مقاله علمی پژوهشی/ نشریه پژوهش‌های صنایع غذایی/ جلد ۳۳ شماره ۲/ سال ۱۴۰۲/ صفحات ۱۵ تا ۳۰
DOI:10.22034/FR.2023.52949.1843

# اثر تیمار بخاردهی پس از برداشت با سولفید هیدروژن روی ویژگی‌های کیفی و آنتی‌اکسیدانی قارچ دکمه‌ای سفید خوراکی در طول دوره عمر قفسه‌ای

**مهتاب مرادی دیگه سرا[۱]، رحیم نقشیبند حسنی*[۲] و ناصر مهنا[۲]**

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۶/۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۱

[۱] دانشجوی دکتری تخصصی، گروه علوم و مهندسی باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز
[۲] دانشیار، گروه علوم و مهندسی باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز
*مسئول مکاتبه: Email: naghshiband@tabrizu.ac.ir

**چکیده**

**زمینه مطالعاتی**: قارچ دکمه‌ای (*Agaricus bisporus*) بیشترین تولید را در بین قارچ‌های دنیا دارد. با این حال، این قارچ‌ها دارای مقدار آب و شدت تنفس بالایی هستند، بنابراین نرم شدن بافت، از دست دادن رطوبت و قهوه‌ای شدن به میزان زیادی در آنها رخ می دهد که پتانسیل توزیع و ذخیره‌سازی پس از برداشت آنها را محدود می‌کند. لذا کاربرد تیمارهای پس از برداشتی مانند سولفید هیدروژن ($H_2S$) می‌تواند منجر به حفظ کیفیت و بهبود عمر قفسه‌ای قارچ دکمه‌ای شود. **هدف**: به همین منظور آزمایشی جهت بررسی اثر تیمار پس از برداشت هیدروسولفید سدیم (NaHS) به عنوان یک آزادکننده گاز سولفید هیدروژن ($H_2S$) بر ویژگی‌های کیفی و آنتی‌اکسیدانی قارچ دکمه‌ای، اجرا گردید. **روش کار**: این آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در شش غلظت ماده هیدروسولفید سدیم (NaHS) (۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵، ۱، ۱/۲۵ و ۱/۵) با سه تکرار به همراه تیمار شاهد (آب مقطر) صورت گرفت. پس از توزین ماده هیدروسولفید سدیم (NaHS)، آنرا در یک بشر حاوی ۲۰۰ میلی لیتر آب مقطر در دمای ۲۰ °C حل کرده و سپس قارچ‌ها در ظروف در بسته (سیلد شده) ۳ لیتری در معرض غلظت‌های مختلف هیدروسولفید سدیم (NaHS) به مدت ۲۰ دقیقه قرار گرفتند. پس از آن، قارچ‌ها در دمای ۲۰ °C– ۲۵ و رطوبت نسبی اتاق ۵±۹۰ درصد به مدت شش روز نگه‌داری شدند. نمونه‌برداری از قارچ ها در روزهای صفر، ۲، ٤ و ٦ انجام شد. **نتایج**: نتایج این پژوهش نشان داد که تیمار ۰/۵ میلی مولار هیدروسولفید سدیم (NaHS) تاثیر بیشتری در کاهش قهوه‌ای شدن کلاهک قارچ دکمه‌ای نسبت به سایر تیمارها داشت. درصد کلاهک های باز و درصد کاهش وزن در قارچ‌های تحت تیمار ۰/۵ میلی مولار هیدروسولفید سدیم (NaHS) به میزان بسیار زیادی کمتر بود. قارچ‌های تحت تیمار ۰/۵ میلی مولار هیدروسولفید سدیم (NaHS)، میزان درصد ماده خشک و سفتی بیشتری در پایان ٦ روز نگهداری در قفسه نشان دادند. افزایش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی و مهار رادیکال DPPH در قارچ‌های دکمه‌ای تیمارشده با ۰/۵ میلی مولار هیدروسولفید سدیم (NaHS) مشاهده گردید که همراه با افزایش معنی‌دار تجمع اسید آسکوربیک و محتوای فنل کل در این قارچ‌ها بود. **نتیجه‌گیری نهایی**: به طور کلی می توان نتیجه گرفت که غلظت ۰/۵ میلی مولار هیدروسولفید سدیم (NaHS) به عنوان آزادکننده گاز سولفید هیدروژن ($H_2S$)، می‌تواند به عنوان یک روش موثر برای حفظ ویژگی‌های کیفی و آنتی‌اکسیدانی قارچ دکمه‌ای سفید خوراکی در طول عمر قفسه‌ای مورد استفاده قرار گیرد.

**واژگان کلیدی**: پس از برداشت، سفتی بافت، ظرفیت آنتی‌اکسیدانی، هیدروسولفید سدیم، قارچ دکمه‌ای، قهوه‌ای شدن

**مقدمه**

امروزه قارچ به یک غذای محبوب در وعده‌های غذایی روزانه تبدیل شده است. محتوای آب قارچ‌های تازه حدود ۹۵-۸۵ درصد است (کومار و همکاران ۲۰۱۳). آنها کم کالری، بدون کلسترول و گلوتن هستند، اما حاوی مواد معدنی ارزشمندی مانند پتاسیم، فسفر، کلسیم و روی هستند. قارچ‌ها هم چنین سرشار از ویتامین B و ویتامین D هستند (منگ و همکاران ۲۰۱۲). قارچ‌های دکمه‌ای بسیار محبوب هستند و ۳۰ درصد از تولید قارچ جهان را به خود اختصاص می‌دهند (رویس ۲۰۱٤). قارچ *Agaricus bisporus*، یک تا سه روز در دمای ۲۰ °C- ۲۵ و پنج تا هفت روز در دمای ٤ °C ماندگاری دارد (دیامانتاپولو و فیلیپوسی ۲۰۱۵؛ جیانگ ۲۰۱۳). از دیدگاه فیزیولوژی پس از برداشت، قارچ‌ها یکی از محصولات بسیار حساس در دوره پس از برداشت هستند، زیرا فاقد لایه کوتیکول در سطح کلاهک هستند و بنابراین در برابر تبخیر آب، آسیب فیزیکی و حملات میکروبی محافظت نمی‌شوند (کیم و همکاران ۲۰۰٦؛ برنان و همکاران ۲۰۰۰). ماندگاری کوتاه قارچ دکمه‌ای نقطه ضعفی است که ارزش اقتصادی آنها را محدود می‌کند. در دوره پس از برداشت، مجموعه‌ای از صفات کاهش‌دهنده کیفیت مانند از دست دادن رطوبت، تغییر بافت و رنگ، از دست دادن طعم و تغذیه در قارچ رخ می‌دهد (دینگ و همکاران ۲۰۱٦).

مطالعات متعددی بر روی حفظ کیفیت پس از برداشت قارچ تازه و به تعویق انداختن زوال آنها از طریق خنک‌سازی، بسته‌بندی در اتمسفر تغییریافته (MAP)[۱]، پوشش‌دهی، شست‌وشو با عوامل ضد میکروبی، فیلم‌های بسته‌بندی، نگه‌داری در محیط کنترل‌شده (CA)[۲]، میدان الکتریکی پالسی، ازن، تیمارهای آب الکترولیز شده، تیمار UV-C و محلول‌های ضد قهوه‌ای شدن مانند تیمار پس از برداشت با ملاتونین انجام شده است (دیامانتاپولو و فیلیپوسی ۲۰۱۵ ؛ کیو و همکاران ۲۰۱۷؛ ژو و همکاران ۲۰۲۱؛ شکاری و همکاران ۲۰۲۱؛ وانگ و همکاران ۲۰۲۱؛ شکاری وهمکاران ۱٤۰۱).

سولفید هیدروژن ($H_2S$) به عنوان سومین مولکول سیگنال‌دهنده گازی پس از اکسید نیتریک (NO) و مونوکسید کربن (CO) شناخته می‌شود (بلتوسکی ۲۰۱۹). شواهد متعدد نشان می‌دهد که سولفید هیدروژن ($H_2S$) به عنوان یک مولکول سیگنال‌دهی چندمنظوره در گیاهان عمل می‌کند (گی و همکاران ۲۰۱۷). در گیاهان، مطالعات بسیاری نشان داده است که سولفید هیدروژن ($H_2S$) در فرآیندهای مختلفی مانند جوانه‌زنی، تشکیل ریشه‌های جانبی و ناخواسته، حرکت روزنه‌ها، فتوسنتز، تنش‌های زیستی و غیرزیستی نقش دارد (لیو و لال ۲۰۱۵؛ جین و پی ۲۰۱٦؛ چن و همکاران ۲۰۱٦؛ جین و همکاران ۲۰۱۷؛ خان و همکاران ۲۰۱۷؛ فو و همکاران ۲۰۱۳). سولفید هیدروژن ($H_2S$) نقش مهمی در فیزیولوژی پس از برداشت میوه‌ها و سبزی‌های مختلف با تنظیم جنبه‌های مربوط به رسیدن آن‌ها مانند تغییرات رنگ، شدت تنفس، بیوسنتز اتیلن، قهوه‌ای شدن آنزیمی، نرم شدن و پوسیدگی پس از برداشت در طول دوره انبارمانی ایفا می‌کند (هو و همکاران ۲۰۱٤؛ فو و همکاران ۲۰۱۳؛ سان و همکاران ۲۰۱۵). اخیراً تحقیقات زیادی در مورد استفاده از سولفید هیدروژن ($H_2S$) در پس از برداشت توسط آزادکننده‌های آن مانند هیدروسولفید سدیم (NaHS)[۳] و سولفید سدیم ($Na_2S$) انجام شده است که نشان می‌دهد سولفید هیدروژن ($H_2S$) فرآیند قهوه‌ای شدن، رسیدن و پیری را در محصولات مختلف مهار یا کاهش می‌دهد. در توت فرنگی، کاربرد پس از برداشت سولفید هیدروژن ($H_2S$) با کاهش شدت تنفس، پوسیدگی میوه و فعالیت آنزیم‌های پلی گالاکتروناز (PG) و پکتین استراز (PE)[٤] باعث افزایش عمر پس از برداشت آن‌ها شد (مولینت و همکاران ۲۰۲۱ ؛ چانگ و همکاران ۲۰۱٤). مطالعات روی کیوی نشان داد که تیمار پس از برداشت سولفید هیدروژن ($H_2S$) با کاهش فعالیت آنزیم PG، نرمی میوه را کاهش داد و فعالیت آنزیم‌های مهارکننده رادیکال های آزاد اکسیژن (ROS)[۵] را افزایش داد که با تجمع زیاد اسید اسکوربیک (AsA)[٦] و تجمع کمتر پراکسید هیدروژن ($H_2O_2$) همراه بود (ژو و همکاران ۲۰۱٤). علاوه بر این، سولفید هیدروژن ($H_2S$) با مهار بیوسنتز اتیلن و کاهش تجمع ROS، رسیدن گوجه فرنگی را به تاخیر انداخت (ژنگ و همکاران ۲۰۲۰).

