



## The Effect of Cadmium Pollution on Clay Minerals Transformation in Wheat Rhizospheric Soil

P. Kabiri Samani<sup>1\*</sup>, M.H. Salehi<sup>2</sup>, H. Motaghian<sup>3</sup>

Received: 16-03-2022

Revised: 14-06-2022

Accepted: 30-07-2022

Available Online: 22-09-2022

### How to cite this article:

Kabiri Samani P., Salehi M.H., and Motaghian H. 2022. The Effect of Cadmium Pollution on Clay Minerals Transformation in Wheat Rhizospheric Soil. Journal of Water and Soil 36(3): 393-405. (In Persian with English abstract)

DOI: [10.22067/jsw.2022.75590.1145](https://doi.org/10.22067/jsw.2022.75590.1145)

### Introduction

In addition to the minerals, weathering in soil which depends on soil forming factors and processes, plants rhizosphere release components which affect soil minerals and finally their weathering. If the soil is polluted by heavy metals, root exudates will be influenced resulting in decreasing microbial activity. Many studies showed minerals weathering in rhizospheric medium for both natural soils and pure clay minerals but information about the effect of pollution of rhizosphere on clay minerals weathering is limited. This study was conducted to investigate the effect of cadmium pollution on the transformation of clay minerals in wheat rhizosphere in a dominant soil of Shahrekord plain (Chaharmahal soil series).

### Materials and methods

Soil samples were collected from 0-20 cm depth of Chaharmahal soil series based on the 1:50,000 scale soil map. A factorial experiment as completely randomized design with three replications and three cadmium levels (0, 5, and 10 mg kg<sup>-1</sup> from cadmium) was performed in two environments including bulk soil and rhizospheric soil (18 samples in total) in greenhouse conditions for 16 weeks. Necessary care was taken during the growth period and the soil moisture was kept constant at the field capacity. At harvest time, the rhizosphere soil was separated from bulk soil. Then, the soil samples were air dried and passed through a 2 mm sieve. The mineralogy was examined by X-ray diffraction (XRD) in the studied soil after plant harvest (including rhizospheric soil and bulk soil) in unpolluted samples. Then, results were compared with minerals in polluted rhizosphere media. Dissolved organic carbon (DOC) and pH in the rhizosphere and bulk soils were also determined.

### Results and Discussion

The results showed that the effect of contamination on soil pH was not significant but the pH value in rhizosphere soil was significantly lower than the bulk soil. The average pH in the soil was 7.8 and in the rhizosphere reduced to 7.5. The interaction of medium (rhizosphere and bulk soil) and contamination on the amount of dissolved organic carbon was significant ( $p < 0.01$ ). The amount of dissolved organic carbon in the rhizosphere at 170.6 mg Kg<sup>-1</sup> was significantly higher than the bulk soil (104.6 mg kg<sup>-1</sup>), which could be due to root secretions. In the rhizosphere, increasing the contamination level to 5 mg kg<sup>-1</sup> decreased by 19% and contamination of 10 mg kg<sup>-1</sup> caused a 21% decrease in dissolved organic carbon. The amount of dissolved organic carbon in the rhizosphere was 39% higher than the bulk soil. The average of dissolved organic carbon in the rhizosphere and bulk soil was 170.6 and 104.6 mg kg<sup>-1</sup>, respectively. Based on mineralogical results, mica, smectite, chlorite, kaolinite and palygorskite minerals were detected in the bulk soil. Comparison of clay minerals samples in the bulk soil and rhizosphere showed that the trioctahedral chlorite transformed to hydroxy-interlayer vermiculite (HIV) in the rhizosphere soil. The presence of HIV was identified by an increase in the intensity ratio of the 10 and 14 angstrom peaks after K-saturation. In rhizospheric soils, the intensity of the 14

1, 2 and 3- Ph.D. Student, Professor and Associate Professor, Soil Science Department, College of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran, respectively.

(\*- Corresponding Author Email: [parisak69@yahoo.com](mailto:parisak69@yahoo.com))

angstrom peak decreases in K-550°C treatment. Furthermore, in the rhizospheric soils, a clear increase in the intensity of the 10 angstrom peak was observed from K-air dried to K-550°C treatments which can be related to the presence of HIV which can be attributed to the changing conditions of the rhizosphere, including reducing pH and increasing the dissolved organic carbon and the activity of microorganisms. Comparison of diffractograms for clay fraction of rhizospheric soil with different contamination levels after cultivation showed that the type of minerals in contaminated levels was similar to non-contaminated conditions, but the amount of trioctahedral chlorite was the highest in higher contaminated soil. The peak intensity of 14 angstrom in potassium saturated sample heated at 550°C was lower in non-contaminated soil. Also, at the level of 10 mg kg<sup>-1</sup> cadmium contamination, the chlorite peak had the highest intensity which indicates less chlorite was transformed to HIV in the contaminated soils.

## Conclusions

The results showed that DOC in the rhizosphere soil was significantly higher than the bulk soil, whereas pH significantly decreased in the rhizosphere soil compared to the bulk soil. In both the rhizosphere and the bulk soils, increasing the contamination caused a decreasing trend in dissolved organic carbon. Mineralogical results of the rhizospheric and the bulk soils showed that trioctahedral chlorite was transformed to hydroxy-interlayer vermiculite (HIV). In addition, rhizosphere contamination reduced the chlorite transformation. The results suggest that soil contamination with a negative impact on plant activity and soil could even prevent the availability of nutrients from the clay minerals structure.

**Keywords:** Cadmium, Clay mineral, Contamination, Rhizosphere, Wheat

مقاله پژوهشی

جلد ۳۶، شماره ۳، مرداد-شهریور ۱۴۰۱، ص ۳۹۳-۴۰۵

## تأثیر آلودگی به کادمیم بر تغییر و تبدیل کانی‌های رسی در خاک ریزوسفری گندم

پریسا کبیری سامانی<sup>۱\*</sup> - محمدحسن صالحی<sup>۲</sup> - حمیدرضا متقیان<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۵/۰۸

### چکیده

ریزوسفر گیاهان، باعث رهاسازی عناصر از کانی‌های خاک، تغییر و تبدیل کانی‌ها می‌شود. در این مطالعه تأثیر ریزوسفر گندم و نیز آلودگی آن به کادمیم (مقادیر صفر، ۵ و ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بر تغییر و تحول کانی‌های رسی موجود در خاک غالب دشت شهرکرد (سری چهارمحال) بررسی شده است. پژوهش به مدت ۱۶ هفته در شرایط گلخانه، در دو محیط ریزوسفر و توده خاک به صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار (در مجموع ۱۸ نمونه) اجرا گردید. بعد از برداشت گیاه، ابتدا کانی‌های رسی موجود در خاک ریزوسفری غیرآلوده با توده گندم غیر آلوده و سپس، ریزوسفر آلوده با محیط ریزوسفر غیرآلوده مقایسه شدند. نتایج نشان داد که pH در خاک‌های ریزوسفری نسبت به توده خاک کاهش معنی‌داری یافت و کربن آلی محلول در خاک‌های ریزوسفری گندم نیز، به طور معنی‌داری بیشتر از توده خاک بود. همچنین، در خاک‌های آلوده (توده و ریزوسفر)، مقدار کربن آلی محلول به طور معنی‌داری کمتر از خاک‌های غیرآلوده بود. این نتایج، نشان‌دهنده فعالیت بیشتر موجودات زنده در محیط ریزوسفر و تأثیر منفی آلودگی بر آن بود. نتایج کانی‌شناسی نشان داد کانی حدواسط ورمی کولیت با هیدروکسی بین لایه‌ای (HIV) از تبدیل کانی کلریت سه‌جایی در محیط ریزوسفر تشکیل شده است ولی با افزایش آلودگی، شدت هوادیدگی کانی کلریت و نیز تبدیل آن به HIV کاهش می‌یابد. بنابراین، آلودگی خاک با تأثیر منفی بر فعالیت گیاهان و سایر موجودات زنده خاک، حتی می‌تواند مانع از دسترس قرار گرفتن عناصر غذایی موجود در ساختار کانی‌های خاک گردد.

