

## توزیع شکل‌های فسفر در خاک‌های جنگلی کلاردشت

محمدجواد محبی صادق و احمد حیدری<sup>1</sup>

دانشجوی دکتری گروه مهندسی علوم خاک، دانشگاه تهران؛ [mjmohebbi@ut.ac.ir](mailto:mjmohebbi@ut.ac.ir)

استاد گروه مهندسی علوم خاک، دانشگاه تهران؛ [ahaidari@ut.ac.ir](mailto:ahaidari@ut.ac.ir)

دریافت: 95/3/5 و پذیرش: 95/12/2

### چکیده

فسفر از عناصر اصلی مورد نیاز گیاه می‌باشد که به شکل‌های مختلف شیمیایی و بیوشیمیایی در خاک دیده می‌شود. به همین دلیل فسفر مستعد اثرپذیری از فرآیندها و شرایط خاکساز می‌باشد. در این پژوهش با هدف بررسی اثر فرآیندهای خاکساز بر توزیع شکل‌های فسفر و قابلیت فراهمی آن 8 نیمرخ خاک در اراضی تحت پوشش جنگلی منطقه کلاردشت حفر و مطالعه گردید. فسفر فراهم (Pav)، فسفر کل (TP)، فسفر آلی (OP)، فسفر معدنی (MP) به-اضافه 8 شکل مختلف فسفر معدنی در افق‌های ژنتیکی خاک اندازه‌گیری شد و همبستگی این شکل‌ها با یکدیگر و نیز پارامترهای فیزیکوشیمیایی در نیمرخ‌های خاک بررسی گردید. نتایج نشان داد فرآیندهای خاکساز اثرات قابل توجهی بر توزیع شکل‌های مختلف فسفر دارند. فسفات‌های آهن (Fe-P) و آلومینیوم (Al-P) همبستگی مثبت و معنی‌داری با فسفر قابل استخراج با اگزالات آمونیوم (Pox) داشتند که ممکن است نمایانگر استخراج فسفر هم‌رسوبی شده با اکسیدهای آهن و آلومینیوم دارای تبلور ضعیف (از طریق انحلال) و یا فسفر جذب شده توسط این اکسیدها (از طریق تبادل لیگاند و آنیونی) باشد. این شکل‌های با تبلور پایین و همچنین اکتا کلسیم فسفات (Ca8-P) و فسفر محبوس (Oc-P) همبستگی مثبت و معنی‌داری را با درصد رس نشان دادند که اتصال این ترکیبات به ذرات رس در طی واکنش‌های شیمیایی مختلف و انتقال همزمان (co-migration) این ترکیبات و ذرات رس در طی فرآیند انتقال مکانیکی ذرات ریز (lessivage) و شستشو و رسوب مجدد (illuvation-eluviation) را محتمل می‌سازد. فسفر معدنی لبایل (LPi) و نسبتاً لبایل (MLPi) همبستگی معنی‌داری با فسفر قابل دسترس نداشتند اما فرم آپاتیت همبستگی معنی‌داری با فسفر قابل دسترس داشت که می‌تواند در اثر تخلیه فسفر توسط گیاهان، میکروارگانیسم‌ها از افق‌های سطحی خاک و علاوه بر آن انتقال عناصر به قسمت‌های پایین‌تر نیمرخ خاک باشد که در نتیجه آن از منابع مقاومی مثل آپاتیت برای تامین فسفر استفاده می‌شود. این در حالی است که بیشترین همبستگی بین فسفر قابل دسترس، فسفر آلی و کربن آلی مشاهده شد که به همین دلیل فرآیند اضافه شدن بقایای گیاهی و چرخه جذب-بازگشت فسفر توسط گیاه (littering) و هوموسی شدن و فرآیندهای جانبی آن مهم‌ترین فرآیند موثر بر فسفر قابل جذب (Pav) تلقی گردید.

واژه‌های کلیدی: افق ژنتیکی خاک، فسفر معدنی

<sup>1</sup> نویسنده مسئول، آدرس: کرج، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، گروه مهندسی

## مقدمه

کاهش خواهد یافت (جاوید و روجل<sup>10</sup>، 2002)، با این وجود برخی مطالعات نقش فرم‌های با تبلور بالا در تأمین فسفر قابل جذب را گزارش کرده‌اند (سالک<sup>11</sup> و همکاران، 2001). خصوصیات خاک همچون pH، میزان کربنات‌ها، درصد رس و مواد آلی خاک از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در توزیع و پایداری شکل‌های فسفر در نیمرخ خاک می‌باشند (بک و سانچز<sup>12</sup>، 1994؛ دلگادو و تورنت<sup>13</sup>، 2000).

روش‌های مختلفی برای استخراج شکل‌های معدنی فسفر خاک پیشنهاد شده است که فسفر خاک را به شکل‌های ترکیب شده با کلسیم، آهن و آلومینیوم در درجات مختلف تبلور تقسیم می‌کند (چانگ و جکسون<sup>14</sup>، 1957؛ جیانگ و گو<sup>15</sup>، 1989). همچنین روش‌هایی برای استخراج فرم‌های فسفر با درجات مختلف فراهمی ارائه شده است که می‌تواند فرم‌های لبایل و نسبتاً لبایل که در تعادل با فسفر قابل دسترس هستند را تعیین نموده و درک بهتری از شرایط فسفر فراهم کنند (بومن و کول<sup>16</sup>، 1978؛ شارپلی و اسمیت<sup>17</sup>، 1985؛ ایوانف<sup>18</sup> و همکاران، 1998). یانگ<sup>19</sup> و همکاران (2012) در مطالعه عمقی خاک‌های هیستوسول و آلفی-سول با درصد اشباع بازی کم و تحت شرایط غرقاب بیشترین میزان شکل فسفر معدنی را فسفر در اتصال با آهن گزارش کردند و افزایش آن در افق‌های عمقی را ناشی از فرآیند انتقال رس و مواد آلی در نیمرخ خاک دانستند. دابرن<sup>20</sup> و همکاران (2002) در مطالعه خاک‌های اسیدی فرم‌های در اتصال با آلومینیوم و آهن را بیشترین شکل‌های فسفر گزارش کردند. شاهین<sup>21</sup> و همکاران (2007) با مطالعه خاک‌های اریدی-سول و انتی-سول در مصر بیان کردند فسفر در اتصال با کلسیم بیشترین سهم از فسفر کل را داراست و فرآیندهای خاکسازای همچون هم-رسوبی و واکنش‌های جذب و واجذب مهم‌ترین فرآیندهای کنترل کننده توزیع فسفر هستند. کریرا<sup>22</sup> و

خاک سیستم پیچیده‌ای است که تکامل و تغییرات آن تحت تأثیر عوامل مختلفی همچون اقلیم، مواد مادری، فرآیندهای بیولوژیک، زمان و شرایط هندسی آن در منظر اراضی است (لیناتور<sup>1</sup> و همکاران، 2004). طبق نظریه سیمونسون<sup>2</sup> (1959) چهار فرآیند خاکسازای شامل افزایش، کاهش، انتقال و تغییر و تبدیلات اجزای فیزیکی و شیمیایی خاک ارکان اصلی تغییرات سطحی و عمقی آن را تشکیل می‌دهند و عوامل خاکسازای شدت و ضعف این فرآیندها را تعیین می‌کنند. برآیند این تغییرات شرایط خاک را از نظر حاصلخیزی، مقاومت به تغییرات محیطی و نقش آن در فرآیندهای زیست محیطی مشخص می‌کند (توریون<sup>3</sup> و همکاران، 2007).