۱- Modified Atmosphere Package (MAP)

۲- Controlled atmosphere (CA)

۳- Sodium hydrosulfide (NaHS)

٤- Pectin esterase (PE)

۵- Reactive oxygen species (ROS)

٦- Ascorbic acid (AsA)

با توجه به عمر پس از برداشتی کوتاه‌مدت قارچ دکمه‌ای سفید خوراکی و ماهیت فساد پذیری بالای این محصول در طول دوره نگهداری پس از برداشت، و نقش مهم و اساسی گاز سولفید هیدروژن ($H_2S$) در افزایش طول دوره ماندگاری پس از برداشت محصولات مختلف، این تحقیق با هدف بررسی اثرات کاربرد ماده هیدروسولفید سدیم (NaHS) به عنوان آزادکننده این گاز بر روند تغییرات برخی از ویژگی‌های کمی و کیفی قارچ دکمه‌ای سفید خوراکی در طول شش روز ماندگاری آن در شرایط قفسه انجام شده است.

## مواد و روش‌ها

### تیمار قارچ‌ها

قارچ دکمه‌ای سفید خوراکی برداشت شده در مرحله‌ی فلش اول از شرکت کشت و تولید قارچ دکمه‌ای سادات تبریز تهیه گردید. قارچ‌های تهیه شده بلافاصله به آزمایشگاه منتقل شده و از نظر معیارهای ظاهری شامل اندازه کلاهک (۳۰-۲۰ میلی متر)، عدم بازشدگی کلاهک، یکنواختی رنگ کلاهک، و عدم وجود آلودگی و آسیب فیزیکی در کلاهک جهت انجام آزمایش، غربال‌گری شدند. هیدروسولفید سدیم ( NaHS, CAS 207683-19-0, Sigma-Aldrich) به عنوان آزادکننده گاز سولفید هیدروژن ($H_2S$)، جهت اعمال تیمار استفاده شد. آزمایش، به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملا تصادفی با سه تکرار اجرا شد. فاکتورها شامل غلظت ماده هیدروسولفید سدیم (NaHS) و طول دوره نگه‌داری در شرایط قفسه‌ای بود. برای مشخص نمودن غلظت بهینه ماده هیدروسولفید سدیم (NaHS)، پیش‌آزمایشی به منظور میزان تاثیر ماده مذکور بر درصد قهوه‌ای شدن کلاهک قارچ‌ها به شرح زیر اجرا گردید: ابتدا شش غلظت ماده هیدروسولفید سدیم (NaHS) (۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵، ۱، ۱/۲۵ و ۱/۵) به همراه تیمار شاهد (آب مقطر) مورد بررسی قرار گرفتند. برای این منظور، تعداد ۱۰ عدد قارچ یکنواخت و بدون آسیب‌دیدگی برای هر تکرار و در کل ۳۰ عدد برای هر تیمار (غلظت) انتخاب شدند. برای اعمال تیمار بخاردهی سولفید هیدروژن ($H_2S$)، پس از توزین ماده هیدروسولفید سدیم (NaHS)، آنرا در یک بشر حاوی ۲۰۰ میلی لیتر آب مقطر در دمای ۲۰ °C حل کرده و سپس قارچ‌ها در ظروف در بسته (سیلد شده) ۳ لیتری در معرض غلظت‌های مختلف هیدروسولفید سدیم (NaHS) به مدت ۲۰ دقیقه قرار گرفتند. بعد از اعمال تیمارها، قارچ‌ها در ظروف پلی‌اتیلنی مخصوص قرار داده شده و با پوشش سلفون بسته بندی شدند. سپس ظروف حاوی قارچ تحت شرایط قفسه (دمای ۲۰- ۲۵ °C و رطوبت نسبی ۹۵±۹۰ درصد) به مدت ٦ روز نگه‌داری شدند. پس از اتمام مدت زمان مذکور، نمونه‌های قارچ از نظر میزان قهوه‌ای شدن کلاهک مورد بررسی قرار گرفته و غلظتی که در آن کمترین میزان قهوه‌ای شدن قارچ مشاهده گردید، به عنوان غلظت بهینه انتخاب شد. سپس، قارچ‌ها تحت دو تیمار غلظت بهینه و تیمار شاهد قرار گرفتند. بعد از اعمال تیمارها، نمونه‌های قارچ به مدت ٦ روز در شرایط قفسه نگه-داری شدند. برای اندازه گیری صفات موردنظر، نمونه‌برداری از قارچ‌ها در روزهای صفر، ۲، ٤ و ٦ روز پس از اعمال تیمار انجام شد.

### شاخص قهوه‌ای شدن

شاخص قهوه‌ای شدن (BI)[۱] رنگ نمونه‌ها با استفاده از عکس برداری از قارچ‌ها در روزهای نمونه برداری انجام شد. برای عکس برداری، از جعبه مخصوصی که بدین منظور ساخته شده بود استفاده شد. برای هر تکرار از ۱۰ عدد قارچ استفاده شد. عکس‌ها به محیط نرم افزار فتوشاپ (نسخه ۲۰۱۸) منتقل شد و پارامترهای L* (روشنی نمونه)، a* ( قرمزی- سبزی) و b* ( زردی- آبی) در آنها اندازه‌گیری شد. سپس شاخص قهوه‌ای شدن (BI) با استفاده از معادلات $X= (a^*+1.75L^*)$ و $BI=[100 (X- (5.645L^*+a^*- 0.3012b^*) / 0.172]/(0.31)$ تعیین شد (اقدم و همکاران ۲۰۱۹).

### درصد کلاهک های باز

معیار تعیین درصد کلاهک های باز (OC)[۲]، بر اساس توسعه شکل چتر مانند کلاهک و جدا شدن پرده بود که بر اساس روش جیانگ و همکاران (۲۰۱۱) با معادله $OC (\%) = (Noc / N_t) \times 100$ اندازه‌گیری شد که در آن Noc، تعداد قارچ‌های با کلاهک باز و Nt، تعداد کل قارچ‌ها می‌باشد.

### کاهش وزن

برای اندازه‌گیری میزان درصد کاهش وزن نمونه‌های قارچ، ابتدا وزن اولیه نمونه‌ها در زمان صفر ($W_1$) با استفاده از

[۱]- Browning index (BI)

[۲]-Percent open caps

ترازوی دیجیتال به‌دست آمد. سپس وزن ثانویه ($W_2$) نمونه‌های قارچ در روزهای نمونه برداری اندازه‌گیری شد و میزان درصد کاهش وزن با استفاده از فرمول $(W_1-W_2 / W1) = 100 \times$ (٪) کاهش وزن، محاسبه گردید (سینگ و همکاران ۲۰۱٦).

**میزان ماده خشک**

برای اندازه‌گیری میزان درصد ماده خشک، از هر تکرار ۱۰ عدد قارچ به صورت تصادفی انتخاب شد. سپس با یک چاقوی تیز هر قارچ به چهار بخش تقسیم شد. پس از توزین این برش‌ها، آن‌ها را داخل پاکت های مقوایی گذاشته و سپس به مدت ٢٤ ساعت در آون با دمای ۱۰۵ °C قرار داده شدند. پس از خشک شدن نمونه‌ها، وزن آن‌ها اندازه‌گیری و میزان درصد ماده خشک آن‌ها با استفاده از روش کالبرر (۱۹۹۱) و طبق رابطه ۱۰۰× (وزن تر / وزن خشک) = درصد ماده خشک، محاسبه گردید.

**سفتی بافت**

اندازه‌گیری سفتی بافت قارچ‌ها توسط دستگاه سفتی‌سنج دیجیتال (PCE-FM50) ساخت کشور انگلیس صورت گرفت. برای این کار، تعداد ۱۰ عدد قارچ از هر تکرار انتخاب و با استفاده از سفتی‌سنج با نوک پنج میلی متری، سفتی بافت کلاهک هر قارچ اندازه‌گیری شد. به این صورت که ابتدا ساقه قارچ‌ها را از فاصله یکسان برش داده و کلاهک را روی سطح صاف قرار داده و سپس نوک دستگاه را روی بخش مرکزی بافت کلاهک قارچ قرار داده و پس از وارد کردن فشار یکنواخت، میزان سفتی قارچ‌ها قرائت شد و بر حسب نیوتن بیان شد (نصیری و همکاران ۲۰۱۷).

