مجله علوم و فنون باغبانی ایران جلد ۲۷ شماره ۱ صفحه‌های ۳۳ تا ۶۰ (۱۴۰۵)
مقاله پژوهشی

بهبود ماندگاری و شاخص‌های زیست فعال قارچ دکمه‌ای سفید از طریق غنی‌سازی بستر کمپوست

Improvement of the Shelf Life and Bioactive Properties of White Button Mushroom (*Agaricus bisporus* L.) Through Compost Enrichment

علی اسلامی‌زاده[۱]، سپیده کلاته جاری*[۲]، علی محمدی ترکاشوند[۳]، دکتر محمد فارسی[۴] و محمدرضا صالحی سلمی[۵]

۱. گروه علوم و مهندسی کشاورزی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران؛ مدیرتولید شرکت کشاورزی جلگه دز، درفول، ایران
۲. گروه علوم و مهندسی کشاورزی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
۳. گروه علوم و مهندسی کشاورزی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
۴. گروه بیوتکنولوژی گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران
۵. گروه علوم باغبانی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، اهواز، ایران
*نویسنده مسئول، پست الکترونیک: (kalatehjari@iau.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۹/۲۹، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۲/۹

چکیده

به‌منظور ارزیابی اثر مکمل‌های تغذیه‌ای پروتئینی و کربوهیدراتی در بستر کمپوست بر ویژگی‌های پس از برداشت قارچ دکمه‌ای سفید، در این بررسی تأثیر دو سطح کنجاله سویا و دو سطح بلغور ذرت (۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ گرم بر مترمربع) به‌همراه تیمار شاهد (بدون مکمل) مورد ارزیابی قرار گرفتند. تأثیر تیمارها روی قارچ‌های برداشت شده طی ۲۰ روز انبارمانی در دمای ۴ درجه سلسیوس مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کاملاً تصادفی با سه تکرار اجرا گردید. نتایج نشان داد نوع مکمل، الگوهای تجزیه و تغییرات متابولیکی قارچ دکمه‌ای سفید را به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر قرار می‌دهد. تیمارهای کنجاله سویا، به‌ویژه سطح ۱۵۰۰ گرم، با افزایش برجسته فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (کاتالاز، سوپراکسید دیسموتاز و گایاکول پراکسیداز)، غلظت ترکیبات فنلی و ظرفیت مهار رادیکال در قارچ دکمه‌ای سفید همراه بودند و در مجموع کاهش وزن بیشتری را نسبت به سایر تیمارها نشان دادند. در مقابل، قارچ دکمه‌ای سفید با تیمارهای حاوی بلغور ذرت، اگرچه فعالیت آنزیمی و کاهش وزن کمتری داشتند، اما کیفیت ظاهری آنها (روشنایی بالاتر و قهوه‌ای‌شدن کمتر) در پایان دوره مطلوب‌تر بود. تیمار شاهد پایین‌ترین مقادیر اغلب شاخص‌ها را ثبت کرد. روندهای زمانی مشترک شامل افزایش نسبت وزن خشک به تر و تشدید تدریجی قهوه‌ای‌شدن قارچ دکمه‌ای سفید در تمامی تیمارها، و الگوی افزایشی-کاهشی در فعالیت بیشتر آنزیم‌ها و متابولیت‌ها بود. به‌طور کلی، یافته‌ها بیانگر آن است که کنجاله سویا احتمالاً با تحریک بیشتر فرآیندهای اکسیداتیو و میکروبی، تجزیه سریع‌تر کمپوست را تسهیل می‌کند؛ درحالی‌که بلغور ذرت با تعدیل شدت این فرآیندها، در حفظ برخی ویژگی‌های فیزیکی بستر مؤثرتر است. بنابراین، انتخاب نوع مکمل می‌تواند ابزاری مدیریتی برای هدایت کیفیت و پویایی قارچ دکمه‌ای سفید باشد.

واژه‌های کلیدی: آنتی‌اکسیدانی، بلغور ذرت، پس از برداشت، پیری، تغذیه، کنجاله سویا.

مقدمه

قارچ‌های خوراکی به‌ویژه قارچ دکمه‌ای سفید[1] به‌عنوان یکی از پرمصرف‌ترین قارچ‌ها در جهان، جایگاه ویژه‌ای در رژیم غذایی انسان دارند (Royse *et al*., 2017). این محبوبیت ناشی از عطر و طعم مطلوب، ارزش غذایی بالا و کالری نسبتاً پایین آن است (Wani *et al*., 2010). قارچ‌ها منبعی غنی از پروتئین، فیبر غذایی، مواد معدنی مانند سلنیوم، پتاسیم و ویتامین‌ها هستند (Bach *et al*., 2017). هم‌چنین، وجود ترکیبات زیست فعال مانند پلی‌ساکاریدها (مانند بتا-گلوکان‌ها) و ترکیبات فنولی، خواص آنتی‌اکسیدانی و تعدیل‌کنندگی سیستم ایمنی را به آن‌ها می‌بخشد (Kozarski *et al*., 2023; Yadav & Negi, 2021). با افزایش تقاضای جهانی برای غذاهای سالم و فراسودمند، تولید و مصرف قارچ‌های خوراکی روندی صعودی داشته است (Silva *et al*. 2024).

با وجود مزایای فراوان، یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های پیش روی صنعت قارچ، فسادپذیری سریع محصول تازه، پس از برداشت است (Dawadi *et al*., 2022). قارچ دکمه‌ای به دلیل میزان تنفس بالا، محتوای رطوبتی زیاد (حدود ۹۰ درصد) و عدم وجود یک لایه محافظ خارجی (کوتیکول)، به شدت مستعد کاهش کیفیت است (Castellanos-Reyes *et al*., 2021; Mohapatra *et al*., 2010). فرآیندهای پیری بلافاصله پس از برداشت آغاز می‌شود و با از دست دادن آب (کاهش وزن و شادابی)، تغییر رنگ (قهوه‌ای شدن آنزیمی و میکروبی)، باز شدن کلاهک، نرم شدن بافت و کاهش ترکیبات مغذی و زیست‌فعال همراه است (Guo *et al*., 2023; Lin & Sun, 2019). این تغییرات نه تنها بر جذابیت ظاهری و حسی محصول تأثیر منفی می‌گذارد، بلکه عمر نگهداری آن را به ۱ تا ۳ روز در دمای محیط محدود می‌کند و منجر به ضایعات قابل توجه اقتصادی می‌شود (Palacios *et al*., 2011).

به‌منظور کاهش ضایعات و حفظ کیفیت پس از برداشت قارچ، استراتژی‌های متنوعی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. متداول‌ترین روش، نگهداری در دمای پایین (۰ تا ۴ درجه سانتی‌گراد) است که میزان تنفس و فعالیت آنزیمی را کند می‌کند (Azevedo *et al*., 2017; bin Harun, 2017). با این حال، سرمادهی به تنهایی نمی‌تواند به‌طور کامل از قهوه‌ای شدن و کاهش کیفیت ظاهری جلوگیری کند، و برخی از گونه‌های قارچ نیز به دمای بسیار پایین حساس هستند (Gui *et al*., 2022). سایر فناوری‌های پس از برداشت عبارتند از: بسته‌بندی اتمسفر اصلاح‌شده (Joshi *et al*., 2018)، بسته‌بندی فعال با رهاسازی ترکیبات ضد میکروبی یا ضد اکسیداتیو (Han Lyn *et al*., 2020; Wrona *et al*., 2015)، کاربرد پوشش‌های خوراکی حامل ترکیبات طبیعی مانند کیتوزان یا آلژینات (Amighi *et al*., 2025; Cavusoglu *et al*., 2021; Díaz-Montes & Castro-Muñoz, 2021)، تیمار با بخار یا محلول اسانس‌های گیاهی (Guo *et al*., 2023; López-Gómez *et al*., 2021) و تیمارهای حرارتی کوتاه‌مدت (Ranjbar *et al*., 2019). اگرچه این روش‌ها تا حدی مؤثر بوده‌اند، اما اغلب مستلزم هزینه‌های اضافی، تغییر در طعم محصول یا استفاده از مواد شیمیایی هستند که ممکن است با ترجیحات مصرف‌کننده برای محصولات طبیعی و سالم همخوانی نداشته باشد.

در این راستا، تمرکز فزاینده‌ای روی استراتژی‌های پیش از برداشت وجود دارد که با هدف بهبود کیفیت ذاتی و مقاومت محصول در برابر فساد طراحی می‌شوند. یک اصل کلیدی در کشاورزی این است که ترکیب و کیفیت بستر رشد ریشه، می‌تواند به‌طور مستقیم بر ترکیب شیمیایی، ویژگی‌های فیزیکی و ماندگاری پس از برداشت محصول تأثیر بگذارد (Ziaei Ghahnavieh *et al*., 2025). در کشت قارچ، بستر رشد (کمپوست) منبع اصلی تغذیه برای میسیلیوم و اندام بارده هستند؛ بنابراین، مدیریت دقیق فرمولاسیون بستر، می‌تواند یک راهکار پایه‌ای و کم‌هزینه برای ارتقای کیفیت نهایی باشد (Eslamizadeh *et al*., 2025).

مطالعات متعددی نشان داده‌اند که ترکیب بستر کشت بر محتوای پروتئین، مواد معدنی، ترکیبات فنولی و فعالیت آنتی‌اکسیدانی قارچ تأثیر می‌گذارد. به‌عنوان‌مثال، نشان داده شده است که نوع کود دامی مورد استفاده در تهیه کمپوست (مانند مرغ در مقابل بلدرچین) می‌تواند بر سرعت قهوه‌ای شدن قارچ در طول انبارمانی تأثیرگذار باشد که احتمالاً به دلیل تفاوت در محتوای نیتروژن و سایر عناصر است (Ranjbar *et al*., 2019). هم‌چنین، استفاده از مکمل‌های غنی از مواد مغذی در مراحل مختلف کشت، به‌ویژه در مرحله افزودن خاک‌پوشش، می‌تواند نتایج امیدوارکننده‌ای داشته باشد. افزودن مواد لیپو-

---

۱- *Agaricus bisporus* L.

پروتئینی به خاک‌پوشش، منبع مستقیم کربن و نیتروژن در اختیار میسیلیوم قرار می‌دهد که می‌تواند برای سنتز ترکیبات ذخیره‌ای مانند مانیتول و اسیدهای چرب مورداستفاده قرار گیرد (Holtz & Schisler, 1986). این ترکیبات ذخیره‌ای می‌توانند به‌عنوان سوخت برای متابولیسم پس از برداشت عمل کرده و روند پیری را به تأخیر بیندازند. در میان مکمل‌های بالقوه، کنجاله سویا و بلغور ذرت به دلیل دردسترس‌بودن، هزینه نسبتاً پایین و ارزش تغذیه‌ای بالا مورد توجه هستند. سویا منبع غنی از پروتئین، اسیدهای چرب و ایزوفلاونوئیدهای دارای خاصیت آنتی‌اکسیدانی است (Eslamizadeh *et al*., 2025; Lachman *et al*., 1990). ذرت نیز حاوی کربوهیدرات‌ها، پروتئین و فیبر است. انجام مطالعات سیستماتیک بیشتر برای درک کامل مکانیسم‌های عمل این مکمل‌ها و نیز بررسی تأثیر آن‌ها بر طیف وسیع‌تری از شاخص‌های کیفی ضروری به نظر می‌رسد. هم‌چنین، مقایسه اثرات این دو مکمل گیاهی رایج در شرایط یکسان و در طول دوره نگهداری سرد می‌تواند اطلاعات کاربردی برای تولیدکنندگان فراهم کند.

براین‌اساس، هدف از نگارش این مقدمه، تأکید بر اهمیت رویکردهای پیش از برداشت، به‌ویژه تغذیه بهینه از طریق فرمولاسیون بستر کمپوست، به‌عنوان یک راهبرد بنیادی و پایدار برای بهبود کیفیت و افزایش عمر انباری قارچ دکمه‌ای سفید بود. مطالعه حاضر با تمرکز بر بررسی تأثیر افزودن سطوح مختلف کنجاله سویا و بلغور ذرت به بستر کمپوست، در پی ارزیابی سیستماتیک تغییرات شاخص‌های فیزیکی (رنگ، کاهش وزن)، شیمیایی (مواد جامد محلول، پروتئین) و زیست فعال (ترکیبات فنلی کل، ظرفیت آنتی‌اکسیدانی) قارچ دکمه‌ای در طول دوره نگهداری در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد بود.

مواد و روش‌ها

محل و زمان اجرای آزمایش

آزمایش در فروردین‌ماه ۱۴۰۳ در سالن‌های کنترل‌شده مجتمع کشاورزی جلگه دز (دزفول، استان خوزستان) انجام شد. مختصات جغرافیایی مزرعه شامل طول جغرافیایی ۳۲ درجه و ۳۳ دقیقه شرقی، عرض جعرافیایی ۴۸ درجه و ۵۰ دقیقه شمالی و ارتفاع از سطح دریا ۱۰۳ متر بود. کلیه سالن‌ها از نظر شرایط محیطی، سیستم تهویه و کنترل دما مشابه و یکنواخت بودند.

مواد و طرح آزمایشی

از قارچ دکمه‌ای سفید، رقم تجاری ۷۳۷ (Silvan, France) استفاده شد که اسپان در کمپوست فاز II (پس از آمونیاک‌گیری و هوادهی) با رطوبت اولیه ۶۵ درصد اضافه شد. آزمایش به صورت فاکتوریل (مکمل و زمان‌های اندازه‌گیری) در قالب طرح بلوک‌های کاملاً تصادفی با سه تکرار اجرا گردید. هر تکرار شامل یک واحد کشت مستقل به مساحت ۰/۸۴ مترمربع (۱/۴ متر در ۰/۶ متر) روی قفسه‌های استاندارد بود. قبل از تخصیص تیمارها، یکنواختی کمپوست و شرایط سالن بررسی و تأیید شد.

تیمارها و آماده‌سازی بستر

کمپوست تجاری فاز III (کاه گندم + کود مرغی + سنگ گچ) با رطوبت اولیه ۷۰ درصد تهیه شد. مکمل‌ها به‌صورت کاملاً مخلوط و یکنواخت‌شده با کمپوست و بدون هیچ‌گونه ضدعفونی یا عملیات حرارتی اضافی به کار رفتند (جدول ۱). تیمارها عبارت بودند از:

S1: شاهد (کمپوست بدون مکمل)

S2: ۱۰۰۰ گرم کنجاله سویا در هر مترمربع بستر کمپوست فازIII

S3: ۱۵۰۰ گرم کنجاله سویا در هر مترمربع بستر کمپوست فازIII

S4: ۱۰۰۰ گرم بلغور ذرت در هر مترمربع بستر کمپوست فازIII

S5: ۱۵۰۰ گرم بلغور ذرت در هر مترمربع بستر کمپوست فازIII

جدول ۱- آنالیز فیزیکیوشیمیایی و تغذیه‌ای کنجاله سویا و بلغور ذرت (در ۱۰۰ گرم وزن خشک).

Table 1. Physico-chemical and nutritional composition of soybean meal and corn grift (per 100 g dry weight).

نمونه Sample	رطوبت Moisture (%)	اسیدیته pH	چگالی Density (g m-3)	کربوهیدرات Carbohydrates (g)	شکر Sugars (g)	پروتئین Protein (g)	چربی Fat (g)	خاکستر Ash (g)
بلغور ذرت Corn grift	11.4	5.9	0.63	76.5	1.87	8.2	4.1	1.7
کنجاله سویا Soybean meal	10.6	6.3	0.55	32.8	2.54	41.3	1.82	4.4
	کلسیم Ca (mg)	آهن Fe (mg)	فسفر P (mg)	منیزیوم Mg (mg)	پتاسیم K (mg)	روی Zn (mg)	سدیم Na (mg)	منگنز Mn (mg)
بلغور ذرت Corn grift	10.3	1.9	264.2	103.3	313.8	1.7	7.9	0.88
کنجاله سویا Soybean meal	170.8	1.3	670.0	290.5	1294	2.4	4.7	2.4

مدیریت پرورش

پس از پر کردن سالن با کمپوست فاز III، عملیات خاک‌پوششی لایه‌ای به ضخامت ۰/۰۵ متر از خاک‌پوششی پیت (Tima Peat، ارمنستان) روی بستر کمپوست قرار داده شد که مدت‌زمان این مرحله پنج روز بود. سپس جهت تحریک رشد بیشتر و بهتر میسیلیوم‌ها در خاک عملیات بهم زدن خاک‌پوششی (رافلینگ)، انجام شد که به‌مدت ۳ ساعت به‌طول انجامید، پس از گذشت دو روز از عملیات رافلینگ، جهت ظهور اندام بارده (ته سنجاقی‌ها)، عملیات هوادهی به‌مدت ۴ روز انجام شد، پس‌ازآن اندام بارده قارچ به‌مدت ۸ روز رشد کرد، پس از این‌مدت، اولین برداشت سنگین یا فلش یک حدود ۷-۶ روز انجام شد. لازم به‌ذکر است شرایط محیطی سالن پرورش، در طول مراحل دوره پرورش با استفاده از سیستم اتوماسیون کنترل شد و داده‌های محیطی شامل دما (بیشینه ۲۷ درجه سلسیوس و کمینه ۱۷ درجه سلسیوس)، رطوبت (بیشینه ۹۵ درصد و کمینه ۸۰ درصد)، دی‌اکسید کربن (بیشینه ۵۰۰۰ پی‌پی‌ام و کمینه ۸۰۰ پی‌پی‌ام) اعمال و تنظیم شدند. آبیاری واحدهای آزمایشی با استفاده از درخت آبیاری و شرایط محیطی سالن کشت بر اساس استاندارد شرکت کشاورزی جلگه دز مدیریت شد.

پس از برداشت

برای ارزیابی ماندگاری، قارچ‌های سالم و یکنواخت با قطر کلاهک ۴ تا ۵ سانتی‌متر از فلش اول انتخاب شدند. قارچ‌ها در ظروف پلی‌پروپیلن (۱۴×۱۷/۵×۷ سانتی‌متر) با روکش سلفون به ضخامت ۱۰ میکرومتر (Mush, Korea) بسته‌بندی گردید. ظروف بلافاصله در سردخانه و دمای ۴ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۸۵ درصد نگهداری شدند. ارزیابی‌ها در روزهای اول و ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ روز پس از برداشت انجام شد.

ویژگی‌های مورد اندازه‌گیری

سفتی: میزان سفتی کلاهک قارچ‌ها با استفاده از دستگاه بافت‌سنج (STEP Systems GmbH, Germany; 196.10 N capacity) اندازه‌گیری شد. کلاهک قارچ در زیر پلانجر با قطر ۵ میلی‌متر قرار گرفت و با چرخاندن پلانجر به داخل گوشت نفوذ کرد. سفتی به‌صورت حداکثر نیروی وارده (بر حسب نیوتن) برای ایجاد سوراخ و نفوذ به این عمق ثبت گردید.

افت وزنی: در طول دوره نگهداری، وزن قارچ با استفاده از ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۱ گرم اندازه‌گیری شد.

نسبت وزن خشک به تر قارچ: به‌منظور محاسبه نسبت وزن خشک به وزن تر قارچ میزان ۱۰۰ گرم از بافت تازه قارچ با استفاده از ترازو دیجیتال با دقت ۰/۰۰۱ گرم اندازه‌گیری شد، سپس برش زده و تا زمان تثبیت وزن خشک (۴۸ ساعت) در دمای ۶۰ درجه سلسیوس قرار گرفت. نسبت وزن خشک به وزن تر از حاصل تقسیم میزان وزن خشک بر میزان وزن تر بدست آمد (Alam *et al*., 2008).

مواد جامد محلول کل (TSS): مواد جامد محلول هر نمونه قارچ با استفاده از دستگاه رفراکتومتر مدل (VBR-32T) اندازه‌گیری شد. بدین منظور، پس از گرفتن مقداری از آب نمونه‌ها و عبور دادن آن از صافی، مایع مذکور روی دستگاه رفراکتومتر قرار داده شد و میزان مواد جامد محلول آن بر حسب درجه بریکس (°Brix) قرائت گردید.