فسفر از عناصر اصلی مورد نیاز گیاهان است که از دیدگاه‌های کشاورزی، زیست‌محیطی و تغییرات شرایط خاک و حفاظت پایدار آن مورد توجه محققان قرار گرفته است (میسنر<sup>4</sup> و همکاران، 2008؛ لی<sup>5</sup> و همکاران، 2004). برخلاف عناصری همچون نیتروژن، چرخه فسفر در طبیعت تنها بین اکوسیستم‌های خاکی و آبی در گردش است و این امر اهمیت بررسی و مدیریت آن در خاک را دوچندان می‌کند (پوردر<sup>6</sup> و همکاران، 2007). فسفر خاک دارای شکل‌های مختلف شیمیایی و بیوشیمیایی است که به طور مؤثری تحت تأثیر شرایط فیزیکی-شیمیایی محیط قرار می‌گیرند (بیوچمین<sup>7</sup> و همکاران، 2003)، در نتیجه تغییرات پیدایشی و تکاملی خاک به طور مؤثری بر پراکنش و قرارگیری فسفر در فازهای مختلف تأثیر گذارند (سالومون<sup>8</sup> و همکاران، 2002). عناصر کلسیم، آهن و آلومینیوم و ترکیبات حاوی این عناصر مهم‌ترین عواملی هستند که بسته به شرایط میزان نگهداشت، تثبیت و فراهمی فسفر معدنی در خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهند (ونگ<sup>9</sup> و همکاران، 2000). هرچه فرآیندهای خاک شرایط مساعدتری را برای افزایش پایداری و تبلور کانی‌های حاوی فسفر فراهم کند میزان ترکیبات تثبیت شده فسفر خاک افزایش یافته و مقادیر قابل دسترس آن

10. Javid &amp; Rowell

11. Saleque

12. Beck &amp; Sanchez

13. Delgado &amp; Torrent

14. Chang &amp; Jackson

15. Jiang &amp; Gu

16. Bowman &amp; Cole

17. Sharply &amp; smith

18. Ivanoff

19. Yang

20. Dobermann

21. Shaheen

22. Carreira

1. Litaor

2. Simonson

3. Turrión

4. Meissner

5. Lee

6. Porder

7. Beauchemin

8. Solomon

9. Wang

## مواد و روش‌ها

این پژوهش در جنوب شهر کلاردشت واقع در استان مازندران بین  $51^{\circ}07'$  تا  $51^{\circ}14'$  طول شرقی و  $36^{\circ}29'$  تا  $36^{\circ}34'$  عرض شمالی انجام گردید. زمین-شناسی غالب منطقه شامل سنگ آهک دوره پرمین می-باشد. رژیم رطوبتی و حرارتی منطقه به ترتیب زیرک و مزیک بوده و پوشش گیاهی غالب منطقه، جنگل گونه‌های راش (*Fagus orientalis*) می‌باشند.

به منظور بررسی شرایط فسفر معدنی، بعد از بررسی نقشه‌های زمین‌شناسی و توپوگرافی، 8 نیمرخ خاک تا عمق 100 سانتی‌متری حفر، تشریح و نمونه-برداری از افق‌های ژنتیکی انجام شد (NRCS, USDA, 2002). نیمرخ‌های خاک بر اساس نتایج صحرایی و آزمایشگاهی آن‌ها رده‌بندی گردیدند (soil survey staff, 2014). نمونه‌های خاک از الک 2 میلی‌متری عبور داده شدند و اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های برداشت شده (38 نمونه) شامل کربن آلی (OC) به روش والکی و بلک<sup>5</sup> (1934)، بافت خاک به روش هیدرومتری (گی و بوردر<sup>6</sup>، 2002)، اسیدیته در گل اشباع (pH) (توماس<sup>7</sup>، 1996)، شوری (EC) در عصاره اشباع خاک (اسمیت و دوران<sup>8</sup>، 1996)، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) به روش استات آمونیوم (روود<sup>9</sup>، 1982)، درصد اشباع بازی خاک (BS) (اکرت و مک‌لین<sup>10</sup>، 1981) و درصد کربنات کلسیم معادل (CCE) به روش کلسیمتری (آیسون و مودی<sup>11</sup>، 1965) انجام گردید.

شکل‌های مختلف فسفر خاک شامل فسفر کل خاک (TP) (سامرز و نلسون، 1997)، فسفر آلی (OP) و معدنی (MP) خاک (کو<sup>12</sup>، 1996)، فسفر قابل دسترس گیاه (Pav) به روش اولسن<sup>13</sup> (1954)، فسفر قابل استخراج با اگزالات آمونیوم (Pox) (گو و یوست<sup>14</sup>، 1999) و شکل‌های مختلف فسفر معدنی شامل فسفر معدنی لبایل و نسبتاً لبایل به روش ژانگ و کوار (2000) و عصاره‌گیری متوالی شکل‌های معدنی فسفر شامل دی-کلسیم فسفات ( $Ca_2-P$ )، اکتاکلسیم فسفات ( $Ca_8-P$ ).

همکاران (2006) در مطالعه خاک‌های مناطق خشک مقادیر بالای فسفات کلسیم را گزارش کرده و دلیل آن را رسوب کربنات کلسیم ثانویه و فرآیند خاکسازي کربناتی-شدن دانستند. کراس و اسکلینگر<sup>1</sup> (2001) بیشترین سهم فسفات‌های کلسیم را در خاک‌های مناطق نیمه‌خشک گزارش کردند و توزیع مواد آلی و فرآیند هوموسی شدن در خاک را مهم‌ترین عامل مؤثر بر فسفات‌های آهن و آلومینیوم دانستند. وانن<sup>2</sup> و همکاران (2008) فرآیند پدزولی شدن و اتصال فسفر به اکسیدهای آهن، آلومینیوم و ترکیبات آلی و در پی آن تجمع فسفر در افق‌های اسپودییک را فرآیند اصلی توزیع فسفر در خاک‌های اسپودوسول تلقی کردند. ژاویر و همکاران (2011) در مطالعه اکوسیستم‌های کشاورزی در برزیل بیان کردند فسفر لبایل و نسبتاً لبایل رابطه معنی‌دار و مثبتی با فسفر قابل دسترس گیاه در خاک‌های سطحی دارند و تحت تأثیر خصوصیات خاک قرار می‌گیرند. گومز<sup>3</sup> و همکاران (2016) در مطالعه خاک‌های جنگلی مناطق حاره دلیل مقادیر کم فسفر لبایل و نسبتاً لبایل را به مقادیر بالای فسفر در اتصال با آهن و آلومینیوم با درجه تبلور بالا در طی فرآیند تبادل لیگاندی به ویژه در خاک‌های اکسی‌سول نسبت دادند.

بررسی شرایط خاک‌های جنگلی به دلیل توسعه و حفاظت از جنگل در جهان برای اهداف مختلف همچون جلوگیری از فرسایش، ذخیره درازمدت کربن و جلوگیری از پیامدهای تغییرات اقلیمی و از طرف دیگر نیاز روزافزون به چوب و مشتقات آن مورد توجه است (فارلی<sup>4</sup> و کلی، 2004). می‌توان گفت تا به حال مطالعات اختصاصی بر شکل‌های فسفر در خاک‌های جنگلی در ایران انجام نشده است و همچنین مطالعات بسیار اندکی بر روی تغییرات عمقی فسفر خاک در رابطه با شرایط پیدایش و خصوصیات افق‌های مختلف خاک در ایران و حتی در جهان انجام شده است. بنابراین مطالعه فسفر در نیمرخ خاک با در نظر گرفتن خصوصیات پیدایشی دیدگاه جدیدی در این بحث ارائه می‌دهد. با توجه به این مطلب هدف از این پژوهش بررسی شکل‌های مختلف فسفر معدنی در نیمرخ خاک و افق‌های حاصل از فرآیندهای خاکسازي و ارتباط آن با خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و پدورژنیکی خاک در نیمرخ خاک‌های جنگلی بود.

5. Walky &amp; black

6. Gee &amp; Bauder

7. Thomas

8. Smith &amp; Doran

9. Rhoades

10. Eckert &amp; McLean

11. Allison &amp; Moodie

12. Kuo

13. olsen

14. Guo &amp; Yost

1. Cross &amp; Schlesinger

2. Vanaan

3. Gomez

4. Farley

سطحی داشت و در محدوده 5 تا 35 میلی گرم بر کیلوگرم تغییر می کرد. فسفر قابل استخراج با اگزالات آمونیوم در گستره 90-35 میلی گرم بر کیلوگرم تغییرات داشت کرده و با افزایش عمق روند افزایشی را نشان داد (جدول 2).

میزان اکتاکلسیم فسفات در گستره 68 تا 410 میلی گرم بر کیلوگرم تغییرات داشت، این محدوده برای آپاتیت بین اعداد 70 تا 293 میلی گرم بر کیلوگرم بود. دی کلسیم فسفات در نمونه های مطالعه شده بسیار ناچیز بوده و قابل قرائت نبود. میزان فسفات آهن و آلومینیوم به ترتیب در محدوده 75 تا 107 و 125 تا 147 میلی گرم بر کیلوگرم تغییرات داشت. فسفر محبوس بین اعداد 4 تا 11 میلی گرم بر کیلوگرم متغیر بود (شکل 2).

