌های به‌دست‌آمده به‌صورت طرح اسپلیت پلات در زمان با استفاده از آنالیز ANOVA و آزمون‌های چند دامنه‌ای دانکن ($P < 0.05$) توسط نرم‌افزار SAS 9.1 و SPSS 21 تجزیه و تحلیل شدند.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از تجزیه واریانس صفات در جداول ۱ و ۲ خلاصه شده است. بررسی نتایج تجزیه واریانس صفات نشان دهنده اثرات معنی‌دار زمان نمونه برداری، نوع و تیمار و اثرات متقابل این دو بر میزان شاخص‌های مورد بررسی داشته است (جدول ۱)

جدول ۱- نتایج تجزیه واریانس اثرات تیمارهای مورد استفاده بر شاخص‌های مورد بررسی طی ۶۰ روز بعد از گلدهی در میوه‌های کدو

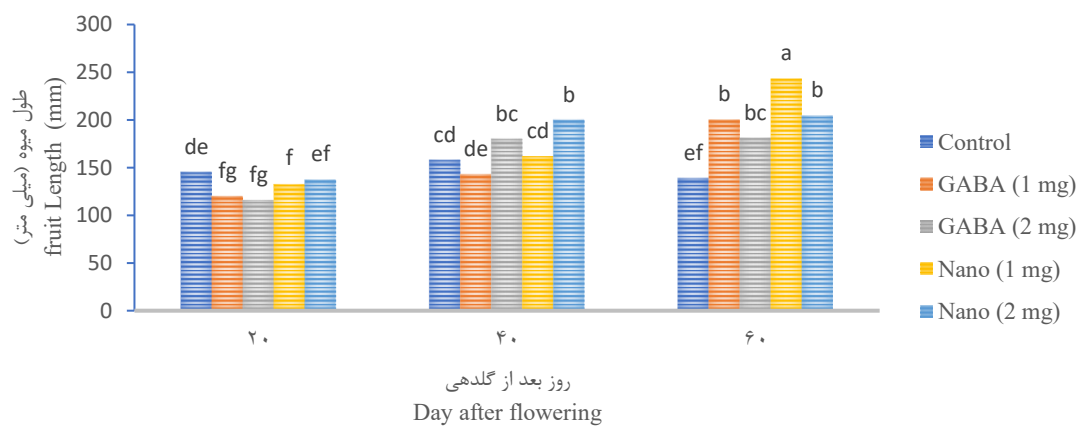
Table 1: Variance analysis results of the effects of treatments on the examined traits over 60 days after flowering in Cucurbita fruits.

S. O.V	DF	Mean Square								
		طول میوه Length of the fruit	قطر میوه Diameter of the fruit	ضخامت گوشت Flesh thickness	ضخامت پوست Skin thickness	کربوهیدرات کل Total Carbohydrates	محتوای فنل کل Total Phenol Content	محتوای فلاونوئید کل Total Flavonoid Content	آنتی‌اکسیدان کل Total Antioxidant	نشاسته Starch
بلوک Block	2	626.11 ^{ns}	10.190 ^{ns}	0.378 ^{ns}	0.0191 ^{ns}	0.0430 ^{ns}	0.039 ^{ns}	0.0185 ^{ns}	12.55 ^{ns}	0.0345 ^{ns}
تیمار Treat	4	2056.86**	1127.87**	34.88*	0.0658*	34.54**	2.19*	0.419**	622.958**	0.8185*
بلوک×تیمار Block× Treat	8	395.562 ^{ns}	343.05 ^{ns}	8.38 ^{ns}	0.0157 ^{ns}	0.060 ^{ns}	0.211 ^{ns}	0.0071 ^{ns}	2.24 ^{ns}	0.0088 ^{ns}
زمان Time	2	15239.93**	18333.06**	31.89**	1.679**	45.338**	73.75**	0.979**	1249.32**	1.45**
تیمار×زمان Treat× Time	8	2100.217**	1565.58**	43.76**	0.1238**	0.530**	1.69*	0.115**	41.39**	0.367**
بلوک×زمان Block× Time	4	133.038 ^{ns}	140.572 ^{ns}	17.26 ^{ns}	0.031 ^{ns}	0.014 ^{ns}	0.688 ^{ns}	0.0035 ^{ns}	10.151 ^{ns}	0.0021 ^{ns}
خطا Error	16	17.961	15.044	2.82	0.138	0.619	0.666	0.065	1.91	0.045
ضریب تعمیرات CV	-	10.95	11.53	20.07	18.79	11.54	9.56	7.27	7.07	9.89