**محتوای اسید آسکوربیک**

اندازه‌گیری میزان اسید آسکوربیک (AsA) نمونه‌های قارچ به کمک دستگاه اسپکتروفتومتر مدل Analytic Jena Specord 250، ساخت کشور آلمان صورت گرفت. برای این منظور یک گرم از بافت قارچ پودر شده با ۱۵ میلی لیتر متافسفریک اسید پنج درصد مخلوط شد. سپس محلول حاصل به مدت ۲۰ دقیقه در دمای ٤ °C با دور ۱۲۰۰۰ سانتریفیوژ شد. پنج میلی لیتر از مخلوط صاف شده برداشته و در لوله آزمایش ریخته شد و به آن ۰/۵ میلی لیتر از ترکیب دی نیتروفنیل هیدرازین (DNPH) اضافه شد. سپس نمونه‌ها به دستگاه اسپکتروفتومتر انتقال داده شد و میزان جذب در طول موج ۵۱۵ نانومتر قرائت شد و نتایج به صورت میلی گرم در کیلوگرم وزن خشک بیان شد (ترادا و همکاران ۱۹۷۸).

**محتوای فنل کل**

اندازه‌گیری محتوای فنل کل طبق روش سینگلتون و روسی (۱۹٦۵) با استفاده از معرف فولین سیوکالتوانجام شد. ۵۰ میلی‌لیتر متانول به ۱ گرم از پودر بافت کلاهک قارچ اضافه و در دمای ٤ °C به مدت ۱۵ دقیقه با دور ٦۰۰۰ سانتریفیوژ شد. ۲۰۰ میکرولیتر از عصاره با ۱/۸۰ میلی‌لیتر آب مقطر مخلوط شد، سپس ۱ میلی‌لیتر از معرف فولین سیوکالتو به آن اضافه شد. محلول به دست آمده به مدت ۹۰ دقیقه در تاریکی و در دمای اتاق نگه‌داری شد. سپس به دستگاه اسپکتروفتومتر انتقال داده شد و جذب در طول موج ۷۵۰ نانومتر قرائت شد. در نهایت، میزان فنل کل به صورت معادل میلی‌گرم اسید گالیک در یک گرم بافت تازه بیان شد.

**ظرفیت آنتی‌اکسیدانی**

ظرفیت آنتی‌اکسیدانی نمونه‌های مورد آزمایش بر اساس واکنش شیمیایی خنثی‌کنندگی رادیکال آزاد ۱و۱ دی فنیل ۲-پیکریل هیدرازین (DPPH) با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۵۱۷ نانومتر تعیین و به صورت درصد ارائه شد (دخانیه و اقدم ۲۰۱٦).

**طرح آماری**

تجزیه و تحلیل داده‌های به‌دست آمده در این پژوهش با استفاده از نرم افزار (نسخه ۹.٤) SAS و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون توکی در سطح احتمال ۵ درصد ($p<$ ۰/۰۵) انجام شد. رسم نمودارها هم با استفاده از نرم افزار اکسل (Excel) انجام گردید.

## نتایج و بحث

**شاخص قهوه‌ای شدن**

با توجه به نتایج تجزیه واریانس داده‌ها، اثرات ساده تیمار **پس از برداشت** هیدروسولفید سدیم و مدت زمان نگه‌داری در قفسه و برهمکنش آن‌ها در مورد شاخص قهوه‌ای شدن قارچ دکمه‌ای در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود ($p<$ ۰/۰۱) (جدول ۱). بر اساس مقایسه میانگین داده‌ها، با افزایش زمان انبارمانی، شاخص قهوه‌ای شدن قارچ دکمه‌ای در همه‌ی نمونه‌ها به صورت معنی‌داری افزایش یافت، ولی تیمار هیدروسولفید سدیم (NaHS) آزادکننده سولفید هیدروژن

($H_2S$) شاخص قهوه‌ای شدن قارچ ها را نسبت به نمونه‌های شاهد به شکل قابل توجهی کاهش داد (شکل ۱ A , B). در بین غلظت‌های مختلف ماده هیدروسولفید سدیم (NaHS)، غلظت ۰/۵ میلی مولار بیشترین کاهش شاخص قهوه‌ای شدن کلاهک قارچ دکمه‌ای را نشان داد (شکل ۱)، بنابراین غلظت ۰/۵ میلی مولار هیدروسولفید سدیم (NaHS) به عنوان غلظت بهینه هیدروسولفید سدیم (NaHS) به همراه شاهد (آب مقطر) برای انجام سایر مراحل آزمایش انتخاب شد و به منظور اندازه‌گیری صفات میزان درصد کلاهک های باز، درصد کاهش وزن، میزان ماده خشک، میزان سفتی بافت، محتوای اسید آسکوربیک، میزان فنل کل، و ظرفیت آنتی اکسیدانی کل از غلظت‌های صفر و ۰/۵ میلی مولار هیدروسولفید سدیم (NaHS) برای تیمار قارچ‌های دکمه‌ای سفید خوراکی در این آزمایش استفاده گردید.

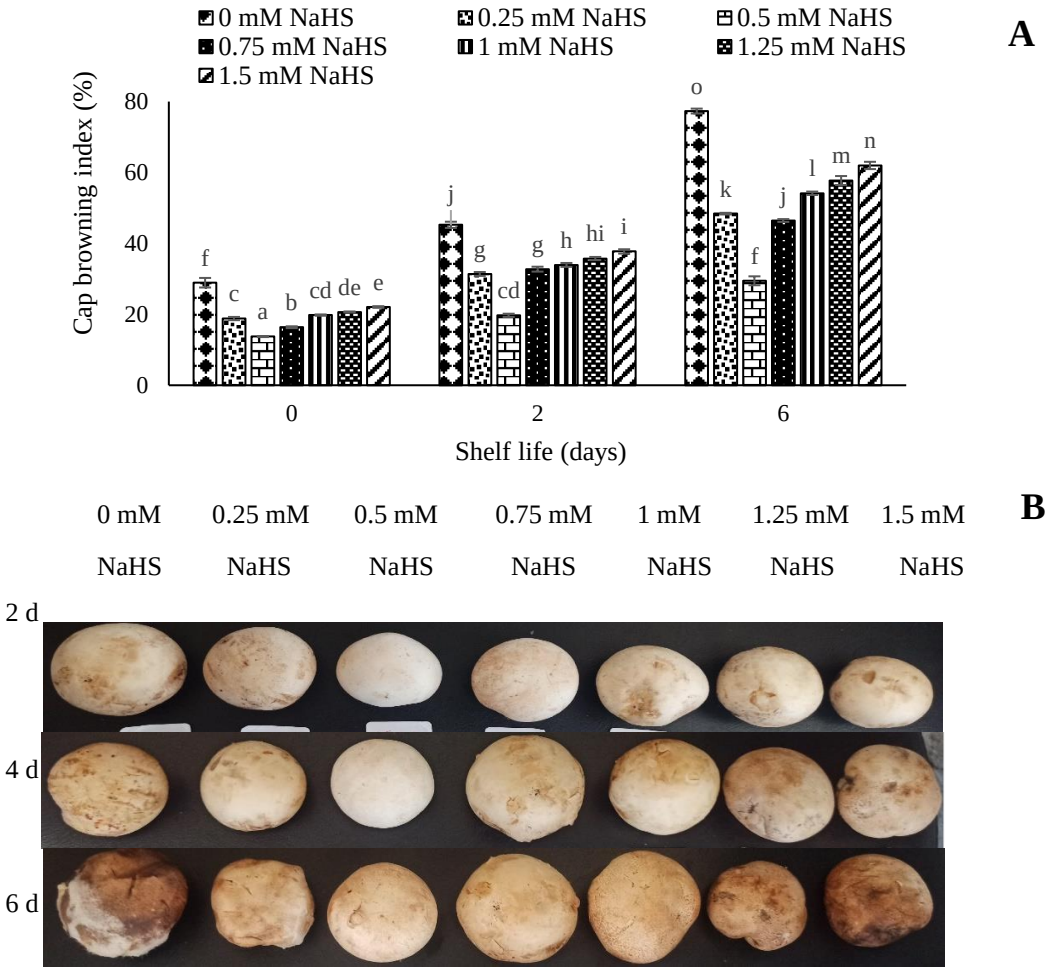
از دست دادن رنگ مشخصه محصولات، محدودیت اصلی در طول انبار پس از برداشت است. در میان تمام ویژگی‌های کیفی قارچ‌های دکمه‌ای تجاری، ظاهر، برجسته‌ترین شاخص کیفیت است که بر رفتار خرید مصرف کنندگان تأثیر می‌گذارد. قسمت خارجی کلاهک *Agaricus bisporus* سفید به دلیل آلودگی میکروبی یا فعالیت های آنزیمی مستعد قهوه‌ای شدن است (میشرا و همکاران ۲۰۱۳). افزایش شاخص قهوه‌ای شدن در قارچ دکمه‌ای سفید طی دوره پس از برداشت یک پدیده مورد انتظار است که دلیل آن می‌تواند افزایش جابجایی و انتقال پیش‌ماده‌ها و آنزیم‌ها به دنبال آسیب‌های فیزیکی باشد که به دنبال آن سبب افزایش فعالیت آنزیم پلی‌فنل‌اکسیداز (PPO) می‌شود (سوتیراک و مانوراکچیناکورن ۲۰۱۰). فعالیت بالاتر آنزیم PPO ممکن است مسئول اکسیداسیون فنل ها و در نتیجه قهوه‌ای شدن قارچ در مدت ماندگاری در قفسه به مدت شش روز باشد. بنابراین، حفظ پایداری غشاء با پیشبرد فعالیت‌های سیستم‌های بازدارنده ROS از طریق استفاده از روش‌های پس از برداشت در طول ماندگاری برای به تاخیر انداختن قهوه‌ای شدن کلاهک قارچ ارزشمند خواهد بود (اقدم و همکاران ۲۰۱۹؛ میشرا و همکاران ۲۰۱۳). سولفید هیدروژن ($H_2S$) توانایی بسیار زیادی برای حفظ رنگ خارجی برخی محصولات باغی دارد (ژنگ و همکاران ۲۰۱۱؛ چانگ و همکاران ۲۰۱٤؛ لی و همکاران ۲۰۱٤). مطالعه حاضر نیز ثابت کرد که سولفید هیدروژن ($H_2S$) با تنظیم متابولیسم فنل ها، قهوه‌ای شدن قارچ‌های دکمه‌ای سفید برداشت شده را کاهش می‌دهد. در این رابطه، اخیراً نتایج مطالعات متعدد نشان داده است که بخاردهی پس از برداشت سولفید هیدروژن ($H_2S$) رنگ میوه توت فرنگی را طی دوره پس از برداشت حفظ کرد (مولینت و همکاران ۲۰۲۱؛ هو و همکاران ۲۰۱۲). هم چنین تیمار کلم بروکلی با ۰/۹٦ میلی مول در لیتر هیدروسولفید سدیم (NaHS) آزادکننده سولفید هیدروژن ($H_2S$) بیان ژن‌های مخرب کلروفیل را تنظیم کرد و پیری را با حفظ رنگ سبز بروکلی به تعویق انداخت (لی و همکاران ۲۰۱٤). به طور مشابهی، کاربرد ۰/۸ میلی مول در لیتر هیدروسولفید سدیم (NaHS) در میوه توت، میزان سولفید هیدروژن ($H_2S$) درون‌زا را افزایش داد و تخریب آنتوسیانین‌ها را مهار کرده که باعث حفظ رنگ قرمز آن‌ها شد (هو و همکاران ۲۰۱٤).