بررسی اجزای مختلف فسفر معدنی تغییرات متفاوت آنها در نیمرخ خاک را نشان داد. به طور کلی در افق های A بیشترین میزان متعلق به فسفر آپاتیت بود و بعد از آن فسفات آلومینیوم و اکتاکلسیم فسفات در مقادیر تقریباً یکسان و سپس فسفات آهن و در نهایت فسفر محبوس قرار داشت (شکل 2). در نیمرخ های دارای افق AB افزایش در مقادیر اکتاکلسیم فسفات مشاهده شد که این افزایش بیشتر از فسفات آلومینیوم بود و باعث شد اکتاکلسیم فسفات بیشترین شکل فسفر باشد و بعد از آن به رغم اینکه آپاتیت کاهش یافت، اکتاکلسیم فسفات قرار گرفت و بعد از آن فسفات آلومینیوم، فسفات آهن و فسفر محبوس قرار داشتند. روند افزایشی اکتاکلسیم فسفات در افق های Bt ادامه داشت و در این افقها بیشترین میزان را دارا بود. آپاتیت در افق های تحتانی کاهش یافت و فسفات آهن، آلومینیوم و فسفر محبوس به افزایش خود ادامه دادند (شکل 2).

فسفات آلومینیوم (Al-P)، فسفات آهن (Fe-P)، فسفر محبوس (Oc-P) و آپاتیت (Ca<sub>10</sub>-P) به روش جیانگ و گو<sup>1</sup> (1989) انجام گردید. فسفر در همه عصاره های استخراج شده به روش اسپکتروفتومتری (مورفی و رایلی<sup>2</sup>، 1962) تعیین گردید. آنالیز همبستگی توسط نرم افزار SPSS.18 و ترسیم نمودارها توسط نرم افزار Excel انجام گردید.

## نتایج

کلیه خاک های مطالعه شده در رده آلفی سولها و زیر رده Xerals طبقه بندی شدند (جدول 1). این نیمرخ ها دارای افق های A، AB و Bt هستند و دارای اپی- بدون اکریک در سطح خاک و افق مشخصه غنی از رس آرچلیک در عمق های تحتانی می باشند (جدول 1، شکل 1). افق های مطالعه شده دارای pH قلیایی 7/91-7/45 بود و درصد اشباع بازی آنها بین 92-75 درصد بود. کمترین میزان درصد رس در افق های A نیمرخ ها و بیشترین میزان آن در افق های Bt تحتانی مشاهده شد.

کربن آلی روند کاهشی در طول نیمرخ خاک را دارا بود و میزان آن در محدوده 0/39-3/5 درصد متغیر بود که بیشترین میزان آن در افق A نیمرخ 1 و کمترین میزان آن در افق Bt نیمرخ 2 مشاهده شد. درصد کربنات کلسیم معادل حدوداً در همه افقها در یک گستره قرار داشت و در حدود 0/4 تا 0/6 درصد بود (جدول 1).

میزان فسفر کل در برخی نیمرخ های مطالعه شده در سطح خاک و در برخی از آنها در افق های پایین تر میزان بیشتری داشت و در محدوده 623-881 میلی گرم در کیلوگرم قرار داشت. فسفر معدنی خاک در گستره 865-572 میلی گرم در کیلوگرم تغییرات داشت و روند آن از فسفر کل تبعیت می کرد. فسفر آلی خاک بیشترین میزان را در سطح خاک دارا بود و با افزایش عمق کاهش نشان داد و تغییرات آن بین اعداد 0-120 میلی گرم در کیلوگرم قرار داشت (شکل 1).

فسفر معدنی لبایل خاک روند تقریباً ثابتی را در نیمرخ خاک داشت و در برخی موارد در افق های میانی و تحتانی افزایش داشت، کمترین میزان آن (12 میلی گرم بر کیلوگرم) در افق Bt2 نیمرخ 6 و بیشترین میزان آن (37 میلی گرم بر کیلوگرم) در افق Bt نیمرخ 1 بود. فسفر نسبتاً لبایل در محدوده 210 تا 360 میلی گرم بر کیلوگرم تغییرات داشت و در اکثر موارد با افزایش عمق، افزایش نشان داد. فسفر قابل دسترس بیشترین میزان را در افق های

<sup>1</sup> Jiang & Guo

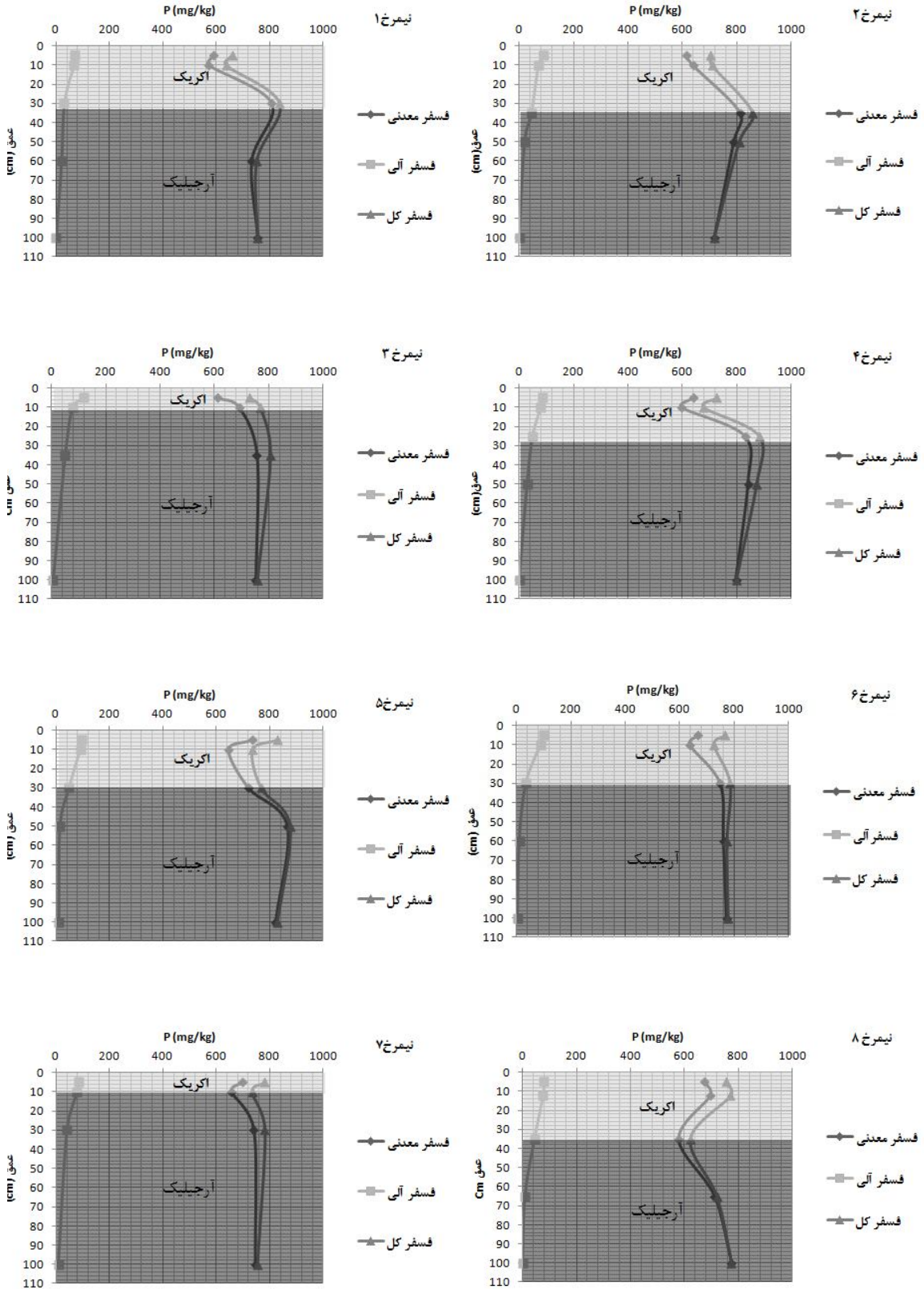
<sup>2</sup> Murphy & Riley

جدول 1- برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی نیمرخ‌های مطالعه شده