طول و قطر میوه

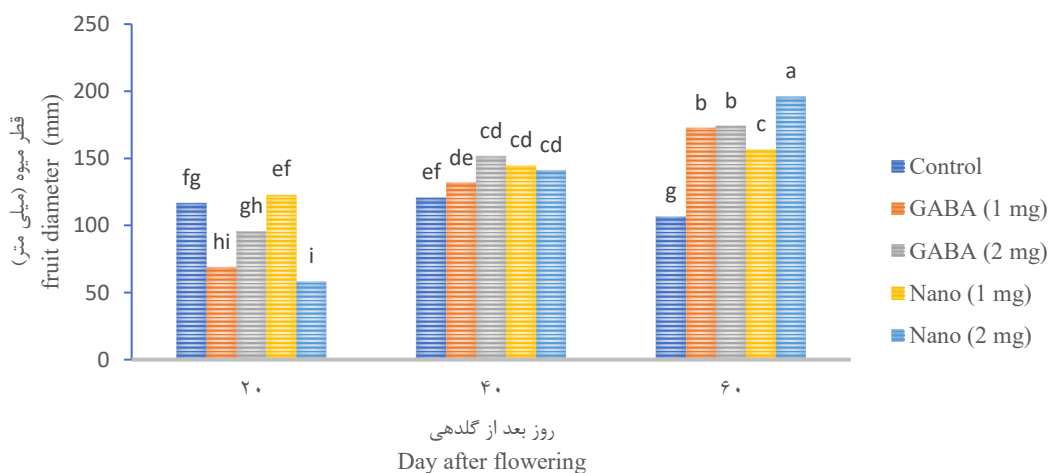
بطور کلی طول و قطر میوه طی ۶۰ روز بعد از گلدهی با افزایش همراه بود که این افزایش تا ۲۰ روز بعد از گلده یدر گیاهان شاهد بیشتر نمونه‌های تیمار شده بود از ۴۰ تا ۶۰ روز بعد از گلدهی میزان این دوشاخص در نمونه‌های تیمار شده بیشتر از نمونه‌های شاهد به دست آمد. بیشترین میزان طول میوه در گیاهان تیمار شده با نانولوله کربن در غلظت ۱ میلی‌گرم ۶۰ روز بعد از گلدهی مشاهده شد (شکل ۱). همچنین نتایج نشان داد که بیشترین میزان قطر میوه در گیاهان تیمار شده با نانولوله کربن در غلظت ۲ میلی‌گرم به دست آمد (شکل ۲). پژوهش حاضر نشان داد که طول و عرض میوه، به همراه ضخامت

پوست و گوشت میوه، در نمونه‌برداری‌های انجام‌شده از ۲۰ تا ۶۰ روز پس از گلدهی در میوه‌های کدو تحت تأثیر استفاده از گابا و نانولوله‌های کربن تغییرات قابل توجهی داشت. به طوری که طول (شکل ۱) و قطر (شکل ۲) میوه پس از ۶۰ روز از گلدهی با استفاده از نانولوله کربن در غلظت‌های ۱ و ۲ میلی‌گرم به حداکثر مقدار خود رسید. نشان داده شده است که نانولوله‌های کربن می‌توانند با تغییر مورفولوژی و فیزیولوژی گیاهان، بر رشد و عملکرد محصولات تأثیر بگذارند (Safdar *et al.*, 2022; Tiwari *et al.*, 2013). کاناس و همکاران (Cañas *et al.*, 2008) طی پژوهشی تأثیرات نانولوله‌های کربنی بر کشیدگی ریشه شش محصول انتخابی (کلم، هویج، خیار، کاهو، پیاز و گوجه‌فرنگی) بررسی کردند و مشاهده کردند که نانولوله‌های کربن طول ریشه‌ها را در پیاز و خیار افزایش دادند، در حالی که نانولوله‌ها نتوانستند به ریشه‌ها نفوذ کنند.



شکل ۱: تغییرات طول میوه‌های کدو (اکوتیپ اردبیل) طی ۶۰ روز بعد از گلدهی تحت تیمار گابا و نانولوله کربن.

Figure 1: Changes in the fruits length in *Cucurbita* (Ardabil's ecotype) over 60 days after flowering under GABA and carbon nanotube treatments.

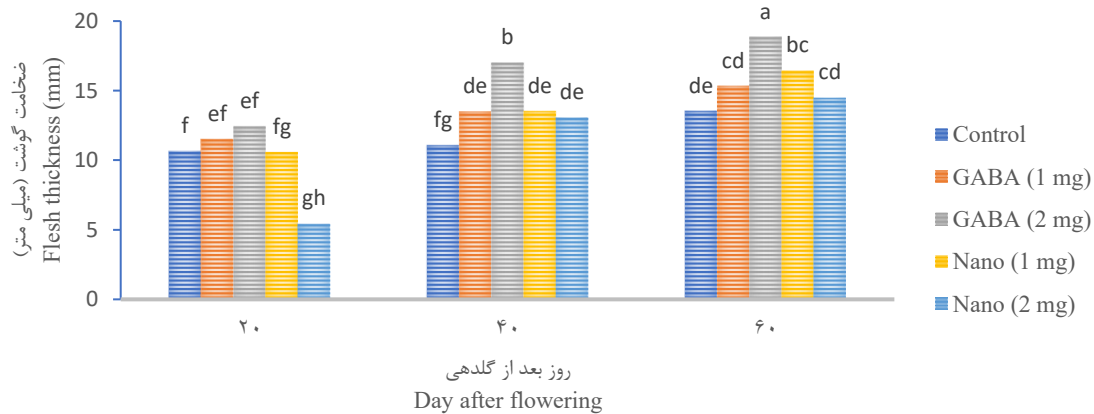


شکل ۲: تغییرات قطر میوه‌های کدو (اکوتیپ اردبیل) طی ۶۰ روز بعد از گلدهی تحت تیمار گابا و نانولوله کربن.

Figure 2: Changes in the fruits diameter of *Cucurbita* (Ardabil's ecotype) over 60 days after flowering under GABA and carbon nanotube treatments.

