

روش بهینه تعیین غلظت آستانه بحرانی هدررفت فسفر برای خاک‌های حوزه آبخیز تلخه‌رود، استان آذربایجان شرقی

رامین سلماسی^۱، محسن فرحبخش^{۲*} و حسین اسدی^۳

^۱ دانشجوی دوره دکترای رشته علوم و مهندسی خاک، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران و ^{۲،۳} دانشیار، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۱۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۱۳

چکیده

مقادیر بالای فسفر خاک ممکن است، غلظت فسفر رواناب را به اندازه‌ای بالا ببرد که باعث آلودگی فسفری پیکره‌های آبی شود. در این پژوهش، سنجشی بین دو روش عصاره‌گیری آزمایشگاهی و شبیه‌سازی باران برای بررسی سطح آستانه زیست‌محیطی غلظت فسفر انجام شده است تا بین این دو روش، روش بهینه برگزیده شود. برای این منظور، از خاک‌های حوزه آبخیز تلخه‌رود واقع در استان آذربایجان شرقی بهره‌گیری شده است. به این منظور، از ۳۰ نقطه این حوزه که فسفر فراهم آن‌ها در دامنه گسترده‌ای قرار داشت، نمونه‌های خاک برداشت شدند. پس از اندازه‌گیری ویژگی‌های عمومی، فسفر فراهم خاک‌ها با روش‌های اولسن، مهلیچ-۳، سلطان‌پور و کاغذ صافی آغشته به اکسید آهن اندازه‌گیری شد. فسفر محلول در آب نمونه‌های خاک در آزمایشگاه و فسفر محلول رواناب نمونه‌های خاک تحت شبیه‌سازی باران از نوع دوار با شدت ۷۵ میلی‌متر بر ساعت به مدت ۳۰ دقیقه اندازه‌گیری شد. یافته‌های به‌دست آمده نشان دادند که نقطه شکستگی در رابطه بین غلظت فسفر رواناب و غلظت فسفر فراهم خاک به‌روش‌های گوناگون در غلظت‌های نزدیک به غلظت‌های رابطه بین غلظت فسفر فراهم با چهار روش اندازه‌گیری با میزان فسفر محلول خاک دیده شده است. غلظت آستانه زیست‌محیطی فسفر برای خاک‌های این منطقه را می‌توان بر اساس هر دو روش عصاره‌گیری‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی باران برآورد کرد. به‌دلیل این‌که روش آزمایشگاهی ساده‌تر بوده، نیازمند زمان کمتری است، برای برآورد غلظت آستانه توصیه می‌شود. از آنجایی که اختلاف شیب دو خط شکسته در روش نوارهای کاغذی آغشته به اکسید آهن نسبت به سایر روش‌های اندازه‌گیری فسفر فراهم در هر دو روش آزمایشگاهی و شبیه‌سازی باران بیشتر بود (اختلاف شیب دو خط در روش نوارهای کاغذی در حدود هشت برابر و برای سه روش دیگر در حدود دو تا سه برابر) و ضریب تبیین بالایی برای تمام آن‌ها به‌دست آمد (بالای ۸۲ درصد)، روش نوارهای کاغذی برای تعیین غلظت آستانه زیست‌محیطی فسفر نسبت به سایر روش‌های اندازه‌گیری فسفر فراهم برتری نشان داد. با توجه به این‌که برای تمام روش‌های اندازه‌گیری، در غلظت ۰/۳۶ میلی‌گرم بر لیتر فسفر رواناب محلول نقطه شکستگی مشاهده شد، نتیجه‌گیری می‌شود که این غلظت پایین‌تر از غلظت آستانه زیست‌محیطی فسفر برای رخداد پدیده شکستگی جلبکی قرار دارد.

واژه‌های کلیدی: رواناب، زیست‌محیطی، شکستگی جلبکی، شبیه‌سازی باران، عصاره‌گیری فسفر

مقدمه

فسفر به‌عنوان یک عنصر غذایی شناخته شده است که بیشترین محدودیت عملکرد گیاهان زراعی در محیط‌های گرمسیری و نیمه‌گرمسیری را دارد، به این علت سالانه مقادیر بالایی از کودهای فسفوری به مزارع داده می‌شود (Tiecher و همکاران، ۲۰۱۸). کاربرد بالای کودهای فسفوری خطر هدررفت این عنصر را از طریق فرسایش، جریان سطحی و آبشویی افزایش می‌دهد که عامل اصلی رشد سریع جلبک‌ها و پدیده شکفتگی جلبکی^۱ در آب‌های سطحی است (Smith و همکاران، ۲۰۱۵؛ Machado و Oliviera، ۲۰۱۳).

مقادیر بالای فسفر خاک ممکن است، غلظت فسفر رواناب را به اندازه‌ای بالا ببرد که باعث آلودگی فسفوری پیکره‌های آبی شود. به‌منظور بهره‌برداری کارا از روش‌ها و داده‌های آزمون خاک برای حفاظت کیفیت آب، می‌بایست سطوح آستانه زیست‌محیطی غلظت فسفر خاک سطحی که در بالاتر از آن، فسفر اثر منفی بر کیفیت آب خواهد گذاشت، تعریف شود. یک رویکرد نو در این رابطه، به‌کارگیری مدل خط شکسته^۲ است. در این رویکرد، یک نقطه شکستگی رابطه بین فسفر خاک و فسفر موجود در رواناب‌های سطحی (Sharpley و McDowell، ۲۰۰۱) را به دو بخش تقسیم می‌کند که یکی از این دو هدررفت بیشتر فسفر را در واحد افزایش فسفر خاک نشان می‌دهد. به‌عبارت دیگر، خطر حرکت فسفر از زمین‌های کشاورزی زمانی که غلظت فسفر خاک به نقطه شکست می‌رسد، افزایش می‌یابد (Nair و همکاران، ۲۰۱۳). آگاهی از ویژگی‌های جذبی فسفر خاک‌ها و ارتباطی که با فسفر آزمون خاک دارند، در پیشگویی غلظت فسفر محلول رواناب می‌تواند یاری‌رسان باشد (Wang و همکاران، ۲۰۱۵).

