

# Comparison of Vermicomposts Properties Produced from Several Types of Wastes Biomass

Received: 2024.05.27  
Accepted: 2024.07.14

Maedeh Bohlouli,<sup>1</sup> Hossein Ali Asadi-Gharneh,<sup>1\*</sup> Elham Chavoshi,<sup>2</sup>  
Nafiseh Zamindar<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Department of Horticultural Science, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran

<sup>2</sup> Department of Soil Science, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran

<sup>3</sup> Department of Food Science and Technology, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran

## EXTENDED ABSTRACT

**Introduction:** One of the key environmental challenges in sustainable agriculture is the management of plant residues. Medicinal plants, belonging to the aromatic group and possessing high economic value, are typically used for a small portion of their biomass, while a substantial amount is burned in the field. Similarly, pistachio dehulling residues, although rich in essential nutrients, are often discarded. Vermicomposting is a low-cost and eco-friendly technique that converts agricultural waste into valuable organic fertilizer. This study aims to evaluate the potential for nutrient recovery from selected plant residues and transform them into a suitable organic fertilizer through the vermicomposting process.

**Materials and Methods:** Plant residues from chamomile, madder, valerian, licorice, and pistachio were used as raw materials for vermicompost production. The experiment was arranged in a completely randomized design (CRD) with five treatments and three replications. Each treatment substrate was composed of 80% (v/v) plant residue, 15% (v/v) cow manure, and 5% (v/v) of *Eisenia fetida* earthworms. All composting substrates were maintained under shaded conditions and monitored regularly to maintain optimal environmental parameters, including 70% moisture content, pH in the range of 6.8–7.2, and temperature between 18–25 °C. Vermicompost maturity was assessed based on a C/N ratio between 20 and 30, a change in color to dark brown, and approximately 50% reduction in substrate volume. After a period of 30 to 120 days, samples were harvested. Statistical differences among replicates were determined using Duncan's multiple range test at a 5% significance level. Paired t-tests were employed to compare the chemical properties of the initial substrates with the final vermicompost products.

**Results and discussion:** The vermicomposting duration ranged from 30 days for licorice residues to 120 days for chamomile. Earthworm growth rates across treatments varied from 1.46 to 9.02 g. Analysis of the chemical properties showed a significant increase in total nitrogen content in the final vermicompost, ranging from 11.66 to 22.07 g/kg. Paired comparisons revealed significant differences in total phosphorus levels between the raw materials and the vermicompost across all treatments. Additionally, total potassium content increased after vermicomposting ranging from 14.01 to 36.34 g/kg. The C/N ratio decreased markedly from 37.76–46.55 in the raw materials to 18.40–21.62 in the final products, confirming compost maturity in all treatments. The increase in nitrogen content is attributed to the secretion of mucus, growth-promoting hormones, nitrogenous compounds, and digestive enzymes by earthworms. Phosphatase enzymes in the digestive system of *E. fetida* facilitated the conversion of insoluble phosphorus into plant-available forms. Moreover, the rich microbial flora in the earthworm's gut contributed to the increased potassium levels. The decomposition of plant biomass during the vermicomposting process also enhanced earthworm growth and reproduction, contributing to the reduction in the C/N ratio. Differences in compost quality were influenced by the composition of plant residues, particularly their cellulose structure and phenolic content.

**Conclusion:** The results of this study demonstrate that nutrient-rich vermicompost can be produced from medicinal plant residues and pistachio waste. Among the treatments, valerian residues led to the highest increase in total nitrogen and potassium contents, reaching 11.61 and 24.53 g/kg, respectively outperforming other treatments. The highest change in total phosphorus was observed in the madder treatment, with an increase of 8.80 g/kg. These findings confirm the feasibility of converting medicinal plant waste into high-quality organic fertilizer through vermicomposting. Variations in compost quality are likely due to differences in the physical and chemical properties of the residues, including high cellulose and phenolic compound content and their influence on earthworm growth. This study introduces the vermicomposting of selected plant biomass as a sustainable and environmentally friendly strategy for organic fertilizer production.

**Keywords:** Bio-degradable, C to N ratio, *Eisenia fetida*, Macro-nutrients, Plant residue

**How to cite this article:**  
Bohlouli, M., Asadi-Gharneh, H.A., Chavoshi, E. and Zamindar, N., 2025. Comparison of Vermicomposts Properties Produced from Several Types of Wastes Biomass.. Adv. Environ. Sci. 23(2): 359-376.

\* Corresponding Author Email Address: h.asadi@khuisf.ac.ir  
DOI: 10.48308/envs.2024.1402



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

## مقایسه ویژگی‌های ورمی کمپوست‌های تولید شده از زیست توده چند نوع ضایعات گیاهی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۲۴

مآنده بهلولی<sup>۱</sup>، حسینعلی اسدی قارنه<sup>۱\*</sup>، الهام چاوشی<sup>۲</sup>، نفیسه زمیندار<sup>۳</sup>

### چکیده مبسوط

**سابقه و هدف:** یکی از چالش‌های زیست‌محیطی در کشاورزی پایدار، نحوه مدیریت بقایای گیاهی است. گیاهان دارویی از گروه‌های آروماتیک و با ارزش اقتصادی بالا هستند که قسمت کوچکی از آن‌ها قابل استفاده بوده و بخش عظیمی از زیست توده در مزرعه سوزانده می‌شود. بقایای پسته پوست‌گیری شده نیز هر چند منابع غنی از عناصر غذایی است اما دور ریخته می‌شود. فناوری ورمی کمپوست روشی ارزان برای تبدیل ضایعات کشاورزی به محصولی سازگار با محیط زیست است. مطالعه حاضر به بررسی قابلیت بازیافت مواد مغذی برخی پسماندهای گیاهی به یک کود آلی مناسب مانند ورمی کمپوست می‌پردازد.

**مواد و روش‌ها:** برای تولید ورمی کمپوست، مواد اولیه گیاهی از ضایعات گیاهان بابونه، روناس، سنبل الطیب و پسته تهیه شد. این مطالعه به وسیله‌ی طرح کاملاً تصادفی با ۵ تیمار و سه تکرار اجرا شد. بسترهای هر تیمار با ۸۰ درصد حجمی بقایای گیاهی به اضافه‌ی ۱۵ درصد حجمی کود گاوی و ۵ درصد حجمی کرم خاکی (*Eisenia fetida*) تهیه شد. بسترها در مکانی سایه‌پوش نگهداری و هر چند روز یکبار بررسی شدند تا میزان رطوبت ۷۰ درصد، pH در محدوده‌ی ۷/۲-۶/۸ و دما بین ۱۸ تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد حفظ شود. شاخص برداشت ورمی کمپوست نسبت C/N بود که بین ۲۰ تا ۳۰ در نظر گرفته شد. پس از ۱۲۰-۳۰ روز نمونه‌ها برداشت شدند. تفاوت معنی‌داری داده‌ها در سه تکرار با آزمون دانکن در سطح ۵ درصد تعیین شد. سپس برای مقایسه میانگین خصوصیات شیمیایی در بستر اولیه قبل از فرآیند ورمی کمپوست با محصولات نهایی از آزمون t زوجی استفاده شد.

**نتایج و بحث:** نتایج نشان داد که کمترین و بیشترین مدت فرآیند انجام ورمی کمپوست در شیرین بیان و بابونه بود که به ترتیب ۳۰ و ۱۲۰ روز ثبت شد. نرخ رشد کرم‌های خاکی در بسترهای مختلف بین ۹/۰۲-۱/۴۶ متغیر بود. تجزیه خصوصیات شیمیایی تیمارها افزایش قابل توجهی را در نیتروژن کل بین ۱۱/۶۶-۲۲/۰۷ گرم بر کیلوگرم در ورمی کمپوست نشان داد. نتایج مقایسه میانگین ماده‌ی اولیه و ورمی کمپوست، اختلاف معنی‌داری در میزان فسفر کل برای همه‌ی تیمارها به دست آورد. مقدار پتاسیم کل بعد از تولید ورمی کمپوست افزایش یافت و از ۱۴/۰۱-۳۶/۳۴ گرم بر کیلوگرم متغیر بود. همچنین نسبت C/N نیز از ۳۷/۷۶-۴۶/۵۵ در مواد اولیه به ۲۱/۶۲-۱۸/۴۰ در ورمی کمپوست‌ها کاهش یافت و همه‌ی تیمارها به شاخص برداشت رسیدند. ترشح مخاط، هورمون‌های محرک رشد، مواد حاوی نیتروژن و آنزیم‌های ترشح شده توسط کرم‌های خاکی بر بهبود سطح نیتروژن بسترها اثرگذار بود. وجود آنزیم فسفاتاز در فرآیند هضم کرم خاکی، باعث تبدیل فسفر نامحلول به فرم محلول شد. همچنین وجود میکرو فلور غنی در دستگاه گوارش کرم خاکی نیز باعث افزایش سطح پتاسیم در ورمی کمپوست شد. علاوه بر این با تخریب زیست توده‌ی بقایای گیاهی در طول ورمی کمپوست‌سازی، رشد و تولید مثل کرم خاکی افزایش و نسبت C/N کاهش یافت که این تغییرات با توجه به کاربرد ضایعات مختلف نیز سبب تولید توده‌هایی با کیفیت‌های مختلف شد.

**نتیجه‌گیری:** با توجه نتایج این مطالعه، نیتروژن و پتاسیم کل در ورمی کمپوست سنبل الطیب به ترتیب ۱۱/۶۱ و ۲۴/۵۳ گرم بر کیلوگرم نسبت به بستر اولیه افزایش یافت که این نتایج بهتر از سایر تیمارها بود. همچنین بیشترین تغییرات فسفر قبل و بعد از تولید ورمی کمپوست در تیمار روناس ۸/۸۰ گرم بر کیلوگرم گزارش شد. تبدیل ضایعات گیاهان دارویی و بازیافت مواد مغذی به یک کود زیستی امکان‌پذیر است. کیفیت متفاوت در تولید ورمی کمپوست می‌تواند به دلیل بافت سخت سلولزی، ترکیبات فنلی بالا در ضایعات گیاهان دارویی و سرعت رشد کرم خاکی نتیجه‌گیری شود. پژوهش حاضر ورمی کمپوست برخی زیست توده‌های پسماند گیاهی را به عنوان یک منبع جدید کودی بدون آلودگی زیست‌محیطی معرفی می‌کند.

