Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Journal of Plant Production Research

Print ISSN: 2322-2050
Online ISSN: 2322-2778

The effect of postharvest treatments of melatonin and γ-aminobutyric acid on improving antioxidant activity and reducing browning of fresh cut button mushroom (*Agaricus bisporus*) during cold storage

Aydin Shekari[1], Rahim Naghsiband Hassani[*2], Morteza Soleimani Aghdam[3], Mehdi Rezaee[4], Abbasali Jannatizadeh[5]

1. Ph.D. Graduate, Dept. of Horticultural Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail: ap.shekari@tabrizu.ac.ir
2. Corresponding Author, Assistant Prof., Dept. of Horticultural Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail: naghshiband@tabrizu.ac.ir
3. Assistant Prof., Dept. of Horticultural Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran. E-mail: soleimaniaghdam@eng.ikiu.ac.ir
4. Assistant Prof., Seed and Plant Certification and Registration Institute, Karaj, Iran. E-mail: meh.rezaee@areeo.ac.ir
5. Assistant Prof., Dept. of Horticultural Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran. E-mail: jannatizadeh@eng.ikiu.ac.ir

Article Info

Article type:
Full Length Research Paper

Article history:
Received: 08.06.2021
Revised: 08.31.2021
Accepted: 11.15.2021

Keywords:
Browning,
Fresh cut button mushroom,
GABA,
Melatonin,
Storage

ABSTRACT

Background and Objectives: Production and consumption of button mushroom is increasing in many parts of the world due to their good nutritional value and desirable medicinal properties, but because these types of mushrooms do not have a protective outer coating, they have a short shelf life, and during the postharvest, the quality of button mushrooms decreases due to water reduction, color change, texture change, reduction of taste and nutritional value, which limits its economic value, so the application of postharvest treatments can preserve the nutritional value and improve the shelf life of these mushrooms. Therefore, this study aimed to investigate the effect of postharvest treatments of melatonin and γ-aminobutyric acid (GABA) on the storage life and nutritional quality of fresh cut button mushrooms.

Materials and Methods: The postharvest treatments used in this experiment included melatonin (10 µM) and GABA (1 mM) and control (distilled water), which the mushrooms were immersed in a solution of these treatments for 5 minutes, and after drying at room temperature (24 ± 1), the mushrooms were placed in sealed containers and stored in a cold store at 4 °C with a relative humidity of 90 ± 5%. The samples were taken on days 0, 5, 10, and 15 days after treatment, and to measure browning index, hydrogen peroxide accumulation, the activity of cell membrane degrading enzymes and antioxidants enzymes were used.

Results: The results showed that postharvest application of melatonin and GABA in fresh cut button mushrooms caused a delay in browning of slices of button mushrooms compared to control mushrooms and on the 15th day of storage, browning index in mushrooms treated with melatonin, GABA, and control was 45.78, 40.01, and 90.5%, respectively. Accumulation of hydrogen peroxide in melatonin and GABA treated mushrooms was significantly reduced compared to control mushrooms due to increased activity of the antioxidant enzymes superoxide dismutase, ascorbate peroxidase, catalase and glutathione reductase, and the highest hydrogen

peroxide accumulation (51.35 µ mol g^{-1} FW) was obtained on the 10^{th} day of storage in control samples. Membrane stability increased in melatonin and GABA treated mushrooms due to decreased activity of lipoxygenase and phospholipase D enzymes in these mushrooms. GABA treatment also showed better results than melatonin in most of the studied traits.

Conclusion: In general, according to the results of the present study, melatonin and GABA can used as an effective and safe method in maintaining nutritional quality and improving the shelf life of fresh cut button mushrooms during cold storage. Also, due to the better results provided by GABA in most of the studied traits and its cheapness compared to melatonin, it is recommended to use GABA in fresh cut mushrooms postharvest to maintain the quality of the mushrooms.

Cite this article: Shekari, Aydin, Naghsiband Hassani, Rahim, Soleimani Aghdam, Morteza, Rezaee, Mehdi, Jannatizadeh, Abbasali. 2023. The effect of postharvest treatments of melatonin and γ-aminobutyric acid on improving antioxidant activity and reducing browning of fresh cut button mushroom (*Agaricus bisporus*) during cold storage. *Journal of Plant Production Research*, 29 (4), 45-61.

© The Author(s).
DOI: 10.22069/JOPP.2022.19347.2859
Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

نشریه پژوهش‌های تولید گیاهی

شاپا چاپی: ۲۳۲۲-۲۰۵۰
شاپا آنلاین: ۲۳۲۲-۲۷۷۸

تأثیر تیمارهای پس از برداشت ملاتونین و گاما–آمینو بوتیریک اسید بر بهبود فعالیت آنتی‌اکسیدانی و کاهش قهوه‌ای شدن فرم تازه بریده قارچ تکمه‌ای (*Agaricus bisporus*) طی انبارمانی سرد

آیدین شکاری[۱]، رحیم نقشبند حسنی*[۲]، مرتضی سلیمانی‌اقدم[۳]، مهدی رضایی[۴]، عباسعلی جنتی‌زاده[۵]

۱. دانشجوی سابق دکتری تخصصی گروه علوم و مهندسی باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.
رایانامه: ap.shekari@tabrizu.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، استادیار گروه علوم و مهندسی باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.
رایانامه: naghshiband@tabrizu.ac.ir
۳. استادیار گروه علوم و مهندسی باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.
رایانامه: soleimaniaghdam@eng.ikiu.ac.ir
۴. استادیار مؤسسه ثبت و گواهی بذر و نهال، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی (areeo)، کرج، ایران.
رایانامه: meh.rezaee@areeo.ac.ir
۵. استادیار گروه علوم و مهندسی باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.
رایانامه: jannatizadeh@eng.ikiu.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله کامل علمی- پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۱۵
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۰/۰۶/۰۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۲۴

واژه‌های کلیدی:
انبارمانی،
قارچ تکمه‌ای تازه بریده،
قهوه‌ای شدن،
گابا،
ملاتونین

چکیده

سابقه و هدف: تولید و مصرف قارچ تکمه‌ای به دلیل ارزش خوراکی مناسب و خصوصیات دارویی مطلوب در بسیاری از نقاط جهان رو به افزایش است، ولی چون این نوع قارچ‌ها فاقد پوشش خارجی نگهدارنده هستند، عمر نگهداری کوتاهی دارند و طی مرحله پس از برداشت کیفیت قارچ تکمه‌ای به دلیل کاهش آب، تغییر رنگ، تغییر بافت، کاهش طعم و ارزش غذایی کاهش می‌یابد که موجب محدود کردن ارزش اقتصادی آن می‌شود، بنابراین کاربرد تیمارهای پس از برداشت می‌تواند موجب حفظ ارزش تغذیه‌ای و بهبود عمر انباری این قارچ‌ها شود. بنابراین، این پژوهش با هدف بررسی اثر تیمارهای پس از برداشت ملاتونین و گاما–آمینوبوتیریک اسید (گابا) بر عمر انباری و کیفیت تغذیه‌ای قارچ تکمه‌ای تازه بریده انجام شد.

مواد و روش‌ها: تیمارهای پس از برداشت استفاده شده در این آزمایش شامل ملاتونین (۱۰ میکرومولار) و گابا (۱ میلی‌مولار) و شاهد (آب مقطر) بود که غوطه‌وری قارچ‌ها در محلول این تیمارها به مدت ۵ دقیقه صورت گرفت و پس از خشک کردن در دمای اتاق (۱±۲۴)، قارچ‌ها در ظروف بسته‌بندی قرار گرفته و در سردخانه در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد با رطوبت نسبی ۵ ± ۹۰ درصد نگهداری شدند. نمونه‌برداری از قارچ‌ها در روزهای صفر، ۵،

۱۰ و ۱۵ روز پس از تیمار انجام شد. نمونه‌های گرفته شده برای اندازه‌گیری شاخص قهوه‌ای شدن، تجمع پراکسید هیدروژن، فعالیت آنزیم‌های تجزیه‌کننده غشای سلولی و آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان مورد استفاده قرار گرفت.