**جدول ۱- تجزیه واریانس اثر تیمار پس از برداشت** هیدروسولفید سدیم **و زمان ماندگاری در قفسه بر شاخص قهوه‌ای شدن کلاهک قارچ دکمه‌ای سفید خوراکی**

**Table 1- Analysis of variance of the effect of postharvest sodium hydrosulfide treatment and shelf life time on the browning index of edible white button mushroom**

| | | Means of Square |
|---|---|---|
| Sources of variance | df | Browning index |
| NaHS | 6 | 735.32** |
| Shelf life time | 2 | 5974.38** |
| NaHS × Shelf life time | 12 | 85.68** |
| Error | 42 | 1.12 |
| CV (%) | - | 2.94 |

**: Significantly at the 1 % of probability level.




**شکل ۱- تاثیر غلظت‌های مختلف** هیدروسولفید سدیم **بر شاخص قهوه‌ای شدن قارچ دکمه‌ای سفید خوراکی در زمان ماندگاری در قفسه**

**Figure 1- Effect of different sodium hydrosulfide concentrations on the browning index of edible white button mushroom during shelf life**

Different letters indicate significant differences among the treatments according to Tukey's test ($P < 0.05$).

**درصد کلاهک های باز**

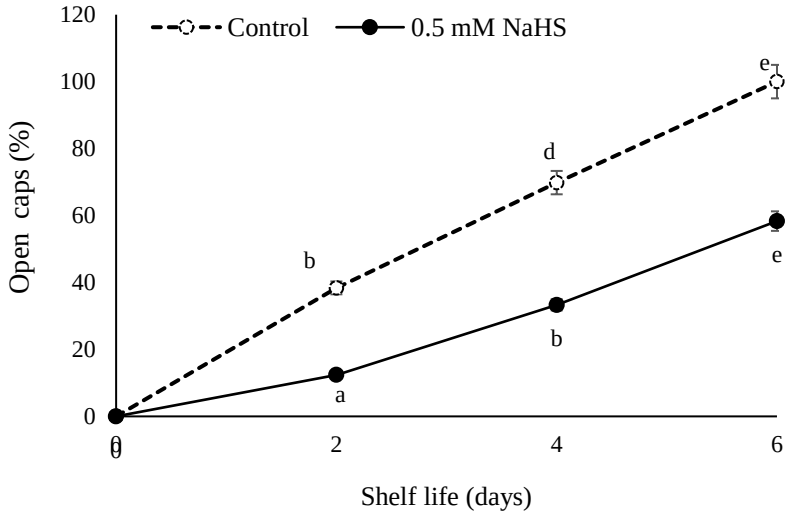
نتایج تجزیه واریانس داده‌های مربوط به تیمارها (جدول ۲) نشان می‌دهد که اثرات ساده و متقابل ۰/۵ میلی مولار هیدروسولفید سدیم (NaHS) آزاد کننده سولفید هیدروژن ($H_2S$) و زمان ماندگاری در قفسه در سطح احتمال ۱ درصد بر درصد کلاهک های باز قارچ دکمه‌ای معنی‌دار شد (۰/۰۵ >p). بر اساس نتایج حاصل از مقایسه میانگین داده‌ها، با افزایش زمان ماندگاری قارچ‌ها در قفسه، میزان درصد کلاهک های باز قارچ‌ها در نمونه‌های تیمار شده با ۰/۵ میلی مولار هیدروسولفید سدیم (NaHS) و شاهد به طور معنی‌داری افزایش یافت، طوری که بیشترین میزان درصد کلاهک های باز قارچ‌ها در روز ٦ نگه‌داری در قفسه در تیمار شاهد به میزان ۱۰۰ درصد به دست آمد (شکل ۲). باز شدن کلاهک قارچ‌ها به از دست دادن آب آنها در حین نگه‌داری پس از برداشت مربوط می شود. افزایش از دست‌دهی آب در حین نگه‌داری پس از برداشت باعث تغییر وضعیت کلاهک ها و پرده سالم و کامل در قارچ می‌شود که به عنوان کلاهک باز اطلاق می‌گردد (جیانگ و همکاران ۲۰۱۱). در تحقیق حاضر نیز از آنجا که سولفید هیدروژن ($H_2S$) میزان از دست‌دهی آب قارچ‌های تحت تیمار ۰/۵ میلی مولار هیدروسولفید سدیم (NaHS) آزادکننده را کاهش داد، میزان درصد کلاهک های باز این قارچ‌ها در مقایسه با تیمار شاهد بسیار کمتر بود.

**جدول ۲- تجزیه واریانس اثر تیمار پس از برداشت** هیدروسولفید سدیم **و زمان ماندگاری در قفسه بر پارامترهای کیفی و آنتی‌اکسیدانی قارچ دکمه‌ای سفید خوراکی**

**Table 2- Analysis of variance of the effect of postharvest sodium hydrosulfide treatment and shelf life time on the quality characteristics, and antioxidants of edible white button mushroom**

| Sources of variance | df | Means of Square | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | percent Open caps | Firmness | Weight loss | Dry matter | Ascorbic acid | Total phenol | DPPH |
| NaHS | 1 | 4071.09$^{**}$ | 73.29$^{**}$ | 13.30$^{**}$ | 58.56$^{**}$ | 77.25$^{**}$ | 17.37$^{**}$ | 725.39$^{**}$ |
| Shelf life time | 3 | 6956.96$^{**}$ | 895.92$^{**}$ | 108.54$^{**}$ | 112.15$^{**}$ | 496.49$^{**}$ | 54.41$^{**}$ | 512.24$^{**}$ |
| NaHS × Shelf life time | 3 | 515.88$^{**}$ | 9.25$^{**}$ | 4.87$^{**}$ | 8.59$^{**}$ | 9.63$^{**}$ | 2.18$^{*}$ | 190.71$^{**}$ |
| Error | 16 | 10.16 | 0.64 | 0.28 | 0.61 | 0.07 | 0.58 | 1.29 |
| CV (%) | - | 8.16 | 4.65 | 10.65 | 7.82 | 1.56 | 6.19 | 1.55 |

**, *, ns: Significant differences at the 1 and 5% of probability levels, and ns represent non-significant, respectively.




**شکل ۲- تاثیر غلظت‌های مختلف** هیدروسولفید سدیم **بر درصد کلاهک های باز قارچ دکمه‌ای سفید خوراکی در زمان ماندگاری در قفسه**

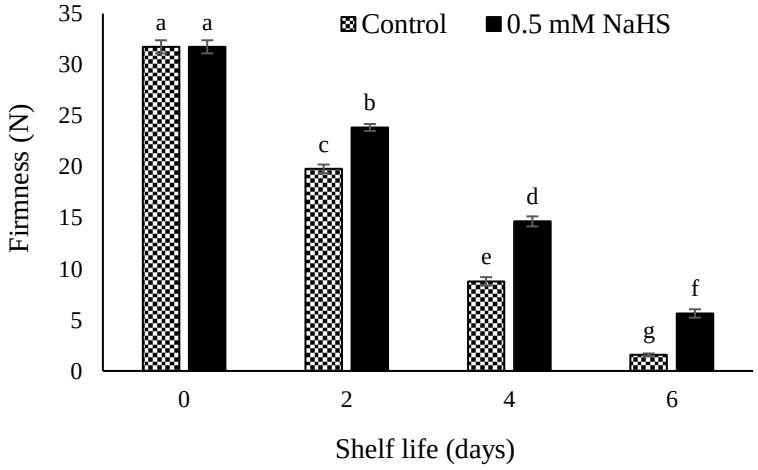
**Figure 2- Effect of different sodium hydrosulfide concentrations on percent open caps of edible white button mushroom during shelf life**

Different letters indicate significant differences among the treatments according to Tukey's test ($P < 0.05$).

