تغییرات فسفر قابل‌جذب و شکل‌های فسفر معدنی بومی پس از غرقاب در خاک‌های شالیزاری شمال ایران

نصرت‌اله نجفی[۱*] و حسن توفیقی[۲]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱/۱۶ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۷/۲۵)

چکیده

رفتار فسفر در خاک‌های غرقاب تفاوت قابل ملاحظه‌ای با خاک‌های غیرغرقاب دارد. تغییرات فسفر قابل جذب و شکل‌های فسفر معدنی پس از غرقاب در خاک‌های شالیزاری شمال ایران در یک تحقیق آزمایشگاهی بررسی گردید. آزمایش به صورت فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی شامل نوع خاک در ۱۴ سطح (چهار خاک اسیدی یا غیرآهکی و ۱۰ خاک آهکی) و مدت غرقاب شدن خاک در سه سطح (صفر، ۳۰ و ۹۰ روز) و با دو تکرار انجام شد. در پایان دوره غرقاب، شکل‌های فسفر معدنی در خاک‌های آهکی به روش جیانگ و گو و در خاک‌های اسیدی به روش کیو و فسفر قابل جذب به روش اولسن اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که فسفر قابل جذب تمام خاک‌های مورد مطالعه ۹۰ روز پس از غرقاب نسبت به خاک هواخشک به‌طور معنی‌داری افزایش یافت (به‌طور میانگین ۲/۳ برابر). به‌طورکلی، مقادیر تمامی شکل‌های فسفر معدنی پس از غرقاب شدن خاک به طور معنی‌داری تغییر یافتند و میزان تغییر بسته به شکل فسفر، نوع خاک و مدت غرقاب متفاوت بود. این نتایج نشان‌دهنده رفتار شیمیایی پیچیده فسفر در خاک‌ها بود. مقدار فسفات آلومینیوم در ۱۲ خاک از ۱۴ خاک مورد مطالعه ۹۰ روز پس از غرقاب نسبت به خاک هواخشک به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. در ۹ خاک از ۱۰ خاک آهکی، مقدار فسفات آهن ۹۰ روز پس از غرقاب نسبت به خاک هواخشک کاهش یافت در حالی که اثر غرقاب بر فسفات آهن در خاک‌های غیرآهکی و اسیدی معنی‌دار نبود. فسفر به سهولت محلول در چهار خاک غیرآهکی و اسیدی، ۳۰ و ۹۰ روز پس از غرقاب افزایش یافت. نتایج حاکی از تبدیل شکل‌های معدنی فسفر به یکدیگر و احتمالاً فسفر آلی به فسفر معدنی در طول دوره غرقاب شدن خاک بود.

واژه‌های کلیدی: خاک‌های شالیزاری، شکل‌های فسفر، غرقاب، فسفر قابل جذب

۱. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

۲. گروه علوم خاک، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران

* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: n-najafi@tabrizu.ac.ir

مقدمه

برنج از مهم‌ترین غلات در دنیا بوده و از لحاظ میزان تولید و مصرف پس از گندم مقام دوم را دارد (۳۳). در ایران نیز برنج از محصولات مهم زراعی است که عمدتاً در استان‌های گیلان، مازندران، گلستان و در شرایط غرقاب کشت می‌شود. از طرف دیگر، کمبود فسفر در گیاهان دومین مشکل عمده حاصلخیزی خاک در سراسر دنیا می‌باشد (۱۴). رفتار فسفر در خاک‌های غرقاب تفاوت قابل‌ملاحظه‌ای با خاک‌های غیرغرقاب دارد. این تفاوت در رفتار فسفر، بیشترین اهمیت را در تغذیه گیاه برنج دارد. برخی بررسی‌ها نشان داده است که پاسخ برنج غرقاب به مصرف کود فسفر کمتر از گیاهان غیرغرقاب کشت شده در همان خاک می‌باشد (۵، ۲۷ و۳۱). ویلت و هیگینز گزارش دادند که با وجود خیلی‌کم بودن فسفر قابل‌جذب خاک‌های مورد مطالعه در حالت هواخشک، برنج به مصرف کود فسفر پاسخ نداد (۳٦). ساح و مایکلسن بیان داشتند که تغییر شکل فسفر پس از زهکشی خاک‌های غرقاب، با بروز کمبود شدید فسفر در گیاهان پس از برنج همراه است (۳۱). شاهنده و همکاران گزارش دادند که پاسخ برنج غرقاب به مصرف کود فسفر ضعیف است. به‌نظر می‌رسد یکی از دلایل مربوط به این پدیده به اثر غرقاب کردن خاک مربوط باشد. غرقاب کردن خاک شرایطی را فراهم می‌کند که از نظر ویژگی‌های شیمیایی، زیستی و فیزیکی به‌طور قابل‌ملاحظه با خاک غیرغرقاب تفاوت دارد (۳۲).

ماهاپاترا و پاتریک گزارش دادند که یکی از مهمترین تغییرات ناشی از غرقاب در خاک که در تغذیه برنج غرقاب نقش مهمی دارد، افزایش قابلیت جذب فسفر می‌باشد (۱۷). افزایش فسفر قابل‌جذب پس از غرقاب شدن خاک به‌وسیله سایر محققان نیز گزارش شده است (۸ و ۱۸). رایت و همکاران مشاهده کردند که فسفر قابل‌جذب پس از غرقاب شدن خاک افزایش یافت ولی فسفات‌های آهن و آلومینیوم اندازه‌گیری شده با روش عصاره‌گیری متوالی تغییر معنی‌داری نکردند (۳۷). ماهاپاترا و پاتریک گزارش دادند که بر اثر غرقاب شدن خاک، شکل‌های غیرقابل‌جذب فسفر به شکل‌های قابل‌جذب تبدیل می‌شوند. نتایج آنان نشان داد که اثر غرقاب بر شکل‌های فسفر بسته به نوع خاک متفاوت است. آنان مشاهده کردند که فسفات‌های آهن (Fe-P) بر اثر غرقاب در یک خاک کاهش و در ۱۵ خاک افزایش یافت. بخشی از افزایش این شکل بر اثر غرقاب به تبدیل فسفر محلول در احیاء کننده به Fe-P نسبت داده شد (۱۷). مندال مشاهده کرد که بر اثر غرقاب، مقدار Fe-P کاهش یافت ولی فسفات‌های آلومینیوم (Al-P) و فسفات‌های کلسیم (Ca_{10}-P) تغییری نکردند (۱۹). دوآ و جوشی گزارش دادند که پس از غرقاب نمودن ۱۵ نمونه خاک شالیزاری، Fe-P و Al-P کاهش و Ca_{10}-P به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش و سپس کاهش یافتند (۷).

تولید پایدار محصولات کشاورزی نیازمند سطح کافی فسفر خاک در شکل‌های قابل‌جذب است. شکل‌های فسفر در خاک مقدار فسفر قابل‌جذب برای گیاهان و امکان آزاد شدن این عنصر به محلول خاک و آب‌های سطحی را تعیین می‌کنند (٦). بررسی منابع نشان داد که در داخل کشور تاکنون مطالعه‌ای در مورد اثر غرقاب بر شکل‌های فسفر معدنی انجام نشده است. با توجه به مطالب مذکور، این مطالعه برای بررسی تغییرات فسفر قابل‌جذب و شکل‌های فسفر معدنی پس از غرقاب در خاک‌های شالیزاری شمال ایران انجام شد.

