

## Effect of Incubation Time and Different Levels of Vermicompost on Nickel Chemical Forms in a Calcareous Soil

Maryam Mosapour<sup>1</sup>  and Mohammad Feizian<sup>2</sup> 

1-Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Lorestan, Khorramabad, Iran.

Email: [maryam.mosapour8@gmail.com](mailto:maryam.mosapour8@gmail.com)

2-Corresponding Author, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Lorestan, Khorramabad, Iran. Email: [feizian.m@lu.ac.ir](mailto:feizian.m@lu.ac.ir)

Received: June 19, 2024

Revised: August 7, 2024

Accepted: August 10, 2024

Published: December 21, 2024

### Extended Abstract

#### Background and Objectives

One of the major environmental problems is soil and water pollution with heavy metals in human societies. One of the main reasons for increasing the availability of heavy metals in the soil is the excessive use of chemical fertilizers, pesticides, as well as the entry of municipal and industrial wastewaters into the soil environment. Nickel (Ni) is one of the heavy metals but essential elements for plants. This metal is a part of urease enzyme and plays an important role in nitrogen metabolism. But its excessive accumulation reduces the nutritional value of plants. Heavy metals show different behaviors with the passage of time according to the type of soil and its components; So that with the passage of time, their availability for plants root is reduced and they become less soluble. Heavy metals are observed in the soil in the form of soluble, exchangeable complexes, connected to carbonates, oxides and hydroxides of iron and manganese, organic substances, and in the form of a part of the structure of minerals. Determining the chemical forms of heavy metals using successive extractors helps to relate their chemical forms in the soil, evaluate their availability and leaching. In fact, it can show the destructive and environmental effects of heavy metals in the soil.

Nowadays, the use of organic fertilizers has increased in reducing the bioavailability of heavy metals and converting them into less soluble forms. Nickel is a nutrient for plants, humans, and animals, but its high concentrations can cause toxicity in these organisms. Therefore, it seems necessary to study the change of shape and its transformation over time in the environment on the growth and health of plants and animals. Therefore, in this study, we investigate the effect of time duration on the forms and chemical components of Nickel in a calcareous soil under the different levels of vermicompost application.

#### Methodology

In order to investigate the effect of vermicompost application on the distribution of chemical forms of nickel in the soil, a factorial experiment was conducted on the basis of a completely randomized design with three factors of vermicompost at three levels (0, 5, and 10 % by weight), nickel at two levels (0 and 100 mg Ni/kg), and time duration at two levels (1 and 2 months) with three repetitions in greenhouse conditions. In order to contaminate the soil, first, 500 grams of soil was weighed for each pot, then different levels of nickel nitrate were added to the soil samples by spraying. After drying, the pot soil samples were completely mixed and the desired levels of vermicompost were added to them. During the test period, the samples were incubated at 25 °C and the moisture of the samples were also kept at field capacity. In order to ventilate and create aerobic conditions, a hole with a diameter of several millimeters was created on the lid of the samples. In the first stage, one month after contaminating the studied soil with nickel, 1 gram of soil was removed from each pot

and the chemical forms of nickel including solution + exchange, carbonate, organic, and bound to manganese and iron oxides were measured. In the second stage (2 months after contaminating the soil), the steps of the first stage were repeated. Finally, SAS software and Duncan's multiple range test were used for statistical analysis of the data.

## Results

The results of this research showed that vermicompost application had different effects on the chemical forms of nickel over time, so that in both times (1 and 2 months) the application of 5 and 10 % of vermicompost caused a decrease in the form of soluble + exchangeable, carbonate, and residual nickel, while it increased the nickel concentration in the forms of organic-bound, and bounded to manganese oxides, amorphous iron oxides, and crystalline iron oxides.

## Conclusion

Considering the results of this research and the positive effects of vermicompost application in reducing the bioavailability of soil nickel over time, it can be concluded that application of this organic fertilizer can reduce the environmental risks of this heavy metal in contaminated soils. Also, considering the short period of time used in this research, it is suggested to investigate the long term effect of vermicompost on the bioavailability of nickel and other heavy elements in longer periods of time.

**Keywords:** Calcareous soils, Fractionation, Heavy metals, Organic fertilizers

## Data Availability Statement

Data is available on reasonable request from the authors.

## Acknowledgements

This paper is published as a part of a Master's thesis supported by the Vice Chancellor for Research and Technology of the University of Lorestan, Iran. The authors are thankful to the University of Lorestan for financial supports.

## Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

## Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

**Cite this article:** Mosapour, M. & Feizian, M. (2024). Effect of incubation time and different levels of vermicompost on nickel chemical forms in a calcareous soil. *Journal of Soil and Plant Science*, 34(4), 37–52. <https://doi.org/10.22034/sps.2024.19182>

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



Copyright © 2024 The Authors.  
Publisher: The University of Tabriz





نشریه دانش خاک و گیاه، جلد ۳۴، شماره ۴، صفحه‌های ۳۷ تا ۵۲، سال ۱۴۰۳

DOI: 10.22034/sps.2024.19182

Online ISSN: 3092-6106

<https://sps.tabrizu.ac.ir>



## مقاله پژوهشی

# اثر زمان خواباندن و سطوح مختلف ورمی کمپوست بر شکل‌های شیمیایی نیکل در یک خاک آهکی

مریم موسی‌پور<sup>۱</sup> و محمد فیضیان<sup>۲</sup> ✉

۱- گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران.

E-mail: [maryam.mosapour8@gmail.com](mailto:maryam.mosapour8@gmail.com)

۲- نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران.

E-mail: [feizian.m@lu.ac.ir](mailto:feizian.m@lu.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۳۰	تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۵/۱۷
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۲۰	تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۰/۰۱

## چکیده

برای بررسی تأثیر ورمی کمپوست بر توزیع شکل‌های شیمیایی نیکل در خاک، آزمایشی به صورت فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه عامل ورمی کمپوست در سه سطح (۰، ۵ و ۱۰ درصد وزنی)، نیکل در دو سطح (۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و زمان خواباندن در دو سطح (۱ و ۲ ماه) و با سه تکرار انجام شد. نمونه‌ها در طول دوره آزمایش (دو ماه) در دمای حدود ۲۵ درجه سلسیوس و رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای نگهداری شدند. توزیع شکل‌های شیمیایی نیکل، با روش عصاره‌گیری پی‌درپی تعیین گردید. نتایج نشان داد که در هر دو زمان (۱ و ۲ ماه)، کاربرد سطوح ۵ و ۱۰ درصد ورمی کمپوست سبب کاهش شکل‌های محلول + تبدالی، کربناتی و باقی‌مانده و افزایش شکل‌های آلی، پیوند یافته با اکسیدهای منگنز، اکسیدهای آهن بی‌شکل و اکسیدهای آهن بلورین شد. باتوجه به نقش مثبت ورمی کمپوست در کاهش زیست‌فراهمی نیکل خاک در طول زمان می‌توان نتیجه گرفت که مصرف این کود آلی در خاک‌های آلوده به فلزهای سنگین از جمله نیکل، می‌تواند خطرات محیط‌زیستی این فلزها را کاهش دهد. همچنین، باتوجه به دوره کوتاه زمانی به کار گرفته شده در این پژوهش پیشنهاد می‌شود که اثر طولانی‌مدت ورمی کمپوست بر زیست‌فراهمی نیکل و سایر فلزهای سنگین در زمان‌های طولانی‌تری نیز بررسی شود.

**واژه‌های کلیدی:** خاک‌های آهکی، شکل محلول و تبدالی، فلزهای سنگین، عصاره‌گیری پی در پی، کودهای آلی

استناد به این مقاله: موسی‌پور، م. و فیضیان، م. (۱۴۰۳). اثر زمان خواباندن و سطوح مختلف ورمی کمپوست بر شکل‌های شیمیایی نیکل در یک خاک آهکی. نشریه دانش خاک و گیاه، ۳۴(۴)، ۳۷-۵۲.