**سفتی بافت**

با توجه به نتایج تجزیه واریانس داده‌ها، اثر ساده تیمار پس از برداشت ۰/۵ میلی مولار هیدروسولفید سدیم (NaHS) آزادکننده سولفید هیدروژن ($H_2S$) و مدت زمان نگه‌داری در قفسه و برهمکنش آن‌ها در مورد میزان سفتی بافت قارچ دکمه‌ای در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود (p< ۰/۰۱) (جدول ۲). بر اساس مقایسه میانگین داده‌ها، با افزایش زمان ماندگاری در قفسه، میزان سفتی بافت قارچ دکمه‌ای در همه‌ی نمونه‌ها به صورت معنی‌داری کاهش یافت، ولی تیمار ۰/۵ میلی مولار هیدروسولفید سدیم (NaHS) آزادکننده سولفید هیدروژن ($H_2S$) میزان سفتی قارچ‌ها را نسبت به نمونه‌های شاهد به شکل قابل توجهی حفظ کرد (شکل ۳). در پایان روز ششم ماندگاری قارچ ها در قفسه، میزان سفتی در قارچ‌های

تحت بخاردهی سولفید هیدروژن ($H_2S$)، ۵/۳ نیوتن و در قارچ‌های تحت تیمار شاهد ۱/۲۵ نیوتن بود. در این رابطه نتایج آزمایشات نشان داده است که بخاردهی پس از برداشتی انگور با سولفید هیدروژن ($H_2S$)، از کاهش سفتی پالپ در خوشه‌های آن می‌کاهد (نی و همکاران ۲۰۱۶). هم‌چنین، استفاده از این تیمار در توت فرنگی به دلیل کاهش فعالیت آنزیم‌های پکتین متیل استراز و پلی گالاکتروناز باعث سفتی بالاتر میوه‌های آن شد (مولینت و همکاران ۲۰۲۱؛ هو و همکاران ۲۰۱۲). علاوه بر این، تیمار بخاردهی سولفید هیدروژن ($H_2S$) از دست دادن سفتی پالپ کیوی را کاهش داد و منجر به حفظ سفتی بالاتر پوست میوه موز شد (لی و همکاران ۲۰۱۶؛ ژو و همکاران ۲۰۱۴). به طور مشابهی، قرار گرفتن میوه توت در معرض ۰/۸ میلی مول در لیتر هیدروسولفید سدیم (NaHS) به طور قابل توجهی نرم شدن آن را با حفظ محتوای پکتین محلول بالاتر به تاخیر انداخت (هو و همکاران ۲۰۱۴). به نظر می رسد با توجه به اثرات متعدد فیزیولوژیکی کاربرد تیمار پس از برداشت ماده سولفید هیدروژن در روند کنترل فرایند پیری در محصولات مختلف باغی، کاهش روند سفتی بافت قارچ دکمه ای در این آزمایش نیز به دنبال تیمار پس از برداشت با سولفید هیدروژن می تواند ناشی از کنترل فعالیت آنزیم های دخیل در نرم شدن بافت قارچ دکمه ای باشد.




**شکل ۳- تاثیر** هیدروسولفید سدیم **بر میزان سفتی بافت قارچ دکمه‌ای سفید خوراکی در زمان ماندگاری در قفسه**

**Figure 3- Effect of sodium hydrosulfide on the firmness of edible white button mushroom during shelf life**

Different letters indicate significant differences among the treatments according to Tukey's test ($P < 0.05$).

**کاهش وزن**

تجزیه واریانس داده‌های کاهش وزن نمونه‌ها نشان داد که اثرات ساده و متقابل ۰/۵ میلی مولار هیدروسولفید سدیم (NaHS) آزادکننده سولفید هیدروژن ($H_2S$) و زمان ماندگاری در قفسه در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود ($p< ۰/۰۵$) (جدول ۲). مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد با افزایش زمان نگه‌داری در قفسه، درصد کاهش وزن قارچ دکمه‌ای به صورت معنی‌داری افزایش یافت، طوری که بیشترین درصد کاهش وزن در روز ٦ نگه‌داری در قفسه در تیمار شاهد به مقدار ۱۲/۰٦ درصد به دست آمد. کاربرد تیمار هیدروسولفید سدیم (NaHS) درصد کاهش وزن را نسبت به نمونه‌های شاهد کاهش داد، اگرچه در روز دوم نگه‌داری در قفسه اختلاف معنی‌دار با نمونه‌های شاهد در سطح ۵ درصد بود (جدول ۳). با توجه به نبود کوتیکول ضخیم در قارچ‌ها، از دست دادن آب که طی فرآیند تعرق رخ می‌دهد، می‌تواند تبدیل به یکی از مهم‌ترین مشکلات پس از برداشت قارچ شود که انبارمانی این محصول را به شدت پایین می‌آورد (یه و همکاران ۲۰۱۲؛ لی و همکاران ۲۰۲۱). هم‌چنین خسارت وارده به غشای سلولی یکی از دلایل کاهش وزن محصول به شمار می‌رود (خان و همکاران ۲۰۱۴). کاربرد تیمارهای پس از برداشت سبب کاهش از دست‌دهی وزن در محصولات باغی طی دوره‌ی نگه‌داری در پس از برداشت می‌شوند که به دلیل تاثیر این تیمارها در جلوگیری از پیری، آسیب‌غشایی و تنفس می‌باشد. نتایج آزمایش حاضر با نتیجه بررسی‌های نی و

همکاران (۲۰۱۶) که نشان دادند بخاردهی با سولفید هیدروژن ($H_2S$) با افزایش سفتی و جلوگیری از پیری خوشه های انگور، از دست‌دهی وزن آنها را کاهش داده است، مطابقت دارد.

**جدول ۳- تاثیر تیمار پس از برداشت هیدروسولفید سدیم بر میزان کاهش وزن، ماده خشک، ویتامین ث، فنل کل و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی قارچ دکمه‌ای سفید خوراکی در زمان ماندگاری در قفسه**

**Table 3- Effect of postharvest NaHS treatment on weight loss, dry matter, AsA, total phenol content, and DPPH capacity of edible white button mushroom during shelf life**

| Shelf life (days) | NaHS (mM) | Weight loss | Dry matter | Ascorbic acid (mg $kg^{-1}$ FW) | Total Phenol (mg GAE $g^{-1}$ FW) | DPPH (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | - | - | 14.77 ± 0.41 a | 27.04 ± 0.17 a | 8.02 ± 0.37 d | 71.97 ± 0.29 c |
| 2 | 0 | 3.72 ± 0.12 a | 10.95 ± 0.38 c | 19.36 ± 0.11 c | 12.46 ± 0.11 c | 72.48 ± 0.2 c |
| | 0.5 | 3.19 ± 0.04 a | 13.46 ± 0.31 b | 24.8 ± 0.29 b | 14.65 ± 0.76 ab | 76.55 ± 0.8 b |
| 4 | 0 | 6.93 ± 0.11 c | 7.62 ± 0.29 d | 10.11 ± 0.06 e | 14.09 ± 0.37 b | 65.41 ± 0.97 e |
| | 0.5 | 5.56 ± 0.31 b | 10.48 ± 0.74 c | 15.71 ± 0.14 d | 15.90 ± 0.28 a | 80.26 ± 0.27 a |
| 6 | 0 | 12.06 ± 0.28 d | 2.43 ± 0.41 f | 4.86 ± 0.07 g | 11.25 ± 0.42 c | 42.21 ± 0.71 f |
| | 0.5 | 8.01 ± 0.73 e | 5.68 ± 0.52 e | 8.49± 0.05 f | 14.05 ± 0.54 b | 67.28 ± 0.78 d |

Different letters indicate significant differences among the treatments according to Tukey's test ($P < 0.05$).

**میزان ماده خشک**

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۲) نشان می‌دهد که اثرات ساده و متقابل ۰/۵ میلی مولار هیدروسولفید سدیم (NaHS) آزادکننده سولفید هیدروژن ($H_2S$) و زمان ماندگاری در قفسه در سطح احتمال ۱ درصد بر میزان ماده خشک قارچ دکمه‌ای معنی‌دار شد (p< ۰/۰۱). بر اساس نتایج حاصل از مقایسه میانگین داده‌ها، با افزایش زمان ماندگاری، میزان ماده خشک در هر دوی نمونه‌های تیمار شده با ۰/۵ میلی مولار هیدروسولفید سدیم (NaHS) و شاهد به طور پیاپی در طول مدت ماندگاری در قفسه کاهش یافت، اگرچه میزان کاهش ماده خشک در قارچ‌های تحت تیمار بخاردهی سولفید هیدروژن ($H_2S$) به طور معنی‌داری بیشتر از قارچ‌های تحت تیمار شاهد بود (جدول ۳). یکی از مهم‌ترین پارامترهای کیفی قارچ، میزان ماده خشک آن است. نتایج بررسی‌ها نشان داده که قارچ‌های دارای میزان ماده خشک بالا، از سفتی بالا و عمر قفسه‌ای بیشتری در مقایسه با قارچ‌های با ماده خشک کمتر برخوردارند. این موضوع هم در مورد سفتی بخش بیرونی کلاهک قارچ و هم سفتی بخش درونی آن صادق است. هم‌چنین نتایج نشان داده است که هر چه میزان از دست‌دهی آب قارچ‌ها کمتر باشد، میزان ماده خشک آنها بالاتر خواهد بود (لون و همکاران ۲۰۰۰).

**محتوای اسید آسکوربیک**

مطابق نتایج تجزیه واریانس داده‌ها، اثرات ساده و متقابل ۰/۵ میلی مولار هیدروسولفید سدیم (NaHS) آزادکننده سولفید هیدروژن ($H_2S$) و زمان ماندگاری در قفسه در سطح احتمال ۱ درصد بر محتوای اسید آسکوربیک قارچ دکمه‌ای معنی‌دار بود (p< ۰/۰۱) (جدول ۲). بر اساس مقایسه میانگین داده‌ها، با افزایش زمان ماندگاری در قفسه میزان اسید آسکوربیک در نمونه‌های تیمار شده با ۰/۵ میلی مولار هیدروسولفید سدیم (NaHS) آزادکننده سولفید هیدروژن ($H_2S$) و شاهد در طول زمان ماندگاری کاهش داشت (جدول ۳). اگرچه میزان اسید آسکوربیک در نمونه‌های تیمار شده با ۰/۵ میلی مولار

هیدروسولفید سدیم (NaHS) نسبت به شاهد در همه‌ی زمان‌های اندازه‌گیری بیشتر بود (جدول ۳). اسید آسکوربیک در مجاورت اکسیژن مستقیماً و یا با کمک آنزیم‌هایی مثل آنزیم آسکوربیک اسید اکسیداز اکسیده می‌گردد و در طول دوره انبارمانی کاهش می‌یابد (شریواس و همکاران ۲۰۰۵). کاهش کمتر اسید آسکوربیک در قارچ‌های دکمه‌ای تیمارشده با هیدروسولفید سدیم (NaHS) آزادکننده سولفید هیدروژن ($H_2S$) را می‌توان به اثرات آنتی‌اکسیدانی این ماده نسبت داد که سبب کاهش فعالیت‌های فیزیولوژیکی مرتبط با پیری می‌شود. از طرفی دیگر این کاهش اسید آسکوربیک را می‌توان به کاهش وزن و از دست دادن رطوبت قارچ‌ها نیز نسبت داد. بدین معنی که چون اسید آسکوربیک محلول در آب است، با از دست دادن رطوبت از بین خواهد رفت و چون از بین رفتن اسید آسکوربیک در نمونه‌های شاهد بسیار مشهود است در نتیجه این تفاوت مشاهده شد (خینگ و همکاران ۲۰۱۱).

