

## اثر رژیم رطوبتی و ویژگی‌های خاک بر فسفر بومی و بازیابی فسفر افزوده شده به خاکهای آهکی

ابراهیم ادهمی، عبدالمجید رونقی و منوچهر مفتون<sup>1\*</sup>

### چکیده

فسفر بعنوان یک عنصر ضروری در تولید محصولات کشاورزی مهم است. از سوی دیگر توانایی آن در القاء کمبود عناصر کم مصرف ضروری و اثرات منفی آن بر محیط زیست سبب توجه بیشتر به این عنصر شده است. از آنجا که رژیم رطوبتی و ویژگی‌های خاک از جمله عوامل مهم در واکنش فسفر در خاک هستند، تحقیق حاضر جهت بررسی تأثیر دو سطح فسفر (صفر و 300 میلی‌گرم فسفر در کیلوگرم خاک از منبع دی هیدروژن پتاسیم فسفات) و دو رژیم رطوبتی (غرقاب و رطوبت 20% وزنی) بر فسفر محلول در بی‌کربنات سدیم (روش اولسن) در 20 خاک آهکی با ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی متفاوت در زمانهای 1، 2، 5، 10، 20، 40، 80 و 160 روز بصورت طرح کاملاً تصادفی در دو تکرار انجام شد. جهت بررسی اثر مستقیم و غیر مستقیم ویژگی‌های خاک بر بازیابی فسفر، از روش ضرایب مسیر استفاده شد. نتایج نشان داد که غرقابی شدن خاک سبب افزایش فسفر بومی در زمانهای 1، 2، 5 و 10 روز در مقایسه با رطوبت 20% وزنی شد، و در زمانهای بیشتر اثر معنی داری نداشت. رژیم رطوبتی غرقابی سبب کاهش معنی دار بازیابی فسفر اضافه شده به خاک در روزهای 80 و 160 در مقایسه با رطوبت 20% وزنی شد. در حالی که در سایر زمان ها اثر معنی داری بر آن نداشت. با توجه به اثر معنی دار رژیم رطوبتی و برهمکنش رژیم رطوبتی و ویژگی‌های خاک بر بازیابی فسفر در روزهای 80 و 160، اثر ویژگی‌های خاک بر بازیابی فسفر در این زمانها بررسی شد. نتایج حاصله نشان که در حالت غرقابی اکسیدهای آهن، آلومینیوم و منگنز، رس و نسبت رس به کربنات کلسیم فعال بصورت منفی و کربنات کلسیم معادل بصورت مثبت بر بازیابی فسفر اضافه شده به خاک در روزهای 80 و 160 تأثیر داشته است. در رطوبت 20% وزنی نیز روند مشابهی دیده شد با این تفاوت که اثر اکسیدهای آهن و کربنات کلسیم معادل بر آن معنی دار نبود. نتایج ضرائب مسیر نشان داد که در رطوبت 20% وزنی اثر مستقیم کربنات کلسیم معادل و کربنات کلسیم فعال بر بازیابی فسفر بیشتر از رژیم غرقابی بود. نتایج ضرایب مسیر همچنین بیانگر نقش مستقیم و غیر مستقیم کربنات کلسیم معادل و نسبت رس به کربنات کلسیم فعال در واکنش فسفر در خاکهای آهکی ما در هر دو رژیم رطوبتی مورد مطالعه می‌باشد. با توجه به اینکه واکنش فسفر در خاک به میزان قابل توجهی تحت تأثیر اکسیدهای آهن، آلومینیوم و منگنز قرار گرفت، بنابراین تحقیقات بیشتری همراه با اندازه‌گیری تغییر شکل‌های شیمیایی آهن، آلومینیوم و منگنز در رژیم‌های رطوبتی متفاوت و توانایی شکل‌های متفاوت آنها در جذب و آزاد سازی فسفر توصیه می‌شود.

واژه های کلیدی: فسفر، رژیم غرقابی، رطوبت 20% وزنی، ویژگی‌های خاک، ضرایب مسیر.

1- بترتیب استادیار دانشکده کشاورزی، دانشگاه یاسوج، دانشیار و استاد بخش خاکشناسی، دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز.

\* وصول: 84/7/10 و تصویب: 85/6/28

## مقدمه

عصاره گیری فسفر به روش اولسن بیشتر از سایر روش ها در بررسی وضعیت فسفر قابل استفاده گیاه در خاکهای آهکی استفاده می شود که همبستگی خوبی را با پاسخ های گیاهی در شرایط هوازای و بی هوازای نشان داده است (الفتی و همکاران، 1378؛ مفتون و همکاران، 2003؛ و قنبری، 1371) و چنین نتیجه گیری شده است که روش اولسن جهت برآورد فسفر قابل جذب گیاه در خاکهای آهکی مناسب است (مفتون و همکاران، 2003). با این وجود برآورد مناسبی از تغییرات فسفر بومی خاک و بازیابی فسفر اضافه شده به خاک در طولانی مدت در خاکهای آهکی ایران صورت نگرفته است.

شرایط غرقابی با توجه به اثر آن بر شیمی فسفر خاکها از دیر باز مورد توجه محققان بوده است Sharma و Mishra (1985) گزارش کردند که فسفر قابل جذب به روش اولسن در یک خاک خشتی در ده روز اول خوابانیدن بسرعت افزایش یافته و با سرعت کمتر تا روز 30 و 40 ادامه داشت. مفتون و همکاران (2003) با قرار دادن 23 نمونه خاک آهکی استان فارس در شرایط غرقابی و ظرفیت مزرعه مشاهده کردند که میانگین فسفر عصاره گیری شده به روش های اولسن و کولول در شرایط هوازای پس از دو ماه، 18/7 و 30/5 میلی گرم در کیلوگرم خاک بود که در شرایط غرقابی به ترتیب به 19/8 و 33/5 میلی گرم در کیلوگرم خاک تغییر کرده است. Mandal و Khan (1977) مشاهده کردند که در شرایط غرقابی افزایش فسفر عصاره گیری شده به روش بری (Bray و Kurtz، 1945) 17/8 درصد بوده است. Khalid و Patrick (1974) دریافتند که شرایط بی هوازای خاکها فسفر بیشتری را به محلولهای فاقد فسفر اضافه می کنند در حالی که توانایی بیشتری برای جذب فسفر از محلول های غنی از فسفر دارند. Moore و Reddy (1994) عقیده دارند که در شرایط اکسایش استرنیگیت 1 یا فسفاتهای منگنز سه ظرفیتی رفتار فسفر در خاک را کنترل می کنند در حالی که در شرایط کاهشی، شکل های پایدار اکسیدهای آهن و منگنز ویونیت 2 و ردانگیت 3 می باشند و از آنجا که این شکل ها در مقایسه با شکل های اکسیدی دارای حلالیت بیشتری هستند غلظت فسفر در محلول خاک افزایش می یابد. Samadi و Gilkes (1999) با آزمایش روی چهارده خاک آهکی استرالیا گزارش کردند که میانگین