**واژه‌های کلیدی:** بقایای گیاهی، زیست تخریب‌پذیر، عناصر پرمصرف، نسبت C به N در *Eisenia fetida*

<sup>۱</sup> گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)، اصفهان، ایران.

<sup>۲</sup> گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)، اصفهان، ایران.

<sup>۳</sup> گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)، اصفهان، ایران.

**استناد به این مقاله:** بهلولی، م.، ح.ع. اسدی قارنه، ا. چاوشی و ن. زمیندار. ۱۴۰۴. مقایسه ویژگی‌های ورمی کمپوست‌های تولید شده از زیست توده چند نوع ضایعات گیاهی. فصلنامه علوم محیطی نوین. ۲۳(۲): ۳۷۶-۳۵۹

\* Corresponding Author Email Address: h.asadi@khuisf.ac.ir

DOI: 10.48308/envs.2024.1402



## مقدمه

رطوبت و معدنی شدن بقایای آلی توسط کرم‌های خاکی است که در نتیجه زمان کمپوست‌سازی را کاهش می‌دهد و محصولی تولید می‌شود که ظرفیت تبادل یونی بالاتری دارد (Bhat *et al.*, 2017). مطالعات انجام شده در این زمینه عبارتند از تولید ورمی کمپوست از: پوست انار و کمپوست مصرف شده قارچ (A'ali *et al.*, 2017)، ضایعات محصول موز (Mago *et al.*, 2021) و ضایعات گل کلم (Patra *et al.*, 2022). مطالعات نشان می‌دهد که همه‌ی بقایای گیاهی به دلیل دارا بودن مقادیر زیادی ترکیبات آلکالوئیدی، فنولی و تانن‌ها، مناسب مصرف دام نیستند در نتیجه این بقایا به عنوان ضایعات در مزرعه رها شده یا سوزانده می‌شوند (Grogatti *et al.*, 2022).

تاکنون مطالعات زیادی در مورد فرآوری ضایعات گیاهان دارویی حاصل از فعالیت‌های صنعتی گزارش شده است اما به نظر می‌رسد در ارتباط با زیست‌توده گیاهان دارویی باقی‌مانده در مزرعه تحقیقات چندانی انجام نشده باشد. این پژوهش به منظور بررسی امکان استفاده از پسماند مزرعه‌ای چند نوع گیاه دارویی (بابونه، شیرین‌بیان، روناس، سنبل‌الطیب) و یک گیاه اقتصادی و معمول در تولید کمپوست و ورمی کمپوست (پسته)، به عنوان بستر اولیه ورمی کمپوست و مقایسه نتایج برخی خصوصیات شیمیایی آن‌ها پیش و پس از تولید ورمی کمپوست، انجام شد.

## مواد و روش‌ها

این مطالعه به مدت ۱۲۰ روز در دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه آزاد واحد اصفهان (خوراسگان) طی سال‌های ۱۴۰۱-۱۴۰۲ انجام شد. این مطالعه به صورت طرح کاملاً تصادفی در ۳ تکرار انجام شد. خصوصیات شیمیایی ضایعات گیاهی و ورمی کمپوست حاصل از آن‌ها از طریق ANOVA تجزیه واریانس شد و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح ۵ درصد محاسبه شد. برای مقایسه نتایج ماده‌ی اولیه و

مدیریت پسماندهای جامد کشاورزی یک نگرانی مشروع به ویژه برای دولت‌ها و دوستداران محیط‌زیست است. روش‌های نادرست دفع ضایعات کشاورزی می‌تواند باعث آسیب‌های زیست‌محیطی، خطرات بهداشتی و آلودگی آب شود. بنابراین، تبدیل ضایعات کشاورزی به محصول با ارزش و اقتصادی، یک مدیریت مناسب پسماند، سازگار با محیط‌زیست، مقرون به صرفه و پایدار است (Awogbemi and Kallon, 2022). میزان برداشت محصول سالانه در ایران به ۴۵ میلیون تن در هکتار می‌رسد که نیمی از آن در مراحل مختلف تولید تا مصرف از بین می‌رود.

ضایعات کشاورزی سرشار از مواد آلی و منبع مهم عناصر غذایی برای رشد گیاه هستند که می‌تواند از طریق فناوری‌های مختلف به محصولات با ارزش تبدیل شوند. ورمی کمپوست‌سازی روشی موثر برای تبدیل ضایعات کشاورزی به کودهای آلی است که باعث جلوگیری از مخاطرات زیست‌محیطی و حفاظت از کشاورزی پایدار می‌شود (Yang *et al.*, 2023). ورمی کمپوست یک فناوری امیدبخش برای تبدیل ضایعات جامد زیست تخریب‌پذیر به یک کود آلی و زیستی است که به وسیله‌ی گونه‌ای از کرم‌های خاکی (*Eisenia fetida*) انجام می‌شود (Hokmabadi, 2018). کودهای زیستی نتیجه‌ی آماده‌سازی‌های بیولوژیکی میکروارگانیسم‌های کارآمد هستند که با بهبود جذب مواد مغذی باعث رشد گیاه می‌شوند. آنها با تثبیت نیتروژن اتمسفر، حل شدن فسفر خاک و تحریک رشد گیاه، بهره‌وری خاک را افزایش می‌دهند. فناوری کود زیستی مدیریت مواد مغذی گیاهی را برای کشاورزی پایدار بهبود می‌بخشد (Kaur Maan and Garcha, 2021).

برای به دست آوردن استانداردهای قابل قبول در تولید ورمی کمپوست، استفاده از منابع غذایی مناسب برای افزایش تولید مثل و سرعت رشد کرم خاکی ضروری است. مزیت ورمی کمپوست نسبت به کمپوست حرارتی، افزایش میزان

حجمی ضایعات گیاهی، ۵ درصد حجمی کرم خاکی، و ۱۵ درصد حجمی کود گاوی (به عنوان ماده اولیه برای تغذیه و فعالیت کرم خاکی) در سبدهایی به ابعاد ۲۶×۳۳×۵۲ سانتی‌متری ریخته شد (Abdoli *et al.*, 2016). هر چند روز یکبار بسترها بررسی شدند تا رطوبت در سطح ۷۰ درصد و pH در سطح ۶/۸-۷/۲ حفظ شود. تیمارها در محیطی سایه و در دمای ۱۸-۲۵ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. خصوصیات شیمیایی کود گاوی به کار رفته در این مطالعه در جدول ۱ نمایش داده شده است.

ورمی‌کمپوست از آزمون t نمونه‌های جفت شده استفاده شد و سپس رسم نمودارها به کمک نرم‌افزار Excel 2013 انجام گرفت.

به منظور انجام پژوهش پس از برداشت محصول، ضایعات باقی‌مانده در مزرعه شامل اندام هوایی روناس سنبل‌الطیب، شیرین‌بیان، بابونه (به استثنای گل‌ها) و ضایعات پسته پوست گیری شده از مزارع تهیه شد.

ابتدا نمونه‌های گیاهی به مدت ۴۰ تا ۵۰ روز در دمای اتاق، هوا خشک و به قطعات ۲-۱ سانتی‌متری خرد شدند. سپس به منظور تهیه‌ی بستر هر ورمی‌کمپوست، ۸۰ درصد

جدول ۱- تجزیه خصوصیات شیمیایی کود گاوی  
Table 1. Chemical analysis of cow dung

| خصوصیات<br>Properties     | بی‌اچ<br>pH | هدایت الکتریکی<br>Eleterical<br>conductivity<br>(dS m <sup>-1</sup> ) | نیتروژن کل<br>Total<br>nitrogen<br>(g kg <sup>-1</sup> ) | فسفر کل<br>Total<br>Phosphorous<br>(g kg <sup>-1</sup> ) | پتاسیم کل<br>Total organic<br>carbon<br>(g kg <sup>-1</sup> ) | کربن آلی<br>organic<br>carbon<br>(g kg <sup>-1</sup> ) | کربن به<br>نیتروژن<br>C/N | کربن به<br>فسفر<br>C/P |
|---------------------------|-------------|---|--|--|---|--|---------------------------|------------------------|
| کود گاوی<br>Cow<br>Manure | 7.04        | 2.92  | 8.51   | 6.26   | 6.32  | 300.08   | 35.26                     | 47.93                  |

شاخص‌های رشدی کرم خاکی در هر بستر (Esmacili *et al.*, 2020) با استفاده از رابطه‌های (۱) و (۲) محاسبه شد:

$$GR = \frac{W_1 - W_2}{T_v} \quad (1)$$

$$SR = \frac{P_1}{P_2} \times 100 \quad (2)$$

در این رابطه‌ها GR نرخ رشد، W<sub>1</sub> و W<sub>2</sub> به ترتیب وزن اولیه و نهایی کرم‌ها را بر حسب گرم پیش و پس از تولید ورمی‌کمپوست، و T<sub>v</sub> مدت زمان فرآیند تولید ورمی‌کمپوست را بر حسب تعداد روز، SR نرخ زندمانی، P<sub>1</sub> و P<sub>2</sub> به ترتیب جمعیت اولیه و نهایی کرم‌ها پیش و پس از تولید ورمی‌کمپوست را نشان می‌دهد. سطح pH و EC با تهیه سوسپانسیون بقایای گیاهی-آب و ورمی‌کمپوست-آب به نسبت ۵:۱ وزنی-حجمی به ترتیب با pH متر و EC متر دیجیتال تعیین شد (Tajbakhsh *et*

شاخص کمی زمان برداشت ورمی‌کمپوست، رسیدن نسبت کربن به نیتروژن در بسترها به ۲۰-۳۰ بود (Fusilero *et al.*, 2013). لذا در طی فرآیند انجام ورمی‌کمپوست، هر ۳۰ روز یکبار از بسترها نمونه‌برداری و میانگین نتایج هر ماه گزارش شد. همچنین تغییر رنگ بسترها به قهوه‌ای تیره و کاهش ۵۰ درصدی حجم آن‌ها نیز به عنوان شاخص‌های فرعی و کیفی زمان برداشت مورد توجه قرار گرفت (Fusilero *et al.*, 2013).

با توجه به نتایج آزمایشگاهی، ورمی‌کمپوست‌های رسیده پس از ۳۰-۱۲۰ روز برداشت شدند. جداسازی کرم‌های خاکی به صورت دستی و با خشک کردن بسترها صورت گرفت (Patra *et al.*, 2022). در این روش، یک هفته قبل از برداشت ورمی‌کمپوست، بسترها آبیاری نشدند و کرم‌ها به عنوان جمعیت فعال با مش ۳ (۰/۲۶۵ اینچ) جدا و شمارش گردیدند.

