نشریه دانش آب و خاک / جلد ۳۰ شماره ۴ صفحه‌های ۱ تا ۱۴ / سال ۱۳۹۹

## مقاله پژوهشی

# تأثیر مدیریت‌های مختلف خاک‌ورزی بر شکل‌های معدنی فسفر خاک

**زهره محمدی[۱]، مجتبی بارانی مطلق*[۲]، محمد اسماعیل اسدی[۳]، سید علیرضا موحدی نائینی[٤]، سمیه سفیدگر شاهکلایی[٥]**

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰٤/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۲/۳۰

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه علوم خاک، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۲- دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۳- دانشیار آبیاری و زهکشی بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات وآموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان گلستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، گرگان

٤- دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۵- دانش‌آموخته دکتری گروه علوم خاک، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: mbarani2002@yahoo.com

**چکیده**

خاک‌ورزی می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی باروری و پایداری سیستم‌های نوین کشاورزی را تحت تأثیر قرار دهد. همچنین طبیعت شیمیایی فسفر خاک می‌تواند تحت تأثیر عملیات خاک‌ورزی قرار گیرد. هدف از این تحقیق، بررسی اثر خاک‌ورزی‌های مختلف بر شکل‌های معدنی فسفر خاک (فسفر لبایل، فسفر نسبتاً لبایل، فسفر غیر لبایل و فسفر باقی‌مانده) با استفاده از روش عصاره‌گیری دنباله‌ای بوومن و کول (۱۹۷۸) بود. بدین منظور نمونه‌برداری خاک به‌صورت فاکتوریل بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی از چهار روش خاک‌ورزی مختلف (مرسوم، بستر برآمده، کم‌خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی) از عمق‌های ۸-۰ و ۱٦-۸ سانتی‌متری در ۵ تکرار صورت گرفت. نتایج نشان داد که مقدار فسفر معدنی کل و نیز شکل‌های مختلف فسفر معدنی به جز فسفر معدنی غیرلبایل در اثر خاک‌ورزی تغییرات معنی‌داری داشت. تغییر خاک‌ورزی از مرسوم به خاک‌ورزی‌های حفاظتی موجب افزایش معنی‌دار فسفر معدنی در شکل‌های لبایل، نسبتاً لبایل و باقی‌مانده شد. بیش‌ترین تغییرات را فسفر معدنی لبایل از خود نشان داد، به گونه‌ای که میزان این شکل از فسفر از ۹/۵۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم در خاک‌ورزی مرسوم به ۲۱/۳۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم در کم‌خاک‌ورزی تغییر یافت که نشانگر افزایش حدوداً ۲ برابری بود. تیمار بی‌خاک‌ورزی با ٦۷۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم بالاترین و خاک‌ورزی مرسوم با ۵۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کم‌ترین مقدار فسفر نسبتاً لبایل را داشت. بیشترین و کمترین فسفر معدنی کل به‌ترتیب با مقادیر ۵۲۲/۹۵ و ٤٤۱/۹۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم در بی‌خاک‌ورزی و خاک‌ورزی مرسوم مشاهده شد. نتایج این پژوهش نشان داد که تغییر خاک‌ورزی مرسوم به روش‌های خاک‌ورزی حفاظتی اثر قابل توجهی بر مقدار ذخایر فسفر خاک دارد.

**واژه‌های کلیدی**: خاک‌ورزی حفاظتی، خاک‌ورزی مرسوم، جزءبندی فسفر، عصاره‌گیری دنباله‌ای، فسفر معدنی

# The effect of Different Tillage Managements on Soil Inorganic Phosphorus Forms

**Z Mohammadi[1], M Baranimotlagh[2*], ME Asadi[3], SA Movahedi Naeini[4] and S Sefidgar Shahkolaie[5]**

Received: 10 July 2018 Accepted: 20 May 2019

[1] M.Sc Gradute, Dept. of Soil Science, Faculty of Water and Soil Engin., Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran
[2] Assoc. Prof., Dept. of Soil Science, Faculty of Water and Soil Engin. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran
[3]Assoc. Professor, Agricultural Engineering Research Department, Golestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Gorgan, Iran
[4] Assoc. Prof., Dept. of Soil Science, Faculty of Water and Soil Engin. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran
[5] PhD Graduate, Dept. of Soil Science, Faculty of Water and Soil Engin., Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

[*]Corresponding Author, Email: mbarani2002@yahoo.com

## Abstract

Tillage can significantly influence the productivity and sustainability of modern farming systems. In addition, the chemical nature of soil P is affected by tillage practice. The aim of this work was to determine changes of inorganic P fractions in a soil (labile, moderately labile, nonlabile, residual) under different tillage managements using Bowman and Cole (1978) procedure. Soil samples were taken from four different tillage treatments {conventional tillage (CT), Raised Bed Tillage (RB), Minimum Tillage (MT) and No-Tillage (NT)} from 0-8 and 8-16 cm depths with a factorial randomized complete block design with 5 replicates. The results showed that the tillage systems had significant effect on total P and all inorganic phosphorous except on nonlabile inorganic phosphorus. The change in soil tillage from conventional to conservation tillage significantly increased the amount of inorganic phosphorus forms (labile P, moderately labile P, residual P). The most significant variation belonged to in labile inorganice phosphorus, in which the amount of labile inorganic phosphorus in conventional tillage (9.51 $mgkg^{-1}$) increased to 21.37 $mgkg^{-1}$ in minimum tillage (MT), indicating an increase of approximately 2 times compared to conventional tillage. No-tillage treatment showed the highest amount of moderately labile P (678 $mgkg^{-1}$) and the lowest amount (580 $mgkg^{-1}$) was in conventional tillage. The highest and lowest amounts of total inorganic P (522.95 and 441.98 $mgkg^{-1}$) were observed in No-tillage and conventional tillage, respectively. The results of this study indicated that the change in soil tillage from conventional to conservation tillage has considerable effect on soil P reserve.

**Keywords**: Conservation tillage, Conventional Tillage, Phosphorus fractionation, Sequential extraction, Inorganic P

**مقدمه**

در واکنش به افزایش هزینه‌های سوخت‌های فسیلی، فرسایش گسترده خاک، استفاده زیاد از کودهای شیمیایی و آفت‌کش ها و نگرانی‌های زیست محیطی در ارتباط با آلودگی آب و هزینه های عمومی انجام کار، نیاز به فناوری‌های جدید کشاورزی احساس می‌شود. از این رو استفاده از استراتژی‌های مناسب برای کاهش تلفات عناصر غذایی و فرسایش خاک ضروری است. سیستم خاک‌ورزی حفاظتی شامل کم خاک‌ورزی و بدون خاک‌ورزی یکی از روش‌های مفید برای جلوگیری از این مسائل می‌باشد(قادری‌فر و همکاران ۱۳۹۰). عملیات خاک‌ورزی به روش‌های گوناگونی انجام می

شود که به طور کلی می‌توان آنها را به دو روش خاک-ورزی متداول یا سنتی و خاک‌ورزی حفاظتی تقسیم کرد. در خاک‌ورزی سنتی اغلب از وسایلی مانند گاوآهن برگردان استفاده می‌شود. در این سیستم‌ها اغلب کمتر از ۱۵ ٪ بقایا در سطح خاک باقی می‌ماند. خاک‌ورزی حفاظتی در مقابل خاک‌ورزی سنتی قرار دارد که می‌تواند به روش‌هایی گوناگون از جمله بدون خاک‌ورزی و کم خاک‌ورزی صورت گیرد. در این خاک‌ورزی اغلب بیش از ۳۰ ٪ بقایا در سطح خاک حفظ می‌شود (عباسی و همکاران ۱۳۹۲). خاک‌ورزی می‌تواند به میزان قابل توجهی تولید و پایداری سیستم‌های کشاورزی مدرن را تحت تأثیر قرار دهد. رابسون و تایلور (۱۹۸۷) بیان داشتند که عملیات شخم می‌تواند از سه طریق عناصر غذایی را تغییر دهد:۱) اختلاط عناصر غذایی سرتاسر خاک و تغییر فراهمی آنها برای گیاهان ۲) تغییر محیط فیزیکی خاک مانند جرم مخصوص که نهایتاً رشد و عمل ریشه را متأثر می سازد و ۳) تغییر فعالیت بیولوژیکی خاک.