یافته‌ها: نتایج پژوهش نشان داد که کاربرد پس از برداشت ملاتونین و گابا در فرم تازه بریده قارچ تکمه‌ای، سبب تاخیر در قهوه‌ای شدن اسلایس‌های قارچ تکمه‌ای نسبت به قارچ‌های شاهد شد و در پانزدهمین روز انبارمانی شاخص قهوه‌ای شدن در قارچ‌های تیمار شده با ملاتونین، گابا و شاهد به ترتیب برابر با ۴۵/۷۸، ۴۰/۰۱ و ۹۰/۵ درصد بود. تجمع پراکسید هیدروژن در قارچ‌های تکمه‌ای تیمار شده با ملاتونین و گابا نسبت به قارچ‌های تکمه‌ای شاهد به‌طور معنی‌داری کاهش یافت که ناشی از افزایش فعالیت آنزیم آنتی‌اکسیدان سوپراکسید دیسموتاز، آسکوربات پراکسیداز، کاتالاز و گلوتاتیون ردوکتاز بود و بیش‌ترین مقدار تجمع پراکسید هیدروژن (۵۱/۳۵ میکرومول در گرم وزن تر) در دهمین روز انبارمانی در نمونه‌های شاهد به‌دست آمد. پایداری غشا در قارچ‌های تکمه‌ای تیمار شده با ملاتونین و گابا افزایش یافت که ناشی از کاهش فعالیت آنزیم‌های لیپواکسیژناز و فسفولیپاز D در این قارچ‌ها بود. هم‌چنین تیمار گابا در بیش‌تر صفات مورد بررسی نتایج بهتری نسبت به ملاتونین ارائه داد.

نتیجه‌گیری: به طور کلی با توجه به نتایج پژوهش حاضر، ملاتونین و گابا می‌توانند به عنوان یک روش مؤثر و ایمن در حفظ کیفیت تغذیه‌ای و بهبود عمر انبارمانی قارچ تکمه‌ای تازه بریده طی نگهداری در انبار سرد استفاده گردند. هم‌چنین با توجه به ارائه نتایج بهتر توسط گابا در بیش‌تر صفات مورد بررسی و ارزان بودن آن نسبت به ملاتونین، توصیه به استفاده از گابا در پس از برداشت قارچ تکمه‌ای تازه بریده به منظور حفظ کیفیت قارچ‌ها می‌شود.

استناد: شکاری، آیدین، نقشیبند حسنی، رحیم، سلیمانی‌اقدم، مرتضی، رضایی، مهدی، جنتی‌زاده، عباسعلی (۱۴۰۱). تأثیر تیمارهای پس از برداشت ملاتونین و گاما-آمینو بوتیریک اسید بر بهبود فعالیت آنتی‌اکسیدانی و کاهش قهوه‌ای شدن فرم تازه بریده قارچ تکمه‌ای (*Agaricus bisporus*) طی انبارمانی سرد. *نشریه پژوهش‌های تولید گیاهی*، ۲۹ (۴)، ۶۱-۴۵.
DOI: 10.22069/JOPP.2022.19347.2859

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان
© نویسندگان.

مقدمه

قارچ تکمه‌ای (*Agaricus bisporus*) به دلیل ارزش غذایی و طعم خوب آن یکی از خوش‌طعم‌ترین قارچ‌ها می‌باشد، طوری که تولید و مصرف آن همه روزه افزایش می‌یابد و تقریباً ۳۵ درصد از کل تولید قارچ خوراکی جهان را تشکیل می‌دهد (۱). قارچ‌ها منبع خوبی از مواد مغذی به‌خصوص ویتامین B_2، فولات‌ها، نیاسین و بسیاری از مواد معدنی سالم می‌باشند (۲). عمر قفسه‌ای کوتاه قارچ تکمه‌ای که ۱ تا ۳ روز در شرایط اتاق است، مشکل جدی در توزیع پس از برداشت آن می‌باشد. عمر قفسه‌ای کوتاه قارچ‌ها عمدتاً ناشی از تنفس زیاد، از دست دادن آب و فعالیت متابولیکی سریع آن می‌باشد (۳). برای قارچ‌های تازه بریده، عمر نگهداری کوتاه‌تر نیز هست، که به‌دلیل اثرات بریدن و شستن می‌باشد. شستن باعث افزایش فساد میکروبی می‌شود، زیرا شستن حجم آب قارچ را افزایش می‌دهد که منجر به افزایش رشد باکتری‌ها می‌شود (۴). فرآیند برش می‌تواند سبب پخش باکتری‌ها در سطوح بریده شود و سلول‌های هیف را آسیب دیده کند، و با فعال کردن پیش‌ماده‌ها و آنزیم‌ها و تماس آن‌ها با یکدیگر سبب تشکیل رنگدانه‌های قهوه‌ای می‌شود (۵). لامل‌ها و ساقه قارچ در قارچ‌های تازه بریده نسبت به فرم کامل قارچ بیش‌تر نمایان خواهد شد و می‌تواند آلودگی میکروبی سریع‌تری نسبت به کلاهک نشان دهد. علاوه بر این، آب‌دهی برش‌ها، سبب خمیدگی آن‌ها می‌شود. افزایش ماندگاری قارچ‌های تازه بریده به‌دلیل این‌که پتانسیل صادرات آن را محدود می‌کند، ضروری می‌باشد (۴).

تنش اکسیداتیو یکی از اصلی‌ترین تنش‌ها طی دوره انبارمانی و پیری محصول می‌باشد (۶). گونه‌های فعال اکسیژن مانند آنیون سوپراکسید و پراکسید هیدروژن یک نقش اساسی در افزایش پراکسیداسیون لیپیدی غشاء و ایجاد آسیب اکسیداتیو در غشاء دارند (۷). حساسیت به تنش اکسیداتیو بستگی به تعادل کلی اکسیدان‌ها و آنتی‌اکسیدان‌ها دارد. سامانه دفاعی طبیعی مثل آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی، توانایی محافظت از گیاه در برابر اثرات سمی گونه‌های فعال اکسیژن دارند. آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان مثل سوپراکسید دیسموتاز، آسکوربات پراکسیداز، کاتالاز و گلوتاتیون ردوکتاز با هماهنگی هم در مقابل گونه‌های فعال اکسیژن عمل می‌کنند. سوپر اکسید دیسموتاز اولین قسمت دفاعی در برابر گونه‌های فعال اکسیژن می‌باشد که رادیکال‌های اکسیژن را به پراکسید هیدروژن کاتالیز می‌کند. سپس آنزیم‌های کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز، پراکسید هیدروژن را به اکسیژن و آب تجزیه می‌کنند (۸). کاربرد تیمارهای پس از برداشت با افزایش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان برای حفظ کیفیت قارچ تکمه‌ای تازه بریده طی دوره انبارمانی می‌تواند برای افزایش سودآوری و توسعه صنعت قارچ مفید باشد.

ملاتونین یک ترکیب طبیعی ایندول آمین مشتق شده از تریپتوفان (ان استیل ۵ متوکسی تریپتامین) است که در گیاهان برای اولین بار در گوجه‌فرنگی در سال ۱۹۹۵ تشخیص داده شده است (۹). ملاتونین به‌عنوان یک هورمون (مولکول سیگنالی) داخلی باعث افزایش مقاومت در برابر تنش‌هاست زیستی و غیرزیستی در گیاه می‌شود (۶). این ترکیب نقش قابل‌توجهی در محافظت گیاهان در برابر تنش‌های اکسیداتیو داخلی و محیطی ایفا می‌کند و گزارش شده است که به عنوان خط اول دفاع و حسگر داخلی تنش اکسیداتیو در گیاهان می‌باشد (۱۰). کاربرد پس از برداشت ملاتونین در بسیاری از میوه‌ها و سبزی‌ها مثل انبه (۱۱)، زردآلو (۱۲) و قارچ تکمه‌ای (۲) صورت گرفته است که منجر به حفظ ویژگی‌های

کیفی و افزایش طول دوره انبارمانی این محصولات شده است.

گاما-آمینوبوتیریک اسید (گابا) آمینواسیدی غیرپروتئینی و چهار کربنه است که در گیاهان از طریق دکربوکسیلاسیون گلوتامات تولید می‌شود (۱۳). گابا در برابر تنش‌هایی مثل زخم‌های مکانیکی، اسیدی شدن سیتوزول، شوری، کمبود اکسیژن، خشکی و سرما به عنوان یک پاسخ سوخت‌وسازی و هم‌چنین به‌صورت مستقیم از پلی‌آمین‌ها که در پاسخ به تنش‌های غیرزیستی تجمع می‌یابند، در گیاه تولید می‌شود (۱۴). کاربرد گابا در پس از برداشت محصولات باغبانی به دلیل اثرات آنتی‌اکسیدانی این آمینواسید که موجب حفظ کیفیت محصول و افزایش ماندگاری آن می‌شود، توسعه یافته است که گزارش‌هایی در میوه هلوی تازه بریده (۱۵)، میوه زغال اخته (۱۶)، میوه سیب (۱۷) و گوجه‌فرنگی (۱۸) ارائه شده است.