بازیابی فسفر ظاهری فسفر اضافه شده به خاک در زمانهای 1، 5، 20، 40، 80 و 160 روز برترتیب 83، 60، 52، 37، 34 و 27 درصد بوده است. این محققان نتیجه گرفتند که بازیابی فسفر در زمانهای مختلف با رس، اکسیدهای آهن فعال و بلورین و اکسیدهای آلومینیوم فعال ارتباط منفی و معنی داری داشته و با کربنات کلسیم فعال ارتباط مثبت و معنی داری داشته است، که بیانگر این است که اکسیدهای آهن و آلومینیوم و رس مکان های فعال جذب فسفر در خاک های آهکی هستند. آزمایش های جذب سطحی فسفر در خاکهای آهکی نیز نشان دهنده اثر مثبت ویژگی های نظیر آهن قابل عصاره گیری توسط سیترات -دیتونات -بیکربنات (Fed) و آهن قابل عصاره گیری توسط محلول اسیدی اگزالات (Feo) بر جذب سطحی فسفر و اثر منفی کربنات کلسیم معادل خاکها بر آن می باشد (Soils و Torrent، 1989، Ryan و همکاران، 1985 و Zhou و Li، 2001). Griffin و Jurinak (1973) و reeman و Rowell (1981) و اخیراً Carreira و همکاران (2005) نشان داده اند که کربنات کلسیم شیمیایی خالص و کربنات کلسیم خاکها نقش مهمی را در رسوب دادن و خارج ساختن فسفر از محلول دارند.

ضرائب همبستگی و رگرسیون های چند متغیره تا حدودی نقش ویژگی های خاک را در واکنش های شیمیایی عناصر را مشخص می کنند. Soils و Torrent (1989) معتقدند اگرچه معادلات رگرسیون چند متغیره نشان دهنده نقش رس و Fed در جذب سطحی فسفر در خاکهای آهکی اسپانیا می باشد اما مشخص نمودن سهم هر کدام از آنها در جذب سطحی فسفر مشکل است. Carreira و همکاران (2005) نیز تأکید کرده اند که استفاده از روابط رگرسیون چند متغیره جهت ارزیابی ویژگی های موثر در واکنش فسفر در خاک مناسب نیست و در عوض از تجزیه ساختاری 4 بایستی استفاده شود. چنین بنظر می رسد که به دلیل همبستگی های موجود بین ویژگی های خاکها، استفاده از روش رگرسیون چند متغیره و ضرائب همبستگی می تواند به تفسیرهای اشتباه از نقش ویژگی های خاکها در واکنش های شیمیایی منجر گردد. روش ضرائب مسیر 5 یکی از روش های تجزیه ساختاری است که می تواند درک بهتری از روابط علت و معلولی موجود در خاک ایجاد کند. اگرچه این روش بیشتر در جنبه های زراعی به کار رفته اما Basta و همکاران (1993) جهت توضیح جذب سطحی فلزات سنگین در خاک و Tiessen و همکاران (1984)

- 1-Strengite
- 2- Vivianite
- 3- Reddingite

- 4- Structural Analysis
- 5- Path analysis

نیز بدون فسفر خوابانیده شد. در تیمار غرقابی پس از اشباع خاکها در حدود 0/5 سانتیمتر آب روی نمونه‌ها قرار داده شد. در تیمار رطوبت 20% وزنی هر سه روز یکبار رطوبت خاک توسط توزین تنظیم شد. در ظرف‌ها منافذی جهت برقراری تبادل با هوای آزاد تعبیه شد. در زمانهای 1، 2، 5، 10، 20، 40، 80 و 160 روز یک نمونه حدود 6 گرم از هر نمونه جهت تعیین فسفر به روش اولسن برداشته شد. همزمان از یک نمونه نیز جهت تعیین رطوبت وزنی استفاده شد. در عصاره‌های حاصل غلظت فسفر به روش Murphy و Riley (1962) تعیین و غلظت فسفر بر اساس وزن خاک خشک محاسبه گردید.

اثر تیمارهای مختلف بر فسفر اولیه خاک و بازیابی فسفر افزوده شده به خاک، ارتباط میان بازیابی فسفر و ویژگی‌های خاکها در زمان‌های مختلف توسط برنامه‌های آماری MSTATC و SPSS تعیین گردید.

جهت بدست آوردن درک بهتر از نقش ویژگی‌های خاک در بازیابی فسفر از روش ضرایب مسیر استفاده شد که ضرایب همبستگی (r) میان بازیابی فسفر و ویژگی‌های خاک را به اثرات مستقیم و غیر مستقیم تفکیک می‌کند. به عنوان مثال اگر  $V_1$  تا  $V_5$  ویژگی‌های خاک باشند که بازیابی فسفر ( $V_6$ ) را کنترل می‌کنند (شکل 1)، هر ویژگی دارای یک اثر مستقیم ( $P_{ij}$ ) بر بازیابی فسفر می‌باشد و اثر غیر مستقیم آن بر بازیابی فسفر از طریق همبستگی آن با سایر ویژگی‌ها اعمال می‌شود. بر اساس جدول پیشنهاد شده توسط Williams و همکاران (1993) می‌توان اثرات  $V_1$  تا  $V_5$  بر بازیابی فسفر ( $V_6$ ) را توسط معادلات 1 تا 5 نشان داد. علایمی که بصورت پر رنگ و زیرخط دار هستند نشان‌دهنده اثرات مستقیم ویژگی‌های یک تا پنج بر بازیابی فسفر ( $V_6$ ) هستند.