<https://doi.org/10.22034/sps.2024.19182>

## مقدمه

نیکل یکی از فلزهای سنگین اما ضروری برای گیاهان محسوب می‌شود زیرا این فلز جزئی از آنزیم اوره‌آز است و در متابولیسم نیتروژن نقش مهمی ایفا می‌کند؛ اما تجمع بیش از حد آن موجب کاهش ارزش غذایی گیاهان می‌شود. حد مجاز نیکل در خاک‌ها ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم است. هرچند جذب نیکل اضافی محدودیت رشد گیاه را به دنبال دارد اما هنوز سازوکار نحوه عمل آن مشخص نشده است (Yang et al., 1996). از مشکی‌لایت عمده محیط‌زیست، آلودگی خاک و آب با فلزهای سنگین در جوامع بشری است زیرا بر کاهش عملکرد و کیفیت محصولات کشاورزی اثرگذار است و پایداری تولید محصولات کشاورزی را دچار مشکل نموده است. از دلایل اصلی افزایش فراهمی فلزهای سنگین در خاک، استفاده بیش از حد از کودهای شیمیایی، آفت‌کش‌ها و ورود فاضلاب‌های شهری و صنعتی به محیط خاک می‌باشد (Lorestani et al., 2014). فلزهای سنگین با توجه به نوع خاک و اجزای آن با گذشت زمان رفتارهای متفاوتی از خود نشان می‌دهند به طوری که با گذشت زمان از فراهمی آن‌ها برای جذب به وسیله گیاهان کاسته شده و به شکل کم‌محلول‌تر تبدیل می‌شوند (Hooda & Alloway, 1993; Selim & Sparks, 2001; Bolan et al., 2003). فلزهای سنگین در خاک به شکل کمپلکس‌های محلول، تبادل‌ی، پیوند یافته با کربنات‌ها، اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن و منگنز، مواد آلی و به شکل جزئی از ساختمان کانی‌ها مشاهده می‌گردند (Fytianos et al., 2001). تثبیت فلزهای سنگین یکی از راه‌های مقرون‌به‌صرفه با اثرات مخرب محیط‌زیستی پایین بسیار مورد توجه است (Gao et al., 2019). امروزه پسماندهای آلی در کشاورزی منبع بالارزشی از عناصر غذایی و اصلاحگرهای آلی برای گیاه به‌شمار می‌آیند (Courtney & Mullen, 2007). کودهای آلی از جمله ورمی‌کمپوست از طریق تبدیل شکل تبادل‌ی و محلول فلزهای سنگین به شکل‌های کربناتی، آلی و هیدروکسید چندگانه، موجب تغییر و کاهش زیست‌فراهمی آن‌ها در خاک می‌شوند که این پدیده خود به نوع فلز، میزان فلزهای سنگین، میزان نمک فلز، نوع خاک، ویژگی‌های کود آلی مخصوصاً درجه هوموسی شدن کود، ظرفیت تبادل کاتیونی و اثر آن بر اسیدیته خاک بستگی دارد (Tordoff et al., 2000). از طرفی با توجه به اینکه اسیدیته ورمی‌کمپوست نزدیک به خنثی می‌باشد با تثبیت فلزهای سنگین موجب کاهش حل‌پذیری آن‌ها در خاک می‌گردد. مطالعات نشان داده است مصرف کودهای آلی سبب افزایش حل‌پذیری فلزهای سنگین به صورت کمپلکس فلزها با ترکیبات آلی محلول می‌شود، اما مواد هیومیکی که بخش اصلی مواد آلی را تشکیل می‌دهد از طریق تشکیل کی‌لایت با فلز، می‌تواند حل‌پذیری فلز را کاهش دهد (Udom et al., 2004; Madrid et al., 2007). در ایران تحقیقات متعددی در ارتباط با کاهش آلودگی فلزهای سنگین در خاک با استفاده از مواد آلی (کودهای حیوانی و بقایای گیاهی) از طریق تثبیت و نامحلول کردن این فلزها انجام شده است (Rahimi, 2018; Falahati et al., 2023). تعیین شکل‌های شیمیایی فلزهای سنگین با استفاده از عصاره‌گیرهای پی‌درپی به ارتباط شکل‌های شیمیایی آن‌ها در خاک، ارزیابی فراهمی و آبشویی آن‌ها کمک شایانی می‌نماید. همچنین، اثرات مخرب و محیط‌زیستی فلزهای سنگین را در خاک نشان می‌دهد (Tessier et al., 1979; Gleyzes et al., 2002; Kaasalainen & Yli-Halla, 2003). نیکل عنصری ضروری برای گیاهان، انسان و حیوانات به‌شمار می‌آید، اما غلظت‌های بالای آن قادر به ایجاد سمیت در این جانداران است؛ بنابراین مطالعه تغییر شکل و تبدیل آن در طول زمان در محیط بر رشد و سلامت گیاهان و جانوران ضروری به نظر می‌رسد. لذا، در این پژوهش اثر گذشت زمان بر تغییر شکل‌ها و اجزای شیمیایی فلز نیکل در یک خاک آهکی پس از کاربرد ورمی‌کمپوست بررسی شد.

## مواد و روش‌ها

در پژوهش حاضر برای بررسی اثر زمان و ورمی‌کمپوست کود گاوی بر توزیع شکل‌های شیمیایی نیکل، نمونه‌برداری از عمق ۰-۳۰ سانتی‌متری خاک واقع در ایستگاه دانشکده کشاورزی دانشگاه لرستان انجام شد. پس از هوا خشک کردن

نمونه‌ها و غربال کردن با الک ۲/۰ میلی‌متری برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی از قبیل pH عصاره اشباع با استفاده از دستگاه pH متر (Thomas, 1996)، کلسیم کربنات معادل به روش خنثی‌سازی با اسید و تیتر کردن با سود (Allison and Moodie, 1965)، بافت خاک به روش هیدرومتری (Gee & Buder, 1986)، قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع به وسیله هدایت‌سنج الکتریکی (Rhoades, 1996)، کربن آلی به روش ترسوزانی (Nelson & Sommers, 1996)، نیتروژن کل به روش کلدال (Bremner, 1996)، فسفر قابل‌استفاده به روش عصاره‌گیری با سدیم بی‌کربنات (Kuo, 1996)، پتاسیم قابل‌جذب خاک با استفاده از عصاره‌گیر آمونیوم استات و قرائت با دستگاه فلیم فتومتر (Knudsen et al., 1982)، نیکل قابل‌جذب با استفاده از عصاره‌گیر DTPA (Lindsay and Norvell, 1978) و نیکل کل پس از عصاره‌گیری با هیدروکلریک اسید و نیتریک اسید (Baker & Amacher, 1982) با استفاده از دستگاه جذب اتمی تعیین شدند (جدول ۱).

برای اندازه‌گیری ویژگی‌های شیمیایی ورمی کمپوست ابتدا ورمی کمپوست در دمای ۹۰ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت خشک گردید و از الک ۲/۰ میلی‌متری عبور داده شد. سپس در عصاره نسبت ۱:۱۰ (ورمی کمپوست: آب مقطر) پس از گذشت ۲ ساعت، EC (با استفاده از دستگاه EC سنج) و pH (با استفاده از دستگاه pH سنج) و برخی عناصر شامل فسفر، پتاسیم و نیکل کل به روش خشک‌سوزانی (Westerman, 1990; Peters, 2003) اندازه‌گیری گردید (جدول ۱).

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و ورمی کمپوست مورد مطالعه.

ورمی کمپوست	خاک	واحد	ویژگی
-	لوم	-	بافت
۷/۶۱ (نسبت ۱:۱۰ با آب مقطر)	۷/۶ (عصاره اشباع)	-	pH
۱/۷ (نسبت ۱:۱۰ با آب مقطر)	۰/۷۲ (عصاره اشباع)	(dS m <sup>-1</sup> )	قابلیت هدایت الکتریکی
۱/۱۹	۰/۰۸	%	نیتروژن
۲۸۸	۲۱	mg kg <sup>-1</sup>	فسفر
۱۳۳۰۰	۲۸۰	mg kg <sup>-1</sup>	پتاسیم
۱۳/۲	۱/۲	(%)	کربن آلی
-	۲۸/۵	(%)	کلسیم کربنات معادل
۴/۴۹	۰/۰۹	mg kg <sup>-1</sup>	نیکل قابل‌جذب
۴۴/۳۳	۱/۷۶	mg kg <sup>-1</sup>	نیکل کل

آزمایش به صورت فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی و با سه تکرار انجام شد. فاکتورهای آزمایش شامل نیکل در دو سطح (۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک)، ورمی کمپوست در سه سطح (۰، ۵ و ۱۰ درصد وزنی خاک) و دو زمان خواباندن (۱ و ۲ ماه) بودند. برای آلوده کردن خاک ابتدا برای هر گلدان، ۵۰۰ گرم خاک توزین شد. سپس سطوح مختلف نیکل از منبع نیکل نیترات از طریق اسپری کردن به نمونه‌های خاک اضافه گردید. پس از خشک شدن، نمونه‌های خاک گلدان کاملاً مخلوط شد و سطوح ورمی کمپوست به آن‌ها اضافه شد. در طول دوره آزمایش، نمونه‌ها در دمای ۲۵ درجه سلسیوس انکوباسیون و رطوبت نمونه‌ها نیز با توزین کردن در حدود ظرفیت مزرعه‌ای نگهداری شد. برای ایجاد تهویه و شرایط هوایی، سوراخی به قطر چند میلی‌متر روی درب هر یک از ظرف‌ها تعبیه گردید. در مرحله اول (یک ماه پس از آلوده کردن خاک مورد نظر با نیکل)، ۱/۰ گرم از خاک هر گلدان برداشته شد و با استفاده از روش Sing et al. (1988) شکل‌های شیمیایی نیکل شامل محلول + تبادل، کربناتی، آلی، پیوند یافته با اکسیدهای منگنز و آهن اندازه‌گیری شدند (جدول ۲). در مرحله دوم (۲ ماه پس از آلوده کردن) نیز مراحل مرحله اول تکرار گردید. برای تحلیل آماری داده‌ها از نرم‌افزار SAS و برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد استفاده گردید.