فرآوری‌کنندگان قارچ تکمه‌ای روش‌های متنوعی مانند بسته‌بندی و تیمار شیمیایی را برای بهبود عمر نگهداری قارچ تازه بریده انجام می‌دهند و تأثیر تیمارهای مختلف استفاده شده در نگه داشتن سفیدی قارچ و افزایش عمر انباری آن متفاوت می‌باشد. بنابراین، هدف از این مطالعه تأثیر دو تیمار شیمیایی پس از برداشت ملاتونین و گاما- آمینوبوتیریک اسید بر شاخص قهوه‌ای شدن، فعالیت آنزیم‌های تجزیه‌کننده غشاء و آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در قارچ تکمه‌ای تازه بریده می‌باشد.

مواد و روش‌ها

تیمار قارچ‌ها و انبارمانی: قارچ‌های تکمه‌ای در مرحله بلوغ تجاری از شرکت تولیدکننده قارچ تکمه‌ای سادات در تبریز خریداری شد و تحت شرایط محیطی در مدت ۱ ساعت به آزمایشگاه پس از برداشت دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز منتقل شد. قارچ‌های با اندازه یکسان و بدون آسیب‌دیدگی و قهوه‌ای‌شدگی انتخاب شدند، سپس قارچ‌ها در اندازه‌های ۴ میلی‌متری با چاقوی تیز بریده شدند و غوطه‌وری قارچ‌ها در غلظت‌های ۱ میلی‌مولار گاما-آمینوبوتیریک اسید (گابا) و ۱۰ میکرومولار ملاتونین به همراه شاهد (غوطه‌وری در آب مقطر) برای مدت ۵ دقیقه در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد صورت گرفت. سپس قارچ‌ها از محلول‌های ذکر شده خارج و به مدت ۱ ساعت در دمای اتاق خشک شدند. پس از خشک شدن، قارچ‌های هر تکرار در بسته‌های ۵۰۰ گرمی بسته‌بندی شده و در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۹۰-۹۵ درصد به‌مدت ۱۵ روز نگهداری شدند. در روز صفر و هر ۵ روز طی دوره انبارمانی قارچ‌های هر تکرار به دنبال ۲ ساعت نگهداری در دمای ۱±۲۴ درجه سانتی‌گراد برای اندازه‌گیری شاخص قهوه‌ای شدن استفاده شدند. هم‌زمان تعداد ۱۰ عدد اسلایس قارچ از هر تکرار نمونه‌گیری، مخلوط و در نیتروژن مایع پودر شدند و در دمای ۸۰- به منظور اندازه‌گیری صفات بیوشیمیایی نگهداری شدند.

شاخص قهوه‌ای شدن: برای محاسبه شاخص قهوه‌ای شدن (BI) عکس‌برداری از نمونه‌های قارچ خوراکی در روزهای نمونه‌برداری انجام و محاسبه شاخص‌های L، a و b در محیط نرم‌افزار فتوشاپ مشخص گردید، سپس شاخص قهوه‌ای شدن با استفاده از معادلات $X= (a^*+1.75L^*) / (5.645L^*+a^*- 0.3012b^*)$ و $BI=[100 (X-0.31)]/0.172$ تعیین شد (۳).

پراکسید هیدروژن: اندازه‌گیری تجمع پراکسید هیدروژن در نمونه‌ها بر اساس روش پترسون و همکاران (۱۹۸۴) انجام شد (۱۹). برای همین منظور، یک گرم بافت پودر شده قارچ با ۱۰ میلی‌لیتر استون

در دمای صفر درجه سانتی‌گراد مخلوط شد. سپس به‌مدت ۱۵ دقیقه در دمای چهار درجه سانتی‌گراد با دور ۶۰۰۰ سانتریفیوژ شد و مایع رویی آن جمع‌آوری شد. یک میلی‌لیتر از مایع رویی با ۰/۱ میلی‌لیتر تیتانیوم سولفات پنج درصد و ۰/۲ میلی‌لیتر آمونیا مخلوط شد و در دمای چهار درجه سانتی‌گراد با دور ۶۰۰۰ به‌مدت ده دقیقه سانتریفیوژ شد. بعد از سانتریفیوژ، مخلوط حاصل در سه میلی‌لیتر سولفوریک اسید (H_2SO_4) ۱۰ درصد حل شد و با دور ۵۰۰۰ به‌مدت ده دقیقه سانتریفیوژ شد. سپس نمونه‌ها در دستگاه اسپکتروفتومتر قرار داده شد و جذب آن‌ها در طول موج ۴۱۰ نانومتر اندازه‌گیری شدند. میزان پراکسید هیدروژن با استفاده از پراکسیدهیدروژن به‌عنوان استاندارد محاسبه شد و سپس به صورت میکرومول در گرم وزن تر بیان شد.

اندازه‌گیری فعالیت آنزیم‌های تجزیه‌کننده غشاء سلولی: برای اندازه‌گیری فعالیت آنزیم فسفولیپاز D (PLD) از روش روی و همکاران (۲۰۱۰) استفاده شد (۲۰). جهت استخراج عصاره آنزیمی یک گرم از بافت پودر شده قارچ با پنج میلی‌لیتر بافر تریس-HCl (pH=۸) که حاوی ده میلی‌مولار پتاسیم کلرید، ۵۰۰ میلی‌مولار ساکارز و ۰/۵ میلی‌مولار فنیل متیل سولفونیل فلورید بود هموژن شد و سپس در دمای چهار درجه سانتی‌گراد به مدت ده دقیقه با دور ۱۲۰۰۰ سانتریفیوژ شد. مخلوط واکنش شامل ۱/۸ میلی‌لیتر کلسیم استات ۵۰ میلی‌مولار (pH=۵/۶) که با ۲۷/۴ میلی‌مول بر لیتر نیتروفنیل فسفوریل کولین، ۰/۲ میلی‌لیتر اسید فسفات حل شده در ۵۰ میلی‌مول بر لیتر کلسیم استات (pH=۵/۶) و ۰/۶ میلی‌لیتر عصاره آنزیمی مخلوط شد. بعد از ۶۰ دقیقه نگهداری در دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد، ۰/۱ میلی‌لیتر سدیم هیدروکسید ۵۰ میلی‌مول بر لیتر به آن اضافه شد و میزان دی نیتروفنول در طول موج ۴۰۰ نانومتر تعیین شد. طبق تعریف یک واحد آنزیمی از آنزیم فسفولیپاز D به مقداری از آنزیم گفته می‌شود که توانایی تولید یک نانومول دی نیتروفنول را در یک ساعت داشته باشد و براساس واحد آنزیمی در میلی‌گرم پروتئین بیان شد.

اندازه‌گیری فعالیت آنزیم لیپواکسیژناز به روش ملک‌زاده و همکاران (۲۰۱۷) انجام شد (۲۲). مخلوط واکنش حاوی ۲/۷ میلی‌لیتر بافر فسفات ۱۰۰ میلی‌مول بر لیتر (pH=۶/۸)، ۱۰۰ میکرولیتر سوبسترای لینولئیک اسید و ۰/۲ میلی‌لیتر عصاره آنزیم بود که به مدت ده دقیقه در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد نگهداری شد و سپس به دستگاه اسپکتروفتومتر انتقال داده شد و در طول موج ۲۳۴ نانومتر قرائت شد. طبق تعریف یک واحد آنزیمی از آنزیم LOX به مقداری از آنزیم گفته می‌شود که توانایی افزایش جذب در یک صدم دقیقه در طول موج ۲۳۴ نانومتر و دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد را زمانی که لینولئیک اسید به عنوان سوبسترا اضافه می‌گردد، داشته باشد.

اندازه‌گیری فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان: از روش لیو و همکاران (۲۰۱۳) برای اندازه‌گیری فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز (SOD) استفاده شد (۸). مخلوط واکنش حاوی ۱۰۰ میکرومولار نیتروبلو تترازولیوم (NBT)، ده میلی‌مولار متیونین، ۱۰۰ میکرومولار EDTA و ۳۰ میکرومولار ریبوفلاوین و ۰/۱ میلی‌لیتر عصاره آنزیم در ۵۰ میلی‌مولار بافر فسفات سدیم (pH=۷/۸) بود. یک واحد فعالیت آنزیم SOD به عنوان میزانی از آنزیم که سبب بازدارندگی ۵۰ درصدی NBT شود، تعریف می‌شود. فعالیت آنزیم SOD به صورت واحد در میلی‌گرم پروتئین بیان شد.