محتوای فیبر: ابتدا ۲ گرم از نمونه پودر شده قارچ با اتر عصاره‌گیری شد. نمونه خشک شده با ۲۰۰ میلی‌لیتر اسید سولفوریک به‌مدت ۳۰ دقیقه جوشانده و از طریق کاغذ صافی صاف گردید و با آب جوشان تا عاری شدن از اسید شستشو گردید. رسوب با ۲۰۰ میلی‌لیتر سود به‌مدت ۳۰ دقیقه جوشانده شد و با کاغذ صافی دوباره صاف گردید و با ۲۵ میلی‌لیتر اسیدسولفوریک در حال جوشیدن، ۳ نوبت با ۵۰ میلی‌لیتر آب مقطر و در پایان با ۲۵ میلی‌لیتر الکل شسته شد، سپس رسوب برداشته و به‌مدت ۲ ساعت در دمای ۱۳۰ درجه سلسیوس خشک شد و در دسیکاتور قرار داده شد تا خنک شود و وزن آن محاسبه گردید و در آخر نمونه در کوره الکتریکی در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس گذاشته شد. سپس در دسیکاتور خنک شده و دوباره وزن شد (Maynard, 1970).

میزان پروتئین: برای تعیین میزان پروتئین کل، از عصاره تهیه‌شده و معرف رنگی کوماسی برلیانت بلو G-250 در محلول اتانول ۹۵ درصد و اسید ارتوفسفریک ۸۵ درصد استفاده گردید. به‌منظور انجام سنجش، مقدار مشخصی از مایع رویی آنزیمی استخراج‌شده با ۲/۵ میلی‌لیتر از معرف برادفورد ترکیب شد و پس از اختلاط، نمونه‌ها به‌مدت ۱۵ دقیقه در شرایط تاریکی نگهداری شدند. سپس میزان جذب نوری نمونه‌ها در طول موج ۵۹۵ نانومتر اندازه‌گیری شد و غلظت کل پروتئین با استفاده از منحنی استاندارد محاسبه گردید. در این فرآیند، پروتئین گاما گلوبولین حاصل از پلاسما گاوی به‌عنوان استاندارد جهت ترسیم منحنی کالیبراسیون به‌کار گرفته شد (Bradford, 1976).

فعالیت آنزیم کاتالاز (CAT): فعالیت این آنزیم بر پایه تجزیه پراکسید هیدروژن توسط این آنزیم اندازه‌گیری شد. کمپلکس واکنشی شامل ۱/۵ میلی‌لیتر از بافر فسفات پتاسیم ۱۰۰ میلی‌مولار (pH=7)، ۰/۵ میلی‌لیتر از پراکسید هیدروژن ۷/۵ میلی‌مولار و ۵۰ میکرولیتر از محلول آنزیمی بود که حجم نمونه‌ها با اضافه کردن آب مقطر به ۳ میلی‌لیتر رسید. با افزودن پراکسید هیدروژن واکنش آغاز شد. کاهش در جذب نمونه‌ها در طول موج ۲۴۰ نانومتر در مدت یک دقیقه ثبت شد. فعالیت آنزیمی، از محاسبه میزان پراکسید هیدروژن تجزیه شده توسط آنزیم محاسبه گردید (Aebi, 1984).

فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز (GPx): ۳۳ میکرولیتر از عصاره استخراج با یک میلی‌لیتر از محلول پراکسیداز (شامل۱۳ میلی‌مولار گایاکول، ۵ میلی‌مولار بافر فسفات پتاسیم (pH=8) ترکیب نموده و جذب آن، به‌مدت یک دقیقه فواصل ۱۰ ثانیه در طول موج ۴۷۰ نانومتر قرائت شد. جهت ساختن ۱۰۰ میلی‌لیتر بافر فسفات پتاسیم، ۳۹ میلی‌لیتر فسفات پتاسیم مونو بازیک ۵۰ میلی‌مولار با ۶۱ میلی‌لیتر فسفات پتاسیم دی بازیک ۵۰ میلی‌مولار ترکیب شد (Chance & Maehly, 1955).

فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز (SOD): فعالیت سوپراکسید دیسموتاز با استفاده از روش کاهش نیتروبلوتترازولیوم تعیین شد. مخلوط واکنش شامل ۵۰ میلی مولار بافر فسفات (pH=7.8)، ۱۳ میلی‌مولار متیونین، ۷۵ میکرومولار نیتروبلوتترازولیوم، ۲ میکرومولار ریبوفلاوین و ۰/۱ میلی مولار EDTA بود. ۱۰۰ میکرولیتر از عصاره‌ی آنزیم به ۲/۹ میلی‌لیتر از مخلوط واکنش اضافه شد، سپس مخلوط به مدت ۱۰ دقیقه در معرض نور قرار گرفت و جذب در ۵۶۰ نانومتر اندازه‌گیری گردید. یک واحد فعالیت SOD به‌عنوان مقدار آنزیمی تعریف می‌شود که لازم است تا کاهش نیتروبلو تترازولیوم را به‌میزان ۵۰ درصد مهار کند (Beauchamp & Fridovich, 1971).

محتوای فنل کل: مقدار کل ترکیبات فنلی با روش فولین سیوکالتو تعیین شد. نمونه‌های عصاره (۰/۵ میلی‌لیتر) با ۲/۵ میلی‌لیتر معرف فولین سیوکالتو به‌مدت ۵ دقیقه ترکیب شدند و ۲ میلی‌لیتر کربنات سدیم ۷۵ گرم در لیتر اضافه شد. جذب واکنش در طول موج ۷۶۰ نانومتر پس از ۲ ساعت انکوباسیون در دمای اتاق اندازه‌گیری شد. نتایج به‌عنوان معادل اسید گالیک بیان شد (Ordoñez *et al*., 2006).

فعالیت آنتی‌اکسیدانی DPPH: رادیکال پایدار ۱، ۱- دی فنیل-۲- پیکریل هیدرازیل (DPPH) برای تعیین فعالیت مهار رادیکال‌های آزاد عصاره‌ها استفاده شد. ابتدا عصاره نمونه‌های قارچ با استفاده از حلال متانول استخراج گردید و عصاره‌ها فیلتر شد. یک میلی‌لیتر از عصاره قارچ با ۱ میلی‌لیتر از محلول ۰/۱ میلی‌مولار DPPH مخلوط گردید و مخلوط به‌مدت ۱۵ دقیقه در تاریکی و در دمای اتاق انکوبه شد. سپس با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر جذب مخلوط در طول موج ۵۱۷ نانومتر اندازه‌گیری شد. سپس میزان فعالیت جذب رادیکال DPPH با واحد میکرمولار ترولوکس اکی‌والان در وزن خشک محاسبه شد (Rubab *et al*., 2022).

شاخص روشنایی قارچ: برای این منظور، جعبه‌ای به ابعاد ۶۰×۵۰×۵۰ سانتی‌متر (طول، عرض و ارتفاع) تهیه شد که دیوار داخلی آن دارای پوششی به رنگ سفید بوده و از دو لامپ CIXIN 60 وات با زاویه ۴۵ درجه جهت تأمین نور لازم برای عکس گرفتن استفاده تشکیل شده بود. بعد از قرار دادن هر نمونه مورد نظر، درب محفظه بسته شد و لنز دوربین دیجیتال (Canon power shot A590 IS) که روی سوراخ تعبیه شده روی آن قرار گرفت. فاصله‌ی دوربین از سطح نمونه در این حالت ۵۰ سانتی‌متر تنظیم گردید. عکس‌های گرفته شده از نمونه‌ها به برنامه PhotoshopC55 منتقل گردید و سپس توسط نرم افزار، دایره‌ای به اندازه محیط کلاهک هر نمونه روی عکس گرفته شده مشخص گردید و از طریق گزینه‌های Filter-Blur-Average میانگین رنگ تمام پیکسل‌های آن گرفته شد و بررسی مؤلفه‌ی a، b و L (به‌ترتیب قرمزی، زردی و روشنایی) از پنجره Information استخراج گردید.

شاخص قهوه‌ای شدن[1] (BI): توسط روابط (۱) و (۲) ارزیابی شد (Plesoianu & Nour 2022):

$$BI = 100(x-0.31)/0.17$$ رابطه (۱)

$$X= (a + 1.75L)/(5.645L+a-3.012b)$$ رابطه (۲)

واکاوی آماری داده ها

پس از اندازه‌گیری صفات و جمع‌آوری داده‌ها، تجزیه واریانس شاخص‌ها و نیز مقایسه میانگین تیمارها به روش توکی در سطح احتمال ۵ درصد صورت گرفت. کلیه محاسبات آماری و رسم نمودارها به‌ترتیب با استفاده از نرم افزارهای Minitab و Excel انجام شدند.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر مکمل‌های استفاده شده در بستر کمپوست بر شاخص‌های سفتی، کاهش وزن، نسبت وزن خشک به تر، مواد جامد محلول کل، فیبر، پروتئین، آنزیم‌های کاتالاز، گایاکول پراکسیداز، سوپراکسید دیسموتاز، فنل، فعالیت آنتی‌اکسیدانی و شاخص قهوه‌ای شدن در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود. با این وجود اثر مکمل بر شاخص روشنایی تأثیر معنی‌داری نداشت. اثر عامل زمان بر میزان پروتئین در سطح ۵ درصد معنی‌داری بود و در سایر شاخص‌ها در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود. برهمکنش عامل زمان و مکمل‌های استفاده شده در بستر کمپوست نشان داد که شاخص‌های سفتی، نسبت وزن خشک به تر، فیبر، پروتئین، آنزیم‌های کاتالاز، گایاکول پراکسیداز، سوپراکسید دیسموتاز، فنل، فعالیت آنتی‌اکسیدانی و شاخص قهوه‌ای در سطح ۱ درصد و شاخص‌های کاهش وزن، مواد جامد محلول کل و شاخص روشنایی در سطح ۵ درصد معنی‌دار شد (جدول ۲).

براساس داده‌های شاخص سفتی، در روز اول بیشترین سفتی مربوط به تیمار ۱۰۰۰ گرم مکمل بلغور ذرت در یک متر مربع بستر کمپوست با مقدار ۲/۹۷ و کمترین آن مربوط به تیمار ۱۵۰۰ گرم مکمل بلغور ذرت در یک متر مربع بستر کمپوست با مقدار ۲/۶۴ بود. پس از پنج روز، مقدار سفتی در همه تیمارها کاهش یافت. در این زمان، تیمار شاهد و ۱۰۰۰ گرم مکمل کنجاله سویا در یک متر مربع بستر کمپوست با مقدار ۲/۴۸ بیشترین سفتی را حفظ کردند، در حالی‌که تیمار ۱۵۰۰ گرم مکمل بلغور ذرت در یک متر مربع بستر کمپوست با ۲/۲۷ کمترین مقدار را داشت. در روز دهم، روند کاهشی ادامه پیدا کرد و تیمار شاهد با ۲/۳ همچنان بالاترین سفتی را نشان داد و تیمارهای ۱۵۰۰ گرم مکمل کنجاله سویا و بلغور ذرت در یک متر مربع بستر کمپوست با مقادیر نزدیک به ۲/۲۲ پایین‌ترین مقادیر را ثبت کردند. با رسیدن به روز پانزدهم، کاهش سفتی مشهودتر شد. در این مرحله، تیمارهای ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ گرم مکمل بلغور ذرت در یک متر مربع بستر کمپوست با مقدار ۲/۰۷ به‌طور مشترک بیشترین سفتی را داشتند، در حالی‌که تیمار شاهد با ۱/۷۶ کمترین مقدار را نشان داد. در پایان دوره روز بیستم، همه تیمارها به پایین‌ترین مقادیر سفتی خود رسیدند. تیمار ۱۰۰۰ گرم کنجاله سویا در هر مترمربع بستر کمپوست با مقدار ۱/۶۹ بیشترین سفتی نهایی را حفظ کرد و پس از آن تیمار شاهد با ۱/۶ قرار گرفت. در مقابل، تیمار ۱۰۰۰ گرم بلغور ذرت در هر مترمربع بستر کمپوست با ۱/۲۷ کمترین سفتی نهایی را داشت (شکل ۱).

۱- Browning index

جدول ۲- تجزیه واریانس اثر مکمل‌های غذایی، زمان و برهمکنش آنها بر شاخص‌های اندازه‌گیری شده در قارچ دکمه‌ای سفید.

Table 2. Analysis of variance of the effect of compost supplements, time and their interaction on characteristics of white button mushroom.

منبع Source	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean square					
		سفتی Firmness	کاهش وزن Weight loss	نسبت وزن خشک به تر dry to fresh weight	مواد جامد محلول TSS	فیبر Fiber	پروتئین Protein
تکرار Replication	2	0.047^{**}	34.38^{**}	0.920^{**}	1.872^{**}	71.46^{*}	0.213^{ns}
مکمل (A) Supplement	4	0.259^{**}	6.991^{**}	2.685^{**}	0.445^{**}	10.03^{**}	0.244^{**}
خطا اول Error a	8	0.000^{ns}	6.277^{ns}	0.000^{**}	0.001^{ns}	0.068^{ns}	0.001^{ns}
زمان (B) Time	4	15.68^{**}	301.4^{**}	2.061^{**}	19.60^{**}	70.83^{**}	0.728^{*}
A*B	16	0.839^{**}	6.680^{*}	0.0362^{**}	0.947^{*}	0.983^{**}	0.014^{**}
خطا Error	40	0.003	6.432	0.000	0.011	0.102	0.001

جدول ۲- ادامه.

Table 2. Continued.

منبع Source	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean square						
		کاتالاز CAT	گایاکول پراکسیداز GPx	سوپراکسید دیسموتاز SOD	فنل Phenol	فعالیت آنتی‌اکسیدانی DPPH	شاخص روشنایی L index	شاخص قهوه‌ای BI
تکرار Replication	2	57.48^{**}	10.48^{**}	2218^{**}	9.649^{**}	29.72^{**}	34.38^{**}	154.0^{**}
مکمل (A) Supplement	4	716.5^{**}	16.98^{**}	8248^{**}	69.99^{**}	49.66^{**}	6.991^{ns}	10.64^{**}
خطا اول Error a	8	0.28^{ns}	0.068^{*}	26.30^{ns}	0.147^{**}	0.254^{*}	6.27^{ns}	0.046^{ns}
زمان (B) Time	4	3731^{**}	499.5^{**}	14993^{**}	24.49^{**}	58.80^{**}	301.4^{**}	797.1^{**}
A*B	16	264.6^{**}	3.299^{**}	1093^{**}	9.246^{**}	6.489^{**}	6.680^{*}	8.980^{**}
خطا Error	40	0.330	0.408	12.30	0.025	0.102	6.432	0.714

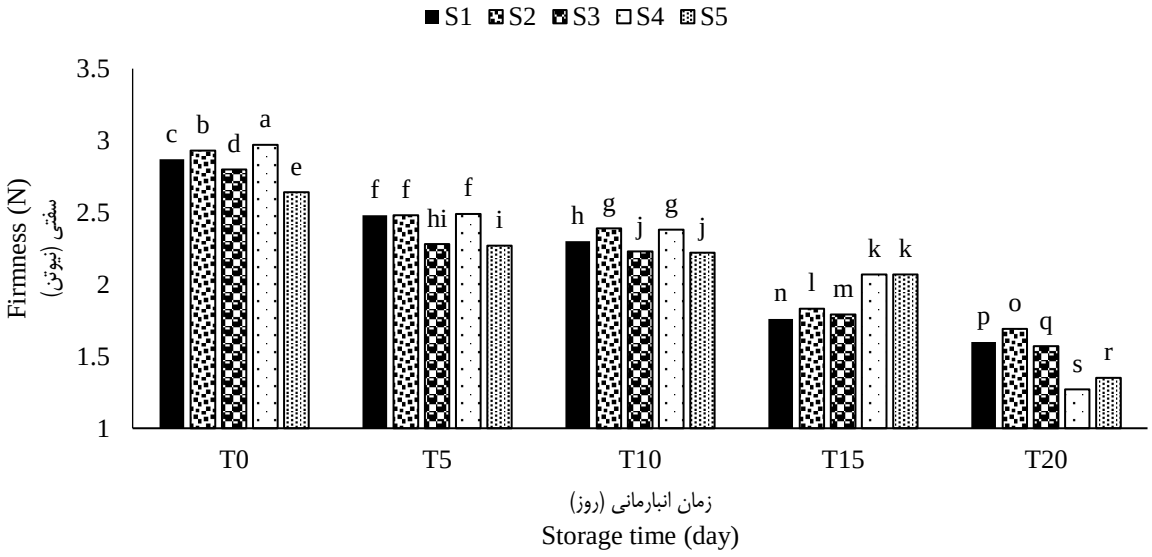
^{ns}، ** و * به ترتیب عدم معنی‌داری، معنی‌داری در سطح ۱ و ۵ درصد

^{ns}, **, and * indicate not significant, significant at 1%, and significant at 5%, respectively.

نتایج این مطالعه نشان داد که کاربرد مکمل‌های غذایی در بستر کمپوست، الگوی تغییرات شاخص سفتی قارچ دکمه‌ای را در طول دوره ۲۰ روزه نگهداری پس از برداشت به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر قرار داد. کاهش تدریجی سفتی در همه تیمارها، روندی طبیعی و قابل انتظار است که عمدتاً ناشی از فرآیندهای پیری، تنفس، از دست‌دهی رطوبت و تخریب تدریجی دیواره سلولی است. این مشاهده با یافته‌های Wang و همکاران (۲۰۲۳) هم‌خوانی دارد که کاهش سفتی را با افزایش فعالیت آنزیم‌های تجزیه‌کننده دیواره سلولی مرتبط دانسته‌اند. تفاوت در میزان این کاهش بین تیمارها حائز اهمیت است. برتری اولیه تیمار ۱۰۰۰ گرم بلغور ذرت در هر مترمربع بستر کمپوست از نظر سفتی در روز اول ممکن است نشان‌دهنده تأثیر سریع مکمل‌های کربوهیدراتی بر استحکام بافت باشد. با این‌حال، دوام این اثر مطلوب نبود و این تیمار در پایان دوره به کمترین سفتی رسید. این امر می‌تواند نشان‌دهنده تخلیه سریع منابع یا تشدید فرآیندهای متابولیکی منجر به نرمی باشد. در مقابل، تیمار ۱۰۰۰ گرم کنجاله سویا در هر مترمربع بستر کمپوست که در روز بیستم بالاترین سفتی نهایی را حفظ کرد، احتمالاً به دلیل تأمین پایدارتر نیتروژن و سایر مواد مغذی، بستر را برای حفظ یکپارچگی دیواره سلولی در دوره نگهداری طولانی‌تر آماده

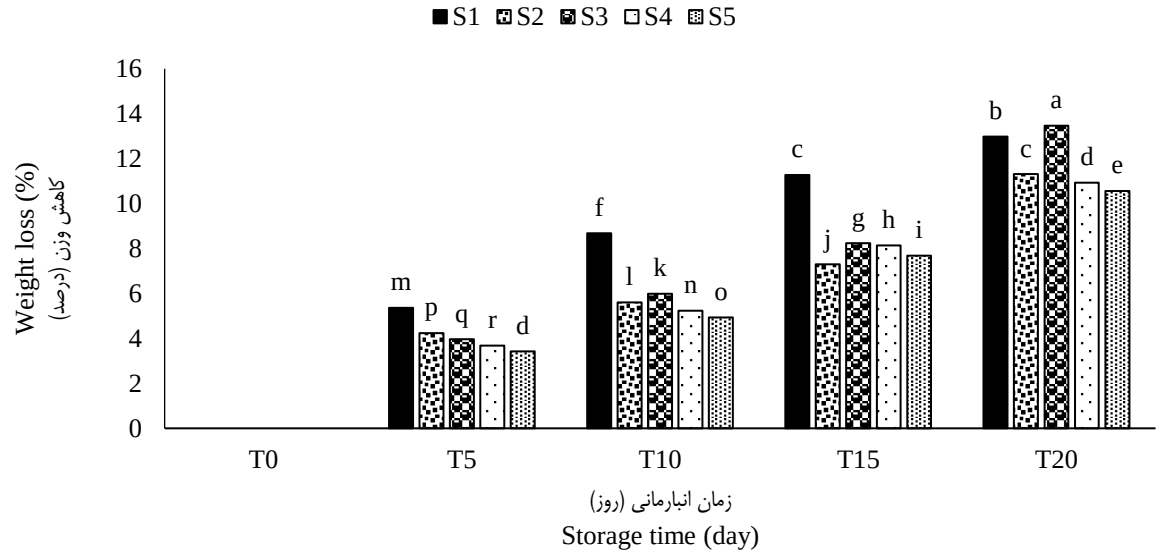
کرده است. این موضوع نقش کیفیت ترکیب شیمیایی مکمل و خاک پوششی را در حفظ کیفیت پس از برداشت پررنگ می‌کند که توسط Pardo-Giménez و همکاران (۲۰۲۰) نیز بر آن تأکید شده است. عملکرد نسبتاً خوب تیمار شاهد در حفظ سفتی در روزهای میانی و سپس افت آن، می‌تواند بیانگر وابستگی قارچ به ذخایر داخلی و محدودیت این ذخایر در بلندمدت باشد. از دست دادن سفتی مستقیماً بر بازارپسندی و ماندگاری محصول تأثیر می‌گذارد، چرا که مصرف‌کنندگان قارچ‌های سفت‌تر را نشانه تازگی و کیفیت برتر می‌دانند (Castellanos-Reyes *et al*., 2021). هم‌چنین، سرعت کاهش سفتی با عمر انباری محصول مرتبط است، زیرا بافت نرم‌تر مستعد لهیدگی و فساد میکروبی می‌شود (Liufang *et al*., 2024).