فسفر به نیتروژن با توجه به مقادیر کربن آلی کل، نیتروژن کل و فسفر کل محاسبه شد.

### نتایج و بحث

مطابق با جداول ۲ و ۴، سطح pH برای همه تیمارها در بقایای گیاهی و ورمی کمپوست در سطح ۱ درصد معنی دار بود، همچنین مقدار pH اولیه در بقایای گیاهی از ۸/۱۲ تا ۴/۷۱ (جدول ۳)، و در ورمی کمپوست بین ۶/۲۵ تا ۴/۹۵ (جدول ۵)، متغیر بود.

(al., 2008). نیتروژن کل به روش کج‌دال، فسفر کل و پتاسیم کل پس از انجام احتراق خشک به ترتیب با اسپکتروفتومتر و شعله‌ی فلیم اندازه‌گیری شد (APHA, 2012). در روش احتراق خشک ۰/۲ گرم از نمونه‌های آسیاب شده داخل کروزه چینی ریخته شد و به مدت سه ساعت در داخل کوره الکتریکی با دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت (Kamegam et al., 2021). همچنین درصد کربن آلی به روش سوزاندن مواد آلی (Nelson et al., 1996)، نسبت کربن به نیتروژن و نسبت

جدول ۲- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) خصوصیات شیمیایی بقایای گیاهی

Table 2. ANOVA (mean square) of properties in plant residues

| منابع تغییرات<br>Source of<br>variation | درجه<br>آزادی<br>df | پی‌اچ<br>pH | هدایت<br>الکتریکی<br>Eleterical<br>conductivity | نیتروژن<br>کل<br>Total<br>nitrogen | فسفر کل<br>Total<br>phosphorous | پتاسیم کل<br>Total<br>potassium | کربن آلی<br>Organic<br>carbon | کربن به<br>نیتروژن<br>C/N | کربن به<br>فسفر<br>C/P |
|---|---------------------|-------------|---|------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|---------------------------|------------------------|
| بقایای گیاهی<br>Plant residue           | 4                   | 0.74**      | 5.40**  | 0.55**                             | 0.13**                          | 29.76**                         | 1519.87**                     | 58.81**                   | 877.33**               |
| خطا<br>Error                            | 10                  | 0.27        | 0.15  | 0.22                               | 0.10                            | 0.53                            | 3.12                          | 2.67                      | 1.07                   |
| ضریب تغییرات<br>CV                      | -                   | 0.08        | 0.18  | 0.90                               | 0.13                            | 0.18                            | 0.40                          | 0.07                      | 0.14                   |

\*\*\*: معنی‌داری در سطح ۱ درصد

\*\* : Significance at 1%

جدول ۳- مقایسه میانگین خصوصیات شیمیایی در بقایای گیاهی

Table 3. Comparison of mean chemical properties in plant residues

| ضایعات<br>گیاهی<br>Plant<br>residue | پی‌اچ<br>pH      | هدایت الکتریکی<br>Eleterical<br>conductivity<br>(dS m <sup>-1</sup> ) | نیتروژن<br>کل<br>Total<br>nitrogen<br>(g kg <sup>-1</sup> ) | فسفر کل<br>Total<br>phosphorous<br>(g kg <sup>-1</sup> ) | پتاسیم کل<br>Total<br>potassium (g<br>kg <sup>-1</sup> ) | کربن آلی<br>Organic<br>carbon<br>(g kg <sup>-1</sup> ) | کربن به<br>نیتروژن<br>C/N | کربن به<br>فسفر<br>C/P |
|-------------------------------------|------------------|---|---|--|--|--|---------------------------|------------------------|
| بابونه<br>Chamomile                 | 7.41<br>±0.40d   | 5.91 ±0.02b   | 10.43<br>±0.04d   | 10.22 ±0.10e   | 10.43 ±0.04d   | 485.53<br>±0.02b                                       | 46.55<br>±0.01a           | 133.02<br>±0.01a       |
| شیرین بیان<br>Licorice              | 8.06 ±<br>0.06ab | 4.67 ±0.07d   | 11.65<br>±0.10b   | 12.19 ±0.01a   | 11.65 ±0.10b   | 451.40<br>±0.04d                                       | 38.74<br>±0.01c           | 106.96<br>±0.01c       |
| روناس<br>Madder                     | 7.91<br>±0.18bc  | 7.94 ±0.10a   | 11.60<br>±0.02c   | 10.55 ±0.03c   | 11.60 ± 0.02c  | 438.13<br>±0.01e                                       | 37.76<br>±0.01e           | 129.62<br>±0.01b       |
| پسته<br>Pistachio                   | 7.85 ±<br>0.10c  | 5.13 ±0.14c   | 12.76<br>±0.02a   | 10.43 ±0.01d   | 12.76 ±0.02a   | 490.90<br>±0.01a                                       | 38.47<br>±0.01d           | 95.87<br>±0.01e        |
| سنبل الطیب<br>Valerian              | 8.12 ±<br>0.02a  | 4.17 ±0.04e   | 10.46 ±<br>0.02d  | 11.81 ±0.01b   | 10.46 ±0.02d   | 473.22<br>±0.01c                                       | 45.24<br>±0.01b           | 96.57<br>±0.01d        |

میانگین‌ها با حرف مشابه در هر ستون فاقد اختلاف معنی‌دار است

Means followed by the letter are not significantly different within a column

جدول ۴- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) خصوصیات شیمیایی ورمی کمپوست

Table 4. ANOVA (mean square) of properties in vermicompost

| منابع تغییرات<br>Source of variation | درجه آزادی<br>df | پی‌اچ<br>pH | هدایت الکتریکی<br>Eleterical conductivity | نیترژن کل<br>Total nitrogen | فسفر کل<br>Total phosphorous | پتاسیم کل<br>Total potassium | کربن آلی<br>Organic carbon | کربن به نیترژن<br>C/N | کربن به فسفر<br>C/P |
|--------------------------------------|------------------|-------------|---|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------|-----------------------|---------------------|
| ورمی کمپوست<br>Vermicompost          | 4                | 0.20**      | 5.53**                                    | 95.72**                     | 13.85**                      | 206.28**                     | 787.70**                   | 4.31**                | 1164.16**           |
| خطا<br>Error                         | 10               | 0.01        | 0.16                                      | 2.04                        | 0.36                         | 0.30                         | 0.10                       | 2.21                  | 0.44                |
| ضریب تغییرات<br>CV                   | -                | 0.03        | 0.19                                      | 0.32                        | 0.56                         | 0.33                         | 0.06                       | 0.50                  | 0.45                |

\*\* : معنی داری در سطح ۱ درصد

\*\* : Significance at 1%

جدول ۵- مقایسه میانگین خصوصیات شیمیایی در ورمی کمپوست

Table 5. Comparison of mean chemical properties in vermicompost

| ورمی کمپوست<br>Vermicompost | پی‌اچ<br>pH   | هدایت الکتریکی<br>Eleterical conductivity<br>(dS m <sup>-1</sup> ) | نیترژن کل<br>Total nitrogen<br>(g kg <sup>-1</sup> ) | فسفر کل<br>Total phosphorous<br>(g kg <sup>-1</sup> ) | پتاسیم کل<br>Total potassium<br>(g kg <sup>-1</sup> ) | کربن آلی<br>Organic carbon<br>(g kg <sup>-1</sup> ) | کربن به نیترژن<br>C/N | کربن به فسفر<br>C/P |
|-----------------------------|---------------|--|--|---|---|---|-----------------------|---------------------|
| بابونه<br>Chamomile         | 5.23 ± 0.02bc | 6.25 ± 0.04c   | 11.66 ± 0.11c  | 14.01 ± 0.01e   | 11.66 ± 0.11c   | 242.52 ± 0.01d                                      | 20.89 ± 0.01b         | 31.07 ± 0.01d       |
| شیرین بیان<br>Licorice      | 5.43 ± 0.01b  | 5.72 ± 0.56d   | 11.91 ± 0.02b  | 20.64 ± 0.47c   | 11.91 ± 0.02b   | 257.51 ± 0.02c                                      | 21.62 ± 0.01a         | 31.79 ± 0.01c       |
| روناس<br>Madder             | 4.95 ± 0.02c  | 8.78 ± 0.20a   | 11.66 ± 0.02c  | 19.92 ± 0.02d   | 11.66 ± 0.02c   | 214.55 ± 0.01e                                      | 18.40 ± 0.01e         | 17.60 ± 0.01e       |
| پسته<br>Pistachio           | 7.25 ± 0.02a  | 7.08 ± 0.14b   | 22.04 ± 0.10a  | 24.50 ± 0.56b   | 22.04 ± 0.10a   | 449.50 ± 0.10a                                      | 20.39 ± 0.01c         | 55.22 ± 0.01b       |
| سنبل الطیب<br>Valerian      | 5.41 ± 0.08b  | 5.61 ± 0.02d   | 22.07 ± 0.04a  | 36.34 ± 0.04a   | 22.07 ± 0.04a   | 443.12 ± 0.01b                                      | 20.07 ± 0.01d         | 66.03 ± 0.01a       |