واژه‌های کلیدی: آلودگی، ریزوسفر، کانی‌رسی، کادمیم، گندم

### مقدمه

ریزوسفر به‌عنوان ناحیه دربرگیرنده ریشه‌های فعال بر ویژگی‌های شیمیایی و زیستی خاک مؤثر می‌باشد، که در آن تغییراتی مانند اسیدی‌شدن، افزایش مقدار مواد آلی، تغییر در فعالیت و زیست توده ریزجانداران اتفاق می‌افتد. این ویژگی‌های متفاوت ریزوسفر، بر جذب عناصر به‌وسیله گیاهان مؤثر هستند (Khademi et al., 2008). هوادیدگی کانی‌ها فرآیندی است که منجر به عرضه عناصر غذایی پر نیاز مانند کلسیم، منیزیم، پتاسیم، گوگرد و برخی عناصر غذایی کم نیاز می‌گردد (Birkeland, 1990). هوادیدگی کانی‌ها در ریزوسفر می‌تواند با یکسری فرآیندها مثل آزادسازی یون هیدروژن،

دی‌اکسید کربن و ترشحات اسیدهای آلی مرتبط باشد (Wallander, 2000). مطالعات مختلفی اثر فرآیندهای بیولوژیکی و مواد مترشحه از ریشه گیاهان و قارچ‌ها را بر روی هوادیدگی کانی‌ها در ناحیه ریزوسفر بیان کرده‌اند (Hinsinger and Htzpatrick and Roux, 1979; Jaillard, 1993; Khayyamim et al., 2010; Khormali et al., 2015; Martin and Sparks, 1985; Rezainejad et al., 2020; Rezainejad et al., 2021; Salehi and Tahamtani, 2012). برخی از این مطالعات روی رس‌های خالص و برخی از آن‌ها روی رس‌های موجود در خاک انجام شده‌اند.

صالحی و تهمنتی (Salehi and Tahamtani, 2012) تأثیر ریزوسفر دو گیاه گندم و یولاف را بر تغییر و تبدیل کانی پالیگورسکیت خالص مورد بررسی قرار دادند، نتایج نشان‌دهنده عدم تشکیل کانی جدید از هوادیدگی پالیگورسکیت در محیط ریزوسفر این دو گیاه بود. اگر چه وجود منیزیم در بافت گیاهان تغذیه شده با محلول غذایی بدون منیزیم، دلیلی بر تخریب ساختمان پالیگورسکیت تحت تأثیر ریزوسفر این گیاهان بود. هم‌چنین کاهش شدت نقطه فراز

۱، ۲ و ۳- به‌ترتیب دانشجوی دکتری مدیریت منابع خاک و ارزیابی اراضی، استاد و دانشیار گروه خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد  
(Email: parisak69@yahoo.com) \* - نویسنده مسئول

۱۰/۵ آنگستروم مربوط به این کانی در محیط‌هایی که منبع منیزیم گیاه فقط کانی پالیگورسکیت بود و تغذیه با محلول غذایی بدون منیزیم انجام شد نسبت به محیط‌های تغذیه شده با محلول غذایی کامل بیشتر بود. رضایی نژاد و همکاران (Rezaeinejad et al., 2020) تبدیل کانی فلوگوپیت به ورمی کولیت را به دلیل جذب پتاسیم توسط ریشه گیاه جو گزارش کردند. در این مطالعه، نرخ تبدیل فلوگوپیت به ورمی کولیت با مقدار فلوگوپیت اضافه شده همبستگی معکوس و با سطح تنش خشکی اعمال شده همبستگی منفی داشت. نتایج آن‌ها نشان داد تنش خشکی به طور چشم‌گیری سرعت آزاد شدن پتاسیم از مواد معدنی و سرعت هوازدگی بیولوژیکی آن را کاهش می‌دهد. نوروزی و خادمی (Norouzi and Khademi, 2007) توانایی ریشه‌های گیاه یونجه در تغییر کانی‌های میکایی فلوگوپیت، بیوتیت و موسکویت همراه با آزاد شدن بین لایه‌ای و ورمی کولیتی شدن میکا در ریزوسفر این گیاه را مطالعه کردند. نتایج نشان داد که یونجه قادر به آزاد سازی پتاسیم بین لایه‌ای از فلوگوپیت و بیوتیت در طول دوره کشت بوده و پتاسیم آزاد شده بخش قابل توجهی از نیاز گیاه را تأمین می‌کند.

رضایی (Rezaei, 2010) در مطالعات کانی‌شناسی که روی بخش رس و سیلت خاک‌ها در چهار رده اریدی سول، آلفی سول، اینسپتی سول و مالی سول در استان گلستان به منظور بررسی تأثیر ریزوسفر گیاه بر هوادیدگی کانی‌ها انجام داد گزارش نمود که در چهار رده‌ی خاک مطالعه شده با کشت گیاه ذرت تحت تأثیر ترشحات و اسیدی شدن محیط ریشه، هوادیدگی کانی‌ها صورت گرفته است و در هر چهار رده‌ی خاک بعد از گذشت یک فصل زراعی در بخش سیلت، کانی‌های کلریت، میکا و حتی پلاژیوکلاز حذف گردیده‌اند. همچنین در بسترهای حاوی رس، کانی حدواسط میکا-ورمی کولیت تشکیل شده است. شاهرخ و همکاران (Shahrokh et al., 2020) در مطالعه بر روی تغییر کانی‌های رسی در خاک زیر کشت پرتقال دریافتند کاهش مقدار کانی ایلیت و افزایش کانی‌های اسمکتیت و مختلط ایلیت-اسمکتیت در ارتباط با افزایش سن باغ‌های مورد مطالعه است. شاهرخ و همکاران (Shahrokh et al., 2020) تشکیل کائولینیت از پالیگورسکیت را در ریزوسفر درختان مرکبات مناطق نیمه خشک گزارش کردند. حسینی‌فرد (Hosseinifard, 2010) تأثیر کشت و سن باغات پسته را روی تغییرات ویژگی‌های خاک بررسی کرد. بررسی تغییرات کانی‌شناسی بیانگر تبدیل کانی پالیگورسکیت به اسمکتیت، کاهش مقدار کانی ایلیت و افزایش کانی اسمکتیت بر اثر خروج پتاسیم از فضای بین لایه‌ای ناشی از فعالیت ریشه گیاهان و جذب پتاسیم بود. مصلح و همکاران (Mosleh et al., 2013) تأثیر کشت گیاه بابونه آلمانی و کاربرد کود دامی بر تغییر و تحولات کانی‌های بخش رس و سیلت خاک‌های مختلف در دشت شهرکرد استان چهارمحال و بختیاری را مورد بررسی قرار داده و نشان دادند

که در بخش رس کانی تری‌اکتاهدرال تحت تأثیر ریزوسفر گیاه بابونه آلمانی به کانی دی‌اکتاهدرال کلریت تبدیل شد و کانی کائولینیت از محیط خاک حذف شد. همچنین، در خاک‌های تیمار شده با کود دامی، تغییر کانی‌ها، مشابه با خاک‌های بدون کود بود. روشنی (Roushani, 2010) سه نوع خاک (آلفی سول، ورتی سول و اینسپتی سول) که کانی غالب آن‌ها ایلیت بود را تحت کشت سورگوم قرار داد و در پایان دوره کشت تبدیل کانی ایلیت را به کانی‌های اسمکتیت، ورمی کولیت و کلریت در اثر جذب دائمی پتاسیم از خاک و آزاد شدن پتاسیم از بین لایه‌های ایلیت، گزارش نمود. رضایی نژاد (Rezaeinejad, 2022) در مطالعه روی تأثیر ریزوسفر درختان بادام وحشی و امچک در سنین مختلف بر ویژگی‌های خاک و کانی‌های رسی، ورمی کولیتی شدن کانی‌های رسی میکایی در ریزوسفر این درختان را گزارش کرد. نتایج نشان داد که میانگین پتاسیم قابل استفاده در خاک تحت پوشش درختان بادام وحشی و امچک بیشتر از خاک بکر و فاقد این درخت بود و با افزایش سن درخت میزان پتاسیم قابل استفاده افزایش یافت. در خاک سطحی درختان بادام با سن‌های مختلف مقدار پتاسیم غیرتبادلی نسبت به شاهد افزایش یافت، در حالی که در اعماق دیگر کاهش نسبت به شاهد مشاهده شد. همچنین میانگین مقادیر پتاسیم غیرتبادلی در کل خاک‌رخ تمام سن‌ها نسبت به خاک شاهد کاهش یافت، که این موضوع نشان دهنده‌ی آزاد شدن پتاسیم غیر تبادلی در نمونه‌های خاک تحت رشد درختان بادام وحشی و امچک بود. همچنین با افزایش سن درختان و رشد ریشه پتاسیم بیشتری از خاک جذب شده و تغییرات بیشتری در کانی‌های رسی خاک گزارش شد.