فسفر در خاک‌ها در شکل‌های پیچیده شیمیایی وجود دارد که به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای در رفتار، تحرک و زیست‌فراهمی در خاک‌ها با همدیگر متفاوتند. مقدار کل فسفر یک خاک اطلاعات اندکی در ارتباط با رفتار فسفر در محیط ارائه می‌کند. شکل‌های مختلف فسفر، سرنوشت و انتقال فسفر در خاک‌ها را تعیین می‌کنند. روش‌های جزءبندی با استفاده از عصاره‌گیرهای دنباله‌ای شیمیایی مختلف به منظور توصیف شکل‌های مختلفی فسفر استفاده شده‌اند. دلیل جزءبندی و مطالعه شکل‌های فسفر در خاک، توصیف دقیق‌تر پتانسیل رهاسازی فسفر از خاک است(وانگ و همکاران ۲۰۰۶). شکل‌های شیمیایی فسفر می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی به‌وسیله عملیات‌های مدیریتی کشاورزی تحت تأثیر قرار گیرد (لیتور و همکاران ۲۰۰٤). وو و همکاران (۲۰۰۹) بیان می‌دارند که طبیعت شیمیایی فسفر خاک می‌تواند تحت تأثیر عملیات خاک‌ورزی قرار گیرد به گونه‌ای که حلالیت فسفر در خاک‌ورزی حفاظتی افزایش می‌یابد که این امر به فعالیت میکروبی بیشتر در طی تجزیه مواد آلی خاک نسبت داده می‌شود. ژانگ و همکاران (۲۰۰۱) نیز گزارش کردند که کشت و کار تمامی شکل‌های فسفر را در خاک تغییر می‌دهد. وو و همکاران (۲۰۰۹) اثر سیستم‌های خاک‌ورزی بر شکل-های مختلف فسفر را بررسی کرده و دریافتند که عملیات خاک‌ورزی و تناوب زراعی به‌طور قابل توجهی توزیع شکل‌های لبایل و نسبتاً لبایل فسفر معدنی را تحت تأثیر قرار داد. زامونر و همکاران (۲۰۰۸) شکل-های مختلف فسفر معدنی تحت تأثیر عملیات مختلف خاک‌ورزی را بررسی کرده و دریافتند که سیستم خاک‌ورزی بر فسفر کل اثری ندارد بلکه توزیع فسفر در بین شکل‌های مختلف را متأثر می سازد. باسامبا و همکاران (۲۰۰٦) اظهار داشتند که دست خوردن مکانیکی خاک در طی شخم سبب افزایش تماس بین ذرات خاک و فسفر کودی و یا فسفر محلول خاک شده و بدین طریق تشکیل ترکیبات فسفر نامحلول پایدار را تسهیل می‌کند. براوو و همکاران (۲۰۰٦) با بررسی طولانی مدت اثر خاک‌ورزی بر شکل‌های فسفر بیان داشتند که اختلاف در غلظت فسفر در سیستم‌های خاک‌ورزی حفاظتی و مرسوم می‌تواند به توزیع کود در عمق خاک به هم خورده توسط هر یک از سیستم‌ها نسبت داده شود. مطالعات متعددی نشان داده‌اند که سیستم بدون خاک‌ورزی در مقایسه با خاک‌ورزی سنتی، مقدار فسفر کل، فسفر قابل استفاده خاک را افزایش داده و توزیع فسفر در بین شکل‌های مختلف را تحت تأثیر قرار می‌دهد (فینک و همکاران ۲۰۱٦، محمد و همکاران ۲۰۱۲، مارگنوت و همکاران ۲۰۱۷، رودریگوئز و همکاران ۲۱۰٦، سونر و همکاران ۲۰۱٤، تیچر و همکاران ۲۰۱۸، وی و همکاران ۲۰۱٤، زیائوژو و همکاران ۲۰۱٦).

فسفر از عناصر ضروری در تغذیه گیاهان زراعی است و عملیات خاک‌ورزی تأثیر مستقیمی بر

رفتار و قابلیت جذب فسفر خاک دارد. کاربرد روش های مختلف خاک‌ورزی (مرسوم و حفاظتی) منجر به توزیع متفاوت شکل‌های فسفر در خاک می‌شود. از این رو، این مطالعه با هدف بررسی اثر سیستم‌های مدیریتی مختلف خاک‌ورزی بر شکل‌های مختلف شیمیایی فسفر معدنی خاک به انجام رسید.

**مواد و روش‌ها**

مکان مورد مطالعه پایگاه تحقیقات کاربردی اجرایی آموزشی ترویجی کشاورزی حفاظتی (HUB) در شهرستان کردکوی – روستای گرجی محله استان گلستان با عرض جغرافیایی ( "۱۵/۵٤ ′٤۷ °۳٦) و طول جغرافیایی ("۳٤/۳٤ ′۱۲ °٥٤) و با ارتفاع ٤۳ متر از سطح دریا واقع شده است. متوسط بارندگی سالیانه ٥۷۰ میلی‌متر و متوسط درجه حرارت ۱٦/٤ درجه سانتی‌گراد با اقلیم مدیترانه‌ای است. دارای رژیم رطوبتی- حرارتی زریک- ترمیک است و نام علمی خاک Typic Haploxerepts می‌باشد. این آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با ٤ تیمار و ٥ تکرار و دو عمق نمونه‌برداری (۸-۰ و ۱٦-۸ سانتی‌متری) در مجموع ۲۰ کرت انجام شد. ابعاد هر کرت ۹ در ۲٥ متر با مساحت ۲۲٥ مترمربع بود. تیمارها شامل: ۱- تیمار خاک‌ورزی مرسوم[1] (CT) (شخم با گاوآهن برگردان‌دار، سپس دو بار دیسک و کشت با عمیق‌کار مدل تاکا)، ۲- تیمار بستر برآمده[2] (RB): (شخم با گاوآهن برگردان‌دار سپس دیسک، ایجاد شیارها با فاصله ۷٥ سانتیمتر از هم با استفاده از شیارکش و سپس کشت با کارنده بستر برآمده دزفولی به طوری که روی هر بستر ۳ خط کشت و عرض هر بستر ٥۰ سانتی‌متر بود)، ۳- تیمار کم‌خاک‌ورزی[3] (MT): (تهیه زمین با استفاده از چیزل مدل پکر و سپس کشت با استفاده از کارنده بی‌خاک‌ورز مدل شیلان سازه) ٤- تیمار بی‌خاک‌ورزی[4] (NT): (کاشت بدون دست‌کاری خاک با استفاده از کارنده بی‌خاک‌ورز مدل شیلان سازه کشت بوکان با شیار بازکن دابل دیسک). در این مطالعه گندم آبی نوع N 87-20 بذر مادری در تاریخ ۹ آذر ماه ۱۳۹٤ کشت شد. بذر استفاده برای کلیه تیمارها ۱۸۰ کیلوگرم در هکتار بود که در عمق ٥ سانتی‌متری کاشت شد. همچنین کود مصرفی برای کلیه تیمارها بر اساس آزمون خاک شامل ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار سوپرفسفات‌تریپل، ۱۲٥ کیلوگرم در هکتار کلرید پتاسیم و ٥۰ کیلوگرم در هکتار اوره در زمان کاشت در عمق ۷ سانتی‌متری جاگذاری شد. ضمناً دو بار کود اوره به عنوان سرک با مقدار۱۰۰ کیلوگرم در هکتار در تاریخ ۹٤/۱۰/۲۳ در مرحله پنجه‌زنی گیاه و ۷٥ کیلوگرم در هکتار در تاریخ ۹٤/۱۱/۱۱ در مرحله ساقه‌دهی گندم به همه تیمارها داده شد. نمونه‌برداری خاک از هر کرت از عمق‌های ۸-۰ و ۱٦-۸ سانتی‌متری در تاریخ ۹٥/۳/۱٦ قبل از برداشت محصول زمانی که گندم به طور کامل رسیده بود، انجام شد. نمونه‌های خاک هوا خشک شده و از الک ۲میلی‌متری عبور داده و برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن تعیین گردید که شامل: کربن آلی به روش والکی و بلاک (نلسون و سامر ۱۹۸۲)، قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره اشباع خاک با هدایت سنج الکتریکی، pH خاک به روش الکترود شیشه‌ای در عصاره ۱:۲، فسفر قابل استفاده خاک (اولسن و سامرز ۱۹۸۲)، نیتروژن کل با استفاده از هضم تر و به روش کجلدال (برمنر ۱۹۹٦)، جرم مخصوص ظاهری خاک به روش سیلندر (بلیک و هارتج ۱۹۸٦) بود.

برای تعیین اجزای فسفر معدنی از روش بوومن و کول (۱۹۷۸) اصلاح شده به وسیله شارپلی و اسمیت (۱۹۸٥) و ایوانف و همکاران (۱۹۹۸) استفاده شد. در این روش، فسفر معدنی خاک به اجزای فسفر لبایل، فسفر نسبتاً لبایل، فسفر غیر لبایل و فسفر باقی‌مانده

[1] Conventional Tillage
[2] Raised Bed Tillage
[3] Minimum Tillage
[4] No-Tillage

قابل تفکیک است. برای اندازه‌گیری فسفر معدنی کل، به ۱/۵ گرم خاک ۴۰ میلی لیتر اسید سولفوریک ۰/۵ مولار اضافه و به مدت ۱۶ ساعت با تکان دهنده تکان داده شد. سپس به مدت ۱۵ دقیقه سانتریفیوژ گردید (اولسن و سامرز ۱۹۸۲). فسفر موجود در عصاره‌ها به روش رنگ‌سنجی با کمک دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۸۲۰ نانومتر تعیین شد. تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم افزار SAS و مقایسه میانگین‌ها توسط آزمون LSD در سطح احتمال ۵٪ صورت گرفت. نمودارها با استفاده از نرم افزار Excel رسم شد.