میانگین‌ها با حرف مشابه در هر ستون فاقد اختلاف معنی دار است

Means followed by the letter are not significantly different within a column

جدول ۶- تجزیه و تحلیل داده‌های آماری بین ماده اولیه و ورمی کمپوست

Table 6. Statistical data analysis between raw material and vermicompost

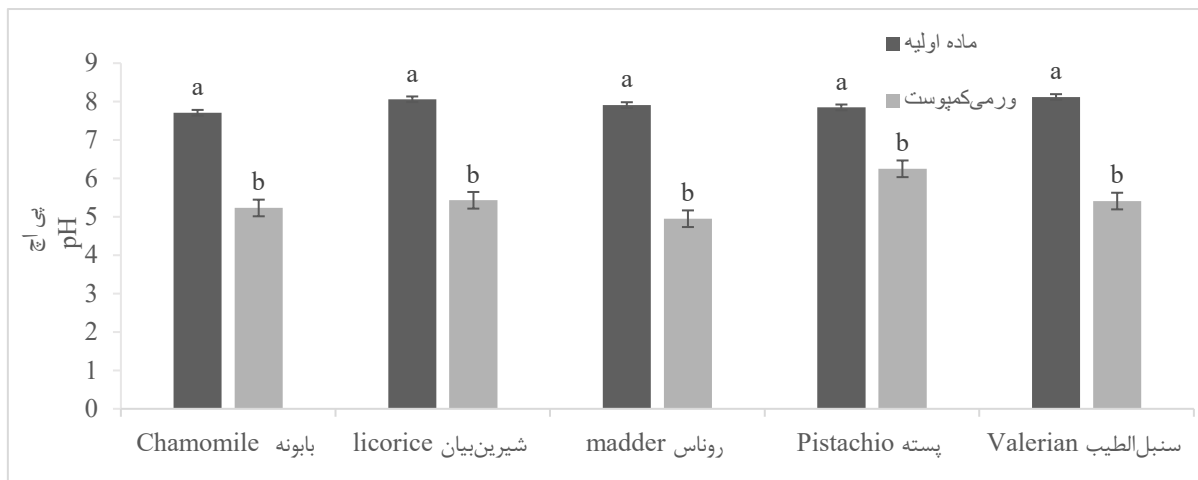
| پارامترها<br>Parameters                   | مقدار احتمال<br>p-value |                        |                 |                   |                        |
|---|-------------------------|------------------------|-----------------|-------------------|------------------------|
|   | بابونه<br>Chamomile     | شیرین بیان<br>Licorice | روناس<br>Madder | پسته<br>Pistachio | سنبل الطیب<br>Valerian |
| پی‌اچ<br>pH                               | 0.003                   | <0.001                 | 0.009           | <0.001            | 0.007                  |
| هدایت الکتریکی<br>Eleterical conductivity | <0.001                  | 0.005                  | <0.001          | 0.017             | 0.003                  |
| نیترژن کل<br>Total nitrogen               | <0.001                  | 0.005                  | <0.01           | 0.015             | <0.001                 |
| فسفر کل<br>Total phosphorous              | <0.001                  | <0.001                 | <0.001          | 0.008             | 0.013                  |
| پتاسیم کل<br>Total potassium              | <0.001                  | <0.001                 | <0.001          | <0.001            | <0.001                 |
| کربن آلی<br>Organic carbon                | <0.001                  | 0.003                  | <0.001          | <0.001            | <0.001                 |
| کربن به نیترژن<br>C/N                     | <0.001                  | 0.005                  | <0.001          | <0.001            | <0.001                 |
| کربن به فسفر<br>C/P                       | <0.001                  | 0.035                  | <0.001          | <0.001            | <0.001                 |

سطح معنی داری در P\_0.05 بود

The significant level was at P\_0.05

روند کاهشی داشته است و این کاهش در روناس بیشتر از سایر تیمارها گزارش شد.

جدول ۶ نشان داد که تغییرات pH در همه‌ی تیمارها از نظر آماری در سطح ۵ درصد معنی‌دار بود. شکل ۱، تغییرات pH را نشان می‌دهد، در طول فرآیند ورمی‌کمپوست سطح pH



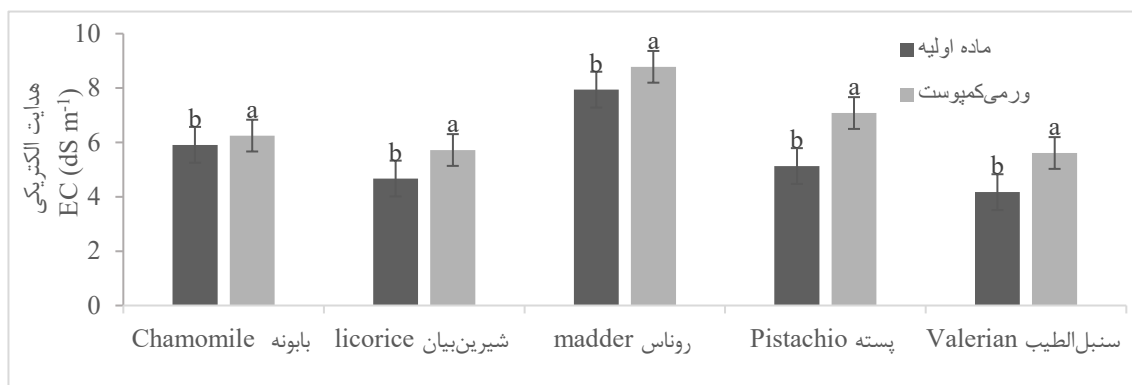
شکل ۱- تغییرات pH در ماده‌ی اولیه و ورمی‌کمپوست تیمارهای مختلف  
 Fig. 1- pH changes in raw material and vermicompost of different treatments

تیمارها در بقایای گیاهی (جدول ۲) و ورمی‌کمپوست (جدول ۴) در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود. بیشترین و کمترین EC در ضایعات روناس و سنبل‌الطیب به ترتیب، ۷/۹۴ و ۴/۱۷ دسی‌زیمنس بر متر گزارش شد (جدول ۳). سطح EC در ورمی‌کمپوست‌ها از ۸/۷۸ تا ۵/۷۲ دسی‌زیمنس بر متر متغیر بود (جدول ۵). در این مطالعه بالاترین و پایین‌ترین سطح هدایت الکتریکی به ترتیب برای ورمی‌کمپوست حاصل از ضایعات روناس و شیرین‌بیان ثبت شد. همچنین ورمی‌کمپوست شیرین‌بیان و سنبل‌الطیب از نظر سطح هدایت الکتریکی با یکدیگر اختلاف معنی‌داری نداشتند.

جدول ۶ نشان داد که تغییرات EC در همه‌ی تیمارها از نظر آماری در سطح ۵ درصد معنی‌دار بود. با توجه به مقایسه میانگین در شکل ۲، بیشترین سطح EC در نتایج پسته مشاهده شد. همچنین ضایعات سنبل‌الطیب پس از فرآیند ورمی‌کمپوست با ۱/۹۵ دسی‌زیمنس بر متر افزایش نسبت به بستر اولیه، بیشترین تغییرات EC را داشت (شکل ۲).

این مطالعه نشان داد که pH بستر اولیه با پیشرفت فرآیند ورمی‌کمپوست به سمت اسیدی شدن پیش می‌رود، این حالت می‌تواند به دلیل تولید دی‌اکسیدکربن و اسیدهای آلی توسط عوامل میکروبی و کرم خاکی گزارش شود (Tajbakhsh *et al.*, 2008). نیتروژن معدنی تابعی از بازه تغییرات pH است. با کاهش سطح pH در طی فرآیند ورمی‌کمپوست، محتوای نیتروژن در چربی‌ها و پروتئین‌های گیاهی به صورت تبخیر آمونیاک آزاد می‌شود و این مولکول‌ها به سرعت تجزیه می‌شوند (Garcia-Sanchez *et al.*, 2017). تبدیل کمپوست مصرف شده قارچ به ورمی‌کمپوست نشان داد که سطح pH در محصول نهایی ۸ درصد کاهش یافت. در مطالعات دیگر نیز نتایج مشابهی یافت شد و سطح pH در ورمی‌کمپوست حاصل از کمپوست مصرف شده‌ی قارچ و ضایعات انار نسبت به بستر اولیه کاهش یافت (A'ali *et al.*, 2017). همچنین تبدیل ضایعات موز به ورمی‌کمپوست باعث کاهش سطح pH در محصول نهایی شد (Mago *et al.*, 2021).

تحلیل واریانس نشان می‌دهد که سطح EC برای همه



شکل ۲- تغییرات هدایت الکتریکی در ماده‌ی اولیه و ورمی کمپوست تیمارهای مختلف

Fig. 2- EC changes in raw material and vermicompost of different treatments

تیمارها در بقایای گیاهی (جدول ۲) و ورمی کمپوست (جدول ۴) در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود. نتایج مقایسه میانگین‌ها، بیشترین نیتروژن کل را برای ضایعات پسته نشان داد و ضایعات بابونه و سنبل الطیب کمترین سطوح را داشتند (جدول ۳). اما ورمی کمپوست سنبل الطیب و پسته به ترتیب با ۲۲/۰۷ و ۲۲/۰۴ گرم بر کیلوگرم، بالاترین نیتروژن کل را در بین تیمارها داشت. کمترین نیتروژن کل نیز برای ورمی کمپوست روناس و بابونه به ترتیب ۱۱/۶۹ و ۱۱/۶۶ گرم بر کیلوگرم گزارش شد (جدول ۵).

جدول ۶ نشان داد که تغییرات نیتروژن کل در همه‌ی تیمارها از نظر آماری در سطح ۵ درصد معنی‌دار بود. شکل ۳، نشان می‌دهد که به دنبال روند تولید ورمی کمپوست، نیتروژن کل در بسترها افزایش یافت. ورمی کمپوست سنبل الطیب با ۱۱/۶۱ واحد اختلاف نسبت به ماده اولیه گیاهی بیشترین نیتروژن کل را در بین تیمارها داشت.

افزایش EC در ورمی کمپوست به غلظت نمک‌های معدنی و کاهش مواد آلی بستر وابسته است. در طی فرآیند ورمی کمپوست، اشکال نامحلول نمک‌های معدنی محلول می‌شوند و افزایش می‌یابند. این مطالعه نشان داد که بستر بقایای روناس با EC دارای سطح شوری بالاتری در مقایسه با سایر بسترهای آلی بود. روناس یک گیاه شورپسند است که با که با خاک‌های شور قلیایی سازگار شده است. برخی پژوهش‌ها نشان داده است که غلظت نمک در اندام هوایی روناس بیشتر از ریشه است (Biruti et al., 2010)، لذا ممکن است به دلیل توانایی بالای ریشه‌های گیاه روناس در جذب سدیم از خاک‌های شور، میزان شوری ورمی کمپوست تهیه شده از آن نیز افزایش یافته باشد. نتایج این پژوهش با یافته‌های به دست آمده از ورمی کمپوست حاصل از ضایعات گیاه سیترنولا مطابقت داشت (Banakar et al., 2013). با توجه به جدول میانگین مربعات، نیتروژن کل برای همه



شکل ۳- تغییرات نیتروژن کل در ماده‌ی اولیه و ورمی کمپوست تیمارهای مختلف

Fig. 3- Total nitrogen changes in raw material and vermicompost of different treatments

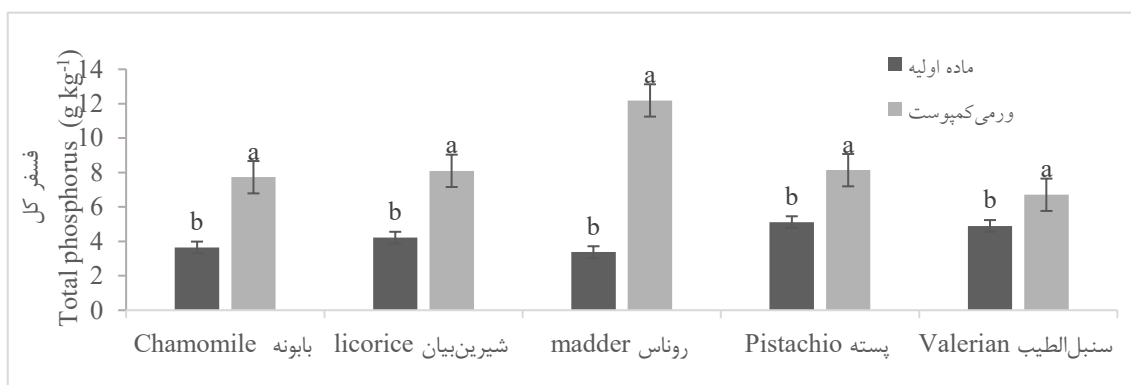


تیمارهای مختلف نیز نشان داد که بیشترین و کمترین سطح فسفر کل مربوط به ضایعات پسته و روناس به ترتیب ۵/۱۲ و ۳/۳۸ گرم بر کیلوگرم گزارش شد (جدول ۳). فسفر کل در ورمی کمپوست تهیه شده از بقایای روناس با غلظت ۱۲/۱۹ گرم بر کیلوگرم به طور قابل توجهی بیشتر از سایر تیمارها بود و کمترین سطح فسفر کل برای ورمی کمپوست سنبل الطیب به دست آمد (جدول ۴).