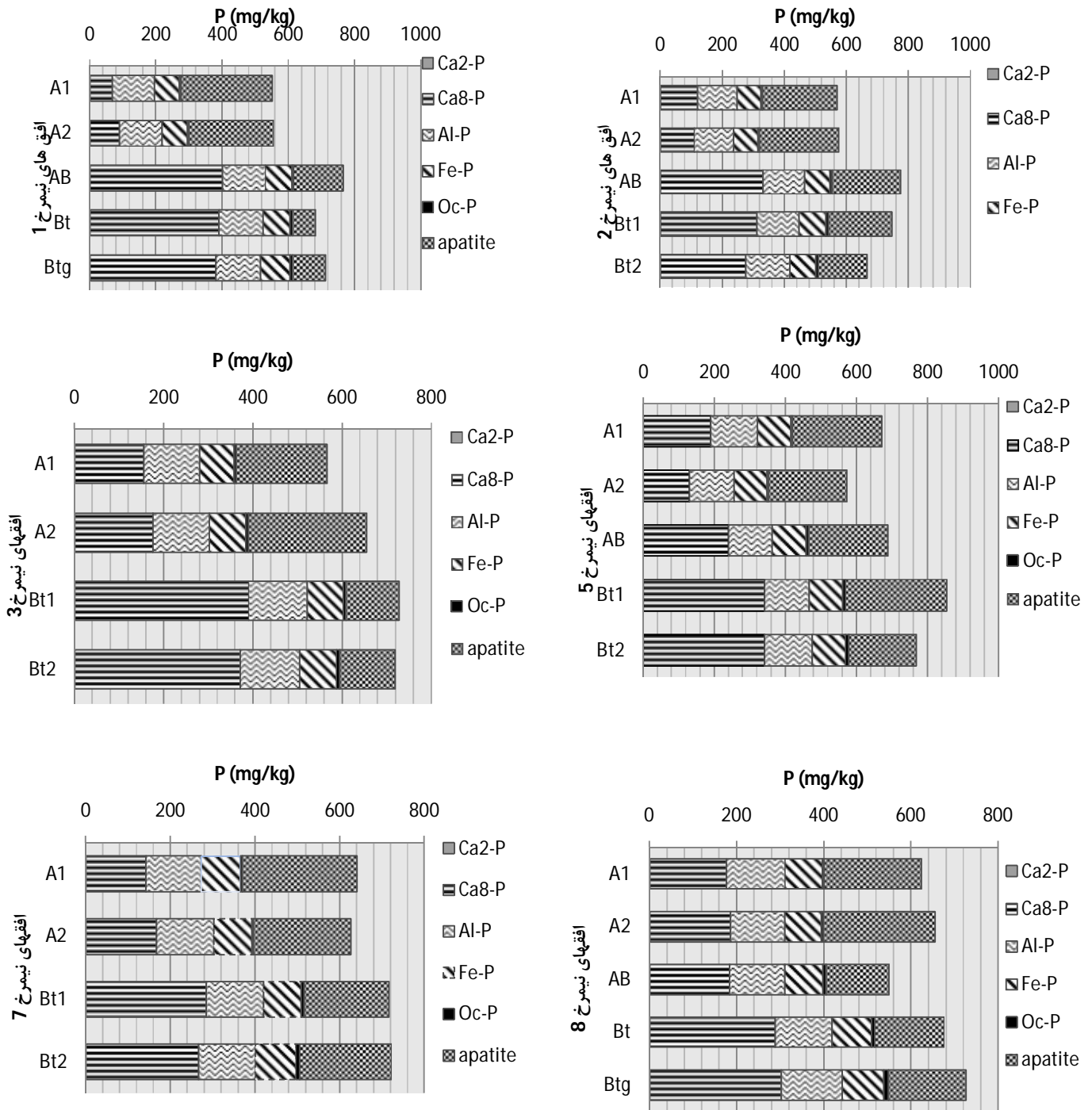
افق	pH	CCE%	BS%	OC%	CEC (Cmol+/kg)	رس %	سیلت %	شن %	
رده بندی نیمرخ‌ها: Very fine, mixed, mesic, Typic Haploxeralfs									
نیمرخ 1	A1	7/8	0/5	81/5	3/5	34	55	33	12
	A2	7/79	0/6	85/6	3	32/5	58	31	11
	AB	7/87	0/5	76/27	2/1	30	60	27	13
	Bt	7/9	0/4	94	0/6	30/5	71	23	6
	Btg	7/8	0/5	84/5	0/48	32	73	20	7
نیمرخ 2	A1	7/77	0/45	87/9	3/2	32	56	25	19
	A2	7/89	0/5	94	2/8	30	55	26	19
	AB	7/9	0/65	84/3	1/2	33	59	25	16
	Bt1	7/78	0/5	80	0/68	34	67	20	13
	Bt2	7/8	0/5	90/15	0/39	32	72	22	6
نیمرخ 3	A1	7/8	0/5	94	3/2	31	55	33	12
	A2	7/78	0/5	85/5	3	32	58	31	11
	Bt1	7/94	0/45	96	1/8	30	68	27	5
	Bt2	7/91	0/5	81/72	0/75	33	71	23	6
	A1	7/69	0/6	88/7	3/2	32	57	34	9
نیمرخ 4	A2	7/8	0/5	87/42	2/8	33	55	34	11
	AB	7/87	0/6	83/9	1/56	31	59	29	12
	Bt	7/7	0/5	80/59	0/77	32	69	22	9
	Btg	7/88	0/6	83/44	0/46	35	74	20	6
	A1	7/55	0/5	88/21	2/58	32	54	26	20
نیمرخ 5	A2	7/54	0/5	86/96	2/3	31	55	29	16
	AB	7/6	0/5	92/58	0/9	29	58	30	12
	Bt1	7/8	0/5	81	0/7	33	67	22	11
	Bt2	7/88	0/5	91	0/4	32	70	20	10
	A1	7/5	0/5	77	2/9	34	53	24	23
نیمرخ 6	A2	7/57	0/45	82/8	2/2	31	54	26	20
	AB	7/74	0/5	87	1	32	58	26	16
	Bt1	7/76	0/4	86	0/7	33	71	21	8
	Bt2	7/78	0/5	86/62	0/5	32	70	22	8
	A1	7/45	0/6	79/57	3	33	58	27	15
نیمرخ 7	A2	7/5	0/45	78	2/8	32	58	31	11
	Bt1	7/8	0/6	91/83	0/8	31	72	22	6
	Bt2	7/8	0/5	92	0/6	30	74	20	6
	A1	7/5	0/4	82/48	3/1	31	55	25	20
	A2	7/55	0/5	82/61	2/5	31	57	24	19
نیمرخ 8	AB	7/65	0/6	84/17	1	34	60	25	15
	Bt	7/77	0/5	85/87	0/6	32	70	23	7
	Btg	7/82	0/5	90	0/45	30	72	20	8

جدول 2- مقادیر شکل های مختلف فسفر با درجات مختلف فراهمی (میلی گرم بر کیلوگرم)

افق	فسفر قابل دسترس (Pav)	فسفر لبایل معدنی (LPi)	فسفر نسبتاً لبایل معدنی (MLPi)	فسفر اگزالات (Pox)	
نیمرخ 1	A1	20	22	290	50
	A2	18	19	314	45
	AB	12	25	330	60
	Bt	9	37	328	71
	Btg	5	33	360	65
نیمرخ 2	A1	25	23	210	42
	A2	30	21	240	40
	AB	15	22	266	52
	Bt1	8	20	257	60
	Bt2	6	19	270	67
نیمرخ 3	A1	26	25	286	56
	A2	26	21	299	50
	Bt1	15	33	312	75
	Bt2	10	22	300	80
	A1	35	25	267	44
نیمرخ 4	A2	27	23	274	35
	AB	23	30	286	50
	Bt	16	32	290	66
	Btg	10	32	284	74
	A1	29	20	276	52
نیمرخ 5	A2	30	20	265	42
	AB	20	26	284	50
	Bt1	14	28	312	60
	Bt2	8	26	304	71
	A1	33	28	258	60
نیمرخ 6	A2	28	27	254	62
	AB	15	25	288	60
	Bt1	10	22	301	80
	Bt2	12	12	312	80
	A1	30	22	222	59
نیمرخ 7	A2	32	27	241	67
	Bt1	24	26	256	80
	Bt2	17	19	270	90
	A1	32	20	294	63
	A2	28	25	275	55
نیمرخ 8	AB	16	21	264	84
	Bt	10	33	260	80
	Btg	8	25	267	78