مدل خط شکسته می‌تواند به‌عنوان یک ابزار مدیریتی به‌کار رود که نشان دهد در چه غلظتی از فسفر خاک، توانایی خطر هدررفت فسفر افزایش می‌یابد. یافته‌های پژوهشی نشان داده‌اند که یک سطح بحرانی یکتا برای فسفر خاک نمی‌تواند از کیفیت آب محافظت کند، چون هدررفت فسفر برای تمام خاک‌ها

ثابت نیست (Yli-Halla و همکاران، ۱۹۹۵؛ Pote و همکاران، ۱۹۹۶). سطوح بحرانی و ارتباط بین هدررفت فسفر و فسفر خاک، ویژه هر خاک بوده و به ویژگی‌های خاک و محل بستگی دارد (Daniel و همکاران، ۱۹۹۴؛ Sharpley و همکاران، ۱۹۹۶؛ Pote و همکاران، ۱۹۹۹؛ Cox و Hendricks، ۲۰۰۰).

برای این‌که ویژگی روش‌های برگزیده اندازه‌گیری فسفر، شاخص زیست‌محیطی موثری از پتانسیل هدررفت فسفر باشند، شمار زیادی از پژوهشگران لازم دیدند همبستگی خوبی از این ویژگی با شکلی از فسفر که بیشتر دست‌خوش هدررفت از طریق رواناب یا آبشویی است، پیدا کنند (Yli-Halla و همکاران، ۱۹۹۵؛ Pote و همکاران، ۱۹۹۶ و Hesketh؛ Brooks، ۲۰۰۰؛ McDowell و Sharpley، ۲۰۰۱؛ Brooks و همکاران، ۱۹۹۷). یافته‌های این پژوهشگران نشان داد، همبستگی معنی‌دار بالایی بین غلظت فسفر موجود در جریان‌های سطحی و زیرسطحی با فسفر قابل عصاره‌گیری با آب وجود داشته است. به بیان دیگر، رسم نمودار بین غلظت فسفر عصاره‌گیری‌شده با آب در مقابل فسفر آزمون خاک، نمایان‌گر نمودار هدررفت فسفر در جریان سطحی و زیرسطحی است.

در حوزه آبخیز تلخه‌رود واقع در استان آذربایجان شرقی، کاربرد طولانی‌مدت کودهای فسفوره در خاک‌ها سبب شده است که در برخی مناطق میزان فسفر خاک بالا رود و زیادی آن از طریق رواناب، وارد آب‌های پذیرنده این حوضه‌ها شود و یکی از عوامل اصلی تشدید رشد جلبک‌ها و در نتیجه افت کیفیت این آب‌ها است. پژوهش حاضر به‌گونه‌ای طراحی شده است که برای خاک‌های نماینده حوزه آبخیز تلخه‌رود در آذربایجان شرقی، وجود نقطه شکست یا همان سطح بحرانی زیست‌محیطی غلظت فسفر فراهم خاک به‌روش‌های برگزیده، اندازه‌گیری و ارتباط آن با فسفر محلول نمونه‌های خاک و با فسفر محلول رواناب‌های سطحی ایجادشده تحت شبیه‌سازی باران بررسی شود.

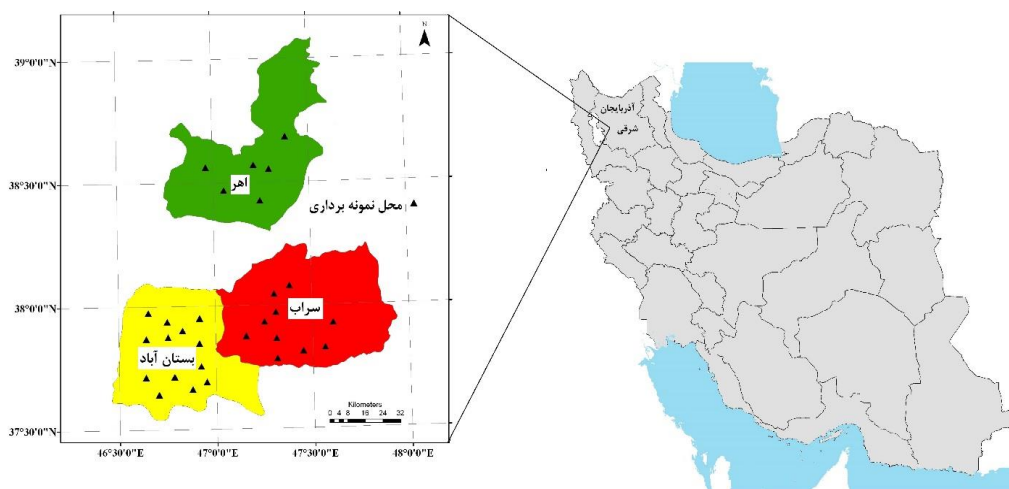
مواد و روش‌ها

برای دستیابی به اهداف پژوهش حاضر، ۳۰ نمونه خاک به روش مرکب از لایه سطحی خاک (عمق ۱۵-