جدول ۶ نشان داد که تغییرات فسفر کل در همه‌ی تیمارها از نظر آماری در سطح ۵ درصد معنی دار بود. گزارش شکل ۴، نشان می‌دهد که فسفر کل در ورمی کمپوست همه‌ی تیمارها بیشتر از بقایای گیاهی بود و ورمی کمپوست روناس با ۸/۸۰ گرم بر کیلوگرم افزایش نسبت به بقایای روناس به عنوان بهترین تیمار از نظر بهبود سطح کمیت فسفر شناخته شد.

محتوای نیتروژن در تمام بسترها با تجزیه مواد اولیه، افزایش یافت. افزایش غلظت نیتروژن و آمونیوم ناشی از کانی‌سازی نیتروژن است. علاوه بر این، از جمله عوامل دیگری که بر سطح نیتروژن در بستر نهایی تأثیر گذار است، ترشح مخاط، هورمون‌های محرک رشد، مواد حاوی نیتروژن و آنزیم‌های ترشح شده توسط کرم‌های خاکی است (Hong *et al.*, 2011). با توجه به برخی نتایج در طی انجام فرآیند ورمی کمپوست از ضایعات ذرت، میزان نیترات بستر افزایش و آمونیوم کاهش یافت و درصد نیتروژن کل در محصول نهایی (ورمی کمپوست) با کاربرد ۴۰٪ این ضایعات بیشتر شد (Kharazi *et al.*, 2020).

فسفر کل برای بقایای گیاهی (جدول ۲) و ورمی کمپوست (جدول ۴) در سطح ۱ درصد معنی دار بود. مقایسه میانگین



شکل ۴- تغییرات فسفر کل در ماده‌ی اولیه و ورمی کمپوست تیمارهای مختلف  
Fig. 4- Total phosphorus changes in raw material and vermicompost of different treatments

و ورمی کمپوست (جدول ۴) در سطح ۱ درصد معنی دار بود. بیشترین و کمترین سطح پتاسیم کل در ضایعات شیرین بیان و بابونه به ترتیب ۱۲/۱۸ و ۱۰/۲۲ گرم بر کیلوگرم گزارش شد (جدول ۳). در بررسی نتایج ورمی کمپوست‌ها، پتاسیم کل در سنبل الطیب، ۳۶/۳۴ گرم بر کیلوگرم به دست آمد که بالاترین سطح را در بین همه‌ی تیمارها داشت (جدول ۵).

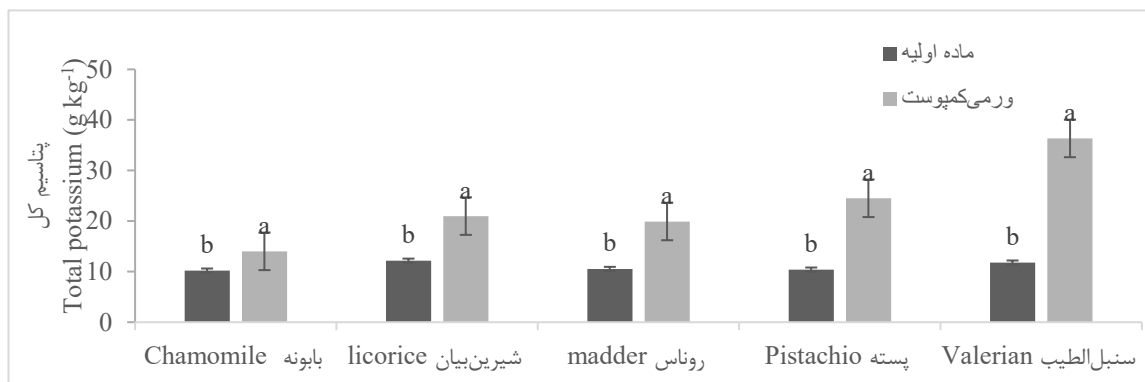
جدول ۶ نشان داد که تغییرات پتاسیم کل در همه‌ی تیمارها از نظر آماری در سطح ۵ درصد معنی دار بود. مقایسه تغییرات پتاسیم کل در ماده اولیه و ورمی کمپوست نشان می‌دهد که محتوای پتاسیم کل در ورمی کمپوست همه

نوع و کیفیت مواد اولیه مورد استفاده در آزمایش و همچنین مدت زمان تولید ورمی کمپوست، از عوامل اثرگذار بر تغییر غلظت فسفر در بسترهای مختلف است. وجود آنزیم فسفاتاز در فرآیند هضم کرم خاکی، فرم نامحلول را به فسفر محلول تبدیل می‌کند. دکا و همکاران (۲۰۱۱) با مطالعه بر روی تولید کمپوست و ورمی کمپوست از برخی بقایای گیاهان معطر اختلاف معنی داری را در سطح ۵ درصد گزارش دادند. این گزارشات حاکی از آن بود که سطح نیتروژن و فسفر کل در ورمی کمپوست به ترتیب ۱/۹ درصد و ۴/۱ درصد بیشتر از کمپوست عارض می‌شود.

پتاسیم کل برای همه تیمارها در بقایای گیاهی (جدول ۲)

که فرآیندهای شیمیایی اثر زیادی بر بهبود سطح پتاسیم کل در ورمی کمپوست بابونه در مقایسه با سایر تیمارها نداشت.

تیمارها بیشتر از ماده اولیه گیاهی بود اما بهترین نتیجه با ۲۴/۵۳ گرم بر کیلوگرم افزایش در تیمار سنبل‌الطیب مشاهده شد (شکل ۵). همچنین می‌توان نتیجه‌گیری کرد



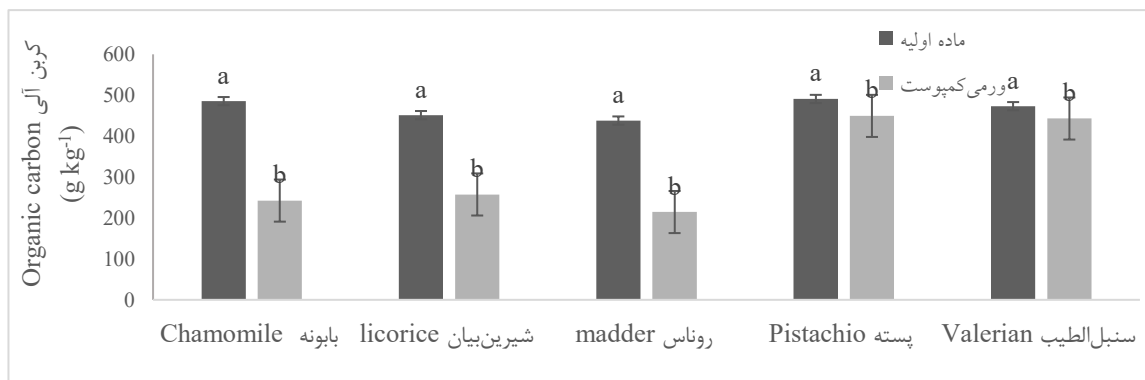
شکل ۵- تغییرات پتاسیم کل در ماده‌ی اولیه و ورمی کمپوست تیمارهای مختلف

Fig. 5- Total potassium changes in raw material and vermicompost of different treatments

به ترتیب ۴۳۸/۱۳ و ۴۹۰/۹۰ گرم بر کیلوگرم به دست آمد (جدول ۳). این در حالی است که پس از تولید ورمی کمپوست نیز بیشترین و کمترین سطح کربن آلی برای ورمی کمپوست پسته و روناس به ترتیب ۴۴۹/۵۰ و ۲۱۴/۵۵ گرم بر کیلوگرم حاصل شد (جدول ۵). جدول ۶ نشان داد که تغییرات کربن آلی در همه‌ی تیمارها از نظر آماری در سطح ۵ درصد معنی‌دار بود. مقایسه تغییرات سطح کربن آلی در شکل ۶، نشان می‌دهد که کربن آلی در همه‌ی تیمارها با پیشرفت ورمی کمپوست به تدریج روند کاهشی داشت و سرعت این روند به صورت سنبل‌الطیب > پسته > شیرین بیان > روناس > بابونه انجام شده است.

وجود آنزیم‌های گوارشی و میکروارگانیسم‌های مختلف در دستگاه گوارش کرم‌خاکی باعث افزایش سطح پتاسیم در ورمی کمپوست می‌شود (Rupani *et al.*, 2017). با بررسی امکان فرآوری ضایعات چغندر قند به ورمی کمپوست گزارش شد که پتاسیم کل در محصول نهایی ۱۶ گرم بر کیلوگرم نسبت به بستر اولیه افزایش یافت و این تغییر با استفاده از فناوری ورمی کمپوست بیشتر از سایر روش‌های فرآوری بود (Honarvar *et al.*, 2012).