(1)

$$r_{16} = \underline{P_{16}} + r_{12}P_{26} + r_{13}P_{36} + r_{14}P_{46} + r_{15}P_{56}$$

(2)

$$r_{26} = r_{12}P_{16} + \underline{P_{26}} + r_{23}P_{36} + r_{24}P_{46} + r_{25}P_{56}$$

(3)

$$r_{36} = r_{13}P_{16} + r_{23}P_{26} + \underline{P_{36}} + r_{34}P_{46} + r_{35}P_{56}$$

(4)

$$r_{46} = r_{14}P_{16} + r_{24}P_{26} + r_{34}P_{36} + \underline{P_{46}} + r_{45}P_{56}$$

(5)

$$r_{56} = r_{15}P_{16} + r_{25}P_{26} + r_{35}P_{36} + r_{45}P_{46} + \underline{P_{56}}$$

با مشخص بودن ضرایب همبستگی میان بازیابی فسفر و ویژگی‌های خاک و ضرایب همبستگی میان ویژگی‌های خاک می‌توان دستگاه چند معادله چند مجهول

جهت بررسی تبدیلات شکل‌های مختلف فسفر به یکدیگر از این روش استفاده کرده‌اند.

در سال زراعی 79-80 کشت برنج درایران 3/13 درصد از سطح کل زیر کاشت محصولات زراعی را به خود اختصاص داده است. از آنجا که اطلاعات کمی در مورد تأثیر رژیم رطوبتی و ویژگی‌های خاک بر فسفر بومی و بازیابی فسفر اضافه شده به خاک به روش اولسن با گذشت زمان گزارش شده است هدف‌های این تحقیق (1) بررسی تأثیر شرایط غرقابی و رطوبت وزنی 20% بر فسفر بومی و فسفر افزوده شده به خاک، (2) اثر ویژگی‌های خاک بر بازیابی فسفر در شرایط غرقابی و رطوبت وزنی 20% (3) تعیین اثرات مستقیم و غیر مستقیم ویژگی‌های خاک بر بازیابی فسفر افزوده شده به خاک در زمان‌های مختلف صورت گرفت.

### مواد و روش آزمایش

در این پژوهش از بیست نمونه خاک دارای ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی کاملاً متفاوت استفاده شد. در این خاکها بافت به روش پی پت، کربنات کلسیم معادل (CCE) به روش خنتی سازی با اسید کلریدریک و کربنات کلسیم فعال (ACCE) به روش آمونیوم اگزالات، پ هاش خمیر اشباع (pH)، ماده آلی (OM) به روش اکسیداسیون مرطوب، آهن و آلومینیوم قابل عصاره‌گیری توسط سترات-دی تیونایت-بیکربنات (Fed و Ald) و محلول اسیدی اگزالات آمونیوم (Alo و Feo)، اکسیدهای منگنز محلول در هیدروکسیل آمین هیدروکلرید (Mnh)، و فسفر به روش اولسن بر اساس روشهای استاندارد آزمون خاک (Page و همکاران، 1982) تعیین گردید (جدول 1).

آزمایش بصورت فاکتوریال ( $2 \times 2 \times 2$ ) با بیست خاک، دو سطح فسفر (صفر و 300 میلی‌گرم فسفر در کیلوگرم خاک) و دو رژیم رطوبتی (غرقابی و رطوبت 20% وزنی) در قالب طرح کامل تصادفی در دو تکرار انجام پذیرفت. ممکن است تصور شود که کاربرد 300 میلی‌گرم فسفر در کیلوگرم خاک در آزمایش حاضر بسیار زیاد است اما محققان مختلف جهت بررسی روند تبدیلات فسفر در خاکها از مقادیری نظیر 300 (Samadi و Gilkes، 1999)؛ 200 (Mandal و Khan، 1977)، 400 (Ryan و همکاران، 1985b) و 20 تا 500 میلی‌گرم فسفر در کیلوگرم خاک (Afif و همکاران، 1993) استفاده نموده‌اند.

مقدار 150 گرم از هر نمونه خاک در ظروف پلاستیکی درب دار ریخته شد و معادل 300 میلی‌گرم فسفر در کیلوگرم خاک به هر ظرف بصورت محلول از منبع دی هیدروژن پتاسیم فسفات افزوده شد، نمونه‌ها توسط هم زدن کاملاً یکنواخت شدند. همزمان یک نمونه

فوق را جهت بدست آوردن Piz حل نمود و اثر هر ویژگی را به اثرات مستقیم و غیر مستقیم آن تفکیک نمود.

### بحث و نتایج

#### اثر رژیم رطوبتی بر فسفر اولیه و بازیابی فسفر اضافه شده به خاک

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که رژیم رطوبتی اثر معنی داری بر فسفر عصاره گیری شده به روش اولسن در زمانهای 1، 2، 5 و 10 روز داشت و برهمکنش خاک و رژیم رطوبتی تنها در روز 10 معنی دار بود (جدول 2). میانگین فسفر عصاره‌گیری شده در حالت غرقابی در روزهای یاد شده بصورت معنی داری بیشتر از حالت رطوبت 20% وزنی بود (جدول 3). مفتون و همکاران (2003) گزارش کردند که میانگین غلظت فسفر به روش اولسن پس از دو ماه خوابانیدن خاکها در شرایط بی‌هوازی هوازی بترتیب 18/7 و 19/8 بوده است. Reddy و Moore (1994) عقیده دارند که در شرایط اکسیدی استرنگیت یا فسفاتهای منگنز سه ظرفیتی کنترل کننده غلظت فسفر در محلول می‌باشند در حالی که در شرایط کاهش شکل پایدار فسفاتهای آهن و منگنز ویونیت و ردانگیت هستند که حالیت بیشتری دارند و در نتیجه آزادسازی فسفر در این شرایط بیشتر خواهد شد.