براساس نتایج ارائه‌شده در شکل ۲، روند کاهش وزن در طول زمان بدین گونه بود که با گذشت پنج روز، همه تیمارها کاهش وزن را نشان دادند. بیشترین کاهش مربوط به تیمار شاهد با ۵/۳۶۷ درصد و کمترین کاهش مربوط به تیمار ۱۵۰۰ گرم مکمل بلغور ذرت در یک متر مربع بستر کمپوست با ۳/۴۳ درصد بود. در روز دهم، کاهش وزن در تمام تیمارها نسبت به روز پنجم افزایش یافت. همچنان تیمار شاهد با ۸/۶۸ درصد بالاترین مقدار و تیمار ۱۵۰۰ گرم مکمل بلغور ذرت در یک متر مربع بستر کمپوست با ۴/۹۳ درصد پایین‌ترین مقدار را داشتند. تا روز پانزدهم، روند کاهش وزن ادامه پیدا کرد. تیمار شاهد با ۱۱/۳۶۷ درصد در صدر قرار گرفت و تیمار ۱۰۰۰ گرم کنجاله سویا در هر مترمربع بستر کمپوست با ۷/۲۹۷ درصد کمترین کاهش را داشت. در پایان دوره بیست روز، بیشترین کاهش وزن مشاهده شده مربوط به تیمار ۱۵۰۰ گرم مکمل کنجاله سویا در یک متر مربع بستر با ۱۳/۴۵۷ درصد بود که از تیمار شاهد (۱۲/۹۷۷ درصد) نیز فراتر رفت. در این زمان، تیمارهای ۱۵۰۰ گرم مکمل بلغور ذرت در یک متر مربع بستر کمپوست و ۱۰۰۰ گرم بلغور ذرت در هر مترمربع بستر کمپوست، به ترتیب با ۱۰/۵۷۷ و ۱۰/۹۲۷ درصد، کمترین میزان کاهش وزن را در بین تمام تیمارها نشان دادند.



شکل ۱- مقایسه سفتی قارچ سفید دکمه‌ای در تیمارهای مختلف مکمل در هر دوره انبارمانی. حروف مشترک نشان‌دهنده عدم معنی‌داری با آزمون توکی در سطح ۵ درصد، بین میانگین‌ها می‌باشد. شاهد (S1)، :۱۰۰۰ گرم کنجاله سویا در هر مترمربع بستر کمپوست فازIII (S2)، ۱۵۰۰ گرم کنجاله سویا در هر مترمربع بستر کمپوست فازIII (S3)، ۱۰۰۰ گرم بلغور ذرت در هر مترمربع بستر کمپوست فازIII (S4)، ۱۵۰۰ گرم بلغور ذرت در هر مترمربع بستر کمپوست فاز III (S5)

Fig. 1. Comparison of white button mushroom firmness under different supplement treatments during storage periods. Means followed by the same letter are not significantly different according to Tukey's test at the 5% probability level. Treatments: Control (S1); 1000 g soybean meal per m² of Phase III compost (S2); 1500 g soybean meal per m² of Phase III compost (S3); 1000 g corn grits per m² of Phase III compost (S4); and 1500 g corn grits per m² of Phase III compost (S5).



شکل ۲- مقایسه کاهش وزن (درصد) قارچ سفید دکمه‌ای در تیمارهای مختلف مکمل در هر دوره انبارمانی. حروف مشترک نشان‌دهنده عدم معنی‌داری با آزمون توکی در سطح ۵ درصد، بین میانگین‌ها می‌باشد. شاهد (S1)، :۱۰۰۰ گرم کنجاله سویا در هر مترمربع بستر کمپوست فازIII (S2)، ۱۵۰۰ گرم کنجاله سویا در هر مترمربع بستر کمپوست فازIII (S3)، ۱۰۰۰ گرم بلغور ذرت در هر مترمربع بستر کمپوست فازIII (S4)، ۱۵۰۰ گرم بلغور ذرت در هر مترمربع بستر کمپوست فاز III (S5)

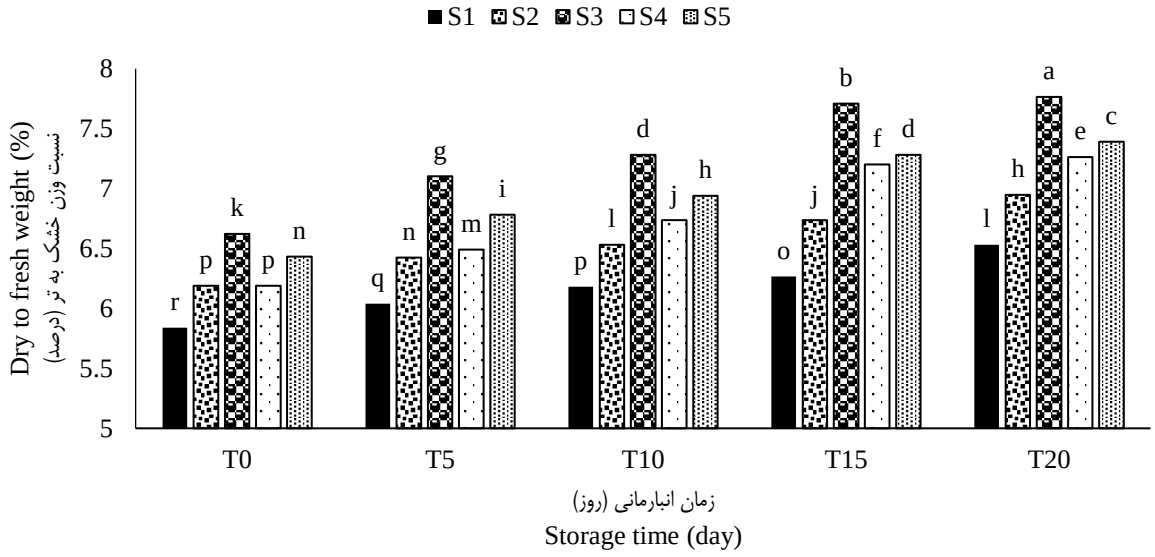
Fig. 2. Comparison of white button mushroom weight loss (%) under different supplement treatments during storage periods. Means followed by the same letter are not significantly different according to Tukey's test at the 5% probability level. Treatments: Control (S1); 1000 g soybean meal per m² of Phase III compost (S2); 1500 g soybean meal per m² of Phase III compost (S3); 1000 g corn grits per m² of Phase III compost (S4); and 1500 g corn grits per m² of Phase III compost (S5).

براساس نتایج نسبت وزن خشک به وزن تر، در زمان صفر بیشترین مقدار مربوط به تیمار ۱۵۰۰ گرم مکمل کنجاله سویا در یک متر مربع بستر با ۶/۶۲۲ درصد و کمترین مقدار مربوط به تیمار شاهد با ۵/۸۳۹ درصد بود. پس از پنج روز، این نسبت در تمامی تیمارها افزایش یافت. تیمار ۱۵۰۰ گرم مکمل کنجاله سویا در یک متر مربع بستر با ۷/۱۰۲ درصد همچنان بالاترین مقدار را حفظ کرد و تیمار شاهد با ۶/۰۳۹ درصد کمترین مقدار را نشان داد. در روز دهم، روند افزایشی در همه تیمارها ادامه پیدا کرد. تیمار ۱۵۰۰ گرم مکمل کنجاله سویا در یک متر مربع بستر با ۷/۲۸۱ درصد و تیمار ۱۰۰۰ گرم کنجاله سویا در هر مترمربع بستر کمپوست با ۶/۵۳ درصد در بالاترین سطوح قرار گرفتند، در حالی‌که تیمار شاهد با ۶/۱۸۱ درصد پایین‌ترین مقدار را داشت. با گذشت زمان به روز پانزدهم، مقادیر باز هم افزایش یافتند و تیمار ۱۵۰۰ گرم مکمل کنجاله سویا در یک متر مربع بستر با ۷/۷۰۹ درصد و تیمار ۱۰۰۰ گرم بلغور ذرت در هر مترمربع بستر کمپوست با ۷/۲۰۲ درصد به ترتیب بالاترین مقادیر را ثبت کردند. تیمار شاهد با ۶/۲۶۶ درصد کمترین مقدار بود. در پایان دوره بیست روزه، این نسبت در همه تیمارها به بیشترین مقدار خود در کل دوره رسید. تیمار ۱۵۰۰ گرم مکمل کنجاله سویا در یک متر مربع بستر با ۷/۷۶۵ درصد بیشترین و تیمار شاهد با ۶/۵۳۲ درصد کمترین مقدار نهایی را نشان داد (شکل ۳).

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که کاربرد مکمل‌های غذایی در بستر کمپوست، به‌طور قابل‌توجهی بر حفظ رطوبت و پویایی کاهش وزن قارچ دکمه‌ای در طول دوره نگهداری تأثیر دارد. روند افزایشی کاهش وزن در همه تیمارها، پدیده‌ای طبیعی ناشی از تنفس و تعرق پس از برداشت است که با گزارش‌های Xu و همکاران (۲۰۱۶) و Zhang و همکاران (۲۰۱۸) مطابقت دارد. با این‌حال، میزان این کاهش در تیمارهای مختلف متفاوت بود که نقش مؤثر تغذیه بر کاهش اتلاف آب را نشان می‌دهد. در کل دوره، تیمار شاهد همواره یکی از بالاترین مقادیر کاهش وزن را داشت. این موضوع می‌تواند نشان‌دهنده نقش محافظتی مکمل‌ها باشد. عملکرد مطلوب تیمارهای حاوی بلغور ذرت که در پایان دوره کمترین کاهش وزن را داشتند، احتمالاً به ظرفیت بالاتر این مکمل کربوهیدراتی در حفظ آب مرتبط است. این مشاهده ممکن است ناشی از بهبود ساختار فیزیکی بستر، افزایش

ظرفیت نگهداری آب یا تأثیر بر یکپارچگی دیواره سلولی قارچ باشد که با یافته‌های Cao و همکاران (۲۰۲۴) هم‌خوانی دارد. در مقابل، تیمار ۱۵۰۰ گرم مکمل کنجاله سویا در متر مربع بستر که در پایان بیشترین کاهش وزن را نشان داد، ممکن است با وجود تولید ماده خشک بیشتر (همان‌طور که در نسبت وزن خشک به تر مشهود است)، میزان متابولیک یا تعرق بالاتری داشت. نتایج نسبت وزن خشک به وزن تر به‌وضوح نشان داد که تیمارهای دریافت‌کننده مکمل، به‌ویژه ۱۵۰۰ گرم مکمل کنجاله سویا در یک متر مربع بستر و ۱۰۰۰ گرم بلغور ذرت در هر مترمربع بستر کمپوست، در طول زمان افزایش پایدارتری در این نسبت داشتند و در پایان دوره به بالاترین مقادیر رسیدند. این امر می‌تواند بیانگر تولید قارچ‌هایی با محتوای مواد جامد بیشتر یا با ساختار بافتی متراکم‌تر در اثر تغذیه تکمیلی باشد. به‌عبارت دیگر، مکمل‌ها ممکن است ضمن افزایش زیست‌توده، به حفظ بهتر ترکیبات ساختاری مانند دیواره سلولی کمک کرده باشند. این موضوع با گزارش‌های Royse و Chalupa (۲۰۰۹) و Cunha-Zied و همکاران (۲۰۲۰) که بر نقش مکمل‌های آلی در بهبود کیفیت ذاتی محصول تأکید کرده‌اند، هم‌سو است. رابطه معکوس بین عملکرد برخی تیمارها در شاخص‌های مختلف جالب توجه است. برای مثال، تیمار ۱۵۰۰ گرم مکمل کنجاله سویا در متر مربع بستر با وجود داشتن بالاترین نسبت وزن خشک (نشان‌دهنده مواد جامد بیشتر)، در نهایت بیشترین کاهش وزن را نیز داشت. این ممکن است نشان‌دهنده یک الگوی متابولیک متفاوت یا تبادل گازی بیشتر در این تیمار باشد. از سوی دیگر، تیمارهای حاوی بلغور ذرت که کاهش وزن کمتری داشتند، احتمالاً با مکانیسم‌هایی مانند کاهش میزان تعرق یا افزایش ظرفیت بافتی برای نگهداری آب، رطوبت را به‌طور مؤثرتری حفظ کرده‌اند. حفظ رطوبت یک عامل کلیدی در جلوگیری از چروکیدگی و حفظ تازگی ظاهری است که بر انتخاب مصرف‌کننده تأثیر مستقیم می‌گذارد (Mahajan *et al*., 2008).

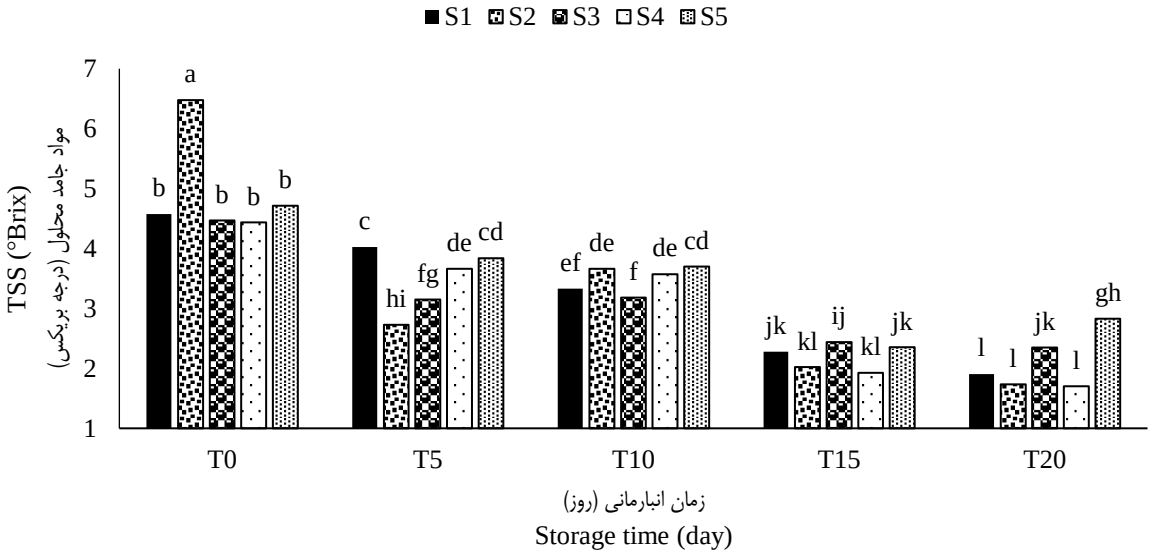
براساس داده‌های مواد جامد محلول کل، در روز اول بیشترین مقدار مربوط به تیمار ۱۰۰۰ گرم کنجاله سویا در هر مترمربع بستر کمپوست با ۶/۴۷۷ درجه بریکس و کمترین مقدار مربوط به تیمار ۱۰۰۰ گرم بلغور ذرت در هر مترمربع بستر کمپوست با ۴/۴۳۷ درجه بریکس بود. پس از پنج روز، مقدار مواد جامد محلول در همه تیمارها کاهش یافت و این کاهش در تیمار ۱۰۰۰ گرم کنجاله سویا در هر مترمربع بستر کمپوست با رسیدن به ۲/۷۲۷ درجه بریکس بسیار شدیدتر بود. در این زمان، تیمار شاهد با ۴/۰۲۷ درجه بریکس نسبتاً بالاتر از بقیه قرار گرفت. در روز دهم، مقدار در برخی تیمارها همچنان کاهش و در برخی دیگر افزایش جزئی داشت. تیمار ۱۵۰۰ گرم مکمل بلغور ذرت در متر مربع بستر کمپوست با ۳/۷ درجه بریکس و تیمار ۱۰۰۰ گرم کنجاله سویا در هر مترمربع بستر کمپوست با ۳/۶۶ درجه بریکس در صدر بودند، در حالی‌که تیمار شاهد با ۳/۳۳ درجه بریکس کمترین مقدار را نشان داد. با گذشت زمان به روز پانزدهم، روند کاهشی در همه تیمارها ادامه یافت و تیمار ۱۰۰۰ گرم بلغور ذرت در هر مترمربع بستر کمپوست با ۱/۹۲۷ درجه بریکس به پایین‌ترین سطح و تیمار ۱۵۰۰ گرم مکمل کنجاله سویا در متر مربع بستر با ۲/۴۴ درجه بریکس به بالاترین سطح در این زمان رسید. در پایان دوره بیست روز، مقدار مواد جامد محلول در اکثر تیمارها به حداقل خود رسید، اما تیمار ۱۵۰۰ گرم مکمل بلغور ذرت در متر مربع بستر کمپوست با افزایش به ۲/۸۳ درجه بریکس یک استثنا بود و بالاترین مقدار نهایی را ثبت کرد. تیمارهای ۱۰۰۰ گرم بلغور ذرت در هر مترمربع بستر کمپوست با ۱/۷ درجه بریکس و ۱۰۰۰ گرم کنجاله سویا در هر مترمربع بستر کمپوست با ۱/۷۳۳ درجه بریکس کمترین مقادیر را در پایان دوره داشتند (شکل ۴).



شکل ۳- مقایسه نسبت وزن خشک به تر (درصد) قارچ سفید دکمه‌ای در تیمارهای مختلف مکمل در هر دوره انبارمانی. حروف مشترک نشان‌دهنده عدم معنی‌داری با آزمون توکی در سطح ۵ درصد، بین میانگین‌ها می‌باشد. شاهد (S1)، :۱۰۰۰ گرم کنجاله سویا در هر مترمربع بستر کمپوست فازIII (S2)، ۱۵۰۰ گرم کنجاله سویا در هر مترمربع بستر کمپوست فازIII (S3)، ۱۰۰۰ گرم بلغور ذرت در هر مترمربع بستر کمپوست فازIII (S4)، ۱۵۰۰ گرم بلغور ذرت در هر مترمربع بستر کمپوست فاز III (S5)

Fig. 3. Comparison of white button mushroom dry to fresh weight (%) under different supplement treatments during storage periods. Means followed by the same letter are not significantly different according to Tukey's test at the 5% probability level. Treatments: Control (S1); 1000 g soybean meal per m² of Phase III compost (S2); 1500 g soybean meal per m² of Phase III compost (S3); 1000 g corn grits per m² of Phase III compost (S4); and 1500 g corn grits per m² of Phase III compost (S5).