^۱ Eutrophication^۲ Split-line model

آهن برای این منظور برگزیده شدند. به این منظور، از نمونه‌های خاک عصاره‌های بی‌کربنات سدیم (Olsen و همکاران، ۱۹۵۴)، صافی آغشته به اکسید آهن (Chardon، ۲۰۰۰)، مهلیج-۳ (Mehlich، ۱۹۸۴) و آمونیوم بی‌کربنات دی‌تی‌پی (Schwab و Soltanpour، ۱۹۷۷) و محلول در آب مقطر (Kuo، ۱۹۹۶) تهیه شد و غلظت فسفر در این عصاره‌ها به‌وسیله دستگاه اسپکتروفتومتر با به‌کارگیری روش Riley و Murphy (۱۹۶۲) قرائت شدند.

۰ سانتی‌متر) از اطراف شهرستان‌های بستان‌آباد، سراب و اهر در استان آذربایجان شرقی برداشت شد (شکل ۱). در بخشی از نمونه‌ها هوای خشک‌شده از غربال دو میلی‌متری گذرانده شد و سپس اسیدیته (Thomas، ۱۹۹۶)، مواد آلی (والکلی-بلک، ۱۹۳۴)، توزیع اندازه ذرات (Bauder و Gee، ۲۰۰۲) و درصد کربنات کلسیم معادل (Jones، ۲۰۰۱) آن‌ها در آزمایشگاه اندازه‌گیری شد. چهار روش اندازه‌گیری فسفر فراهم خاک شامل روش‌های عصاره‌گیری اولسن، مهلیج-۳ و سلطان‌پور و روش صافی آغشته به اکسید



شکل ۱- نقشه موقعیت استان آذربایجان شرقی در ایران و نقاط نمونه‌برداری خاک از شهرستان‌های این استان

رواناب و رسوب در شدت‌های بالا انجام می‌گیرد و در بیشتر پژوهش‌های مشابه انجام‌گرفته (Kleinman و همکاران، ۲۰۰۴؛ Pote و همکاران، ۱۹۹۶؛ McDowell و Sharpley، ۲۰۰۱)، شدت ۷۵ میلی‌متر بر ساعت به‌کار گرفته می‌شود، در پژوهش حاضر نیز از شدت یادشده بهره‌گیری شد. دستگاه شبیه‌ساز باران به‌کار رفته از نوع دیسکی چرخان بود. بعد از شروع بارندگی، رواناب حاصل در فواصل زمانی گوناگون صفر تا سه، سه تا هفته، هفت تا ۱۲، ۱۲ تا ۲۰ و ۲۰ تا ۳۰ دقیقه جمع‌آوری شد. به‌دلیل این‌که در ابتدای شروع رواناب نسبت به زمان‌های پایانی در نظر گرفته شده، غلظت رسوب بالاتر است (Pote و همکاران، ۱۹۹۹)، بازه زمانی برای زمان‌های آغازین نسبت به زمان‌های پایانی، کمتر در نظر گرفته شد. به این ترتیب برای هر خاک پنج نمونه و برای ۳۰ خاک در مجموع ۱۵۰ نمونه رواناب جمع‌آوری شد. نمونه‌های رواناب

برای انجام آزمایش‌های مربوط به باران‌ساز (شکل ۲)، از دستگاه شبیه‌ساز باران مستقر در دانشکده کشاورزی دانشگاه تهران بهره‌گیری شد. این دستگاه، از نوع دوار، دارای ارتفاع حدود ۳/۵ متر بوده، توانایی شبیه‌سازی باران تا شدت ۱۰۰ میلی‌متر بر ساعت را داشت. نمونه‌های خاک، درون سینی‌هایی به ابعاد ۳۰ در ۶۰ و ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر و دارای سوراخ‌های زهکشی ریخته شده، برای رساندن به جرم حجمی ظاهری ۱۳۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب (میانگین جرم حجمی نمونه خاک‌های برداشته‌شده) فشردگی لازم بر آن‌ها اعمال شد. سپس، این سینی‌ها از پایین به مدت ۲۴ ساعت اشباع شدند. در روز بعد، پس از خروج آب ثقلی و بعد از قرار دادن سینی در شیب پنج درصد با به‌کارگیری شبیه‌ساز باران، بارانی با شدت ۷۵ میلی‌متر بر ساعت به مدت نیم‌ساعت بر سینی‌ها اعمال شد. از آنجایی که عمده فرسایش و تولید

$(j=1,2,3,4,5,6)$ را نشان می‌دهند.

تجزیه و تحلیل‌های آماری انجام‌گرفته با به-کارگیری نرم‌افزار Excel و تعیین نقطه شکستگی و تعیین ضرایب تبیین برازش‌ها از طریق مدل خط شکسته انجام گرفت (McDowell و Sharpley, ۲۰۰۱). بر تمام نقاط یک رابطه زمانی خط شکسته برازش داده می‌شود که خط برازش داده‌شده به تمام این نقاط دارای ضریب همبستگی پایین است در حالی که منحنی برازش داده‌شده بر آن‌ها ضریب تبیین بالا داشته باشد. نقاطی که بر آن‌ها یک خط با ضریب همبستگی بالا برازش داده می‌شود، در یک دسته و به‌همین ترتیب سایر نقاط در دسته دیگر قرار داده می‌شوند.