## نتایج و بحث

### تأثیر مدیریت‌های مختلف خاک‌ورزی بر برخی پارامترهای شیمیایی و فیزیکی خاک

همه ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی (بجز قابلیت هدایت الکتریکی) معنی‌دار بود. جدول ۲ مقایسه میانگین اثر خاک‌ورزی و عمق بر pH، کربن آلی، فسفر قابل استفاده خاک، نیتروژن کل و جرم مخصوص ظاهری خاک را نشان می‌دهد.

جدول ۱ تجزیه واریانس اثر مدیریت‌های مختلف خاک‌ورزی بر برخی ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک را نشان می‌دهد. بر این اساس، اثر خاک‌ورزی بر

**جدول ۱- تجزیه واریانس اثر خاک‌ورزی بر برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک.**

| منبع تغییرات | درجه آزادی | میانگین‌مربعات | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | pH | EC | کربن آلی | فسفر قابل استفاده خاک | نیتروژن کل | جرم مخصوص ظاهری |
| بلوک | ٤ | ۰/۰۰۲$^{ns}$ | ۰/۰۰۰۷$^{ns}$ | ۰/۰۳٦$^{ns}$ | ۰/۲۲$^{ns}$ | ۰/۰۰۰۱$^{ns}$ | ۰/۰۰۹$^{ns}$ |
| خاک‌ورزی | ۳ | ۰/۲۲۱$^{**}$ | ۰/۰۲$^{ns}$ | ۰/۵۳۳$^{***}$ | ۳٦/۱٦$^{***}$ | ۰/۰۰٤$^{***}$ | ۰/۰۵۵$^{**}$ |
| عمق | ۱ | ۰/۰۰۲$^{ns}$ | ۰/۰٦$^{*}$ | ۰/۰۲۱$^{ns}$ | ۲۲/۳۵$^{***}$ | ۰/۰۰۵$^{***}$ | ۰/۰۰۵$^{ns}$ |
| اثر متقابل عمق * خاک‌ورزی | ۳ | ۰/۰۲۵$^{ns}$ | ۰/۰۰۳$^{ns}$ | ۰/۰٦۷$^{ns}$ | ۱/٦۷$^{**}$ | ۰/۰۰۰٦$^{*}$ | ۰/۰۰۵$^{ns}$ |
| خطای آزمایش | ۲۸ | ۰/۰۳۱ | ۰/۰۱٤ | ۰/۰۲۸ | ۰/۳۰۷ | ۰/۰۰۵ | ۰/۰۰٦ |
| ضریب تغییرات | | ۲/٤۵ | ۱۵/۸۲ | ۱۸/۷۲ | ۱۱/۰۷ | ۱۹/٦۱ | ٤/۸۲ |

$^{***}$، $^{**}$، $^{*}$ و ns به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۱ ، ۱ و ۵ درصد و غیرمعنی‌دار هستند.

مطابق داده‌های جدول ۱، اثر خاک‌ورزی بر pH خاک معنی‌دار بود لکن تغییر عمق همچنین اثر متقابل خاک‌ورزی و عمق بر این پارامتر خاک تأثیر معنی‌داری نداشت. طبق داده‌های جدول ۲، بی‌خاک‌ورزی کم‌ترین میزان pH و کاهشی در حدود ٤/۳٪ نسبت به خاک‌ورزی مرسوم را نشان داد. همچنین بین کم‌خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی تفاوت معنی‌داری در سطح ۵ درصد مشاهده نشد. خاک‌ورزی مرسوم (CT) و بستر برآمده (RB) نیز تفاوت معنی‌داری در سطح ۵ درصد در pH ندارند. با این حال خاک‌ورزی مرسوم (CT) بالاترین میزان pH داشت. زامونر و همکاران (۲۰۰۸) با مطالعه فسفر آلی و معدنی تحت مدیریت‌های مختلف خاک‌ورزی در خاک مالی‌سول در آرژانتین ذکر کردند که سامانه بی‌خاک‌ورزی سبب کاهش معنی‌داری در pH با نیم واحد در ۵ سانتی‌متری بالایی خاک شد. اما تفاوت معنی‌داری در pH در عمق عمیق‌تر بین بی‌خاک‌ورزی و خاک‌ورزی مرسوم مشاهده نشد. آنان کاهش pH خاک در لایه سطحی بی‌خاک‌ورزی را ناشی از اوره پخش سطحی شده دانستند و بیان داشتند که مقدار بالای کربن آلی و نیز معدنی شدن کربن آلی منجر به تولید اسیدهای آلی اضافی و نتیجتاً کاهش pH می‌شود. اوهالوران (۱۹۹۳) با مطالعه تأثیر شخم و کوددهی بر فسفر معدنی و آلی خاک گزارش کرد که اثر متقابل شخم و کوددهی معدنی بر pH لایه ۱۰-۰ سانتی‌متر معنی‌دار بود. این امر می‌تواند به دلیل کاهش pH به وسیله کوددهی معدنی در کم‌خاک‌ورزی و

بی‌خاک‌ورزی باشد. کاهشpH ممکن است بر تعادل فسفر موثر باشد زیرا کاهش pH می‌تواند انحلال فسفر را از شکل‌های معدنی غیر لبایل به شکل‌های لبایل فسفر بهبود بخشد (سونر و همکاران ۲۰۱٤). سینگ و همکاران (۱۹۹٤) نیز گزارش کردند که pH در عمق ۵-۰ سانتی‌متری فوقانی خاک نسبت دادند هرچند اثر خاک-ورزی بر pH را متأثر از شرایط اقلیمی، نوع خاک و عوامل مدیریتی دانستند.

سانتی‌متر در بی‌خاک‌ورزی با نگه‌داری بقایا پایین‌ترین مقدار بود. کاهش pH در کم‌خاک‌ورزی نسبت به خاک-ورزی سنتی توسط مارگنوت و همکاران (۲۰۱۷) نیز گزارش شده است. بوساری و همکاران (۲۰۱۵) pH کمتر در بی‌خاک‌ورزی را به تجمع مواد آلی در چند

**جدول ۲- مقایسه میانگین اثر خاک‌ورزی و عمق بر برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک.**

| | خاک‌ورزی | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| عمق | خاک‌ورزی مرسوم | خاک‌ورزی بستر برآمده | کم‌خاک‌ورزی | بدون خاک‌ورزی | میانگین |
| pH | | | | | |
| ۰-۸ | ۷/۳$^{ab}$ | ۷/۲$^{abc}$ | ۷/۰$^{d}$ | ۷/۱$^{dc}$ | ۷/۱$^{a}$ |
| ۸-۱۶ | ۷/٤$^{a}$ | ۷/۲$^{abdc}$ | ۷/۱$^{cdb}$ | ۷/۰$^{d}$ | ۷/۱$^{a}$ |
| میانگین | ۷/۳$^{a}$ | ۷/۲$^{ab}$ | ۷/۰$^{bc}$ | ۷/۰$^{c}$ | |
| کربن آلی(٪) | | | | | |
| ۰-۸ | ۰/٦۵$^{b}$ | ۰/۹۳$^{b}$ | ۰/۸۳$^{b}$ | ۱/۲۳$^{a}$ | ۰/۹۱$^{a}$ |
| ۸-۱۶ | ۰/۷۷$^{b}$ | ۰/۸۱$^{b}$ | ۰/۹۳$^{b}$ | ۱/۱۹$^{a}$ | ۰/۹۲$^{a}$ |
| میانگین | ۰/٦۵$^{c}$ | ۰/۸۷$^{b}$ | ۰/۸۸$^{b}$ | ۱/۲۱$^{a}$ | |
| فسفرقابل استفاده | | | | | |
| خاک($mg\ kg^{-1}$) | | | | | |
| ۰-۸ | ۳/۹۵$^{e}$ | ۵/۰۲۵$^{d}$ | ۷/۳۸$^{a}$ | ٦/٦۵$^{b}$ | ۵/۷۵$^{a}$ |
| ۸-۱۶ | ۱/۲۵$^{f}$ | ۳/۷۷$^{e}$ | ٦/۲۱$^{bc}$ | ۵/۷۸$^{c}$ | ٤/۲۵$^{b}$ |
| میانگین | ۲/٦$^{d}$ | ٤/٤$^{c}$ | ٦/۷۹$^{a}$ | ٦/۲۲$^{b}$ | |
| نیتروژن کل (٪) | | | | | |
| ۰-۸ | ۰/۰٦٦$^{c}$ | ۰/۰۸۳$^{abc}$ | ۰/۰۹۱$^{ab}$ | ۰/۰۹۸$^{a}$ | ۰/۰۸٤$^{a}$ |
| ۸-۱۶ | ۰/۰۱۸$^{d}$ | ۰/۰٦۷$^{c}$ | ۰/۰۷۸$^{bc}$ | ۰/۰٦۷$^{abc}$ | ۰/۰٦۱$^{b}$ |
| میانگین | ۰/۰٤۲$^{c}$ | ۰/۰۷۵$^{b}$ | ۰/۰۸۵$^{ab}$ | ۰/۰۸۸$^{a}$ | |
| جرم مخصوص ظاهری | | | | | |
| ($g\ cm^{-3}$) | | | | | |
| ۰-۸ | ۱/۷٤$^{a}$ | ۱/۷۱$^{ab}$ | ۱/۷۲$^{ab}$ | ۱/٦۲$^{bc}$ | ۱/٦۹$^{a}$ |
| ۸-۱۶ | ۱/۷٦$^{a}$ | ۱/٦۸$^{ab}$ | ۱/۷۱$^{ab}$ | ۱/۵۳$^{c}$ | ۱/٦۷$^{a}$ |
| میانگین | ۱/۷۵$^{a}$ | ۱/٦۹$^{a}$ | ۱/۷۱$^{a}$ | ۱/۵۷$^{b}$ | |