نتایج تجزیه واریانس بقایای گیاهی (جدول ۲) و ورمی کمپوست (جدول ۴) در سطح ۱ درصد معنی‌دار شد. با توجه به مقایسه میانگین ضایعات گیاهان مختلف، بیشترین و کمترین کربن آلی برای ضایعات پسته و روناس



شکل ۶- تغییرات کربن آلی در ماده‌ی اولیه و ورمی کمپوست در تیمارهای مختلف

Fig. 6- Total organic carbon changes in raw material and vermicompost of different treatments

طول این فرآیند تا زمان برداشت افزایش می‌یابد. تجزیه ضایعات شیرین‌بیان با سرعت بیشتری انجام شد و ورمی‌کمپوست حاصل شده پس از ۳۰ روز با نسبت نیتروژن به کربن ۲۱/۶۲ به شاخص برداشت رسید، گزارش شد (جدول ۸). طولانی‌ترین مدت زمان تولید ورمی‌کمپوست مربوط به ضایعات بابونه بود که پس از ۱۲۰ روز عدد نسبت نیتروژن به کربن، ۲۰/۷۹ ثبت شد. سایر تیمارها پس از ۶۰ روز به شاخص برداشت رسیدند (جدول ۷).  
بیشترین و کمترین نسبت نیتروژن به کربن به ترتیب در بقایای بابونه و روناس گزارش شد (جدول ۳). پس از فرآیند ورمی‌کمپوست نسبت نیتروژن به کربن در روناس کمتر از سایر تیمارها باقی ماند و بیشترین نسبت نیز برای شیرین‌بیان ثبت شد (جدول ۵).

با گذر زمان بستر ورمی‌کمپوست حالت چسبناک و ژله‌ای پیدا می‌کند، در نتیجه فرآیند هوادهی با مشکل مواجه شده و توده‌هایی با فرآیندهای تجزیه متفاوت ایجاد می‌شود (Rostami, 2011). کاهش کربن آلی به دلیل فعالیت همزمان کرم‌های خاکی و سایر میکروارگانیسم‌ها اتفاق می‌افتد که نشان دهنده متعادل‌سازی مواد مغذی به‌وسیله کانی‌سازی است (Negi and Suthar, 2013).

جدول تجزیه واریانس، نسبت نیتروژن به کربن را برای بقایای گیاهی (جدول ۲) و ورمی‌کمپوست (جدول ۴) در سطح ۱ درصد معنی‌دار نشان داد. مطابق با جداول ۷ تا ۱۱، مدت زمان فرآیند ورمی‌کمپوست تا رسیدن به شاخص برداشت را نشان می‌دهد. درصد کربن آلی و نسبت نیتروژن به کربن به دنبال تولید ورمی‌کمپوست کاهش یافته اما نیتروژن کل در

جدول ۷- روند پیشرفت فرآیند ورمی‌کمپوست در بستر بابونه  
Table 7. The progress of vermicomposting in chamomile substrate

| بسترها<br>Substrate                                   | اولیه<br>Initial | ۳۰ روز<br>30 days | ۶۰ روز<br>60 days | ۹۰ روز<br>90 (days) | ۱۲۰ روز<br>120 (days) | برداشت<br>Harvest |
|---|------------------|-------------------|-------------------|---------------------|-----------------------|-------------------|
| بابونه Chamomile                                      |                  |                   |                   |                     |                       |                   |
| کربن آلی<br>Organic carbon<br>(g kg <sup>-1</sup> )   | 485.53±0.02      | 480.15±0.01       | 374.28±0.29       | 363.20±0.50         | 242.52±0.01           |                   |
| نیتروژن کل<br>Total nitrogen<br>(g kg <sup>-1</sup> ) | 10.43±0.04       | 10.98±0.08        | 11.32 ±0.12       | 11.48±0.42          | 11.66±0.02            |                   |
| کربن به نیتروژن<br>C/N                                | 46.55 ±0.01      | 43.72±0.01        | 33.06±0.01        | 31.63±0.01          | 20.79±0.01            | 20.79±0.01        |

جدول ۸- روند پیشرفت فرآیند ورمی‌کمپوست در بستر شیرین‌بیان  
Table 8. The progress of vermicomposting in licorice substrate

| بسترها<br>Substrates                                  | اولیه<br>Initial | ۳۰ روز<br>30 days | ۶۰ روز<br>60 days | ۹۰ روز<br>90 (days) | ۱۲۰ روز<br>120 (days) | برداشت<br>Harvest |
|---|------------------|-------------------|-------------------|---------------------|-----------------------|-------------------|
| شیرین‌بیان Licorice                                   |                  |                   |                   |                     |                       |                   |
| کربن آلی<br>Organic carbon<br>(g kg <sup>-1</sup> )   | 451.40±0.04      | 257.51±0.08       | —                 | —                   | —                     | —                 |
| نیتروژن کل<br>Total nitrogen<br>(g kg <sup>-1</sup> ) | 11.65±0.01       | 11.91 ±0.02       | —                 | —                   | —                     | —                 |
| کربن به نیتروژن<br>C/N                                | 38.74±0.01       | 21.62±0.01        | —                 | —                   | —                     | 21.62±0.01        |

جدول ۹- روند پیشرفت فرآیند ورمی کمپوست در بستر روناس

Table 9. The progress of vermicomposting in madder substrate

| بسترها<br>Substrates                                   | اولیه<br>Initial | ۳۰ روز<br>30 days | ۶۰ روز<br>60 days | ۹۰ روز<br>90 (days) | ۱۲۰ روز<br>120 (days) | برداشت<br>Harvest |
|--|------------------|-------------------|-------------------|---------------------|-----------------------|-------------------|
| روناس Madder   |                  |                   |                   |                     |                       |                   |
| کربن آلی کل<br>Organic carbon<br>(g kg <sup>-1</sup> ) | 438.13±0.01      | 388.17±0.12       | 214.55±0.01       | —                   | —                     | —                 |
| نیتروژن کل<br>Total nitrogen<br>(g kg <sup>-1</sup> )  | 11.60±0.02       | 11.63±0.32        | 11.66 ±0.02       | —                   | —                     | —                 |
| کربن به نیتروژن<br>C/N                                 | 37.76±0.01       | 33.37±0.01        | 18.40±0.01        | —                   | —                     | 18.40±0.01        |

جدول ۱۰- روند پیشرفت فرآیند ورمی کمپوست در بستر پسته

Table 10. The progress of vermicomposting in pistachio substrate

| بسترها<br>Substrates                                   | اولیه<br>Initial | ۳۰ روز<br>30 days | ۶۰ روز<br>60 days | ۹۰ روز<br>90 (days) | ۱۲۰ روز<br>120 (days) | برداشت<br>Harvest |
|--|------------------|-------------------|-------------------|---------------------|-----------------------|-------------------|
| پسته Pistachio   |                  |                   |                   |                     |                       |                   |
| کربن آلی کل<br>Organic carbon<br>(g kg <sup>-1</sup> ) | 490.90±0.01      | 470.81±1.11       | 449.50±0.01       | —                   | —                     | —                 |
| نیتروژن کل<br>Total nitrogen<br>(g kg <sup>-1</sup> )  | 12.76±0.02       | 15.05±0.10        | 22.04±0.10        | —                   | —                     | —                 |
| کربن به نیتروژن<br>C/N                                 | 38.47±0.01       | 31.28±0.01        | 20.39±0.01        | —                   | —                     | 20.39±0.01        |

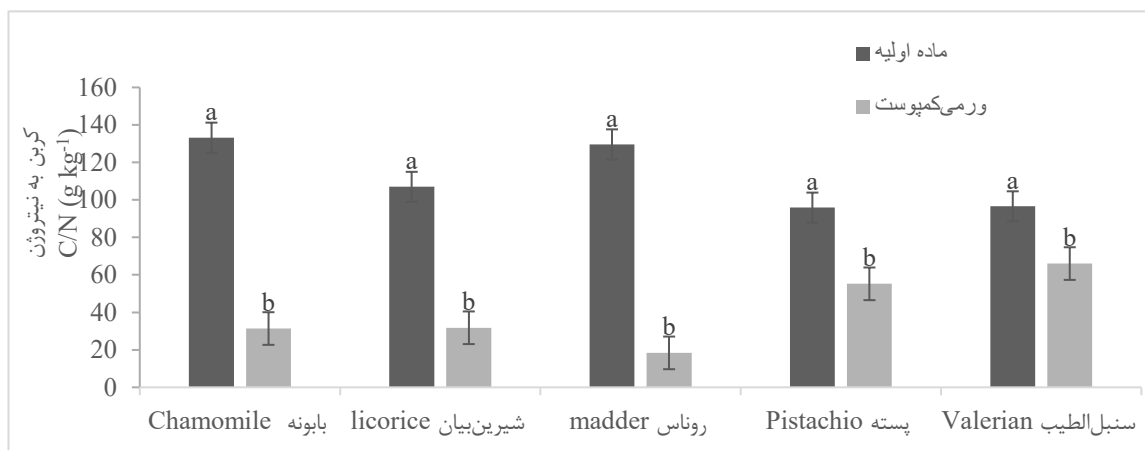
جدول ۱۱- روند پیشرفت فرآیند ورمی کمپوست در بستر سنبل الطیب

Table 11. The progress of vermicomposting in valerian substrate

| بسترها<br>Substrates                                   | اولیه<br>Initial | ۳۰ روز<br>30 days | ۶۰ روز<br>60 days | ۹۰ روز<br>90 (days) | ۱۲۰ روز<br>120 (days) | برداشت<br>Harvest |
|--|------------------|-------------------|-------------------|---------------------|-----------------------|-------------------|
| سنبل الطیب Valerian                                    |                  |                   |                   |                     |                       |                   |
| کربن آلی کل<br>Organic carbon<br>(g kg <sup>-1</sup> ) | 473.22±0.01      | 461.22±0.42       | 443.13±0.10       | —                   | —                     | —                 |
| نیتروژن کل<br>Total nitrogen<br>(g kg <sup>-1</sup> )  | 10.46±0.02       | 13.42±0.04        | 22.07±0.044       | —                   | —                     | —                 |
| کربن به نیتروژن<br>C/N                                 | 45.24±0.01       | 34.36 ±0.01       | 20.07±0.01        | —                   | —                     | 20.07±0.01        |

ورمی کمپوست است. در مطالعه حاضر محدوده نسبت نیتروژن به کربن تیمارها با گذشت زمان کاهش یافته است (شکل ۷).