شکل 1- توزیع مقادیر فسفر کل، معدنی و آلی در نیمرخ‌های خاک



شکل 2- توزیع شکل های مختلف فسفر معدنی در برخی نیمرخ های خاک (طول کل نمودار نشان دهنده مجموع اجزای معدنی در هر افق)



جدول 3- همبستگی اجزای فسفر و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک

S	Si	Cl	BS	CCE	CEC	OC	PH	MLPi	LPI	TP	MP	OP	apatite	Oc-P	Fe-P	Al-P	Ca8-P	Pox	Pav	
																			1	Pav
																		1	-0/56**	Pox
																	1	0/56**	-0/75**	Ca8-P
																1	0/57**	0/55**	-0/55**	Al-P
															1	0/42*	0/41*	0/53**	ns	Fe-P
														1	0/45*	0/49*	0/55**	0/57**	-0/65**	Oc-P
													1	-0/4*	ns	-0/41*	-0/7**	-0/55**	0/67**	apatite
												1	0/57**	-0/77**	-0/47*	-0/61**	0/77**	-0/66**	0/94**	OP
											1	-0/7**	ns	0/57**	0/46*	0/57**	0/87**	0/4*	-0/56**	MP
										1	0/91**	ns	ns	ns	0/4*	0/41*	0/67**	ns	ns	TP
									1	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	0/55**	ns	ns	LPI
								1	ns	ns	-0/4*	-0/43*	ns	ns	ns	ns	0/49*	ns	-0/54**	MLPi
							1	0/41*	ns	ns	ns	-0/55**	-0/55**	0/44*	ns	ns	0/55**	ns	-0/6**	PH
						1	-0/4*	-0/4*	ns	-0/4*	-0/69**	0/91**	0/58**	-0/81**	-0/57**	-0/57**	-0/79**	-0/7**	0/83**	OC
				1	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	CEC
				1	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	CCE
			1	ns	-0/52**	ns	0/4*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	BS
		1	ns	ns	ns	-0/8**	0/52**	0/41*	ns	ns	0/6**	-0/93**	-0/6**	0/78**	0/55**	0/67**	0/76**	0/75**	-0/81**	Cl
	1	-0/7*	ns	ns	ns	0/7**	ns	ns	ns	-0/4*	-0/62**	0/71**	0/4*	-0/67**	-0/54**	ns	-0/6**	-0/68**	0/62**	Si
1	ns	-0/8*	ns	ns	ns	0/6**	-0/59**	-0/54**	ns	ns	-0/4*	0/72**	0/56**	-0/55**	ns	-0/48*	-0/54**	-0/56**	0/65**	S

\*, \*\* به ترتیب، غیر معنی دار و معنی داری در سطح 0/05 و 0/01.

Pav: فسفر قابل دسترس، Pox: فسفر اگزالات آمونیوم، Ca8-P: اکتاکلسیم فسفات، Al-P: فسفات آلومینیوم، Fe-P: فسفات آهن، Oc-P: فسفر محبوس، apatite: آپاتیت، OP: فسفر آلی، MP: فسفر معدنی، TP: فسفر کل، LPI: فسفر

معدنی لبایل، MLPi: فسفر معدنی نسبتا لبایل، OC: کربن آلی، CCE: کربنات کلسیم معادل، CEC: ظرفیت تبادل کاتیونی، BS: درصد اشباع بازی، Cl: درصد رس، Si: درصد سیلت، S: درصد شن

## بحث

سمت افق آرجیلیک از فرآیندهای اصلی توزیع این ترکیبات در نیمرخ خاک‌های مطالعه شده است. میرابلا و کارسینلی<sup>5</sup> (1993) بیان کردند ترکیبات آهن و آلومینیوم می‌توانند در اتصال با ذرات رس قرار گرفته و در طی فرآیند مهاجرت همزمان (Co-migration) در خاک انتقال یابند. همچنین مورگان<sup>6</sup> (1997) بیان کرد فسفر می‌تواند در طی فرآیند تبادل آنیونی و لیگاندی بر روی لبه‌های شکسته (broken edges) رس‌های سیلیکاتی قرار گرفته و بدین ترتیب از توزیع این ترکیبات تبعیت کند. همبستگی اکتا کلسیم فسفات با رس ( $P < 0/01$ ,  $r = 0/76$ ) می‌تواند به دلیل توزیع آن از مواد مادری به سمت بالای نیمرخ خاک باشد اما این فرم از کانی‌های ثانویه فسفر تلقی می‌شود که یا از هوادیدگی آپاتیت و یا از تبلور کانی‌های با تبلور کمتر حاصل می‌گردد (اکسمن و شواندنمن<sup>7</sup>، 2015). این امر اثرپذیری توزیع آن از فرآیندهای خاکسازی در نیمرخ خاک را محتمل می‌کند. برخی از تحقیقات نشان می‌دهند کلسیم و ترکیبات آن می‌توانند به عنوان پلی بین فسفر، ذرات رس و اکسیدهای آهن و آلومینیوم قرار گرفته و انتقالی شبیه به رس و اکسیدهای آهن و آلومینیوم داشته باشند (استیونسون<sup>8</sup>، 1986؛ شاهین<sup>9</sup> شاهین و همکاران، 2007).

با افزایش کربن آلی خاک فسفر آلی نیز افزایش می‌یابد ( $P < 0/01$ ,  $r = 0/91$ ) این نتیجه مطابق با نتایج چپونی<sup>10</sup> و همکاران (2001) و جی‌بورک<sup>11</sup> و همکاران (2000) است، هرچند که افزایش در کربن آلی خاک الزاماً و در همه موارد باعث افزایش در میزان فسفر آلی نخواهد شد (ماکاروف<sup>12</sup> و همکاران، 1997). همچنین رابطه منفی و معنی‌دار بین رس و کربن آلی ( $P < 0/01$ ,  $r = 0/81$ ) نشان دهنده عدم تبعیت توزیع ماده آلی از فرآیندهای خاکسازی منجر به شستشوی رس و اثرپذیری معنی‌دار آن از فرآیند اضافه شدن بقایای گیاهی به سطح خاک (Littering) می‌باشد. با این وجود ارتباط کربن آلی موجود در عمق-های تحتانی با ذرات رس محتمل است. محققان مختلفی اظهار داشته‌اند که اجزای آلی خاک می‌توانند به صورت-های مختلف همچون تشکیل کمپلکس رس-ماده آلی، با

فسفر قابل استخراج با اگزالات آمونیوم (Pox) همبستگی مثبت و معنی‌داری با فسفات آهن ( $r = 0/53$ ،  $P < 0/01$ )، فسفات آلومینیوم ( $r = 0/55$ ،  $P < 0/01$ )، اکتا کلسیم فسفات ( $r = 0/56$ ،  $P < 0/01$ ) و فسفر محبوس در کانی‌های خاک ( $r = 0/57$ ،  $P < 0/01$ ) داراست و از طرف دیگر همبستگی مثبت و معنی‌داری را با درصد رس خاک نشان می‌دهد (جدول 3). فسفر قابل استخراج با اگزالات آمونیوم (Pox) بیانگر فسفر در اتصال با فرم‌های بی‌شکل و کمتر تبلور یافته می‌باشد (شاهین<sup>1</sup> و همکاران، 2007). با توجه به pH بالای خاک به نظر می‌رسد شرایط برای تبلور اکسیدهای آهن و آلومینیوم در ترکیب با فسفر فراهم نباشد زیرا شکل‌های با درجه تبلور زیاد فسفات آهن و آلومینیوم مانند استرنجایت و وریسایت در خاک‌هایی با pH کمتر از 6 یافت می‌شوند (بلکویل<sup>2</sup> و همکاران، 2009). بنابراین می‌توان گفت در نیمرخ‌های مطالعه شده بخش زیادی از فسفر موجود در فسفات‌های آهن و آلومینیوم به وسیله اگزالات قابل استخراج است.