برای هر ویژگی، اعدادی که دارای حروف یکسان هستند، در سطح احتمال ۵ درصد فاقد تفاوت معنی‌دار می‌باشند.

مطابق داده‌های جدول ۱، کربن آلی خاک متأثر از خاک‌ورزی بود ولی عمق و اثر متقابل این دو فاکتور بر کربن آلی خاک معنی‌داری نبود. بر طبق داده‌های جدول ۲، خاک‌ورزی مرسوم کم‌ترین مقدار درصد کربن و بی‌خاک‌ورزی (MT) با حدود ٤٦٪ افزایش نسبت به خاک‌ورزی مرسوم (CT) بالاترین مقدار کربن آلی را دارد. خاک‌ورزی بستر برآمده (RB) و کم‌خاک‌ورزی (MT) فاقد تفاوت معنی‌دار با هم‌دیگر و هر کدام به ترتیب افزایشی در حدود ٢٦٪ و ٢٥/٤٪ نسبت به خاک‌ورزی مرسوم (CT) نشان دادند. زامونر و همکاران (۲۰۰۸) با مطالعه بی‌خاک‌ورزی و خاک‌ورزی مرسوم بر کربن آلی در آرژانتین گزارش کردند که بی‌خاک‌ورزی به طور قابل توجهی سبب افزایش تمرکز کربن آلی در سطح خاک تا عمق ۱۰ سانتی‌متری خاک شد. لکن تفاوت معنی‌داری زیر ۱۰ سانتی‌متر مشاهد نشد. آنان تجمع بالای کربن آلی در بی‌خاک‌ورزی را به سرعت پایین تجزیه و بخش‌های پایدار مواد آلی نسبت دادند. باسامبا و همکاران (٢٠٠٦) نیز گزارش کردند که تفاوت معنی‌داری بین مدیریت بی‌خاک‌ورزی و کم‌خاک‌ورزی در کربن کل پیدا شد. یافته‌های آنان نشان داد که بی‌خاک‌ورزی همواره مقادیر کربن نسبت به کم‌خاک‌ورزی بزرگ‌تر می‌باشد که احتمالاً از تلفات بیش‌تر ماده آلی در کم‌خاک‌ورزی در استفاده از چیزل در مقایسه با بی‌خاک‌ورزی ناشی می‌شود. زیائوژو و همکاران (٢٠١٦) بالاتربودن تجمع مواد آلی در سیستم بی‌خاک‌ورزی را رشد و متابولیسم سریعتر ریشه ها در نتیجه حفظ بقابا در این نوع کشت حفاظتی نسبت دادند.

ماهیت شیمیایی فسفر خاک تحت تأثیر عملیات خاک‌ورزی است و حلالیت فسفر تحت خاک‌ورزی حفاظتی افزایش می‌یابد (وو و همکاران ۲۰۰۹). مطابق داده‌های جدول ۱، اثر خاک‌ورزی و عمق و اثر متقابل خاک‌ورزی و عمق بر فسفر قابل استفاده معنی‌دار بود. بر اساس جدول ۲، فسفر قابل استخراج با بیکربنات سدیم در عمق ۸-۰ سانتی‌متر، خاک‌ورزی مرسوم (CT) با مقدار ۳/۹۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم کم‌ترین مقدار و کم‌خاک‌ورزی (MT) با مقدار ۷/۳۸ میلی‌گرم بر گیلوگرم و حدود ٤٦/٦٪ افزایش نسبت به خاک‌ورزی مرسوم (CT)، بالاترین مقدار را داشت. تیمارهای بدون خاک‌ورزی (NT) و خاک‌ورزی بستر برآمده (RB) به ترتیب حدود ٤٠/٦٪ و ٢١/٤٪ افزایش نسبت به خاک‌ورزی مرسوم (CT) را نشان دادند. فسفر قابل استفاده با افزایش عمق کاهش یافت. در عمق ١٦-٨ سانتی‌متر، تیمارهای کم‌خاک‌ورزی (MT) و بی‌خاک‌ورزی (NT) از لحاظ آماری فاقد تفاوت معنی‌دار بوده و هر کدام به ترتیب ٧٩/٨٪ و ٧٨/٣٪ افزایش معنی‌داری نسبت به خاک‌ورزی مرسوم (CT) نشان دادند، با این حال کم‌خاک‌ورزی بالاترین مقدار فسفر قابل استخراج با بیکربنات سدیم را داشت. براوو و همکاران (٢٠٠٦) در مطالعه اثرات بلند مدت شخم بر فسفر در خاک ورتی‌سول جنوب اسپانیا گزارش کردند که فسفر اولسن به طور معنی‌داری در کم‌خاک‌ورزی نسبت به خاک‌ورزی مرسوم بالاتر بود. محمد و همکاران (٢٠١٢) با مطالعه تأثیر شخم تناوب زراعی بر تولید محصول گندم در منطقه خشک شمال غربی پاکستان دریافتند که فسفر قابل استفاده خاک با عمق کاهش یافت. ریدل و همکاران (٢٠٠٧) با مطلعه زیست-فراهمی فسفر در دو روش خاک‌ورزی مرسوم و بی-خاک‌ورزی گزارش کردند عموماً، مقادیر بالایی از فسفر اولسن در بی‌خاک‌ورزی نسبت به خاک‌ورزی سنتی وجود داشت. تیچر و همکاران (٢٠١٨) گزارش کردند که مقدار فسفر قابل استفاده در خاک‌ورزی سنتی و مرسوم نسبت به بی‌خاک‌ورزی پایین بود. آنان بیان داشتند که در خاک‌ورزی مرسوم، شخم زدن خاک مکان‌های جذب سطحی را در معرض قرار داده و نیز تشدید تجزیه مواد آلی خاک، جذب سطحی فسفر توسط تبادل لیگاندی در مقایسه با بی‌خاک‌ورزی را افزایش می‌دهد. نتایج مشابهی توسط فینک و همکاران (٢٠١٦) گزارش شده است.

طبق داده‌های جدول ۱، نیتروژن کل اختلاف معنی‌داری را در اثر خاک‌ورزی و عمق و اثر متقابل خاک‌ورزی و عمق در بین مدیریت‌های مختلف خاک‌ورزی نشان داد. بر اساس داده‌های جدول ۲، نیتروژن کل در عمق ۸-۰ سانتی‌متر هر سه خاک‌ورزی بستر برآمده (RB)، کم‌خاک‌ورزی (MT) و بی‌خاک‌ورزی (NT) فاقد تفاوت معنی‌دار باهم هستند. با این وجود بی‌خاک‌ورزی با حدود ۳۳٪ افزایش معنی‌دار نسبت به خاک‌ورزی مرسوم بالاترین میزان را داشت. کم‌خاک‌ورزی با ۲۷/٤٪ نسبت به خاک‌ورزی مرسوم افزایش نشان داد. خاک‌ورزی مرسوم و بستر برآمده فاقد تفاوت معنی‌دار ($P < ۰/۰۵$) با هم‌دیگر بودند. در عمق ۱٦-۸ سانتی‌متر نیز بی‌خاک‌ورزی با حدود ۷۷٪ افزایش معنی‌دار نسبت به خاک‌ورزی مرسوم بالاترین مقدار را داشت. وگلر و همکاران (۲۰۰۹) گزارش کردند نیتروژن کل در لایه بالایی خاک (۱۵-۰ سانتی‌متر) در خاک‌ورزی حفاظتی نسبت به خاک‌ورزی سنتی بالاتر بود. باسامبا و همکاران (۲۰۰٦) گزارش کردند که تفاوت معنی‌داری بین مدیریت بی‌خاک‌ورزی و کم‌خاک‌ورزی در نیتروژن کل پیدا شد. وو و همکاران (۲۰۰۹) گزارش کردند توزیع نیتروژن در سه خاک در سطح خاک (۵-۰ سانتی‌متری) بالاترین میزان و با عمق کاهش یافت. همچنین عملیات خاک‌ورزی عموماً اثر معنی‌داری بر نیتروژن زیر ۱۰ سانتی‌متر نداشت. بوساری و همکاران (۲۰۱۵) کاهش کربن آلی و نیتروژن کل در کرت شخم خورده در خاک‌ورزی سنتی و مرسوم را ناشی از سرعت بیشتر معدنی شدن و آبشویی دانستند که در اثر تخریب ساختمان خاک در پی شخم ایجاد می‌شود.