نتایج آنالیز واریانس همچنین نشان داد که اثر رژیم رطوبتی بر بازیابی ظاهری فسفر تا 40 روز معنی دار نبوده در حالی که در 80 و 160 روز معنی دار می‌باشد (جدول 4). میانگین بازیابی فسفر افزوده شده به خاک در روزهای 80 و 160 در رطوبت 20% وزنی به ترتیب 139 (45%) و 113 (37%) میلی‌گرم در کیلوگرم خاک بود در حالی که در شرایط غرقابی این مقادیر به ترتیب 116 (37%) و 82 (29%) بودند (جدول 5). نتایج بازیابی فسفر افزوده شده به خاک در روزهای 80 و 160 نشان داد که در بیشتر خاکها مقدار بازیابی فسفر به روش اولسن در شرایط غرقابی بصورت معنی دار کمتر از شرایط رطوبت 20% وزنی بود. Patrick و Khalid (1974) مشاهده کردند که خاکها در شرایط غرقابی توانایی بیشتری جهت برون جزیی فسفر از محلول‌های غنی از فسفر دارند. این محققان گزارش کردند که در شرایط هوازی خاکها کمتر از نیمی از فسفر محلول را جذب کردند در حالی که در شرایط غرقابی تا 93% از فسفر محلول خاک توسط فاز جامد جذب شد. این محققان بیان کرده‌اند که علت جذب سطحی بیشتر فسفر در شرایط بی‌هوازی افزایش اکسیدهای آهن بی‌شکل است.

بررسی شکل‌های مختلف آهن نشان داده است که در شرایط غرقابی مقداری از اکسیدهای آهن بلورین به

اکسیدهای آهن بی شکل تبدیل می‌شوند (Sims و Patrick, 1974). Soils و Torrent (1989) در خاکهای آهکی اسپانیا مشاهده کردند که اکسیدهای آهن بلورین عمدتاً مسئول خروج فسفر در غلظت‌های کم فسفر (یک میلی‌گرم در لیتر) از محلول هستند در حالی که Ryan و همکاران (1985a) در خاکهای آهکی لبنان مشاهده کردند که در غلظت‌های زیاد فسفر (62/5-12/5 میلی‌گرم در لیتر، معادل با 156 تا 781 میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک) اکسیدهای آهن بی‌شکل جذب سطحی فسفر را کنترل می‌کنند. نتایج این محققان بیانگر این واقعیت است که اکسیدهای آهن بلورین انرژی جذب بیشتر و سطح ویژه کمتری برای جذب سطحی فسفر در مقایسه با اکسیدهای آهن بی‌شکل دارند. این نتایج ممکن است علت بازیابی کمتر فسفر در شرایط غرقابی را نسبت به شرایط هوازی توضیح دهند. در مطالعه حاضر نتایج عصاره گیری جزء به جزء فسفر (اطلاعات ارائه نشده است) نشان داد که مقدار فسفر بازیابی شده در شکل فسفات‌های آهن و آلومینیوم در خاکهای خوابانیده شده در رژیم رطوبتی غرقابی در روزهای 80 و 160 به مراتب بیشتر از رطوبت 20% وزنی بود.

#### اثر ویژگی‌های خاکها بر بازیابی فسفر افزوده شده به خاک

نتایج آنالیز واریانس (جدول 5) نشان داد که اثر رژیم رطوبتی و برهمکنش رژیم رطوبتی و خاک در 80 و 160 روز بر بازیابی ظاهری فسفر معنی دار بوده است. لذا جهت مشخص شدن نقش ویژگی‌های خاکها بر بازیابی فسفر در این تیمارها و اثر رژیم رطوبتی در این مسیر، ارتباط میان ویژگی‌های خاکها و بازیابی فسفر مورد بررسی قرار گرفت. ضرایب همبستگی میان بازیابی فسفر در روزهای 80 و 160 در حالت غرقابی (جدول 6) نشان داد که بازیابی فسفر بصورت منفی و معنی دار به Ald، Fed، Mn<sub>h</sub>، رس، CEC و نسبت رس به کربنات کلسیم فعال همبستگی داشت در حالی که با CCE همبستگی مثبت و معنی داری در روز 80 نشان داد. در رطوبت 20% وزنی نیز روند مشابهی دیده شد با این تفاوت که همبستگی میان بازیابی فسفر و اکسیدهای آهن بلورین و کربنات کلسیم معادل معنی دار نبوده است (جدول 7). Gilkes و Samadi (1999) در خاکهای آهکی استرالیا مشاهده کردند که بازیابی فسفر به روش اولسن با ویژگی‌های وابسته به رس خاک نظیر اکسیدهای آهن و آلومینیوم، همبستگی منفی و با کربنات کلسیم معادل و فعال همبستگی مثبت داشته است. تحقیق حاضر نقش اکسیدهای منگنز در بازیابی فسفر در خاکهای آهکی را نشان می‌دهد. نتایج سایر محققان

اثر مستقیم CCE بر بازیابی فسفر منفی است اما رابطه منفی میان CCE و ویژگی‌های وابسته به رس خاک سبب ایجاد اثر غیرمستقیم مثبت بر بازیابی فسفر گشته و بنابر این اثر کلی CCE بر بازیابی فسفر را مثبت نشان می‌دهد. این یافته می‌تواند تناقض‌های موجود بین یافته‌های سایر پژوهشگران در ارزیابی اهمیت کربنات کلسیم در جذب و رسوب فسفر بین خاکهای آهکی و کربنات کلسیم خالص را توضیح دهد و نیز مانع از تصور عدم توانایی CCE در جذب و رسوب فسفر در خاکهای آهکی ایران شود. نتایج ضرائب مسیر همچنین نشان داد که CCE و نسبت رس به کربنات کلسیم فعال از طریق اعمال اثرات مستقیم و غیر مستقیم بر بازیابی فسفر در خاکهای شدیداً آهکی ایران بیشترین تأثیر را داشته است.

یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که غرقاب شدن خاکها در ده روز اول خواباندن، تا حدودی، سبب افزایش فسفر محلول در بی‌کربنات سدیم شد اما در زمانهای بیشتر از ده روز این تأثیر معنی داری نبود. نتایج ما همچنین حاکی از بازیابی کمتر فسفر اضافه شده به خاک در شرایط غرقابی نسبت به رطوبت 20% وزنی در روزهای 80 و 160 می‌باشد، همچنین یافته‌های این پژوهش نشان داد که علاوه بر نقش اکسیدهای آهن و آلومینیوم، رس، CCE و نسبت رس به کربنات کلسیم فعال، اکسیدهای منگنز بر بازیابی و واکنش فسفر اضافه شده به خاکهای آهکی نقش مهمی را بازی می‌کند، همچنین درک بهتری از رابطه CCE و بازیابی فسفر در خاکهای شدیداً آهکی بدست آمد که نشان می‌دهد اثر مستقیم و اصلی کربنات کلسیم در خارج ساختن فسفر از شکل قابل عصاره‌گیری به روش اولسن می‌باشد. با توجه به اینکه که واکنش فسفر در خاک به تحت تأثیر ترکیبات آهن، آلومینیوم و منگنز قرار گرفت، بنابراین تحقیقات بیشتری همراه با اندازه‌گیری تغییر شکل‌های شیمیایی آهن، آلومینیوم و منگنز در رژیم‌های رطوبتی متفاوت و توانایی شکل‌های متفاوت آنها در جذب و آزاد سازی فسفر توصیه می‌شود.

در خاکهای آهکی نیز بیانگر همبستگی مثبت جذب سطحی فسفر با اکسیدهای آهن و آلومینیوم و همبستگی منفی آن با کربنات کلسیم معادل می‌باشد (Soils و Torrent, 1989, Ryan و همکاران, 1985a). یافته‌های این محققان و این تحقیق در تناقض با مشاهدات جذب و رسوب فسفر بر ذرات کربنات کلسیم شیمیایی خالص توسط Griffin و Jurinak (1973) و Rowell و Freeman (1981) می‌باشد. بعبارت دیگر انتظار می‌رود که میان بازیابی فسفر و جزء کربنات کلسیم در خاکهای آهکی همبستگی منفی مشاهده شود.

نتایج همبستگی میان ویژگی‌های خاک (جدول 8) نشان داد که ویژگی‌هایی نظیر Ald، Fed، Mnh و رس دارای همبستگی مثبت با یکدیگر و دارای همبستگی منفی و معنی دار با CCE خاکها هستند، هر چند همبستگی Fed و سایر ویژگی‌ها در اکثر موارد معنی دار نیست. چنین همبستگی میان ویژگی‌های خاکها بیانگر این حقیقت است که اثر هر ویژگی بر بازیابی فسفر می‌تواند متأثر از ارتباط آن با سایر ویژگی‌های خاک باشد بهمین علت معادلات رگرسیون چند متغیره و ضرایب همبستگی ساده نمی‌توانند بیانگر درجه اهمیت و نقش ویژگی‌های خاک بر بازیابی فسفر باشند. در حالی که استفاده از روش ضرائب مسیر بهتر می‌تواند در این راه کمک نماید.

ضرائب مسیر (جدول‌های 6 و 7) نشان داد که در حالت غرقابی اثرات مستقیم منفی Fed و Mnh (اعداد پر رنگ و زیر خط دار) بر بازیابی فسفر در روز 160 نسبت به رطوبت 20% وزنی بیشتر است در حالی که اثرات منفی مستقیم Ald در رطوبت 20% وزنی بیشتر از حالت غرقابی است. در واقع چنین تصور می‌شود که ترکیبات عنصری نظیر Fe و Mn که دارای ظرفیت متغیر هستند در حالت غرقابی به ترکیباتی با توانایی بیشتر برای جذب فسفر تبدیل می‌شوند، در حالی که در رطوبت 20% وزنی اثرات مستقیم و غیرمستقیم CCE، ACCE و Clay/ACCE بر بازیابی فسفر بسیار بیشتر از شرایط غرقابی است، بعبارت دیگر در حالت هوازی خاکهای شدیداً آهکی این ترکیبات کنترل کننده واکنش فسفر می‌باشند. نتایج تجزیه ضرائب مسیر (جدول‌های 6 و 7) همچنین نشان داد که اثرات مستقیم ویژگی‌هایی نظیر Fed، Ald و Mnh در حالت غرقابی و رطوبت 20% وزنی در اکثر موارد کمتر از همبستگی مشاهده شده میان این ویژگی‌ها و بازیابی فسفر می‌باشد و مقدار زیادی از اثرات آنها از طریق همبستگی آنها با ویژگی‌هایی نظیر رس و نسبت رس به کربنات کلسیم فعال اعمال می‌گردد. از طرف دیگر ضرائب مسیر نشان داد که در هر دو رژیم رطوبتی

جدول 1- برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاکهای مورد مطالعه

OM	ACCE	CCE	Mn <sub>h</sub>	Al <sub>d</sub>	Al <sub>o</sub>	Fe <sub>d</sub>	Fe <sub>o</sub>	رس	CEC	Olsen-P	EC <sub>e</sub>	pH	شماره خاک
(گرم بر کیلوگرم خاک)								(سانتی مول در کیلوگرم)	(میلی گرم در کیلوگرم)	(دسی زیمنس بر متر)	(خمیر اشباع)		
3/0	204	452	0/45	0/45	0/35	5/05	1/89	435	25/7	17	0/73	7/4	1
23/8	136	420	0/42	0/58	0/32	8/59	2/20	426	22/3	14	0/63	7/7	2
15/0	109	650	0/65	0/31	0/18	3/86	0/64	131	7/1	45	0/89	7/7	3
23/8	163	325	0/33	0/43	0/20	6/76	0/60	350	15/0	15	2/18	7/9	4
16/3	174	335	0/34	0/59	0/39	5/92	1/14	370	21/8	12	0/85	7/4	5
27/9	70	218	0/22	0/62	0/84	12/11	1/13	381	34/2	10	0/97	7/8	6
21/8	196	329	0/33	0/45	0/56	6/50	0/96	467	33/1	32	0/59	7/8	7
30/6	239	420	0/42	0/45	0/49	5/16	1/52	325	28/6	38	0/69	7/8	8
16/3	54	309	0/31	0/42	0/70	9/38	0/91	356	25/2	7	0/43	7/8	9
13/6	234	290	0/29	0/37	0/32	4/64	1/00	492	30/2	13	0/97	7/6	10
23/8	196	410	0/41	0/38	0/42	5/81	2/18	359	25/2	15	0/56	7/6	11
23/1	147	486	0/49	0/17	0/28	3/48	1/28	243	13/9	53	1/78	7/3	12
34/0	103	500	0/50	0/20	0/40	4/24	0/71	189	10/5	21	0/81	7/7	13
8/8	65	503	0/50	0/31	0/26	13/47	0/35	171	5/9	4	0/52	7/8	14
5/4	163	300	0/30	0/26	0/45	5/70	0/84	286	24/0	33	1/41	7/6	15
25/9	141	406	0/41	0/31	0/34	3/63	1/37	243	19/5	26	1/29	7/5	16
17/0	109	446	0/45	0/19	0/39	4/23	0/94	212	12/7	30	0/85	7/7	17
17/0	213	395	0/40	0/34	0/42	5/66	1/01	280	24/0	18	0/52	7/6	18
20/1	144	422	0/42	0/28	0/75	3/18	0/76	268	22/9	6	1/37	7/4	19
11/7	109	495	0/50	0/20	0/16	5/47	0/53	167	12/2	31	0/89	7/6	20