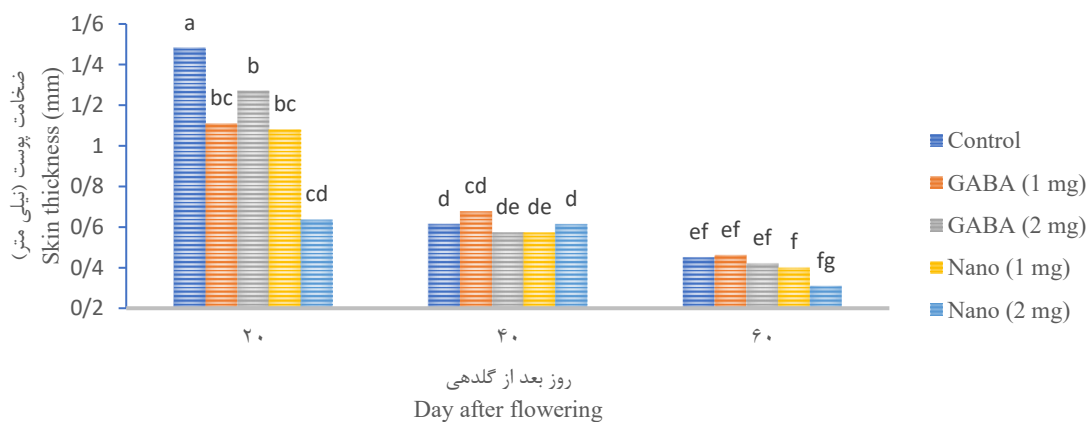
ضخامت گوشت و پوست میوه

میزان ضخامت گوشت میوه‌های کدو طی ۶۰ روز بعد از گلدهی روندی افزایشی داشت این در حالی بود که میزان ضخامت پوست میوه روندی کاهشی را طی این دوره نشان داد. نتایج پژوهش نشان داد که استفاده از غلظت‌های مختلف گابا و نانولوله کربن ضخامت گوشت در میوه‌های کدو را نسبت به نمونه‌های شاهد افزایش داد است (شکل ۳). از طرفی دیگر نتایج نشان داد که استفاده از این دو تیمار میزان ضخامت پوست میوه را کاهش داده است (شکل ۴). بیشترین میزان ضخامت گوشت میوه کدو (۱۸/۸۸ میلی‌متر) در گیاهان تیمار شده با نانولوله کربن در غلظت ۱ میلی‌گرم ۶۰ روز بعد از گلدهی مشاهده شد (شکل ۳). همچنین نتایج نشان داد که بیشترین میزان ضخامت پوست میوه (۱/۴۸ میلی‌متر) در نمونه شاهد ۲۰ روز بعد از گلدهی مشاهده شد (شکل ۴). کمترین میزان (۰/۳۱ میلی‌متر) این شاخص در نمونه‌های تیمار شده با نانولوله کربن در غلظت ۲ میلی‌گرم؛ ۶۰ روز بعد از گلدهی مشاهده شد (شکل ۴).



شکل ۳: تغییرات میزان ضخامت گوشت میوه‌های کدو (اکوتیپ اردبیل) طی ۶۰ روز بعد از گلدهی تحت تیمار گابا و نانولوله کربن.

Figure 3: Changes in the flesh thickness in Cucurbita (Ardabil's ecotype) over 60 days after flowering under GABA and carbon nanotube treatments.



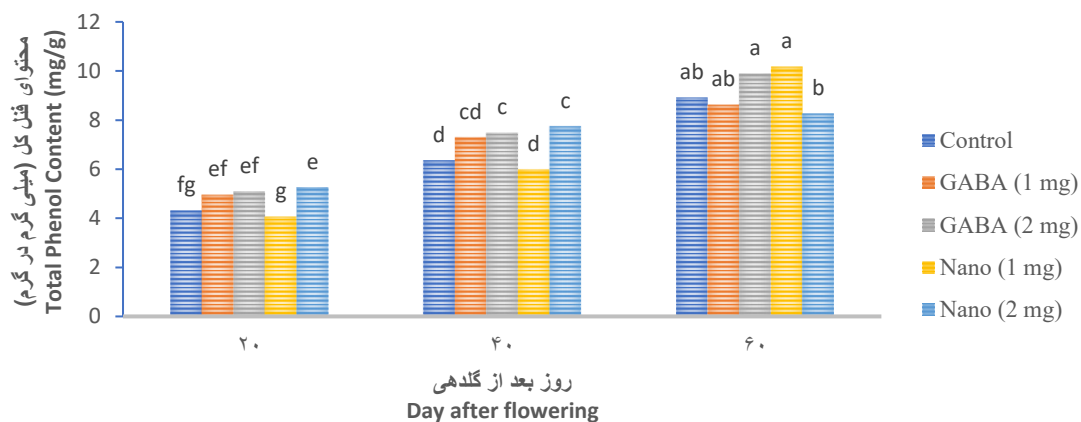
شکل ۴: تغییرات میزان ضخامت پوست میوه‌های کدو (اکوتیپ اردبیل) طی ۶۰ روز بعد از گلدهی تحت تیمار گابا و نانولوله کربن.

Figure 4: Changes in the skin thickness of Cucurbita fruits (Ardabil's ecotype) over 60 days after flowering under GABA and carbon nanotube treatments.

ضخامت گوشت میوه‌های کدو طی ۶۰ روز پس از گلدهی روندی افزایشی در گیاهان تیمار شده با گابا و نانو لوله کربن نسبت به نمونه‌های شاهد داشت، در حالی که ضخامت پوست میوه کاهش یافته بود. نشان داده شده است که نانولوله‌های کربنی می‌توانند بهبود قابل توجهی در جذب آب و مواد مغذی در گیاهان ایجاد کنند که این افزایش جذب مواد مغذی می‌تواند منجر به افزایش ضخامت گوشت میوه شود، زیرا بافت‌های گیاهی برای رشد و توسعه به مواد مغذی کافی نیاز دارند (Cai *et al.*, 2022). گابا به‌عنوان یک تنظیم‌کننده طبیعی رشد عمل می‌کند و می‌تواند به کاهش استرس‌های محیطی در گیاهان کمک کند که این امر ممکن است به کاهش ضخامت پوست میوه منجر شود، زیرا پوست میوه معمولاً تحت تأثیر شرایط محیطی و استرس‌های فیزیولوژیکی قرار دارد (Badiche *et al.*, 2023; Tilahun *et al.*, 2021). علاوه بر این، نشان داده شده است که استفاده از نانولوله‌های کربنی در ترکیب با دیگر مواد مغذی می‌تواند به افزایش کیفیت میوه‌ها و بهبود ویژگی‌های فیزیکی آن‌ها کمک کند (Sha *et al.*, 2022).