مطابق داده‌های جدول ۱، جرم مخصوص ظاهری خاک متأثر از خاک‌ورزی بود ولی اثر عمق و اثر متقابل عمق و خاک‌ورزی بر این پارامتر معنی‌دار نبود. بر طبق داده‌های جدول۲، خاک‌ورزی مرسوم، خاک‌ورزی بستر برآمده و کم‌خاک‌ورزی اختلاف معنی‌داری در جرم مخصوص ظاهری در سطح ۵ درصد نشان ندادند با این حال، بی‌خاک‌ورزی با ۱/۵۷گرم بر سانتی متر مکعب، کم‌ترین جرم مخصوص ظاهری خاک را در بین مدیریت‌های مختلف خاک‌ورزی داشت. وگلر و همکاران (۲۰۰۹) در مطالعه تأثیر شخم و کودهی فسفر بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی ذکر کردند جرم مخصو ظاهری خاک در اثر خاک‌ورزی حفاظتی بلند مدت کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، آلوارز و استینباخ (۲۰۰۹) در مطالعه اثر خاک‌ورزی بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نشان دادند که جرم مخصوص ظاهری خاک تحت بی‌خاک‌ورزی نسبت به خاک‌ورزی مرسوم بالاتر بود ولی تفاوتی بین خاک‌ورزی مرسوم و کم‌خاک‌ورزی مشاهده نشد. سینگ و همکاران (۱۹۹٤) در مطالعه اثر بی‌خاک‌ورزی و خاک‌ورزی مرسوم ویژگی‌های خاک دریافتند که متوسط جرم مخصوص ظاهری خاک در عمق ۱۵-۰ سانتی‌متر کم‌تر بود که عمدتاً به مشارکت مقدار ماده آلی بالاتر در این خاک‌ها بود و جرم مخصوص ظاهری خاک در عمق ۵-۰ سانتی‌متر به طور معنی‌داری در بی‌خاک‌ورزی و نگه‌داری بقایا در مقایسه با خاک‌ورزی بدون بقایا پایین‌تر بود.

### تأثیر مدیریت‌های مختلف خاک‌ورزی بر شکل‌های معدنی فسفر خاک

سامانه‌های کشاورزی و مدیریت کود و خاک، پویایی فسفر و دسترسی آن را با تغییر شکل‌های فسفر و مقادیر نسبی‌شان تغییر می‌دهند (رودریگوئز و همکاران ۲۰۱٦). جدول۳ تجزیه واریانس اثر خاک‌ورزی بر شکل‌های معدنی فسفر را نشان می‌دهد. بر این اساس، اثر خاک‌ورزی و اثر متقابل خاک‌ورزی و عمق بر همه شکل‌های معدنی فسفر به جز فسفر معدنی غیرلبایل معنی‌دار بود. همچنین اثر عمق بر همه شکل‌های معدنی فسفر معنی‌دار بود.

**جدول ۳- تجزیه واریانس اثر خاک‌ورزی بر شکل‌های مختلف فسفر معدنی.**

| | | میانگین مربعات | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| منبع تغییرات | درجه آزادی | فسفر لبایل | فسفر نسبتاً لبایل | فسفر غیر لبایل | فسفر باقی‌مانده | فسفر کل |
| بلوک | ٤ | ۱/۸۱$^{ns}$ | ۱۲۳۱$^{ns}$ | ۱۲/۷۳$^{ns}$ | ۱/۳۲$^{ns}$ | ۱۲۹$^{ns}$ |
| خاک‌ورزی | ۳ | ۱٦٦/۹۲$^{***}$ | ۱۷۱۸۲$^{***}$ | ۷/٦۸$^{ns}$ | ۱٤٦/۳۳$^{***}$ | ۱٤۹۲۷$^{***}$ |
| عمق | ۱ | ۱٤۹/٦۹$^{***}$ | ۱٥۹۳٤٥۸$^{***}$ | ۲۸۳/٤۳$^{***}$ | ٤۲۳۰$^{***}$ | ۱۹٤۱۱٦۱$^{***}$ |
| اثر متقابل عمق * خاک‌ورزی | ۳ | ۲٤/۰٥$^{***}$ | ۲۳۷۰$^{**}$ | ۱/۷۰٥$^{ns}$ | ۹/٦۳$^{*}$ | ٥۳۹** |
| خطای آزمایش | ۲۸ | ۱/٥۷ | ٦٦۱ | ٤/٥٦ | ۲/۲٤ | ۱٥۲ |
| ضریب تغییرات | | ۱۰/۰ | ٤/۱ | ٥/٦ | ۳/۲ | ۱/۷ |

$^{***}$، $^{**}$، $^{*}$ و ns به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۱، ۱ و ٥ درصد و غیرمعنی‌دار هستند.

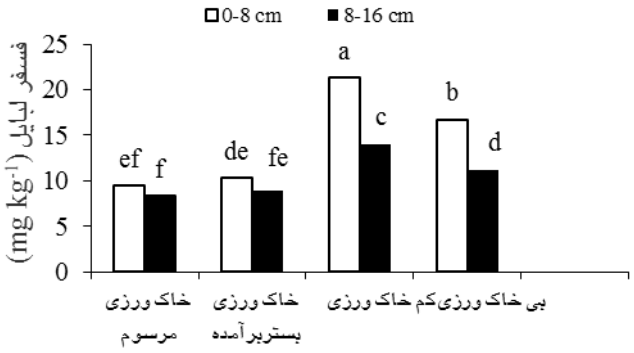
نتایج نشان داد که به‌طور کلی در همه تیمارها اجزای مختلف فسفر معدنی در عمق ۸-۰ سانتی‌متر به ترتیب به این صورت می‌باشد: فسفر نسبتا لبایل> فسفر غیر لبایل > فسفر باقی‌مانده (فسفر بسیار مقاوم)> فسفر لبایل.

در عمق دوم نیز ترتیب اجزاء در همه تیمارها به این صورت می‌باشد: فسفر نسبتا لبایل> فسفر باقی‌مانده> فسفر غیرلبایل> فسفر لبایل.