مواد و روش‌ها

تعداد ۴۰ نمونهٔ مرکب خاک از عمق صفر تا ۲۰ سانتی‌متری خاک‌های شالیزاری استان‌های گیلان، مازندران و گلستان برداشت و به آزمایشگاه منتقل شد. پس از هواخشک شدن، خاک‌ها از الک دو میلی‌متری عبور داده شدند و برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها مثل pH (۲۱)، بافت (۹)، کربنات کلسیم معادل (۳۰) و کربن آلی (۲٦) اندازه‌گیری گردید. سپس بر اساس این ویژگی‌ها، تعداد ۱۴ نمونه (۱۰ نمونه خاک قلیایی آهکی و چهار نمونه خاک غیرآهکی یا اسیدی) از میان آنها برای انجام این بررسی انتخاب شد.

آزمایش به‌صورت فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی شامل نوع خاک در ۱۴ سطح و مدت غرقاب شدن خاک در سه سطح (صفر، یک و سه ماه) و با دو تکرار انجام شد. یک گرم از هر نمونه خاک در داخل لوله‌های پلی‌اتیلنی به قطر داخلی پنج میلی‌متر و ارتفاع ۱۸ سانتی‌متر ریخته و با افزودن آب مقطر غرقاب شد. سپس پنج سانتی‌متر آب در سطح خاک قرار داده و در شرایط آزمایشگاه نگهداری شد. هر دو روز یک بار از طریق توزین، آب لوله‌ها کنترل گردید. در زمان‌های صفر، یک و سه ماه پس از غرقاب، ابتدا به داخل لوله سانتریفیوژ ۱۰۰ میلی‌لیتری، عصاره‌گیر مورد نظر ریخته شد و سپس قسمت بیرونی لوله‌های پلاستیکی با آب مقطر شسته و با قیچی به قطعات کوچک‌تر بریده و به داخل لوله سانتریفیوژ ریخته شد. بلافاصله شکل‌های فسفر معدنی در خاک‌های آهکی به روش عصاره‌گیری متوالی جیانگ و گو (۱۲) (جدول ۱) و در خاک‌های غیرآهکی و اسیدی به روش کیو (۱٦) (جدول ۲) و فسفر قابل‌جذب به روش اولسن (۱٦) استخراج گردید. فسفر معدنی موجود در داخل عصاره‌ها به روش اسید آسکوربیک و با دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شد (۱٦ و۲۳). مقدار آب همراه خاک غرقاب از طریق توزین تعیین و بر اساس آن غلظت عصاره‌گیر اولسن و اولین عصاره‌گیر روش‌های جیانگ و گو (۱۲) و کیو (۱٦) تصحیح گردید و بدین ترتیب عصاره‌گیری فسفر از خاک در شرایط غرقاب انجام شد. تحلیل آماری داده‌ها مانند آزمون نرمال بودن توزیع داده‌ها، تجزیه واریانس و مقایسه میانگین‌ها (با آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد) با استفاده از نرم‌افزار MSTATC و رسم نمودارها با نرم‌افزار Excel انجام شد.

نتایج و بحث

ویژگی‌های خاک‌ها

در جدول ۳ برخی ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک‌های مورد مطالعه ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود خاک‌ها از نظر ویژگی‌های مختلف تنوع خوبی داشتند. بنابراین، بهتر می‌توان نتایج حاصل از این پژوهش را به خاک‌های مشابه تعمیم داد. در اکثر مطالعاتی که در این زمینه انجام شده است از تعداد محدودی خاک استفاده شده و اغلب این مطالعات در خاک‌های اسیدی بوده است در حالی‌که در مطالعه حاضر از تعداد زیادتری خاک (هم خاک‌های آهکی و هم خاک‌های غیرآهکی و اسیدی) استفاده شده است.

فسفر قابل‌جذب (Olsen-P) در خاک‌های قلیایی و اسیدی

مقایسه میانگین‌ها نشان داد که در تمام خاک‌های مورد مطالعه، مقدار فسفر قابل‌جذب سه ماه پس از غرقاب به‌طور معنی‌داری بیشتر از رطوبت هواخشک بود (شکل ۱). این افزایش به‌طور میانگین ۲۵/۳ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک بود که معادل مصرف حدود ۳۱۰ kg/ha سوپرفسفات تریپل بود. مقدار فسفر قابل‌جذب سه ماه پس از غرقاب به‌طور میانگین ۲/۳ برابر خاک هواخشک بود. این نتایج نشان می‌دهد که عصاره‌گیر اولسن در خاک هواخشک فسفر قابل‌جذب گیاه برنج در خاک‌های شالیزاری را کمتر از مقدار واقعی برآورد می‌کند. اخگر و توفیقی نیز مشاهده کردند که فسفر قابل‌جذب در خاک‌های شالیزاری گیلان و مازندران، پس از غرقاب به‌سرعت افزایش یافت و در کمتر از دو هفته به دو برابر مقدار اولیه رسید (۱). افزایش فسفر قابل‌جذب گیاه پس از غرقاب شدن خاک به‌وسیله سایر محققان نیز گزارش شده است (۲، ۳، ۸، ۱۸ و۳۷). به‌نظر پونمپروما، افزایش فسفر قابل‌جذب گیاه در خاک یکی از مزایای شرایط غرقاب نسبت به شرایط غیرغرقاب می‌باشد (۳۰). افزایش غلظت فسفر محلول و قابل‌جذب پس از غرقاب به افزایش حل‌پذیری Ca-P به‌دلیل کاهش pH ناشی از تجمع CO_2 در خاک‌های آهکی (۲۴)، افزایش حل‌پذیری فسفر بر اثر هیدرولیز Fe-P و Al-P به‌دلیل افزایش pH خاک‌های اسیدی پس از غرقاب، جانشین شدن آنیون‌های آلی به جای فسفات در Fe-P و Al-P از طریق تبادل آنیونی، افزایش سرعت پخشیدگی فسفر در شرایط غرقاب، آزاد شدن فسفر محبوس در اکسیدهای فریک هیدراته بر اثر احیای آهن و احیای فسفات فریک

جدول ۱. عصاره‌گیری متوالی فسفر معدنی در خاک‌های آهکی به روش جیانگ و گو (۱۲)

مرحله عصاره‌گیری	ترکیب عصاره‌گیر	نسبت حجم عصاره‌گیر (mL) به جرم خاک (g)	مدت تکان دادن (ساعت)	شکل استخراج شده
۱	0.25M $NaHCO_3$ با pH=7.5	۵۰:۱	۱	دی‌کلسیم‌فسفات (Ca_2-P)
۲	0.5M NH_4AC با pH=4.2	۵۰:۱	۱	اکتاکلسیم‌فسفات (Ca_8-P)
۳	0.5M NH_4F با pH=8.2	۵۰:۱	۱	فسفات آلومینیوم (Al-P)
۴	0.1N NaOH + 0.1N Na_2CO_3	۵۰:۱	۲+۲	فسفات آهن (Fe-P)
۵	$Na_3C_6H_5O_7.2H_2O$+ $Na_2S_2O_4.2H_2O$+$NaHCO_3$	–	–	فسفر محبوس در اکسیدهای آهن (CBD-P)
۶	0.25M H_2SO_4	۵۰:۱	۱	آپاتایت (Ca_{10}-P)

جدول ۲. عصاره‌گیری متوالی فسفر معدنی در خاک‌های غیرآهکی و اسیدی به روش کیو (۱۶)

مرحله عصاره‌گیری	ترکیب عصاره‌گیر	نسبت حجم عصاره‌گیر (mL) به جرم خاک (g)	مدت تکان دادن (ساعت)	شکل استخراج شده
۱	1M NH_4Cl	۵۰:۱	۰/۵	فسفر به‌سهولت محلول
۲	0.5M NH_4F با pH=8.2	۵۰:۱	۱	فسفات آلومینیوم (Al-P)
۳	0.1N NaOH	۵۰:۱	۱۷	فسفات آهن (Fe-P)
۴	$Na_3C_6H_5O_7.2H_2O$+ $Na_2S_2O_4.2H_2O$+$NaHCO_3$	–	–	فسفر محبوس در اکسیدهای آهن (CBD-P)
۵	0.25M H_2SO_4	۵۰:۱	۱	آپاتایت (Ca_{10}-P)