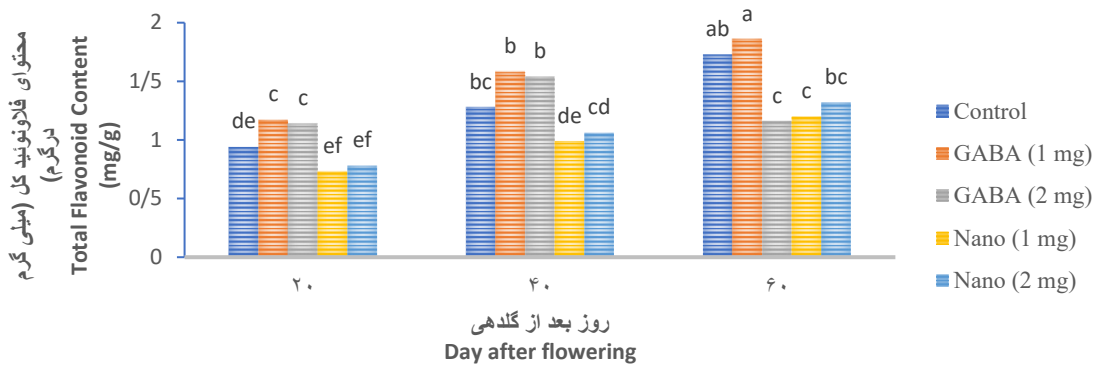
محتوای فنل، فلاونوئید کل و آنتی‌اکسیدان کل

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که محتوای فنل و فلاونوئید کل در طی بلوغ میوه‌های کدو تحت تاثیر غلظت‌های مختلف گابا و نانولوله کربن با افزایش همراه بود. به طوری که بیشترین میزان این دو شاخص ۶۰ روز بعد از گلدهی مشاهده شد. نتایج نشان داد که بیشترین محتوای فنل کل میوه در گیاهان تیمار شده با نانولوله کربن در غلظت ۱ میلی‌گرم (۱۰/۱۷ میلی‌گرم در گرم) و گابا در غلظت ۲ میلی‌گرم (۹/۹ میلی‌گرم در گرم) طی ۶۰ روز بعد از گلدهی مشاهده شد (شکل ۵) در بررسی اثرات تیمارهای گابا و نانولوله کربن مشاهده شد که افزایش غلظت نانولوله کربن با وجود افزایش محتوای فلاونوئید کل تا ۴۰ روز بعد از گلدهی، میزان این شاخص را بین ۴۰ : ۶۰ روز بعد از گلدهی را کاهش داد. بیشترین میزان محتوای فلاونوئید میوه در گیاهان تیمار شده با گابا در غلظت ۱ میلی‌گرم مشاهده شد (شکل ۶).



شکل ۵: تغییرات محتوای فنل کل در میوه‌های کدو (اکوتیپ اردبیل) طی ۶۰ روز بعد از گلدهی تحت تیمار گابا و نانولوله کربن.

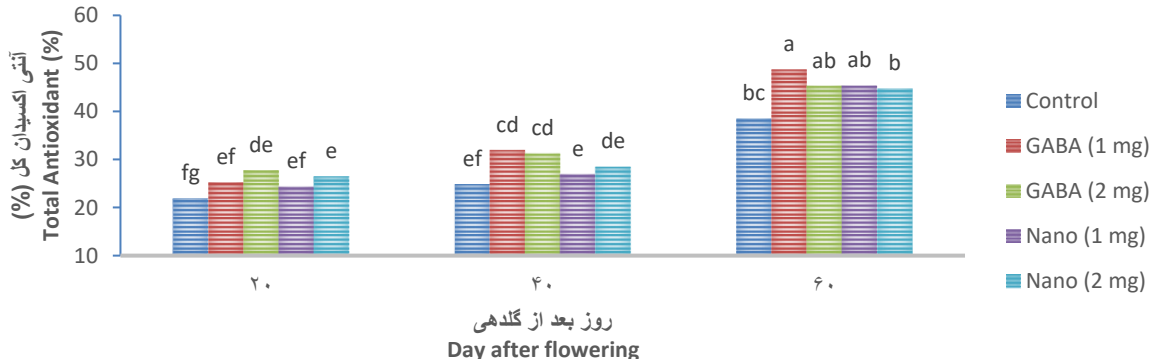
Figure 5: Changes in total phenol content in Cucurbita fruits (Ardabil's ecotype) over 60 days after flowering under GABA and carbon nanotube treatments.



شکل ۶: تغییرات محتوای فلاونوئید کل در میوه‌های کدو (اکوتیپ اردبیل) طی ۶۰ روز بعد از گلدهی تحت تیمار گابا و نانولوله کربن.

Figure 6: Changes in total flavonoid content in Cucurbita fruits (Ardabil's ecotype) over 60 days after flowering under GABA and carbon nanotube treatments.

میزان آنتی‌اکسیدان کل تحت تاثیر غلظت‌های مختلف گابا و نانولوله کربن طی بلوغ میوه (۶۰ روز بعد از گلدهی) با افزایش همراه بود. استفاده از گابا در غلظت ۱ میلی‌گرم تاثیر بهتری نسبت به شاهد در مقایسه با سایر تیمارها داشت. از این رو بیشترین میزان آنتی‌اکسیدان کل در نمونه‌های تیمار شده با گابا در غلظت ۱ میلی‌گرم طی ۶۰ روز بعد از گلدهی مشاهده شد. کمترین میزان این شاخص در نمونه‌های شاهد ۲۰ روز بعد از گلدهی به دست آمد (شکل ۷).