فعالیت آنزیم کاتالاز (CAT) به روش لیو و همکاران (۲۰۱۳) اندازه‌گری شد (۸). مخلوط واکنش حاوی یک میلی‌لیتر بافر فسفات پتاسیم (pH=۷/۸)،

۱ میلی‌لیتر پراکسید هیدروژن ۰/۲ درصد و یک میلی‌لیتر عصاره آنزیمی بود. سپس محلول حاصل در دستگاه اسپکتروفتومتر قرار داده شد و در طول موج ۲۴۰ نانومتر قرائت شد. یک واحد فعالیت آنزیم کاتالاز به صورت میزانی از آنزیم که سبب تجزیه یک میکرومولار پراکسیدهیدروژن در دقیقه در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد شود، تعریف می‌شود. فعالیت آنزیم کاتالاز به صورت واحد در میلی‌گرم پروتئین بیان شد.

بر اساس روش ناکانو و اسدا (۱۹۸۱) اندازه‌گیری فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز (APX) انجام شد (۲۳). مخلوط واکنش (سه میلی‌لیتر) شامل ۱۰۰ میلی‌مولار بافر فسفات پتاسیم (pH=۷)، ۰/۳ میلی‌مولار آسکوربیک اسید، ۰/۱ میلی‌مولار EDTA، ۰/۰۶ میلی‌مولار پراکسید هیدروژن و ۱۰۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی بود. جذب در طول موج ۲۹۰ نانومتر پس از افزودن پراکسید هیدروژن در ۳۰ ثانیه قرائت شد. یک واحد فعالیت آنزیمی آسکوربات پراکسیداز به عنوان اکسید کردن یک میکرومولار آسکوربات در هر دقیقه تعریف می‌شود. فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز به صورت واحد در میلی‌گرم پروتئین بیان شد.

جهت اندازه‌گیری فعالیت آنزیم گلوتاتیون ردوکتاز (GR) از روش فوستر و هس (۱۹۸۰) استفاده شد (۲۴). مخلوط واکنش حاوی بافر فسفات سدیم ۵۰ میلی‌مولار (pH=۷/۸)، ۲/۵ میلی‌مولار منیزیم کلرید، گلوتاتیون اکسید شده (GSSG) ۰/۵ میلی‌مولار، NADPH ۰/۱ میلی‌مولار و ۰/۱ میلی‌لیتر عصاره آنزیمی بود. واکنش با اضافه کردن NADPH آغاز شد. جذب نمونه‌ها به مدت سه دقیقه در طول موج ۳۴۰ نانومتر قرائت شد. یک واحد فعالیت آنزیمی گلوتاتیون ردوکتاز مقدار آنزیمی است که برای اکسیداسیون یک نانومول NADPH در یک دقیقه لازم است و بر مبنای واحد آنزیمی بر میلی‌گرم پروتئین گزارش شد.

تجزیه آماری: آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار اجرا شد. تجزیه و تحلیل داده‌های به‌دست آمده با استفاده از نرم‌افزار SAS و مقایسه میانگین با استفاده از آزمون چنددامنه‌ای دانکن صورت گرفت.

نتایج و بحث

شاخص قهوه‌ای شدن: تجزیه واریانس داده‌های حاصل از قهوه‌ای شدن قارچ تکمه‌ای تازه بریده نشان داد که اثر تیمار پس از برداشت، زمان انبارمانی و اثر متقابل این دو عامل در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود (P<۰/۰۱) (جدول ۱). مطابق نتایج مقایسه میانگین داده‌ها، با افزایش زمان انبارمانی، شاخص قهوه‌ای شدن قارچ تکمه‌ای تازه بریده در همه نمونه‌ها به صورت معنی‌داری افزایش یافت، ولی تیمار ملاتونین و گابا شاخص قهوه‌ای شدن را نسبت به نمونه‌های شاهد به‌طور معنی‌داری کاهش دادند (شکل ۱). در بین دو تیمار ملاتونین و گابا هم با وجود این‌که میزان شاخص قهوه‌ای شدن در قارچ‌های تیمار شده با گابا نسبت به ملاتونین کم‌تر بود، ولی اختلاف معنی‌داری در همه زمان‌های انبارمانی بین این دو تیمار مشاهده نشد (شکل ۱).

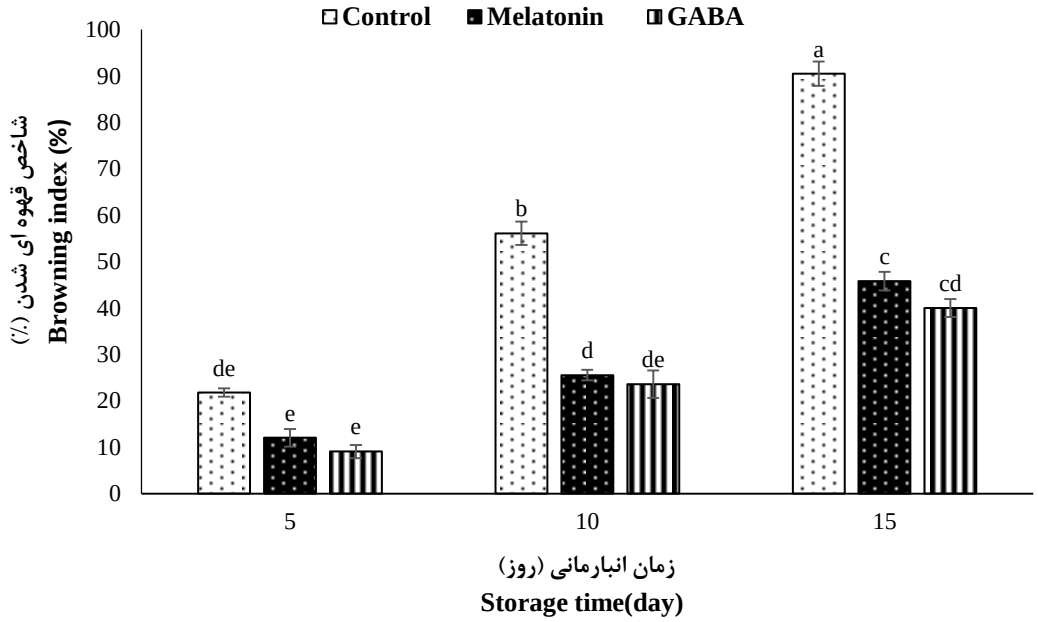
جدول ۱- تجزیه واریانس اثر تیمار پس از برداشت گابا و ملاتونین طی دوره انبارمانی بر قهوه‌ای شدن و خصوصیات بیوشیمایی فرم تازه بریده قارچ تکمه‌ای.

Table 1. Analysis of variance of the effect of post-harvest treatment of GABA and melatonin during storage period on browning and biochemical properties of fresh cut button mushroom.

منابع تغییرات Sources of variation	درجه آزادی Degrees of freedom	میانگین مربعات Means of square							
		شاخص قهوه‌ای شدن Browning index	پراکسید هیدروژن Hydrogen peroxide	آنزیم لیپواکسیژناز Lipoxygenase	آنزیم فسفولیپاز D Phospholipase D	آنزیم سوپراکسید دیسموتاز Superoxide dismutase	آنزیم کاتالاز Catalase	آنزیم آسکوربات پراکسیداز Ascorbate peroxidase	آنزیم گلوتاتیون ردوکتاز Glutathione reductase
تیمار Treatment	2	1137.34**	471.99**	119.71**	21.32**	514.88**	6217.2**	771.8*	3309.99*
زمان انبارمانی Storage time	2	7382.74**	707.57**	39.06**	35.38**	60.36**	6970.7**	3945.3*	112.97*
تیمار × زمان انبارمانی Treatment × Storage time	4	7.63**	114.8**	6.51**	6.08**	7.21**	440.92**	46.06*	519.25*
اشتباه Error	18	34.78	8.73	0.584	0.429	2.23	56.07	64.26	9.96
ضریب تغییرات (درصد) Coefficient of variation (%)	-	10.92	8.89	11.89	9.97	9.4	7.13	6.40	6.20