جدول ۲ - مراحل مختلف عصاره‌گیری دنباله‌ای به روش Sing et al. (1988)

شکل شیمیایی	نسبت خاک به عصاره‌گیر	عصاره‌گیر	زمان به تعادل رسیدن (ساعت)	دما (درجه سلسیوس)
تبادلی (Ex)	10:40	1 M Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	۲	۲۰
کربناتی (Car)	10:40	1 M NaOAc (pH=5.0)	۵	۲۰
پیوند یافته با ماده آلی (OM)	10:20	0.7 M NaOCl (pH=8.5)	۰/۵	۱۰۰
پیوند یافته با اکسیدهای منگنز (Mn-Ox)	5:50	0.1 M NH <sub>2</sub> OH.HCl (pH=2.0)	۰/۵	۱۰۰
پیوند یافته با اکسیدهای آهن بی‌شکل (AFe-Ox)	5:50	0.25 M NH <sub>2</sub> OH.HCl + 0.25 M HCl	۰/۵	۵۰
پیوند یافته با اکسیدهای آهن بلورین (CFE-Ox)	5:50	0.2 M (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> C <sub>2</sub> O <sub>4</sub> + 0.2 M H <sub>2</sub> C <sub>2</sub> O <sub>4</sub> + 0.1 M C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O <sub>6</sub>	۰/۵	۱۰۰
باقی‌مانده (Res)	-	Total (مجموع سایر شکل‌ها)	-	-

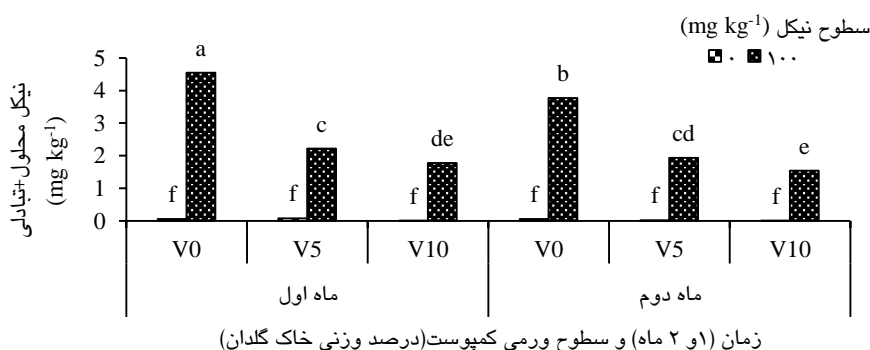
## غلظت نیکل محلول + تبادلی در خاک

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثرهای اصلی ورمی‌کمپوست، نیکل و زمان و اثرهای متقابل دوگانه و سه‌جانبه آن‌ها بر غلظت نیکل محلول + تبادلی در خاک معنادار بودند (جدول ۳).

جدول ۳ - تجزیه واریانس اثر ورمی‌کمپوست، نیکل و زمان بر شکل‌های شیمیایی نیکل در خاک.

منابع تغییر	درجه آزادی	Res	CFeOX	AFeOX	MnOX	OM	Car	Sol+Ex
زمان	۱	۲۷/۳۴ <sup>ns</sup>	۴۰/۵۷**	۱۲/۰۶**	۶/۳۵۱**	۱/۸۲۸**	۱۲/۴۶۸**	۰/۲۴۶**
نیکل	۱	۴۷۱۸/۱۱**	۱۸۲۱/۰۳**	۱۰۵۸/۲**	۲۳۲/۴**	۴۰۴/۶۹۴**	۳۲۹/۳۲**	۱۵/۹۵**
ورمی‌کمپوست	۲	۶۸۳/۴۶**	۹۷/۳۶**	۴۵۹/۶۳**	۲/۵۱۱**	۷/۸۹۸**	۲۰/۶۶**	۱/۹۲۲**
زمان × نیکل	۱	۱۷/۴۹ <sup>ns</sup>	۲۰/۶۴**	۶/۰۶**	۱/۲۸۶**	۰/۰۰۷ <sup>ns</sup>	۱۱/۸۴۷**	۰/۲۴**
زمان × ورمی‌کمپوست	۲	۱۰۲/۶۳**	۵/۱۴**	۰/۰۷ <sup>ns</sup>	۰/۲۸۶ <sup>ns</sup>	۰/۱۸۶ <sup>ns</sup>	۰/۸۸۴**	۰/۰۴**
نیکل × ورمی‌کمپوست	۲	۳۵۲/۱۶**	۳۴/۱۳**	۳/۹۷**	۰/۵۸۷*	۱/۵۵۹**	۹/۵۶۲**	۱/۶۹**
زمان × نیکل × ورمی‌کمپوست	۲	۳۴/۹ <sup>ns</sup>	۱/۳ <sup>ns</sup>	۰/۰۸ <sup>ns</sup>	۰/۳۰۹ <sup>ns</sup>	۰/۰۵۶ <sup>ns</sup>	۰/۷۵۵**	۰/۰۴۲**
خطا	۲۴	۱۷/۷۶	۰/۵۳	۰/۶۳	۰/۱۴۶	۰/۱۵۵	۰/۱۰۴	۰/۰۰۵
ضریب تغییرات		۸/۶۷	۱/۶۳	۷/۶۱	۸/۴۶	۱۱/۹۹	۷/۴	۴/۸۹

<sup>ns</sup>، \* و \* به ترتیب غیرمعنادار و معنادار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد.



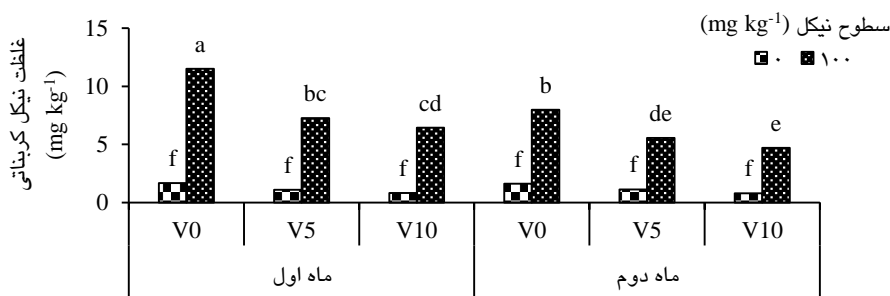
شکل ۱ - اثر متقابل سه‌جانبه ورمی‌کمپوست، نیکل و زمان خوابانیدن بر غلظت نیکل محلول + تبادلی. ستون‌های دارای یک حرف لاتین مشترک، در سطح احتمال ۵ درصد با آزمون دانکن از لحاظ آماری تفاوت معناداری ندارند.

(V0=شاهد (بدون ورمی کمپوست)، V1=۵ درصد وزنی خاک ورمی کمپوست و V2=۱۰ درصد وزنی خاک ورمی کمپوست)

مقایسه میانگین‌های شکل محلول+تبادلی برای اثر متقابل سه‌جانبه ورمی کمپوست، نیکل و زمان نشان داد که در هر دو زمان کاربرد ورمی کمپوست شکل محلول+تبادلی را در غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم نیکل به صورت معناداری کاهش داد (شکل ۱)؛ به طوری که در ماه دوم در غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم نیکل در هر دو سطح ورمی کمپوست (۵ و ۱۰ درصد وزنی خاک) نسبت به ماه اول در این سطح نیکل به ترتیب ۱۲/۷۹ و ۱۲/۱۳ درصد شکل محلول+تبادلی نیکل کاهش پیدا کرد. در حالی که در سطح عدم کاربرد نیکل، کاربرد ورمی کمپوست تفاوت معناداری بر این شکل از نیکل نداشت (شکل ۱). افزایش غلظت نیکل محلول+تبادلی در نتیجه افزودن نیکل به خاک را می‌توان این‌گونه بیان کرد که با افزایش غلظت نیکل به خاک، در ابتدا نیکل وارد فاز محلول و تبادلی می‌شود اما با گذشت زمان به تدریج نیکل از این دو فاز خارج شده و به شکل‌های کم‌محلول‌تر تبدیل می‌گردد. کاهش در میزان شکل محلول+تبادلی با گذشت زمان می‌تواند به عنوان راهکاری مؤثر در کاهش آلودگی محیط‌زیستی ناشی از نشر فلزهای سنگین معرفی گردد (Meng et al., 2018). (Rajaie et al. (2008). گزارش کردند که با افزایش غلظت نیکل، شکل تبادلی+محلول نیکل به طور معناداری افزایش یافت در حالی که با گذشت زمان به طور معناداری کاهش یافت که با نتایج این تحقیق مشابهت دارد. (Meng et al. (2018). با بررسی اثر اصلاح‌کننده آلی بر توزیع شکل‌های شیمیایی کادمیم گزارش کردند افزایش تیمار آلی در طول زمان سبب تغییر کادمیم از بخش تبادلی به بخش کربناتی شد. آنان دلیل این امر را افزایش اسیدیته خاک در اثر استفاده از کود آلی و در نتیجه رسوب کادمیم به شکل کربنات کادمیم دانستند.