جمع‌آوری‌شده برای اندازه‌گیری میزان فسفر محلول به‌آزمایشگاه منتقل شدند. اندازه‌گیری غلظت فسفر محلول در رواناب بعد از عبور دادن رواناب از صافی ۰/۴۵ میکرومتر بر اساس روش قبلی انجام گرفت. برای نمونه‌های خاک میانگین وزنی غلظت فسفر فعال محلول رواناب برای زمان ۳۰ دقیقه (DRP_{30}) بر اساس رابطه زیر به‌کار گرفته شد.

$$DRP_{30} = \frac{\sum(DRP_j \times V_j)}{\sum V_j} \quad (1)$$

که در آن، DRP_j غلظت فسفر رواناب محلول (میلی‌گرم بر لیتر) مربوط به رواناب جمع‌آوری شده در زمان‌های صفر تا سه، سه تا شش، شش تا ۱۰، ۱۰ تا ۱۵-۱۰، ۱۵-۲۰ و ۲۰-۳۰ دقیقه ($j=1,2,3,4,5,6$) و V_j حجم رواناب (لیتر) جمع‌آوری شده در این زمان‌ها



شکل ۲- نمایی از روش جمع‌آوری نمونه‌های رواناب در پژوهش حاضر

نتایج و بحث

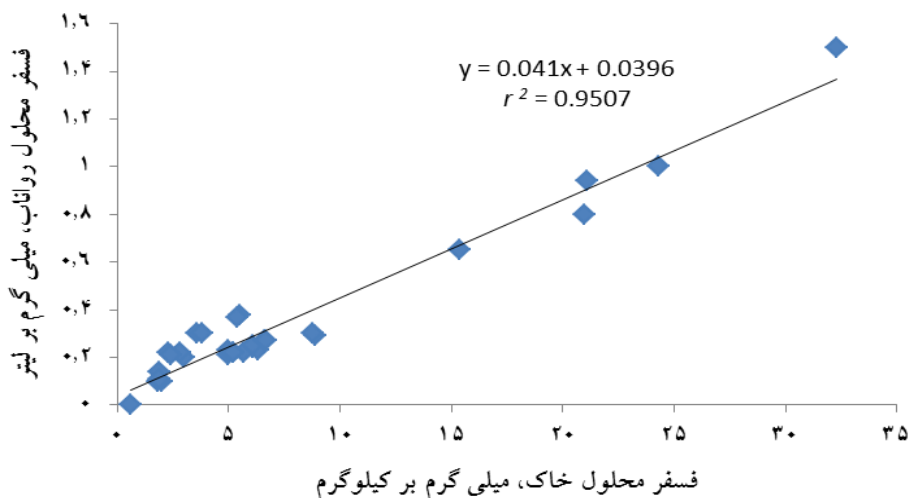
ویژگی‌های پایه خاک‌های مورد بررسی: کمینه، بیشینه، میانگین و انحراف استاندارد برخی ویژگی‌های پایه خاک‌های بررسی شده در جدول ۱ آمده است. یافته‌های تجزیه نمونه‌های خاک این پژوهش نشان داد، خاک‌ها دارای واکنش قلیایی، میزان مواد آلی کم، درصد آهک نمونه‌ها کم تا متوسط و بافت خاک‌ها در

دامنه لوم تا لوم رسی می‌باشند.

رابطه هدررفت فسفر با غلظت فسفر فراهم به روش‌های برگزیده: نخست رابطه بین فسفر رواناب و فسفر محلول در آب (شکل ۳) خاک رسم شد تا مشخص شود که می‌توان از غلظت فسفر محلول خاک به‌جای فسفر محلول رواناب بهره برد یا خیر؟

جدول ۱- کمینه، بیشینه، میانگین و انحراف استاندارد برخی ویژگی‌های پایه در ۳۰ نمونه از خاک‌های بررسی شده

ویژگی خاک	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف استاندارد
اسیدیته محلول	۸/۰	۸/۵	۸/۲۵	۰/۴
کربن آلی (گرم بر کیلوگرم)	۶/۰	۱۵/۰	۱۱/۰	۲/۴
کربنات کلسیم معادل (گرم بر کیلوگرم)	۱۵۰/۰	۲۵۰/۰	۲۱۰/۰	۴۲/۶
میزان رس (گرم بر کیلوگرم)	۱۰۰/۰	۳۸۰/۰	۲۶۰/۰	۴۸/۰
غلظت فسفر اولسن (میلی گرم بر کیلوگرم)	۱۱/۷	۲۴۰/۸	۶۶/۱	۱۴/۰
غلظت فسفر مهلیچ-۳ (میلی گرم بر کیلوگرم)	۱۶/۱	۴۲۰/۷	۱۱۷/۰	۳۴/۰
غلظت فسفر صافی آغشته به اکسید آهن (میلی گرم بر کیلوگرم)	۱۲/۸	۱۰۰/۷	۴۸/۰	۱۸/۲
غلظت فسفر سلطان پور (میلی گرم بر کیلوگرم)	۵/۹	۹۱/۳	۳۷/۵	۷/۸