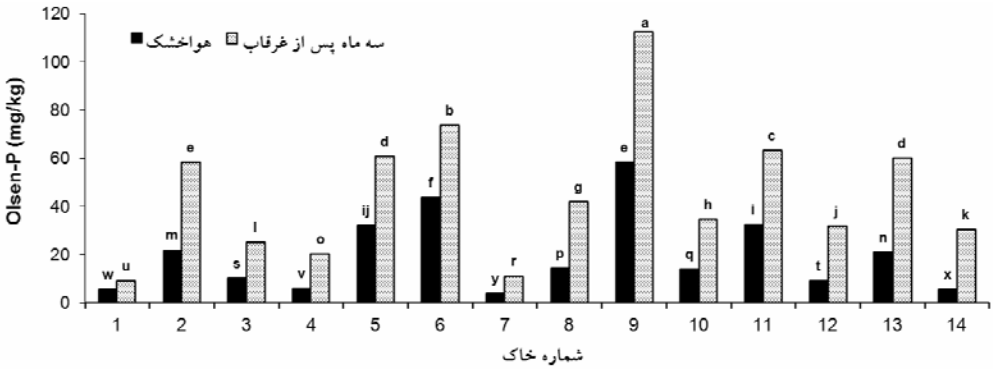
نامحلول به فسفات فرو محلول نسبت داده شده است (۱۵، ۲۷، ۲۸ و ۳۴). رایت و همکاران افزایش فسفر قابل‌جذب را به کاهش نیاز میکروبی به فسفر در شرایط غرقاب و آزاد شدن فسفر لبایل از بیوماس میکروبی نسبت دادند. بر اثر غرقاب جمعیت میکروبی کاهش یافته (کاهش نیاز میکروبی به فسفر) و بر اثر تجزیه ریزجانداران هوازی به‌وسیله ریزجانداران بی‌هوازی و بی‌هوازی اختیاری، فسفر آلی به فسفر معدنی تبدیل شده و فسفر قابل‌جذب افزایش می‌یابد (۳۷).

دی‌کلسیم فسفات (Ca_2-P) در خاک‌های آهکی

مقایسه میانگین‌ها نشان داد که اثر مدت غرقاب شدن خاک بر مقدار این شکل در خاک‌های آهکی مختلف یکسان نبود. در خاک‌های آهکی ۱، ۲، ۷ و ۱۰ مقدار این شکل در حالت هواخشک و یک ماه پس از غرقاب تفاوت معنی‌داری نداشت ولی سه ماه پس از غرقاب به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. در خاک‌های ۳ و ۹ مقدار این شکل یک ماه پس از غرقاب به‌طور معنی‌داری افزایش یافت ولی سه ماه پس از غرقاب با زمان صفر (حالت هواخشک) تفاوت معنی‌داری نداشت. اثر مدت غرقاب شدن خاک بر مقدار این شکل در خاک ۴ معنی‌دار نبود. در خاک ۵ یک ماه پس از غرقاب مقدار این شکل کمتر از حالت هواخشک بود ولی سه ماه پس از غرقاب به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. در خاک ۶ مقدار این شکل در سه ماه پس از غرقاب به‌طور معنی‌داری از حالت هواخشک کمتر بود ولی میان یک ماه پس از غرقاب و حالت هواخشک و یک ماه

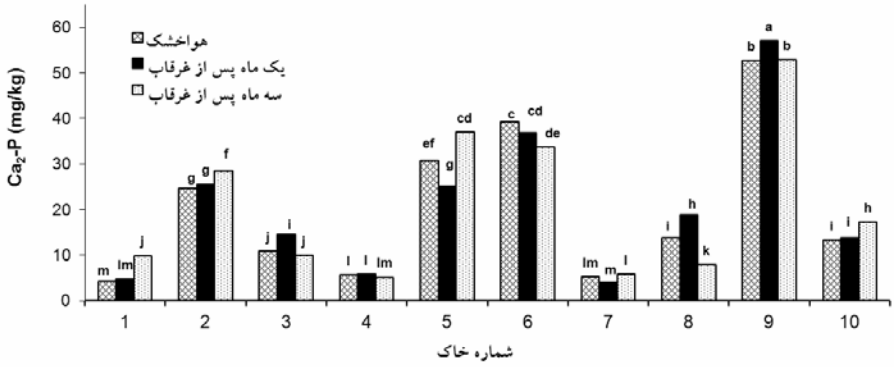
جدول ۳. برخی ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک‌های مورد مطالعه

شماره خاک	pH	فسفر قابل‌جذب (mg/kg)	کربنات‌کلسیم معادل	کربن آلی (g/kg)	رس	شن	گروه بافت
۱	۷/۴	۵/۷	۱۵۵	۶/۹	۱۵۲	۵۹۶	SL
۲	۷/۴	۲۱/۸	۱۴۱	۹/۹	۹۱	۷۰۷	SL
۳	۷/۵	۱۰/۰	۲۸۵	۲۷/۰	۴۰۷	۴۲۶	C
۴	۸/۰	۶/۰	۳۲	۱۶/۰	۱۹۶	۷۱۳	SL
۵	۷/۱	۳۲/۰	۳۴	۱۱/۸	۱۱۴	۶۹۶	SL
۶	۷/۲	۴۳/۶	۱۰۴	۱۴/۰	۳۷۹	۳۸۶	CL
۷	۷/۷	۳/۸	۴۲۴	۲۵/۳	۲۵۵	۴۶۰	L
۸	۷/۷	۱۴/۳	۶۱	۱۶/۹	۱۷۳	۵۸۴	SL
۹	۷/۵	۵۸/۶	۱۰۲	۲۶/۵	۲۳۵	۵۰۰	SCL
۱۰	۷/۱	۱۳/۹	۱۳۸	۲۰/۰	۱۵۸	۴۹۶	L
۱۱	۷/۲	۳۲/۴	غیرقابل‌اندازه‌گیری (ناچیز)	۱۱/۷	۵۳	۸۸۸	S
۱۲	۶/۶	۹/۲	غیرقابل‌اندازه‌گیری (ناچیز)	۱۶/۴	۲۲۱	۵۶۱	SCL
۱۳	۶/۱	۲۱/۰	غیرقابل‌اندازه‌گیری (ناچیز)	۲۴/۷	۱۷۵	۵۵۱	SL
۱۴	۵/۷	۵/۶	غیرقابل‌اندازه‌گیری (ناچیز)	۱۲/۹	۱۳۲	۶۸۳	SL



شکل ۱. فسفر قابل‌جذب خاک‌های آهکی (۱ تا ۱۰) و غیرآهکی و اسیدی (۱۱ تا ۱۴) در حالت هواخشک و سه ماه پس از غرقاب

و سه ماه پس از غرقاب تفاوت معنی‌داری وجود نداشت. در خاک شماره ۸ مقدار این شکل در یک ماه پس از غرقاب به‌طور معنی‌داری افزایش یافت ولی دوباره در سه ماه پس از غرقاب کاهش یافت (شکل ۲). افزایش Ca_2-P پس از غرقاب در برخی خاک‌ها را می‌توان به حل شدن $CaCO_3$ بر اثر کاهش pH (۲۴) و افزایش غلظت Ca^{2+} نسبت داد که با فسفات‌ها واکنش داده و Ca_2-P تشکیل می‌شود (۳۱). کاهش Ca_2-P در برخی خاک‌ها پس از غرقاب در بررسی دیگری نیز مشاهده شده است (۲) و