**محتوای فنل کل**

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۲) نشان می‌دهد که اثرات ساده ۰/۵ میلی مولار هیدروسولفید سدیم (NaHS) آزادکننده سولفید هیدروژن ($H_2S$) و زمان ماندگاری در قفسه بر محتوای کل ترکیبات فنلی در سطح احتمال ۱ درصد ($p<0/01$) و اثرات متقابل آنها نیز در سطح ۵ درصد معنی‌دار بود ($p<0/05$). هم‌چنین مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که با افزایش زمان ماندگاری در قفسه، میزان فنل کل در نمونه‌های تیمار شده با ۰/۵ میلی مولار هیدروسولفید سدیم (NaHS) و شاهد تا روز ٤ افزایش نشان داد، ولی بعد از آن کاهش داشت (جدول ۳). محتوای فنل کل در نمونه‌های تیمار شده با ۰/۵ میلی مولار هیدروسولفید سدیم (NaHS) آزادکننده سولفید هیدروژن ($H_2S$) نسبت به شاهد در همه‌ی زمان‌های اندازه‌گیری بیشتر بود (جدول ۳).

ترکیبات فنلی یکی از آنتی‌اکسیدان های دفاعی در مقابل تنش اکسیداتیو هستند. تجمع ترکیبات فنلی در بافت‌های گیاهی برای تثبیت کربن فتوسنتزی و ارتقای مکانیسم‌های دفاعی بسیار مهم است. گروه‌های هیدروکسیل آزاد متصل به حلقه آروماتیک فنل‌ها به وسیله‌ی حذف رادیکال‌ها و دیگر مکانیسم‌های دفاعی از آسیب‌های اکسیداتیو می‌کاهند و به این ترتیب ساختارهای سلولی را از تاثیر منفی تنش محافظت می‌کنند. ترکیبات فنلی با قابلیت آنتی‌اکسیدانی و سمیت‌زدایی رادیکال‌های اکسیژن، باعث افزایش مقاومت گیاهان می‌شوند. بیوسنتز فنل‌ها در گیاهان از طریق مسیر شیکمیک- فنیل پروپانوئید-فلاونوئید انجام می‌شود (تسای و همکاران ۲۰۰٦ ). فنیل آلانین آمونیالیاز[۱] (PAL) آنزیم اصلی در اتصال مسیر سنتزی اسیدهای آمینه آروماتیک و متابولیت‌های ثانویه شامل گروه وسیعی از ترکیبات فنلی است و نقش کلیدی در تنظیم محصولات حاصل از مسیر فنیل پروپانوئیدی ایفا می‌کند. در واقع PAL امکان تبدیل فنیل آلانین به ترانس- اسید سینامیک را فراهم ساخته و سبب ادامه چرخه و تولید مواد فنلی می‌شود (سون و همکاران ۲۰۱٦). تجمع ترکیبات فنلی در قارچ‌های تیمار شده با هیدروسولفید سدیم (NaHS) آزادکننده سولفید هیدروژن ($H_2S$) می‌تواند سبب بالا بردن ظرفیت آنتی‌اکسیدانی شود که در کاهش قهوه‌ای شدن کلاهک قارچ نقش دارد. افزایش فعالیت آنزیم PAL در قارچ‌های تیمار شده از طرفی سبب افزایش فنل کل می‌شود که تجمع فنل برای کیفیت غذایی میوه‌ها و سبزی‌ها ضروری است و به نگه‌داری سلامت انسان‌ها از طریق مهار فعالیت گونه‌های فعال اکسیژن کمک می‌کند (ژنگ و همکاران ۲۰۱۸). از طرف دیگر فعالیت بالای این آنزیم در میوه‌ها و سبزی‌ها از طریق رسوب فنل‌ها و لیگنین در دیواره سلولی و جلوگیری از نفوذ پاتوژن‌ها به سلول منجر به استحکام دیواره سلولی می‌شود. منگ و همکاران (۲۰۱۲) گزارش کردند که فعالیت بالاتر آنزیم PAL، بیوسنتز ترکیبات فنلی را افزایش می‌دهد و منجر به تجمع کمتر ROS در قارچ می‌شود و کیفیت قارچ را حفظ می‌کند و قهوه‌ای شدن آن را کاهش می‌دهد. اثر بخاردهی پس از برداشت سولفید هیدروژن ($H_2S$) در میوه زالزالک نشان داد که این تیمار با افزایش تجمع ترکیبات فنلی از طریق افزایش فعالیت آنزیم PAL، باعث افزایش فعالیت مهاری DPPH می‌شود (اقدم و همکاران ۲۰۱۸). میوه‌های سیب تیمار شده با سولفید هیدروژن ($H_2S$) در زمان پس از برداشت، ترکیبات فنلی و فعالیت‌های آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان بالاتری نسبت به تیمار شاهد در طول ماندگاری نشان دادند و با کاهش $H_2O_2$ و رادیکال آزاد اکسیژن پیری میوه را به تاخیر انداختند (ژنگ و همکاران ۲۰۱٦).

[۱]- Phenylalanine ammonia-lyase (PAL)

**ظرفیت آنتی‌اکسیدانی**

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۲) نشان می‌دهد که اثرات ساده و متقابل ۰/۵ میلی مولار هیدروسولفید سدیم (NaHS) آزادکننده سولفید هیدروژن ($H_2S$) و زمان ماندگاری در قفسه در سطح احتمال ۱ درصد بر ظرفیت آنتی‌اکسیدانی قارچ دکمه‌ای معنی‌دار شد ($p<$ ۰/۰۱). بر اساس نتایج حاصل از مقایسه میانگین داده‌ها، با افزایش زمان ماندگاری، ظرفیت آنتی‌اکسیدانی در نمونه‌های تیمار شده با ۰/۵ میلی مولار هیدروسولفید سدیم (NaHS) تا روز ٤ افزایش نشان داد و پس از آن کاهش یافت، ولی در نمونه‌های شاهد میزان افزایش تا روز ۲ بود، و بعد از آن روند کاهشی به خود گرفت (جدول ۳). میزان ظرفیت آنتی‌اکسیدانی در نمونه‌های تیمار شده با هیدروسولفید سدیم (NaHS) نسبت به شاهد در همه‌ی زمان‌های اندازه‌گیری بیشتر بود. اندازه‌گیری DPPH برای ارزیابی ظرفیت آنتی‌اکسیدانی استفاده می‌شود، زیرا افزایش مهار رادیکال DPPH نشان دهنده‌ی ظرفیت بالای آنتی‌اکسیدانی سلول‌ها می‌باشد. افزایش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی سبب افزایش مهار گونه‌های فعال اکسیژن و کاهش شاخص قهوه‌ای شدن می‌شود (لاگنیکا و همکاران ۲۰۱۳). طبق مطالعه نگی (۲۰۱۵)، استفاده از تیمار پس از برداشت سولفید هیدروژن ($H_2S$) باعث سرکوب یا کاهش شدید آسیب اکسیداتیو و افزایش فعالیت آنزیم‌های اکسیداتیو می‌شود که ممکن است به خواص هسته دوستی مولکول‌های سولفید هیدروژن ($H_2S$) و قدرت آن در تعامل با $O_2^{\cdot-}$، $H_2O_2$ یا پراکسی نیتریت ($ONOO^-$) مرتبط باشد. در این آزمایش فعالیت‌های مهار رادیکال DPPH در قارچ‌های دکمه‌ای تیمارشده با هیدروسولفید سدیم (NaHS) در مقایسه با گروه شاهد در طول ماندگاری در قفسه بیشتر بود که نشان می‌دهد حذف رادیکال DPPH پس از تیمار سولفید هیدروژن ($H_2S$) بهبود یافته است.

**نتیجه‌گیری**

در این آزمایش، اثر مثبت تیمار پس از برداشت هیدروسولفید سدیم (NaHS) به عنوان آزادکننده گاز سولفید هیدروژن ($H_2S$) بر ویژگی‌های کیفی و آنتی‌اکسیدانی قارچ دکمه‌ای سفید خوراکی در مدت ماندگاری در قفسه به مدت ٦ روز مشاهده شد. نتایج مطالعه ما نشان داد که تیمار بخاردهی پس از برداشت قارچ دکمه‌ای با ۰/۵ میلی مولار هیدروسولفید سدیم (NaHS) منجر به کاهش پیری پس از برداشت همراه با تاخیر در قهوه‌ای شدن کلاهک، درصد کلاهک های باز کمتر، کاهش وزن کمتر و درصد ماده خشک و سفتی بالاتر نسبت به شاهد در طول قفسه شد که این موضوع احتمالاً با حفظ پایداری غشای سلولی در طول ماندگاری مرتبط می‌باشد. علاوه بر این، قارچ‌های دکمه‌ای بخاردهی داده شده توسط گاز سولفید هیدروژن ($H_2S$)، افزایش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی و مهار رادیکال DPPH را در طول ماندگاری در قفسه نشان دادند که ناشی از افزایش تجمع ترکیبات فنلی و اسید آسکوربیک در این قارچ‌ها بود. در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از تیمار بخاردهی سولفید هیدروژن ($H_2S$) در پس از برداشت قارچ دکمه‌ای با حفظ ویژگی‌های کیفی و آنتی‌اکسیدانی می تواند روش مناسبی برای به تاخیر انداختن پیری پس از برداشت و افزایش ماندگاری قارچ دکمه‌ای سفید خوراکی باشد.