مطالعات مختلف نشان داده‌اند که آلودگی خاک سبب کاهش فعالیت میکروبی و جمعیت میکروبی (زیست توده)، گوناگونی زیستی میکروبی، تجزیه مواد آلی و فعالیت آنزیمی خاک و به‌طور کلی تغییر شرایط ریزوسفر می‌شود (Karaca et al., 2013; Bagheri and Mirseyed Hosseini, 2015; al., 2002; Mosleh et al., 2013; Norouzi and Khademi, 2007). همچنین مطالعات در ارتباط با تأثیر ریزوسفر بر تغییر کانی‌ها، در محیط‌های غیرآلوده متمرکز بوده است (Hinsinger and Jaillard, 2013; Mosleh et al., 2013; Norouzi and Khademi, 2007). بنابراین، مطالعه حاضر با هدف بررسی اثر ریزوسفر گندم و آلودگی آن به کادمیم روی تغییر کانی‌های رسی خاک غالب دشت شهرکرد (سری چهارمحال) استان چهارمحال و بختیاری انجام شده است.

## مواد و روش‌ها

نمونه خاک مورد نظر از عمق صفر تا بیست و پنج سانتی‌متری خاک غالب دشت شهرکرد (سری چهارمحال) بر اساس نقشه خاک ۱:۵۰۰۰ منطقه برداشت شد. آزمایش در گلخانه تحقیقاتی به منظور

۴۰ درجه برای نمونه‌های اشباع شده با کلرید منیزیم و ۴ تا ۱۵ درجه برای سایر تیمارها، مورد تجزیه قرار گرفتند و نتایج کانی‌شناسی ریزوسفر و توده خاک (غیرآلوده) و همچنین ریزوسفر آلوده و غیرآلوده مقایسه شدند.

## نتایج و بحث

برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه در جدول ۱ نشان داده شده است. بر اساس نتایج ارائه شده در جدول ۱ خاک به کار رفته در این پژوهش با کلاس بافتی رسی، غیر شور، آهکی و با واکنش قلیایی و غیرآلوده بوده است. نتایج تجزیه واریانس (جدول ۲) نشان می‌دهد که تأثیر آلودگی بر pH خاک معنی‌دار نبوده است ولی اثر محیط (ریزوسفر و توده خاک) بر pH معنی‌دار بوده و میانگین pH کاهش معنی‌داری در خاک‌های ریزوسفری نسبت به توده خاک دارد. میانگین مقدار pH در خاک توده ۷/۸ بود و در ریزوسفر این مقدار به ۷/۵ کاهش یافت. در اغلب موارد تغییر در مقدار pH ریزوسفر به دلیل خنثی کردن بار بر اثر جذب عناصر غذایی توسط گیاه اتفاق می‌افتد. دلیل اصلی آن اتفاق عدم توازن در جذب کاتیون و آنیون به وسیله ریشه گیاهان است. بر همین اساس در کشت گیاه گندم حتی اختلاف ۲/۲ واحدی برای pH بین توده خاک و ریزوسفر گزارش شده است که می‌تواند سبب جذب یا آزاد شدن، رسوب یا حلالیت عناصر سنگین شود. عناصر سنگین شرایط اسیدی، حلالیت بیشتری پیدا می‌کنند (Lombi et al., 2001).

مقایسه و همکاران (Motaghian et al., 2013) در مطالعه ریزوسفر گندم نشان دادند که میانگین pH در خاک‌های ریزوسفری، کاهش معنی‌داری نسبت به خاک‌های توده داشتند. در مطالعه دیگری (Motaghian and Hosseinpour, 2013) در ریزوسفر گیاه لوبیا، کاهش ۰/۲ واحدی pH ریزوسفر نسبت به توده خاک گزارش گردید. لی و همکاران (Li et al., 2011) نشان دادند که pH در ریزوسفر گیاه لوبیا ۱/۶ واحد نسبت به خاک کشت نشده (شاهد)، کاهش یافت. نتایج تجزیه واریانس (جدول ۲) نشان می‌دهد که اثر متقابل محیط (ریزوسفر و توده خاک) و آلودگی بر میزان کربن آلی محلول معنی‌دار ( $p < 0/01$ ) است. مقدار کربن آلی محلول در ریزوسفر با مقدار ۱۷۰/۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم بیشتر از توده خاک (۱۰۴/۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم) است که می‌تواند به دلیل وجود ترشحات ریشه در این ناحیه باشد (Motaghian et al., 2013).

کیبم و همکاران (Kim et al., 2010) همبستگی معنی‌داری بین کربن آلی محلول و جمعیت باکتریایی در خاک‌های ریزوسفری گزارش کردند. ایشان نشان دادند که جمعیت باکتریایی در خاک‌های ریزوسفری بیشتر از خاک‌های توده بود.

بررسی تأثیر دو محیط ریزوسفر و توده خاک و نیز آلودگی آن به کادمیم بر تغییر و تبدیل کانی‌ها، با استفاده از ریزوباکس (برای جداسازی محیط ریزوسفر از توده خاک) اجرا گردید. این تحقیق براساس آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار و سه سطح کادمیم (صفر، ۵ و ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و در مجموع با ۱۸ نمونه مورد آزمایش قرار گرفت.

مقدار ۴/۵ کیلوگرم خاک هوا خشک شده از الک ۶/۳ میلی‌متری عبور داده شد و به هر گلدان منتقل شد. برای آلوده کردن خاک به کادمیم از منبع کلرید کادمیم استفاده شد. نمونه‌ها به مدت ۳۰ روز در ظرفیت زراعی خوابانده شد. بدلیل این که سایر عناصر غذایی باید به مقدار کافی در اختیار گیاه باشند، به هر ریزوباکس ۱۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم نیتروژن از منبع اوره به صورت تقسیط در سه مرحله (ابتدا، میانه و انتهای دوره رشد)، ۱۰ میلی‌گرم آهن در کیلوگرم خاک از منبع سکوسترین ۱۳۸، ۵ میلی‌گرم مس در کیلوگرم خاک از منبع سولفات مس، ۵ میلی‌گرم منگنز در کیلوگرم خاک، از منبع سولفات منگنز و ۵ میلی‌گرم در کیلوگرم روی از منبع سولفات روی اضافه شد. قبل از کشت، بذرهاى گندم (*Triticum aestivum* L.) (رقم بک‌کراس روشن) با استفاده از محلول هیپوکلریت سدیم (۳٪) استریل شدند. سپس، درون آب مقطر قرار داده شدند تا در کاغذ صافی جوانه زدند. پنج بذر در هر ریزوباکس کشت و پس از دوره کوتاهی (یک هفته)، به سه گیاه کاهش داده شد. در طول مدت رشد مراقبت‌های لازم انجام و سعی شد رطوبت خاک‌ها در حد ظرفیت مزرعه (FC) ثابت بماند (جدول ۱). دمای گلخانه در روز ۲۰ تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد و در شب ۱۵ تا ۲۰ درجه سانتی‌گراد بود. پس از پایان ۱۶ هفته کشت، خاک محیط ریزوسفری و توده به منظور آزمایشات بعدی جداسازی گردید و پس از هوا خشک کردن از الک دو میلی‌متری عبور داده شدند. برای تعیین کربن آلی محلول (DOC) از نسبت ۱ به ۲ خاک به آب مقطر استفاده شد، محلول صاف رویی با استفاده از فیلتر ۰/۴۵ میکرومتر صاف گردید و در عصاره تهیه شده، مقدار کربن آلی محلول با روش سوزاندن تر تعیین شد (Nelson and Sommers, 1996). کادمیم قابل استفاده در خاک با استفاده از روش DTPA-TEA تعیین شد (Lindsay and Norvell, 1978).