Fe<sub>d</sub> و Fe<sub>o</sub>، بترتیب آهن قابل عصاره‌گیری توسط سیترات-دی تیونات-بیکربنات و محلول اسیدی اگزالات، Al<sub>o</sub> و Al<sub>d</sub>، بترتیب آلومینیوم قابل عصاره‌گیری توسط سیترات-دی تیونات-بیکربنات و محلول اسیدی اگزالات، Mn<sub>h</sub>، منگنز عصاره‌گیری شده توسط هیدروکسیل آمین-هیدروکلرید، CCE و ACCE بترتیب کربنات کلسیم معادل و کربنات کلسیم فعال، EC<sub>e</sub>، هدایت الکتریکی ویژه عصاره اشباع، و CEC ظرفیت تبادل کاتیونی.

جدول 2- اثر تیمارهای مختلف بر فسفر بومی عصاره گیری شده (میلی گرم در کیلو گرم خاک) به روش اولسن در مقدار صفر فسفر در زمانهای مختلف

منبع تغییر	زمان خوابانیدن (روز)	زمان خوابانیدن (روز)						
		یک	دو	پنج	ده	بیست	چهل	هشتاد
خاک	19	720**	642**	674**	644**	711**	754**	464**
رژیم رطوبتی	1	156*	25*	165*	52/81*	1/250 <sup>ns</sup>	1/800 <sup>ns</sup>	6/612 <sup>ns</sup>
خاک * رژیم رطوبتی	19	30/43 <sup>ns</sup>	7/023 <sup>ns</sup>	21/15 <sup>ns</sup>	21/07*	23/85 <sup>ns</sup>	3/958 <sup>ns</sup>	17/22 <sup>ns</sup>
خطا	40	19/32	4/188	7/28	5/438	13/87	12/35	34/96

ns معنی دار نیست.

\* و \*\* بترتیب در سطح پنج و یک درصد آماری معنی دار هستند.

جدول 3- اثر رژیم رطوبتی بر میانگین فسفر عصاره گیری شده به روش اولسن در مقدار صفر فسفر در زمانهای مختلف

رژیم رطوبتی	زمان خوابانیدن (روز)	زمان خوابانیدن (روز)						
		یک	دو	پنج	ده	بیست	چهل	هشتاد
رطوبت 20% وزنی	20/95	19/9	19/2	19/7	19/5	20/4	20/3	17/5
غرقابی	23/75	21/02	22/1	21/3	19/8	20/1	20/8	16/9

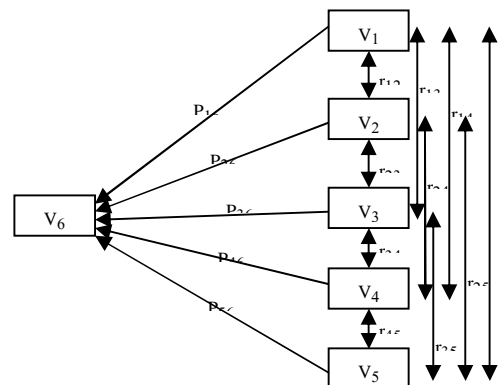
جدول 4- اثر تیمارهای مختلف بر بازیابی فسفر به روش اولسن از 300 میلی گرم فسفر در کیلو گرم خاک در زمانهای مختلف

منبع تغییر	زمان خوابانیدن (روز)	زمان خوابانیدن (روز)						
		یک	دو	پنج	ده	بیست	چهل	هشتاد
خاک	19	5570**	4409**	4776**	3445**	3569**	5046**	3490**
رژیم رطوبتی	1	1980 <sup>ns</sup>	812 <sup>ns</sup>	208 <sup>ns</sup>	535 <sup>ns</sup>	456 <sup>ns</sup>	1470 <sup>ns</sup>	12152**
خاک رژیم * رطوبتی	19	3850 <sup>ns</sup>	1746 <sup>ns</sup>	1403 <sup>ns</sup>	2376 <sup>ns</sup>	1999 <sup>ns</sup>	646 <sup>ns</sup>	447**
خطا	40	294	495	918	932	193	415	41/5

ns معنی دار نیست.

\* و \*\* بترتیب در سطح پنج و یک درصد آماری معنی دار هستند.

r15



شکل 1- دیاگرام ضرایب مسیر برای پنج ویژگی خاک (V<sub>1</sub>-V<sub>5</sub>) کنترل کننده بازیابی فسفر (V<sub>6</sub>).