شکل ۳- رابطه بین فسفر محلول رواناب و فسفر محلول در آب خاک

همبستگی از ۰/۹۲ تا ۰/۹۶ دست یافتند. بررسی‌های Sharpley و همکاران (۱۹۹۵) نشان داده است که بخشی از فسفر خاک که با آب قابل عصاره‌گیری است، بیشترین همبستگی را با غلظت فسفر محلول رواناب داشته است، حتی زمانی که شدت بارندگی، شیب و شرایط فصلی در نوسان بوده‌اند. از آنجایی که آب، حلال فسفر در رواناب است، انتظار می‌رفت که عصاره‌گیر آب مقطر همبستگی بالایی با فسفر محلول

بررسی این همبستگی نشان داد که این دو ویژگی رابطه معنی‌داری در سطح ۰/۰۰۱ با هم دارند. بنابراین، برای خاک‌های این پژوهش عصاره‌گیری با آب در یک نسبت خاک به محلول یک به ۱۰ می‌تواند برآورد سودمندی از هدررفت فسفر محلول رواناب سطحی باشد. Pote و همکاران (۱۹۹۹) برای سه سری خاک مورد بررسی خود در رابطه بین فسفر خاک محلول و رواناب محلول در آب به ضرایب

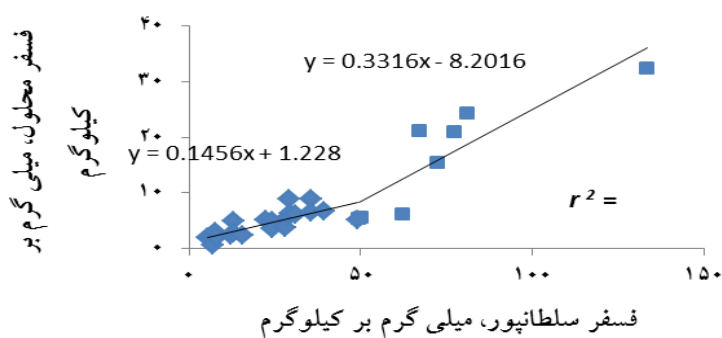
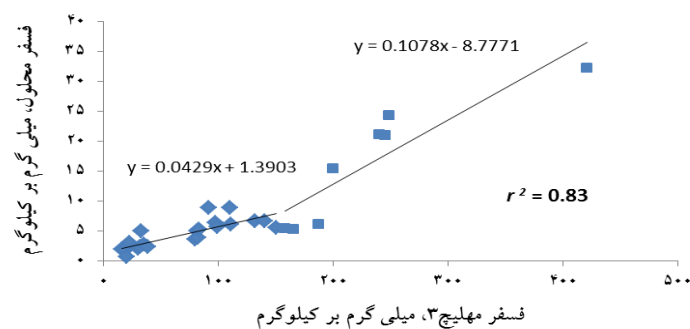
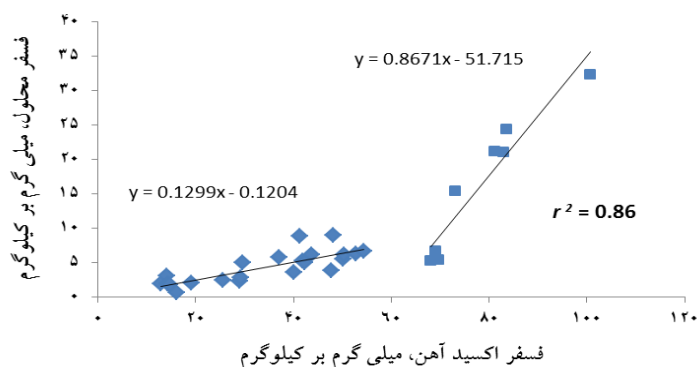
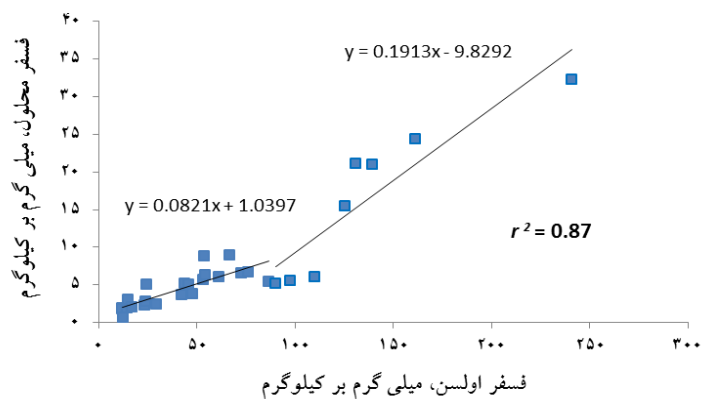
غلظت آستانه زیست‌محیطی فسفر نسبت به سایر روش‌های اندازه‌گیری فسفر برتری دارد.

نقطه شکستگی برای روش‌های اولسن، مهلیچ-۳، نوار کاغذی اکسید آهن و سلطان‌پور به ترتیب در ۹۰، ۱۶۵/۴، ۵۲/۷-۶۸/۱ و ۴۹/۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم دیده شد که نزدیک به اندازه‌های به‌دست آمده بر پایه روش پیشین است. برای تمام روش‌های اندازه‌گیری، این نقطه در ۰/۳۶ میلی‌گرم بر لیتر فسفر رواناب محلول مشاهده شد. با توجه به این‌که برای خاک‌های دارای ویژگی‌های مشابه با خاک‌های این پژوهش، غلظت ۰/۴۵ میلی‌گرم بر لیتر فسفر رواناب محلول به‌عنوان غلظت آستانه این عنصر برای وقوع پدیده شکستگی جلبکی در نظر گرفته شده است (آژانس مهار آلودگی Minnesota در ایالات متحده)، نتیجه‌گیری می‌شود، برای نمونه خاک‌های این پژوهش، غلظت فسفر رواناب محلول پایین‌تر از حد آستانه زیست‌محیطی آن قرار دارد.