#### غلظت نیکل پیوند شده با کربنات‌ها

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثرهای اصلی ورمی کمپوست، نیکل و زمان و اثرهای متقابل دوگانه و سه‌جانبه آن‌ها بر غلظت نیکل پیوند شده با کربنات‌ها در خاک معنادار بودند (جدول ۳). مقایسه میانگین‌های غلظت نیکل پیوند شده با کربنات‌ها برای اثر متقابل سه‌جانبه ورمی کمپوست، نیکل و زمان نشان داد که کاربرد سطوح مختلف ورمی کمپوست سبب کاهش معنادار شکل کربناتی نیکل در طول زمان گردید. به طوریکه در ماه دوم در غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم نیکل بر کیلوگرم خاک، کاربرد ۵ و ۱۰ درصد وزنی ورمی کمپوست، نسبت به همان سطح از نیکل و همان سطح از ورمی کمپوست در ماه اول شکل محلول+تبادلی به ترتیب ۲۳/۴۷ و ۲۶/۹۸ درصد کاهش پیدا کرد. در حالی که در هر دو زمان در سطح عدم کاربرد نیکل در تمامی سطوح ورمی کمپوست تفاوت معنادار مشاهده نشد (شکل ۲). به نظر می‌رسد با افزایش ماده آلی و تجزیه آن در طول زمان اسیدهای آلی افزایش یافته و موجب تجزیه فاز کربناتی می‌گردد؛ بنابراین، نیکل آزاد شده و به سایر اجزا فاز آلی می‌پیوندد در نتیجه فرم کربناتی کاهش می‌یابد. کودهای آلی می‌توانند شکل تبادلی و محلول فلزهای سنگین را به شکل‌های کربناتی، ماده آلی و هیدروکسید چندگانه تغییر و فراهمی زیستی آن‌ها را کاهش دهند. شکل کربناتی، آلی و هیدروکسیدهای چندگانه به ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی محیط بستگی دارد (Hoseinian Rostami et al., 2013). (Rahimi (2018). با بررسی اثر سطوح مختلف کود آلی بر شکل‌های شیمیایی نیکل گزارش کرد با گذشت زمان در تمامی سطوح کودی اعمال شد شکل کربناتی نیکل در خاک کاهش پیدا کرد. نتایج تحقیقات (Hamidpour et al. (2017). نشان داد که کاربرد ۵ و ۱۰ درصد ورمی کمپوست سبب افزایش غلظت سرب و کادمیم در بخش کربناتی شد به طوریکه از بین شکل‌های محلول+تبادلی، آلی و اکسیدهای آهن و منگنز و شکل باقی‌مانده بیشترین مقدار مربوط به بخش کربناتی بود.



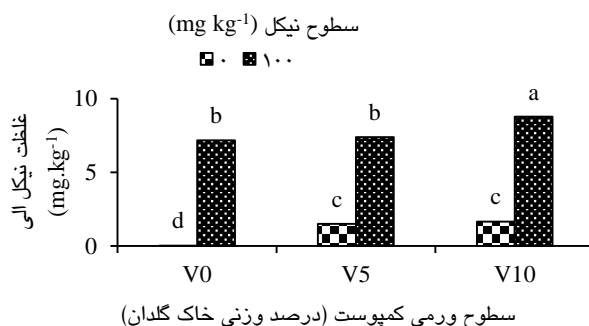
زمان (۱ و ۲ ماه) و سطوح ورمی کمپوست (درصد وزنی خاک گلدان)

شکل ۲- اثر متقابل سه تایی ورمی کمپوست، سطوح نیکل و زمان خواباندن بر غلظت نیکل کربناتی. ستون‌های دارای یک حرف لاتین مشترک، در سطح احتمال ۵ درصد با آزمون دانکن از لحاظ آماری تفاوت معناداری ندارند. (V0= شاهد (بدون ورمی کمپوست)، V1= ۵ درصد وزنی خاک ورمی کمپوست و V2= ۱۰ درصد وزنی خاک ورمی کمپوست)

### غلظت نیکل پیوند شده با مواد آلی

نتایج تجزیه واریانس اثر کاربرد سطوح مختلف ورمی کمپوست و نیکل در طول زمان بر نیکل شکل پیوند شده با ترکیبات آلی، نشان داد اثر اصلی سطوح ورمی کمپوست، نیکل و زمان بر شکل آلی نیکل در سطح احتمال ۱ درصد مثبت و معنادار شد (جدول ۳). در حالی که از بین تیمارهای اعمال شده تنها اثر متقابل دوگانه نیکل × ورمی کمپوست معنادار گردید. نتایج اثر متقابل دوگانه نیکل × ورمی کمپوست نشان داد که افزایش سطوح مختلف کود ورمی کمپوست، سبب افزایش شکل پیوند شده نیکل با ترکیبات آلی شد به طوری که بیشترین شکل نیکل آلی (۸/۷ میلی گرم در کیلوگرم) در بالاترین سطح ورمی کمپوست (۱۰ درصد وزنی خاک گلدان) و نیکل (۱۰۰ میلی گرم در کیلوگرم) مشاهده گردید (شکل ۳). در حالی که کمترین شکل نیکل آلی (۰/۰۲۵ میلی گرم در کیلوگرم) در سطح شاهد (عدم کاربرد ورمی کمپوست و نیکل) مشاهده گردید (شکل ۳). یکی از دلایل افزایش شکل پیوند شده با ترکیبات آلی می تواند تمایل فلز به ماده آلی و پیوند قوی آن با گروه‌های عاملی دارای الکترون در ماده آلی باشد. جذب فلزهای سنگین به وسیله مواد آلی از طریق واکنش‌های کمپلکس با مواد آلی ایجاد می گردد. در نتیجه همواره بین کربن آلی خاک و میزان جذب فلزهای سنگین رابطه معناداری وجود دارد. بررسی Brummer & Herms (1983) نشان داد که با توجه به اینکه مواد آلی، دارای ترکیبات مختلف با ساختارهای متفاوت، وزن مولکولی و گروه‌های عاملی متعددی هستند بنابراین تعیین اینکه کدام یک سبب افزایش یا کاهش حل پذیری فلز سنگین در خاک می شوند، امری مشکل است. Abdelhafez et al. (2014) گزارش کردند افزایش شکل نیکل پیوند شده با ترکیبات آلی در تیمارهای تحت تأثیر مواد آلی به افزایش کربن آلی ناشی از کاربرد این تیمارها در خاک در طی زمان مرتبط است.



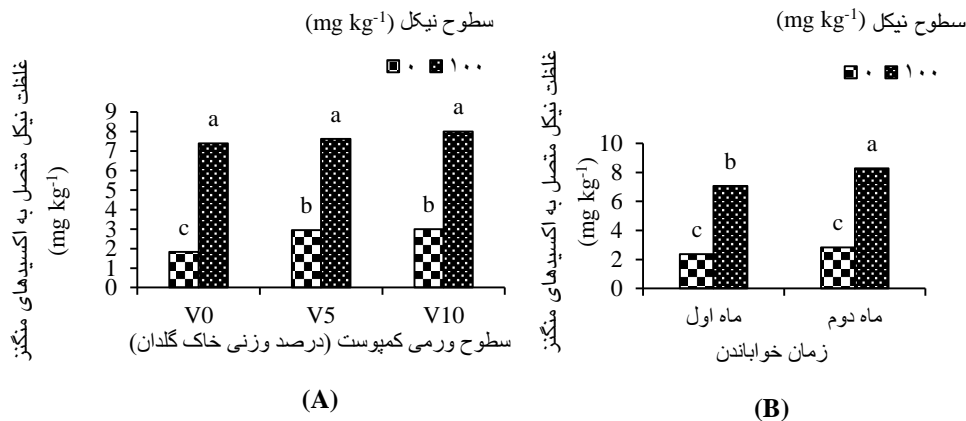


شکل ۳- اثر متقابل ورمی کمپوست و سطوح نیکل بر غلظت نیکل آلی.