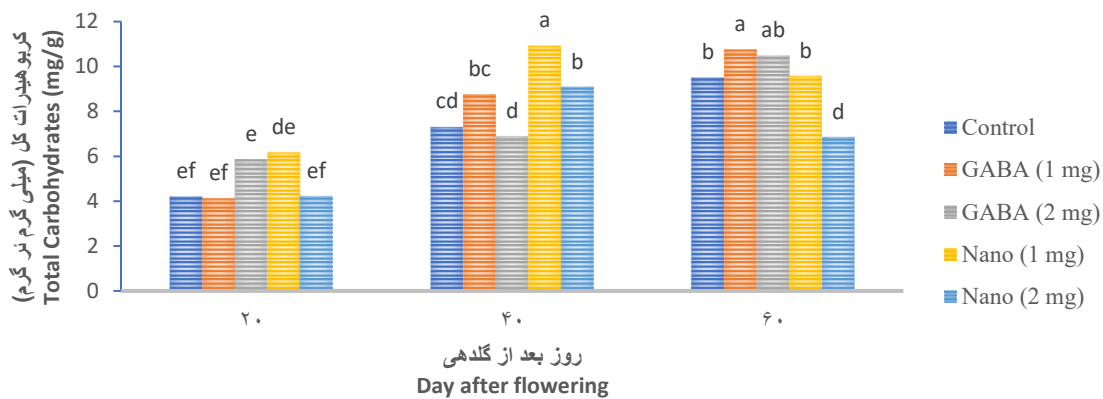
شکل ۷: تغییرات آنتی‌اکسیدان کل در میوه‌های کدو (اکوتیپ اردبیل) طی ۶۰ روز بعد از گلدهی تحت تیمار گابا و نانولوله کربن.

Figure 7: Changes in total antioxidant capacity in Cucurbita fruits (Ardabil's ecotype) over 60 days after flowering under GABA and carbon nanotube treatments.

نتایج این تحقیق نشان داد که غلظت‌های مختلف گابا و نانولوله کربن باعث افزایش محتوای فنل و فلاونوئید در میوه‌های کدو می‌شود، به طوری که بیشترین میزان این ترکیبات ۶۰ روز پس از گلدهی مشاهده شد. همچنین، نانولوله کربن در غلظت ۱ میلی‌گرم و گابا در غلظت ۲ میلی‌گرم بیشترین محتوای فنل را تولید کردند، در حالی که افزایش نانولوله کربن در بازه ۴۰ تا ۶۰ روز بعد از گلدهی، منجر به کاهش فلاونوئیدها شد. استفاده از نانولوله‌های کربنی در گیاهان *Thymus daensis* (al., 2012) و کالوس‌های *Satureja khuzestanica* نیز به افزایش محتوای این ترکیبات منجر شده است (Samadi et al., 2021).

کربوهیدرات کل و نشاسته

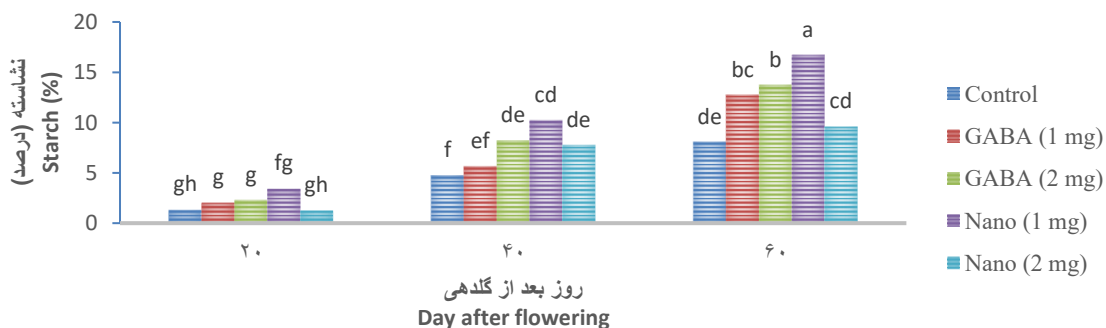
میزان کربوهیدرات کل در میوه‌های کدو تحت تاثیر زمان نمونه‌برداری و تیمارهای مورد استفاده قرار گرفت. به طوری که از ۲۰ روز بعد از شروع گلدهی میزان کربوهیدرات کل تا ۶۰ روز روندی افزایشی را به همراه داشت. این افزایش در گیاهان تیمار شده با گابا و غلظت متوسط نانولوله کربن بیشتر از نمونه‌های شاهد بود. بیشترین میزان کربوهیدرات (۱۰/۹۲ میلی‌گرم در گرم) کل در نمونه‌های تیمار شده با نانولوله کربن در غلظت ۱ میلی‌گرم ۴۰ روز بعد از گلدهی به دست آمد که با میزان این شاخص در نمونه‌های تیمار شده با گابا در غلظت ۱ میلی‌گرم ۶۰ روز بعد از گلدهی تفاوت معنی‌داری نداشت (شکل ۸).



شکل ۸: تغییرات میزان کربوهیدرات کل در میوه‌های کدو (اکوتیپ اردبیل) طی ۶۰ روز بعد از گلدهی تحت تیمار گابا و نانولوله کربن.

Figure 8: Changes in Total carbohydrate content in Cucurbita fruits (Ardabil's ecotype) over 60 days after flowering under GABA and carbon nanotube treatments.