تجزیه داده‌ها در پژوهش‌های گوناگون برای ارزیابی روند خطی یا غیرخطی (وجود نقطه شکستگی) نتایج گوناگونی را نشان داده است. یافته‌های پژوهشی Wang و همکاران (۲۰۱۵ و ۲۰۱۰) بر روی شش سری خاک از منطقه Ontario در کشور کانادا که دارای واکنش اسیدی تا قلیایی، بافت لوم شنی تا رسی و مواد آلی متوسط بودند، نشان داد که در رابطه بین فسفر رواناب محلول/فسفر خاک محلول در آب خاک با روش‌های برگزیده اندازه‌گیری فسفر خاک شامل اولسن، مهلیچ-۳، نوار کاغذی اکسید آهن و بری-۱، نقطه شکستگی فقط برای روش نوارهای کاغذی اکسید آهن برای هر دو حالت رواناب و محلول در آب به ترتیب ۴۵/۳ و ۳۸/۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر به‌دست آمده است. Sims و همکاران (۲۰۰۲)، نشان دادند، بعد از این‌که غلظت فسفر مهلیچ-۳ خاک از میزان ۱۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم فراتر رفت، میزان افزایش فسفر رواناب محلول افزایش سریع‌تری پیدا کرد. Hansen و همکاران (۲۰۰۲)، برای خاک‌های با واکنش خنثی تا قلیایی مورد پژوهش خود، همبستگی خطی ضعیفی را بین روش‌های گوناگون اندازه‌گیری فسفر گزارش کردند.

در رواناب داشته باشد. بررسی ضریب همبستگی بین فسفر محلول در آب و روش‌های برگزیده اندازه‌گیری فسفر به‌کار گرفته شده در این پژوهش (شکل ۴) نشان داد، هر چهار روش اولسن، مهلیچ-۳، نوار کاغذی اکسید آهن و سلطان‌پور، برآورد به‌طور تقریبی یکسان و دقیقی از فسفر محلول ارائه می‌دهند، به‌طوری‌که تغییرات فسفر محلول به‌وسیله این روش‌ها با بالاتر از ۸۰ درصد اطمینان قابل برآورد است. Paulter و Sims (۲۰۰۰)، بین روش‌های نوار کاغذی اکسید آهن، مهلیچ-۱ و اکسالات آمونیوم اسیدی، روش نوار کاغذی اکسید آهن را روش دقیق‌تری برای برآورد فسفر محلول برای خاک‌های اسیدی Delaware به‌دست آوردند. در دامنه‌ای از خاک‌های اسیدی تا قلیایی ضعیف Ontario در کشور کانادا، روش نوار کاغذی اکسید آهن نسبت به روش‌های مهلیچ-۳، اولسن و بری-۱ برآورد بهتری ارائه داد (Wang و همکاران، ۲۰۱۵). همان‌گونه که در شکل ۴ دیده می‌شود، نقطه شکستگی برای تمام روش‌های اندازه‌گیری فسفر دیده شد، گرچه وضوح آن در روش اندازه‌گیری نوارهای کاغذی اکسید آهن بیش از سایر روش‌ها بود. زیرا اختلاف شیب دو خطی که در بالا و پایین نقطه شکستگی قرار گرفته‌اند، برای روش نوارهای کاغذی اکسید آهن در حدود هشت برابر و برای سه روش دیگر در حدود دو تا سه برابر بوده است (برای روش نوارهای کاغذی اکسید آهن، شیب خط قرار گرفته شده در پایین نقطه شکستگی ۰/۱۲ و برای خط بالای این نقطه، ۰/۸۶ به‌دست آمده است).

رابطه بین غلظت فسفر رواناب و غلظت فسفر فراهم به روش‌های برگزیده: در پژوهش حاضر، با بررسی رابطه بین فسفر محلول رواناب و فسفر فراهم خاک اندازه‌گیری‌شده با روش‌های برگزیده، نقطه شکستگی برای تمام روش‌های اندازه‌گیری فسفر دیده شد (شکل ۵). در اینجا نیز همانند رابطه بین روش‌های گوناگون اندازه‌گیری فسفر و میزان فسفر محلول (شکل ۴)، وضوح نقطه شکستگی در روش اندازه‌گیری نوارهای کاغذی اکسید آهن بیش از سایر روش‌ها بود و ضریب تبیین برای این روش بالا (۰/۸۳ درصد) به‌دست آمد. بنابراین، می‌توان نتیجه‌گیری کرد، روش نوارهای کاغذی اکسید آهن برای تعیین