شکل ۲. اثر مدت غرقاب بر مقدار دی‌کلسیم فسفات (Ca_2-P) در خاک‌های آهکی

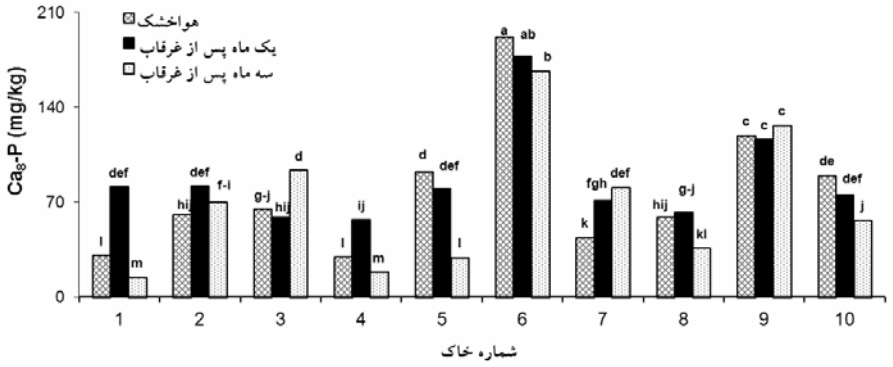
آن را می‌توان به ناپایداری این شکل فسفر در شرایط غرقاب و تبدیل آن به شکل‌های دیگر مربوط دانست. عدم تغییر معنی‌دار Ca_2-P پس از غرقاب در خاک ۴ شاید به بلوری بودن $CaCO_3$ و حل‌پذیری کم آن در شرایط غرقاب مربوط باشد. هم‌چنین ممکن است میزان Ca_2-P تشکیل یافته در این خاک‌ها با میزان Ca_2-P تبدیل شده به شکل‌های دیگر تقریباً برابر بوده است.

اکتاکلسیم فسفات (Ca_8-P) در خاک‌های قلیایی آهکی

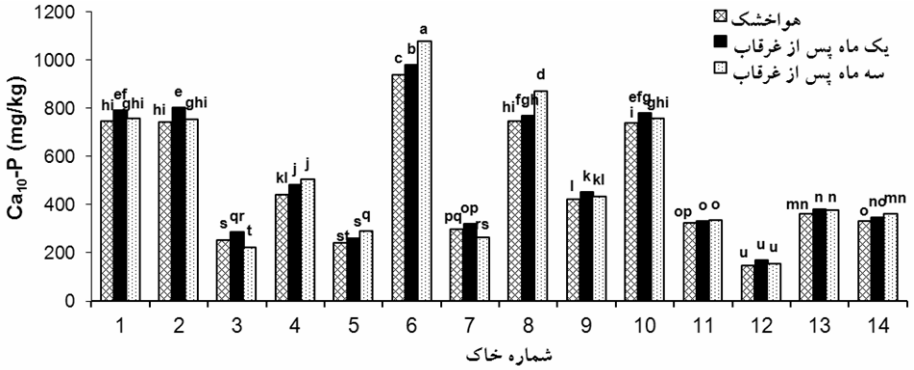
مقایسه میانگین‌ها نشان داد که اثر مدت غرقاب بر مقدار این شکل در خاک‌های مختلف، یکسان نبود. در خاک‌های ۱ و ۴ مقدار این شکل یک ماه پس از غرقاب به‌طور معنی‌داری افزایش و سپس در سه ماه پس از غرقاب کاهش یافت. در خاک‌های ۲ و ۷ مقدار این شکل یک ماه پس از غرقاب به‌طور معنی‌داری افزایش یافت و سپس تغییر معنی‌داری نکرد. در خاک ۳ مقدار این شکل یک ماه پس از غرقاب با حالت هوا خشک تفاوت معنی‌داری نداشت ولی در سه ماه پس از غرقاب به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. در خاک‌های ۵، ۶، ۸ و ۱۰ مقدار این شکل یک ماه پس از غرقاب با حالت هواخشک تفاوت معنی‌داری نداشت ولی در سه ماه پس از غرقاب به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. اثر مدت غرقاب شدن خاک بر مقدار این شکل در خاک ۹ معنی‌دار نبود (شکل ۳). عدم تغییر معنی‌دار Ca_8-P در خاک ۹ پس از غرقاب در بررسی دیگری نیز دیده شده است (۲) و نشان‌دهنده پایدار بودن آن در شرایط مذکور است. مورنو و همکاران نیز گزارش دادند که Ca_8-P خیلی پایدار است (۲۲). همچنین، ممکن است سرعت تشکیل Ca_8-P در شرایط مذکور با سرعت تبدیل آن به شکل‌های دیگر تقریباً برابر باشد؛ در نتیجه، غلظت Ca_8-P پس از غرقاب چندان تغییر نکند. به‌نظر می‌رسد دلایل ذکر شده در مورد تغییرات Ca_2-P در مورد Ca_8-P هم صادق باشد. یکسان نبودن اثر غرقاب بر مقدار Ca_8-P در این خاک‌ها بیانگر پیچیده بودن رفتار شیمیایی فسفر می‌باشد.

فسفر به شکل آپاتایت (Ca_{10}-P)

مقایسه میانگین‌ها نشان داد که اثر مدت غرقاب بر مقدار این شکل در خاک‌های مختلف یکسان نبود (شکل ۴). در خاک‌های آهکی ۱، ۲ و ۱۰ مقدار این شکل یک ماه پس از غرقاب به‌طور معنی‌داری بیشتر از حالت هواخشک بود ولی در سه ماه پس از غرقاب با حالت هواخشک تفاوت معنی‌داری نداشت. در خاک ۳ مقدار این شکل یک ماه پس از غرقاب نسبت به حالت هواخشک به‌طور معنی‌داری بیشتر بود ولی در سه ماه پس از غرقاب کاهش یافت به‌طوری که از حالت هواخشک نیز به‌طور معنی‌داری کمتر بود. در خاک آهکی ۴ و خاک اسیدی ۱۴ مقدار این شکل، یک و سه ماه پس از غرقاب نسبت به حالت هواخشک به‌طور معنی‌داری افزایش یافت ولی بین یک و سه ماه پس از غرقاب تفاوت معنی‌داری وجود نداشت. در خاک‌های آهکی ۵ و ۸ بین حالت هواخشک و یک ماه پس از



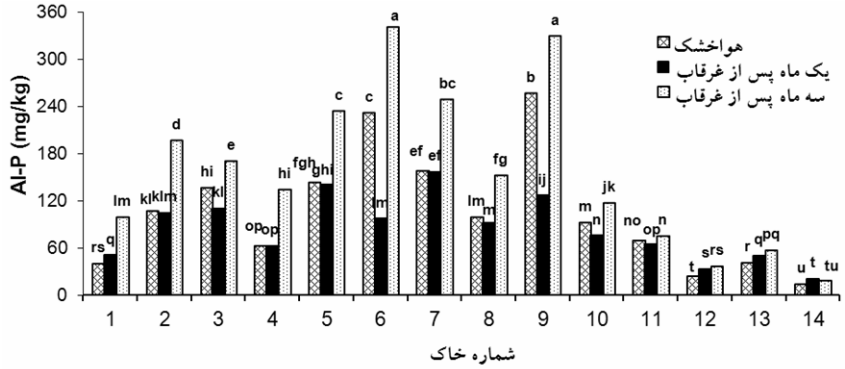
شکل ۳. اثر مدت غرقاب بر مقدار اکتاکلسیم فسفات (Ca_8-P) در خاک‌های آهکی



شکل ۴. اثر مدت غرقاب بر مقدار فسفر به شکل آپاتایت (Ca_{10}-P) در در خاک‌های آهکی (۱ تا ۱۰) و غیرآهکی و اسیدی (۱۱ تا ۱۴)

غرقاب تفاوت معنی‌داری وجود نداشت ولی سه ماه پس از غرقاب به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. در خاک آهکی ۶ مقدار این شکل یک و سه ماه پس از غرقاب به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. در خاک آهکی ۷ بین یک ماه پس از غرقاب و حالت هواخشک تفاوت معنی‌داری وجود نداشت ولی سه ماه پس از غرقاب به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. در خاک آهکی ۸ نیز بین یک ماه پس از غرقاب و حالت هواخشک تفاوت معنی‌داری وجود نداشت ولی سه ماه پس از غرقاب به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. در خاک‌های اسیدی ۱۱، ۱۲ و ۱۳ اثر غرقاب شدن خاک بر Ca_{10}-P معنی‌دار نبود (شکل ۴).