جدول 5- اثر رژیم رطوبتی بر میانگین بازیابی فسفر به روش اولسن از 300 میلی گرم فسفر در کیلوگرم خاک در زمانهای مختلف

رژیم رطوبتی	زمان خوابانیدن (روز)						
	یک	دو	پنج	ده	بیست	چهل	هشتاد
رطوبت 20% وزنی	226	220	218	213	184	167	137
غرقاب	241	229	221	218	189	158	112
صد و شصت							112
							87

جدول 6- ضرایب مسیر و همبستگی میان بازیابی فسفر به روش اولسن در روزهای 80 و 160 در رژیم رطوبتی غرقابی و برخی خصوصیات خاکها

خصوصیات خاک									خصوصیات خاک
روز هشتاد									
r	Clay/ACCE	ACCE	CCE	CEC	Clay	Mn <sub>h</sub>	Al <sub>d</sub>	Fe <sub>d</sub>	
-0/40*	-0/59	0/22	0/16	0/00	-0/04	-0/08	-0/03	-0/05	Fe <sub>d</sub>
-0/64**	-0/42	-0/07	0/26	0/00	-0/17	-0/14	-0/06	-0/03	Al <sub>d</sub>
-0/66**	-0/58	0/03	0/32	0/00	-0/16	-0/20	-0/05	-0/02	Mn <sub>h</sub>
-0/61**	-0/29	-0/24	0/34	0/00	-0/24	-0/12	-0/05	-0/01	Clay
-0/53**	-0/31	-0/22	0/37	0/00	-0/20	-0/13	-0/04	-0/01	CEC
0/40*	0/46	0/08	-0/49	0/00	0/17	0/13	0/03	0/02	CCE
0/01 <sup>ns</sup>	0/48	-0/46	0/09	0/00	-0/13	0/01	-0/01	0/03	ACCE
-0/64**	-0/87	0/25	0/26	0/00	-0/08	-0/13	-0/03	-0/04	Clay/ACCE
روز صد و شصت									
-0/33 <sup>ns</sup>	-0/28	0/14	0/11	-0/01	-0/02	-0/19	0/06	-0/15	Fe <sub>d</sub>
-0/54**	-0/20	-0/05	0/19	-0/08	-0/10	-0/35	0/13	-0/08	Al <sub>d</sub>
-0/65**	-0/27	0/02	0/22	-0/09	-0/09	-0/47	0/09	-0/06	Mn <sub>h</sub>
-0/53**	-0/14	-0/15	0/24	-0/11	-0/14	-0/30	0/09	-0/02	Clay
-0/52**	-0/14	-0/14	0/27	-0/14	-0/12	-0/31	0/08	-0/02	CEC
0/41*	0/21	0/05	-0/34	0/11	0/10	0/31	-0/07	0/05	CCE
-0/02 <sup>ns</sup>	0/22	-0/29	0/06	-0/07	-0/07	0/03	0/02	0/07	ACCE
-0/52**	-0/41	0/16	0/18	-0/05	-0/05	-0/32	0/06	-0/10	Clay/ACCE

ns معنی دار نیست.

\* و \*\* بترتیب در سطح پنج و یک درصد آماری معنی دار هستند.



جدول 7- ضرایب مسیر و همبستگی میان بازیابی فسفر به روش اولسن در روزهای 80 و 160 در رژیم رطوبتی 20% وزنی و برخی خصوصیات خاکها

خصوصیات خاک									خصوصیات خاک
خصوصیات خاک									
روز هشتاد									
r	Clay/ACCE	ACCE	CCE	CEC	Clay	Mn <sub>h</sub>	Al <sub>d</sub>	Fe <sub>d</sub>	
-0/37 <sup>ns</sup>	-0/78	0/30	0/23	0/02	-0/04	-0/07	-0/10	0/06	Fe <sub>d</sub>
-0/61 <sup>**</sup>	-0/55	-0/10	0/37	0/14	-0/18	-0/13	-0/20	0/03	Al <sub>d</sub>
-0/59 <sup>**</sup>	-0/77	0/04	0/45	0/15	-0/16	-0/17	-0/15	0/02	Mn <sub>h</sub>
-0/52 <sup>**</sup>	-0/39	-0/32	0/49	0/19	-0/25	-0/11	-0/14	0/01	Clay
-0/39 <sup>*</sup>	-0/41	-0/30	0/54	0/23	-0/21	-0/11	-0/12	0/01	CEC
0/22 <sup>ns</sup>	0/60	0/11	-0/70	-0/17	0/18	0/11	0/11	-0/02	CCE
0/07 <sup>ns</sup>	0/63	-0/62	0/12	0/11	-0/13	0/01	-0/03	-0/03	ACCE
-0/61 <sup>**</sup>	-1/14	0/34	0/37	0/08	-0/09	-0/12	-0/09	0/04	Clay/ACCE
روز صد و شصت									
-0/26 <sup>ns</sup>	-0/58	0/30	0/23	-0/02	0/03	-0/12	-0/10	0/00	Fe <sub>d</sub>
-0/52 <sup>**</sup>	-0/41	-0/10	0/37	-0/09	0/13	-0/22	-0/20	0/00	Al <sub>d</sub>
-0/52 <sup>**</sup>	-0/57	0/04	0/45	-0/10	0/11	-0/30	-0/15	0/00	Mn <sub>h</sub>
-0/39 <sup>*</sup>	-0/29	-0/31	0/49	-0/13	0/18	-0/19	-0/14	0/00	Clay
-0/39 <sup>*</sup>	-0/30	-0/29	0/53	-0/15	0/15	-0/20	-0/12	0/00	CEC
0/16 <sup>ns</sup>	0/45	0/11	-0/69	0/12	-0/13	0/19	0/11	0/00	CCE
-0/01 <sup>ns</sup>	0/47	-0/61	0/12	-0/07	0/09	0/02	-0/03	0/00	ACCE
-0/44 <sup>*</sup>	-0/85	0/34	0/36	-0/05	0/06	-0/20	-0/10	0/00	Clay/ACCE

ns معنی دار نیست.

\* و \*\* بترتیب در سطح پنج و یک درصد آماری معنی دار هستند.