دینامیک مواد جامد محلول کل در قارچ دکمه‌ای طی دوره نگهداری، به‌طور معناداری تحت تأثیر نوع مکمل غذایی در بستر کمپوست قرار گرفت. روند کلی کاهش TSS در اکثر تیمارها مطابق با انتظار و ناشی از مصرف این ترکیبات به‌عنوان سوبسترای فرآیندهای تنفسی پس از برداشت است (Sami *et al*., 2021). با این وجود، الگوهای متفاوت بین تیمارها حاکی از تأثیر مکمل‌ها بر میزان ذخایر اولیه و سرعت مصرف آن‌هاست. مشاهده شد که تیمار کنجاله سویا ۱۰۰۰ گرم در بستر کمپوست در روز اول بالاترین مقدار TSS را داشت، اما کاهش بسیار شدیدی را تا روز پنجم داشت. این افت شدید می‌تواند نشان‌دهنده میزان تنفس بالاتر در این تیمار در اوایل دوره نگهداری باشد. احتمالاً مکمل پروتئینی کنجاله سویا با فراهم کردن پیش‌سازهای نیتروژنی، متابولیسم قارچ را فعال‌تر کرده و منجر به مصرف سریع‌تر کربوهیدرات‌های محلول مانند مانیتول شده است (Xu *et al*., 2016; Dawadi *et al*., 2022). در مقابل، تیمار ۱۰۰۰ گرم بلغور ذرت در هر مترمربع بستر کمپوست که کمترین TSS اولیه را داشت، در طول دوره روند نسبتاً پایداری را نشان داد و کاهش شدید نداشت. این موضوع ممکن است بیانگر یک الگوی متابولیک آرام‌تر در قارچ‌های پرورش‌یافته با این مکمل کربوهیدراتی باشد. رفتار متمایز تیمار ۱۵۰۰ گرم مکمل بلغور ذرت در متر مربع بستر کمپوست بسیار جالب توجه است. این تیمار در روز دهم و به‌ویژه در روز بیستم، با افزایش TSSبه ترتیب به ۳/۷ و ۲/۸۳ درجه بریکس مواجه شد. این افزایش دیرهنگام می‌تواند ناشی از هیدرولیز احتمالی پلی‌ساکاریدهای ذخیره‌ای به قندهای ساده‌تر در پاسخ به شرایط استرس نگهداری باشد. این فرضیه با یافته‌های Yang و همکاران (۲۰۲۴) که بر نقش مکمل‌های کربنی در تأمین ذخایر متابولیکی تأکید کرده‌اند، هم‌خوانی دارد. عملکرد ضعیف نهایی تیمارهای ۱۰۰۰ گرم کنجاله سویا و بلغور ذرت در هر مترمربع بستر کمپوست با کمترین مقادیر TSS در روز بیستم، می‌تواند نشان‌دهنده تخلیه کامل ذخایر و ورود به فاز تخریب پیشرفته باشد.



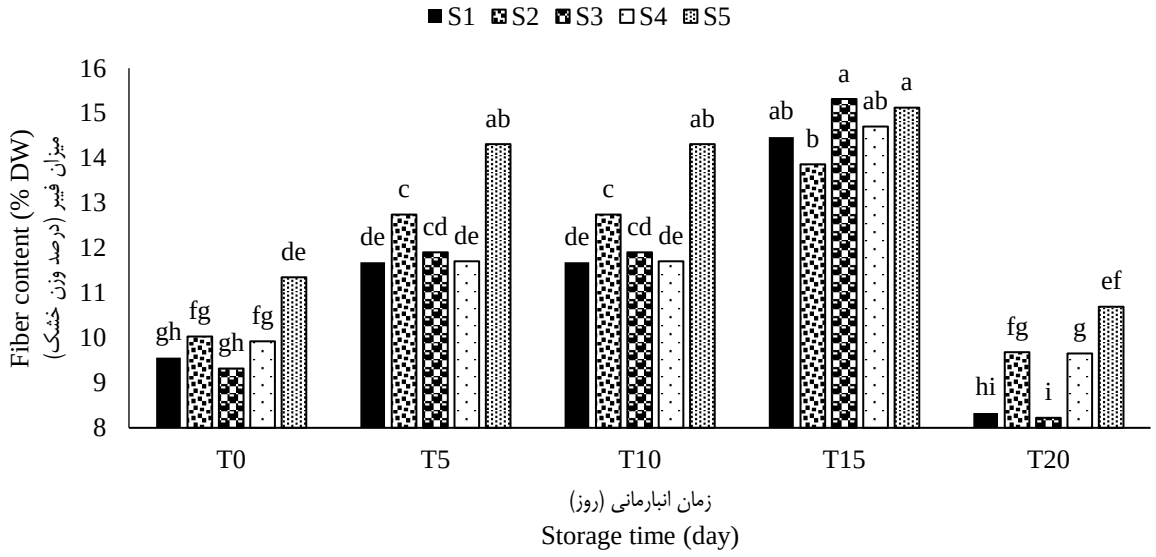
شکل ۴- مقایسه مواد جامد کل محلول قارچ سفید دکمه‌ای در تیمارهای مختلف مکمل در هر دوره انبارمانی. حروف مشترک نشان‌دهنده عدم معنی‌داری با آزمون توکی در سطح ۵ درصد، بین میانگین‌ها می‌باشد. شاهد (S1)، :۱۰۰۰ گرم کنجاله سویا در هر مترمربع بستر کمپوست فازIII (S2)، ۱۵۰۰ گرم کنجاله سویا در هر مترمربع بستر کمپوست فازIII (S3)، ۱۰۰۰ گرم بلغور ذرت در هر مترمربع بستر کمپوست فازIII (S4)، ۱۵۰۰ گرم بلغور ذرت در هر مترمربع بستر کمپوست فاز III (S5)

Fig. 4. Comparison of white button mushroom TSS under different supplement treatments during storage periods. Means followed by the same letter are not significantly different according to Tukey's test at the 5% probability level. Treatments: Control (S1); 1000 g soybean meal per m² of Phase III compost (S2); 1500 g soybean meal per m² of Phase III compost (S3); 1000 g corn grits per m² of Phase III compost (S4); and 1500 g corn grits per m² of Phase III compost (S5).

نتایج بررسی میزان فیبر نشان داد که در ابتدا بیشترین مقدار مربوط به تیمار ۱۵۰۰ گرم مکمل بلغور ذرت در متر مربع بستر کمپوست با ۱۱/۳۴۷ درصد وزن خشک و کمترین مقدار مربوط به تیمار ۱۵۰۰ گرم مکمل کنجاله سویا در یک متر مربع بستر با ۹/۳۱۹ درصد وزن خشک بود. پس از پنج روز، میزان فیبر در تمامی تیمارها افزایش یافت و این افزایش در روز دهم نیز دقیقاً در همان سطح روز پنجم تثبیت شد، به طوری‌که مقادیر برای هر تیمار در این دو زمان یکسان باقی ماند. در این مرحله، تیمار ۱۵۰۰ گرم مکمل بلغور ذرت در متر مربع بستر کمپوست با ۱۴/۳۰۹ درصد وزن خشک بالاترین و تیمار شاهد با ۱۱/۶۸۶ درصد وزن خشک پایین‌ترین مقدار را نشان دادند. با رسیدن به روز پانزدهم، مقدار فیبر در همه تیمارها مجدداً افزایش پیدا کرد و به اوج خود در کل دوره رسید. در این زمان تیمار ۱۵۰۰ گرم در متر مربع بستر مکمل کنجاله سویا و بلغور ذرت به ترتیب با ۱۵/۳۱۳ و ۱۵/۱۲۶ درصد وزن خشک در بالاترین سطح قرار گرفتند. در پایان دوره، میزان فیبر در همه‌ی تیمارها کاهش شدیدی داشت و به مقادیری پایین‌تر از زمان‌های میانی و حتی در برخی موارد پایین‌تر از سطح اولیه رسید. در این زمان، تیمار ۱۵۰۰ گرم مکمل بلغور ذرت در متر مربع بستر کمپوست با ۱۰/۶۹۲ درصد وزن خشک و تیمار ۱۰۰۰ گرم کنجاله سویا در هر مترمربع بستر کمپوست با ۹/۶۸۱ درصد وزن خشک نسبتاً بهتر از بقیه وضعیت را حفظ کردند، در حالی‌که تیمار ۱۵۰۰ گرم مکمل کنجاله سویا در یک متر مربع بستر با ۸/۲۲ درصد وزن خشک و تیمار شاهد با ۸/۳۳۳ درصد وزن خشک کمترین مقادیر نهایی را داشتند (شکل ۵).

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که محتوای فیبر قارچ دکمه‌ای در طول دوره نگهداری پس از برداشت، از یک روند پویا و چند مرحله‌ای تبعیت می‌کند که به وضوح تحت تأثیر نوع مکمل غذایی در بستر کمپوست قرار دارد. روند کلی شامل افزایش تدریجی تا روز پانزدهم و سپس کاهش شدید تا روز بیستم است. این الگو می‌تواند نشان‌دهنده دو فرآیند متوالی باشد: اول، تجمع یا حفظ نسبی ترکیبات ساختاری دیواره سلولی در روزهای اولیه و میانی، و دوم، تخریب پیشرونده این ترکیبات توسط آنزیم‌های اندوژن در پایان دوره که با یافته‌های Smiderle و همکاران (۲۰۱۱) و Cheung (۲۰۱۳) درباره اهمیت یکپارچگی

دیواره سلولی هم‌خوانی دارد. تیمار ۱۵۰۰ گرم مکمل بلغور ذرت در متر مربع بستر کمپوست در تمام مراحل میانی (روزهای پنجم، دهم و پانزدهم) بالاترین یا نزدیک به بالاترین محتوای فیبر را حفظ کرد. این ثبات نسبی می‌تواند حاکی از نقش مؤثر مکمل‌های کربوهیدراتی مانند بلغور ذرت در فراهم کردن پیش‌سازهای لازم برای بیوسنتز و حفظ پلی‌ساکاریدهای دیواره سلولی مانند بتا-گلوکان‌ها باشد. این موضوع با گزارش Pardo-Giménez و همکاران (۲۰۲۰) که بر نقش مکمل‌های کربنی در افزایش پلی‌ساکاریدهای ساختاری تأکید کرده‌اند، مطابقت دارد. عملکرد خوب این تیمار در روز بیستم نسبت به سایرین نیز می‌تواند نشان‌دهنده مقاومت بیشتر ساختار ایجاد شده در برابر تخریب آنزیمی باشد. در مقابل، تیمار ۱۵۰۰ گرم مکمل کنجاله سویا در متر مربع بستر که در ابتدا کمترین فیبر را داشت، در روز پانزدهم به اوج خود (۱۵/۳۱۳ درصد) رسید. این افزایش قابل توجه دیرهنگام ممکن است نشان‌دهنده یک پاسخ متابولیک تأخیری یا سنتز جبرانی ترکیبات دیواره‌ای در پاسخ به تغذیه پروتئینی باشد. با این‌حال، این تیمار در پایان دوره شدیدترین کاهش را داشت و به کمترین مقدار نهایی رسید. این سقوط شدید احتمالاً حاکی از آن است که ساختار فیبری تشکیل شده در این تیمار، اگرچه از نظر کمی در یک مقطع بالا رفته، اما از پایداری ساختاری کمتری در برابر هیدرولیز آنزیمی در مراحل پایانی پیری برخوردار بوده است. کاهش شدید محتوای فیبر در همه تیمارها در روز بیستم، به‌ویژه در تیمار شاهد و ۱۵۰۰ گرم مکمل کنجاله سویا در یک متر مربع بستر، منطبق با فعال شدن آنزیم‌های تجزیه‌کننده دیواره سلولی مانند کیتیناز و گلوکاناز در فاز نهایی انبارداری است که توسط Cremades و همکاران (۲۰۱۲) نیز گزارش شده است. این تخریب دیواره سلولی مستقیماً با نرم شدن بافت و کاهش کیفیت مصرفی مرتبط است.

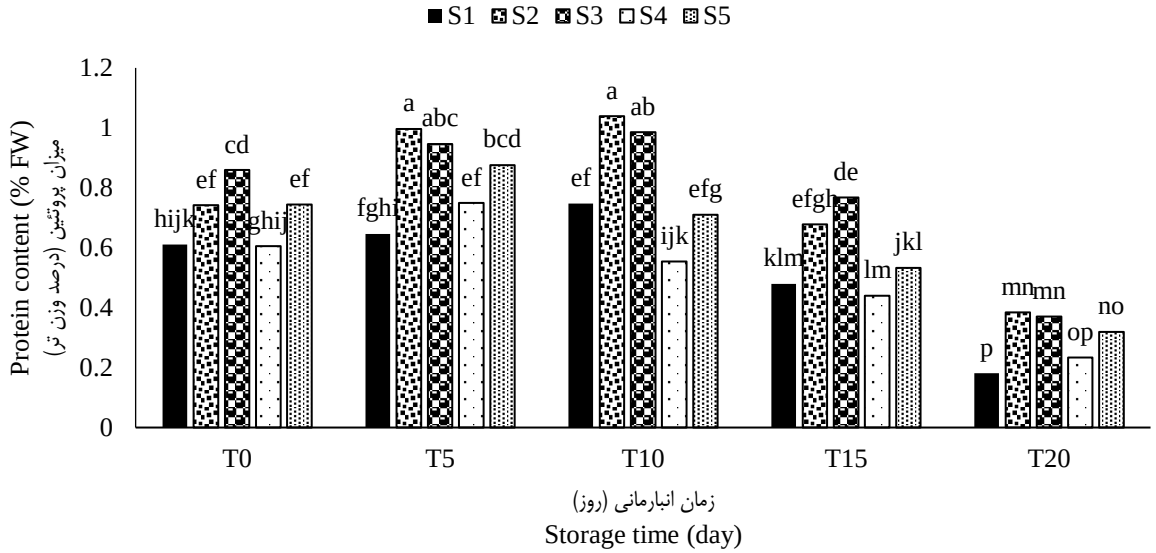


شکل ۵- مقایسه میزان فیبر (درصد وزن خشک) قارچ سفید دکمه‌ای در تیمارهای مختلف مکمل در هر دوره انبارمانی. حروف مشترک نشان‌دهنده عدم معنی‌داری با آزمون توکی در سطح ۵ درصد، بین میانگین‌ها می‌باشد. شاهد (S1)، :۱۰۰۰ گرم کنجاله سویا در هر مترمربع بستر کمپوست فاز III(S2)، ۱۵۰۰ گرم کنجاله سویا در هر مترمربع بستر کمپوست فازIII (S3)، ۱۰۰۰ گرم بلغور ذرت در هر مترمربع بستر کمپوست فاز III(S4)، ۱۵۰۰ گرم بلغور ذرت در هر مترمربع بستر کمپوست فاز III (S5)

Fig. 5. Comparison of white button mushroom fiber content (% DW) under different supplement treatments during storage periods. Means followed by the same letter are not significantly different according to Tukey's test at the 5% probability level. Treatments: Control (S1); 1000 g soybean meal per m² of Phase III compost (S2); 1500 g soybean meal per m² of Phase III compost (S3); 1000 g corn grits per m² of Phase III compost (S4); and 1500 g corn grits per m² of Phase III compost (S5).

نتایج نشان داد که در زمان شروع برداشت بیشترین مقدار پروتئین مربوط به تیمار ۱۵۰۰ گرم مکمل کنجاله سویا در متر مربع بستر با ۰/۸۵۹ درصد وزن تر و کمترین مقدار مربوط به تیمار ۱۰۰۰ گرم بلغور ذرت در هر مترمربع بستر کمپوست با ۰/۶۰۵ درصد وزن تر بود. پس از پنج روز، میزان پروتئین در تمامی تیمارها به جز ۱۰۰۰ گرم بلغور ذرت در هر مترمربع بستر

کمپوست افزایش یافت و تیمار ۱۰۰۰ گرم کنجاله سویا در هر مترمربع بستر کمپوست با ۰/۹۹۶ درصد وزن تر به بالاترین سطح رسید. تیمار شاهد با ۰/۶۴۶ درصد وزن تر کمترین مقدار را در این زمان داشت. در روز دهم، مقدار پروتئین در تیمارهای شاهد، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ گرم کنجاله سویا در هر مترمربع بستر کمپوست به اوج خود در کل دوره رسید که بیشترین آن مربوط به تیمار ۱۰۰۰ گرم کنجاله سویا در هر مترمربع بستر کمپوست با ۱/۰۳۹ درصد وزن تر بود. در مقابل، تیمارهای ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ گرم مکمل بلغور ذرت در یک متر مربع بستر کمپوست کاهش محسوسی را نسبت به زمان روز پنجم داشتند. با گذشت زمان به روز پانزدهم، روند کاهشی در همه تیمارها آغاز شد. در این مرحله، تیمار ۱۵۰۰ گرم مکمل کنجاله سویا در یک متر مربع بستر با ۰/۷۶۸ درصد وزن تر و تیمار ۱۰۰۰ گرم کنجاله سویا در هر مترمربع بستر کمپوست با ۰/۶۷۸ درصد وزن تر بالاترین مقادیر را حفظ کردند، در حالی‌که تیمار ۱۰۰۰ گرم بلغور ذرت در هر مترمربع بستر کمپوست با ۰/۴۴ درصد وزن تر و تیمار شاهد با ۰/۴۷۹ درصد وزن تر در سطوح پایین‌تری قرار گرفتند. در پایان دوره روز بیستم، میزان پروتئین کل در همه تیمارها به کمترین مقدار خود رسید. تیمار ۱۰۰۰ گرم کنجاله سویا در هر مترمربع بستر کمپوست با ۰/۳۸۴ درصد وزن تر و تیمار ۱۵۰۰ گرم مکمل بلغور ذرت در یک متر مربع بستر کمپوست با ۰/۳۱۹ درصد وزن تر نسبتاً بالاتر از بقیه بودند، در حالی‌که تیمار شاهد با ۰/۱۸۱ درصد وزن تر کمترین مقدار نهایی را نشان داد (شکل ۶).



شکل ۶- مقایسه میزان پروتئین (درصد وزن تر) قارچ سفید دکمه‌ای در تیمارهای مختلف مکمل در هر دوره انبارمانی. حروف مشترک نشان‌دهنده عدم معنی‌داری با آزمون توکی در سطح ۵ درصد، بین میانگین‌ها می‌باشد. شاهد (S1)، :۱۰۰۰ گرم کنجاله سویا در هر مترمربع بستر کمپوست فازIII (S2)، ۱۵۰۰ گرم کنجاله سویا در هر مترمربع بستر کمپوست فازIII (S3)، ۱۰۰۰ گرم بلغور ذرت در هر مترمربع بستر کمپوست فازIII (S4)، ۱۵۰۰ گرم بلغور ذرت در هر مترمربع بستر کمپوست فاز III (S5)

Fig. 6. Comparison of white button mushroom protein content (% FW) under different supplement treatments during storage periods. Means followed by the same letter are not significantly different according to Tukey's test at the 5% probability level. Treatments: Control (S1); 1000 g soybean meal per m² of Phase III compost (S2); 1500 g soybean meal per m² of Phase III compost (S3); 1000 g corn grits per m² of Phase III compost (S4); and 1500 g corn grits per m² of Phase III compost (S5).