ستون‌های دارای یک حرف لاتین مشترک، در سطح احتمال ۵ درصد با آزمون دانکن از لحاظ آماری تفاوت معناداری ندارند. (V0= شاهد (بدون ورمی کمپوست)، V1= ۵ درصد وزنی خاک ورمی کمپوست و V2= ۱۰ درصد وزنی خاک ورمی کمپوست)

### غلظت نیکل پیوند شده به اکسیدهای منگنز

نتایج تجزیه واریانس اثر کود ورمی کمپوست و نیکل بر شکل نیکل پیوند شده با اکسیدهای منگنز در طول زمان نشان داد اثرات اصلی سطوح ورمی کمپوست، نیکل و زمان در سطح احتمال ۱ درصد مثبت و معنادار گردید. در حالی که از اثر متقابل تیمارهای اعمال شده تنها اثر متقابل دوتایی زمان × نیکل و ورمی کمپوست × نیکل مثبت و معنادار گردید. بر اساس نتایج به دست آمده با افزایش سطوح ورمی کمپوست نیکل پیوند شده با اکسیدهای منگنز افزایش یافت (شکل ۴): به طوری که بیشترین (۷/۹۹ میلی گرم در کیلوگرم) این شکل از نیکل در تیمار ۱۰ درصد وزنی ورمی کمپوست + ۱۰۰ میلی گرم در کیلوگرم نیکل مشاهده گردید در حالی که با تیمارهای شاهد (عدم کاربرد ورمی کمپوست) + ۱۰۰ میلی گرم در کیلوگرم نیکل و ۵ درصد وزنی ورمی کمپوست + ۱۰۰ میلی گرم در کیلوگرم نیکل تفاوت معناداری نداشت. طبق نتایج کمترین (۱/۸۳ میلی گرم در کیلوگرم) شکل نیکل پیوند شده با اکسیدهای منگنز در تیمار شاهد (عدم کاربرد نیکل و ورمی کمپوست) مشاهده گردید (شکل ۴). مطالعات (Baghaie et al. 2012) نشان داد کاربرد کود گاوی در خاک آلوده به سرب به ترتیب موجب افزایش توزیع نسبی سرب در بخش‌های اکسیدها و کربنات گردید؛ که این امر اهمیت بخش معدنی را در برابر بخش آلی نشان می‌دهد. آنان همچنین بیان کردند که کودهای آلی دارای مقادیر بالایی از ترکیبات معدنی تثبیت کننده از جمله فسفات‌ها و اکسیدهای آهن منگنز هستند که قابلیت دسترسی فلزهای سنگین را کاهش می‌دهد. در خاک‌هایی با اسیدیته قلیایی و خنثی کاتیون‌های فلزی می‌توانند جذب هیدروکسیدهای آهن، منگنز و آلومینیوم شوند. ماده آلی و اکسیدها جاذب‌های اولیه خاک به شمار می‌آیند که در کاهش زیست‌فراهمی فلزهای سنگین در خاک نقش مهمی را بر عهده دارند. با افزایش زمان خواباندن نیکل پیوند یافته با اکسیدهای منگنز افزایش یافت. به طوری که بیشترین شکل نیکل (۸/۲۷ میلی گرم در کیلوگرم) در تیمار ۱۰۰ میلی گرم در کیلوگرم نیکل و در ماه دوم مشاهده شد که نسبت به ماه دوم ۱۷/۲۴ درصد افزایش یافت. کمترین مقدار نیکل نیز در تیمار شاهد (عدم کاربرد نیکل) در ماه اول مشاهده شد که با تیمار شاهد در ماه دوم تفاوت معناداری نداشت. افزایش جزء پیوند یافته با اکسیدهای فلز در اثر افزودن کودهای آلی به وسیله سایر پژوهشگران نیز گزارش شده است (Basta et al., 2005; Rahimi, 2018).

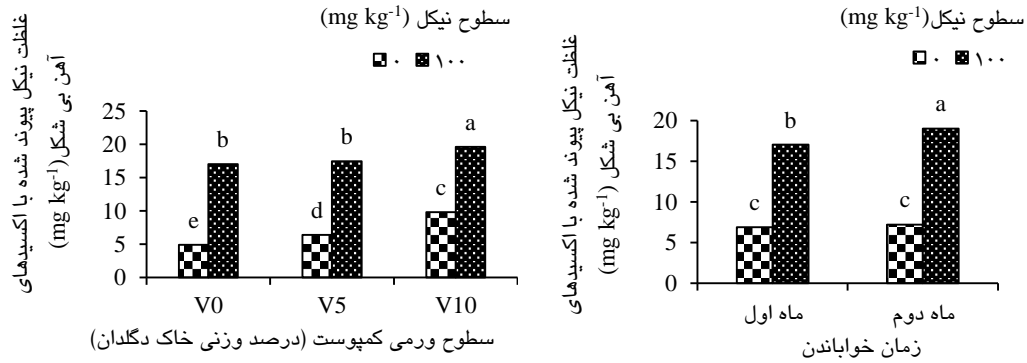


شکل ۴- اثر متقابل ورمی کمپوست و سطوح نیکل (A) و اثر متقابل زمان و سطوح نیکل (B) بر غلظت نیکل پیوند یافته با اکسیدهای منگنز.

ستون‌های دارای یک حرف لاتین مشترک، در سطح احتمال ۵ درصد با آزمون دانکن از لحاظ آماری تفاوتی معنادار ندارند. (V0= شاهد (بدون ورمی کمپوست)، V1= ۵ درصد وزنی خاک ورمی کمپوست و V2= ۱۰ درصد وزنی خاک ورمی کمپوست)

#### غلظت نیکل پیوند شده با اکسیدهای آهن بی شکل

نتایج تجزیه واریانس اثر کاربرد سطوح مختلف ورمی کمپوست و نیکل بر شکل نیکل پیوند شده با اکسیدهای آهن بی شکل در طول زمان، نشان داد اثر اصلی سطوح ورمی کمپوست، نیکل و زمان بر شکل آلی نیکل در سطح احتمال ۱ درصد مثبت و معنادار شد (جدول ۳). در حالی که از بین تیمارهای اعمال شده تنها اثر متقابل دوتایی زمان×نیکل و نیکل×ورمی کمپوست معنادار گردید. نتایج اثر متقابل دوتایی نیکل×ورمی کمپوست نشان داد که کاربرد سطوح مختلف ورمی کمپوست سبب افزایش معنادار شکل نیکل پیوند شده با اکسیدهای آهن بی شکل شد (شکل ۵). به طوری که بیشترین شکل نیکل پیوند شده با اکسیدهای آهن بی شکل (۱۹/۶۲ میلی گرم در کیلوگرم) در تیمار ۱۰ درصد ورمی کمپوست + ۱۰۰ میلی گرم در کیلوگرم نیکل مشاهده گردید، کمترین (۴/۹۳ میلی گرم در کیلوگرم) مقدار این شکل نیکل نیز در تیمار شاهد (عدم کاربرد نیکل و ورمی کمپوست) مشاهده شد. نتایج اثر متقابل دوتایی نیکل×زمان بر شکل نیکل پیوند شده با اکسیدهای آهن بی شکل نشان داد با گذشت زمان مقدار نیکل پیوند شده با اکسیدهای آهن بی شکل افزایش معناداری داشت به طوری که بیشترین غلظت نیکل در ماه دوم (۱۹/۰۲ میلی گرم در کیلوگرم) و سطح ۱۰۰ میلی گرم در کیلوگرم مشاهده گردید که نسبت به ماه اول ۱۱/۶۰ درصد افزایش یافت. کمترین مقدار (۶/۸۸ میلی گرم در کیلوگرم) نیز در تیمار شاهد (عدم کاربرد نیکل) در ماه اول مشاهده گردید که با تیمار شاهد در ماه دوم تفاوت معناداری نداشت (شکل ۵). (Rajaie et al. (2008) گزارش کرد که کاربرد نیکل به صورت منبع نمکی و کمپوست غنی شده در گذر زمان باعث افزایش شکل اکسیدهای آهن بی شکل در خاک گردید. (Sefidgar Shahkolaie et al. (2020) گزارش کردند استفاده از اصلاح کننده آلی سبب کاهش بخش تبدالی کادمیم و افزایش بخش های اکسیدی و آلی شد.



شکل ۵- اثر متقابل ورمی کمپوست و سطوح نیکل (A) و اثر متقابل زمان و سطوح نیکل (B) بر غلظت نیکل پیوند یافته به اکسیدهای آهن.