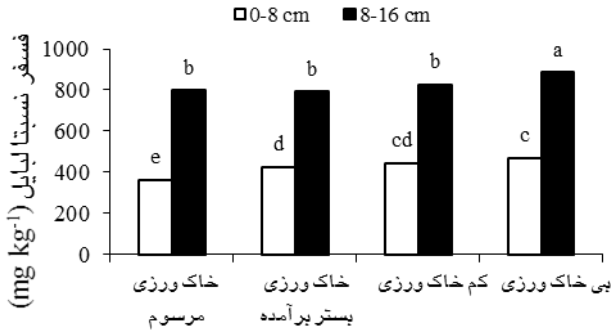
شکل ۱ مقایسه میانگین اثر خاک‌ورزی و عمق بر غلظت فسفر معدنی لبایل را نشان می‌دهد. بر اساس شکل ۱، در عمق ۸-۰ سانتی‌متر، فسفر لبایل در خاک‌ورزی مرسوم (CT) ۹/٥ میلی‌گرم بر کیلوگرم کم‌ترین مقدار و در کم‌خاک‌ورزی (MT) ۲۱/٤ میلی‌گرم بر گیلوگرم بیش‌ترین مقدار و حدود ٤/۲٪ از فسفر معدنی کل را شامل می‌شود. بی‌خاک‌ورزی (NT) نیز حدود ٤۳/۲٪ افزایش معنی‌دار نسبت به شاهد داشت. خاک‌ورزی بستر برآمده (RB) و خاک‌ورزی مرسوم (CT) در این بخش فسفر فاقد تفاوت معنی‌دار بودند. در عمق ۱٦-۸ سانتی‌متر نیز خاک‌ورزی بستر برآمده (RB) و خاک‌ورزی مرسوم (CT) از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری در سطح ٥ درصد ندارند. کم‌خاک‌ورزی با ۱۳/۹٥ میلی‌گرم بر کیلوگرم بالاترین فسفر لبایل را دارد. همچنین بی‌خاک‌ورزی حدود ۲٥/۸٪ افزایش معنی‌دار نسبت به خاک‌ورزی مرسوم (CT) داشت. نتایج نشان داد که فسفر لبایل با افزایش عمق کاهش یافت به گونه‌ای که این کاهش در کم‌خاک‌ورزی (MT) با حدود ۳٤/۷٪ شدیدترین کاهش بود. کاهش در خاک‌ورزی بستر برآمده (RB) و خاک‌ورزی مرسوم (CT) از لحاظ آماری معنی‌دار نبود. ژانگ و همکاران (۲۰۰۱) با مطالعه فسفر در یک خاک با سامانه‌های مختلف تناوب و منابع غذایی گزارش کردند که ترکیب سامانه‌های تناوب کشت با خاک‌ورزی چیزل به طور معنی‌داری مقدار فسفر لبایل را نسبت به دیگر تیمارها افزایش داد. تناوب با خاک‌ورزی چیزل، فسفر لبایل را به واسطه بیش‌تر بودن مقدار کربن کل و فعالیت میکروبی کل، افزایش می‌دهد و معدنی شدن فسفر آلی را در مقایسه با دیگر سامانه‌های کشت بهبود می‌بخشد. رودریگز و همکاران (۲۰۱٦) دریافتند که تجمع فسفر معدنی در شکل‌های لبایل می‌تواند ناشی از کاهش جذب فسفر در خاک‌هایی با اختلاط کم‌تر باشد که کود کمتری را در معرض واکنش‌های جذب با انرژی بالا قرار می‌دهد و همچنین به دلیل حضور بیش‌تر مواد آلی با وزن مولکولی پایین از بقایای گیاهی باشد که مکان‌های جذب سطحی فسفر را مسدود می‌کنند. وو و همکاران (۲۰۰۹) ذکر کردند تجمع فسفر لبایل در خاک سطحی سیلتی لوم احتمالاً ناشی از معدنی شدن بیش‌تر فسفر آلی در سامانه خاک‌ورزی چیزل همراه بقایای گیاهی در خاک باشد. پاویناتو و همکاران (۲۰۰۹) در مطالعه اثر خاک‌ورزی بر کود فسفر افزوده شده به خاک در سرادو برزیل گزارش کردند که افزایش فسفر قابل

استفاده در لایه‌های سطحی از خاک تحت مدیریت بی‌خاک‌ورزی ناشی از عدم اختلاط خاک به اضافه رهاسازی فسفر از بافت‌های گیاهی مرده و کاربرد کود است. مکان‌های جذب فسفر در این لایه‌های سطحی به سرعت اشباع شده و تعادل عناصر غذایی حاصل شده از کود معدنی یا ترکیبات آلی در جزءهای پیوند یافته با انرژی کم مجددا توزیع گردد و در نتیجه منجر به ظرفیت بالاتری از واجذب گردد که در نهایت ممکن است سبب افزایش زیست فراهمی فسفر شود. یافته‌های شی و همکاران (۲۰۱۵) نیز افزایش فسفر لبایل در بی‌خاک‌ورزی نسبت به خاک‌ورزی مرسوم را نشان داد.

چنانچه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، در عمق ۸-۰ سانتی‌متر، به طور کلی هر سه مدیریت خاک‌ورزی بستر برآمده، کم‌خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی نسبت به خاک‌ورزی مرسوم افزایش معنی‌داری در فسفر نسبتاً لبایل در سطح ۵ درصد نشان دادند. لکن بین کم‌خاک‌ورزی (MT) و بی‌خاک‌ورزی (NT) اختلاف معنی‌داری ($P<0.05$) از لحاظ فسفر نسبتاً لبایل مشاهده نشد. با این وجود، فسفر نسبتاً لبایل در کم‌خاک‌ورزی (NT) بالاترین مقدار و ۸۹/۹٪ از فسفر معدنی کل و خاک‌ورزی مرسوم (CT) کم‌ترین مقدار از فسفر نسبتاً لبایل را دارا بود. بین کم‌خاک‌ورزی (MT) و خاک‌ورزی بستر برآمده (RB) نیز اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. در عمق دوم بی‌خاک‌ورزی با افزایش معنی‌دار نسبت به خاک‌ورزی مرسوم بالاترین مقدار و ۹۲٪ از فسفر معدنی کل را شامل می‌شود. بین بقیه مدیریت‌های خاک‌ورزی اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. به طور میانگین در هر دو عمق، اثر مدیریت‌های خاک‌ورزی بر فسفر نسبتاً لبایل در سطح ۵٪ معنی‌دار بود و در تیمار بی‌خاک‌ورزی با ۶۷۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم بالاترین و تیمار خاک‌ورزی مرسوم با ۵۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کم‌ترین مقدار را داشت.




**شکل ۱- اثر خاک‌ورزی و عمق بر غلظت فسفر لبایل معدنی.**




**شکل ۲- اثر خاک‌ورزی و عمق بر غلظت فسفر نسبتاً معدنی لبایل.**

هنگام استفاده کود همه بخش‌های فسفر معدنی افزایش می‌یابند و این اثر برای شکل‌های لبایل و نسبتاً لبایل دارای اهمیت بیشتری است زیرا آن‌ها مسئول بافر فسفر در محلول خاک هستند (پاوویناتو و همکاران ۲۰۰۹). براوو و همکاران (۲۰۰۶) در مطالعه بلند مدت اثر خاک‌ورزی بر روی شکل‌های فسفر در ورتی‌سول قلیایی جنوب و غرب اسپانیا گزارش کردند که فسفر پیوند یافته با کلسیم (فسفر عصاره‌گیری شده با عصاره‌گیر HCl) فراوان‌ترین شکل فسفر با دامنه غلظتی از ۱۲۹ تا ۷۵۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. غلظت HCl-P که اساساً فسفات‌های کلسیم کم محلول (اغلب آپاتیت پدوژنیک و لیتوژنیک) را عصاره‌گیری می‌کند، در

کم‌خاک‌ورزی بیش‌تر از خاک‌ورزی مرسوم و به طور میانگین بیش از ۸۰ درصد از فسفر معدنی کل را شامل شد. سلز و همکاران (۱۹۹۹) بیان کردند که فسفر و عناصر نامتحرک دیگر معمولاً گرایش به تجمع در نزدیک نقطه جاگذاری دارند. مارگنوت و همکاران (۲۰۱۷) با مطالعه اثر شخم و کشاورزی حفاظتی بر فراهمی فسفر دریافتند که فسفر لبایل ($NaHCO_3$-Pi) و فسفر پیوندیافته با کلسیم (HCl-Pi) در کم‌خاک‌ورزی به ترتیب ۷۷٪ و ۳۳٪ نسبت به خاک‌ورزی مرسوم افزایش یافت. نگاسا و لینوبر (۲۰۰۹) دریافتند که بخش HCl-P در اریدی سولز به شدت غالب است در حالی که در اولتی‌سولز و اکسی‌سولز، فسفر باقی‌مانده غالب است. تیچر و همکاران (۲۰۱۲) در مطالعه اثر سامانه‌های خاک‌ورزی مختلف بر روی فسفر معدنی خاک دریافتند که با کاربرد کود در خاک‌های تحت مدیریت بی‌خاک‌ورزی با مقادیر بالای آهک، غلظت فسفر در از فسفر که اغلب بیانگر فسفات جذب شده روی سطوح هیدروکسیدهای آهن و آلومینیوم و فسفات‌های غنی از آهن و آلومینیوم است، پایین بود. آنان دلیل پایین بودن این بخش از فسفر معدنی را جذب دوباره فسفات آزاد شده با عصاره‌گیر NaOH به وسیله کلسیت در روش جزءبندی دانستند و ذکر کردند که این اثر به خوبی در ورتی‌سولز و اینسپتی‌سولز آهکی جنوب اسپانیا ثبت شده است.