این امر جذب فسفر به وسیله ساختارهای با تبلور کم در اثر فرآیندهایی همچون هم رسوبی (Co-precipitation) و تبادل آنیونی و لیگاندی (anion and ligand exchange) را محتمل می‌کند (کورنل و شوئرتمن<sup>3</sup>، 2003). میزان پایین شکل‌های محبوس (Oc-P) در اکسی‌هیدروکسیدهای آهن و آلومینیوم در خاک‌های مطالعه شده که دارای فسفر در ساختار خود هستند نیز موید این مطلب می‌باشد (شکل 2). همچنین فسفر قابل استخراج با اگزالات رابطه منفی و معنی‌داری ( $r = -0/7$ ،  $P < 0/01$ ) را با کربن آلی دارا بود (جدول 3). فرم‌های بی-شکل کانی‌های خاک در حضور ماده آلی افزایش می‌یابند اما از طرف دیگر اشغال سایت‌های جذبی این مواد توسط اجزای مختلف مواد آلی می‌تواند منجر به کاهش جذب عناصر و به طور اخص فسفر توسط این ساختارها شود (کورنل و شوئرتمن، 2003؛ جانسون و لوپرت<sup>4</sup>، 2006). با توجه به همبستگی موجود بین رس و شکل‌های آلومینیوم و آهن و فرم قابل استخراج با اگزالات (جدول 3)، به طور کلی می‌توان گفت اتصال فسفات‌های آلومینیوم و آهن با ذرات رس و انتقال (Lessivage)، شستشو و رسوب مجدد آنها (Illuviation-Eluviation) در نیمرخ خاک به

5. Mirabella & Carcinelli

6. Morgan

7. Oxmann & Schwendenmann

8. Stevenson

9. Shaheen

10. Chepkwony

11. Gburek & Sharpley

12. Makarov

1. Shaheen

2. Blackwell

3. Cornell & Shwertmann

4. Johnson & Loepfert

اختر<sup>10</sup> و همکاران، 2005). به نظر می‌رسد با توجه به اثر بالای فسفر آلی بر فسفر قابل دسترس، فسفر آلی در فرم‌های با درجات فراهمی مختلف اثرگذاری بیشتری بر شکل‌های قابل جذب در این خاک‌ها را دارا هستند، این اثرات توسط محققان مختلفی گزارش شده است (لینکوئیست<sup>11</sup> و همکاران، 1997؛ ردل<sup>12</sup> و همکاران، 2007).

روند کاهشی فسفر قابل دسترس و آپاتیت با افزایش عمق منجر به همبستگی این دو شکل فسفر شده است. به نظر می‌رسد تخلیه شکل‌های دیگر فسفر خاک در افق‌های سطحی باعث ازیاد آتیت می‌شود، همچنین آپاتیت همبستگی مثبت و معنی‌داری را با درصد شن ( $P < 0/01$ ,  $r = 0/56$ ) و سیلت ( $P < 0/05$ ,  $r = 0/4$ ) داراست. آپاتیت در هر دو صورت پدوژنیک و لیتوژنیک در ابعاد حدودی شن و سیلت ظاهر می‌شود (اکسمن و شواندنمن<sup>13</sup>، 2015) و شستشوی رس به اعماق زیرین و تغلیظ آن در این اعماق می‌تواند روند کاهشی آپاتیت را توجیه کند. با این وجود گیاهان و میکروارگانیسم‌ها قابلیت استفاده از شکل‌های مقاوم فسفر را نیز دارا هستند. آلوارز<sup>14</sup> و همکاران (2007) همبستگی فسفر قابل دسترس و شکل‌های مقاوم به هوادیدگی همچون آپاتیت را گزارش کرده و دلیل آن را تخلیه شکل‌های دیگر فسفر از خاک توسط موجودات زنده (Removal) دانستند. رددی<sup>15</sup> و همکاران (2000) با مطالعه اراضی شالیزار دریافتند زمانی که منابع تغذیه‌ای فسفر منحصر به فسفر بومی خاک است گیاه می‌تواند از شکل‌های مختلف فسفر از جمله اجزای مقاوم‌تر برای تامین فسفر استفاده کند.

### نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان داد شکل‌های مختلف فسفر خاک به شدت تحت تأثیر فرآیندهای خاکسازگی در نیمرخ خاک قرار می‌گیرند. براساس نتایج این پژوهش از مهم‌ترین فرآیندهای مؤثر در توزیع و فراهمی فسفر در خاک‌های آلفی‌سول تحت پوشش جنگل می‌توان به انتقال مکانیکی ذرات ریز خاک (Lessivage) و انحلال، شستشو و رسوب مجدد ترکیبات فسفره (Eluviation-Illuviation) به عمق‌های زیرین اشاره کرد. این فرآیند به شدت توزیع فسفات‌های آلومینیوم و آهن را تحت تأثیر

ذرات رس ارتباط برقرار کرده و تحت تأثیر تغییرات مکانی رس قرار گیرند (ماهيو<sup>1</sup> و همکاران، 2002).

فسفر قابل دسترس همبستگی معنی‌دار و مثبتی را با فسفر آلی ( $P < 0/01$ ,  $r = 0/94$ ) و کربن آلی ( $P < 0/01$ ,  $r = 0/83$ ) داراست این نتیجه هم‌راستا با نتایج کولاول و تیان<sup>2</sup> (2007) و اوپارزون<sup>3</sup> و همکاران (2007) (2007) می‌باشد. مولن<sup>4</sup> (2005) بیان کرد فسفر آلی خاک خاک در طی فرآیند هوموسی شدن (Humification) در درجات مختلف تجزیه‌ای قرار گرفته و حتی در مقادیر کم اثر زیادی بر فرم قابل دسترس فسفر در خاک دارد. از طرف دیگر pH خاک رابطه منفی و معنی‌داری با فسفر قابل دسترس دارد. صمدی<sup>5</sup> (2006) بیان کرد افزایش pH خاک در خاک‌های قلیایی منجر به کاهش قابلیت فراهمی فسفر می‌شود. همچنین رابطه منفی و معنی‌دار pH و کربن آلی ( $P < 0/01$ ,  $r = -0/4$ ) می‌تواند موید اثر غیر مستقیم ماده آلی و فرآیند هوموسی شدن بر حلالیت فسفر خاک در پی آزادسازی دی اکسید کربن، پروتون و اسیدهای آلی در محلول خاک باشد (چن<sup>6</sup> و همکاران، 2002).

فسفر لبایل ( $P < 0/01$ ,  $r = 0/55$ ) و نسبتاً لبایل معدنی ( $P < 0/05$ ,  $r = 0/49$ ) تنها با اکتاکلسیم فسفات رابطه مثبت و معنی‌داری داشت و این شکل‌ها رابطه معنی‌دار و مثبتی را با فسفر قابل دسترس نداشتند (جدول 3). این نتیجه برخلاف یافته‌های ابرسون<sup>7</sup> و همکاران (2001) در خاک‌های اکسی‌سول و کاساژ<sup>8</sup> و همکاران (2000) در خاک‌های اینسپتی‌سول و اسپودوسول می‌باشد که رابطه مثبت فسفر لبایل را با فسفر قابل دسترس نشان دادند هر چند که برخی یافته‌های این محققان در شرایطی است که فسفر غیربومی به خاک اضافه می‌شود. این امر را می‌توان به تخلیه فسفر در عمق‌های سطحی توسط گیاه و همچنین انتقال و توزیع اکتاکلسیم فسفات در ارتباط دانست. هر چند که محققان مختلفی بر این عقیده بوده‌اند که فسفر لبایل و نسبتاً لبایل با منابع مختلف فسفر در ارتباط هستند که هر کدام از آنها مقادیر اندک تا زیادی را به این شکل-های فسفر وارد می‌کنند (ساودرا و دلگادو<sup>9</sup>، 2005؛ اختر<sup>10</sup>

1. Mahieu
2. Kolawole & Tian
3. Oyarzun,
4. Mullen
5. Samadi
6. Chen
7. Oberson
8. Cassagne
9. Saavedra & Delgado

<sup>10</sup>. akhtar

<sup>11</sup>. Linquist

<sup>12</sup>. Redel

<sup>13</sup>. Oxmann & Schwendenmann,

<sup>14</sup>. Alvarez

<sup>15</sup>. Reddy

های مقاوم فسفر را محتمل می‌کند. در این میان ترکیبات آلی به‌رغم میزان کمتر نسبت به فسفر معدنی به طور معنی‌داری بر فسفر قابل دسترس تأثیرگذار بودند، که نشان‌دهنده اثر کلیدی منابع آلی بر فراهمی فسفر در این خاک‌ها می‌باشد. این نتایج می‌تواند مورد توجه محققانی که بر روی توزیع فسفر خاک به صورت سطحی و عمقی کار می‌کنند قرار گیرد و یادآور شود که بررسی عمق‌های مختلف خاک بدون توجه به شرایط پیدایشی نتایج مطلوب و قابل اتکایی را در پی نخواهد داشت.