ستون‌های دارای یک حرف لاتین مشترک، در سطح احتمال ۵ درصد با آزمون دانکن از لحاظ آماری تفاوت معناداری ندارند. (V0=شاهد (بدون ورمی کمپوست)، V1=۵ درصد وزنی خاک ورمی کمپوست و V2=۱۰ درصد وزنی خاک ورمی کمپوست)

### غلظت نیکل پیوند شده با اکسیدهای آهن بلورین

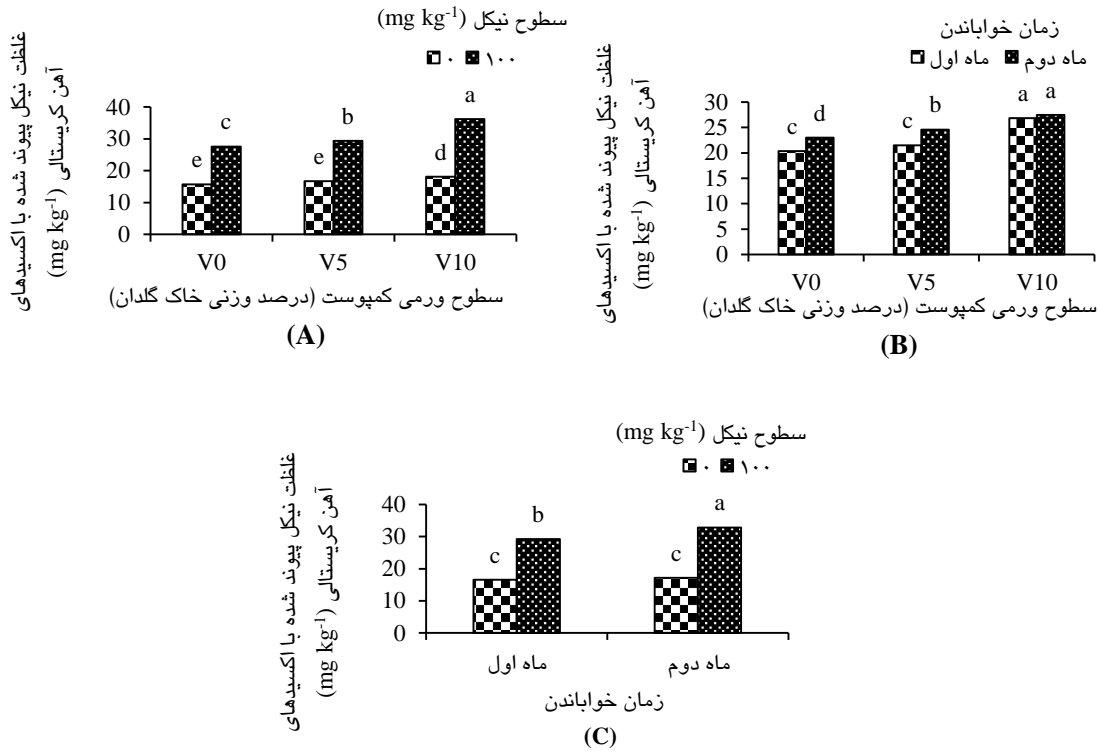
نتایج تجزیه واریانس اثر کاربرد سطوح مختلف ورمی کمپوست و نیکل بر شکل نیکل پیوند شده با اکسیدهای آهن بلورین در طول زمان نشان داد اثر اصلی کاربرد سطوح مختلف ورمی کمپوست، سطوح نیکل و زمان و تمام اثر متقابل‌های دوتایی بین تیمارهای اعمال شده در سطح احتمال ۱ درصد معنادار گردید (جدول ۴). نتایج اثر متقابل دوتایی نیکل × ورمی کمپوست بر شکل نیکل پیوند شده با اکسیدهای آهن بلورین نشان داد که کاربرد سطوح ورمی کمپوست سبب افزایش غلظت نیکل شد (شکل ۶). به طوریکه بیشترین (۳۶/۱۸ میلی‌گرم در کیلوگرم) مقدار این شکل از نیکل در بالاترین سطح ورمی کمپوست (۱۰ درصد وزنی خاک گلدان) و تیمار ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم مشاهده گردید. همچنین نتایج نشان داد که کمترین (۱۵/۷۳ میلی‌گرم در کیلوگرم) مقدار نیکل پیوند شده با اکسیدهای آهن بلورین در تیمار شاهد (عدم کاربرد نیکل و ورمی کمپوست) مشاهده گردید هرچند با تیمار ۵ درصد وزنی ورمی کمپوست و عدم کاربرد نیکل تفاوت معناداری نداشت (شکل ۶). کودهای آلی به دلیل داشتن اکسیدهای آهن می‌توانند نیکل موجود در خاک را به صورت نیکل پیوند یافته با اکسیدهای آهن تثبیت کنند؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در اثر کاربرد کود ورمی کمپوست در طی زمان این شکل از نیکل در خاک افزایش یافته است. Baghaie et al. (2012) اعلام کردند با حذف اکسیدهای آهن از کود گاوی، شکل نیکل پیوند یافته با اکسیدهای آهن کاهش یافت در حالی که افزایش شکل‌ها کربناتی و آلی نیکل مشاهده گردید. نتایج اثر متقابل ورمی کمپوست × زمان نشان داد که با افزایش سطوح ورمی کمپوست و زمان خواباندن غلظت نیکل پیوند شده با اکسیدهای آهن بلورین افزایش یافت به طوریکه بیشترین (۲۷/۴۵ میلی‌گرم در کیلوگرم) مقدار نیکل در بالاترین سطح ورمی کمپوست (۱۰ درصد وزنی خاک گلدان) در ماه دوم مشاهده گردید که با مقدار نیکل در همین سطح از ورمی کمپوست در ماه اول تفاوت معناداری نداشت. در حالی که کمترین (۲۰/۳۴ میلی‌گرم در کیلوگرم) مقدار در تیمار عدم کاربرد ورمی کمپوست در ماه اول مشاهده شد که با تیمار ۵ درصد وزنی ورمی کمپوست در ماه اول تفاوت معناداری نداشت. همان‌طور که مشاهده گردید که با گذشت زمان افزایش شکل‌های اکسیدهای آهن بی‌شکل و بلورین نسبت به شکل اکسیدهای منگنز بیشتر بود. این مسئله را می‌توان به تمایل زیاد نیکل برای واکنش و اتصال به اکسیدهای آهن نسبت داد. نتایج اثر متقابل

سطوح نیکل  $\times$  زمان نشان داد که با افزایش زمان خواباندن غلظت نیکل پیوند شده با اکسیدهای آهن بلورین افزایش یافت به طوری که بیشترین ( $32/87$  میلی گرم در کیلوگرم) مقدار نیکل در بالاترین سطح نیکل ( $100$  میلی گرم در کیلوگرم) در ماه دوم مشاهده گردید. در حالی که کمترین ( $16/53$  میلی گرم در کیلوگرم) مقدار در تیمار شاهد (عدم کاربرد نیکل) در ماه اول مشاهده شد که با تیمار شاهد (عدم کاربرد نیکل) در ماه دوم تفاوت معناداری نداشت (شکل ۶). (Tashakor et al. (2014) بامطالعه شکل‌های شیمیایی فلزهای سنگین گزارش کردند که شکل باقی مانده و اکسیدهای آهن بلورین بیشترین مقدار را در بین شکل‌های شیمیایی نیکل به خود اختصاص داده‌اند. مطالعه (Han et al. (2001 نیز نشان داد توزیع برخی فلزهای سنگین مانند روی، نیکل، مس و کروم پس از افزودن به خاک به این صورت بود که کروم، در درازمدت از جزء کربناتی خاک به جزء مواد آلی و نیکل و روی به جزء اکسیدی منتقل شدند.