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

**, * Significantly differences at the 1 and 5% of probability levels, respectively

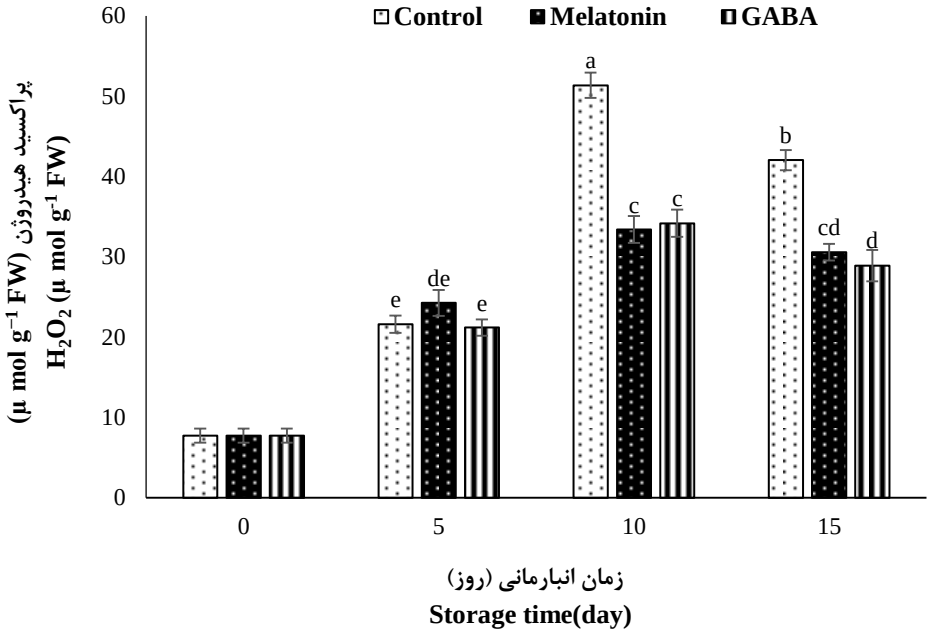


شکل ۱- تأثیر تیمار ملاتونین و گابا بر شاخص قهوه‌ای شدن فرم تازه بریده قارچ تکمه‌ای.

Fig. 1. Effect of melatonin and GABA on browning index of fresh cut button mushroom.

رنگ کلاهک قارچ تکمه‌ای از ویژگی‌های تأثیرگذار در پذیرش آن توسط مشتری می‌باشد که از طریق شاخص قهوه‌ای شدن ارائه می‌شود (۲۵). قهوه‌ای شدن در قارچ تحت‌تأثیر دو عامل حمله میکروبی و نیز فعالیت آنزیمی است (۲۶). در این پژوهش مشخص شد که با افزایش زمان انبارمانی شاخص قهوه‌ای شدن در قارچ تکمه‌ای تازه بریده افزایش می‌یابد. افزایش شاخص قهوه‌ای شدن در قارچ تکمه‌ای طی انبارمانی یک پدیده بدیهی است که توسط بیش‌تر پژوهش‌گران گزارش شده است، ولی کاربرد تیمارهای پس از برداشت سبب کاهش میزان این شاخص می‌شود (۲۷). کاربرد ملاتونین و گابا به‌دلیل این‌که دارای خاصیت آنتی‌اکسیدانی هستند، موجب جاروب کردن گونه‌های فعال اکسیژن شده و مانع اکسیداسیون فنل‌ها و کاهش فعالیت آنزیم‌های مؤثر در قهوه‌ای شدن شده و قهوه‌ای شدن را به تاخیر می‌اندازند. در همین راستا، لیو و همکاران (۲۰۲۰) گزارش دادند که کاربرد ملاتونین از قهوه‌ای شدن انبه جلوگیری کرد که به دلیل خاصیت آنتی‌اکسیدانی قوی این ماده بود که سبب مهار گونه‌های فعال اکسیژن می‌شود و از قهوه‌ای شدن جلوگیری می‌کند (۶). هم‌چنین هان و همکاران (۲۰۲۱) ثابت کردند که کاربرد گابا، سبب کاهش معنی‌دار قهوه‌ای شدن میوه سیب طی نگهداری در انبار سرد می‌شود (۱۷).

محتوای پراکسید هیدروژن: تجزیه واریانس داده‌های پراکسید هیدروژن نشان داد که اثر تیمار پس از برداشت و زمان انبارمانی و اثر متقابل این دو عامل در سطح احتمال ۱ درصد ($P<۰/۰۱$) معنی‌دار بود (جدول ۱). بر اساس نتایج مقایسه میانگین، با افزایش زمان انبارمانی محتوای پراکسید هیدروژن قارچ تکمه‌ای تازه بریده در همه نمونه‌ها به صورت معنی‌داری افزایش یافت، ولی تیمار ملاتونین و گابا محتوای پراکسید هیدروژن را نسبت به نمونه‌های شاهد به‌طور معنی‌داری کاهش دادند (شکل ۲). بین دو تیمار ملاتونین و گابا هم اختلاف معنی‌داری در همه زمان‌های انبارمانی مشاهده نشد (شکل ۲).



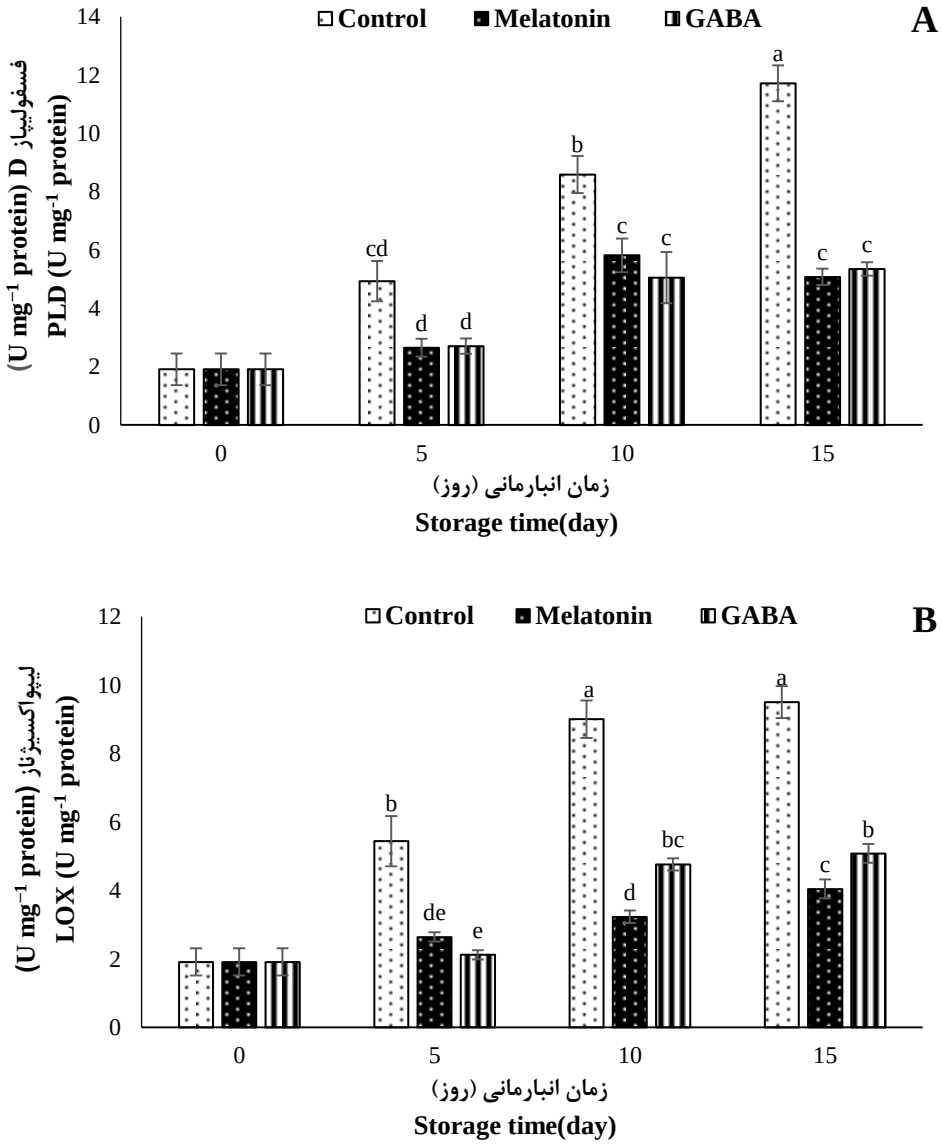
شکل ۲- تأثیر تیمار ملاتونین و گابا بر محتوای پراکسید هیدروژن شدن فرم تازه بریده قارچ تکمه‌ای.

Fig. 2. Effect of melatonin and GABA on H_2O_2 content of fresh cut button mushroom.