قرار می‌دهد، علاوه بر این می‌توان به فرآیندهای اضافه شدن بقایای آلی به خاک (Littering) و هوموسی شدن (Humification) که در میزان فراهمی و توزیع فسفر آلی مؤثر است، خارج شدن فسفر توسط ریشه گیاهان و میکروارگانسیم‌ها (Removal) اشاره نمود. همچنین نتایج نشان داد شکل قابل دسترس فسفر برای گیاه به شدت تحت تأثیر فرآیندهای خاکساز است. در بین شکل‌های معدنی تنها آپاتیت با فسفر قابل دسترس همبستگی داشت که این امر استفاده گیاهان و موجودات خاکزی از شکل-

### فهرست منابع:

1. Akhtar, M., D.L. McCallister, D.D. Francis and J.S. Schepers. 2005. Manure source effect on soil phosphorus fractions and their distribution. *Soil Sci.* 170: 183–190.
2. Allison, L.E., and C.D. Moodie. 1965. Carbonates. PP. 1379-1396. *In: Black C A (Eds). Method of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods.* ASA: Madison, WI.
3. Alvarez-Rogel, J., F.J. Jimenez-Carceles., and C. Egea-Nicolas. 2007. Phosphorus retention in a coastal salt marsh in SE Spain. *Sci. Total Environ.* 378: 71–74.
4. Beauchemin, S., D. Hesterberg, J. Chou., M. Beauchemin, R.R. Simard, and D.E. Sayers. 2003. Speciation of phosphorus in phosphorus-enriched agricultural soils using X-ray absorption near-edge structure spectroscopy and chemical fractionation. *J. Environ. Qual.* 32: 1809–1819.
5. Beck, M.A., and P.A. Sanchez. 1994. Soil phosphorus fraction dynamics during 18 years of cultivation on a Typic Paleudult. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 1424–1431.
6. Blackwell, M.S.A., P.C. Brookes, N. de la Fuente-Martinez, P.J. Murray, K.E. Snars, J.K. Williams, and P.M. Haygarth. 2009. Effects of soil drying and rate of re-wetting on concentrations and forms of phosphorus in leachate. *Biol. Fertil. Soils.* 45: 635–643.
7. Bowman, R.A., and C.V. Cole. 1978. An exploratory method for fractionation of organic phosphorus from grassland soils. *Soil Sci.* 125: 95-101.
8. Carreira, J.A., B. Vinegla and K. Lajtha. 2006. Secondary  $\text{CaCO}_3$  and precipitation of PCA compounds control the retention of soil P in and ecosystems. *J. Arid Environ.* 64: 460-473.
9. Cassagne, N., M. Remaury, T. Gauquelin and A. Fabre. 2000. Forms and profile distribution of soil phosphorus in alpine Inceptisols and Spodosols (Pyrenees). *Geoderma.* 95: 161–172.
10. Chang, S.C., and M.L. Jackson. 1957. Fractionation of soil phosphorus. *Soil Sci.* 84: 133-144.
11. Chen, C.R., L.M. Condon, M.R. Davis, and R.R. Sherlock. 2002. Phosphorus dynamics in the rhizosphere of perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) and radiate pine (*Pinus radiata* D. Don.). *Soil Biol. Biochem.* 34: 487–499.
12. Chepkwony, C.K., R.J. Haynes, R.S. Swift, and R. Harrison. 2001. Mineralization of soil organic P induced by drying and rewetting as a source of plant-available P in limed and unlimed samples of an acid soil. *Plant Soil.* 234: 83–90.
13. Cornell, R.M., and U. Shwertmann. 2003. The iron oxides: Structure, properties, reactions, occurrence and uses. 2nd ed. VCH, Weinheim, Germany.
14. Cross, A.F., and W.H. Schlesinger. 2001. Biological and geochemical controls on phosphorus fractions in semiarid soils. *Biogeochem.* 52: 155-172.
15. Delgado, A., and Torrent, J. 2000. Phosphorus forms and desorption patterns in heavily fertilized calcareous and limed acid soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 2031–2037.

16. Dobermann, A., T. George, and N. Thevs. 2002. Phosphorus fertilizer effects on soil phosphorus pools in acid upland soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 652–660.
17. Eckert D.J., and E.O. McLean. 1981. Basic cation saturation ratios as a basis for fertilizing and liming agronomic crops: I. Growth chamber studies. *Agron. J.* 73: 795–799
18. Gburek, W.J., A.N. Sharpley, L. Heathwaite, and G.J. Folmar. 2000. Phosphorus management at the watershed scale: a modification of the phosphorus index. *J. Environ. Qual.* 29: 130–144.
19. Gee, G.W., and J.W. Bauder. 2002. Particle size analysis. PP. 201-214. *In: H D Jacob and G Clarke Topp. (Eds). Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods. SSSA. Madison, WI.*
20. Gomes Costa, M., A. Gama-Rodrigues, J. Moraes, E. Gama-Rodrigues, M.S. and da Silva Aleixo. 2016. Labile and non-labile fractions of phosphorus and its transformations in soil under eucalyptus plantations, Brazil. *Forests.* 6: 1-15.
21. Guo, F., and R.S. Yost. 1999. Quantifying the available soil phosphorus pool with acid ammonium oxalate method. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 651–656.
22. Farley, K.A., and E.F. Kelly. 2004. Effects of afforestation of paramo grassland on soil nutrient status. *For. Ecol. Manage.* 195: 281–290.
23. Ivanoff, D.B., K.R. Reddy and S. Robinson. 1998. Chemical fractionation of organic phosphorus in selected histosols. *Soil Sci.* 163: 36-45.
24. Javid, S., and D.L. Rowell. 2002. A laboratory study of the effect of time and temperature on the decline in Olsen P following phosphate addition to calcareous soils. *So. Use. Mana.* 18: 127–134.
25. Jiang, B. and Y. Gu. 1989. A suggested fractionation scheme of inorganic phosphorus in calcareous soils. *Fertil Res.* 20: 159-165.
26. Johnson, S.E., and R.H. Loeppert. 2006. Role of organic acids in phosphate mobilization from iron oxides. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70: 222–228.
27. Kolawole, G.O., and G. Tian. 2007. Phosphorus fractionation and crop performance on an alfisols amended with phosphorus rock combined with and without plant residues. *Afr. J. Biotech.* 16: 1972-1978.
28. Ku, S. 1996. Total organic phosphorus. PP: 869-919. *In: D. L. Sparks. (Ed.), Methods of Soil Analysis. Part 3.*
29. Lee, C.H., C.Y. Park, K.D. Park, W.T. Jeon, and P.J. Kim. 2004. Long-term effects of fertilization on the forms and availability of soil phosphorus in rice paddy. *Chemosphere.* 56: 299–304.
30. Linnquist, B.A., P.W. Singleton, and K.G. Cassman. 1997. Inorganic and organic phosphorus dynamics during a build-up and decline of available phosphorus in an Ultisols. *Soil Sci.* 162: 254–264.
31. Litaor, M.L., O. Reichmann, K. Auerswald, A. Haim, and M. Shenker. 2004. The geochemistry of phosphorus in peat soils of a semiarid altered wetland. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 2078–2085.
32. Mahieu, N., D.C. Olk, E.W. Randall. 2002. Multinuclear magnetic resonance analysis of two humic acid fractions from lowland rice soils. *J. Environ. Qual.* 31: 421–430.
33. Makarov, M.I., T.I. Malysheva, L. Haumaier, H.G. Alt and W. Zech. 1997. The forms of phosphorus in humic and fulvic acids of a toposequence of alpine soils in the northern Caucasus. *Geoderma.* 80: 61– 73.
34. Meissner, R., P. Leinweber, H. Rupp, M. Shenker, M.I. Litaor, S. Robinson, A. Schlichting, and J. Koehn. 2008. Mitigation of diffuse phosphorus pollution during rewetting of fen peat soils: a Trans-European case study. *Water, Air, and Soil Pollution.* 188: 111–126.