مطالعات کانی‌شناسی در این پژوهش برای خاک مورد مطالعه بعد از برداشت گیاه (شامل خاک ریزوسفری و توده) در بخش رس خاک به روش کیتریک و هوپ (Kittrick and Hope, 1963) انجام گردید. بخش رس خاک‌ها پس از جداسازی با هفت تیمار جداگانه، شامل اشباع با منیزیم، اشباع با پتاسیم، اشباع با منیزیم و اتیلن‌گلیکول، اشباع با منیزیم و گلیسرول به مدت یک شبانه روز، اشباع با پتاسیم و نیز اشباع با پتاسیم در دماهای ۱۱۰، ۳۳۰ و ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد هر کدام به مدت دو ساعت تهیه و سپس نمونه‌ها توسط دستگاه پراش اشعه X مدل بروکر D8 تحت زاویه 2θ، ۴ تا

جدول ۱- برخی از ویژگی‌های خاک مورد مطالعه قبل از آلودگی  
Table 1- Some of Soil characteristics before pollution

شن Sand	سیلت Silt	رس Clay	کربنات کلسیم Calcium carbonate equivalent	رطوبت ظرفیت مزرعه $\theta_{FC}$	pH	هدایت الکتریکی EC (dSm <sup>-1</sup> )	کربن آلی Organic carbon (gr kg <sup>-1</sup> )	نیترژن N	پتاسیم K	فسفر P	مس Cu	آهن Fe	روی Zn	منگنز Mn	کادمیوم Cd
23	28	49	66	23.7	7.73	1.1	1.08	0.4	0.01	12	0.47	0.24	0.32	0.37	n.d
n.d. not detected															

(mg.kg<sup>-1</sup>)

جدول ۲- تجزیه واریانس اثر آلودگی و محیط (ریزوسفر و توده خاک) بر pH، کادمیم قابل استفاده خاک و کربن آلی محلول  
Table 2- Analysis of variance for the effects of contamination and environment (rhizosphere and bulk soil) on pH, available soil cadmium and dissolved organic carbon (DOC)

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی (Df) <sup>a</sup>	میانگین مربعات Mean squares		
		pH	کادمیم قابل استفاده (Available soil Cd)	کربن آلی محلول (DOC) <sup>b</sup>
آلودگی Contamination	2	0.21 <sup>ns</sup>	15.613 <sup>***</sup>	13926.6 <sup>***</sup>
محیط Environment	1	0.048 <sup>**</sup>	0.009 <sup>ns</sup>	78012.4 <sup>***</sup>
محیط × آلودگی Environment × contamination	2	0.005 <sup>ns</sup>	0.047 <sup>ns</sup>	1217.7 <sup>**</sup>
خطا Residual	24	0.006	0.078	196.5

ns, \*, \*\*, \*\*\* به ترتیب به مفهوم غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطوح ۵، ۱ و ۰/۱ درصد می‌باشد.  
ns, \*, \*\* and \*\*\* are nonsignificant and significant at 5, 1 and 0.1% probability levels, respectively.  
a:(Df): Degree of freedom, b: DOC: Dissolved organic carbon.

جدول ۳- اثر محیط (ریزوسفر و توده خاک) و آلودگی بر میزان کربن آلی محلول (DOC) خاک  
Table 3- The effect of environment and contamination on the amount of dissolved organic carbon (DOC) in the studied soil

	آلودگی (mg kg <sup>-1</sup> )			میانگین کربن آلی محلول محیط Mean dissolved organic carbon
	Contamination			
	صفر	5	10	
ریزوسفر Rhizosphere	196.9 <sup>A</sup>	159.3 <sup>B</sup>	155.8 <sup>C</sup>	170.66 <sup>A</sup>
توده Bulk soil	122.3 <sup>D</sup>	98.6 <sup>E</sup>	93.1 <sup>E</sup>	104.66 <sup>B</sup>
میانگین کربن آلی محلول هر سطح آلودگی Average dissolved organic carbon at pollution levels	159.6 <sup>A</sup>	128.9 <sup>B</sup>	124.45 <sup>C</sup>	

حروف مشابه بزرگ، نشان دهنده عدم اختلاف معنی‌دار بین محیط و سطوح آلودگی در سطح (P<0.001) براساس آزمون LSD می‌باشد.  
Similar uppercase letters indicate no significant difference between contamination levels on the basis of LSD test.

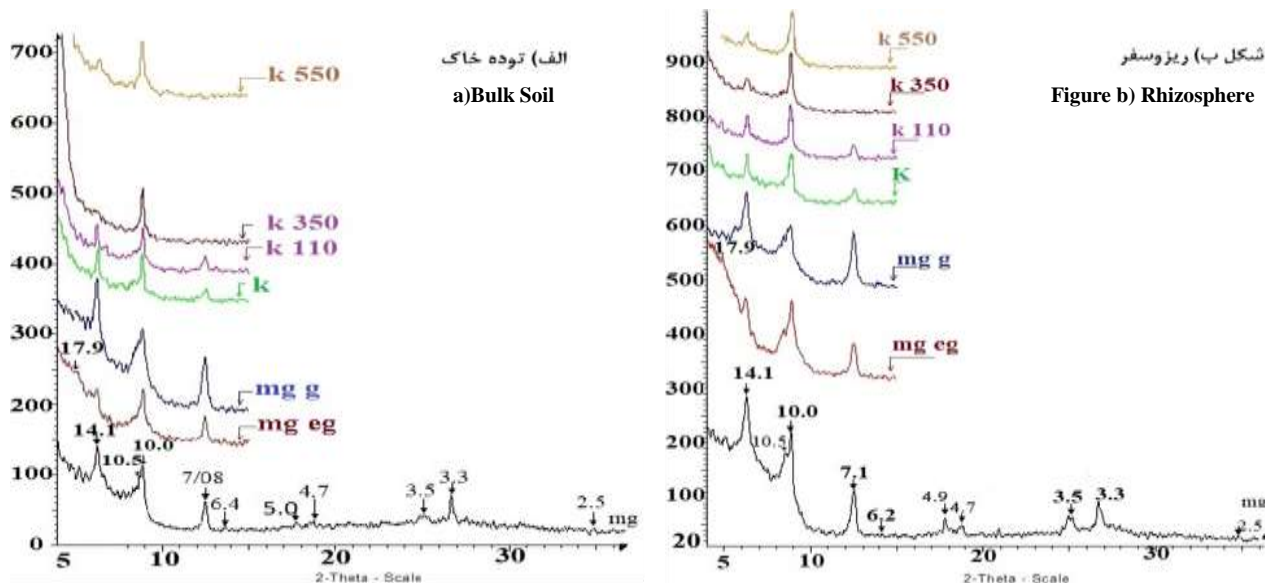
### تأثیر ریزوسفر بر تغییر و تبدیل کانی‌های رسی نسبت به توده خاک پس از پایان دوره کشت

دو پراش نگاشت مربوط به تیمارهای مختلف خاک در دو بخش ریزوسفر و توده خاک شهرکرد در شرایط غیرآلوده و بعد از کشت گندم، در شکل ۱ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که نتایج ارایه شده برای توده خاک غیرآلوده به‌عنوان کانی‌های موجود در خاک قبل از کشت گیاه گندم نیز قابل تعمیم هستند. پراش نگاشت مربوط به نمونه‌های خاک حاکی از آن است که کانی‌های میکا، اسمکتیت،

جدول ۳ نشان می‌دهد که مقدار کربن آلی محلول در توده خاک در سطح آلودگی ۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم، ۱۹ درصد و در سطح آلودگی ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، ۲۴ درصد نسبت به توده غیرآلوده، کاهش یافته است. در محیط ریزوسفر، افزایش سطح آلودگی به ۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم، ۱۹ درصد کاهش و آلودگی ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم ۲۱ درصد کاهش کربن آلی محلول را سبب شده است. متقیان و همکاران (Motaghian and Hosseinpour, 2013) نشان دادند که کربن آلی محلول در محیط ریزوسفری گیاه لوبیا ۲۳ درصد بیشتر از توده خاک بود.