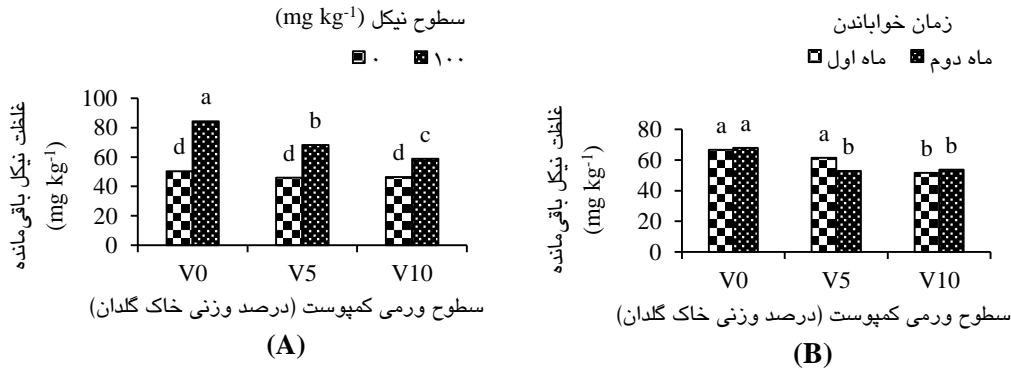
#### غلظت نیکل باقی مانده

نتایج تجزیه واریانس اثر کاربرد سطوح مختلف ورمی کمپوست و نیکل در طول زمان بر شکل نیکل باقی مانده نشان داد کاربرد سطوح نیکل و ورمی کمپوست بر این شکل از نیکل در سطح احتمال ۱ درصد معنادار شد. در حالی که زمان اثر معناداری بر آن نداشت. از بین اثر متقابل تیمارهای اعمال شده تنها اثر متقابل دوتایی زمان  $\times$  ورمی کمپوست و نیکل  $\times$  ورمی کمپوست معنادار گردید. نتایج نشان داد کاربرد ورمی کمپوست شکل نیکل باقی مانده را به صورت معناداری کاهش داد (شکل ۷)؛ به طوری که بیشترین مقدار ( $84/41$  میلی گرم در کیلوگرم) در تیمار شاهد (عدم کاربرد ورمی کمپوست) +  $100$  میلی گرم در کیلوگرم نیکل مشاهده شد و کمترین مقدار ( $46/08$  میلی گرم در کیلوگرم) در تیمار شاهد (عدم کاربرد نیکل) در سطح ۵ درصد وزنی ورمی کمپوست مشاهده گردید که با تیمارهای شاهد (عدم کاربرد نیکل) در سطوح ۱۰ درصد ورمی کمپوست و شاهد (عدم کاربرد ورمی کمپوست) تفاوت معناداری نداشت (شکل ۷). از آنجایی که ترکیبات آلی تمایل گزینشی برای جذب نیکل دارند علت این موضوع را می توان به افزایش نیکل پیوند شده با ترکیبات آلی در اثر افزودن کود ورمی کمپوست نسبت داد.

همچنین بر اساس نتایج، زمان اثر معناداری بر شکل نیکل باقی مانده نداشت. هرچند کاربرد ورمی کمپوست باعث کاهش نیکل باقی مانده شد اما با وجود کاهش این فرم نیکل، شکل‌های دیگر که قابلیت استفاده بیشتری دارند مانند محلول + تبدلی و کربناتی در اثر مصرف تیمارهای کود ورمی کمپوست کاهش یافتند؛ بنابراین کاربرد ورمی کمپوست با تبدیل نیکل به فرم‌های باقابلیت دسترسی کم مانند شکل‌های آلی و اکسیدی می‌تواند قابلیت استفاده نیکل را کاهش دهد. در گزارشی عنوان شد که کاربرد انواع کمپوست سبب افزایش شکل آلی و کاهش شکل کربناتی کادمیم و همچنین سبب کاهش شکل باقی مانده نیکل و افزایش شکل‌های آلی و اکسیدی این فلز می‌شود (Zinati et al., 2004). مطالعات Ravanbakhsh et al. (2011) نیز نشان داد نیکل به صورت عمده به فاز باقی مانده می‌پیوندد و در خاک‌های با ویژگی‌های متفاوت انعطاف پذیری بالایی نشان نمی‌دهد و تقریباً همان نسبت را حفظ می‌کند.



شکل ۶- اثر متقابل ورمی کمپوست و سطوح نیکل (A)، اثر متقابل زمان و سطوح ورمی کمپوست (B) و اثر متقابل زمان و سطوح نیکل (C) بر غلظت نیکل پیوند یافته به اکسیدهای آهن بلورین. ستون‌های دارای یک حرف لاتین مشترک، در سطح احتمال ۵ درصد با آزمون دانکن از لحاظ آماری تفاوت معناداری ندارند. (V0=شاهد (بدون ورمی کمپوست)، V1=۵ درصد وزنی خاک ورمی کمپوست و V2=۱۰ درصد وزنی خاک ورمی کمپوست)



شکل ۷- اثر متقابل ورمی کمپوست و سطوح نیکل (A) و اثر متقابل زمان و سطوح ورمی کمپوست (B) بر غلظت نیکل باقی مانده. ستون‌های دارای یک حرف لاتین مشترک، در سطح احتمال ۵ درصد با آزمون دانکن از لحاظ آماری تفاوت معناداری ندارند. (V0=شاهد (بدون ورمی کمپوست)، V1=۵ درصد وزنی خاک ورمی کمپوست و V2=۱۰ درصد وزنی خاک ورمی کمپوست)

### نتیجه‌گیری کلی

به‌طور کلی نتایج نشان داد که کاربرد سطوح مختلف ورمی کمپوست نسبت به شاهد باعث تغییر در توزیع شکل‌های شیمیایی نیکل گردید به این صورت که در طول زمان از شکل‌های با حل‌پذیری بالا به شکل‌های با حل‌پذیری کمتر تغییر پیدا کرد. همچنین، نتایج نشان داد که در تمامی تیمارها بیشترین شکل نیکل در

قسمت باقی‌مانده بود. بنابراین، حضور بخش عمده نیکل به شکل باقی‌مانده و تغییر شکل سایر شکل‌های نیکل با قابلیت استفاده زیاد به شکل‌های کم محلول‌تر در طی زمان، نشان‌دهنده زیست‌فراهمی بسیار کم نیکل در خاک است. همچنین، نتایج نشان داد که در هر دو زمان (۱ و ۲ ماه) کاربرد سطوح مختلف ورمی‌کمپوست موجب کاهش معنادار شکل محلول+تبادلی، کربناتی و باقی‌مانده نیکل گردید در حالی‌که سایر شکل‌های نیکل (آلی، اکسیدهای آهن و منگنز، اکسیدهای آهن بی‌شکل) به‌صورت معناداری افزایش یافتند. باتوجه‌به اثر مثبت ورمی‌کمپوست بر کاهش زیست‌فراهمی نیکل در خاک در طول زمان می‌توان عنوان کرد این کود آلی در خاک‌های آلوده به فلزهای سنگین از جمله نیکل می‌تواند خطرات محیط‌زیستی این عنصر را کاهش دهد. همچنین، باتوجه‌به دوره کوتاه زمانی به کار گرفته‌شده در این پژوهش پیشنهاد می‌شود که برای بررسی اثر ورمی‌کمپوست بر زیست‌فراهمی نیکل و سایر فلزهای سنگین در دوره‌های زمانی طولانی‌تری نیز مورد بررسی قرار گیرد.

### منابع مورد استفاده

#### References

- Abdelhafez, A., Li, J. & Abbas, M.H.H. (2014). Feasibility of biochar manufactured from organic wastes on the stabilization of heavy metals in a metal smelter contaminated soil. *Chemosphere*, 117, 66–71. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.05.086>
- Allison, L.E., & Moodie, C.D. (1965). Carbonates. Pp. 1379–1396. In: *Methods of Soil Analysis*. Part 2. *Chemical and Microbiological Properties*. Monograph No. 9, Soil Science Society of America, Madison, WI, USA.
- Baghaie, A.H., Khoshgoftarmansh, A.H. & Afyuni, M. (2012). Effects of inorganic and organic fractions of enriched cow manure and sewage sludge on distribution of lead chemical fractionation in soil. *Journal of Water and Soil Science (Science and Technology of Agriculture and Natural Resources)*, 16, 95–106. (In Persian with English abstract). DOR: [20.1001.1.24763594.1391.16.60.9.4](https://doi.org/20.1001.1.24763594.1391.16.60.9.4)
- Baker, D.E. & Amacher, M.C. (1982). Nickel, copper, zinc and cadmium, Pp. 323–336. In: Page AL, Miller RH and Keeney DR (eds) *Methods of soil analysis*. Part 2. *Chemical and microbiological properties*. Second Edition, Soil Science Society of America, American Society of Agronomy, Madison, WI, USA.
- Basta, N.T., Ryan, J.A. & Chaney, R.L. (2005). Trace element chemistry in residual treated soil: key concepts and metal bioavailability. *Journal of Environmental Quality*, 34, 49–63. <https://doi.org/10.2134/jeq2005.0049dup>
- Bolan, N.S., Adriano, D.C. & Curtin, D. (2003). Soil acidification and liming interactions with nutrient and heavy metal transformation and bioavailability. *Advanced in Agronomy*, 78, 216–272. DOI: [10.1016/S0065-2113\(02\)78006-1](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(02)78006-1)
- Bremner, J.M. (1996). Nitrogen total. Pp. 1085–1122. In: Sparks DL (eds). *Methods of soil analysis*. Part 3. *Chemical methods*. Soil Science Society of America Book Series 5, Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA.
- Brummer, G. & Herms, U. (1983). Influence of soil reaction and organic matter on the solubility of heavy metals in soils. Pp. 233-243. In: Ulrich B. & Pankrath J. (eds). *Effects of accumulation of air pollutants in forest ecosystems*. Springer, Dordrecht.
- Courtney, R.G. & Mullen, G.J. (2007). Soil quality and barley growth as influenced by the land application of two compost types. *Bioresource Technology*, 99, 2913–2918. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.06.034>
- Falahati, S., Adhami, A. & Olyaei, H. (2023). Changes in the forms of nickel under the influence of time and the use of vermicompost and zeolite in two calcareous soils with different textures. *Journal of Water and Soil Sciences*, 28, 83–94. (In Persian with English abstract) DOI: [10.47176/jwss.27.1.31212](https://doi.org/10.47176/jwss.27.1.31212)