محتوای پروتئین قارچ دکمه‌ای در طول دوره نگهداری پس از برداشت، از یک الگوی مشخص اما متأثر از تیمار تغذیه‌ای پیروی کرد. روند کلی شامل افزایش اولیه تا روز پنجم یا دهم و سپس کاهش تدریجی تا پایان دوره بیست‌روزه است که با الگوی گزارش‌شده توسط Cavusoglu و همکاران (۲۰۲۱) برای قارچ‌های خوراکی مطابقت دارد. این افزایش اولیه می‌تواند ناشی از تداوم فعالیت متابولیکی و سنتز پروتئین‌های مرتبط با پاسخ به تنش پس از برداشت باشد (Liu *et al*., 2013). تفاوت‌های بارز بین تیمارها حاکی از تأثیر عمیق نوع و مقدار مکمل است. به‌طور کلی، تیمارهای حاوی کنجاله سویا، در تمام مراحل، محتوای پروتئین بالاتری را نسبت به تیمار شاهد و تیمارهای حاوی بلغور ذرت حفظ کردند. به‌ویژه، تیمار ۱۰۰۰ گرم

کنجاله سویا در هر مترمربع بستر کمپوست در روز دهم به اوج مقدار پروتئین رسید. این برتری را می‌توان به محتوای بالای نیتروژن و پروفایل متوازن اسیدهای آمینه در کنجاله سویا نسبت داد که سنتز پروتئین‌های ساختاری و آنزیمی در قارچ را به‌طور کارآمدی پشتیبانی می‌کند (Carrasco *et al*., 2018; Ayimbila & Keawsompong, 2023). عملکرد ضعیف تیمار شاهد که در تمام زمان‌ها کمترین یا نزدیک به کمترین مقدار پروتئین را داشت، بر ضرورت مکمل‌دهی برای دستیابی به کیفیت تغذیه‌ای مطلوب تأکید می‌کند. در مقابل، تیمارهای حاوی بلغور ذرت عمدتاً مقادیر پروتئین پایین‌تری را ثبت کردند. این امر منطقی است، زیرا بلغور ذرت عمدتاً یک منبع کربوهیدراتی است و نسبت نیتروژن به کربن پایین‌تری دارد. این موضوع نشان می‌دهد که اگرچه این مکمل ممکن است بر سایر پارامترها تأثیر مثبت داشته باشد، اما برای افزایش خاص محتوای پروتئین قارچ، مکمل‌های غنی از نیتروژن مانند کنجاله سویا مؤثرتر هستند (Royse *et al*., 2017). کاهش شدید پروتئین در همه تیمارها پس از روز دهم و رسیدن به حداقل در روز بیستم، احتمالاً ناشی از فعال شدن فرآیندهای تخریبی مانند پروتئولیز برای تأمین اسیدهای آمینه جهت تنفس پایه، همراه با از دست‌دادن تدریجی رطوبت است (Liu *et al*., 2013; Guzmán *et al*., 2022). با این حال، میزان این کاهش در تیمارها متفاوت بود. جالب توجه اینکه تیمار ۱۰۰۰ گرم کنجاله سویا در هر مترمربع بستر کمپوست حتی در روز بیستم نیز نسبتاً بالاترین مقدار پروتئین را حفظ کرد. این امر می‌تواند نشان‌دهنده پایداری بیشتر پروتئین‌ها یا تأخیر در آغاز تخریب در قارچ‌های پرورش‌یافته با این مکمل باشد. این مشاهده با گزارش Martín و همکاران (۲۰۲۳) مبنی بر مقاومت بیشتر قارچ‌های غنی از نیتروژن در برابر تخریب کیفی در انبارداری هم‌خوانی دارد.

داده‌های فعالیت آنزیم کاتالاز نشان داد که در زمان آغاز، فعالیت این آنزیم در همه‌ی تیمارها در سطوح متوسطی قرار داشت که بیشترین مقدار مربوط به تیمار ۱۵۰۰ گرم مکمل کنجاله سویا در یک متر مربع بستر و کمترین مقدار مربوط به تیمار شاهد به ترتیب با ۴۶/۰۵ و ۳۴/۲۹ واحد بر دقیقه بر میلی گرم پروتئین بود. پس از پنج روز، فعالیت کاتالاز در تمامی تیمارها افزایش چشمگیری یافت. در این زمان، تیمار ۱۵۰۰ گرم مکمل بلغور ذرت در یک متر مربع بستر کمپوست با ۸۳/۴۱ واحد بر دقیقه بر میلی گرم پروتئین به اوج فعالیت رسید و تیمار ۱۰۰۰ گرم بلغور ذرت در هر مترمربع بستر کمپوست با ۷۳/۳۶۷ واحد بر دقیقه بر میلی گرم پروتئین در رده‌ی بعدی قرار گرفت. کمترین افزایش نسبت به دیگران، مربوط به تیمار شاهد با ۴۷/۲۵۳ واحد بر دقیقه بر میلی گرم پروتئین بود. در روز دهم، فعالیت آنزیم در بیشتر تیمارها ادامه‌دار بود. تیمار ۱۵۰۰ گرم مکمل کنجاله سویا در یک متر مربع بستر با رسیدن به ۸۳/۹۶۷ واحد بر دقیقه بر میلی گرم پروتئین، همچنان بالاترین فعالیت را حفظ کرد. در مقابل، فعالیت در تیمار ۱۰۰۰ گرم بلغور ذرت در هر مترمربع بستر کمپوست کاهش یافت و به ۴۹/۴۲۷ واحد بر دقیقه بر میلی گرم پروتئین رسید. تیمار شاهد با ۵۱/۸ واحد بر دقیقه بر میلی گرم پروتئین کمترین فعالیت را در بین تیمارها در این زمان داشت. با گذشت زمان تا روز پانزدهم، یک روند کاهشی کلی در فعالیت کاتالاز در مقایسه با روز دهم مشاهده شد. با این حال، این فعالیت همچنان بالاتر از سطح اولیه (روز اول) بود. در این مرحله، تیمار ۱۵۰۰ گرم مکمل بلغور ذرت در یک متر مربع بستر کمپوست با ۵۰/۵۸۳ واحد بر دقیقه بر میلی گرم پروتئین و تیمار ۱۰۰۰ گرم بلغور ذرت در هر مترمربع بستر کمپوست با ۴۶/۱۳۷ واحد بر دقیقه بر میلی گرم پروتئین بالاترین مقادیر را ثبت کردند، در حالی‌که تیمار شاهد با ۳۴/۵۲۷ واحد بر دقیقه بر میلی گرم پروتئین به پایین‌ترین سطح بازگشت. در پایان روز انبارمانی، فعالیت آنزیم کاتالاز در همه تیمارها افت شدیدی را داشت و به کمترین مقادیر خود در کل دوره رسید. با این وجود، تیمار ۱۵۰۰ گرم مکمل کنجاله سویا در یک متر مربع بستر با ۴۰/۷۳۷ واحد بر دقیقه بر میلی گرم پروتئین و تیمار ۱۰۰۰ گرم کنجاله سویا در هر مترمربع بستر کمپوست با ۳۶/۲۶ واحد بر دقیقه بر میلی گرم پروتئین نسبتاً بهتر از سایرین وضعیت را حفظ کردند. تیمارهای ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ گرم مکمل بلغور ذرت در یک متر مربع بستر کمپوست به ترتیب به ۲۳/۰۴۳ و ۲۷/۴۳۳ واحد بر دقیقه بر میلی گرم پروتئین کاهش یافتند و تیمار شاهد با ۱۵/۶۱۷ واحد بر دقیقه بر میلی گرم پروتئین کمترین فعالیت آنزیمی را در پایان دوره نشان داد.

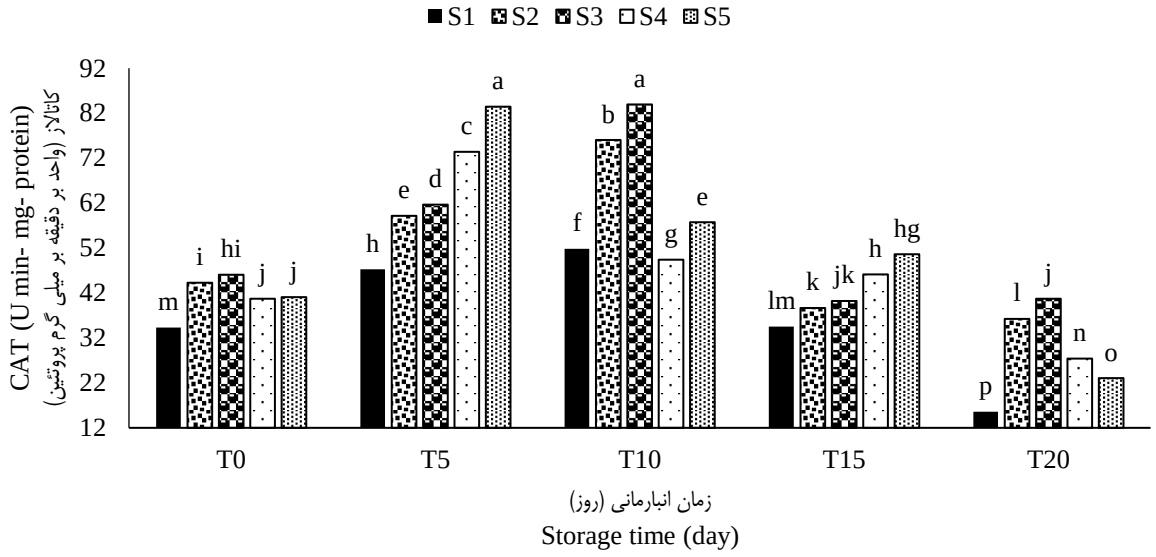
داده‌های فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز در شکل ۸ نشان داد که در ابتدای برداشت بیشترین فعالیت مربوط به تیمار ۱۵۰۰ گرم مکمل کنجاله سویا در یک متر مربع بستر با ۱۶/۳۵۳ واحد بر دقیقه بر میلی گرم پروتئین و کمترین فعالیت مربوط به تیمار شاهد با ۹/۹۸۵ واحد بر دقیقه بر میلی گرم پروتئین بود. پس از پنج روز، فعالیت این آنزیم در تمامی تیمارها در مقایسه با روز صفر کاهش یافت، اما رتبه‌بندی تیمارها تقریباً مشابه زمان صفر باقی ماند. در این زمان، تیمار ۱۵۰۰ گرم

مکمل کنجاله سویا در یک متر مربع بستر با ۱۳/۳۳ واحد بر دقیقه بر میلی گرم پروتئین همچنان بالاترین مقدار و تیمار شاهد با ۹/۱۸۷ واحد بر دقیقه بر میلی گرم پروتئین پایین‌ترین مقدار را نشان داد. در روز دهم، کاهش شدیدی در فعالیت آنزیم در همه تیمارها مشاهده شد. با این حال، تیمار ۱۵۰۰ گرم مکمل کنجاله سویا در یک متر مربع بستر با ۵/۲۱۳ و تیمار ۱۰۰۰ گرم کنجاله سویا در هر مترمربع بستر کمپوست با ۴/۸۳ واحد بر دقیقه بر میلی گرم پروتئین به ترتیب بالاترین مقادیر را حفظ کردند. تیمار شاهد با ۳/۴۲ واحد بر دقیقه بر میلی گرم پروتئین کمترین فعالیت را در این زمان داشت. این روند کاهشی در روز پانزدهم با شدت بیشتری ادامه یافت و فعالیت آنزیم به مقادیر بسیار کمی (زیر ۱/۲۵ واحد بر دقیقه بر میلی گرم پروتئین) در همه تیمارها رسید. در این مرحله، تیمار ۱۵۰۰ گرم مکمل کنجاله سویا در یک متر مربع بستر با ۱/۲۴۷ واحد بر دقیقه بر میلی گرم پروتئین کمی بالاتر از تیمارهای ۱۰۰۰ گرم کنجاله سویا در هر مترمربع بستر کمپوست و ۱۵۰۰ گرم مکمل بلغور ذرت در یک متر مربع بستر کمپوست که هر دو ۱/۱۱ واحد بر دقیقه بر میلی گرم پروتئین را ثبت کردند، قرار گرفتند. تیمار شاهد با ۰/۷۸ واحد بر دقیقه بر میلی گرم پروتئین کمترین مقدار بود. در پایان اندازه‌گیری، فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز در تمام تیمارها به کمترین میزان خود در کل دوره رسید و به مقادیر نزدیک به صفر کاهش یافت. تیمار ۱۵۰۰ گرم مکمل کنجاله سویا در یک متر مربع بستر با ۰/۵۲۳ واحد بر دقیقه بر میلی گرم پروتئین و تیمار ۱۰۰۰ گرم کنجاله سویا در هر مترمربع بستر کمپوست با ۰/۴۹ واحد بر دقیقه بر میلی گرم پروتئین همچنان نسبتاً بالاتر از بقیه بودند، در حالی‌که تیمار ۱۰۰۰ گرم بلغور ذرت در هر مترمربع بستر کمپوست با ۰/۲۸۳ واحد بر دقیقه بر میلی گرم پروتئین و تیمار شاهد با ۰/۳۴ واحد بر دقیقه بر میلی گرم پروتئین کمترین مقادیر نهایی را نشان دادند.

همانگونه که در شکل ۹ نشان داده شد در ابتدای اندازه‌گیری، فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در تیمارهای مختلف متفاوت بود. بیشترین فعالیت اولیه مربوط به تیمار ۱۵۰۰ گرم مکمل کنجاله سویا در یک متر مربع بستر با مقدار ۱۱۰ واحد بر دقیقه بر میلی گرم پروتئین و کمترین آن مربوط به تیمار شاهد با ۶۴/۴۶ واحد بر دقیقه بر میلی گرم پروتئین بود. پس از پنج روز، فعالیت این آنزیم در تمامی تیمارها به طور قابل توجهی افزایش یافت. در این زمان، تیمار ۱۵۰۰ گرم مکمل بلغور ذرت در یک متر مربع بستر کمپوست با ۱۴۸/۱۳۳ واحد بر دقیقه بر میلی گرم پروتئین و تیمار ۱۵۰۰ گرم مکمل کنجاله سویا در یک متر مربع بستر با ۱۴۷/۰۶ واحد بر دقیقه بر میلی گرم پروتئین به بالاترین سطوح فعالیت رسیدند. تیمار شاهد با ۹۵/۴۳۳ واحد بر دقیقه بر میلی گرم پروتئین، اگرچه افزایش را نشان داد، اما کمترین مقدار را در بین تمام تیمارها حفظ کرد. در روز دهم، روند افزایشی در برخی تیمارها ادامه پیدا کرد. تیمار ۱۵۰۰ گرم مکمل کنجاله سویا در یک متر مربع بستر به اوج فعالیت خود در کل دوره با مقدار ۲۰۰/۲۸۳ واحد بر دقیقه بر میلی گرم پروتئین رسید. تیمار ۱۰۰۰ گرم کنجاله سویا در هر مترمربع بستر کمپوست نیز افزایش چشمگیری به ۱۶۶/۸۵۷ واحد بر دقیقه بر میلی گرم پروتئین نشان داد. در مقابل، فعالیت در تیمار ۱۰۰۰ گرم بلغور ذرت در هر مترمربع بستر کمپوست کاهش محسوسی را داشته و به ۸۲/۶۷۷ واحد بر دقیقه بر میلی گرم پروتئین رسید. با رسیدن به روز پانزدهم، یک کاهش عمومی در فعالیت آنزیم در مقایسه با روز دهم در همه تیمارها مشاهده شد. با این وجود، تیمار ۱۵۰۰ گرم مکمل کنجاله سویا در یک متر مربع بستر با ۹۶/۰۵ واحد بر دقیقه بر میلی گرم پروتئین همچنان پیشتاز بود و تیمار ۱۵۰۰ گرم مکمل بلغور ذرت در یک متر مربع بستر کمپوست با ۸۹/۹۰۷ واحد بر دقیقه بر میلی گرم پروتئین در جایگاه دوم قرار گرفت. تیمار شاهد با ۶۹/۷۰۳ واحد بر دقیقه بر میلی گرم پروتئین کمترین فعالیت را در این مرحله داشت. در پایان دوره اندازه‌گیری، فعالیت آنزیم در همه تیمارها افت شدیدی کرد و به پایین‌ترین سطوح خود رسید. تیمار ۱۵۰۰ گرم مکمل کنجاله سویا در یک متر مربع بستر با ۹۷/۱۴۳ واحد بر دقیقه بر میلی گرم پروتئین و تیمار ۱۰۰۰ گرم کنجاله سویا در هر مترمربع بستر کمپوست با ۷۹/۶۱ واحد بر دقیقه بر میلی گرم پروتئین بهتر از سایرین وضعیت را حفظ کردند. تیمارهای ۱۵۰۰ و ۱۰۰۰ گرم مکمل بلغور ذرت در یک متر مربع بستر کمپوست به ترتیب به ۴۰/۸۶۷ و ۴۵/۷۹ واحد بر دقیقه بر میلی گرم پروتئین کاهش یافتند و تیمار شاهد با ۳۱/۵۱ واحد بر دقیقه بر میلی گرم پروتئین کمترین فعالیت نهایی را نشان داد.

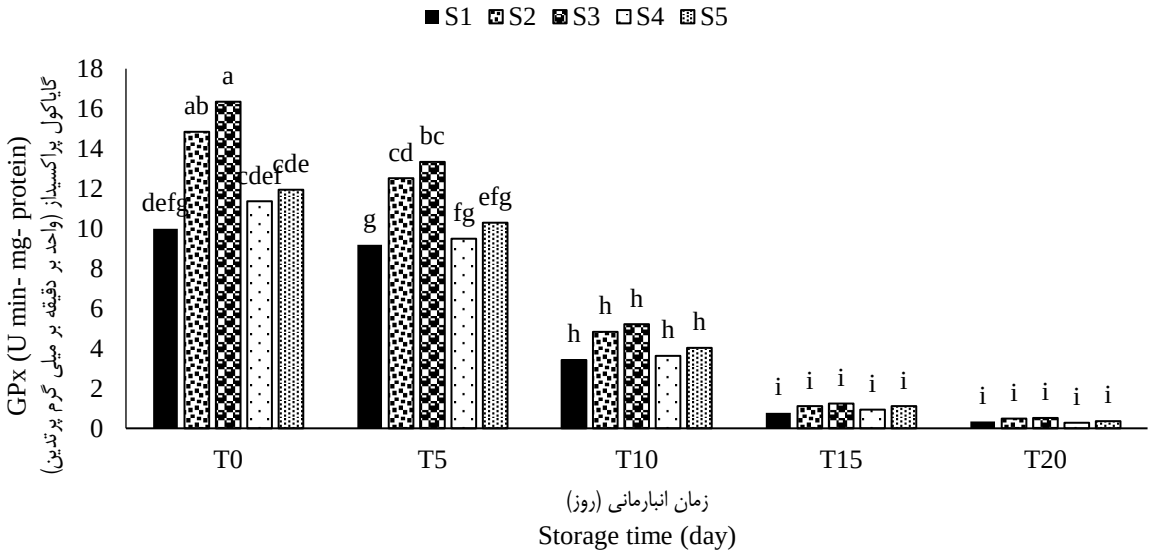
نتایج فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در این مطالعه نشان‌دهنده پاسخ پویای سیستم دفاعی قارچ دکمه‌ای به تنش‌های پس از برداشت و تأثیر واضح مکمل‌های غذایی است. الگوی کلی برای آنزیم‌های کاتالاز و سوپراکسید دیسموتاز شامل افزایش فعالیت تا روزهای پنجم یا دهم و سپس کاهش تدریجی تا پایان دوره بود. این روند منطبق با افزایش اولیه گونه‌های فعال

اکسیژن در اثر تنش برداشت و انبارداری و تحریک متعاقب سیستم دفاعی، و به دنبال آن کاهش تدریجی ظرفیت آنتی‌اکسیدانی در مراحل پایانی پیری است (Blachier *et al*., 2020). در مقابل، فعالیت گایاکول پراکسیداز از همان ابتدا روندی نزولی را نشان داد که ممکن است بیانگر حساسیت بیشتر این آنزیم یا جبران عملکرد آن توسط سایر مسیرها باشد. تفاوت‌های بارز بین تیمارها بر نقش مکمل‌گذاری تأکید دارد. به‌طور کلی، تیمارهای حاوی مکمل، به‌ویژه ۱۵۰۰ گرم مکمل کنجاله سویا و بلغور ذرت در یک متر مربع بستر، فعالیت آنتی‌اکسیدانی بالاتری را در مقایسه با تیمار شاهد در طول دوره حفظ کردند. برای مثال، فعالیت کاتالاز و سوپراکسید دیسموتاز در تیمار ۱۵۰۰ گرم مکمل کنجاله سویا در یک متر مربع بستر در روز دهم به اوج خود رسید و حتی در روز بیستم نیز مقادیر نسبتاً بالاتری را حفظ کرد. این برتری را می‌توان به تأمین بهتر پیش‌سازهای آمینواسیدی و مواد مغذی لازم برای سنتز و فعالیت این آنزیم‌های پروتئینی توسط مکمل‌ها، به‌ویژه منابع غنی از نیتروژن مانند کنجاله سویا، نسبت داد (Maseko *et al*., 2014). عملکرد ضعیف مداوم تیمار شاهد در تمام آنزیم‌ها و در تمام زمان‌ها، به وضوح نشان می‌دهد که عدم مکمل‌دهی، قارچ را با ظرفیت دفاعی پایین‌تری در مواجهه با استرس اکسیداتیو پس از برداشت رها می‌کند. افت شدید فعالیت همه آنزیم‌ها در روز بیستم، به‌ویژه در تیمار شاهد، نشان‌دهنده تخلیه نهایی ظرفیت دفاع آنتی‌اکسیدانی و ورود بافت به فاز تخریب پیشرفته است (Mirończuk-Chodakowska *et al*., 2019). با این حال، تیمارهای مکمل‌دار، به‌ویژه ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ گرم کنجاله سویا در هر مترمربع بستر کمپوست، حتی در این مرحله نیز فعالیت باقی‌مانده بالاتری داشتند. این امر حاکی از آن است که تغذیه مناسب نه‌تنها پاسخ دفاعی اولیه را تقویت می‌کند، بلکه پایداری سیستم آنتی‌اکسیدانی را در طول زمان افزایش می‌دهد.