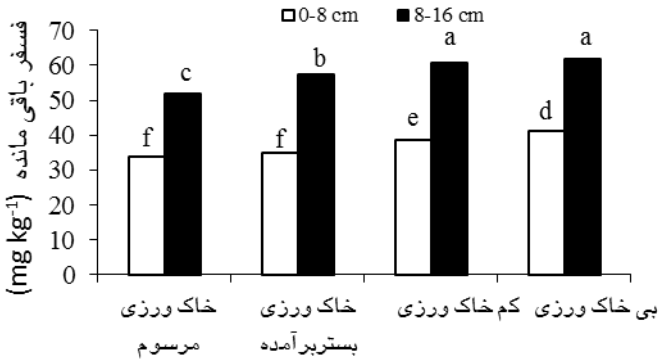
وو و همکاران (۲۰۰۹) در مطالعه سه نوع خاک (Calcarosol، Chromosol و ورتی‌سول) در ویکتوریای استرالیا گزارش کردند که اثر خاک‌ورزی بر بخش‌های فسفر معدنی به جز فسفر عصاره‌گیری شده با NaOH-Pi در خاک ورتی‌سول معنی‌دار بود. آنان همچنین ذکر کردند که در خاک Calcarosol، مقدار NaOH-Pi پایین بود. آنان این امر را ناشی از مقادیر کم اکسیدهای $Al_2O_3$ و $Fe_2O_3$ در این خاک‌ها دانستند.

مطابق شکل ۳، در عمق ۸-۰ سانتی‌متر، بی‌خاک‌ورزی (NT) با مقدار ۴۱/۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم منطقه تحت اثر پخشیدگی محصولات واکنش کود-خاک، افزایش می‌یابد به گونه‌ای که فسفات‌های کلسیم ثانویه با حلالیت پایین تشکیل می‌شوند و این امر مقادیر بالاتر فسفر عصاره‌گیری شده با HCl 1M در بی‌خاک‌ورزی نسبت به خاک‌ورزی مرسوم را توضیح می‌دهد.

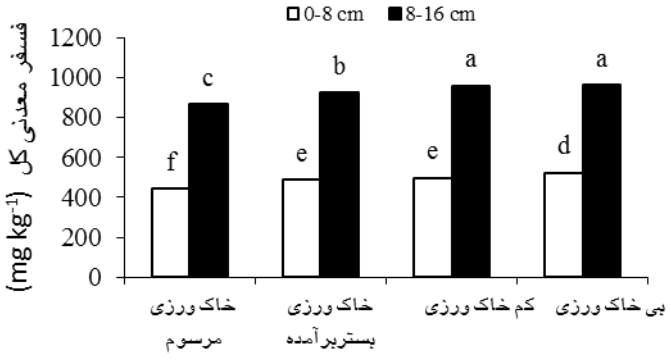
مطابق داده‌های جدول ۳، اثر خاک‌ورزی و اثر متقابل خاک‌ورزی و عمق بر فسفر غیرلبایل معنی‌دار نبود، ولی اثر عمق بر این شکل فسفر در سطح احتمال ۰/۱ درصد معنی‌دار می‌باشد. به‌طور کلی، فسفر غیرلبایل با افزایش عمق کاهش یافت و از ۴۰/۴۲ به ۳۵/۲۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم در عمق دوم رسید. براوو و همکاران (۲۰۰۶) در مطالعه بلندمدت اثر خاک‌ورزی بر شکل‌های فسفر در ورتی‌سول جنوب اسپانیا گزارش کردند که اثر خاک‌ورزی بر همه‌ی شکل‌های فسفر معدنی به جز NaOH-Pi معنی‌دار بود. غلظت این بخش بیش‌ترین مقدار فسفر معدنی باقی‌مانده (فسفر بسیار مقاوم) و با ۱۸٪ افزایش معنی‌دار نسبت به خاک‌ورزی مرسوم (CT) تقریبا ۸٪ از فسفر معدنی کل را تشکیل داد. همچنین بین خاک‌ورزی مرسوم (CT) و خاک‌ورزی بستر برآمده (RB) اختلاف معنی‌داری در سطح ۵ درصد مشاهده نشد. در عمق ۱۶-۸ سانتی‌متر، بین کم‌خاک‌ورزی (MT) و بی‌خاک‌ورزی (NT) اختلاف معنی‌داری وجود نداشت و بی‌خاک‌ورزی (NT) با ۱۶٪ افزایش معنی‌دار نسبت به خاک‌ورزی مرسوم (CT) بیش‌ترین مقدار در این بخش فسفر را داشت. ترتیب کاهشی مقدار فسفر باقی‌مانده در خاک‌ورزی‌های مختلف به ترتیب زیر بود: NT > MT > RT > CT. وو و همکاران (۲۰۰۹) در مطالعه بر روی فسفر سه نوع خاک در استرالیا گزارش کردند که اثرخاک‌ورزی و تناوب زراعی بر فسفر باقی‌مانده معنی‌دار بود. به گونه‌ای که فسفر باقی‌مانده به طور معنی‌داری در بی‌خاک‌ورزی نسبت به کم‌خاک‌ورزی و خاک‌ورزی مرسوم بالاتر بود. براوو و همکاران (۲۰۰۶) گزارش کردند فسفر

محبوس شده در اکسی و اکسی هیدروکسیدهای آهن به طور معنی‌داری در کم‌خاک‌ورزی نسبت به خاک‌ورزی مرسوم بالاتر بود.

مطابق شکل ٤، بالاترین فسفر معدنی کل با مقدار ۵۲۲/۹۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم در بی‌خاک‌ورزی (NT) با ۱۵/۵٪ افزایش معنی‌دار نسبت به خاک‌ورزی مرسوم (CT) بود. ولی بین کم‌خاک‌ورزی (MT) و خاک‌ورزی بستر برآمده (RB) اختلاف معنی‌داری ($P<0.05$) مشاهده نشد و هر کدام به ترتیب ۱۱/۳٪ و ۹/۷٪ افزایش معنی‌دار نسبت به خاک‌ورزی مرسوم نشان دادند. خاک‌ورزی مرسوم (CT) کم‌ترین مقدار فسفر معدنی کل با مقدار ٤٤١/٩٨ میلی‌گرم بر کیلوگرم داشت. در عمق ١٦-٨ سانتی‌متر، بین بی‌خاک‌ورزی (NT) و کم‌خاک‌ورزی (MT) اختلاف معنی‌داری در سطح ۵ درصد مشاهده نشد، با این وجود بی‌خاک‌ورزی (NT) با مقدار ٩٦٢/٦١ میلی‌گرم بر کیلوگرم و با حدود ۹/۸٪ افزایش معنی‌دار نسبت به خاک‌ورزی مرسوم (CT) بالاترین میزان فسفر معدنی کل را داشت. همه مدیریت‌های خاک‌ورزی با افزایش عمق افزایش معنی‌داری نسبت به خاک‌ورزی مرسوم (CT) در سطح ۵ درصد در مقدار فسفر معدنی کل نشان دادند. ژانگ و همکاران (۲۰۰۱) با مطالعه فسفر در یک خاک با سامانه‌های مختلف تناوب و منابع غذایی گزارش کردند که سامانه‌های خاک‌ورزی حفاظتی، اختلاط و عمق مخلوط کردن را کاهش می‌دهند و بنابراین ممکن است در چرخه، توزیع و پویایی مواد مغذی در خاک مؤثر باشند. آنان همچنین ذکر کردند افزایش فسفر کل به دلیل تجمع در شکل‌های لبایل و نسبتاً لبایل فسفر در ۱۵ سانتی‌متری بالایی خاک تحت خاک‌ورزی حفاظتی وجود داشت. آنان این امر را به تجزیه بقایای محصول، افزایش فعالیت میکروبی و معدنی شدن و کاهش تثبیت فسفر به وسیله کلوئیدهای خاک به علت محدود شدن اختلاط کود فسفر با خاک، نسبت دادند. تیچر و همکاران (۲۰۱۲) گزارش کردند که ورود مکرر بقایای محصول در لایه زیر سطحی خاک‌ورزی مرسوم (CT) در اثر برگردان کردن خاک در هر کشت و همچنین اختلاط فسفر اضافه کودی در عمق منجر به افزایش غلظت فسفر کل در لایه‌های ۲۰-۱۰ و ۳۰-۲۰ شد. براوو و همکاران (۲۰۰٦) دریافتند که غلظت فسفر معدنی کل به طور معنی‌داری در کم‌خاک‌ورزی (MT) نسبت به خاک‌ورزی مرسوم (CT) بالاتر بود. آنان تفاوت بین فسفر کل معدنی بین خاک‌ورزی مرسوم و کم‌خاک‌ورزی را ناشی از غلظت فسفر در بخش HCl-P دانستند که بیانگر آن است که فسفر کودی عمدتاً به صورت کلسیم غنی از فسفات نسبتاً نامحلول غیرمتحرک شده است. رودریگز و همکاران (۲۰۱٦) در مطالعه روی فسفر در اکسی‌سولزهای گرمسیری ساوانا برزیل گزارش کردند که غلظت فسفر معدنی در ۵ سانتی‌متری بالایی به طور معنی‌داری در بی‌خاک‌ورزی (NT) نسبت به خاک‌ورزی مرسوم (CT) بیش‌تر بود. فسفر کل و فسفر معدنی بیش‌تر در بی‌خاک‌ورزی (NT)، ممکن است به علت فسفر قابل استفاده بیش‌تر باشد که نیاز به فسفر کودی کم‌تری داشته باشد و منجر به سرعت بیش‌تر پخشیدگی فسفر به سمت ریشه گیاه شود. همچنین در خاک‌ورزی مرسوم میزان فسفر قابل استفاده در سطح خاک در مقایسه با بی‌خاک‌ورزی کم‌تر بود.