جدول ۶ نشان داد که تغییرات نسبت کربن به نیتروژن در همه تیمارها از نظر آماری در سطح ۵ درصد معنی دار بود. نسبت نیتروژن به کربن منعکس کننده طیف تغییر غلظت کربن و نیتروژن مواد زیست تخریب پذیر در طی فرآیند

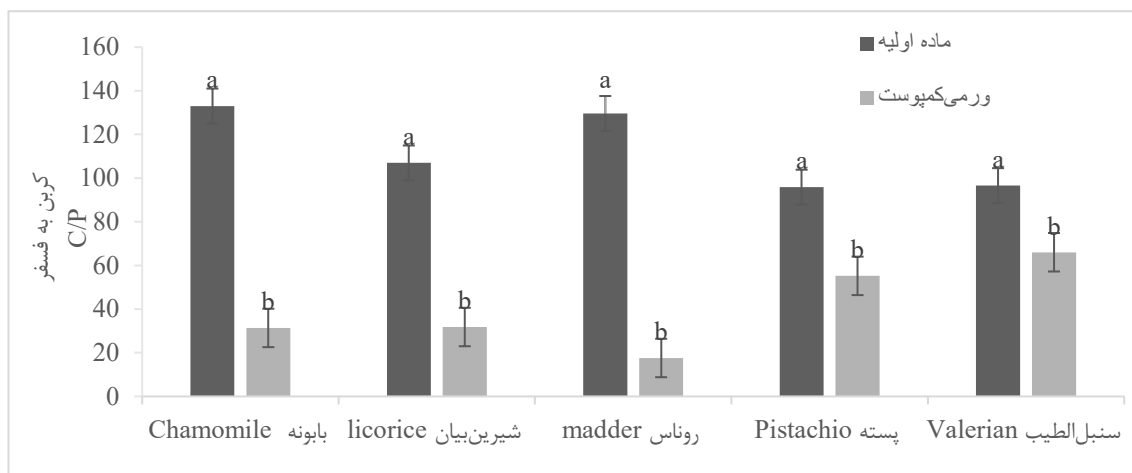


شکل ۷- تغییرات نسبت کربن به نیتروژن در ماده‌ی اولیه و ورمی کمپوست در تیمارهای مختلف

Fig. 7- C/N ratio changes in raw material and vermicompost of different treatments

(جدول ۲) و ورمی کمپوست (جدول ۴) در سطح ۱ درصد معنی دار بود. مقایسه میانگین نتایج مختلف نشان داد که نسبت کربن به فسفر در بقایای بابونه بیشتر از سایر تیمارها بود و کمترین نسبت کربن به فسفر در ضایعات پسته گزارش شد (جدول ۳). نتایج نشان داد که نسبت کربن به فسفر در ورمی کمپوست تیمارهای متفاوت، اختلاف معنی داری با یکدیگر داشت. ورمی کمپوست سنبل الطیب با عدد ۶۶/۰۳ بیشتر از سایر تیمارها بود و کمترین نسبت کربن به فسفر برای ورمی کمپوست روناس، ۱۷/۶۰ محاسبه شد (جدول ۵). جدول ۶ نشان داد که تغییرات نسبت کربن به فسفر در همه تیمارها از نظر آماری در سطح ۵ درصد معنی دار بود. با توجه به شکل ۸، نسبت کربن به فسفر در بقایای گیاهی بین ۱۳۳/۰۲-۹۵/۸۷ متغیر بود که به محدوده‌ی ۶۶/۰۳-۱۷/۶۰ در ورمی کمپوست آماده‌ی برداشت کاهش یافت. به دنبال فرآیند ورمی کمپوست‌سازی بیشترین و کمترین سرعت کاهش نسبت کربن به فسفر به ترتیب در تیمار روناس و سنبل الطیب مشاهده شد.

تغییر نسبت کربن به نیتروژن به خصوصیات شیمیایی بستر اولیه (زیست توده تخریب پذیر و کود دامی) ورمی کمپوست و شرایط رشدی و تولید مثل کرم خاکی بستگی دارد. کرم خاکی با تجزیه برخی ضایعات گیاهی نسبت کربن به نیتروژن را به کمتر از ۲۰ کاهش می‌دهد (Dume et al., 2023). رشد سریع و افزایش جمعیت کرم‌خاکی در طول فرآیند ورمی کمپوست باعث کاهش نسبت کربن به نیتروژن می‌شود که کاهش کربن غیرآلی را نیز در پی خواهد داشت (Bingyu et al., 2024). برخی از محققان گزارش کردند که گیاهان دارویی و ضایعات پسته منبع غنی از ترکیبات فنلی هستند که با پوسیدگی بقایای گیاهی، ترکیبات فنلی کاهش می‌یابد اما به طور کامل حذف نمی‌شود. غلظت این ترکیبات ممکن است بر سرعت رشد گونه‌ی *E. fetida* تأثیرگذار باشد (Gavanbakht et al., 2021). نتایج نسبت کربن به نیتروژن حاصل از این مطالعه با نتایج اسماعیلی و همکاران (۲۰۲۰) بر روی تولید ورمی کمپوست از ضایعات پسته مطابقت داشت. نسبت کربن به فسفر برای همه تیمارها در بقایای گیاهی



شکل ۸- تغییرات نسبت کربن به فسفر در ماده‌ی اولیه و ورمی کمپوست در تیمارهای مختلف

Fig. 8- C/P ratio changes in raw material and vermicompost of different treatments

(Rini *et al.*, 2020) مطابقت داشت.

با توجه به جدول ۱۲ نتایج تجزیه واریانس نرخ رشد در سطح ۱ درصد و میانگین وزن نهایی، وزن خالص، جمعیت نهایی و درصد زنده‌مانی کرم‌ها در سطح ۵ درصد معنی‌دار بود. تغییر نرخ رشد کرم بالغ و نابالغ در همه بسترها بین ۱/۹-۴۶/۰۲ مشاهده شد. همچنین وزن خالص کرم‌ها در تمامی تیمارها بیشتر از بستر بابونه بود (جدول ۱۳).

افزایش سطح فسفر در طول تجزیه ترکیبات آلی منجر به کاهش محتوای کربن به فسفر شد. کاهش نسبت کربن به نیتروژن و کربن به فسفر به افزایش نیتروژن کل و فسفر کل در طول فرآیند تولید ورمی کمپوست و افزودن مقدار کود گاوی بستگی دارد. نتایج این مطالعه با نتایج تولید ورمی کمپوست از کود دامی از نژادهای مختلف گاوهای بومی (Balachandar *et al.*, 2021) و ضایعات علف‌های هرز

جدول ۱۲- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) شاخص‌های رشدی کرم *E. fetida* در بسترهای مختلف

Table 12. Variance analysis (mean square) *E. fetida* growth index in different substrates

| منابع تغییرات<br>Source of variation           | درجه آزادی<br>df | میانگین وزن اولیه<br>Primary weight mean | میانگین وزن نهایی<br>Terminal weight mean | وزن خالص<br>Net weight gained | نرخ رشد<br>Growth rate | جمعیت اولیه کرم‌ها<br>Primary worms population | جمعیت نهایی کرم‌ها<br>Terminal worms population | درصد زنده‌مانی<br>Survival rate |
|--|------------------|--|---|-------------------------------|------------------------|--|---|---------------------------------|
| بسترهای ورمی کمپوست<br>Vermicompost substrates | 4                | 61.43ns                                  | 478.93*                                   | 381.56*                       | 23.48**                | 456.66ns                                       | 1044.33*  | 918.09*                         |
| خطا<br>Error                                   | 10               | 14.80                                    | 19.13                                     | 16.43                         | 0.13                   | 14.71  | 20.03   | 20.01                           |
| ضریب تغییرات<br>CV                             |                  | 0.20                                     | 0.90                                      | 0.16                          | 0.59                   | 0.06   | 0.80  | 0.09                            |

ns و \*\* و \* به ترتیب معنی‌داری در سطح ۵ درصد، ۱ درصد و عدم معنی‌داری

\*, \*\* and ns: Significance at 1%

جدول ۱۳- شاخص‌های رشدی کرم *E.fetida* در بسترهای مختلف

Table 13. *E. fetida* growth index in different substrates

| بسترها<br>Substrates   | میانگین وزن پایانی<br>Terminal weight mean<br>(g) | وزن خالص<br>Net weight gained (g) | نرخ رشد<br>Growth<br>rate | جمعیت پایانی کرم‌ها<br>Terminal worms<br>population | درصد زنده‌مانی<br>Survival rate<br>(%) |
|------------------------|---|-----------------------------------|---------------------------|---|--|
| بابونه<br>Chamomile    | 422.66±57.4c                                      | 177.66±48.9b                      | 1.46±0.4d                 | 2113.13±2.0c  | 197.51±23.6b                           |
| شیرین‌بیان<br>Licorice | 523.33±25.1a                                      | 270.66±19a                        | 9.02±0.6a                 | 2566.66±57.7a                                       | 234.17±17a                             |
| روناس<br>Madder        | 498±13.1ab  | 250.33±7.5a                       | 4.17±0.1b                 | 2490±65.5ab   | 230.33±10.4a                           |
| پسته<br>Pistachio      | 513.33±20.8bc                                     | 256.0±12a                         | 3.31±0.0c                 | 2276.66±25.1bc                                      | 197.26±6.3b                            |
| سنبل‌الطیب<br>Valerian | 496.66±20.8ab                                     | 241.66±16a                        | 4.02±0.2b                 | 2483.33±10.4ab                                      | 215.96±2.6ab                           |

سایر تیمارها بود. در طول فرآیند ورمی‌کمپوست نسبت کربن به نیتروژن و کربن به فسفر به تدریج کاهش یافت. این نسبت‌ها در بستر ضایعات روناس به ترتیب ۱۸/۴۰ و ۱۷/۶۰ گزارش شد که بهتر از سایر تیمارها بود. همچنین بیشترین درصد زنده‌مانی و نرخ رشد کرم‌خاکی در بستر ضایعات شیرین‌بیان به ترتیب ۲۳۴/۱۷ و ۹/۰۲ حاصل شد. اگرچه فرآیند تولید ورمی‌کمپوست در بابونه نسبت به سایر تیمارها طولانی‌تر بود، اما این مطالعه نشان داد که تبدیل زیستی ضایعات گیاهان دارویی به ورمی‌کمپوست امکان‌پذیر است. اگرچه سطح هدایت الکتریکی در ورمی‌کمپوست حاصل از ضایعات روناس و پسته نسبت به سایر تیمارها بیشتر بود اما این ویژگی می‌تواند به عنوان یک تنش ملایم در تهیه بستر کشت گیاهان دارویی و افزایش ترکیبات با ارزش مونوترپنوئیدی در آن‌ها اثربخش باشد.