شکل ۷- مقایسه فعالیت آنزیم کاتالاز (واحد بر دقیقه بر میلی‌گرم پروتئین) قارچ سفید دکمه‌ای در تیمارهای مختلف مکمل در هر دوره انبارمانی. حروف مشترک نشان‌دهنده عدم معنی‌داری با آزمون توکی در سطح ۵ درصد، بین میانگین‌ها می‌باشد. شاهد (S1)، : ۱۰۰۰ گرم کنجاله سویا در هر مترمربع بستر کمپوست فازIII (S2)، ۱۵۰۰ گرم کنجاله سویا در هر مترمربع بستر کمپوست فازIII (S3)، ۱۰۰۰ گرم بلغور ذرت در هر مترمربع بستر کمپوست فازIII (S4)، ۱۵۰۰ گرم بلغور ذرت در هر مترمربع بستر کمپوست فاز III (S5)

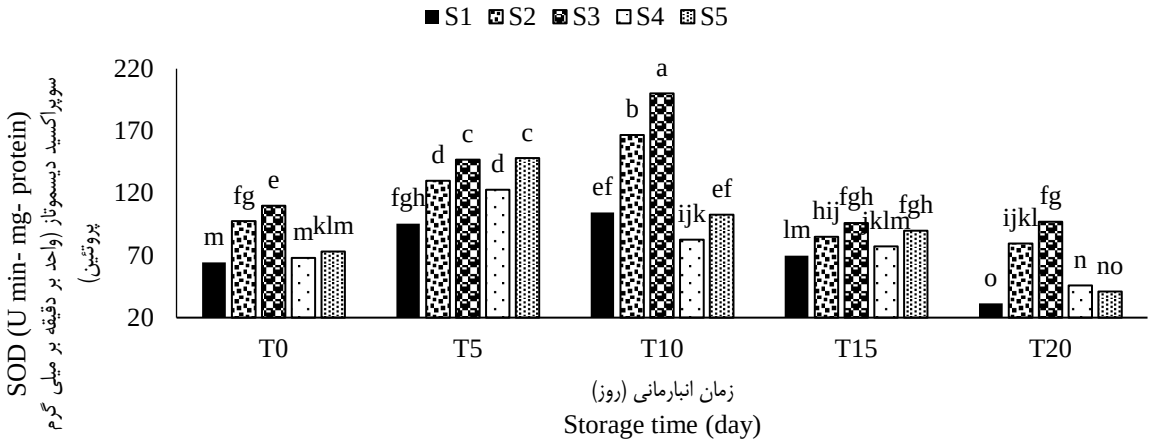
Fig. 7. Comparison of white button mushroom CAT activity (U min^{-1} mg^{-1} protein) under different supplement treatments during storage periods. Means followed by the same letter are not significantly different according to Tukey's test at the 5% probability level. Treatments: Control (S1); 1000 g soybean meal per m^2 of Phase III compost (S2); 1500 g soybean meal per m^2 of Phase III compost (S3); 1000 g corn grits per m^2 of Phase III compost (S4); and 1500 g corn grits per m^2 of Phase III compost (S5).



شکل ۸- مقایسه فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز (واحد بر دقیقه بر میلی‌گرم پروتئین) قارچ سفید دکمه‌ای در تیمارهای مختلف مکمل در هر دوره انبارمانی. حروف مشترک نشان‌دهنده عدم معنی‌داری با آزمون توکی در سطح ۵ درصد، بین میانگین‌ها می‌باشد. شاهد (S1)، :۱۰۰۰ گرم کنجاله سویا در هر مترمربع بستر کمپوست فازIII (S2)، ۱۵۰۰ گرم کنجاله سویا در هر مترمربع بستر کمپوست فازIII (S3)، ۱۰۰۰ گرم بلغور ذرت در هر مترمربع بستر کمپوست فازIII (S4)، ۱۵۰۰ گرم بلغور ذرت در هر مترمربع بستر کمپوست فاز III (S5).

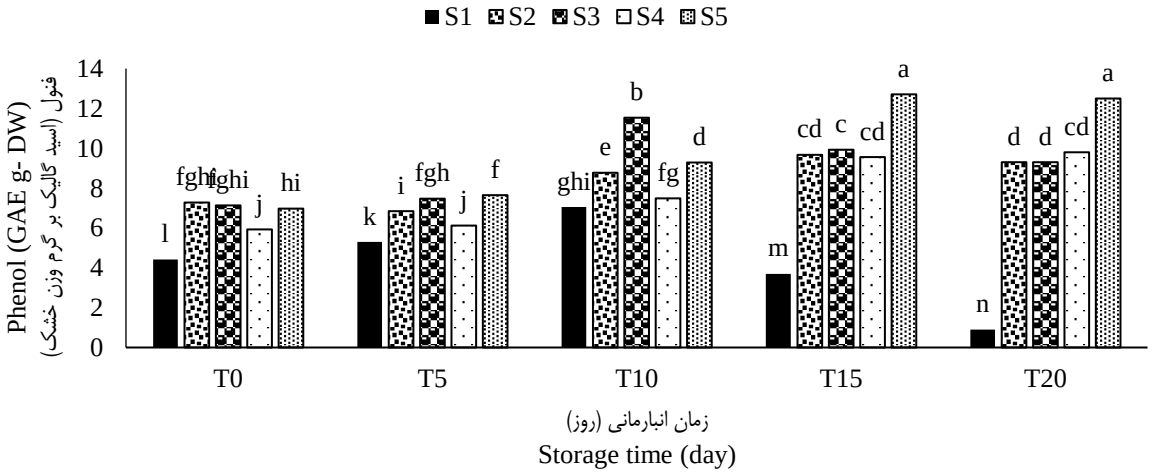
Fig. 8. Comparison of white button mushroom GPx activity (U min^{-1} mg^{-1} protein) under different supplement treatments during storage periods. Means followed by the same letter are not significantly different according to Tukey's test at the 5% probability level. Treatments: Control (S1); 1000 g soybean meal per m^2 of Phase III compost (S2); 1500 g soybean meal per m^2 of Phase III compost (S3); 1000 g corn grits per m^2 of Phase III compost (S4); and 1500 g corn grits per m^2 of Phase III compost (S5).

نتایج اندازه‌گیری فنول کل نشان داد که در زمان آغاز بیشترین مقدار مربوط به تیمار ۱۰۰۰ گرم کنجاله سویا در هر مترمربع بستر کمپوست با ۷/۲۷ اسید گالیک بر گرم وزن خشک و کمترین مقدار مربوط به تیمار شاهد با ۴/۴۱۵ اسید گالیک بر گرم وزن خشک بود. پس از پنج روز، تیمار ۱۵۰۰ گرم مکمل بلغور ذرت در یک متر مربع بستر کمپوست با افزایش به ۷/۶۴۳ اسید گالیک بر گرم وزن خشک به بالاترین سطح رسید، در حالی‌که تیمار شاهد با ۵/۲۹۳ اسید گالیک بر گرم وزن خشک همچنان کمترین مقدار را نشان می‌داد. در روز دهم، مقدار فنول کل در همه تیمارها افزایش یافت و تیمار ۱۵۰۰ گرم مکمل کنجاله سویا در یک متر مربع بستر با ۱۱/۵۳۷ اسید گالیک بر گرم وزن خشک به اوج خود رسید؛ تیمار شاهد با ۷/۰۴۷ اسید گالیک بر گرم وزن خشک نسبت به سایرین کمتر بود. با گذشت زمان به روز پانزدهم، تیمار ۱۵۰۰ گرم مکمل بلغور ذرت در یک متر مربع بستر کمپوست با ۱۲/۷۰۳ اسید گالیک بر گرم وزن خشک جایگاه نخست را به دست آورد و تیمار شاهد با کاهش قابل توجه به ۳/۶۹۳ اسید گالیک بر گرم وزن خشک رسید. در پایان دوره بیست روزه، تیمار ۱۵۰۰ گرم مکمل بلغور ذرت در یک متر مربع بستر کمپوست با ۱۲/۴۹۳ اسید گالیک بر گرم وزن خشک و تیمار ۱۰۰۰ گرم بلغور ذرت در هر مترمربع بستر کمپوست با ۹/۸ اسید گالیک بر گرم وزن خشک بیشترین مقادیر نهایی را حفظ کردند، در حالی‌که تیمار شاهد با کاهش شدید به ۰/۹ اسید گالیک بر گرم وزن خشک رسید که کمترین مقدار در کل دوره بود.



شکل ۹- مقایسه فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز (واحد بر دقیقه بر میلی‌گرم پروتئین) قارچ سفید دکمه‌ای در تیمارهای مختلف مکمل در هر دوره انبارمانی. حروف مشترک نشان‌دهنده عدم معنی‌داری با آزمون توکی در سطح ۵ درصد، بین میانگین‌ها می‌باشد. شاهد (S1)، :۱۰۰۰ گرم کنجاله سویا در هر مترمربع بستر کمپوست فازIII (S2)، ۱۵۰۰ گرم کنجاله سویا در هر مترمربع بستر کمپوست فازIII (S3)، ۱۰۰۰ گرم بلغور ذرت در هر مترمربع بستر کمپوست فازIII (S4)، ۱۵۰۰ گرم بلغور ذرت در هر مترمربع بستر کمپوست فاز III (S5)

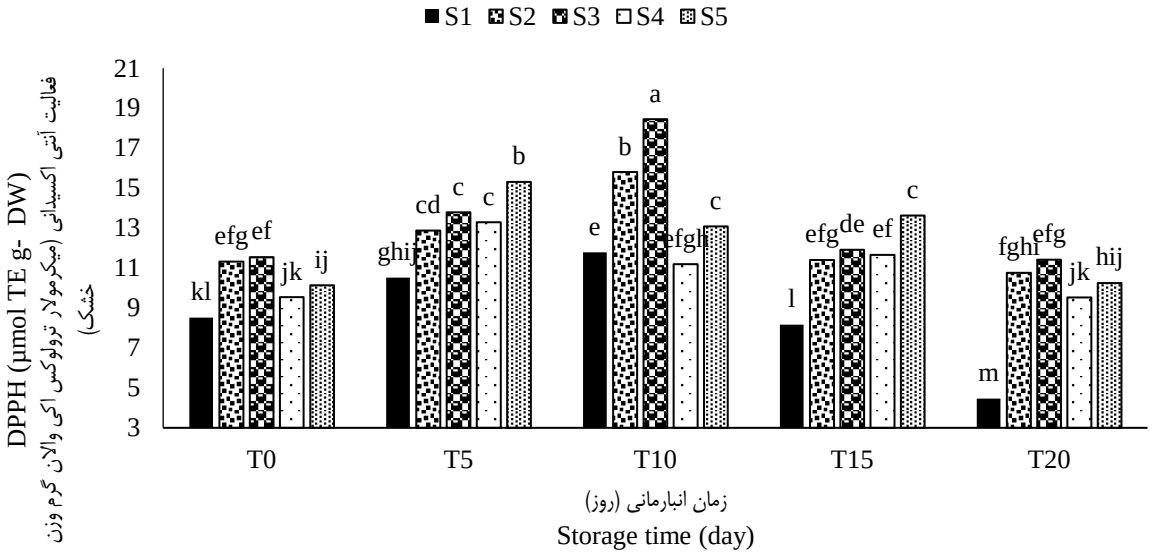
Fig. 9. Comparison of white button mushroom SOD GPx activity (U min^{-1} mg^{-1} protein) under different supplement treatments during storage periods. Means followed by the same letter are not significantly different according to Tukey's test at the 5% probability level. Treatments: Control (S1); 1000 g soybean meal per m^2 of Phase III compost (S2); 1500 g soybean meal per m^2 of Phase III compost (S3); 1000 g corn grits per m^2 of Phase III compost (S4); and 1500 g corn grits per m^2 of Phase III compost (S5).



شکل ۱۰- مقایسه محتوای فنل کل (اسید گالیک بر گرم وزن خشک) قارچ سفید دکمه‌ای در تیمارهای مختلف مکمل در هر دوره انبارمانی. حروف مشترک نشان‌دهنده عدم معنی‌داری با آزمون توکی در سطح ۵ درصد، بین میانگین‌ها می‌باشد. شاهد (S1)، : ۱۰۰۰ گرم کنجاله سویا در هر مترمربع بستر کمپوست فازIII (S2)، ۱۵۰۰ گرم کنجاله سویا در هر مترمربع بستر کمپوست فازIII (S3)، ۱۰۰۰ گرم بلغور ذرت در هر مترمربع بستر کمپوست فازIII (S4)، ۱۵۰۰ گرم بلغور ذرت در هر مترمربع بستر کمپوست فاز III (S5)

Fig. 10. Comparison of white button mushroom phenol content (GAE g^{-1} DW) under different supplement treatments during storage periods. Means followed by the same letter are not significantly different according to Tukey's test at the 5% probability level. Treatments: Control (S1); 1000 g soybean meal per m^2 of Phase III compost (S2); 1500 g soybean meal per m^2 of Phase III compost (S3); 1000 g corn grits per m^2 of Phase III compost (S4); and 1500 g corn grits per m^2 of Phase III compost (S5).

براساس داده‌های فعالیت آنتی‌اکسیدانی DPPH، در ابتدای انبارمانی بیشترین مقدار مربوط به تیمار ۱۵۰۰ گرم مکمل کنجاله سویا در یک متر مربع بستر با ۱۱/۵۵۲ میکرمولار ترولوکس اکی‌والان گرم وزن خشک و کمترین میزان فعالیت آنتی‌اکسیدانی DPPH مربوط به تیمار شاهد با ۸/۵۱۵ میکرمولار ترولوکس اکی‌والان گرم وزن خشک بود. پس از پنج روز، فعالیت در تمام تیمارها افزایش یافت و تیمار ۱۵۰۰ گرم مکمل بلغور ذرت در یک متر مربع بستر کمپوست با ۱۵/۳۱۱ میکرمولار ترولوکس اکی‌والان گرم وزن خشک به اوج خود رسید، در حالی‌که تیمار شاهد با ۱۰/۵۱۲ میکرمولار ترولوکس اکی‌والان گرم وزن خشک کمترین مقدار را حفظ کرد. در روز دهم، تیمار ۱۵۰۰ گرم مکمل کنجاله سویا در یک متر مربع بستر با ۱۸/۴۴۱ میکرمولار ترولوکس اکی‌والان گرم وزن خشک بالاترین سطح را ثبت کرد و تیمار ۱۰۰۰ گرم بلغور ذرت در هر مترمربع بستر کمپوست با ۱۱/۱۹۴ میکرمولار ترولوکس اکی‌والان گرم وزن خشک نسبت به دیگر تیمارهای مکمل‌دار مقدار کمتری نشان داد. با گذشت زمان به روز پانزدهم، میزان DPPH در بیشتر تیمارها نسبت به روز دهم کاهش یافت، اما تیمار ۱۵۰۰ گرم مکمل بلغور ذرت در یک متر مربع بستر کمپوست با ۱۳/۶۲۸ میکرمولار ترولوکس اکی‌والان گرم وزن خشک جایگاه نخست را به دست آورد و تیمار شاهد با ۸/۱۷ میکرمولار ترولوکس اکی‌والان گرم وزن خشک کمترین مقدار بود. در پایان روز بیستم، فعالیت در همه تیمارها کاهش بیشتری پیدا کرد. تیمار ۱۵۰۰ گرم مکمل کنجاله سویا در یک متر مربع بستر با ۱۱/۴۱ میکرمولار ترولوکس اکی‌والان گرم وزن خشک و تیمار ۱۰۰۰ گرم کنجاله سویا در هر مترمربع بستر کمپوست با ۱۰/۷۶ میکرمولار ترولوکس اکی‌والان گرم وزن خشک بالاترین مقادیر نهایی را داشتند، در حالی‌که تیمار شاهد با ۴/۴۶ میکرمولار ترولوکس اکی‌والان گرم وزن خشک کمترین میزان را نشان داد (شکل ۱۱).



شکل ۱۱- مقایسه میزان فعالیت آنتی‌اکسیدانی (میکرمولار ترولوکس اکی‌والان گرم وزن خشک) قارچ سفید دکمه‌ای در تیمارهای مختلف مکمل در هر دوره انبارمانی. حروف مشترک نشان‌دهنده عدم معنی‌داری با آزمون توکی در سطح ۵ درصد، بین میانگین‌ها می‌باشد. شاهد (S1)، ۱۰۰۰ گرم کنجاله سویا در هر مترمربع بستر کمپوست فازIII (S2)، ۱۵۰۰ گرم کنجاله سویا در هر مترمربع بستر کمپوست فازIII (S3)، ۱۰۰۰ گرم بلغور ذرت در هر مترمربع بستر کمپوست فازIII (S4)، ۱۵۰۰ گرم بلغور ذرت در هر مترمربع بستر کمپوست فاز III (S5).

Fig. 11. Comparison of white button mushroom DPPH (µmol TE g^{-1} DW) under different supplement treatments during storage periods. Means followed by the same letter are not significantly different according to Tukey's test at the 5% probability level. Treatments: Control (S1); 1000 g soybean meal per m^2 of Phase III compost (S2); 1500 g soybean meal per m^2 of Phase III compost (S3); 1000 g corn grits per m^2 of Phase III compost (S4); and 1500 g corn grits per m^2 of Phase III compost (S5).