بنابراین، اثر غرقاب شدن خاک بر Ca_{10}-P بسته به نوع خاک و مدت غرقاب شدن آن متفاوت بود که نشان‌دهنده پیچیده بودن رفتار شیمیایی فسفر در خاک‌ها می‌باشد. افزایش Ca_{10}-P پس از غرقاب به‌وسیله سایر محققان نیز گزارش شده است (۷، ۸ و ۲۵). برخی محققان گزارش کردند که Ca_{10}-P پس از غرقاب شدن خاک تغییر نکرد (۱۷ و ۱۹). پاتریک و ماهاپاترا گزارش دادند که Ca_{10}-P یک ماه پس از غرقاب شدن یک خاک اسیدی نسبت به حالت هواخشک کاهش یافت (۲۷). گوپتا و سینگ گزارش دادند که Ca_{10}-P پس از غرقاب، در پنج خاک از ۹ خاک مورد مطالعه، کاهش و در سه خاک افزایش یافت ولی در یک خاک بدون تغییر ماند (۱۰). ساح و مایکلسن گزارش دادند که مقدار فسفات‌های کلسیم پس از غرقاب شدن در دو خاک افزایش و در دو خاک کاهش یافت. به عقیده آنان افزایش قابل ملاحظه فشار جزئی گاز دی‌اکسید کربن در خاک غرقاب، باعث کاهش pH خاک شده و حل‌پذیری کربنات کلسیم و فعالیت Ca^{2+} را افزایش می‌دهد. ممکن است یون‌های Ca^{2+} و فسفات باهم رسوب کرده و شکل فسفات کلسیم افزایش یابد (۳۱). مقایسه شکل‌های ۲، ۳ و ۴ نشان می‌دهد که

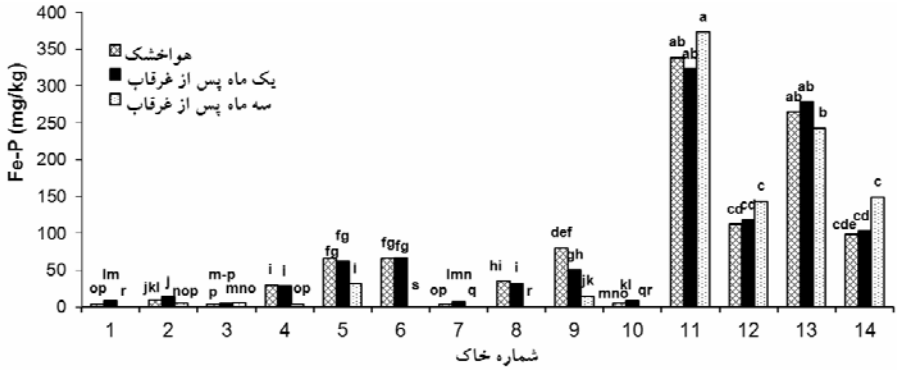


شکل ۵. اثر مدت غرقاب بر فسفات آلومینیوم (Al-P) در خاک‌های آهکی (۱ تا ۱۰) و غیرآهکی و اسیدی (۱۱ تا ۱۴)

با کاهش شکل‌های Ca_2-P و Ca_8-P شکل Ca_{10}-P افزایش می‌یابد که حاکی از تبدیل احتمالی این شکل‌ها به آپاتایت با گذشت زمان پس از غرقاب می‌باشد. افزایش غلظت فسفات و کلسیم محلول خاک در این شرایط سبب تبدیل Ca_2-P به Ca_8-P و آن‌هم به Ca_{10}-P می‌شود. دلیل دیگر برای افزایش در برخی خاک‌ها می‌تواند کاهش Fe-P در آنها و تبدیل این شکل به Ca_{10}-P باشد زیرا به‌نظر می‌رسد در شرایط غرقاب پایداری Ca_{10}-P بیشتر از Fe-P می‌باشد (شکل‌های ۴ و ٦).

فسفات آلومینیوم (Al-P) در خاک‌های قلیایی و اسیدی

مقایسه میانگین‌ها نشان داد که اثر مدت غرقاب بر مقدار این شکل در خاک‌های مختلف، یکسان نبود. در خاک آهکی ۱ مقدار این شکل یک و سه ماه پس از غرقاب به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. در خاک‌های ۲، ۴، ۵، ۷، ۸ و ۱۱ مقدار این شکل یک ماه پس از غرقاب با حالت هواخشک تفاوت معنی‌داری نداشت که با نتایج مندال مطابقت داشت (۱۸)، با این حال، سه ماه پس از غرقاب به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. در خاک‌های ۳، ۶، ۹ و ۱۰ مقدار این شکل یک ماه پس از غرقاب به‌طور معنی‌داری کاهش یافت (شکل ۵) که با نتایج سایر محققان مطابقت داشت (۷، ۸، ۲۷ و ۳۱). لیندزی بیان داشت که وقتی یک خاک غرقاب می‌شود، ویویانایت $Fe_3(PO_4)_2.8H_2O$، پایدارترین گونه کانی می‌شود و وریسایت (Al-P) به مقدار زیادی به ویویانایت تبدیل می‌شود (۱۳). در نتیجه، Al-P در بسیاری از خاک‌های غرقاب کاهش می‌یابد (۲۰). مقدار این شکل در خاک‌های مذکور سه ماه پس از غرقاب مجدداً به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. در خاک‌های غیرآهکی ۱۲، ۱۳ و ۱۴ مقدار این شکل یک و سه ماه پس از غرقاب نسبت به حالت هواخشک به‌طور معنی‌داری افزایش یافت ولی بین یک و سه ماه پس از غرقاب تفاوت معنی‌داری وجود نداشت. به‌طور کلی، سه ماه پس از غرقاب، مقدار Al-P در همه خاک‌های مورد مطالعه افزایش یافت و این افزایش از ۱۴ خاک مورد مطالعه در ۱۲ خاک از نظر آماری معنی‌دار بود (شکل ۵) که با نتایج سایر محققان مطابقت داشت (۱۷ و ۲۵). با مقایسه شکل‌های ۲، ۳، ۵ و ٦، این افزایش مقدار Al-P را می‌توان به کاهش Ca_2-P، Ca_8-P و Fe-P در برخی خاک‌های مورد مطالعه و تبدیل احتمالی آنها به این شکل نسبت داد. گوپتا و سینگ گزارش دادند که مقدار Al-P پس از غرقاب در برخی خاک‌های مورد مطالعه افزایش، در برخی کاهش و در برخی بدون تغییر باقی ماند (۱۰). مقایسه خاک‌های آهکی و اسیدی نشان می‌دهد که مقدار Al-P در برخی خاک‌های اسیدی کمتر از خاک‌های آهکی است. شاید علت آن افزایش حل‌پذیری ترکیبات آلومینیوم در شرایط اسیدی، بیشتر بودن میزان بارندگی و آبشویی در خاک‌های اسیدی باشد که سبب کاهش پایداری Al-P در این خاک‌ها و کاهش مقدار آن می‌گردد. هم‌چنین بررسی دیگر ما نشان داده است که در خاک‌های آهکی نسبت به خاک‌های اسیدی مقدار بیشتری از کود فسفر به شکل Al-P تبدیل