از یکدیگر نیاز به تیمارهای اضافی از جمله تیمار HCl و دی متیل سولفو کساید (DMSO) می‌باشد (Dixon and Weed, 1989). از آن جایی که کلریت غنی از آهن، کانی تری اکتاهدرال می‌باشد که پیک‌های رده فرد آن (۱۴ و ۴/۷ آنگستروم) ضعیف و پیک‌های رده زوج آن (۷ و ۳/۵ آنگستروم) قوی می‌باشند (Hitzpatrick and Roux, 1979). به همین دلیل، وجود پیک ۷ آنگستروم آن‌ها می‌تواند با کانی کائولینیت هم‌پوشانی داشته باشد. شدت پیک رده اول در کلریت‌های تری اکتاهدرال در اثر حرارت ۵۵۰ درجه سلسیوس، کمی افزایش می‌یابد و از شدت پیک رده دوم آن‌ها کاسته می‌شود (Douglas, 1989). بر همین اساس، کانی کلریت نمونه توده خاک از نوع تری اکتاهدرال است. مصلح و همکاران (Mosleh et al., 2013) نیز در مطالعه بخش رس خاک‌های این منطقه، کانی کلریت موجود را از نوع تری اکتاهدرال (سه‌جایی) گزارش کردند. آن‌ها همچنین با استفاده از تیمار HCL وجود کانی کائولینیت را تأیید کردند. وجود نقاط فراز ۱۰/۵ و ۶/۴ آنگستروم در تیمار اشباع با منیزیم و حذف حالت دو شاخه‌ای در تیمار پتاسیم و حرارت ۵۵۰ درجه سلسیوس نشان دهنده وجود کانی پالیگورسکیت است.

کلریت، کائولینیت و پالیگورسکیت در بخش رس نمونه‌های توده خاک وجود داشته‌اند. در نمونه توده خاک (شکل ۱ قسمت الف) وجود نقاط فراز ۱۴، ۷، ۴/۷ و ۳/۵ آنگستروم در تیمار اشباع با منیزیم و نیز وجود نقطه فراز ۱۴ آنگستروم در تیمار اشباع با پتاسیم و حرارت ۵۵۰ درجه سلسیوس به مدت ۲ ساعت، حاکی از وجود کانی کلریت در توده‌ی خاک می‌باشد. تشخیص رس کائولینیت نیز به کمک وجود نقاط فراز ۷/۱، ۳/۵۷ و ۲/۳۸ آنگستروم انجام می‌شود. وجود نقطه فراز ۷/۱ آنگستروم، در تیمار پتاسیم اشباع و حذف آن در تیمار اشباع با پتاسیم و حرارت ۵۵۰ درجه سلسیوس به مدت دو ساعت می‌تواند دلیلی بر وجود کانی کائولینیت در خاک باشد. از آن جایی که نقاط فراز دوم و چهارم کلریت آهن‌دار با نقاط فراز اول و دوم کائولینیت مشابه است در مواقعی که کانی کلریت از نوع کلریت آهن‌دار باشد، تشخیص دو کانی کلریت و کائولینیت کمی دشوار می‌باشد. در این صورت تشخیص نهایی این دو کانی بر مبنای وجود نقطه فراز سوم کائولینیت ۲/۳۸ آنگستروم و ۴/۷۵ آنگستروم برای کانی کلریت می‌باشد. از آن جایی که برخی از کانی‌های کلریت (کلریت غنی از آهن) نیز در حرارت ۵۵۰ درجه سلسیوس، نقطه فراز رده دوم (۷ آنگستروم) آن‌ها حذف می‌گردد، برای تشخیص دقیق‌تر این دو کانی



شکل ۱- پراش نگاشت مربوط به بخش رس خاک مورد مطالعه در خاک غیر آلوده دو محیط توده (الف) و ریزوسفر (ب). Mg: نمونه اشباع با منیزیم، Mg-Eg: نمونه اشباع با منیزیم و اتیلن گلیکول، Mg-G: نمونه اشباع با منیزیم و گلیسرول، K: نمونه اشباع با پتاسیم، K-110: پتاسیم و حرارت ۱۱۰ درجه، K-350: پتاسیم و حرارت ۳۵۰ درجه، K-550: پتاسیم و حرارت ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد.

Figure 1- Diffractograms for clay fractions of the studied soil in non-polluted soils of bulk soil (a) and rhizosphere (b). Mg: Magnesium saturated sample, Mg-Eg: Magnesium saturated sample with ethylene glycol, Mg-g: Magnesium saturated sample with glycerol, k: Potassium saturated sample, K-110: k: saturated sample heated at 110°C, k-350: K saturated sample heated at 350°C, K-550: K saturated sample heated at 550°C.



آنگستروم تبدیل می‌شود. دیکسون و وید (Dixon and Weed, 1989) تشکیل کانی ورمی‌کولیت با هیدروکسی بین لایه‌ای از هوازدگی کلریت در خاک را معمول دانسته‌اند. جورجیادیس و همکاران (Georgiadis et al., 2020) بر اساس نتایج محققین مختلف، تشکیل کانی HIV را از هوازدگی کلریت‌های با منشا پدوژنیک، کلریت اولیه و کلریت ثانویه گزارش کرده‌اند. مصلح و همکاران (Mosleh et al., 2014) در مطالعات کانی‌شناسی اثر کشت گیاه بابونه آلمانی بر تغییر کانی‌های بخش رس در خاک‌های همین منطقه، تشکیل HIV را از کانی کلریت سه‌جایی و کائولینیت گزارش کردند. شرایط اسیدی متوسط، مواد آلی کم، شرایط اکسیداسیون و مرطوب و خشک شدن مکرر خاک شرایط محیطی بهینه برای تشکیل HIV با منشا پدوژنیک هستند (Rich, 1968). هینسینگر و جیلارد (Hinsinger et al., 1993) تشکیل HIV از فلوگوپیت را در محیط ریزوسفری کلزا به دفع پروتون توسط ریشه نسبت دادند.

با توجه به مطالب ذکر شده در بالا می‌توان بیان کرد که، در محیط ریزوسفر گیاه گندم کانی HIV از کانی کلریت تری‌اکتاهدرال تشکیل شده است که این موضوع را می‌توان به تغییر شرایط ریزوسفر نسبت به توده از جمله کاهش pH، افزایش کربن آلی محلول و افزایش فعالیت و زیست توده جانداران در اثر کشت گیاه مرتبط دانست (جدول ۲ و ۳).