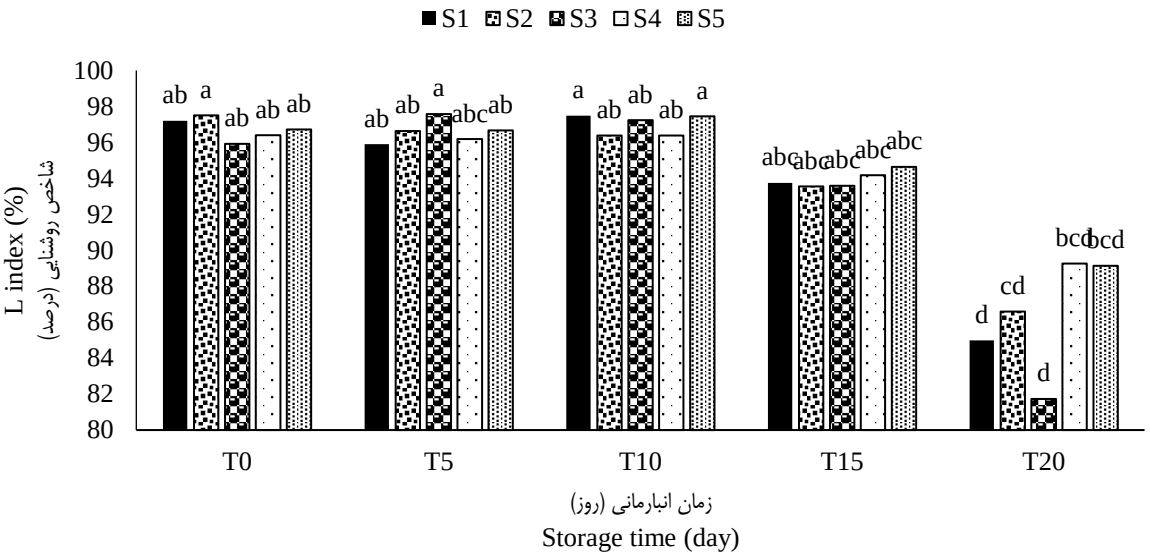
محتوای فنول کل و DPPH قارچ دکمه‌ای در طول دوره نگهداری به طور معناداری تحت تأثیر مکمل‌های غذایی در بستر کمپوست قرار دارد. به طور کلی، تمام تیمارهای دریافت‌کننده مکمل، سطوح بالاتر و پایداری بیشتری از این ترکیبات را در مقایسه با تیمار شاهد نشان دادند که حاکی از نقش مؤثر تغذیه تکمیلی در تقویت سیستم دفاع غیرآنزیمی قارچ در مواجهه با

تنش‌های پس از برداشت است. برتری مداوم تیمارهای ۱۵۰۰ گرم مکمل کنجاله سویا و بلغور ذرت در یک متر مربع بستر کمپوست در حفظ سطوح بالای فنول کل و فعالیت DPPH، به‌ویژه در مراحل میانی و پایانی دوره، قابل توجه است. این مشاهده را می‌توان به تأمین پیش‌سازهای کربنی و نیتروژنی لازم برای مسیرهای متابولیک ثانویه سنتز ترکیبات فنولی نسبت داد. عملکرد ضعیف و کاهش شدید این شاخص‌ها در تیمار شاهد، به‌ویژه در روز بیستم، به وضوح نشان می‌دهد که عدم مکمل‌دهی، قارچ را با ذخایر آنتی‌اکسیدانی ناکافی رها کرده و آن را در برابر استرس اکسیداتیو پس از برداشت آسیب‌پذیرتر می‌کند. الگوی زمانی متفاوت پاسخ تیمارها نیز جالب توجه است. تیمارهای حاوی کنجاله سویا، به‌ویژه ۱۵۰۰ گرم در یک متر مربع بستر ، تمایل به اوج گیری دیرتر (روز دهم) در فعالیت DPPH داشتند، در حالی‌که تیمارهای حاوی بلغور ذرت به‌ویژه ۱۵۰۰ گرم مکمل بلغور ذرت در یک متر مربع بستر کمپوست زودتر به اوج رسیده و سطوح بالای فنول کل را در روزهای پانزدهم و بیستم حفظ کردند. این تفاوت ممکن است بازتابی از سرعت متفاوت متابولیسم و استفاده از پیش‌سازها باشد؛ مکمل‌های پروتئینی مانند کنجاله سویا ممکن است سنتز پایدارتر متابولیت‌های ثانویه را حمایت کنند، در حالی‌که مکمل‌های کربوهیدراتی مانند بلغور ذرت ممکن است منجر به پاسخ سریع‌تر شوند (Martín *et al*., 2023; Pardo-Giménez *et al*., 2020). افزایش ظرفیت آنتی‌اکسیدانی ناشی از مکمل‌ها از دو جنبه حائز اهمیت است. اولاً، این ترکیبات با خنثی سازی رادیکال‌های آزاد، در حفظ یکپارچگی غشاهای سلولی و به تأخیر انداختن فرآیندهای پیری و فساد نقش دارند که به طور مستقیم با ماندگاری محصول مرتبط است (Alkan et al., 2020). ثانیاً، افزایش محتوای فنولیک و فعالیت آنتی‌اکسیدانی، ارزش غذایی و سلامتی‌بخش قارچ را ارتقا می‌دهد. این یافته‌ها بر این نکته تأکید می‌کنند که مدیریت تغذیه‌ای نه تنها یک راهکار عملی برای بهبود کیفیت پس از برداشت و کاهش ضایعات است، بلکه می‌تواند به تولید محصولی با ارزش افزوده تغذیه‌ای بالاتر نیز منجر شود (Podkowa *et al*., 2021).

همان‌گونه که در شکل ۱۲ مشخص است، در زمان آغاز انبارمانی همه تیمارها مقادیر روشنایی بالایی بین ۹۵/۹ تا ۹۷/۵ درصد روشنایی داشتند که بیشترین آن مربوط به تیمار ۱۰۰۰ گرم کنجاله سویا در هر مترمربع بستر کمپوست با ۹۷/۴۹ درصد و کمترین آن مربوط به تیمار ۱۵۰۰ گرم مکمل کنجاله سویا در یک متر مربع بستر با ۹۵/۹۱ درصد بود. با گذشت پنج روز، تغییرات مختلفی مشاهده شد به طوری که تیمار ۱۵۰۰ گرم مکمل کنجاله سویا در یک متر مربع بستر با افزایش به ۹۷/۵۷ درصد به بالاترین مقدار رسید، در حالی‌که تیمار شاهد و تیمار ۱۰۰۰ گرم بلغور ذرت در هر مترمربع بستر کمپوست کاهش جزئی را داشت و کمترین مقدار در این زمان با ۹۵/۸۹ درصد متعلق به تیمار شاهد بود. در روز دهم، تیمارهای شاهد و ۱۵۰۰ گرم مکمل بلغور ذرت در یک متر مربع بستر کمپوست با مقادیر نزدیک به ۹۷/۵۰ درصد مجدداً بالاترین میزان روشنایی را ثبت کردند و تیمار ۱۰۰۰ گرم کنجاله سویا در هر مترمربع بستر کمپوست با ۹۶/۳۸ درصد کمترین مقدار را داشت. با رسیدن به روز پانزدهم، روند کاهشی مشهودی در همه تیمارها آغاز شد و مقادیر به محدوده ۹۳/۵۰ تا ۹۴/۶۰ درصد تنزل یافت که در این میان تیمار ۱۵۰۰ گرم مکمل بلغور ذرت در یک متر مربع بستر کمپوست با ۹۴/۶۳ درصد بیشترین و تیمار ۱۰۰۰ گرم کنجاله سویا در هر مترمربع بستر کمپوست با ۹۳/۵۵ درصد کمترین روشنایی را نشان دادند. این کاهش در روز بیستم به شدت ادامه یافت و مقادیر به طور چشمگیری به محدوده ۸۱/۷ تا ۸۹/۳۰ درصد سقوط کرد. در این زمان، تیمارهای ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ گرم بلغور ذرت در هر مترمربع بستر کمپوست به ترتیب با ۸۹/۲۵ و ۸۹/۱۴ درصد بهترین عملکرد را در حفظ روشنایی داشتند، در حالی‌که تیمار ۱۵۰۰ گرم مکمل کنجاله سویا در یک متر مربع بستر با ۸۱/۷۳ درصد کمترین مقدار روشنایی و تیمار شاهد نیز با ۸۴/۹۹ درصد در رده پایینی قرار گرفتند (شکل ۱۳).

براساس نتایج شاخص قهوه‌ای، در ابتدای برداشت بیشترین مقدار مربوط به تیمار شاهد با ۱۶/۳۲ درصد و کمترین مقدار مربوط به تیمار ۱۰۰۰ گرم بلغور ذرت در هر مترمربع بستر کمپوست با ۱۴/۰۰ درصد بود. پس از پنج روز، مقدار این شاخص در تمام تیمارها افزایش جزئی پیدا کرد و تیمار شاهد با ۱۶/۶۴ درصد همچنان بالاترین مقدار را حفظ نمود، در حالی‌که تیمار ۱۵۰۰ گرم مکمل بلغور ذرت در یک متر مربع بستر کمپوست با ۱۷/۳۰ درصد به رده دوم صعود کرد. در روز دهم، روند افزایشی ادامه یافت و تیمار ۱۵۰۰ گرم مکمل بلغور ذرت در یک متر مربع بستر کمپوست با ۲۱/۵۰ درصد به بالاترین سطح رسید و تیمار ۱۰۰۰ گرم کنجاله سویا در هر مترمربع بستر کمپوست با ۱۸/۰۴ درصد کمترین مقدار را در این زمان نشان داد. با گذشت زمان به روز پانزدهم، افزایش شاخص قهوه‌ای در همه تیمارها شدت گرفت و تیمار ۱۵۰۰ گرم مکمل بلغور ذرت در

یک متر مربع بستر کمپوست با ۳۰/۳۴ درصد در صدر قرار گرفت، حال آن که تیمار شاهد با ۲۴/۴۹ درصد پایین‌ترین مقدار را ثبت کرد. در پایان دوره انبارمانی، مقدار شاخص در همه تیمارها به اوج خود در کل دوره رسید، اما این بار تیمار شاهد با ۳۵/۹۴ درصد بیشترین و تیمار ۱۰۰۰ گرم بلغور ذرت در هر مترمربع بستر کمپوست با ۲۹/۱۲ درصد کمترین مقدار نهایی را داشتند (شکل ۱۴).

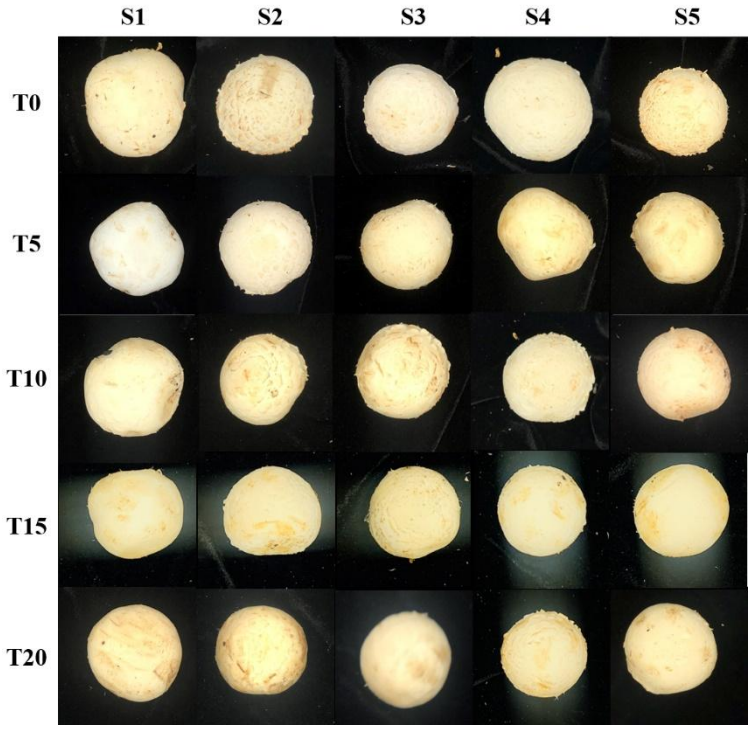


شکل ۱۲- مقایسه شاخص روشنایی قارچ (درصد) قارچ سفید دکمه‌ای در تیمارهای مختلف مکمل در هر دوره انبارمانی. حروف مشترک نشان‌دهنده عدم معنی‌داری با آزمون توکی در سطح ۵ درصد، بین میانگین‌ها می‌باشد. شاهد (S1)، :۱۰۰۰ گرم کنجاله سویا در هر مترمربع بستر کمپوست فازIII (S2)، ۱۵۰۰ گرم کنجاله سویا در هر مترمربع بستر کمپوست فازIII (S3)، ۱۰۰۰ گرم بلغور ذرت در هر مترمربع بستر کمپوست فازIII (S4)، ۱۵۰۰ گرم بلغور ذرت در هر مترمربع بستر کمپوست فاز III (S5)

Fig. 12. Comparison of white button mushroom L index (%) under different supplement treatments during storage periods. Means followed by the same letter are not significantly different according to Tukey's test at the 5% probability level. Treatments: Control (S1); 1000 g soybean meal per m² of Phase III compost (S2); 1500 g soybean meal per m² of Phase III compost (S3); 1000 g corn grits per m² of Phase III compost (S4); and 1500 g corn grits per m² of Phase III compost (S5).

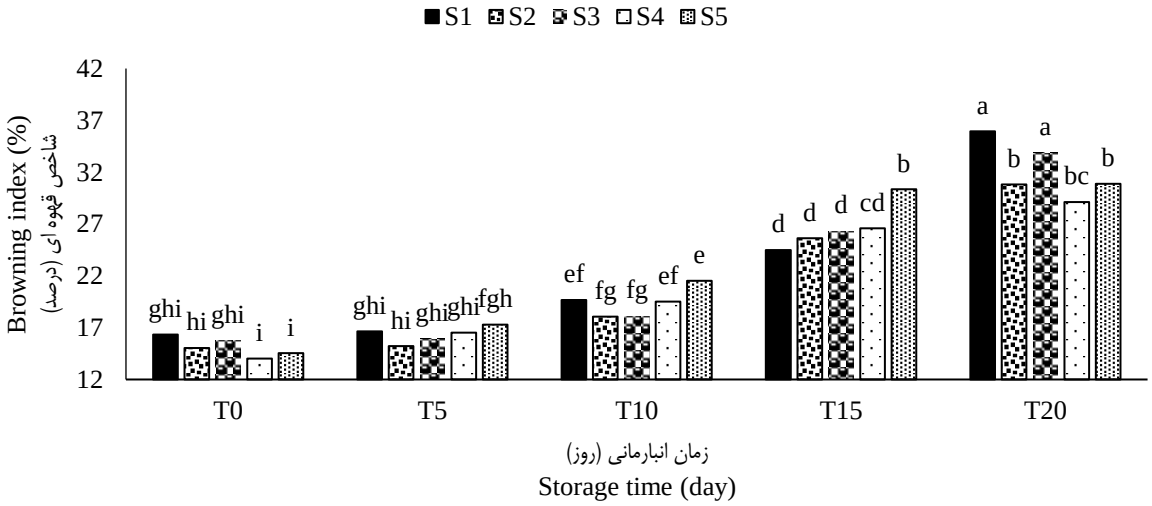
روند کلی کاهش روشنایی و افزایش شاخص قهوه‌ای شدن در همه تیمارها با گذشت زمان، پدیده‌ای طبیعی و مرتبط با فرآیندهای پیری، اکسیداسیون و تخریب آنزیمی پس از برداشت است که توسط مطالعات پیشین نیز تأیید شده است (Lin & Sun, 2019; Mohapatra *et al*., 2010). با این وجود، میزان و شدت این تغییرات در بین تیمارهای مختلف به وضوح متفاوت بود که نقش تعدیل‌کننده مکمل‌ها را برجسته می‌سازد. بررسی نتایج نشان داد تیمارهای حاوی بلغور ذرت، در حفظ روشنایی و کنترل قهوه‌ای شدن در پایان دوره (روز بیستم) عملکرد بهتری داشتند. این تیمارها بالاترین مقادیر روشنایی و پایین‌ترین سطوح شاخص قهوه‌ای شدن را در انتهای انبارداری ثبت کردند. این امر ممکن است ناشی از تأثیر مثبت این مکمل کربوهیدراتی در حفظ یکپارچگی غشای سلولی، کاهش میزان تنفس و تعدیل فعالیت آنزیم‌های اکسیداتیو مانند پلی‌فنل اکسیداز باشد. در مقابل، تیمار شاهد و تیمار ۱۵۰۰ گرم مکمل کنجاله سویا در یک متر مربع بستر در روز بیستم کمترین روشنایی و در مورد شاهد، بیشترین شاخص قهوه‌ای شدن را نشان دادند. این نشان می‌دهد که عدم مکمل‌دهی یا استفاده از برخی مکمل‌های پروتئینی با غلظت بالا، ممکن است در طولانی مدت نتواند از تخریب رنگدانه‌ها و بروز تغییرات نامطلوب رنگ جلوگیری کند. افزایش شاخص قهوه‌ای شدن عمدتاً با فعالیت آنزیم‌های اکسیدکننده فنول‌ها مرتبط است که منجر به تشکیل کینون و در نهایت رنگدانه‌های قهوه‌ای می‌شود (Lin & Sun, 2019). عملکرد بهتر تیمارهای حاوی بلغور ذرت در کنترل این شاخص می‌تواند حاکی از تأثیر این مکمل در حفظ ثبات غشاهای سلولی و جلوگیری از نشت آنزیم‌ها و سوبستراهای درگیر در این واکنش‌ها باشد. از سوی دیگر، رنگ سفید و روشن قارچ یک شاخص کلیدی تازگی و کیفیت درک‌شده توسط مصرف‌کننده

است و هر گونه قهوه‌ای شدن به سرعت بر بازارپسندی و ارزش اقتصادی محصول تأثیر منفی می‌گذارد (Cavusoglu *et al.*, 2021).



شکل ۱۳- تأثیر مکمل‌های غذایی بستر کمپوست بر ظاهر قارچ دکمه‌ای سفید.

Fig. 13. Effects supplementation levels (S1–S5) during storage periods on theexternal appearance of white button mushroom.



شکل ۱۴- مقایسه شاخص قهوه‌ای (درصد) قارچ سفید دکمه‌ای در تیمارهای مختلف مکمل در هر دوره انبارمانی. حروف مشترک نشان‌دهنده عدم معنی‌داری با آزمون توکی در سطح ۵ درصد، بین میانگین‌ها می‌باشد. شاهد (S1)، ۱۰۰۰ گرم کنجاله سویا در هر مترمربع بستر کمپوست فازIII (S2)، ۱۵۰۰ گرم کنجاله سویا در هر مترمربع بستر کمپوست فازIII (S3)، ۱۰۰۰ گرم بلغور ذرت در هر مترمربع بستر کمپوست فازIII (S4)، ۱۵۰۰ گرم بلغور ذرت در هر مترمربع بستر کمپوست فاز III (S5)

Fig. 14. Comparison of white button mushroom browning index (%) under different supplement treatments during storage periods. Means followed by the same letter are not significantly different according to Tukey's test at the 5% probability level. Treatments: Control (S1); 1000 g soybean meal per m² of Phase III compost (S2); 1500 g soybean meal per m² of Phase III compost (S3); 1000 g corn grits per m² of Phase III compost (S4); and 1500 g corn grits per m² of Phase III compost (S5).

نتیجه‌گیری

بررسی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و بیوشیمیایی قارچ دکمه‌ای تحت تأثیر مکمل‌های کنجاله سویا و بلغور ذرت در بستر کمپوست نشان‌دهنده که به طور کلی، تیمارهای حاوی کنجاله سویا فعال‌کنندگی متابولیک بالاتری را نشان دادند که با سطوح برتر فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، سوپراکسید دیسموتاز و گایاکول پراکسیداز، و هم‌چنین مقادیر بالاتر فنول کل و قدرت آنتی‌اکسیدانی در طول دوره مشهود بود. این امر با کاهش وزن بیشتر در انتهای دوره در تیمار ۱۵۰۰ گرم مکمل کنجاله سویا در یک متر مربع بستر و حفظ پروتئین کل نسبی بالاتر همسو است. در مقابل، تیمارهای حاوی بلغور ذرت اغلب عملکرد میانه‌ای داشتند، اما در حفظ شاخص روشنایی و کاهش شاخص قهوه‌ای شدن در پایان دوره برتری نشان دادند که می‌تواند نشان‌دهنده آهسته‌تر شدن فرآیندهای اکسیداتیو و تخریب در این تیمارها باشد. تیمار شاهد در اکثر شاخص‌ها پایین‌ترین را ثبت نمود. افزایش پایدار نسبت وزن خشک به وزن تر در تمام تیمارها تأییدکننده روند تجزیه و تلفات رطوبت است. در مجموع، نتایج حاکی از آن است که افزودن مکمل‌های پروتئینی (کنجاله سویا) کمپوست را به سمت مسیر تجزیه با فعالیت آنزیمی و اکسیداتیو شدیدتر سوق می‌دهد، در حالی‌که مکمل‌های کربوهیدراتی (بلغور ذرت) ممکن است با تعدیل این فرآیندها، بر حفظ برخی کیفیت‌های فیزیکی بستر تأکید داشته باشند. انتخاب مکمل بنابراین می‌تواند بسته به هدف تولید، بر پویایی کمپوست و احتمالاً کیفیت نهایی محصول تأثیرگذار باشد.

میزان مشارکت نویسندگان

اسلامی‌زاده: پژوهش و بررسی، جمع‌آوری داده‌ها، مدیریت پروژه، فراهم‌آوری منابع و نگارش پیش‌نویس اولیه پژوهش؛ کلاته جاری: مفهوم‌سازی، تحلیل رسمی، بررسی، تعیین روش‌شناسی، سرپرستی و بازبینی و ویرایش؛ محمدی ترکاشوند: سرپرستی و بازبینی و ویرایش؛ فارسی: مفهوم‌سازی، مدیریت داده‌ها، تعیین روش‌شناسی و اعتبارسنجی پژوهش؛ صالحی سلمی: مسئولیت مدیریت داده‌ها، تحلیل رسمی، روش‌شناسی، نرم‌افزاری و اعتبارسنجی.