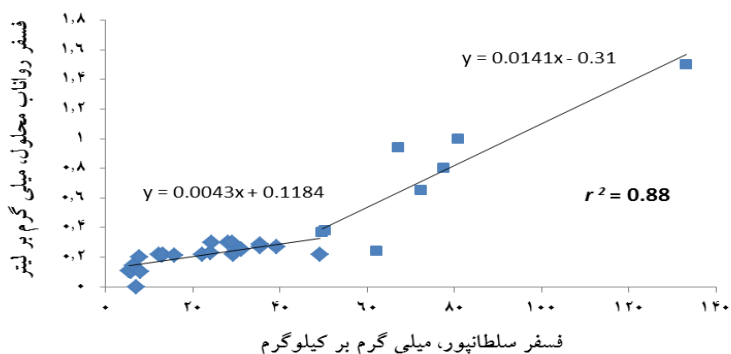
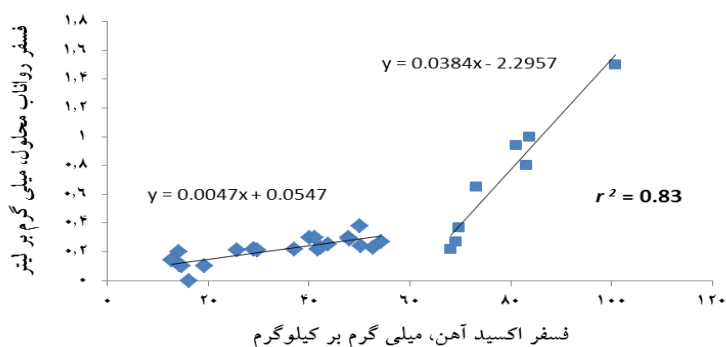
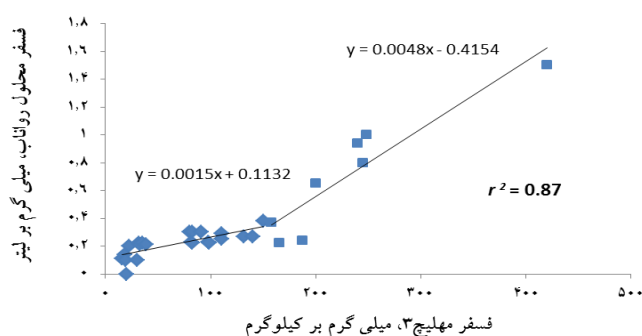
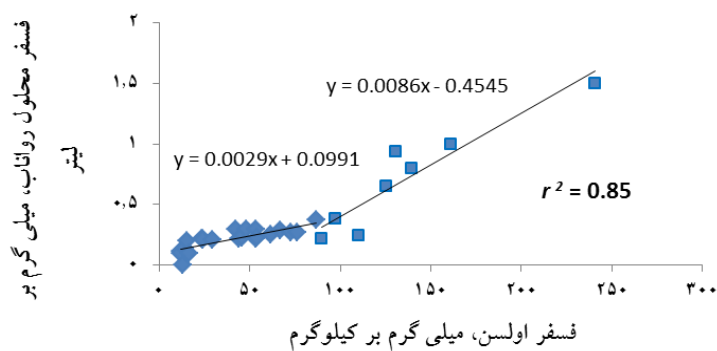


شکل ۴- رابطه بین فسفر محلول در آب و چهار روش گوناگون اندازه‌گیری فسفر به‌کار گرفته‌شده در این پژوهش (ضریب تبیین نوشته شده مربوط به معادله منحنی برازش داده‌شده به داده‌ها است. در هر نمودار، هر یک از دو دسته نقاط مربوط به دو خط برازش داده شده است)

رواناب و روش‌های برگزیده اندازه‌گیری فسفر به‌کار گرفته‌شده در این پژوهش، برای هر چهار روش اولسن، مهلیج-۳، نوارهای کاغذی اکسید آهن و سلطان‌پور،

نتیجه دیگری که از بررسی روابط به‌دست آمده برای خاک‌های پژوهش حاضر (شکل ۵) به‌دست آمد، این است که ضریب همبستگی بین فسفر محلول

برآورد به‌طور تقریبی یکسان و دقیقی از فسفر محلول رواناب می‌دهند، به‌طوری که تغییرات فسفر رواناب به‌وسیله این روش‌ها با بالاتر از ۸۵ درصد اطمینان قابل برآورد است.



شکل ۵- رابطه بین میزان فسفر خاک اندازه‌گیری شده به چهار روش برگزیده و فسفر محلول رواناب (ضریب تبیین نوشته‌شده مربوط به معادله منحنی برازش داده‌شده به داده‌ها است. در هر نمودار، هر یک از دو دسته نقاط مربوط به دو خط برازش داده‌شده است)

نتیجه‌گیری

محلول رواناب، اختلاف شیب دو خط بالا و پایین نقطه شکستگی در روش اندازه‌گیری نوارهای کاغذی اکسید آهن بیش از سایر روش‌ها بود و ضریب تبیین برای هر دو رابطه اندازه بالایی به- دست آمد (بالای ۸۲ درصد)، می‌توان نتیجه‌گیری کرد، روش نوارهای کاغذی اکسید آهن برای تعیین غلظت آستانه زیست‌محیطی فسفر نسبت به سایر روش‌های اندازه‌گیری فسفر فراهم به‌کار گرفته شده در این پژوهش، برتری دارد.

برای تمام نمونه خاک‌های این پژوهش در غلظت فسفر رواناب محلول برابر ۰/۳۶ میلی‌گرم بر لیتر نقطه شکستگی دیده شد. با در نظرگیری حد استاندارد غلظت ۰/۴۵ میلی‌گرم بر لیتر غلظت این شکل از فسفر به‌عنوان غلظت آستانه برای رخداد پدیده شکستگی جلبکی، نتیجه‌گیری می‌شود که غلظت به‌دست آمده برای خاک‌های این پژوهش، پایین‌تر از حد آستانه زیست‌محیطی قرار دارد.