تولید پراکسید هیدروژن در پاسخ به گستره وسیعی از تنش‌های زیستی و غیرزیستی افزایش می‌یابد و تعدادی از پژوهش‌گران پیشنهاد می‌کنند که این ترکیب در گیاهان به عنوان مولکول پیام‌رسان دخیل در ترارسانی علامت سازشی، سبب افزایش تحمل در برابر انواع تنش‌های غیرزیستی می‌شود و در غلظت‌های بالا مرگ سلولی برنامه‌ریزی شده را سازماندهی می‌کند (۳). از سوی دیگر تجمع بالای پراکسید هیدروژن در شرایط تنش اکسیداتیو با تحریک واکنش هابر- ویز (Haber-Weiss) و تولید رادیکال‌های خطرناک هیدروکسیل، موجب پراکسیداسیون لیپیدها و آسیب‌های غشایی می‌گردد (۲۸). در این پژوهش با افزایش زمان انبارمانی میزان پراکسید هیدروژن در قارچ‌های تازه بریده افزایش یافت ولی ملاتونین و گابا باعث کاهش میزان آن در نمونه‌های تیمار شده شدند. دلیل این عمل به ظرفیت ملاتونین و گابا در مهار آنیون‌های سوپراکسید و پراکسید هیدروژن برمی‌گردد، و همچنین به تأثیر این دو ترکیب در فعال کردن آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان که سبب جاروب کردن این مولکول‌های مخرب می‌شود بر می‌گردد. مشابه با نتایج ما، ژنگ و همکاران (۲۰۱۹) نشان دادند که کاربرد ملاتونین سبب کاهش حجم پراکسیدهیدروژن از طریق افزایش فعالیت آنزیم‌های مهارکننده گونه‌های فعال اکسیژن و افزایش ملاتونین درونی در میوه تازه بریده هلو شد (۱۵). هم‌چنین تأثیر گابا در کاهش میزان تجمع پراکسید هیدروژن در میوه زغال اخته (۱۶) و میوه خیار (۲۱) گزارش شده است که با نتایج ما مطابقت دارد.

فعالیت آنزیم‌های تجزیه‌کننده غشای سلولی: بر اساس نتایج تجزیه واریانس، اثر تیمار پس از برداشت و زمان انبارمانی و اثر متقابل این دو عامل در سطح احتمال ۱ درصد ($P<۰/۰۱$) بر میزان فعالیت آنزیم فسفولیپاز D (PLD) و لیپواکسیژناز (LOX) قارچ تکمه‌ای به فرم تازه بریده معنی‌دار بود (جدول ۱). مقایسه میانگین داده‌های حاصل از اثر تیمارها نشان داد که با افزایش زمان انبارمانی، در همه نمونه‌ها میزان

فعالیت آنزیم فسفولیپاز D افزایش یافت و بین نمونه‌های تیمار شده و شاهد، در روزهای دهم و پانزدهم از نظر میزان فعالیت آنزیم فسفولیپاز D اختلاف معنی‌داری وجود داشت و میزان آن در نمونه‌های تیمار شده با ملاتونین و گابا کم‌تر بود، ولی در روز پنجم، اختلاف معنی‌داری بین تیمارها مشاهده نشد (شکل ۳ A). بر اساس نتایج مقایسه میانگین داده‌ها با افزایش زمان انبارمانی، در همه نمونه‌ها میزان فعالیت آنزیم لیپواکسیژناز افزایش یافت. بین نمونه‌های تیمار شده و شاهد، در همه زمان‌های اندازه‌گیری از نظر میزان فعالیت آنزیم لیپواکسیژناز اختلاف معنی‌دار وجود داشت و میزان آن در نمونه‌های تیمار شده با ملاتونین و گابا کم‌تر بود (شکل ۳ B).

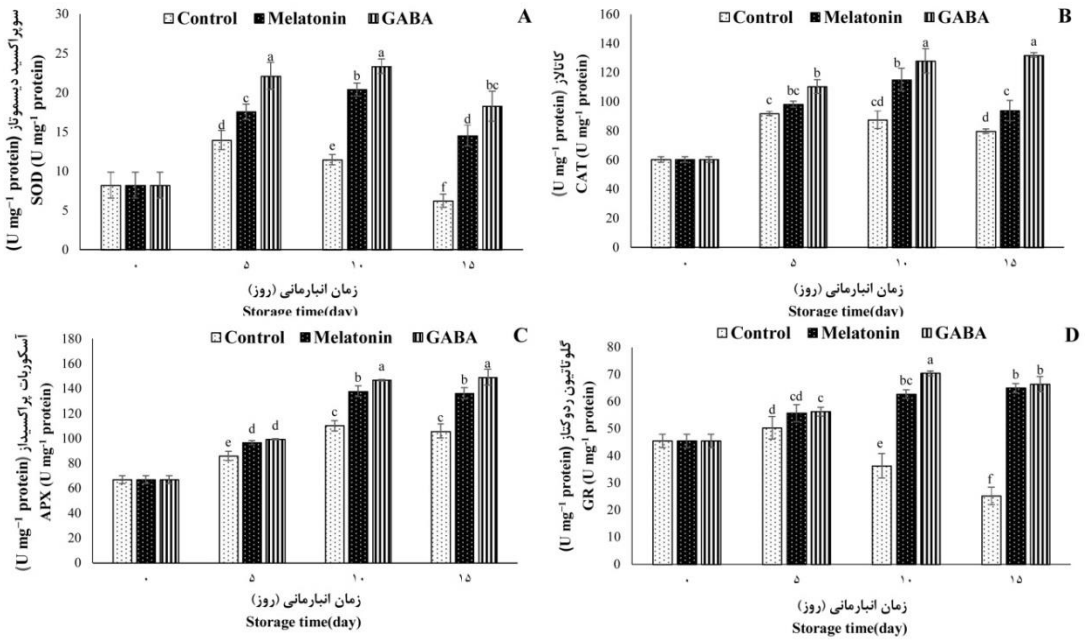


شکل ۳- تأثیر تیمار ملاتونین و گابا بر فعالیت آنزیم‌های فسفولیپاز D (A) و لیپواکسیژنار (B) قارچ تکمه‌ای تازه بریده.

Fig. 3. Effect of melatonin and GABA on PLD and LOX enzymes activity of fresh cut button mushroom.

فسفولیپاز D مهم‌ترین آنزیم در هیدرولیز فسفولیپیدهای غشاء می‌باشد (۲۹). لیپواکسیژناز پراکسیداسیون لیپیدهای غشای سلولی را افزایش داده و سیالیت غشاء را تغییر می‌دهد که تأثیر مستقیم بر انسجام و نفوذپذیری غشای سلولی دارد (۳۰). پیشنهاد شده است که فسفولیپاز D و لیپواکسیژناز آغازگر تجزیه غشای سلولی در طول پیری و تنش می‌باشند (۲۹). در این پژوهش میزان فعالیت این دو آنزیم با افزایش زمان انبارمانی در همه نمونه‌های قارچ تازه بریده افزایش یافت و در روزهای آخر انبارمانی به حداکثر رسید. اما میزان فعالیت این دو آنزیم در قارچ‌های تیمار شده با ملاتونین و گابا به طور معنی‌داری کم‌تر بود که پیشنهاد می‌شود دلیل آن افزایش مقاومت این قارچ‌ها به آسیب سرمازدگی و تجمع کمتر گونه‌های فعال اکسیژن و فعالیت بالای آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان می‌باشد. در واقع طی دوره انبارمانی، میوه‌ها و سبزیجات یکپارچگی غشاء را از طریق پراکسیداسیون اسیدهای چرب غیراشباع غشاء به دلیل تجمع گونه‌های فعال اکسیژن یا فعالیت آنزیم‌های لیپواکسیژناز و فسفولیپاز D از دست می‌دهند. اقدم و همکاران (۲۰۱۶) پیشنهاد کردند که کاهش یکپارچگی غشاء در گل بریده آنتوریوم به دلیل فعالیت بالای آنزیم فسفولیپاز D است که منجر به انتشار اسیدهای چرب غیراشباع می‌شود و این اسیدهای چرب توسط آنزیم لیپواکسیژناز پراکسیده شده و نتیجه آن کاهش سیالیت غشاء می‌باشد و در نهایت منجر به قهوه‌ای شدن اسپات گل می‌شود (۲۸). گزارش شده است که ملاتونین بر کاهش بیان ژن آنزیم لیپواکسیژناز در میوه تازه بریده هلو تاثیرگذار می‌باشد (۱۵). ملک‌زاده و همکاران (۲۰۱۷) پیشنهاد کردند که میزان فعالیت آنزیم‌های لیپواکسیژناز و فسفولیپاز D در خیارهای تیمار شده با غلظت ۵ میلی‌مولار گابا به دلیل افزایش مقاومت به سرمازدگی به طور معنی‌داری کم‌تر بود (۲۱). هم‌چنین گزارش شده است که کاربرد گابا سبب کاهش فعالیت آنزیم لیپواکسیژناز در میوه زغال اخته شد که با نتایج ما مشابه بود (۱۶).

فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان: بر اساس نتایج حاصل از تجزیه واریانس، اثر تیمار پس از برداشت، زمان و اثر متقابل این دو عامل بر فعالیت آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز (SOD) و کاتالاز (CAT) در سطح احتمال ۱ و آنزیم‌های آسکوربات پراکسیداز (APX) و گلوتاتیون ردوکتاز (GR) در سطح احتمال ۵ درصد در فرم تازه بریده قارچ تکمه‌ای معنی‌دار ($P<۰/۰۵$) بود (جدول ۱). بر اساس مقایسه میانگین تیمارهای یاد شده، با افزایش زمان انبارمانی، میزان فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در نمونه‌های تیمار شده تا روز ۱۰ روند افزایشی داشت، سپس روند کاهشی در پیش گرفت (شکل ۴ A). بیش‌ترین میزان فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در همه زمان‌های انبارمانی متعلق به قارچ‌های تیمار شده با گابا بود که به‌طور معنی‌داری نسبت به سایر تیمارها بیش‌تر بود (شکل ۴ A). مطابق نتایج مقایسه میانگین، بیش‌ترین میزان فعالیت آنزیم کاتالاز در همه زمان‌های انبارمانی مربوط به قارچ‌های تیمار شده با گابا بود، ولی در روز پنجم اختلاف معنی‌داری با نمونه‌های تیمار شده با ملاتونین نداشت (شکل ۴ B). کم‌ترین میزان فعالیت آنزیم کاتالاز نیز در همه زمان‌های انبارمانی متعلق به نمونه‌های شاهد بود (شکل ۴ B). با افزایش زمان انبارمانی، میزان فعالیت آنزیم‌های آسکوربات پراکسیداز (شکل ۴ C) و گلوتاتیون ردوکتاز (شکل ۴ D) در نمونه‌های تیمار شده با ملاتونین و گابا روند افزایشی داشت و میزان فعالیت این دو آنزیم در نمونه‌های تیمار شده نسبت به شاهد در همه زمان‌های اندازه‌گیری به‌طور معنی‌داری بیش‌تر بود. بیش‌ترین فعالیت دو آنزیم آسکوربات پراکسیداز و گلوتاتیون ردوکتاز در بین دو تیمار پس از برداشتی مربوط به تیمار گابا بود.



شکل ۴- تأثیر تیمار ملاتونین و گابا بر فعالیت آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز (A)، کاتالاز (B)، آسکوربات پراکسیداز (C) و گلوتاتیون ردوکتاز (D) فرم تازه بریده قارچ تکمه‌ای.

Fig. 4. Effect of melatonin and GABA on SOD, CAT, APX and LOX enzymes activity of fresh cut button mushroom.

گیاهان با استفاده از آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان بر تنش اکسیداتیو غلبه می‌کنند و میزان گونه‌های فعال اکسیژن را کاهش می‌دهند (۱۸). این آنزیم‌ها نقش مهمی در دفاع آنتی‌اکسیدانی طی فرآیندهای رسیدن و انبارمانی میوه ایفا می‌کنند. سوپراکسید دیسموتاز اولین خط مهار گونه‌های فعال اکسیژن را تشکیل می‌دهد که سوپراکسید را به پراکسیدهیدروژن تبدیل می‌کند. سپس پراکسید هیدروژن توسط آنزیم‌های آسکوربات پراکسیداز و کاتالاز به اکسیژن و آب تجزیه می‌شود (۱۲). کاربرد تیمارهای پس از برداشت سبب افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و مهار گونه‌های فعال اکسیژن می‌شود که نتیجه آن افزایش عمر انبامانی و کیفیت قارچ‌ها می‌باشد. مطالعات انجام شده در مورد کاربرد تیمارهای پس از برداشت در قارچ تکمه‌ای نیز این نتایج را نشان می‌دهد (۲ و ۳). طی دوره نگهداری، قارچ‌های خوراکی هم‌چنان به رشد و نمو خود ادامه می‌دهند که به صورت باز شدن کلاهک آشکار می‌شود. این رشد ادامه‌دار سبب از دست رفتن سریع کیفیت قارچ و اثرات منفی بر شاخص‌های کیفی می‌شود که منجر به کاهش عمر قفسه‌ای و مشتری‌پسندی آن می‌شود (۲۵)، به همین دلیل کاربرد تیمارهای پس از برداشت سبب حفظ کیفیت قارچ خوراکی طی پس از برداشت می‌شود. آسیب‌های ناشی از تنش اکسیداتیو معمولاً توسط آنتی‌اکسیدان‌های درونی کاهش می‌یابد، اما تیمارهای خارجی برای کاهش بیش‌تر این آسیب‌ها ضروری می‌باشد. بر اساس نتایج ما میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در قارچ‌های تیمار شده با ملاتونین و گابا بیش‌تر از قارچ‌های تیمار نشده بود و در این دو تیمار نیز بیش‌ترین افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در تیمار گابا به‌دست آمد. تفاوت در اثرگذاری متفاوت این دو ماده می‌تواند به ماهیت متفاوت این دو ترکیب برگردد، از طرفی دیگر مطالعات نشان داده که در دماهای پایین اثرگذاری گابا در جلوگیری از تنش

اکسیداتیو بالا می‌باشد (۱۸). ملاتونین و گابا علاوه بر نقش مستقیم در مهار گونه‌های فعال اکسیژن، توانایی سلول‌ها را در مهار گونه‌های فعال اکسیژن با بهبود فعالیت‌های مهارکننده گونه‌های فعال اکسیژن افزایش می‌دهند (۱۷). لی همکاران (۲۰۲۱) نشان دادند که افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان مانند آسکوربات پراکسیداز، گلوتاتیون ردوکتاز، کاتالاز و سوپراکسید دیسموتاز در اثر کاربرد ملاتونین، سبب کاهش میزان سوپراکسید و پراکسیدهیدروژن در قارچ تکمه‌ای تیمار شده می‌شود (۲). رستگار و همکاران (۲۰۲۰) گزارش دادند که تیمار ملاتونین، قادر به بهبود کیفیت پس از برداشت میوه‌های انبه از طریق حفظ تعادل گونه‌های فعال اکسیژن با بالابردن فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان می‌باشد (۱۱). هم‌چنین گزارش‌های زیادی در مورد تأثیر گابا بر افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان ارائه شده است که نتایج پژوهش حاضر با نتایج این پژوهش‌گران مطابقت دارد. کاربرد گابا سبب بهبود عمر انبارمانی میوه‌های گوجه‌فرنگی شد که این عمل را از طریق افزایش فعالیت آنزیم‌های مهارکننده گونه‌های فعال اکسیژن مانند سوپراکسید دیسموتاز و کاتالاز انجام داد (۱۸). ربیعی و همکاران (۲۰۱۹) نیز نشان دادند که گابا به عنوان یک مولکول سیگنالینگ ایمن با تحریک فعالیت سیستم آنتی‌اکسیدانی سبب افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان سوپراکسیددیسموتاز، کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز و گلوتاتیون ردوکتاز در میوه‌های زغال اخته می‌شود (۱۶).