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که همسو با بلوغ میوه میزان نشاسته نیز با افزایش همراه بود. به طوری که بین ۲۰ تا ۶۰ روز از گلدهی میزان این شاخص به بیشترین میزان خود رسید. استفاده از گابا و غلظت متوسط نانولوله کربن تاثیر قابل ملاحظه‌ای در افزایش میزان نشاسته در میوه‌های کدو نسبت به نمونه‌های شاهد داشت. نتایج نشان داد که بیشترین میزان نشاسته در میوه‌های تیمار شده با نانولوله کربن در غلظت ۱ میلی‌گرم طی ۶۰ روز بعد از گلدهی مشاهده شد.



شکل ۹: تغییرات میزان نشاسته در میوه‌های کدو (اکوتیپ اردبیل) طی ۶۰ روز بعد از گلدهی تحت تیمار گابا و نانولوله کربن.

Figure 9: Changes in total antioxidant capacity in Cucurbita fruits (Ardabil's ecotype) over 60 days after flowering under GABA and carbon nanotube treatments.

طی پژوهش حاضر مشاهده شد که نانولوله کربن در غلظت ۱ میلی‌گرم باعث افزایش قابل توجه نشاسته در میوه‌های کدو شد و این میزان بین ۲۰ تا ۶۰ روز پس از گلدهی به اوج خود رسید. نانولوله‌های کربنی به عنوان نانوذراتی با ویژگی‌های منحصر به فرد، می‌توانند تأثیرات مثبتی بر تجمع کربوهیدرات (خصوصاً نشاسته) در گیاهان، از جمله کدو، داشته باشند. یکی از مکانیسم‌های اصلی این تأثیر، بهبود جذب نور و افزایش کارایی فتوسنتز است (Subalya *et al.*, 2022). نانولوله‌های کربنی به دلیل ساختار خاص خود، می‌توانند به عنوان جاذب نور عمل کنند و انرژی بیشتری را از تابش خورشید جذب کنند. این افزایش جذب نور به گیاهان کمک می‌کند تا فرآیند فتوسنتز را بهینه‌تر انجام دهند و در نتیجه، تولید قند و نشاسته بیشتری داشته باشند. این امر به ویژه در شرایطی که نور کافی برای گیاهان فراهم نیست، می‌تواند تأثیر قابل توجهی داشته باشد (Antal *et al.*, 2021; Velikova *et al.*, 2021). علاوه بر این، نانولوله‌های کربنی می‌توانند به بهبود دسترسی گیاهان به مواد مغذی از خاک کمک کنند. نیتروژن و فسفر، دو عنصر کلیدی هستند که برای سنتز نشاسته بسیار ضروری‌اند (Chen *et al.*, 2022). نانولوله‌های کربنی با افزایش سطح تماس ریشه‌ها با خاک و بهبود ساختار خاک، می‌توانند جذب این عناصر را افزایش دهند (Samadi *et al.*, 2021; Chen *et al.*, 2022). همچنین، این نانوذرات می‌توانند به عنوان حامل‌های مواد مغذی عمل کنند و مواد غذایی را به ریشه‌ها منتقل کنند، که این امر به رشد بهتر گیاه و افزایش تجمع نشاسته منجر می‌شود (Zhao *et al.*, 2021; Dutta *et al.*, 2021). همچنین، نانولوله‌های کربنی می‌توانند فعالیت آنزیم‌های دخیل در متابولیسم نشاسته را تحریک کنند (Asl *et al.*, 2022). این آنزیم‌ها، مانند آمیلاز، نقش مهمی در تجزیه و سنتز نشاسته ایفا می‌کنند. با افزایش فعالیت این آنزیم‌ها، فرآیندهای متابولیکی مربوط به تولید نشاسته تسریع می‌شوند و در نتیجه، تجمع نشاسته در گیاهان افزایش می‌یابد (Fu *et al.*, 2023). این تأثیر می‌تواند به ویژه در مراحل مختلف رشد گیاهان، مانند گلدهی و میوه‌دهی، مشهود باشد (Wu *et al.*, 2023).

نتیجه گیری کلی

کدو به‌عنوان یک منبع غنی از ویتامین‌ها، مواد معدنی و آنتی‌اکسیدان‌ها، نقش مهمی در تأمین نیازهای غذایی و حفظ سلامت عمومی دارد، و نشاسته موجود در آن به عنوان یک منبع اصلی انرژی، به بهبود عملکرد گوارش و افزایش احساس سیری کمک می‌کند. نتایج این پژوهش نشان‌دهنده تأثیر مثبت تیمارهای نانولوله کربن و گابا بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی میوه‌های کدو (ژنوتیپ اردبیل) در طی ۶۰ روز بعد از گلدهی است. طول و قطر میوه‌ها در نمونه‌های تیمار شده به‌طور معنی‌دار بیشتر از گیاهان شاهد بود و بیشترین افزایش در غلظت‌های مشخصی از نانولوله کربن مشاهده شد. همچنین، ضخامت گوشت میوه‌ها روندی افزایشی داشت در حالی که ضخامت پوست کاهش یافت. میزان کربوهیدرات کل و نشاسته نیز تحت تأثیر تیمارها به‌طور معناداری افزایش یافت. محتوای فنل و فلاونوئید نیز در اثر تیمارهای مختلف افزایش یافته و به‌خصوص در غلظت‌های خاص نانولوله کربن و گابا به حداکثر خود رسیدند. در نهایت، میزان آنتی‌اکسیدان کل در نمونه‌های تیمار شده با گابا در غلظت

۱ میلی‌گرم به‌طور قابل توجهی افزایش یافت. این نتایج نشان‌دهنده پتانسیل استفاده از نانولوله کربن و گابا در بهبود کیفیت و ویژگی‌های تغذیه‌ای میوه‌های کدو می‌باشد.