شکل ۶. اثر مدت غرقاب بر فسفات‌های آهن در خاک‌های آهکی (۱ تا ۱۰) و غیرآهکی و اسیدی (۱۱ تا ۱۴)

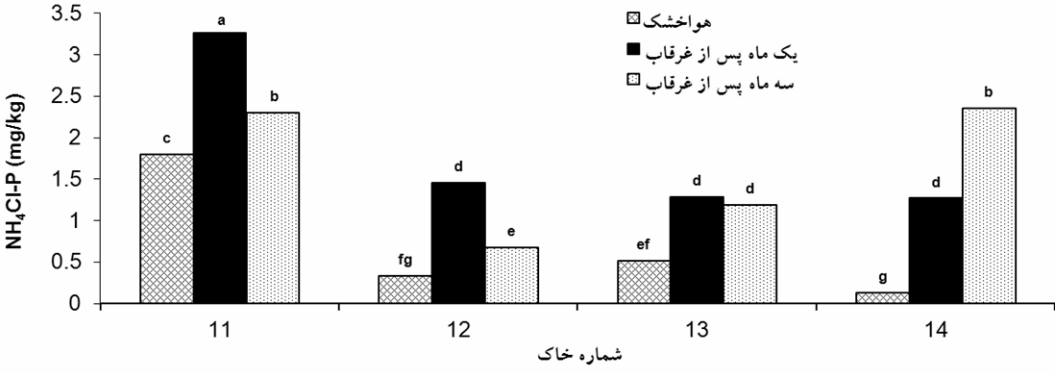
می‌گردد در حالی که در خاک‌های اسیدی نسبت به خاک‌های آهکی مقدار بیشتری از کود فسفر به شکل Fe-P تبدیل می‌شود (۲). با توجه به این‌که این خاک‌ها از شالیزارهای شمال ایران انتخاب شده است و سال‌های زیادی است که در آنها کود فسفر مصرف می‌شود، این پدیده نیز می‌تواند در زیادی مقدار Al-P در خاک‌های آهکی نقش داشته باشد.

فسفات آهن (Fe-P) در خاک‌های قلیایی و اسیدی

مقایسه میانگین‌ها نشان داد که اثر مدت غرقاب شدن خاک بر مقدار این شکل در خاک‌های مختلف، یکسان نبود. در خاک‌های آهکی ۱، ۷ و ۱۰ مقدار Fe-P یک ماه پس از غرقاب نسبت به حالت هوا خشک به‌طور معنی‌داری افزایش یافت ولی سه ماه پس از غرقاب دوباره به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. در خاک‌های آهکی ۲، ۴، ۵، ۶ و ۸ مقدار این شکل یک ماه پس از غرقاب با حالت هواخشک تفاوت معنی‌داری نداشت ولی سه ماه پس از غرقاب به‌طور معنی‌داری کاهش یافت (شکل ۶) که با نتایج سایر محققان مطابقت داشت (۷، ۸ و ۲۰). کاهش مقدار Fe-P را می‌توان به احیای Fe^{3+} به Fe^{2+} در شرایط غرقاب نسبت داد که باعث انحلال فسفات‌های Fe^{3+} می‌شود و غلظت آن‌ها کاهش می‌یابد. در خاک آهکی ۳ بین یک ماه پس از غرقاب و حالت هواخشک و یک ماه با سه ماه پس از غرقاب تفاوت معنی‌داری وجود نداشت ولی مقدار این شکل سه ماه پس از غرقاب از حالت هواخشک بیشتر بود (شکل ۶) که با نتایج سایر محققان مطابقت داشت (۱۱، ۲۵، ۲۷ و ۳۱). به‌طور کلی، در ۹ خاک از ۱۰ خاک آهکی، مقدار Fe-P سه ماه پس از غرقاب نسبت به شرایط غیرغرقاب کاهش یافت در حالی که در همه خاک‌های غیرآهکی یا اسیدی اثر مدت غرقاب شدن خاک بر مقدار این شکل معنی‌دار نبود (شکل ۶). برخی محققان نیز گزارش دادند که مقدار Fe-P پس از غرقاب در برخی خاک‌های مورد مطالعه کاهش و در برخی افزایش یافت (۱۰ و ۱۷).

فسفر به سهولت محلول (NH_4Cl-P) در خاک‌های اسیدی یا غیرآهکی

مقایسه میانگین‌ها نشان داد که اثر زمان‌های مختلف غرقاب بر مقدار این شکل در خاک‌های مختلف، یکسان نبود. در خاک‌های ۱۱ و ۱۲ مقدار این شکل در یک ماه پس از غرقاب به‌طور معنی‌داری افزایش یافت ولی در سه ماه پس از غرقاب دوباره کاهش یافت. مقدار فسفر به‌سهولت محلول در این خاک‌ها در سه ماه پس از غرقاب نیز به‌طور معنی‌داری از رطوبت هواخشک بیشتر بود. در خاک ۱۳ مقدار این شکل در یک و سه ماه پس از غرقاب به‌طور معنی‌داری از رطوبت هواخشک بیشتر بود ولی بین یک و سه ماه پس از غرقاب تفاوت معنی‌داری وجود نداشت. در خاک ۱۴ مقدار این شکل در یک و سه ماه پس از غرقاب به‌طور معنی‌داری افزایش یافت (شکل ۷). به‌طور کلی، می‌توان گفت که غرقاب شدن خاک مقدار فسفر به‌سهولت محلول را در خاک‌های غیرآهکی افزایش



شکل ۷. اثر مدت غرقاب بر فسفر به سهولت محلول در خاک‌های اسیدی یا غیرآهکی

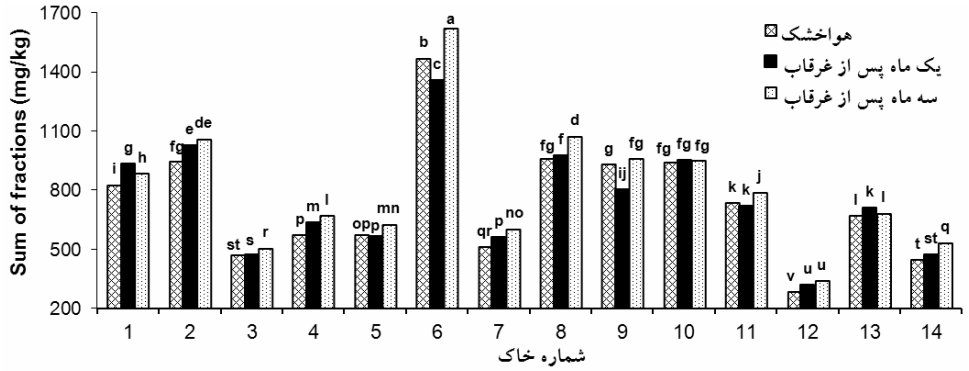
می‌دهد. دلایل این افزایش قبلاً در بخش فسفر قابل‌جذب بیان گردید. پس از غرقاب، افزایش فسفر به‌سهولت محلول به‌وسیله گوپتا و سینگ (۱۰) و کاهش آن به‌وسیله دوآ و جوشی (۷) و ورنا و همکاران (۳۵) گزارش شده است. غلظت NH_4Cl-P نسبت به شکل‌های دیگر کمتر بود (شکل ۷). دبنات و حاجرا مشاهده کردند که فسفر قابل‌استخراج با NH_4Cl در تمام خاک‌های مورد مطالعه ناچیز بود (۴).

فسفر محبوس در اکسیدهای آهن (CBD-P)

مقدار این شکل در خاک‌های مورد مطالعه به حدی کم بود که با دستگاه اسپکتروفتومتر SPECTRONIC 601 قابل‌اندازه‌گیری نبود. لذا، نتایج مربوط به این شکل ارائه نگردید. به‌نظر می‌رسد ناچیز بودن این شکل در خاک‌های شالیزاری مورد مطالعه ناشی از غرقاب شدن خاک در طی سال‌ها کشت برنج است که سبب احیای اکسیدهای آهن، حل شدن آنها و آزاد شدن فسفر محبوس در داخل آنها می‌شود. در نتیجه، مقدار این شکل کاهش می‌یابد.