### سپاسگزاری

بدین وسیله از شرکت داروسازی گل‌دارو جهت تهیه ضایعات گیاهان دارویی تشکر به عمل می‌آوریم. لازم به ذکر است در راستای انجام این پژوهش هیچ حمایت مالی از سوی اشخاص حقیقی یا حقوقی دریافت نشده است.

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که جمعیت کرم‌های خاکی در طول فرآیند ورمی‌کمپوست در همه تیمارها افزایش یافت. با این حال همه‌ی شاخص‌های رشدی (*E. fetida*) در بستر شیرین‌بیان بهتر بود و می‌توان نتیجه گرفت که کود حیوانی یک منبع مغذی برای تأمین نیازهای متابولیستی کرم‌ها و ضایعات شیرین‌بیان به عنوان یک ماده غذایی مطلوب نسبت به سایر تیمارها برای کرم‌خاکی است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که بافت سلولزی سخت و وجود برخی ترکیبات شیمیایی مانند فنل و تانن احتمالاً از مطلوبیت سایر تیمارها کاسته است که این امر می‌تواند بر سرعت رشد کرم خاکی و کیفیت ورمی‌کمپوست نهایی تأثیرگذار بوده باشد (Sonmezdag *et al.*, 2017).

### نتیجه‌گیری

ورمی‌کمپوست، ویژگی‌های شیمیایی، کیفیت نهایی و مدیریت زیست‌توده ضایعات گیاهی را بهبود بخشید. سطح عناصر پر مصرف در همه‌ی تیمارها افزایش یافت به طوری که بیشترین مقدار نیتروژن و پتاسیم کل در بستر ضایعات سنبل‌الطیب به ترتیب ۲۲/۰۷ و ۳۶/۳۴ گرم بر کیلوگرم به‌دست آمد که دارای اختلاف معنی‌داری نیز با

## References

## منابع

- A'ali, R., Jafarpour, M., Kazemi, E., and Pessarakli, M., 2017. Effects of raw materials on vermicompost qualities. *Journal of Plant Nutrition*, 40(11), 1635-1643. <https://doi.org/10.1080/01904167.2016.1270319>.
- Abdoli, M.A., Hadipour, M., Ghazizadeh, M.J., and Asgharnia, H.A. 2016. Vermicomposting of domestic waste using *Eisenia Foetida* earthworm. *Journal of Environmental Science and Technology*, 18(4), 327-333. (In Persian with English abstract). <https://sanad.iau.ir/Journal/jest/Article/839897/FullText>
- APHA., 2012. Standard Methods for Examination of Water and Wastewater. American Public Health Association WWA. Washington, D.C.
- Awogbemi, O., and Kallon, D.V.V., 2022. Pretreatment techniques for agricultural waste. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 6. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2022.100229>.
- Balachandar, R., Biruntha, M., Yuvaraj, A., Thangaraj, R., Subbaiya, R., Govarthanan, M., Kumar, P., and Karmegam, N., 2021. Earthworm intervened nutrient recovery and greener production of vermicompost from *Ipomoea staphylina*—an invasive weed with emerging environmental challenges. *Chemosphere*, 263. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128080>.
- Banakar, M., and Ranjbar, G.h., 2013. Evaluation of Rhonas response to salinity in vegetative growth stage in two methods of planting seed and seed. *Soil Resource*, 27(3), 21-28. (In Persian). <https://doi.org/10.22092/IJSR.2013.126259>.
- Bhat, S.A., Singh, J., and Vig, A.P. 2017. Amelioration and degradation of pressmud and bagasse wastes using vermitechology. *Bioresource Technology*. 243, 1097-1104. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.093>.
- Bingyu, S., Zihao, D., Wenhue, L., 2024. Chapter 17 - Analysis of carbon emissions in composting and vermicomposting of excess sludge. *Earthworm Technology in Organic Waste Management. Waste and the environment: Underlying Burdens and Management Strategies*, pp. 359-366. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-16050-9.00009-8>.
- Biruti, Z., and Dadkhah, A., 2010. Investigating the effect of salinity and drought interaction on the growth of runas. *The First Conference of Madder National.Production, Processing and Administration*, 18th and 19th May, Yazd, Iran. p. 98.
- Deka, H, Deka, S., Baruah, C.K., Das, J., Hoque, S., and Sarma, N.S., 2011. Vermicomposting of distillation waste of citronella plant (*Cymbopogon winterianus* Jowitt.) employing *Eudrilus eugeniae*. *Bioresource Technology*, 102(13), 6944-6950. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.04.027>.
- Dume, B., Hance, A., Svehla, P., Michal, P., Demelash Chan, A., and Negussie, A., 2023. Composting and vermicomposting of sewage sludge at various C/N ratios: Technological feasibility and end-product quality. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 263. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115255>.
- Esmacili, A., Reyahi Khoram, M., Gholami, M., and Eslami, H., 2020. Pistachio waste management using combined composting, vermicomposting technique: Physico-chemical changes and worm growth analysis. *Journal of Clean Production*, 242. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118523>.
- Fusilero, M.A., Mangubat, J., Ragas, R.E., Baguion, N., Taya, H., and Rasco, J.E., 2013. Weed management systems and other factors affecting the earthworm population in a banana plantation. *European Journal of Soil Biology*, 56(3), 89-94. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2013.03.002>.
- Garcia-S\_anchez, M., Tau\_snerov\_a, H., Han\_c, A., and Tlusto\_s, P., 2017. Stabilization of different starting materials through vermicomposting in a continuous-feeding system: changes in chemical and biological parameters. *Waste Management*, 62, 33-42. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.02.008>.
- Gavanbakht, M., Phasemi-Gahsareh, M., and Motaghian, H.R., 2021. The effect of licorice residue root vermicompost on the growth and development of African violet. *Flower and Ornamental Plants*, 7(1), 77-92. (In Persian). <https://doi.org/10.61186/flowerjournal.7.1.77>.
- Grogatti, M., Pertoli, A., and Ciavatta, C., 2022. Plant phosphorus efficiency from raw and composted aground bio waste anaerobic digestates. *Journal of Soil Science Plant Nutrition*. 23(3), 3586-3599. <https://doi.org/10.1007/s42729-023-01274-8>.
- Hokmabadi, H., 2018. Pistachio Wastes in Iran and the Potential to recapture them in Value Chain. *Pistachio and Health Journal*, 1(4), 1-12. <https://doi.org/10.22123/PHJ.2019.151263.1018>
- Honarvar, M., Samavat, S., Davoudi, M.H., and Karimi, K., 2012. The possibility of producing compost and vermicompost from sugar beet waste used in factories. *Journal of Food Science and Nutrition*, 3(8), 53-46. (In Persian). <https://sid.ir/paper/143360/fa>
- Hong, S.W., Lee, J.S., and Chung, K.S., 2011. Effect of enzyme producing microorganisms on the biomass of epigeic earthworms (*Eisenia fetida*) in vermicompost. *Bioresource Technology*, 102(10), 6344-6347. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.02.096>.



- Kamegam, N., Jayakumar, M., Govarathanan, M., and Kummar, P., 2021. Precomposting and green manure amendment for effective vermitransformation of hazardous coir industrial waste into enriched vermicompost. *Bioresource Technology*, *326*, https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124136.
- Kaur Maan, P., Garch, S., 2021. Chapter 3 – production technology, properties, and quality management. *Biofertilizers*, pp. 31-43.
- Kharazi, M., Younesi, H., and Abedini Targhabe, J., 2020. The effect of combining corn waste with cow dung and cardboard on the quality of produced vermicompost. *Applied Agricultural Research Journal*, *27*, 191-179. (In Persian). https://doi.org/10.22092/AJ.2014.101219.
- Mago, M., Yadav, A., Gupta, R., and Garg, V.K., 2021. Management of banana crop waste biomass using vermicomposting technology. *Bioresource Technology*, *326*, https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124742.
- Negi, R., and Suthar, S., 2013. Vermistabilization of paper mill wastewater sludge using *Eisenia fetida*. *Bioresource Technology*, *128* (9), 193-198. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.10.022.
- Nelson, D.W., and Sommers, L.E., 1996. Total carbon and organic carbon and organic matter. In: Miller RH, Keeney DR (ed) *Method of Soil Analysis*. Wilcosin. USA.
- Patra, R. K., Behera, D., Mohapatra, K. K., Sethi, D., Mandal, M., Patra, A. K., and Ravindran, B., 2022. Juxtaposing the quality of compost and vermicompost produced from organic wastes amended with cow dung. *Environmental Resource*, *24*. https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114119.
- Rini, J., Deepthi, M.P., Saminathan, K., Narendhirakannan, R.T., Karmegam, N., and Kathireswari, P., 2020. Nutrient recovery and vermicompost production from livestock solid wastes with epigeic earthworms. *Bioresource Technology*, *313*. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123690.
- Rostami R., 2011. Vermicomposting. *Journal of Integrate and WasteManagement*, *2*, 132-145. https://doi.org/10.5772/16449.
- Rupani, P.F., Embrandiri, A., Ibrahim, M.H., Shahadat, M., Hansen, S.B., Ismail, S.A., and Kadir, M.O.A., 2017. Recycling of palm oil industrial wastes using vermicomposting technology: its kinetics study and environmental application. *Environmental Science and Pollution Research*, *24*(14), 12982-12990. https://doi.org/10.1007/s11356-017-8938-0.
- Sonmezdag, A.S., Kelebek, H., and Selli, S., 2017. Characterization and comparative evaluation of volatile, phenolic and antioxidant properties of pistachio (*Pistacia vera* L.) hull. *Journal of Essential Oil Research*, *24*(29), 262-270. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.07.086.
- Tajbakhsh, J., Abdoli, M.A., Mohammadi, E., Goltapeh, I., Alahdadi, A., and Malakouti, M.J., 2008. Trend of physico-chemical properties change in recycling spent mushroom compost through vermicomposting by epigeic earthworms *Eisenia foetida* and *E. andrei*. *Journal of agricultural technology*, *4*(2), 185-198.
- Yang, Zh., Wang, X.J., Cao, Y.E., Dong, Q., Yun Tong, J., He Mo, M., 2023. Vermicomposting of *Pleurotus eryngii* spent mushroom substrates and the possible mechanisms of vermicompost suppressing nematode disease caused by *Meloidogyne incognita*. *Heliyon*, Available on lion. E15111. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15111.



*This page is intentionally  
left blank.*