منابع

- Anju, Dhiman. K., Sharma, K. D., & Attri, S. (2009).** Functional constituents and processing of pumpkin: A review. *Journal of Food Science and Technology*, 46(5), 411.
- Antal, T. K., Volgusheva, A. A., Kukarskikh, G. P., Lukashev, E. P., Bulychev, A. A., Margonelli, A., & Lambreva, M. D. (2022).** Single-walled carbon nanotubes protect photosynthetic reactions in *Chlamydomonas reinhardtii* against photoinhibition. *Plant Physiology and Biochemistry*, 192, 298-307.
- Asl, M. A., Karbasi, S., Beigi-Boroujeni, S., Benisi, S. Z., & Saeed, M. (2022).** Polyhydroxybutyrate-starch/carbon nanotube electrospun nanocomposite: A highly potential scaffold for bone tissue engineering applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 223, 524-542.
- Bader, H.G. and Göritz, D., (1994).** Investigations on high amylose corn starch films. Part 3: *stress strain behaviour*. *Starch-Stärke*, 46(11): 435-439
- Badiche, F., Valverde, J. M., Martínez-Romero, D., Castillo, S., Serrano, M., & Valero, D. (2023).** preharvest use of γ -aminobutyric acid (GABA) as an innovative treatment to enhance yield and quality in lemon fruit. *Horticulturae*, 9(1), 93.
- Cagno, DR., Mazzacane, F., Rizzello, C., Angelis, M., Giuliani, G., Meloni, M., Servi, B., Gobetti, M. (2010).** Synthesis of gamma - aminobutyric acid (GABA) by *Lactobacillus plantarum* DSM19463: functional grape must beverage and dermatological applications. *Appl Microbiol Biotechnol*, 86(2):731 -41
- Cai, S., Zhang, P., Guo, Z., Jin, F., Wang, J., Song, Z., & Dang, X. (2022).** Multi-walled carbon nanotubes improve nitrogen use efficiency and nutritional quality in *Brassica campestris*. *Environmental Science: Nano*, 9(4), 1315-1329.
- Cañas JE, Long M, Nations S, Vadan R, Dai L, Luo M, Ambikapathi R, Lee EH, Olszyk D. (2008).** Effects of functionalized and nonfunctionalized single walled carbon nanotubes on root elongation of select crop species. *Environ Toxicol Chem*. 27:1922–31.
- Chen, X., Wang, J., You, Y., Wang, R., Chu, S., Chi, Y., ... & Zhou, P. (2022).** When nanoparticle and microbes meet: The effect of multi-walled carbon nanotubes on microbial community and nutrient cycling in hyperaccumulator system. *Journal of Hazardous Materials*, 423, 126947.
- Chen, Z., Zhao, J., Cao, J., Zhao, Y., Huang, J., Zheng, Z., ... & Zhang, J. (2022).** Opportunities for graphene, single-walled and multi-walled carbon nanotube applications in agriculture: A review. *Crop Design*, 1(1), 100006.
- Dhakal, R., Bajpai, V.K., Baek KH. (2012).** Production of GABA (γ -aminobutyric acid) by microorganisms : A review. *Brazilian Journal of Microbiology*, 43:1230 -1241.
- Dutta, S., Pal, S., Sharma, R. K., Panwar, P., Kant, V., & Khola, O. P. S. (2021).** Implication of wood-derived hierarchical carbon nanotubes for micronutrient delivery and crop biofortification. *ACS omega*, 6(37), 23654-23665.
- Fathi, Z., Khavari Nejad, R.A., Mahmoodzadeh, H. and Nejad Satari, T., (2017).** Investigating of a wide range of concentrations of multi-walled carbon nanotubes on germination and growth of castor seeds (*Ricinus communis* L.). *Journal of Plant Production Research*, 57(3): 228-236
- Fazeli-Nasab, B., Solouki, M., & Sobhanizadeh, A. (2021).** Green synthesis of silver nanoparticles using an ephedra sinica herb extract with antibacterial properties. *Journal of Medical Bacteriology*, 30-47.

Fu, Z., Li, C., Tian, X., Zhan, R., & Yang, J. (2023). Single-walled carbon nanohorns promote apple growth by regulating carbohydrate allocation and metabolism. *Scientia Horticulturae*, 320, 112189.

Giglou, M. T., Giglou, R. H., Esmailpour, B., Azarmi, R., Padash, A., Falakian, M., ... & Lajayer, H. M. (2022). A new method in mitigation of drought stress by chitosan-coated iron oxide nanoparticles and growth stimulant in peppermint. *Industrial Crops and Products*, 187, 115286.

Giglou, R. H., Giglou, M. T., Esmailpour, B., Padash, A., Ghahremanzadeh, S., Sobhanizade, A., & Hatami, M. (2023). Exogenous melatonin differentially affects biomass, total carbohydrates, and essential oil production in peppermint upon simultaneous exposure to chitosan-coated Fe₃O₄ NPs. *South African Journal of Botany*, 163, 135-144.

Khodakovskaya, M.V., de Silva, K., Biris, A.S., Dervishi, E. and Villagarcia, H., (2012). Carbon nanotubes induce growth enhancement of tobacco cells. *ACS Nano*, 6(3): 2128-2135

Kinnersley AM, Turano FJ. (2000). Gamma aminobutyric acid (GABA) and plant responses to stress. *Critical Reviews. Plant Sciences*. 19: 479-509.

Lahiani, M.H., Dervishi, E., Chen, J., Nima, Z., Gaume, A., Biris, A.S. and Khodakovskaya, M.V. (2013). Impact of carbon nanotube exposure to seeds of valuable crops. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 5(16): 7965-7973

Luo HY, Gao HB, Xia QP, Gong BB, Xiao-Lei WU. (2011). Effects of exogenous GABA on reactive oxygen species metabolism and chlorophyll fluorescence parameters in tomato under NaCl stress. *Scientia Agricultura Sinica* 34: 37-544.