#### تأثیر آلودگی محیط ریزوسفر بر کانی‌های رسی خاک

پراش نگاشت‌های مربوط به تیمارهای مختلف ریزوسفر آلوده به کادمیم بعد از کشت گیاه در شکل ۲ نشان داده شده است. اگرچه بر اساس مطالب ارائه شده در قبل، نوع کانی‌ها در شرایط آلوده مشابه با شرایط غیرآلوده است اما مقایسه پراش نگاشت‌های خاک ریزوسفر با سطوح آلودگی ۵ و ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم (شکل ۲) با خاک ریزوسفر غیرآلوده (شکل ۱\_ب) نشان می‌دهد مقدار کانی کلریت در سطوح آلوده، بیشترین مقدار را دارد؛ به طوری که در سطح غیرآلوده شدت نقطه فراز ۱۴ آنگستروم در تیمار پتاسیم با حرارت ۵۵۰ درجه سلسیوس کمتر از سطح با آلودگی ۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم است و در سطح آلودگی ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم، نقطه فراز کلریت، بیشترین شدت را دارد (جدول ۴). این نتایج بدین معناست که مقدار کلریت کمتری در آلودگی بیشتر ریزوسفر به کادمیم به HIV تبدیل شده است. بر اساس نتایج، افزایش غلظت کادمیم قابل جذب در خاک، سبب کاهش فعالیت ریزوسفر شده است (جدول ۳) و کادمیم توانسته است با بازدارندگی و کاهش فعالیت ریزوسفر بر روند تبدیل و هوازدگی کانی‌ها مؤثر باشد. کاهش فعالیت ریزوسفر در اثر آلودگی به فلزات سنگین در مطالعات مختلفی گزارش شده است (Karaca et al., 2002; Li et al., 2012; Aghababaei et al., 2013).

حرارت دادن نمونه اشباع از پتاسیم تا ۵۵۰ درجه سلسیوس باعث متلاشی شدن ساختمان بلوری و از بین رفتن نقاط فراز مربوط به این رس می‌گردد (Dixon and Weed, 1989). حضور نقطه فراز ۱۴ آنگستروم در تیمار اشباع با منیزیم و تغییر آن به ۱۸ آنگستروم در تیمار منیزیم و اتیلن گلیکول دلیل بر حضور کانی‌های اسمکتیت است (Douglas, 1989). با توجه به اینکه نقطه فراز ۱۴ آنگستروم پس از تیمار اتیلن گلیکول و گلیسرول حالت پلکانی یا شانه‌ای پیدا کرده است، اسمکتیت دارای درجه بلوری ضعیف یا بار لایه‌ای کم می‌باشد (Htzpatrick and Roux, 1979).

مقایسه پراش نگاشت‌های پرتو ایکس ریزوسفر و توده خاک در شکل ۱ حاکی از آن است که بخشی از کانی کلریت سه‌جایی به کانی حدواسط ورمی‌کولیت با هیدروکسی بین لایه‌ای (HIV) تبدیل شده است. روش‌های مختلفی برای تشخیص کانی HIV توسط محققین مختلف ارائه شده است (Schaeztl and Georgiadis et al., 2020; Anderson, 2005). تشکیل HIV از کانی کلریت سه‌جایی را می‌توان توسط فروپاشی تدریجی لایه‌ی تری‌اکتاهدرال با افزایش دما تایید کرد. مفیدترین معیار XRD در تشخیص وجود اشکال هیدروکسی بین لایه‌ای پاسخ به افزایش دما در تیمارهای حرارتی مختلف اشباع شده با پتاسیم است (Dixon and Weed, 1989). در خاک ریزوسفری، افزایش واضح در شدت نقطه فراز ۱۰ آنگستروم در تیمار پتاسیم اشباع و حرارت ۵۵۰ درجه سلسیوس نسبت به تیمار اشباع با پتاسیم را می‌توان به تشکیل لایه‌های HIV نسبت داد (شکل ۱ و جدول ۴). از آنجایی که نقطه فراز ۱۴ آنگستروم HIV پس از دمای ۵۵۰ درجه سلسیوس به ۱۰ آنگستروم تبدیل می‌شود شدت نقطه فراز ۱۴

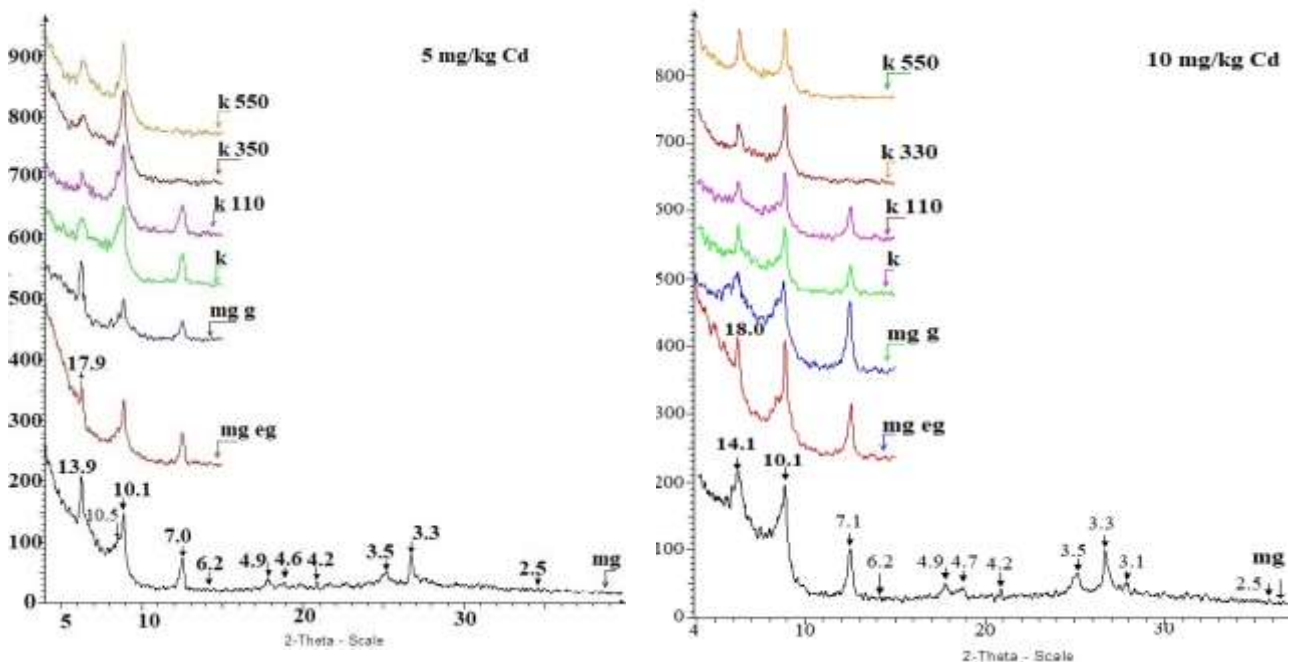
آنگستروم در این تیمار به کلریت نسبت داده می‌شود (Schaeztl and Anderson, 2005). بنابراین، کاهش شدت نقطه فراز ۱۴ آنگستروم در تیمار پتاسیم و حرارت ۵۵۰ درجه سلسیوس بیانگر هوادگی کلریت و تبدیل آن به HIV است (جدول ۴).

ژزربا و یوفر (Szczerba and Ufer, 2018) یکی دیگر از روش‌های شناسایی کانی‌های با هیدروکسی بین لایه‌ای را انبساط نقطه فراز ۱۴ آنگستروم در تیمارهای منیزیم اشباع با اتیلن گلیکول و منیزیم اشباع با گلیسرول نسبت به تیمار منیزیم اشباع معرفی کردند. بر همین اساس، در مطالعه حاضر، انبساط نقطه فراز ۱۴ آنگستروم و کاهش آن در هر دو تیمار اشباع با اتیلن گلیکول و اشباع با گلیسرول نسبت به تیمار منیزیم اشباع دلیل دیگری بر تشکیل HIV در ریزوسفر می‌باشد. علت انبساط این است که بخش‌هایی از ساختار کانی‌های با هیدروکسی بین لایه‌ای، توسط کاتیون‌های قابل تعویض لایه ورمی‌کولیتی اشغال می‌گردد و در تیمار منیزیم اشباع با اتیلن گلیکول و منیزیم اشباع با گلیسرول به نقطه فراز ۱۷/۸ یا ۱۷

جدول ۴- شدت نقاط فرز ۱۴ و ۱۰ انگستروم پس از حرارت دادن تدریجی در دماهای مختلف اعداد شدت میانگین سه تکرار هستند.