مجموع شکل‌های فسفر

برای پاسخ به این سؤال که آیا فسفر معدنی در خاک‌های مورد مطالعه پس از غرقاب به شکل تتمه یا فسفر آلی تبدیل می‌شود یا نه، فسفر استخراج شده به‌وسیله عصاره‌گیرهای مختلف در هر روش عصاره‌گیری متوالی و در هر خاک باهم جمع گردید. مقایسه میانگین‌ها نشان داد که اثر زمان‌های مختلف غرقاب بر مجموع شکل‌های فسفر در خاک‌های مختلف، متفاوت بود. در خاک آهکی ۱ و خاک غیرآهکی ۱۳ در یک ماه پس از غرقاب افزایش ولی در سه ماه پس از غرقاب دوباره کاهش یافت. در خاک آهکی ۲ و خاک غیرآهکی ۱۲ یک و سه ماه پس از غرقاب به‌طور معنی‌داری افزایش یافت ولی بین یک و سه ماه پس از غرقاب تفاوت معنی‌داری وجود نداشت. در خاک‌های آهکی شماره ۳، ۵، ۸ و غیرآهکی ۱۱ بین یک ماه پس از غرقاب و حالت هواخشک تفاوت معنی‌داری وجود نداشت ولی سه ماه پس از غرقاب به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. در خاک‌های آهکی ۴ و ۷ و غیرآهکی ۱۴ مقدار مجموع شکل‌های فسفر یک و سه ماه پس از غرقاب به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. در خاک‌های آهکی ۶ و ۹ یک ماه پس از غرقاب مجموع شکل‌های فسفر به‌طور معنی‌داری کاهش یافت ولی سه ماه پس از غرقاب دوباره افزایش یافت. اثر زمان‌های مختلف غرقاب بر مجموع شکل‌های فسفر معدنی در خاک آهکی ۱۰ معنی‌دار نبود (شکل ۸). عدم تغییر مجموع شکل‌های فسفر در زمان‌های مختلف غرقاب به معنی این است که شکل‌های مختلف معدنی فسفر بر اثر غرقاب به هم تبدیل می‌شوند. برای مثال، سه ماه پس از غرقاب نسبت به حالت هواخشک، در خاک ۱۰، مقدار Ca_2-P و Al-P افزایش، Ca_8-P و Fe-P کاهش یافت و Ca_{10}-P بدون تغییر باقی ماند. در نتیجه، مجموع شکل‌ها نیز بدون تغییر باقی ماند. افزایش یا کاهش معنی‌دار مجموع شکل‌ها پس از



شکل ۸. اثر مدت غرقاب بر مجموع شکل‌های فسفر در خاک‌های آهکی (۱ تا ۱۰) و غیرآهکی و اسیدی (۱۱ تا ۱۴)

غرقاب ممکن است ناشی از تبدیل فسفر آلی به فسفر معدنی و یا احتمالاً تبدیل فسفر معدنی به فسفر آلی و فسفر باقی‌مانده باشد که در روش‌های عصاره‌گیری متوالی مورد استفاده در نظر گرفته نشده‌اند. با توجه به این‌که مجموع شکل‌ها فقط یک ماه پس از غرقاب و در دو خاک ۶ و ۹ کاهش یافته است، به‌نظر می‌رسد در شرایط مورد مطالعه، تبدیل فسفر معدنی به فسفر آلی یا فسفر باقی‌مانده فرآیند غالب نبوده است. در حالی‌که از ۱۴ خاک مورد مطالعه در ۱۲ خاک مجموع شکل‌ها پس از غرقاب افزایش یافته است. به‌نظر می‌رسد این افزایش ناشی از تبدیل فسفر آلی به فسفر معدنی باشد. شاید یکی از دلایل افزایش فسفر قابل‌جذب پس از غرقاب شدن خاک‌های مورد مطالعه مربوط به این پدیده باشد که به‌وسیله رایت و همکاران (۳۷) نیز گزارش شده است. این نتایج بیانگر لزوم توجه بیشتر به فسفر آلی و تعیین تغییرات آن در این‌گونه مطالعات می‌باشد.

نتیجه‌گیری

فسفر قابل‌جذب تمام خاک‌های مورد مطالعه پس از غرقاب افزایش یافت. این نتیجه نشان‌دهنده این است که عصاره‌گیر بی‌کربنات سدیم (روش اولسن) مقدار فسفر قابل‌جذب را در حالت هواخشک کمتر از مقدار واقعی آن در شرایط غرقاب برآورد می‌کند. این یکی از دلایلی است که نشان می‌دهد چرا در خاک‌های با فسفر قابل‌جذب کمتر از سطح بحرانی گاهی برنج غرقاب به مصرف کود فسفر پاسخ نمی‌دهد. لذا، برای انجام توصیه کودی دقیق‌تر پیشنهاد می‌شود سطح بحرانی فسفر قابل‌جذب گیاه برنج در خاک در شرایط غرقاب نیز تعیین شود و سطح بحرانی تعیین شده با خاک هواخشک با توجه به آن اصلاح گردد. اثر غرقاب شدن خاک بر شکل‌های فسفر معدنی بسته به شکل فسفر، نوع خاک و مدت غرقاب شدن آن متفاوت بود که نشان‌دهنده پیچیده بودن رفتار شیمیایی فسفر در خاک‌ها است. مقدار Al-P در ۱۴ خاک مورد مطالعه سه ماه پس از غرقاب نسبت به شرایط غیرغرقاب افزایش یافت. به‌نظر می‌رسد یکی از دلایل افزایش فسفر قابل‌جذب پس از غرقاب مربوط به این پدیده می‌باشد. در ۹ خاک از ۱۰ خاک آهکی، مقدار Fe-P سه ماه پس از غرقاب نسبت به شرایط غیرغرقاب کاهش یافت در حالی‌که اثر غرقاب بر Fe-P در خاک‌های غیرآهکی و اسیدی معنی‌دار نبود. فسفر به‌سهولت محلول در چهار خاک غیرآهکی و اسیدی در یک و سه ماه پس از غرقاب نسبت به شرایط غیرغرقاب افزایش یافت. در برخی خاک‌ها و زمان‌های غرقاب، کاهش برخی شکل‌ها با افزایش سایر شکل‌ها همراه بود که حاکی از تبدیل شکل‌های معدنی فسفر به یکدیگر بود. مقدار فسفر محبوس در اکسیدهای آهن (CBD-P) در خاک‌های مورد مطالعه به حدی کم بود که با دستگاه اسپکتروفتومتر قابل‌اندازه‌گیری نبود. نتایج حاکی از تبدیل Ca_2-P، Ca_8-P و Fe-P به Al-P و Ca_{10}-P در برخی خاک‌های مورد مطالعه بود. با توجه به افزایش مجموع شکل‌های فسفر پس از غرقاب در ۱۲ خاک از ۱۴ خاک مورد مطالعه، به‌نظر می‌رسد این افزایش

ناشی از تبدیل فسفر آلی به فسفر معدنی است. شاید یکی دیگر از دلایل افزایش فسفر قابل‌جذب پس از غرقاب مربوط به این پدیده باشد. لذا، پیشنهاد می‌شود مطالعاتی در مورد اثر غرقاب شدن خاک بر فسفر آلی انجام شود.

منابع مورد استفاده

۱. اخگر، ع. و ح. توفیقی. ۱۳۷۸. بررسی تغییرات Eh، pH و غلظت آهن محلول و فسفر قابل استفاده در خاک‌های شالیزاری شمال ایران با و بدون حضور گیاه برنج. چکیدهٔ مقالات ششمین کنگرهٔ علوم خاک ایران، دانشگاه فردوسی، مشهد.