- Fytianos, K., Katsianis, G., Triantafyllou, P. & Zachariadis, G. (2001). Accumulation of heavy metals in vegetables grown in an industrial area in relation to soil. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 67, 423–430. <https://doi.org/10.1007/s001280141>
- Gao, X., Peng, Y., Zhou, Y., Adeel, M. & Chen, Q. (2019). Effects of magnesium ferrite biochar on the cadmium passivation in acidic soil and bioavailability for packoi (*Brassica chinensis* L.). *Journal of Environmental Management*, 251, 109610. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109610>
- Gee, G. & Buder, W. (1986). Particle-size analysis. Pp 383-410. In: Klute A (eds). *Methods of soil analysis*. Part 1. *Physical and mineralogical methods*. Soil Science Society of America, American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA.
- Gleyzes, C.H., Tellier, S. & Astruc, M. (2002). Fractionation studies of trace elements in contaminated soils and sediments: a review of sequential extraction procedures. *Analytical Chemistry*, 21, 451–467. [https://doi.org/10.1016/S0165-9936\(02\)00603-9](https://doi.org/10.1016/S0165-9936(02)00603-9)
- Hamidpour, M., Akbari, L. & Shirani, H. (2017). Effects of co-application of zeolites and vermicompost on speciation and phytoavailability of cadmium, lead, and zinc in a contaminated soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 48, 262–273. <https://doi.org/10.1080/00103624.2016.1261885>
- Han, F.X., Banin, A. & Triplett, G.B. (2001). Redistribution of heavy metals in arid-zone soils under a wetting–drying soil moisture regime. *Soil Science*, 166, 18–28. DOI: [10.1097/00010694-200101000-00005](https://doi.org/10.1097/00010694-200101000-00005)
- Hooda, P.S. & Alloway, B.J. (1993). Effects of time and temperature on the bioavailability of Cd and Pb from sludgeamended soils. *Journal of Soil Science*, 44, 97–110. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1993.tb00437.x>
- Hoseinian Rostami, G., Gholamalizade Ahangar, A. & Lakzian, A. (2013). Time effect on distribution of different fractions of lead in polluted soils. *Journal of Water and Soil*, 27, 1057–1066. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.22872>
- Kaasalainen, M. & Yli-Halla, M. (2003). Use of sequential extraction to assess metal partitioning in soils. *Environmental Pollution*, 126, 225–233. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(03\)00191-X](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(03)00191-X)
- Knudsen, D., Peterson, G.A. & Pratt, P. (1982). Lithium, Sodium and Potassium. Pp.225-246. In: Page AL (Ed). *Methods of soil analysis*. Part 2. *Chemical and microbiological properties*. Second Edition, Soil Science Society of America, American Society of Agronomy, Madison. WI, USA.
- Kuo, S. (1996). Phosphorus. Pp. 869–918. In: *Methods of soil analysis*. Part 3. *Chemical methods*. Soil Science Society of America, Madison. WI, USA.
- Lindsay, W.L., & Norvell, W. (1978). Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of America Journal*, 42, 421–428. <https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x>
- Lorestani, B., Arjangi, C. & Merrikhpour, H. (2014). Effect of kiwi shell and incubation time on mobility of lead and cadmium in contaminated clay soil. *Journal of Chemical Health Risks*, 4, 23–37. DOI: [10.22034/jchr.2018.544064](https://doi.org/10.22034/jchr.2018.544064)
- Madrid, F., Lopez, R. & Cabrera, F. (2007). Metal accumulation in soil after application of municipal solid waste compost under intensive farming conditions. *Agricultural Ecosystem Environment*, 199, 249–256. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.07.006>
- Meng, J., Tao, M., Wang, L., Liu, X. & Xu, J. (2018). Changes in heavy metal bioavailability and speciation from a Pb-Zn mining soil amended with biochars from co-pyrolysis of rice straw and swine manure. *Science of the Total Environment*, 633, 300–307. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.199>
- Nelson, D.W. & Sommers, L.E. (1996). Total carbon, organic carbon, and organic matter. Pp. 961–1010. In: *Methods of soil analysis*. Sparks DL, et al. (eds) Part 3. *Chemical methods*. Soil Science Society of America, American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA.
- Peters, J. (2003). Recommended Methods of Manure Analysis. *Cooperative Extension publishing, University of Wisconsin*, USA.
- Rahimi, T. (2018). The effect of different levels of cow manure and its biochar on adsorption, desorption kinetic, chemical Fractionation and availability of Ni to maize plant. Ph.D thesis, Shahid Chamran University, Ahwaz, Iran. (In Persian with English abstract)

- Rajaie, M., Karimian, N. & Yasrebi, J. (2008). Nickel transformation in two calcareous soil textural classes as affected by applied nickel sulfate. *Geoderma*, 144, 344–351. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.12.001>
- Ravanbakhsh, M.H., Fotovat, A. & Haghnia, G. (2011). Effect of sewage sludge, clay content and time on the fractionation of nickel and cadmium in selected calcareous soils. *Journal of Water and Soil*, 25, 446–458. (In Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.9625>
- Rhoades, J.D. (1996). Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. Pp. 417–435. In: *Methods of Soil Analysis*. Part 3. *Chemical Methods*. Soil Science Society of America, Madison, WI, USA.
- Sefidgar Shahkoloaie, S., Barani Motlagh, M., Dordipour, E. & Khormali, F. (2020). Effects of organic and inorganic amendments on fractionation of cadmium during incubation time in a contaminated calcareous soil. *Applied Soil Research*, 8, 14–26. (In Persian with English abstract)
- Selim, H.M. & Sparks, D.L. (2001). *Heavy metals release in soils*. CRC Press, Boca Raton, USA.
- Sing, J.P., Karwasra, P.S. & Sing, M. (1988). Distribution and forms of copper, iron, manganese and zinc in calcareous soils of India. *Soil Science*, 146, 359–366.
- Tashakor, M., Zuhairi, W., Yaacob, W., Mohamad, H., Abdul Ghani, A. & Saadati, N. (2014). Assessment of selected sequential extraction and the toxicity characteristic leaching test as indices of metal mobility in serpentinite soils. *Chemical Speciation & Bioavailability*, 26, 139–147. DOI: [10.3184/095422914X14036277112433](https://doi.org/10.3184/095422914X14036277112433)
- Tessier, A., Campbell P.G. & Bisson M. (1979). Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Analytical Chemistry*, 51, 844–851.
- Thomas, G.W. (1996). Soil pH and soil acidity. Pp. 475–490. In: *Methods of soil analysis*. Sparks DL, et al. (eds) Part 3. *Chemical methods*. Third Edition, Soil Science Society of America, American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA.
- Tordoff, G.M., Baker, A.J.M. & Willis, A.J. (2000). Current approaches to the revegetation and reclamation of metalliferous mine wastes. *Chemosphere*, 41, 219–228. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(99\)00414-2](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(99)00414-2)
- Udom, B.E., Mbagwu, J.S.C., Adesodun, J.K. & Agbim, N.N. (2004). Distributions of zinc, copper, cadmium and lead in tropical Ultisol after long-term disposal of sewage sludge. *Environment International*, 30, 467–470. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2003.09.004>
- Westerman, R.L. (1990). *Soil testing and plant analysis*. 3rd Edition, Soil Science Society of America Book Series No. 3, Madison, WI, USA.
- Yang, X., Baligar, V.C., Martens, D.C. & Clark, R.B. (1996). Plant tolerance to nickel toxicity. I: Influx, transport and accumulation of nickel in four species. *Journal of Plant Nutrition*, 19, 73–85. <https://doi.org/10.1080/01904169609365108>
- Zinati, G.M., Li, Y.C., Bryan. H.H., Mylavarapu, R.S. & Cadallo, M. (2004). Distribution and fractionation of phosphorus, Cadmium, nickel, and lead in calcareous soils amended with composts. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 39, 209–223. <https://doi.org/10.1081/PFC-120027450>