یافته‌های این پژوهش نشان دادند که:

- می‌توان غلظت آستانه زیست‌محیطی فسفر را بر اساس به‌ترتیب فسفر محلول خاک و فسفر محلول رواناب برای خاک‌های این پژوهش تعیین کرد. تعیین بر اساس رواناب روشی است که به‌طور مستقیم می‌توان غلظت آستانه را به‌دست آورد. با این وجود، این روش مستلزم به‌کارگیری دستگاه شبیه‌ساز باران و سینی‌های آن است و زمان‌بر است. روش تعیین غلظت آستانه به‌وسیله فسفر محلول خاک دشواری‌های یادشده برای روش پیشین را ندارد و بنابراین، روش ساده‌تری نسبت به آن روش‌ها است و کاربرد آن برای خاک‌های این پژوهش توصیه می‌شود.
- از آنجایی که در رابطه بین میزان فسفر محلول خاک و روش‌های گوناگون اندازه‌گیری فسفر فراهم خاک همانند رابطه بین این روش‌ها و میزان فسفر

منابع مورد استفاده

1. Hansen, N.C., T.C. Daniel, A.N. Sharpley and J.L. Lemunyon. 2002. The fate and transport of phosphorus in agricultural systems. *Journal of Soil and Water Conservation*, 57: 408-417.
2. Hesketh, N. and P.C. Brookes. 1995. Development of an indicator for risk of phosphorus leaching. *Journal of Environmental Quality*, 29: 105-110.
3. Ige, D.V., O.O. Akinremi, D.N. Flaten, B. Ajiboye and M.A. Kashem. 2005. Phosphorus sorption capacity of alkaline Manitoba soils and its relationship to soil properties. *Canadian Journal of Soil Science*, 85: 417-426.
4. Kleinman, P.J.A., A.N. Sharpley, T.L. Veith, R.O. Maguire and P.A. Vadas. 2004. Evaluation of phosphorus transport in surface runoff from packed boxes. *Journal of Environmental Quality*, 33: 1413-1423.
5. McDowell, R.W. and L.M. Trudgill. 2000. Developing a predictor for phosphorus loss from soil. In L.D. Currie (ed.) *Best soil management practices for production pages 153-164. Fertilizer and Lime Res. Centre, 12th Annual Workshop, Palmerston North, New Zealand. 10-13 Feb. 1999. Massey University, Palmerston North, New Zealand.*
6. McDowell, R.W. and A. N. Sharpley. 2001. Approximating phosphorus release from soils to surface runoff and subsurface drainage. *Journal of Environmental Quality*, 30: 508-520.
7. Mehlich, A. 1984. Mehlich III soil test extractant: a modification of Mehlich II extractant. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 15: 1409-1416.
8. Murphy, J. and H.P. Riley. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta*, 27: 31-36.
9. Nair, V.D., G.H. Willie and D. Chakraborty. 2013. An indicator for risk of phosphorus loss from sandy soils. *IFAS Extension*, 2: 1-3.
10. Oliveira, M. and A.V. Machado. 2013. The role of phosphorus on eutrophication: a historical review and future perspectives. *Environmental Technology Reviews*, 2: 117-127.
11. 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. *Environmental Science*, 939: 1-19.
12. Olsen, S.R. and L.E. Sommers. 1982. Phosphorus, in *methods of soil analysis, Part 2. Madison*, pages 403-430.
13. Pote, D.H., T.C. Daniel, D.J. Nichols, A.N. Sharpley, P.A. Moore, D.M. Miller and D.R. Edwards. 1999. Relationship between phosphorus levels in three Ultisols and phosphorus concentrations in runoff. *Journal of Environmental Quality*, 28: 170-175.

14. Pote, D.H., T.C. Daniel, A.N. Sharpley, P.A. Moore, D.R. Edwards and D.J. Nichols. 1996. Relating extractable soil phosphorus to phosphorus losses in runoff. *Soil Science Society of America Journal*, 60: 855–859.
15. Sharpley, A.N. 1995. Dependence of runoff phosphorus on extractable soil phosphorus. *Journal of Environmental Quality*, 24: 920-926.
16. Smith, D.R., K.W. King and M.R. Williams. 2015. What is causing the harmful algal blooms in Lake Erie? *Journal of Soil and Water Conservation*, 70: 27a-29a.
17. Sims, J.T. 2002. Environmental soil testing for phosphorus. *Journal of Production Agriculture*, 6: 501–507.
18. Soltanpour, P.N. and A.P. Schwab. 1977. A new soil test for simultaneous extraction of macro and micro-nutrients in alkaline soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 8: 195-207.
19. Thomas, G.W. 1996. Soil pH and soil acidity. *Methods of soil analysis: part 3, chemical methods*, 475–490 pages.
20. Walkley, A. and L.A. Black. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil science*, 37: 29-38.
21. Wang, Y.J., T.Q. Zhanga, I.P. O'Halloranb, Q.C. Hua, C.S. Tana, D. Speranzini, I. Macdonalde and G. Patterson. 2010. Agronomic and environmental soil phosphorus tests for predicting potential phosphorus loss from Ontario soils. *Geoderma*, 241–242: 51–58.
22. Wang, Y.T., I.P. OHalloran, T.Q. Zhang, Q.C. Hu and C.S. Tan. 2015. Phosphorus sorption parameters of soils and their relationships with soil test phosphorus. *Soil Science Society of America Journal*, 79: 672- 680.
23. Yli-Halla, M., H. Hartikainen, P. Ekholm, E. Turtola, M. Puustinen and K. Kallio. 1995. Assessment of soluble phosphorus load in surface runoff by soil analyses. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 56: 53–62.