۲. نجفی، ن. و ح. توفیقی. ۱۳۹۰. اثر رژیم رطوبتی و کود فسفر بر فسفر قابل‌جذب و شکل‌های فسفر معدنی در برخی خاک‌های شالیزاری شمال ایران. مجله تحقیقات آب و خاک ایران (علوم کشاورزی ایران) ۴۲(۲): ۲۵۷-۲۶۹.

3. Broeshart, H., E. Haunold and M. Fried. 1965. The effect of water conditions and oxidation-reduction status of rice soils on the availability of soil and fertilizer phosphorus. Plant Soil 23: 305-313.
4. Debnath, N. C. and J. N. Hajra. 1972. Inorganic transformation of added phosphorus in soil in relation to soil characteristics and moisture regime. J. Ind. Soc. Soil Sci. 20: 327-335.
5. De Datta, S. K., J. C. Moomaw, V. V. Racho and G. V. Simsiman. 1966. Phosphorus supplying capacity of lowland rice soils. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 30: 613-617.
6. Delgado, A., J. R. Ruiz, M. C. Campillo, S. Kassem and L. Andereu. 2000. Calcium- and iron-related phosphorus in calcareous and calcareous marsh soils: Sequential chemical fractionation and 31P nuclear magnetic resonance study. Commun. Soil Sci. and Plant Anal. 31(15/16): 2483-2499.
7. Dhua, S. P. and R. L. Joshi. 1973. Effect of waterlogging on the available phosphorus and inorganic fractions of some Bihar soils. Technolology. 10: 86-93.
8. Dikshit, P. R. and S. K. Padihar. 1988. Effect of soil moisture regime and applied phosphorus on inorganic phosphate fractions and availability of phosphorus to rice grown in a Vertisol. Oryza 25: 157-163.
9. Gee, G.W. and J.W. Bauder. 1986. Particle-size analysis. PP. 383-411. *In:* A. Klute (Ed.), Methods of Soil Analysis. Part I. Physical and Mineralogical Methods. 2nd ed., ASA, SSSA, Madison, WI, USA.
10. Gupta, R. K. and T. A. Singh. 1975. Laboratory study of phosphorus forms and test procedures on soils under aerobic and anaerobic conditions. Geoderma 14: 255-260.
11. Gupta, R. K., T. A. Singh and B. P. Ghildyal. 1972. Fate of native and applied phosphorus saturated and unsaturated soil moisture conditions. Agrochemistry 16: 548-558.
12. Jiang, B. F. and Y. C. Gu. 1989. A suggested fractionation scheme for inorganic phosphorus in calcareous soils. Fertil. Res. 20: 159-165.
13. Lindsay, W. L. 1979. Chemical Equilibria in Soils. John Wiley and Sons, New York, USA.
14. Lindsay, W. L., P.G. Velke and S.H. Chien. 1989. Phosphate minerals. PP. 1089-1130. *In*: J. B. Dixon and S. B. Weed (Eds.), Minerals in Soil Environments. 2nd ed., SSSA Book Series No. 1, Madison, WI. USA.
15. Khan, S. K. and L. N. Mandal. 1973. Distribution of different inorganic forms of phosphorus in rice soils of West Bengal. J. Ind. Soc. Soil Sci. 21: 395-402.
16. Kuo, S. 1996. Phosphorus. PP. 869-919. *In*: D.L. Sparks (Ed.), Methods of Soil Analysis. Part III. Chemical Methods. 3rd ed., SSSA Book Series No. 5. Madison, WI. USA.
17. Mahapatra, I.C. and W.H. Patrick. 1969. Inorganic phosphate transformation in waterlogged soils. Soil Sci. 107: 281-288.
18. Mahrous, F.N., D.S. Mikelsen and A.A. Hafez. 1983. Effect of soil salinity on the electro-chemical and chemical kinetics of some plant nutrients in submerged soils. Plant Soil 75: 455-472.
19. Mandal, L. N. 1964. Effect of time, starch and lime on the transformation of inorganic phosphorus in waterlogged rice soil. Soil Sci. 97: 127-132.
20. Mandal, L. N. and S. K. Khan. 1975. Influences of soil moisture regime on transformation of inorganic phosphorus in rice soils. J. Indian Soc. Soil Sci. 23: 31-37.
21. Mclean, E. O. 1982. Soil pH and lime requirement. PP. 199- 224. *In*: A.L. Page *et al*. (Eds.), Methods of Soil Analysis. Part II. Chemical and Microbiological Properties. 2nd ed., ASA, SSSA, Madison, WI. USA.
22. Moreno, E.C., W. L. Lindsay and G. Osborn. 1960. Reactions of dicalcium phosphate dehydrate in soils. Soil Sci. 90: 58-68.
23. Murphy, J. and J. P. Riley. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. Anal. Chem. Acta 27: 31-36.

24. Najafi N. and H. Towfighi. 2008. Changes in pH, EC and concentration of phosphorus in soil solution during submergence and rice growth period in some paddy soils of north of Iran. PP. 555-567. *In*: Proceedings of the International Meeting on Soil Fertility, Land Management, and Agroclimatology, 29 October-1 November, Kusadasi, Turkey.
25. Nashy, R.A.M. and A.H. Abdel-Hamied. 1995. Behaviour of phosphorus in waterlogged soils. Ann. Agric. Sci. Mosht. 32(1): 641-650.
26. Nelson, D.W. and L. E. Sommers. 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. PP. 539-579. *In*: A.L. Page *et al*. (Eds.), Methods of Soil Analysis. Part II. Chemical and Microbiological Properties. 2nd ed., ASA, SSSA, Madison, WI. USA.
27. Patrick, W. H. and I. C. Mahapatra. 1968. Transformation and availability to rice of nitrogen and phosphorus in waterlogged soils. Adv. Agron. 20: 323-359.
28. Ponnamperuma, F. N. 1972. The Chemistry of submerged soils. Adv. Agron. 24: 29-96.
29. Ponnamperuma, F. N. 1978. Electrochemical changes in submerged soils and the growth of rice. PP. 421-441. *In*: IRRI. Soil and Rice. Los Banos, Laguna, Philippines.
30. Richards, L. A. 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. US Salinity Laboratory Staff, Agricultural Handbook No. 60. USDA, USA.
31. Sah, R. N. and D. S. Mikkelsen. 1986. Transformation of inorganic phosphorus during the flooding and draining cycles of soil. Soil Sci. Soc. Amer. J. 50: 62-67.
32. Shahandeh, H., L. R. Hossner and F.T. Turner. 1994. Phosphorus relationships in flooded rice soils with low extractable phosphorus. Soil Sci. Soc. Amer. J. 58: 1184-1189.
33. Subhendu, B., T. J. Purakayastha, P. K. Chhonkar and V. Verma. 2002. Phosphorus mobilization in hybrid rice rhizosphere compared to high yielding varieties under integrated nutrient management. Biol. Fertil. Soils 35: 73-78.
34. Turner, F. T. and J.W. Gillian. 1976. Increased P diffusion as and explanation of increased availability in flooded rice soils. Plant Soil 45: 365-377.
35. Verna, R. N. S., M. Singh and M. Singh. 1978. Transformation of native and added phosphorus in four soils under submerged conditions. Riso 27: 317-322.
36. Willet, I. R. and M. L. Higgins. 1978. Phosphorus sorption by reduced and oxidized rice soils. Aust. J. Soil Res. 16: 319-326.
37. Wright, R. B., B. G. Lockaby and M. R. Walbridge. 2001. Phosphorus availability in an artificially flooded Southeastern floodplain forest soil. Soil Sci. Soc. Amer. J. 65: 1293-1302.