سپاسگزاری

از مجتمع کشاورزی جلگه دز که در تأمین امکانات و بودجه لازم جهت اجرای این پروژه همکاری لازم را داشته‌اند تقدیر و تشکر می‌شود.

منابع References

Adibian, M., & Mami, Y. (2015). Mushroom supplement added to casing to improve postharvest quality of white button mushroom. *European Journal of Horticultural Science, 80*(5), 240–248.

Aebi, H. (1984). Catalase in vitro. In Methods in Enzymology (Vol. 105, pp. 121-126). Academic Press.

Alam, N., Amin, R., Khan, A., Ara, I., Shim, M.J., Lee, M.W., & Lee, T.S. (2008). Nutritional analysis of cultivated mushrooms in Bangladesh - *Pleurotus ostreatus*, *Pleurotus sajor-caju*, *Pleurotus florida* and *Calocybe indica*. *Mycobiology, 36*(4), 228–232. https://doi.org/10.4489/MYCO.2008.36.4.228

Alkan, S., Uysal, A., Kasik, G., Vlaisavljevic, S., Berežni, S., & Zengin, G. (2020). Chemical characterization, antioxidant, enzyme inhibition and antimutagenic properties of eight mushroom species: a comparative study. *Journal of Fungi, 6*(3), 166. https://doi.org/10.3390/jof6030166

Amighi, F., Heidari Dalfard, F., & Sadeghi, A. (2025). Evaluation of quality attributes and antioxidant changes of button mushrooms coated with gum Arabic, starch and ascorbic acid during cold storage. *Iranian Food Science and Technology Research Journal, 21*(5), 549-568. doi: 10.22067/ifstrj.2025.95873.1487. (In Persian)

Ayimbila, F., & Keawsompong, S. (2023). Nutritional quality and biological application of mushroom protein as a novel protein alternative. *Current Nutrition Reports, 12*(4), 290-307. https://doi.org/10.1007/s13668-023-00468-x

Azevedo, S., Cunha, L.M., Oliveira, J.C., Mahajan, P.V., & Fonseca, S.C. (2017). Modelling the influence of time, temperature and relative humidity conditions on the mass loss rate of fresh oyster mushrooms. *Journal of Food Engineering, 212*, 108–112.

Bach, F., Helm, C.V., Bellettini, M.B., Maciel, G.M., & Haminiuk, C.W.I. (2017). Edible mushrooms: A potential source of essential amino acids, glucans and minerals. *International Journal of Food Science & Technology, 52*(11), 2382–2392.

Beauchamp, C., & Fridovich, I. (1971). Superoxide dismutase: improved assays and an assay applicable to acrylamide gels. *In Analytical Biochemistry, 44*, 276-287.

bin Harun, A. (2017). Post Harvest Control for Maintenance of Quality Mushrooms. *Food and Fertilizer Technology Center for the Asian and Pacific Region*. https://ap.fftc.org.tw/article/1249

Blachier, F., Andriamihaja, M., & Blais, A. (2020). Sulfur-Containing Amino Acids and Lipid Metabolism. *The Journal of nutrition, 150* (Suppl 1), 2524S–2531S. https://doi.org/10.1093/jn/nxaa243

Bradford M.M. (1976) A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry, 72*, 248-254.

Cao, Y., Wu, L., Xia, Q., Yi, K., & Li, Y. (2024). Novel post-harvest preservation techniques for edible fungi: mechanisms and applications. *Foods, 13*(10), 1554. https://doi.org/10.3390/foods13101554

Carrasco, J., Zied, D.C., Pardo, J.E., Preston, G.M., & Pardo-Giménez, A. (2018). Supplementation in mushroom crops and its impact on yield and quality. *AMB Express, 8*(1), 146. https://doi.org/10.1186/s13568-018-0678-0

Castellanos-Reyes, K., Villalobos-Carvajal, R., & Beldarrain-Iznaga, T. (2021). Fresh mushroom preservation techniques. *Foods, 10*(9), 2126.

Cavusoglu, S., Uzun, Y., Yilmaz, N., Ercisli, S., Eren, E., Ekiert, H., Elansary, H.O., & Szopa, A. (2021). Maintaining the quality and storage life of button mushrooms (*Agaricus bisporus*) with gum, agar, sodium alginate, egg white protein, and lecithin coating. *Journal of Fungi, 7*(8), 614.

Chance, B., & Maehly, C. (1955). Assay of catalase and peroxidases. *In Methods in Enzymology 2*, 764-775.

Cheung, P.C.K. (2013). Mini-review on edible mushrooms as a source of dietary fiber: preparation and health benefits. *Food Science and Human Wellness, 2*(3–4), 162–168.

Cremades, O., Diaz-Herrero, M., Carbonero-Aguilar, P., Gutierrez-Gil, J., Fontiveros, E., Rodríguez-Morgado, B., Parrado, J., & Bautista, J. (2012). Preparation and characterisation of selenium-enriched mushroom aqueous enzymatic extracts (MAEE) from button mushrooms (*Agaricus bisporus*). *Food Chemistry, 133* (4), 1538-1543. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.02.046

Cunha-Zied, D., Sánchez, J.E., Noble, R., & Pardo-Giménez, A. (2020). Use of spent mushroom substrate in new mushroom crops to promote the transition towards a circular economy. *Agronomy, 10*(9), 1239. https://doi.org/10.3390/agronomy10091239

Dawadi, E., Magar, P.B., Bhandari, S., Subedi, S., Shrestha, S., & Shrestha, J. (2022). Nutritional and post-harvest quality preservation of mushrooms: A Review. *Heliyon, 8*(11), e12093.

Díaz-Montes, E., & Castro-Muñoz, R. (2021). Edible films and coatings as food-quality preservers: An overview. *Foods, 10*(2), 249.

Eslamizadeh, A., Kalateh Jari, S., Mohammadi Torkashvand, A., Farsi, M., Salehi Salmi, M. (2025). Improving the nutritional value of button mushroom (*Agaricus bisporus*) through cornmeal supplementation in compost and peat substitution in casing soil. *Future Foods, 100849*. https://doi.org/10.1016/j.fufo.2025.100849

Gui, H., Zhao, M., Zhang, S., Yin, R., Hu, C., Fan, M., & Li, L. (2022). Active antioxidant packaging from essential oils incorporated polylactic acid/Poly (butylene adipate-co-terephthalate)/thermoplastic starch for preserving straw mushroom. *Foods*, *11*(15), 2252.

Guo, Y., Chen, X., Gong, P., Wang, R., Han, A., Deng, Z., Qi, Z., Long, H., Wang, J., Yao, W., & Zhang, J. (2023). Advances in the role and mechanisms of essential oils and plant extracts as natural preservatives to extend the postharvest shelf life of edible mushrooms. *Foods*, *12*(4), 801.

Guzmán, G. (2008). Hallucinogenic mushrooms in Mexico: An overview. *Economic Botany*, *62*, 404–412. https://doi.org/10.1007/s12231-008-9033-8.

Han Lyn, F., Maryam Adilah, Z.A., Nor-Khaizura, M.A.R., Jamilah, B., & Nur Hanani, Z.A. (2020). Application of modified atmosphere and active packaging for oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*). *Food Packaging and Shelf Life*, *23*, 100451.

Holtz, R.B., & Schisler, L. C. (1986). Utilization of fatty acids by *Agaricus bisporus* in commercial culture. *Mycologia*, *78*(5), 722–727.

Joshi, K., Warby, J., Valverde, J., Tiwari, B., Cullen, P.J., & Frias, J.M. (2018). Impact of cold chain and product variability on quality attributes of modified atmosphere packed mushrooms (*Agaricus bisporus*) throughout distribution. *Journal of Food Engineering, 232*, 44–55.

Kozarski, M., Klaus, A., van Griensven, L., Jakovljevic, D., Todorovic, N., Wan-Mohtar, W.A.A.Q.I., & Vunduk, J. (2023). Mushroom β-glucan and polyphenol formulations as natural immunity boosters and balancers: Nature of the application. *Food Science and Human Wellness, 12*(2), 378–396.

Lachman, J., Pivec, V., Rehakova, V., & Hubacek, J. (1990). Polyphenols and isoflavonoids of soybean (*Glycine max* (L.) Merr). *Rostlinná Výroba*, *36*(3), 295–301.

Lin, X., & Sun, D.W. (2019). Research advances in browning of button mushroom (*Agaricus bisporus*): Affecting factors and controlling methods. *Trends in Food Science & Technology*, *90*, 63–75.

Liu, J., Xu, X., & Chen, F. (2013). Changes in reactive oxygen species production and antioxidant enzyme activity of *Agaricus bisporus* harvested at different stages of maturity. *Journal of the Science of Food and Agriculture, 93*(9), 2201–2206. https://doi.org/10.1002/jsfa.6027

Liufang, Y., Wu, Y., Zhou, H., Qu, H., & Yang, H. (2024). Recent advances in the application of natural products for postharvest edible mushroom quality preservation. *Foods*, *13*(15), 2378. https://doi.org/10.3390/foods13152378

López-Gómez, A., Ros-Chumillas, M., Navarro-Martínez, A., Barón, M., Navarro-Segura, L., Taboada-Rodríguez, A., Marín-Iniesta, F., & Martínez-Hernández, G.B. (2021). Packaging of fresh sliced mushrooms with essential oils vapours: A new technology for maintaining quality and extending shelf life. *Foods*, *10*(6), 1196.

Mahajan, P.V., Oliveira, F.A.R., & Macedo, I. (2008). Effect of temperature and humidity on the transpiration rate of whole mushrooms. *Journal of Food Engineering*, *84*(2), 281–288. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.05.021

Martín, C., Zervakis, G.I., Xiong, S., Koutrotsios, G., & Strætkvern, K.O. (2023). Spent substrate from mushroom cultivation: exploitation potential toward various applications and value-added products. *Bioengineered*, *14*(1). https://doi.org/10.1080/21655979.2023.2252138

Maseko, T., Dunshea, F.R., Howell, K., Cho, H.J., Rivera, L.R., Furness, J.B., & Ng, K. (2014). Selenium-enriched *Agaricus bisporus* mushroom protects against increase in gut permeability *ex vivo* and up-regulates glutathione peroxidase 1 and 2 in hyperthermally-induced oxidative stress in rats. *Nutrients*, *6*(6), 2478–2492. https://doi.org/10.3390/nu6062478

Maynard, A.J. (1970). Methods in Food Analysis. Academic Press, San Francisco, London, 845 p.

Mirończuk-Chodakowska, I., Socha, K., Zujko, M.E., Terlikowska, K.M., Borawska, M.H., & Witkowska, A.M. (2019). Copper, Manganese, Selenium and Zinc in wild-growing edible mushrooms from the eastern territory of "Green Lungs of Poland": nutritional and toxicological implications. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 16*(19), 3614. https://doi.org/10.3390/ijerph16193614

Mohapatra, D., Bira, Z.M., Kerry, J.P., Frias, J.M., & Rodrigues, F.A. (2010). Postharvest hardness and color evolution of white button mushrooms. *Journal of Food Science, 75*(3), 146–152.

Ordoñez, A.A.L., Gómez, J.D., Vattuone, M.A., & Isla, M.I. (2006). Antioxidant activities of phenolic compounds from edible mushrooms. *Journal of Food Composition and Analysis, 19*(4), 371–376. https://doi.org/10.1016/j.jfca.2005.03.005

Palacios, I., Moro, C., Lozano, M., D'Arrigo, M., Guillamón, E., García-Lafuente, A., & Villares, A. (2011). Use of modified atmosphere packaging to preserve mushroom quality during storage. *Recent Patents on Food, Nutrition & Agriculture, 3*(3), 196–203.

Pardo-Giménez, A., Zied, D.C., & Pardo-González, J.E. (2020). Supplementation of mushroom substrate with linseed oil: Effects on yield, quality and fatty acid profile of *Agaricus bisporus*. *Scientia Horticulturae, 261*, 108935. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108935

Pleșoianu, A.M., & Nour, V. 2022. Effect of some polysaccharide-based edible coatings on fresh white button mushroom (*Agaricus bisporus*) quality during cold storage. *Agriculture, 12*(9), 1491.

Podkowa, A., Kryczyk-Poprawa, A., & Opoka, W. (2021) Culinary–medicinal mushrooms: a review of organic compounds and bioelements with antioxidant activity. *European Food Research and Technology, 247*, 513–533. https://doi.org/10.1007/s00217-020-03646-1

Ranjbar, M.E., Ghahremani, Z., & Carrasco, J. (2019). Effect of compost formulation and postharvest management on quality parameters of button mushroom. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture, 8* (Suppl 1), S507–S513.

Royse, D.J., & Chalupa, W. (2009). Effects of spawn, supplement, and phase II compost additions and time of re-casing second break compost on mushroom (*Agaricus bisporus*) yield and biological efficiency. *Bioresource Technology, 100*(21), 5277–5282. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.02.074

Royse, D.J., Baars, J., & Tan, Q. (2017). Current overview of mushroom production in the world. In edible and medicinal mushrooms. *Technology and Applications* (pp. 5–13). John Wiley & Sons, Ltd.

Rubab, M., Chelliah, R., & Oh, DH. (2022). Screening for Antioxidant Activity: Diphenylpicrylhydrazine (DPPH) Assay. In Methods in Actinobacteriology Protocol (pp. 453-454). Springer Protocols Handbooks.

Sami, R., Elhakem, A., Alharbi, M., Benajiba, N., Almatrafi, M., Abdelazez, A., & Helal, M. (2021). Evaluation of antioxidant activities, oxidation enzymes, and quality of nano-coated button mushrooms (*Agaricus bisporus*) during storage. *Coatings, 11*(2), 149. https://doi.org/10.3390/coatings11020149

Silva, M., Ramos, A.C., Lidon, F.J., Reboredo, F.H., & Gonçalves, E.M. (2024). Pre- and postharvest strategies for *Pleurotus ostreatus* mushroom in a circular economy approach. *Foods, 13*(10), 1464.

Smiderle, F.R., Iacomini, M., Van Griensven, L.J.L.D., & Cipriani, T.R. (2011). Polysaccharides from *Agaricus bisporus*: extraction, characterization and biological activity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry, 59*(15), 8807–8814.

Wang, Y.H., Yang, X.Y., Wan, L.Z., Ren, H.X., Qu, L., Guo, H.D., Dong, L.L., Lu, X., & Ren, P.F. (2023). Influence of the casing layer on the specific volatile compounds and microorganisms by *Agaricus bisporus*. *Frontiers in Microbiology, 14*, 1154903. https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1154903

Wani, B.A., Bodha, R.H., & Wani, A.H. (2010). Nutritional and medicinal importance of mushrooms. *Journal of Medicinal Plants Research, 4*(24), 2598–2604.

Wrona, M., Bentayeb, K., & Nerín, C. (2015). A novel active packaging for extending the shelf-life of fresh mushrooms (*Agaricus bisporus*). *Food Control, 54*, 200–207.

Xu, Y., Tian, Y., Ma, R., Liu, Q., & Zhang, J. (2016). Effect of plasma-activated water on the postharvest quality of button mushrooms, *Agaricus bisporus*. *Food Chemistry, 197*, 436–444. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.10.144

Yadav, D., & Negi, P.S. (2021). Bioactive components of mushrooms: Processing effects and health benefits. *Food Research International, 148*, 110599.

Yang, Y., Jia, O., Li, Y., Feng, B., Chang, M., Meng, J., & Deng, B. (2024). Effect of high CO_2 controlled atmosphere storage on postharvest quality of button mushroom (*Agaricus bisporus*). *Foods, 13*(21), 3486. https://doi.org/10.3390/foods13213486

Zhang, K., Pu, Y.Y., & Sun, D.W. (2018). Recent advances in quality preservation of postharvest mushrooms (*Agaricus bisporus*): A review. *Trends in Food Science & Technology, 78*, 72–82. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.05.012

Ziaei Ghahnavieh, Z., Raji, M.R., Ehteshamnia, A., & Sohrabi, S.S. (2025). Investigating the effect of natural coating of chitosan nanoparticles and nanohydroxyapatite on the physiological characteristics and shelf life of button mushroom (*Agaricus bisporus*). *Iranian Food Science and Technology Research Journal, 21*(2), 235-251. doi: 10.22067/ifstrj.2024.90381.1376. (In Persian)

Iranian Journal of Horticultural Science and Technology 27 (1): 33-60 (2025)
Research article

Improvement of the Shelf Life and Bioactive Properties of White Button Mushroom (*Agaricus bisporus* L.) Through Compost Enrichment

Ali Eslamizadeh[1], Sepideh Kalateh Jari*[1], Ali Mohammadi Torkashvand[1], Mohammad Farsi[2], Mohamadreza Salehi Salmi[3]

1. Department of Agricultural Science and Engineering, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran
2. Department of Biotechnology and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
3. Department of Horticultural Science, Faculty of Agriculture, Agricultural Sciences and Natural Resource University of Khuzestan, Ahwaz, Iran

*Corresponding Author, Email: (kalatehjari@iau.ac.ir)

Introduction: Optimizing the composting process and improving substrate quality are key determinants of productivity in the cultivation of white button mushroom (*Agaricus bisporus*). The application of nutritional supplements during the spawn-run stage is a common strategy to enrich the substrate and stimulate mycelial growth. This study was conducted to evaluate the effects of two organic supplements differing in their chemical composition—soybean meal (a protein-rich source) and corn grits (a carbohydrate-rich source)—on decomposition kinetics, enzymatic profile, antioxidant status, and physicochemical properties of mushroom compost over a 20-day period. The experiment was carried out as a factorial in completely randomized block design with three replications and consisted of five treatments: the control (S1; compost without supplementation), two soybean meal levels (S2: 1000 g m^{-2} and S3: 1500 g m^{-2}), and two corn grits levels (S4: 1000 g m^{-2} and S5: 1500 g m^{-2}). Sampling was performed on days 0, 5, 10, 15, and 20 postharvest. Measurements included physical indices (weight loss, lightness, and texture firmness), biochemical traits (activities of catalase [CAT], guaiacol peroxidase [GPX], and superoxide dismutase [SOD]), and chemical attributes (total phenolic content, antioxidant capacity based on the DPPH assay, total protein, fiber, total soluble solids (TSS), dry-to-fresh weight ratio, and browning index). Results revealed highly distinct decomposition patterns in response to supplement type. Soybean meal treatments (S2 and S3) exhibited a more active metabolic decomposition profile. Antioxidant enzyme activities (CAT, SOD, GPX) were significantly higher during the mid-incubation phase (days 5–15) compared with the control and corn-based treatments, indicating stronger oxidative stress and enhanced microbial activity. This pattern coincided with higher accumulation of phenolic compounds and greater antioxidant capacity (DPPH values). Soybean treatments also showed the highest final weight loss (13.457% in S3) and consistently higher total protein content, reflecting accelerated mineralization of organic matter. In contrast, corn-based treatments (S4 and S5) displayed a moderated decomposition pattern. Although enzymatic activity and weight loss were generally lower, these treatments demonstrated superior physical quality retention. On day 20, S4 recorded the highest lightness value (89.2%) and the lowest browning index (29.1%), indicating a deceleration of oxidative processes and pigment degradation. The control treatment consistently exhibited the lowest values across most indices, highlighting the necessity of supplementation. General trends observed in all treatments included: a steady linear increase in dry-to-fresh weight ratio (from 5.839 to 7.765), indicating moisture loss and substrate consolidation; a progressive rise in browning index associated with decomposition advancement; and a rise-and-fall pattern in enzyme activities and secondary metabolites (such as phenolics), reflecting the sequential metabolic stages during compost maturation. The type of supplement can strongly modulate the decomposition trajectory of mushroom compost. Soybean meal, by providing accessible ammoniacal nitrogen and protein, accelerated biochemical and oxidative processes, potentially promoting faster compost maturation. Conversely, corn grits served as a more stable carbon source, moderating microbial activity and oxidative stress, thereby maintaining substrate structure and visual quality for a longer period. These findings offer important practical applications for farm management: selection of supplement type—or optimal mixing ratios—can be tailored to production strategies and the specific characteristics of the initial compost. Future studies should explore how these supplements influence yield performance and the quality of fruiting bodies.

Keywords: Antioxidant activity, Corn grits, Nutrition, Postharvest, Senescence, Soybean meal.