نتیجه‌گیری کلی

به‌طورکلی نتایج پژوهش حاضر نشان داد که کاربرد پس از برداشت ملاتونین و گابا در فرم تازه بریده قارچ تکمه‌ای، سبب تاخیر در قهوه‌ای شدن اسلایس‌های قارچ تکمه‌ای نسبت به قارچ‌های شاهد طی نگهداری به مدت ۱۵ روز در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد شد. تجمع پراکسید هیدروژن در قارچ‌های تکمه‌ای تیمار شده با ملاتونین و گابا نسبت به قارچ‌های تکمه‌ای شاهد کاهش یافت که ناشی از افزایش فعالیت آنزیم آنتی‌اکسیدان مثل سوپراکسید دیسموتاز، آسکوربات پراکسیداز، کاتالاز و گلوتاتیون ردوکتاز و کاهش فعالیت آنزی‌های لیپواکسیژناز و فسفولیپاز D در این قارچ‌ها بود. امروزه تمایلات زیادی به استفاده از ترکیبات سالم در فناوری پس از برداشت محصولات باغبانی وجود دارد، که ترکیبات فعال موجود در گیاهان مانند ملاتونین و گاما آمینوبوتیریک اسید نمونه‌ای از این ترکیبات هستند و می‌توانند به عنوان یک روش موثر و ایمن در کاهش قهوه‌ای شدن قارچ تکمه‌ای و حفظ کیفیت تغذیه‌ای قارچ‌ها طی نگهداری در انبار سرد و سایر محصولات باغبانی استفاده گردد. هم‌چنین با توجه به این‌که گابا نسبت به ملاتونین به‌خصوص در فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان نتایج بهتری ارائه داد و از طرفی از لحاظ قیمتی گابا نسبت به ملاتونین ارزان‌تر می‌باشد، بنابراین توصیه به استفاده از گابا در پس از برداشت قارچ تکمه‌ای تازه بریده به منظور حفظ کیفیت قارچ‌ها می‌شود.

منابع

1.Ding, Y., Zhu, Z., Zhao, J., Nie, Y., Zhang, Y., Sheng, J. and Tang, X. 2016. Effects of postharvest brassinolide treatment on the metabolism of white button mushroom (*Agaricus bisporus*) in relation to development of browning during storage. Food Bioprocess Technol. pp. 1-8.

2.Li, L., Kitazawa, H., Zhang, X., Zhang, L., Sun, Y., Wang, X. and Yu, S. 2021. Melatonin retards senescence via regulation of the electron leakage of postharvest white mushroom (*Agaricus bisporus*). Food Chem. 340: 127833.

3.Dokhanieh, A. and Aghdam, M. 2016. Postharvest browning alleviation of *Agaricus bisporus* using salicylic acid treatment. Sci. Hort. 207: 146-151.

4.Oms-Oliu, G., Aguiló-Aguayo, I., Martín-Belloso, O. and Soliva-Fortuny, R. 2010. Effects of pulsed light treatments on quality and antioxidant properties of fresh-cut mushrooms (*Agaricus bisporus*). Postharvest Biol. Tech. 56: 3. 216-222.

5.Brennan, M., Le Port, G. and Gormley, R. 2000. Post-harvest treatment with citric acid or hydrogen peroxide to extend the shelf life of fresh sliced mushrooms. LWT. 33: 4. 285-289.

6.Liu, S., Huang, H., Huber, D.J., Pan, Y., Shi, X. and Zhang, Z. 2020. Delay of ripening and softening in 'Guifei' mango fruit by postharvest application of melatonin. Postharvest Biol. Tech. 163: 111136.

7.Sanchez, C. 2017. Reactive oxygen species and antioxidant properties from mushrooms. Synth. Syst. Biotechnol. 2: 13-22.

8.Liu, J., Yu-Chun W., Juan, K., Yan, W. and Chang-hai, J. 2013. Changes in reactive oxygen species production and antioxidant enzyme activity of *Agaricus bisporus* harvested at different stages of maturity. J. Sci. Food Agric. 93: 2201-2206.

9.Feng, X., Wang, M., Zhao, Y., Han, P. and Dai, Y. 2014. Melatonin from different fruit sources, functional roles, and analytical methods. Trends Food Sci. Technol. 37: 21-31.

10.Tan, D.X., Hardeland, R., Manchester, L.C., Korkmaz, A., Ma, S., Rosales Corral, S. and Reiter, R.J. 2012. Functional roles of melatonin in plants, and perspectives in nutritional and agricultural science. J. Exp. Bot. 63: 577-597.

11.Rastegar, S., Khankahdani, H.H. and Rahimzadeh, M. 2020. Effect of γ-aminobutyric acid on the antioxidant system and biochemical changes of mango fruit during storage. J. Food Meas. Charact. 14: 2. 778-789.

12.Bal, E. 2020. Effect of melatonin treatments on biochemical quality and postharvest life of nectarines. J. Food Meas. Charact. pp. 1-8.

13.Wang, C.Y., Fan, L.Q., Gao, H.B., Wu, X.L., Li, J.R. and Gong, B.B. 2014. Polyamine biosynthesis and degradation are modulated by exogenous gamma-aminobutyric acid in root-zone hyoxia-stressed melon roots. J. Plant Physiol. Biochem. 82: 17-26.

14.Shelp, B.J., Bozzo, G.G., Trobacher, C.P., Zarei, A., Deyman, K.L. and Briklis, C.J. 2012. Contribution of putrescine to γ-aminobutrate (GABA) production in response to abiotic stress. J. Plant Sci. 193: 130-135.

15.Zheng, H., Liu, W., Liu, S., Liu, C. and Zheng, L. 2019. Effects of melatonin treatment on the enzymatic browning and nutritional quality of fresh-cut pear fruit. Food Chem. 299: 125-116.

16.Rabiei, V., Kakavand, F., Zaare-Nahandi, F., Razavi, F. and Aghdam, M.S. 2019. Nitric oxide and γ-aminobutyric acid treatments delay senescence of cornelian cherry fruits during postharvest cold storage by enhancing antioxidant system activity. Sci. Hort. 243: 268-273.

17.Han, S., Liu, H., Han, Y., He, Y., Nan, Y., Qu, W. and Rao, J. 2021. Effects of calcium treatment on malate metabolism and γ-aminobutyric acid (GABA) pathway in postharvest apple fruit. Food Chem. 334: 127479.

18.Moradi, M., Razavi, F., Rabiei, V., Soleimani Aghdam, M. and Salehi, L.

2020. Effects of Gamma-aminobutyric Acid Treatment on Postharvest Chilling Injury on Tomato Fruit. J. Hort. Sci. 34: 2. 221-230.
19. Patterson, B.D., MacRae, E.A. and Ferguson I.B. 1984. Estimation of hydrogen peroxide in plant extracts using titanium (IV). Anal. Biochem. 139: 2. 487-492.
20. Rui, H., Cao, S., Shang, H., Jin, P., Wang, K. and Zheng, Y. 2010. Effects of heat treatment on internal browning and membrane fatty acid in loquat fruit in response to chilling stress. J. Sci. Food Agric. 90:1557-1561.
21. Malekzadeh, P., Khosravi-Nejad, F., Hatamnia, A.A. and Mehr, R.S. 2017. Impact of postharvest exogenous γ-aminobutyric acid treatment on cucumber fruit in response to chilling tolerance. Physiol. Mol. Biol. Plants. 23: 4. 827-836.
22. Malekzadeh, P., Khosravi-Nejad, F., Hatamnia, A.A. and Mehr, R.S. 2017. Impact of postharvest exogenous γ-aminobutyric acid treatment on cucumber fruit in response to chilling tolerance. Physiol. Mol. Biol. Plants. 23: 4. 827-836.
23. Nakano, Y. and Asada, K. 1981. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts. Plant Cell Physiol. 22: 867-880.
24. Foster, G. and Hess, L. 1980. Responses of superoxide dismutase and glutathione reductase activities in cotton leaf tissue exposed to an atmosphere enriched in oxygen. J. Plant Physiol. 66: 482-487.
25. Jiang, T. 2013. Effect of alginate coating on physicochemical and sensory qualities of button mushrooms (*Agaricus bisporus*) under a high oxygen modified atmosphere. Postharvest Biol. Tech. 76: 91-97.
26. Suttirak, W. and Manurakchinakorn, S. 2010. Potential application of ascorbic acid, citric acid and oxalic acid for browning inhibition in fresh-cut fruits and vegetables. Walailak J. Sci. Technol. 7: 5-14.
27. Aghdam, M.S., Luo, Z., Jannatizadeh, A. and Farmani, B. 2019. Exogenous adenosine triphosphate application retards cap browning in *Agaricus bisporus* during low temperature storage. Food Chem. 293: 285-290.
28. Aghdam, M.S., Naderi, R., Jannatizadeh, A., Sarcheshmeh, M.A.A. and Babalar M. 2016. Enhancement of postharvest chilling tolerance of anthurium cut flowers by γ-aminobutyric acid (GABA) treatments. Sci. Hort. 198: 52-60.
29. Paliyath, G., Whiting, M.D., Stasiak, M.A., Murr, D.P. and Clegg, B.S. 1997. Volatile production and fruit quality during development of superficial scald in Red Delicious apples. Food Res. Inter. 30: 95-103.
30. Wang, X. 2001. Plant phospholipases. Ann. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol. 52: 211-231.