Table 4- Intensity (cps) of the 10 and 14 angstrom basal reflections after gradual heating at different temperatures  
The intensity values represent the average of three replicates.

محیط Environment	تیمارهای پتاسیم Potassium Treatments	میانگین شدت نقطه فرز ۱۴ انگستروم Mean of peak intensity, 14 angstrom	میانگین شدت نقطه فرز ۱۰ انگستروم Mean of peak intensity, 10 angstrom	نسبت نقطه فرز ۱۰ انگستروم به ۱۴ انگستروم در تیمار پتاسیم نسبت انسیاع Intensity ratio of 10 to 14 angstrom peak
توده خاک Bulk soil	k	40	60	
	k-110	40	50	1.5
	k-330	16	65	
ریزوسفر خاک Rhizosphere	k-550	28	65	
	k	50	70	1.2
	k-110	35	85	
ریزوسفر خاک با سطح آلودگی ۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیوم Soil rhizosphere with pollution levels of 5 mg kg <sup>-1</sup> cadmium	k-330	20	90	
	k-550	25	100	
	k	34	80	2.3
ریزوسفر خاک با سطح آلودگی ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیوم Soil rhizosphere with pollution levels of 10 mg kg <sup>-1</sup> cadmium	k-110	28	75	
	k-330	20	100	
	k-550	36	100	1.5



شکل ۲- پراش نگاشت خاک ریزوسفر در خاک با سطوح آلودگی ۵ و ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم الف) خاک با آلودگی ۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم. ب) خاک با آلودگی ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم. Mg: نمونه اشباع با منیزیم، Mg-eg: نمونه اشباع با اتیلن گلیکول، Mg-g: نمونه اشباع با گلیسرول، k: نمونه اشباع با پتاسیم، k-110: پتاسیم و حرارت ۱۱۰ درجه، k-350: پتاسیم و حرارت ۳۵۰ درجه، k-550: پتاسیم و حرارت ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد.

Figure 2- Diffractograms for clay fraction of Shahrekord soil rhizosphere in the soil with pollution levels of 5 and 10 mg kg<sup>-1</sup> cadmium. a) Soil with contamination of 5 mg kg<sup>-1</sup> cadmium. b) Soil with contamination of 10 mg kg<sup>-1</sup>. Mg: Magnesium saturated sample, Mg-eg: ethylene glycol saturated sample, Mg-g: Glycerol saturated sample, k: Potassium saturated sample, k-110: Potassium saturated at 110 °C, k-350: Potassium heated at 350°C and k-550: K heated at 550°C.

می‌گیرد. نتایج آنالیز عنصری (XRF) نیز با میزان پتاسیم جذب شده و نسبت ورمی‌کولیتی شدن هم‌خوانی داشت. در مطالعه آن‌ها ریزوسفر جو سبب رهاسازی پتاسیم از فلوگوپیت شد اما اعمال تنش خشکی میزان رهاسازی را کاهش داد.

### نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که محیط ریزوسفری گندم قادر است تغییراتی را در ویژگی‌های خاک ایجاد نماید به طوری که مقدار pH در خاک ریزوسفری به طور معنی‌داری کمتر از توده خاک بود و مقدار کربن آلی محلول در محیط ریزوسفر به طور بسیار معنی‌داری از توده خاک بیشتر بود. در خاک‌های آلوده در هر دو محیط ریزوسفری و توده خاک، میزان کربن آلی محلول کمتر از خاک غیرآلوده و اثر متقابل آلودگی و محیط، در مقدار کربن آلی محلول در خاک معنی‌دار بود. براساس نتایج کانی‌شناسی، HIV در محیط ریزوسفر خاک از کانی کلریت تری اکتاهدرال سه‌جایی تشکیل شد. هم‌چنین، آلودگی ریزوسفر باعث شد شدت هواپدیدی کانی کلریت و تبدیل آن به HIV کاهش یابد. چنین نتایجی نشان می‌دهد آلودگی خاک با تأثیر منفی بر

باقری و میر سید حسینی (Bagheri and Mirseyed, 2015) کاهش تنفس میکروبی، فعالیت میکروبی و آنزیمی خاک را در ریزوسفر آلوده به روی گزارش کردند. نادری‌زاده و خادمی (Naderizadeh and Khademi, 2011) نشان دادند که تجزیه مواد آلی و فعالیت‌های ریشه، قدرت اسیدی ریزوسفر را افزایش داده، رهاسازی پتاسیم را از کانی فلوگوپیت تسهیل کرده و در نهایت باعث تبدیل این کانی به کانی ورمی‌کولیت و تا حدی اسمکتیت و نیز تشکیل جزئی کلریت شده است. چنین نتایجی بیانگر این است که آلودگی در محیط ریزوسفر می‌تواند جذب عناصر را توسط گیاه کاهش دهد. بنابراین، حتی اگر امکان فراهم شدن عناصر از طریق هواپدیدی و تبدیل کانی‌های موجود در محیط خاک فراهم باشد گیاه توانایی هواپدیدی کانی و آزادسازی عناصر را نداشته باشد. رضایی‌نژاد و همکاران (Rezajnejad et al., 2021) در مطالعه تأثیر کانی فلوگوپیت بر جذب پتاسیم توسط گیاه جو دریافتند تنش خشکی باعث کاهش رشد و جذب پتاسیم توسط گیاه جو می‌شود و کاربرد فلوگوپیت به عنوان منبع تأمین‌کننده پتاسیم آثار منفی تنش خشکی را تعدیل می‌کند. در هنگام کمبود پتاسیم، کانی فلوگوپیت با مکانیزم‌هایی که در ریزوسفر جو رخ داده، هواپدیده شده و پتاسیم آن در اختیار گیاه قرار