**منابع مورد استفاده**

شکاری الف، نقشی بند حسنی ر، سلیمانی اقدم م، رضایی م، جنتی زاده ع، ۱٤۰۱، تاثیر کاربرد پس از برداشت ملاتونین بر کیفیت تغذیه‌ای و عمر انبارمانی فرم تازه بریده قارچ تکمه‌ای (Agaricus bisporus)، پژوهش های صنایع غذایی، ۳۲(۳)، ۱۱۱-۱۲۸.

Aghdam MS, Luo Z, Jannatizadeh A and Farmani B, 2019. Exogenous adenosine triphosphate application retards cap browning in *Agaricus bisporus* during low temperature storage. Food chemistry 293: 285-290.

Aghdam MS, Mahmoudi R, Razavi F, Rabiei V and Soleimani A, 2018. Hydrogen sulfide treatment confers chilling tolerance in hawthorn fruit during cold storage by triggering endogenous $H_2S$ accumulation, enhancing antioxidant enzymes activity, and promoting phenols accumulation. Scientia Horticulture 238: 264–271.

Beltowski J, 2019. Synthesis, metabolism, and signaling mechanisms of hydrogen sulfide: An overview. Methods in Molecular Biology 2007: 1–8.

Brennan MH, Le Post G and Gormley TR, 2000. Postharvest treatment with citric acid and hydrogen peroxide to extend the shelf life of fresh sliced mushrooms. Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie 33: 285–289.

Chang Z, Jingying S, Liqin Z, Changle L and Qingguo W, 2014. Cooperative effects of hydrogen sulfide and nitric oxide on delaying softening and decay of strawberry. International Journal of Agriculture and Biology 7: 114–122.

Chen J, Shang YT, Wang WH, Chen XY, He EM, Zheng HL and Shangguan Z, 2016. Hydrogen sulfide-mediated polyamines and sugar changes are involved in hydrogen sulfide-induced drought tolerance in *Spinacia oleracea* seedlings. Frontiers in Plant Science 7: 1173.

Diamantopoulou P and Philippoussis A, 2015. Cultivated mushrooms: preservation and processing. Handbook 488 of vegetable preservation and processing. CRC Press, Florida, 495–525.

Ding Y, Zhu Z, Zhao J, Nie Y, Zhang Y, Liu C, Meng D, Mao H 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 and Bioprocess Technology, 1–8.

Dokhanieh AY and Aghdam MS, 2016. Postharvest browning alleviation of *Agaricus bisporus* using salicylic acid treatment. Scientia Horticulturae 207: 146–151.

Fu P, Wang W, Hou L and Liu X, 2013. Hydrogen sulfide is involved in the chilling stress response in *Vitis vinifera* L. Acta Societatis Botanicorum Poloniae 82: 295.

Ge Y, Hu KD, Wang SS, Hu LY, Chen XY, Li YH, Yang Y, Yang F and Zhang H, 2017. Hydrogen sulfide alleviates postharvest ripening and senescence of banana by antagonizing the effect of ethylene. PLoS One 12: e0180113.

Hu H, Shen W and Li P, 2014. Effects of hydrogen sulphide on quality and antioxidant capacity of mulberry fruit. International Journal of Food Science and Technology 49: 399–409.

Hu LY, Hu SL, Wu J, Li YH, Zheng JL, Wei ZJ, Liu J, Wang HL, Liu YS and Zhang H, 2012. Hydrogen sulfide prolongs postharvest shelf life of strawberry and plays an antioxidative role in fruits. Journal of Agricultural and Food Chemistry 60: 8684–8693.

Jiang T, 2013. Effect of alginate coating on physicochemical and sensory qualities of button mushrooms (*Agaricus bisporus*) under a high oxygen modified atmosphere. Postharvest Biology and Technology 76: 91–97.

Jiang T, Feng L, Zheng X, Li J, Jing G, Cai L and Ying T, 2011. Integrated application of nitric oxide and modified atmosphere packaging to improve quality retention of button mushroom (*Agaricus bisporus*). Food Chemistry 126: 1693–1699.

Jin Z and Pei Y, 2016. Hydrogen sulfide: the shutter button of stomata in plants. Science China Life Sciences 59: 1187–1188.

Jin Z, Wang Z, Ma Q, Sun L, Zhang L, Liu Z, Liu D, Hao X and Pei Y, 2017. Hydrogen sulfide mediates ion fluxes inducing stomatal closure in response to drought stress in *Arabidopsis thaliana*. Plant and Soil 419: 141–152.

Kalberer, PP, 1991. Water relations of the mushroom culture (*Agaricus bisporus*): Influence on the crop yield and on dry matter content of the fruit bodies. Mushroom Sciences 13: 269-274.

Khan MN, Mobin M, Abbas ZK and Siddiqui MH, 2017. Nitric oxide-induced synthesis of hydrogen sulfide alleviates osmotic stress in wheat seedlings through sustaining antioxidant enzymes, osmolyte accumulation and cysteine homeostasis. Nitric Oxide 68: 91–102.

Khan ZU, Aisikaer G, Khan RU, Bu J, Jiang Z, Ni Z and Ying T, 2014. Effects of composite chemical pretreatment on maintaining quality in button mushrooms (*Agaricus bisporus*) during postharvest storage. Postharvest Biology and Technology 95: 36-41.

Kim KM, KO JA, Lee JS, Park HJ and Hanna MA, 2006. Effect of modified atmosphere packaging on the shelf-life of coated, whole and sliced mushrooms. LWT-Food Sciences and Technology 39: 365-372.

Kumar A, Singh M and Singh G, 2013. Effect of different pretreatments on the quality of mushrooms during solar drying. Journal of food science and technology 50(1): 165-170.

Lagnika C, Zhang M and Mothibe KJ, 2013. Effects of ultrasound and high pressure argon on physico-chemical properties of white mushrooms (*Agaricus bisporus*) during postharvest storage. Postharvest Biology and Technology 82: 87–94.

Li D, Limwachiranon J, Li L, Du R and Luo Z, 2016. Involvement of energy metabolism to chilling tolerance induced by hydrogen sulfide in cold-stored banana fruit. Food Chemistry 208: 272–278.

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 Chemistry 340: 127833.

Li SP, Hu KD, Hu LY, Li YH, Jiang AM, Xiao, F, Han Y, Liu YS and Zhang H, 2014. Hydrogen sulfide alleviates postharvest senescence of broccoli by modulating antioxidant defense and senescence-related gene expression. Journal of Agricultural and Food Chemistry 62: 1119–1129.

Liu R and Lal R, 2015. Effects of low-level aqueous hydrogen sulfide and other sulfur species on Lettuce (*Lactuca sativa*) seed germination. Communications in Soil Science and Plant Analysis 46: 576–587.

Loon PV, Swinkels H.A.T.I and Griensven L.J.L.D.V, 2000. 1-Dry matter content in mushrooms (Agaricus bisporus) as an indicator for mushroom quality. Science and Cultivation of Edible Fungi, 2000 Balkama, Rotterdam, ISBN 9058091430. 507-513.

Meng D, Song T, Shen L, Zhang X and Sheng J, 2012. Postharvest application of methyl jasmonate for improving quality retention of *Agaricus bisporus* fruit bodies. Journal of Agriculture of Food Chemistry 60(23): 6056-6062.

Mishra BB, Gautam S and Sharma A, 2013. Free phenolics and polyphenol oxidase (PPO): The factors affecting post-cut browning in eggplant (*Solanum melongena*). Food Chemistry 139: 105–114.

Molinett SA, Alfaro JF, Sáez FA, Elgueta S, Moya-León María A and Figueroa CR, 2021. Postharvest treatment of hydrogen sulfide delays the softening of Chilean strawberry fruit by downregulating the expression of key genes involved in pectin catabolism. International Journal of Molecular Sciences 22, 10008.

Nagy P, 2015. Mechanistic chemical perspective of hydrogen sulfide signaling. Review. Methods inEnzymology 554: 3–29.

Ni ZJ, Hu KD, Song, CB, Ma RH, Li ZR, Zheng JL, Fu LH, Wei ZJ and Zhang H, 2016. Hydrogen sulfide alleviates postharvest senescence of grape by modulating the antioxidant defenses. Oxidative Medicine and Cellular Longevity. 2016, 4715651.

Que PTT, Verlinden B and Nicolai B, 2017. Effect of controlled atmosphere and storage temperature on the weight loss and cap colour of fresh mushrooms (Agaricus bisporus). Can Tho University Journal of Science 6: 127–139.

Royse DJ, 2014. A global perspective on the high five: *Agaricus, Pleurotus, Lentinula, Auricularia & Flammulina*. Paper presented at the Proceedings of the 8th International Conference on Mushroom Biology and Mushroom Products (ICMBMP8).

Shekari A, Naghshiband HR, Soleimani AM, Rezaee M and Jannatizadeh A, 2021. The effects of melatonin treatment on cap browning and biochemical attributes of *Agaricus bisporus* during low temperature storage. Food Chemistry 348: 129074.

Shrivas K, Agrawal K, Patel DK and Kumar A, 2005. A spectrophotometric determination of ascorbic acid. Journal-chinese chemical society Taipei 52: 503.

Singh VP, Singh S, Kumar J and Prasad SM, 2015. Hydrogen sulfide alleviates toxic effects of arsenate in pea seedlings through up-regulation of the ascorbate-glutathione cycle: Possible involvement of nitric oxide. Journal of Plant Physiology 181: 20–29.