35. Mirabella, A., and S. Carcinelli. 1993. Iron oxide mineralogy in red and brown soils developed on calcareous rock in central Italy. *Geoderma*. 55: 95-109.
36. Morgan, M.A. 1997. The behavior of soil and fertilizer phosphorus. In: Tunney, H., Carton, O.T., Brookes, P.C., Johnston, A.E. (Eds.), *Phosphorus loss from soil to water*. Cab International, Wallingford, Oxon OX108DE, UK, pp. 137–150.
37. Mullen, M.D. 2005. Phosphorus in soils - biological interactions. pp. 210–216. In: Hillel, D. (Ed.), *Encyclopedia of Soils in the Environment*. Academic Press.
38. Murphy, I.C.R., and J.P. Riley. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Acta*. 27: 131-143.
39. NRCS, USDA. 2002. Field book for describing and sampling soils, version 2.0, Lincoln.
40. Oberson, A., D.K. Friesen, I.M. Rao, S. Buhler, and E. Frossard. 2001. Phosphorus transformations in an Oxisols under contrasting land-use systems: the role of the soil microbial biomass. *Plant Soil*. 237: 197–210.
41. Olsen, S.R., C.V. Cole, F.S. Watanabe, and L.A. Dean. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. *USDA Circ. 939*. US Gov. Print. Office, Washington, DC.
42. Oxmann, J.F and L. Schwendenmann, 2015. Authigenic apatite and octacalcium phosphate formation due to adsorption–precipitation switching across estuarine salinity gradients. *Biogeosciences*. 12: 723-738.
43. Oyarzun, C., C. Aracena, P. Rutherford, R. Godoy, and A. Deschrijver. 2007. Effects of land use conversion from native forests to exotic plantations on nitrogen and phosphorus retention in catchments of southern Chile. *Water., Air .Soil Pollut.* 179: 341–350.
44. Porder, S., P.M. Vitousek, O.A. Chadwick, C.P. Chamberlain, and G.E. Hilley. 2007. Uplift, erosion, and phosphorus limitation in terrestrial ecosystems, *Ecosystems*. 10: 158–170.
45. Reddy, D.D., A.S. Rao, and T.R. Rupa. 2000. Effects of continuous use of cattle manure and fertilizer phosphorus on crop yields and soil organic in a Vertisol. *Bioresource Technol.* 75: 113-118.
46. Redel, Y.D., R. Rubio, J.L. Rouanet, and F. Borie. 2007. Phosphorus bioavailability affected by tillage and crop rotation on a Chilean volcanic derived Ultisol. *Geoderma*. 139: 388–396.
47. Rhoades, J.D. 1982. Cation exchange capacity. In: A.L. Page (ed.) *Methods of soil analysis. Part 2: Chemical and microbiological properties*. *Agronomy*. 9: 149-157.
48. Saavedra, C., and A. Delgado. 2005. Phosphorus fractions and release patterns in typical Mediterranean soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69: 607–615.
49. Saleque, M.A., M.J. Adedin, Z.U. Ahmed, M.A. Hasan and M. Panaullah. 2001. Influences of phosphorus deficiency on the uptake of nitrogen, potassium, calcium, magnesium, sulfur, and zinc in lowland rice varieties. *J. Plant Nutr.* 24: 1621-1632.
50. Samadi, A. 2006. Contribution of inorganic phosphorus fractions to plant nutrition in alkaline-calcareous soils. *J. Agri. Sci. Technol.* 8: 77–89.
51. Shaheen, M., C.D. Tsadilas, and S. Stamatiadis. 2007. Inorganic phosphorus forms in some entisols and aridisols of Egypt. *Geoderma*. 142: 217-225.
52. Sharpley, A.N., and S.J. Smith. 1985. Fractionation of inorganic and organic phosphorus in virgin and cultivated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49: 127-130.
53. Simonson, R.W. 1959. Modern concepts of soil genesis. Outline of a generalized theory of soil genesis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 152–156.
54. Smith, J.L. and J.W. Doran. 1996. Measurement and use of pH and electrical conductivity for soil quality analysis. P. 169-185. In J.W. Doran and A.J. Jones (ed.) *Methods for assessing soil quality*. Soil Science Society of America Spec. Publ. 49. SSSA, Madison, WI.

55. Soil Survey Staff. 2014. Keys to Soil Taxonomy. 12th ed. USDA. SCS. Agric. U.S. Gov. Print office. Washington. D.C.
56. Solomon, D., J. Lehmann, T. Mamo, F. Fritzsche, W. Zech. 2002. Phosphorus forms and dynamics as influenced by land use changes in the sub-humid Ethiopian highlands. *Geoderma*. 105: 21–4.
57. Sommers, L.E., and D.W. Nelson. 1997. Determination of total phosphorus in soils: A rapid perchloric acid digestion procedure. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 36: 902 – 904.
58. Stevenson, F.J. 1986. Cycles of soils. John Wiley and Sons, New York.
59. Thomas, G.W. 1996. Soil pH and soil acidity. PP. 475-49. *In*: Sparks D L. (Ed). Methods of Soil Analysis, Part 3, Chemical Methods. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA.
60. Turrión, M.B., O. López, F. Lafuente, R. Mulas, C. Rui Pérez, and A. Puyo. 2007. Soil phosphorus forms as quality indicators of soils under different vegetation covers. *Sci Total Environ.* 378: 195–198.
61. Vanaan, R., J. Hristov, N. Tanskanen, H. Haatikainen, M. Neiminen, and H. Ilvesneimi. 2008. Phosphorus sorption properties in podzolic forest soils and soil solution phosphorus concentration in undisturbed and disturbed soil profile. *Boreal Env. Re.* 13: 553-567.
62. Wang, X., J.M. Jackman, R.S. Yost, and B.A. Linquist. 2000. Predicting soil phosphorus buffer coefficients using potential sorption site density and soil aggregation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 240–246.
63. Walkley, A., and I.A. Black. 1934. An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37: 29-37.
64. Xavier, F.A.S., E.F. Almeida, I.M. Cardoso, and E.S. Mendonca. 2011. Soil phosphorus distribution in sequentially extracted fractions in tropical coffee-agro ecosystems in the Atlantic Forest biome, Southeastern Brazil. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 89: 31–44.
65. Yang, W., H. Cheng, F. Hao, W. Ouyang, S. Liu, and C. Lin. 2012. The influence of land-use change on the forms of phosphorus in soil profiles from the Sanjiang Plain of China. *Geoderma*. 190: 207-214.
66. Zhang, H. and J.L. Kovar. 2000. Phosphorus fractionation. In *Methods of Phosphorus Analysis for Soil, Sediments, Residues and Waters*; Pierzynski, G.E. (ed.); Southern Cooperative Series Bulletin No. 396, NCSU: Raleigh,

## Distribution of Phosphorus forms in the Kelardasht Forest Soils

M. J. Mohebbi and A. Heidari<sup>1</sup>

Ph.D. Student, Soil Science Department, University of Tehran; E-mail: mjmohebbi@ut.ac.ir

Professor, Soil Science Department, University of Tehran; E-mail: aheidari@ut.ac.ir

Received: May, 2016 & Accepted: February, 2017

### Abstract

Phosphorus is an essential element for plant that appears in different chemical and biochemical forms in soil, therefore, it is susceptible to effects by pedogenic processes. In order to investigate effect of pedogenic processes on P forms and their distribution, 8 soil profiles were studied in forest land of Kelardasht. Available P (Pav), total P (TP), organic P (OP), mineral P (MP) and 8 mineral P forms were determined in the genetic horizons and the correlation of these forms with each other and also the physicochemical soil parameters were investigated. The results showed that pedogenic process significantly affected distribution of different P forms. Fe-P and Al-P showed significant positive correlation with Pox, which could indicate simultaneous extraction of poorly crystalline Fe-Al oxide (by dissolution) or adsorbed/absorbed P by Al-Fe oxides (anion and ligand exchange). These poorly crystalline forms, octa-calcium phosphate (Ca<sub>8</sub>-P) and occluded P (Oc-P) correlate positively and significantly with clay content that enhance possibility of these components linkage with clay particles during different chemical reaction and co-migration of P and clay by lessivage and eluviation-illuviation process. Labile mineral P (LPi) and moderately labile mineral P (MLPi) did not show significant correlation with Pav, whereas apatite significantly and positively correlated with Pav. Removal of P from surface horizons can explain this result. Nevertheless, the highest correlation was between Pav, OP, and organic carbon (OC). According to this result, littering and humification may be considered as the most important processes that can influence P availability.

**Keywords:** Mineral phosphorus, Pedogenic process, Genetic horizons

---

<sup>1</sup> Corresponding author: Soil Science Department, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.