## منابع

1. Aghababaei F., Raiesi F., and Hosseinpour A. 2013. The influence of earthworm and arbuscular fungi on microbial biomass carbon and enzyme activity in a soil contaminated with cadmium in sunflower (*Helianthus annuus* L.) cultivation. *Journal of Water and Soil* 27: 949-962. (In Persian with English abstract)
2. Bagheri S., and Mirseyed Hosseini H. 2015. Effects of sorghum cultivation on some soil biological indicators at different Zinc levels. *Journal of Water and Soil* 28(6): 1217-1227. (In Persian with English abstract). <https://dx.doi.org/10.22067/jsw.v0i0.31428>
3. Birkeland P.W. 1990. Soil-geomorphic researcha selective overview. *Geomorphology* 3: 207-224. [https://doi.org/10.1016/0169-555X\(90\)90004-A](https://doi.org/10.1016/0169-555X(90)90004-A)
4. Dixon J.B., and Weed S.B. 1989. *Minerals in Soil Environments*. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, series (1).
5. Douglas L.A. 1989. Vermiculites. *Minerals in soil environments*, 1, pp.635-674. In Dixon J.B., and Weed S.B. (ed.), *Minerals in Soil environment*, 2<sup>nd</sup> ed. Book Series, Soil Science Society of America, Madison. Wisconsin, p 625-674.
6. Georgiadis A., Dietel J., Dohrmann R., and Rennert T. 2020. What are the nature and formation conditions of hydroxy-interlayered minerals (HIMs) in soil. *Plant Nutrition and Soil Science* 183 (1): 12-26. <https://doi.org/10.1002/jpln.201900283>.
7. Htzpatrick R.W., and Roux J.L.E. 1979. Mineralogy and chemistry of a Transvaal Black Clay toposequence. *Soil Science* 28: 165-179. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1977.tb02304.x>.
8. Hinsinger P., Elsass F., Jaillard B., and Robert M. 1993. Root-induced irreversible transformation of a trioctahedral mica in rhizosphere of rape. *Soil Science Society of America* 44: 535- 545. <https://doi.org/10.1111/j.12389.1993.tb00475.x>.
9. Hinsinger P., and Jaillard B. 1993. Root-induced release of interlayer potassium and vermiculitization of phlogopite as related to potassium depletion in the rhizosphere of ryegrass. *Soil Science Society of America* 44: 525-534. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1993.tb00474.x>.
10. Hosseinfard S.J. 2010. Mineralogical and chemical changes of some potassium-bearing minerals in the root environment of pistachios and wheat. PhD Thesis in Soil Science. Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology. Iran. (In Persian)
11. Karaca A., Naseby D.C., and Lynch J.M. 2002. Effect of cadmium contamination with sewage sludge and phosphate fertiliser amendments on soil enzyme activities, microbial structure and available cadmium. *Biology and Fertility of Soils* 35: 428-434.
12. Khayyamim F., Khademi H., and Salehi M.H. 2010. Phlogopite and Muscovite mineralogical changes in clay size due to the coexistence of endophytic fungi with long fissures. *Journal of Soil and Water* 24 (3): 556-545.
13. Khademi Z., Malakuti J.M., and Davy J. 2008. The effect of root organic acids on the ability to absorb nutrients in the rhizosphere. *Journal of Water and Soil Sciences* 21: 189-171.
14. Khormali F., Rezaei F., Rahimzadeh N., Hosseinfard S.J., and Dordipour E. 2015. Rhizosphere-induced weathering of minerals in loess-derived soils of Golestan Province, Iran. *Geoderma Regional* 5: 34-43. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2015.02.002>.
15. Kittrick J.A., and Hope E.W. 1963. A procedure for the particle-size separation of soils for X-ray diffraction analysis. *Soil Science*. 96: 319-325.
16. Kim K.R., Owens G., and Kwon S.I. 2010. Influence of Indian mustard (*Brassica juncea*) on rhizosphere soil solution chemistry in long-term contaminated soils. A rhizobox study. *Environmental Sciences* 22(1): 98-105. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(09\)60080-2](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(09)60080-2).
17. Li T., Di Z., Islam E., Jiang H., and Yang X. 2011. Rhizosphere characteristics of zinc hyperaccumulator *Sedum alfredii* involved in zinc accumulation. *Journal of Hazardous Materials* 185(2-3): 818-823. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.09.093>.
18. Li H., Li X., Dou Z., and Zhang J. 2012. Earthworm (*Aporrectodea trapezoides*)–mycorrhiza (*Glomus intraradices*) interaction and nitrogen and phosphorus uptake by maize, *Biology and Fertility of Soils* 48: 75–85.
19. Lindsay W.L., and Norvell W.A. 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>.
20. Lombi E., Wenzel W.W., Gobran G.R., and Adriano D.C. 2001. Dependency of phytoavailability of metals on indigenous and induced rhizosphere processes: a review. In: Gobran G.R., Wenzel W.W., and Lombi E. (Eds.), *Trace Elements in the Rhizosphere*. CRC Press LLC.
21. Martin H.W., and Sparks D.L. 1985. On the behavior of nonexchangeable potassium in soils. *Communications in*

- Soil Science and Plant Analysis 16: 133-162. <https://doi.org/10.1080/00103628509367593>.
22. Motaghian H., and Hosseinpour A. 2013. The effect of red bean root (*Phaseolus vulgaris* L.). On the usability and shapes of copper in a number of soils Iranian limestone. Journal of Water and Soil (Agricultural Sciences and Industries), 5: 1022-1009. (In Persian with English abstract)
  23. Motaghian H.R., Hosseinpour A.R., Mohamadi J., and Raeisi F. 2013. Change in Bioavailability and Fractions of Copper in the Rhizosphere of Wheat (*Triticum aestivum* L.) in Some Calcareous Soils. Journal of Water and Soil 26(6): 1492-1504. (In Persian with English abstract)
  24. Mosleh Z., Salehi M.H., and Rafieiolhossaini M. 2013. The effect of German chamomile cultivation and use of livestock manure in changes and developments of clay and silt soil minerals. Agricultural Science and Technology and Natural Resources 18: 68. 21-11. (In Persian)
  25. Mosleh Z., Salehi M.H., and Rafieiolhossaini M. 2013. Effect of different soil series and manure application on agro-morphological characteristics, essential oil and chamazulene content of German chamomile. Essential Oil Bearing Plants 16: 730-739. <https://doi.org/10.1080/0972060X.2013.861990>.
  26. Mosleh Z., Salehi M.H., Rafieiolhossaini M., and Mehnatkesh A. 2014. Formation of hydroxy-interlayer vermiculite (HIV) in rhizosphere soils under German chamomile cultivation and manure application. Clay Minerals 49(1): 63-73.
  27. Naderizadeh Z., and Khademi H. 2011. The effect of organic matter on the mineralogical changes of phlogopite and clay-sized muscovite in alfalfa root environment. Journal of Crystallography and Mineralogy 2: 267- 280. (In Persian with English abstract)
  28. Nelson D.W. and Sommers L.E. 1996. Total Carbon, Organic carbon, and Organic matter. p. 961-1010. In Sparks, D.L., Methods of Soil Analysis. Part 3. ASA and SSSA, Madison., WI.
  29. Norouzi S., and Khademi H. 2007. Vermiculitization of selected micaceous minerals as influenced by the alfalfa rhizosphere. In: Proceeding of the 15th Symposium of Crystallography and Mineralogy of Iran. Ferdowsi University of Mashhad, Iran. (In Persian)
  30. Roushani G. 2010. Effect of exhaustive cropping on potassium depletion and clay mineral transformations. p. 53-56. 19<sup>th</sup> World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World. Australia.
  31. Rich C.I. 1968. Hydroxy interlayers in expansible layer silicates. Clays and Clay Minerals 16: 15-30.
  32. Rezaei F. 2010. Propagation and transformation of minerals in the root environment of plants grown in soils with different mineralogy in Golestan province. Master Thesis in Soil Science, Gorgan University. Iran. (In Persian with English abstract)
  33. Rezaiejad R., Khademi H., Ayoubi Sh., Mosadeghi M.R., and Khormali F. 2020. Evaluation of the effect of phlogopite mineral application in sandy growth medium on yield and potassium uptake of barley under drought stress. Soil Management and Sustainable Production 10(3): 151-166. (In Persian with English abstract)
  34. Rezaiejad R., Khademi H., Ayoubi Sh., and Mosadeghi M.R. 2021. Roots under water stress induce K release from phlogopite, bio-transforming to vermiculite. Rhizosphere 17: 100-310. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2021.100310>.
  35. Rezaiejad R. 2022. Changes in physicochemical and clay mineralogical properties of soils as influenced by wild almond tree (*Amygdalus arabica*) rhizosphere and drought stress. Ph.D Thesis in Soil Science, Isfahan University of technology, Iran. (In Persian)
  36. Salehi M.H., and Tahamtani L. 2012. Magnesium uptake and palygorskite transformation abilities of wheat and oat. Pedosphere 22: 834-841. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(12\)60069-1](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(12)60069-1).
  37. Shahrokh V., Khademi H., Cano A.F., Acosta J.A., and Zornoza R. 2020. Kaolinite neoformation from palygorskite in the rhizosphere of citrus trees in semi-arid regions. Catena 185: 104-292. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104292>.
  38. Schaetzl R., and Anderson S. 2005. Soils Genesis and Geomorphology, Cambridge University Press, New York.
  39. Soil Survey Staff. 2010. Soil Taxonomy: A basic systems of soil classification for making and interpreting soil surveys. Eleventh edition, NRCS, USDA.
  40. Szczerba M., and Ufer K. 2018. New model of ethylene glycol intercalate in smectites for XRD modelling. Applied Clay Science 153: 113-123. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.12.010>.
  41. Tadano T., and Yoshida S. 1978. Chemical changes in submerged soils and their effect on rice growth. Soils and Rice 399-420.
  42. Wallander H. 2000. Uptake of P from apatite by *Pinus sylvestris* seedlings colonised by different ectomycorrhizal fungi. Plant and Soil 218: 249-256.