**شکل۳- اثر خاک‌ورزی و عمق بر غلظت فسفر باقی‌مانده.**




**شکل۴- اثر خاک‌ورزی و عمق بر غلظت فسفر معدنی کل.**

## نتیجه‌گیری کلی

نتایج نشان داد به‌طور کلی استفاده از سامانه‌های خاک‌ورزی حفاظتی باعث کاهش pH و جرم مخصوص ظاهری خاک شد. مدیریت بی‌خاک‌ورزی با حدود ۰/۳ واحد pH بیش‌ترین کاهش را نسبت به خاک‌ورزی مرسوم نشان داد. همچنین در سامانه بی‌خاک‌ورزی کاهش ۱۰ درصدی جرم مخصوص ظاهری نسبت به خاک‌ورزی مرسوم مشاهده گردید. نتایج همچنین نشان داد استفاده از سامانه‌های خاک‌ورزی حفاظتی باعث افزایش معنی‌دار کربن آلی، فسفر قابل استفاده و نیتروژن کل شد به‌گونه‌ای که در بی‌خاک‌ورزی کربن آلی تقریباً ۲ برابر خاکورزی مرسوم بود؛ مقدار فسفر قابل استفاده در کم‌خاک‌ورزی در لایه سطحی تقریباً ۲ برابر و در لایه پایین‌تر ۵ برابر خاک‌ورزی مرسوم بود و نیتروژن کل در خاک‌ورزی‌های حفاظتی بیش‌ترین میزان بود. افزون بر این، نتایج نشان داد در همه اجزاء فسفر معدنی بجز فسفر غیرلبایل اثر خاک‌ورزی و عمق معنی‌دار بود. در همه اجزاء فسفر معدنی بالاترین مقادیر مربوط به خاک‌ورزی‌های حفاظتی بود. فسفر لبایل با عمق کاهش و فسفر نسبتاً لبایل و فسفر کل در لایه پایین‌تر تقریباً دو برابر شد. به‌طور کلی نتایج نشان داد که شکل‌ها و پویایی فسفر در خاک می‌تواند تا حدود زیادی تحت تأثیر نوع عملیات مدیریتی کشاورزی قرار گیرد.

## منابع مورد استفاده

Abbasi H, Khodaverdiloo H, Ghorbani Dashtaki Sh and Ahmadi Moghaddam P, 2013. The effects of some tillage methods on soil physical quality index in arid and semiarid region. Journal of Agricultural Mechanization 1(2): 37-45.

Alvarez R and Steinbach HS, 2009. A review of the effects of tillage systems on some soil physical properties, water content, nitrate availability and crops yield in the Argentine Pampas. Soil and Tillage Research 104 (1): 1-15.

Basamba TA, Barrios E, Ame´zquita E, Rao IM and Singh BR, 2006. Tillage effects on maize yield in a Colombian savanna oxisol: Soil organic matter and P fractions. Soil and Tillage Research 91 :131–142.

Blake GR and Hartge KH, 1986. Bulk density. Pp. 363–374. In Klute A (ed.) Methods of Soil Analysis. Part 1. 2nd ed. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, WI.

Bowman RA and Cole CV, 1978. An exploratory method for fractionation of organic phosphorus from grassland soils. Soil Science 125:95-101.

Bravo C, Torrent J, Giraldez JV and Ordonez R, 2006. Long term effect of tillage on phosphorous forms and sorption in a vertisol of Southern Spain. Europan Journal Agronomy 25(3): 264-269.

Bremner JM, 1996. Nitrogen-Total. Pp. 1085-1121. In Sparks DL (ed). Methods of Soil Analysis, Part 3. Chemical Methods. Soil Science Society of America, Book Series Number 5. American Society of Agronomy, Madison, WI.

Busari MA, Kukal SS, Kaur A, Bhatt R and Dulazi AA, 2015. Conservation tillage impacts on soil,crop and the environment. International Soil and Water Conservation Research 3:119–129.

Fink JR, Indaa AV, Bavarescoa J, Barrón V, Torrent J and Bayer C, 2016. Adsorption and desorption of phosphorus in subtropical soils as affected by management system and mineralogy. Soil and Tillage Research 155:62–68.

Ghaderi- Far F, Ghajari A, Sadegh-Nejad H and Gharanjiki A, 2011. Effects of tillage systems on yield of cotton following canola in Gorgan. Iranian Journal of Field Crops Research 9 (3): 416-421.

Ivanoff DB, Reddy KR and Robinson S, 1998. Chemical fractionation of organic phosphorus in selected Histosols. Soil Science 163: 36-45.

Litaor ML, Reichmann O, Auerswald K, Haim A and Shenker M, 2004. The geochemistry of phosphorus in peat soils of a semiarid altered wetland. Soil Science Society of America Journal 68: 2078–2085.

Margenot AJ, Paul BK, Sommer RR, Pulleman MM, Parikh SJ, Jackson LE, Fonte SJ, 2017. Can conservation agriculture improve phosphorus (P) availability in weathered soils? Effects of tillage and management on soil P status after 9 years in a Kenyan Oxisol. Soil and Tillage Reserch 166: 157-166.

Mohammad W, Shah SM, Shehzadi S and Shah SA, 2012. Effect of tillage, rotation and crop residues on wheat crop productivity, fertilizer nitrogen and water use efficiency and soil organic carbon status in dry area (rainfed) of north-west Pakistan. Journal of Soil Science and Plant Nutrition 12 (4): 715-727.

Negassa W and Leinweber P, 2009. How does Hedley sequential phosphorus fractionation reflect impacts of land use and management on soil phosphorus: A review. Journal of Plant Nutrtion and Soil Science 172:305-325.

Nelson DW, and Sommer LE, 1982. Total Carbon, Organic Carbon and Organic Matter. Pp.595-579. In: Page AL (ed). Methods of Soil Analysis, Part 2, 2nd ed. Soil Science Society of America, Agronomy Monograph, Madison, WI.

O'Halloran IP, 1993. Effect of tillage and fertilization on inorganic and organic soil phosphorus. Canadian Journal of Soil Science 73:359-369.

Olsen SR, and Sommers LE, 1982. Phosphorus. Pp.403-430. In: Page AL (ed). Methods of Soil Analysis. Part 2. 2nd ed. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Madison, WI.

Pavinato PS, Merlin A and Rosolem CA, 2009. Phosphorus fractions in Brazilian Cerrado soils as affected by tillage. Soil and Tillage Research 105:149-155.

Redel YD, Rubio R, Rouanet JL and Borie F, 2007. Phosphorus bioavailability affected by tillage and crop rotation on a Chilean volcanic derived Ultisol. Geoderma 139:388-396.

Robson AD and Taylor AC, 1987. The effect of tillage on chemical fertility of soil. Pp. 284–307. In: Cornish P and Pratley JE(eds). Tillage: New Directions in Agriculture. Inkata Press: Melbourne.

Rodrigues M, Pavinato PS, Anthony Withers PJ, Bettoni Teles AP and Bejarano Herrera WF, 2016. Legacy phosphorus and no tillage agriculture in tropical oxisols of the Brazilian savanna. Science of the Total Environment 542:1050-1061.

Selles, F, McConkey BG, and Campbell CA, 1999. Distribution and forms of P under cultivator- and zero-tillage for continuous- and fallow-wheat cropping systems in the semi-arid Canadian prairies. Soil and Tillage Research 51:47-59.

Sharpley AN and Smith SJ, 1985. Fractionation of inorganic and organic phosphorus in virgin and cultivated soils . Soil Science Society of America Journal 49:127-130.

Shi YC, Ziadi N, Messiga AJ, Lalande R and Zheng-Yi H, 2015. Soil phosphorus fractions change in winter in a corn-soybean rotation with tillage and phosphorus fertilization. Pedosphere 25(1):1-11.

Singh B, Chanasyk DS, McGill WB and Nyborg MPK, 1994. Residue and tillage management effects on soil properties of a typic cryoboroll under continuous barley. Soil and Tillage Research 32:117-133.

Suñer L, Galantini J and Minoldo G, 2014. Soil Phosphorus Dynamics of Wheat-Based Cropping Systems in the Semiarid Region of Argentina. Applied and Environmental Soil Science http://dx.doi.org/10.1155/2014/532807.

Tiecher T, Rheinheimer dos Santos D and Calegari A, 2012. Soil organic phosphorus forms under different soil management systems and winter crops, in a long term experiment. Soil and Tillage Research 124:57–67.