جدول 8- ضرایب همبستگی میان خصوصیات خاکها

خصوصیات خاک							خصوصیات خاک
ACCE	CCE	CEC	Clay	Mn <sub>h</sub>	Al <sub>d</sub>	Fe <sub>d</sub>	
						0/50 <sup>*</sup>	Al <sub>d</sub>
					0/74 <sup>**</sup>	0/39 <sup>ns</sup>	Mn <sub>h</sub>
				0/64 <sup>**</sup>	0/71 <sup>**</sup>	0/15 <sup>ns</sup>	Clay
			0/83 <sup>**</sup>	0/66 <sup>**</sup>	0/61 <sup>**</sup>	0/10 <sup>ns</sup>	CEC
		-0/77 <sup>**</sup>	-0/71 <sup>**</sup>	-0/65 <sup>**</sup>	-0/54 <sup>*</sup>	-0/33 <sup>ns</sup>	CCE
	-0/18 <sup>ns</sup>	0/48 <sup>*</sup>	0/52 <sup>*</sup>	-0/06 <sup>ns</sup>	0/16 <sup>ns</sup>	-0/49 <sup>*</sup>	ACCE
-0/55 <sup>*</sup>	-0/53 <sup>*</sup>	0/36 <sup>ns</sup>	0/34 <sup>ns</sup>	0/67 <sup>**</sup>	0/48 <sup>*</sup>	0/68 <sup>**</sup>	Clay/ACCE

ns معنی دار نیست.

\* و \*\* بترتیب در سطح پنج و یک درصد آماری معنی دار هستند.

## فهرست منابع:

1. الفتی، م، م. ج. ملکوتی، م. ر. بلالی. 1378. تعیین حد بحرانی فسفر برای محصول گندم در ایران. علوم آب و خاک. 6: 39-45.
2. حکیم‌زاده اردکانی، م. ع. 1373. ارزیابی گلخانه‌ای و آزمایشگاهی چندین روش شیمیایی جهت تعیین فسفر قابل استفاده در بعضی از خاکهای آهکی ماندابی استان‌های فارس و اصفهان. پایان‌نامه فوق لیسانس. بخش خاکشناسی. دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز.
3. قنبری، ع. 1371. ارزیابی گلخانه‌ای و آزمایشگاهی چند عصاره‌گیر فسفر در بعضی از خاکهای آهکی مهم استان فارس. پایان‌نامه فوق لیسانس بخش خاکشناسی. دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز.
4. ملکوتی، م، ج. 1378. کشاورزی پایدار و افزایش عملکرد با بهینه‌سازی مصرف کود. چاپ دوم. نشر آموزش کشاورزی.
5. Afif, E., A. Matar, and J. Torrent. 1993. Availability of phosphorus applied to calcareous soils of West Asia and North Africa. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 756-760.
6. Basta, N. T., D. J. Pantone, and M. A. Tabatabai. 1993. Path analysis of heavy metals adsorption by soils. *Agron. J.* 85: 1054-1057.
7. Bray, R. H., and L. T. Kurtz. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Sci.* 59: 39-45.
8. Carreira, J. A., B. Vinegla, and K. Lajtha. 2005. Secondary  $\text{CaCO}_3$  and precipitation of P-Ca compounds control the retention of soil P in arid ecosystems. *J. Arid Environ.* 64:460-473.
9. Freeman, J. S., and D. L. Rowell. 1981. The adsorption and precipitation of phosphate onto calcite. *J. Soil Sci.* 32: 75-84.
10. Griffin, R. A., and J. J. Jurinak. 1974. Kinetics of phosphate interaction with calcite. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 38: 75-79.
11. Lehr, J. R., and W. E. Brown. 1958. Calcium phosphate fertilizers: II. A petrographic study of their alteration in soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 22: 29-32.
12. Maftoun, M., M. A. Hakimzadeh Ardekani, N. Karimian, and A. M. Ronaghi. 2003. Evaluation of phosphorus availability for paddy rice using eight chemical soil tests under oxidized and reduced conditions. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 34: 2115-2129.
13. Mandal, L. N., and S. K. Khan. 1977. Transformation of fixed phosphorus in soils under waterlogged condition. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 25: 122-128.
14. Moore, Jr., P. A., and K. R. Reddy. 1994. Role of Eh and pH on phosphorus geochemistry in sediments of lake Okeechobee, Florida. *J. Environ. Qual.* 23: 955-964.
15. Murphy, J., and Riley. J. P. 1962. A modified single solution method for determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Acta* 27: 31-36.
16. Olsen, S. R., C. V. Cole, F. S. Watanabe and L. A. Dean. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extracting with sodium bicarbonate. USDA Cric. 939, Washington, DC.
17. Page, A. L., R. H. Miller, and D. R. Keeney. 1982. Methods of soil analysis. Part 2, 2nd ed., Am. Soc. Agron. Madison., WI.
18. Parischa, N. S., and F. N. Ponnampurna. 1976. Influence of salt and alkali on ionic equilibria in submerged soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 40: 374-376.
19. Patrick Jr., W. H., and R. A. Khalid. 1974. Phosphorus release and sorption by soils and sediments : Effect of aerobic and anaerobic conditions. *Science* 186: 53-55.
20. Ryan, J., D. Curtin, and M. A. Cheema. 1985a. Significance of iron oxides and calcium carbonate particle size in phosphate sorption by calcareous soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49: 74-76.

21. Ryan, J., H. M. Hasan, M. Bassiri, and H. S. Tabbra. 1985b. Availability and transformation of applied phosphorus in calcareous Lebanese soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49: 1215-1220.
22. Samadi, A., and R. J. Gilkes. 1999. Phosphorous transformation and their relationships with calcareous soil properties of Southern Western Australia. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 809-815.
23. Schawb, A. P., and W. L. Lindsay. 1983. The effect of redox on the solubility and availability of manganese in a calcareous soil. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 47: 217-220.
24. Sharma, R. D., and B. Mishra. 1985. Phosphorus availability to rice in submerged soils. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 33: 688-691.
25. Sims, J. L. and W. H. Patrick, Jr. 1978. The distribution of micronutrient cations in soils under conditions of varying redox potential and pH. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42: 258-262.
26. Soils, P., and J. Torrent. 1989. Phosphate sorption by calcareous Vertisols and Inceptisols of Spain. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53: 456-459.
27. Tiessen, H., J. W. B. Stewart, and C. V. Cole. 1984. Pathways of phosphorus transformation in soils of differing pedogenesis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48: 853-858.
28. Williams, W. A., M. B. Jones, and M. W. Demment. 1990. A concise table for path analysis statistics. *Agron. J.* 82: 1022-1024.
29. Zhou, M., and Y. Li. 2001. Phosphorous sorption characteristics of calcareous soils and limestone from southern Everglades and adjacent farmlands. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65:1404