Ma, X., Geiser-Lee, J., Deng, Y. and Kolmakov, A. (2010). Interactions between engineered nanoparticles (ENPs) and plants: Phytotoxicity, uptake and accumulation. *Science of the Total Environment*, 408(16): 3053-3061.

Meda, A., Lamien, C. E., Romito, M., Millogo, J., & Nacoulma, O. G. (2005). Determination of the total phenolic, flavonoid and proline contents in Burkina Fasan honey, as well as their radical scavenging activity. *Food chemistry*, 91(3), 571-577.

Miliauskas, G., Venskutonis, P.R., and Vanbeek, T.A. (2004). Screening of radical scavenging activity of some medicinal and aro-matic plant extracts. *Food Chemistry*. 85, 231-237. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2003.05.007>

Mita, S., Murano, N., Akaike, M., & Nakamura, K. (1997). Mutants of Arabidopsis thaliana with pleiotropic effects on the expression of the gene for β-amylase and on the accumulation of anthocyanin that are inducible by sugars. *The Plant Journal*, 11(4), 841-851.

Padash, A., Heydarnajad Giglou, R., Torabi Giglou, M., Azarmi, R., Mokhtari, A. M., Gohari, G., ... & Ghorbanpour, M. (2023). Comparing the toxicity of tungsten and vanadium oxide nanoparticles on *Spirulina platensis*. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(15), 45067-45076.

Pourkhaloee, A., Haghghi, M., Saharkhiz, M.J., Jouzi, H. and Doroodmand, M.M. (2011). Carbon nanotubes can promote seed germination via seed coat penetration. *Seed Technology*, 33(2): 155-169.

Safdar, M., Kim, W., Park, S., Gwon, Y., Kim, Y. O., & Kim, J. (2022). Engineering plants with carbon nanotubes: a sustainable agriculture approach. *Journal of Nanobiotechnology*, 20(1), 275.

Samadi, S., Lajayer, B. A., Moghiseh, E., & Rodríguez-Couto, S. (2021). Effect of carbon nanomaterials on cell toxicity, biomass production, nutritional and active compound accumulation in plants. *Environmental Technology & Innovation*, 21, 101323.

Sha, R., Zhu, S., Wu, L., Li, X., Zhang, H., Yao, D., ... & Yu, K. (2022). Pre-Harvest Application of Multi-Walled Carbon Nanotubes Improves the Antioxidant Capacity of 'Flame Seedless' Grapes during Storage. *Sustainability*, 14(15), 9568.

Shelp, B. J., Bozzo, G. G., Trobacher, C. P., Chiu, G. and Bajwa, V. S. (2012). Strategies and tools for studying the metabolism and function of γ -aminobutyrate in plants. I Pathway Structure. *Botany*, 90(8), 651-668.

Subalya, M., Voleti, R., & Wait, D. A. (2022). The Effects of Different Solid Content Carbon Nanotubes and Silver Quantum Dots on Potential Toxicity to Plants through Direct Effects on Carbon and Light Reactions of Photosynthesis. *WSEAS Trans. Electron*, 13, 11-18.

Takahiro, N., Shogo, T., Motoyuko, M., Shigenobo, t., Chie; S. Katsuichi; W.H. Arachichige; H. Akihiro; S. Yasuyuki and Y. Hiroaki. (2004). The effect of harvest dates on the starch properties of various potato cultivars. *Food Chemistry*, 86,119-125.

Tian, S.; Chen, Y.; Chen, Z.; Yang, Y.; Wang, Y. (2018). Preparation and characteristics of starch esters and its effects on dough physicochemical properties. *J. Food Qual.* 7.(1), 287.

Tilahun, S., Choi, H. R., Baek, M. W., Cheol, L. H., Kwak, K. W., Park, D. S., & Jeong, C. S. (2021). Antioxidant properties, γ -aminobutyric acid (GABA) content, and physicochemical characteristics of tomato cultivars. *Agronomy*, 11(6), 1204.

Tiwari D, DasguptaSchubert N, Villasenor L, Tripathi D, Villegas J. (2013). Inter- action of carbon nanotubes with mineral nutrients for the promotion of growth of tomato seedlings. *Nano Stud.* 7:87-96.

Tiwari, D.K., Dasgupta-Schubert, N., Villaseñor Cendejas, L.M., Villegas, J., Carreto Montoya, L. and Borjas García, S.E. (2014). Interfacing carbon nanotubes (CNT) with plants: enhancement of growth, water and ionic nutrient uptake in maize (*Zea mays*) and implications for nanoagriculture. *Applied Nanoscience*, 4(5): 577-591.

Velikova, V., Petrova, N., Kovács, L., Petrova, A., Koleva, D., Tsonev, T., & Krumova, S. (2021). Single-walled carbon nanotubes modify leaf micromorphology, chloroplast ultrastructure and photosynthetic activity of pea plants. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(9), 4878.

Wu, M., Su, H., Li, C., Fu, Z., Wu, F., Yang, J., & Wang, L. (2023). Effects of foliar application of single-walled carbon nanotubes on carbohydrate metabolism in crabapple plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 194, 214-222.

Yu GH, Sun MX. (2007). Deciphering the possible mechanism of GABA in tobacco pollen tube growth and guidance. *Plant Signaling & Behavior*. 2: 393-395.

Zhao, F., Xin, X., Cao, Y., Su, D., Ji, P., Zhu, Z., & He, Z. (2021). Use of carbon nanoparticles to improve soil fertility, crop growth and nutrient uptake by corn (*Zea mays* L.). *Nanomaterials*, 11(10), 2717.