Singleton VL and Rossi JA, 1965. Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. American journal of Enology and Viticulture 16(3): 144-158.

Sun Q, Zhang N, Wang J, Cao Y, Li X, Zhang H, Zhang LY, Tan DX and Guo Y, 2016. A label-free differential proteomics analysis reveals the effect of melatonin on promoting fruit ripening and anthocyanin accumulation upon postharvest in tomato. Journal of Pineal Research 61: 138–153.

Sun Y, Zhang W, Zeng T, Nie QX, Zhang FY and Zhu LQ, 2015. Hydrogen sulfide inhibits enzymatic browning of fresh-cut lotus root slices by regulating phenolic metabolism. Food Chemistry 177: 376–381.

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 Journal of Science and Technology 7: 5-14.

Terada M, Watanabe Y, Kunitomo M and Hayashi E, 1978. Differential rapid analysis of ascorbic acid and ascorbic acid 2-sulfate by dinitrophenylhydrazine method. Analytical Biochemistry 84(2): 604-608.

Tsai CJ, Harding SA, Tschaplinshi TJ, Lindroth RL and Yuan Y, 2006. Genome-wide analysis of the structural genes regulating defense phenylpropanoid metabolism in Populus. New Phytologist 172: 47–62.

Wang K, Wang C, Liu Y, Jiang W, Li W, Cheng F, Ma C and Nie Y, 2021. Effects of hydrogen sulfide on the quality deterioration of button mushrooms and the interaction with ethylene. Food and Bioprocess Technology 14: 1983–1995.

Xing Y, Li X, Xu Q, Yun J, Lu Y and Tang Y, 2011. Effects of chitosan coating enriched with cinnamon oil on qualitative properties of sweet pepper (*Capsicum annuum* L.). Food Chemistry 124: 1443-1450.

Ye J, Li J, Han X, Zhang L, Jiang T and Xia M, 2012. Effects of active modified atmosphere packaging on postharvest quality of shiitake mushrooms (*Lentinula edodes*) stored at cold storage. Journal of Integrative Agriculture 11: 474-482.

Zhang H, Hu SL, Zhang ZJ, Hu LY, Jiang CX, Wei ZJ, Liu J, Wang HL and Jiang ST, 2011. Hydrogen sulfide acts as a regulator of flower senescence in plants. Postharvest Biology and Technology 60: 251–257.

Zheng JL, Hu, LY, Hu KD, Wu J, Yang F and Zhang H, 2016. Hydrogen Sulfide Alleviates Senescence of Fresh-cut Apple by Regulating Antioxidant Defense System and Senescence-related Gene Expression. Horticulture Science 51(2):152–158.

Zhu D, Wang C, Liu Y, Ding Y, Winters E and Li W and Cheng F, 2021. Gibberellic acid maintains postharvest quality of Agaricus bisporus mushroom by enhancing antioxidative system and hydrogen sulfide synthesis. Journal of Food Biochemistry 45: e13939.

Zhu L, Wang W, Shi J, Zhang W, Shen Y, Du H and Wu Sh, 2014. Hydrogen sulfide extends the postharvest life and enhances antioxidant activity of kiwifruit during storage. Journal of the Science of Food and Agriculture 94: 2699–2704.

Journal of Food Research, 2023,33(2):15-30
https://foodresearch.tabrizu.ac.ir
OPEN ACCESS

© 2009 Copyright by Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran
This is an open access article under the CC BY NC license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/)
DOI: 10.22034/FR.2023.52949.1843

# The effect of postharvest fumigation treatment with hydrogen sulfide on the quality and antioxidant characteristics of edible white button mushroom during shelf life

**M Moradi Digehsara[1], R Naghsiband Hassani [2*] and N Mahna [2]**

Received: August 27, 2022 Accepted: February 20, 2023
[1]PhD Student, Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran
[2]Associate Professor, Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran
[*]Corresponding author: Email: naghshiband@tabrizu.ac.ir

**Introduction:** Button mushrooms are very popular and account for 30 % of the world's mushroom production (Royse, 2014). It has been reported that the *Agaricus bisporus* mushroom has a shelf life of one to three days at 20−25 ºC, and five to seven days at 4 ºC (Diamantopoulou & Philippoussis, 2015; Jiang, 2013). Throughout the short shelf life of white button mushrooms (*Agaricus bisporus*), a few quality degradation processes emerge, including moisture loss, discoloration as browning, texture changes, off-flavor, and nutritional loss, reducing their economic value (Ding et al., 2016). This phenomenon is accompanied by the increase of reactive oxygen species (ROS) levels, due to the decline of the ROS scavenging power of the cell. Numerous studies have been performed on maintaining the postharvest quality of fresh mushrooms and postponing their deterioration (Zhu et al., 2021; Shekari et al., 2021). Extensive investigations reported that the role of hydrogen sulfide ($H_2S$) as an endogenous gaseous signaling molecule primarily acts on the regulation of physiological functions associated with nitric oxide (NO), carbon monoxide (CO), and $H_2O_2$ in animals and plants (Hancock and Whiteman, 2016; Beltowski, 2019). Zheng et al. (2016) stated that postharvest exogenous $H_2S$ treatment of fresh-cut apples mitigated enzymatic browning. In the present investigation, NaHS solution as an $H_2S$ donor was applied to fumigate edible white button mushrooms (*Agaricus bisporus*) in the postharvest and its effects on cap browning index, percent open caps, weight loss, dry matter, firmness, ascorbic acid, total phenol, and 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) radical scavenging in edible white button mushroom during shelf life for 6 days were evaluated.

**Material and methods:** Fresh button mushrooms were selected on the basis of the uniformity of maturity and size. Sodium hydrosulfide (NaHS) was applied as an $H_2S$ donor. Each treatment was implemented in three replications. To prepare the solution, NaHS was dissolved in 200 mL of distilled water in 3 L sealed containers at room temperature, then mushrooms were exposed to 0 (control; distilled water), 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.25, and 1.5 mM NaHS for 20 min. Afterward, treated mushrooms

were maintained for 6 days at shelf life. Samplings of mushrooms were taken at 0, 2, 4, and 6 days after treatment. To calculate the browning index (BI), photographs of edible mushroom samples were taken on sampling days, and L, a, and b were calculated in the Photoshop software environment (Aghdam et al., 2019). Percent open caps were measured according to Jiang et al's (2011) method. Weight loss was measured according to the method of Sing et al (2016). Dry matter was measured according to Kalberer's (1991) method. The firmness of the mushrooms was measured by a digital firmness tester by the method of Nasiri et al (2017). A spectrophotometric procedure described by Terada et al (1978) was used for the determination of ascorbic acid content. Total phenolics were measured using the Folin–Ciocalteu reagent by Singleton and Rossi (1965) method. DPPH radical was used to measure scavenging activity according to the method of Dokhanieh and Aghdam (2016). Data were analyzed using SAS software and the comparison of means was performed using Tukey's test for $p < 0.05$. Graphs were drawn using Excel software.

**Results and discussion:** Our results showed that the cap browning index of mushrooms treated with 0.5 mM NaHS as donor $H_2S$ was significantly lower than that of control samples during 6 days of shelf life. Similar results were observed regarding the color retention of strawberry and broccoli fruits treated with NaHS donor $H_2S$ during the postharvest period (Molinett et al. 2021; Hu et al. 2012; Li et al. 2014). The percentage of weight loss and cap opening of mushrooms treated with 0.5 mM NaHS was significantly lower, and the percentage of dry matter and firmness were higher compared to the control mushrooms. The high dry matter content of mushrooms is related to their lower weight loss (Loon et al. 2000). The results of the present experiment are consistent with the results of Ni et al.'s (2016) studies, which showed that fumigation with $H_2S$ reduces the weight loss of grape bunches by increasing firmness and preventing senescence. Also, the use of NaHS treatment in strawberries caused a higher firmness of its fruits due to the decrease in the activity of pectin methylesterase and polygalacturonase enzymes (Molinett et al. 2021; Hu et al. 2014). Since $H_2S$ reduced the water loss rate of mushrooms treated with 0.5 mM NaHS, the percent cap opens of these mushrooms was much lower and their ascorbic acid content was higher compared to the control treatment. The lower decrease of ascorbic acid in button mushrooms treated with 0.5 mM NaHS donor $H_2S$ can be attributed to its antioxidant effects, which cause a decrease in physiological activities related to senescence. The use of 0.5 mM NaHS treatment led to an increase in total phenol in button mushrooms. A similar increase in total phenolic content along with maintaining quality has also been reported in hawthorn and apple fruits treated with $H_2S$ during storage (Aghdam et al., 2018; Zheng et al., 2016). In this experiment, DPPH radical scavenging activities were higher in button mushrooms treated with 0.5 mM NaHS donor $H_2S$ compared to the control group during shelf life, which indicates that DPPH radical scavenging is improved after $H_2S$ fumigation.

**Conclusion:** In summary, in this experiment, the positive effect of postharvest NaHS treatment as an $H_2S$ donor on the quality and antioxidant characteristics of edible white button mushrooms during a shelf life for 6 days was observed. The results of our study showed that postharvest $H_2S$ fumigation treatment of button mushrooms with 0.5 mM NaHS led to a reduction in postharvest senescence with delayed cap browning, a lower percentage of open caps, lower weight loss, and higher firmness than the control during the shelf life, which is probably related to maintaining the stability of the cell membrane during shelf life. In addition, button mushrooms fumigated by $H_2S$ showed increased antioxidant capacity and DPPH radical scavenging during shelf life, which was caused by increased accumulation of phenolic compounds and ascorbic acid in these mushrooms. In general, it can be concluded that the use of postharvest $H_2S$ fumigation treatment of the button mushrooms by maintaining the quality and antioxidant characteristics can be a suitable method to delay postharvest senescence and increase the shelf life of edible white button mushrooms.

**Keywords**: Postharvest, Tissue firmness, Antioxidant capacity, Sodium hydrosulfide, Button mushroom, Browning