

## برآورد هدررفت فسفر از طریق رواناب با به‌کارگیری دستگاه شبیه‌ساز باران در خاک‌های آهکی حوزه آبخیز تلخه‌رود

رامین سلماسی<sup>۱</sup>، محسن فرح‌بخش<sup>۲\*</sup> و حسین اسدی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دوره دکترای رشته علوم و مهندسی خاک، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران و <sup>۲،۳</sup> دانشیار، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۷/۱۸

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۲/۱۸

### چکیده

هدررفت فسفر خاک از طریق رواناب ممکن است، باعث بالا رفتن غلظت فسفر آب‌های سطحی به اندازه‌ای شود که موجب شکستگی جلبکی در سامانه‌های آبی شود. در نتیجه، بررسی ارتباط بین غلظت فسفر محلول رواناب و غلظت فسفر فراهم خاک برای مدیریت فسفر در آب‌های سطحی و نیز تعیین سطح بحرانی فسفر فراهم خاک ضروری است. برای انجام این کار، از ۳۰ نقطه حوزه آبخیز تلخه‌رود که فسفر فراهم آن‌ها در دامنه گسترده‌ای قرار داشت، نمونه‌های خاک برداشت شدند. پس از تعیین ویژگی‌های عمومی، فسفر فراهم خاک‌ها با استفاده از روش‌های اولسن، مهلیچ-۳، سلطان‌پور و صافی آغشته به اکسید آهن اندازه‌گیری شد. سپس، نمونه‌های خاک با فشردگی یکسان درون سینی‌هایی به ابعاد ۳۰ در ۶۰ سانتی‌متر ریخته و به مدت ۳۰ دقیقه در شیب پنج درصد تحت باران با شدت ۷۵ میلی‌متر بر ساعت قرار داده شدند. از رواناب خروجی در فواصل زمانی مختلف نمونه‌برداری و غلظت فسفر محلول آن‌ها اندازه‌گیری شد. همبستگی بین فسفر محلول رواناب و فسفر فراهم خاک‌ها که به چهار روش اندازه‌گیری شده بودند، معنی‌دار بود. غلظت آستانه فسفر فراهم برای روش‌های اولسن، مهلیچ-۳، صافی آغشته به اکسید آهن و سلطان‌پور به ترتیب ۸۶، ۱۴۰، ۵۲ و ۴۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم به‌دست آمد. همچنین، هر چهار روش غلظت آستانه فسفر محلول رواناب را در بازه باریک ۰/۳۸ تا ۰/۴ میلی‌گرم بر لیتر نشان دادند.

**واژه‌های کلیدی:** روش‌های اندازه‌گیری غلظت فسفر، سامانه‌های آبی، شکستگی جلبکی، غلظت آستانه، فسفر محلول

### مقدمه

ارزش گردشگری محیط زیست می‌شود (Bundy و همکاران، ۲۰۰۱).

از آنجایی که فسفر به‌عنوان محدود کننده‌ترین عنصر برای رشد جلبک‌ها شناخته شده است، مهار سطوح این عنصر در رواناب به‌عنوان بهترین روش به کمینه رساندن این پدیده پیشنهاد شده است (Little, Sharpley؛ ۱۹۸۸ و همکاران، ۱۹۹۴). اغلب، این‌گونه در نظر گرفته می‌شود که فسفر در خاک غیر فعال

هدررفت عناصر غذایی با رواناب از زمین‌های زراعی از جنبه زیست‌محیطی بسیار حایز اهمیت است. زیرا، این عناصر رشد علف‌های هرز و جلبک‌ها را در رودخانه‌ها و دریاچه‌ها تقویت می‌کنند. زمانی که علف‌ها و جلبک‌ها پس از مرگ تجزیه می‌شوند، میزان اکسیژن محلول رودخانه‌ها و دریاچه‌ها کاهش می‌یابد که منجر به مرگ ماهی‌ها، منظره نامناسب و افت

تقسیم می‌کند که یکی از این دو هدررفت بیشتر فسفر را در واحد افزایش فسفر خاک نشان می‌دهد. نقطه شکستگی برآوردی از یک رابطه خطی-منحنی است، اما می‌تواند به‌عنوان یک ابزار مدیریتی به‌کار رود که نشان می‌دهد در چه غلظتی از فسفر خاک، توانایی خطر هدررفت فسفر افزایش می‌یابد. McDowell و همکاران (۲۰۰۱) اظهار داشتند که در بیشتر موارد، تشخیص نقطه عطف دشوار است و دست‌کم هشت سطح گوناگون دربرگیرنده دامنه گوناگونی از فسفر لازم است تا یک نقطه عطف شناسایی شود. 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. سطوح بحرانی و ارتباط بین هدررفت فسفر و فسفر خاک ویژه هر خاک بوده، به ویژگی‌های خاک و محل بستگی دارد (Daniel و همکاران، ۱۹۹۴؛ Sharpley و همکاران، ۱۹۹۶؛ Pote و همکاران، ۱۹۹۹؛ Cox و Hendricks، ۲۰۰۰).

در حوزه آبخیز تلخه‌رود واقع در استان آذربایجان شرقی، کاربرد طولانی مدت 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 باشد. پژوهش حاضر به‌گونه‌ای طراحی شده است که تعیین کند کدام روش اندازه‌گیری فسفر خاک، بالاترین همبستگی را با فسفر رواناب محلول برای خاک‌های آهکی نماینده حوزه آبخیز تلخه‌رود در آذربایجان شرقی دارد. برای این کار، چهار روش اندازه‌گیری فسفر شامل روش‌های عصاره‌گیری اولسن، مهلیچ-۳، سلطان‌پور، صافی آغشته به اکسید آهن برگزیده شدند. چون این چهار روش، روش‌های اندازه‌گیری فسفر فراهم برای خاک‌های آهکی به‌شمار می‌روند. در نهایت، یافته‌های به‌دست آمده غلظت بحرانی فسفر برای خاک‌های این پژوهش با یافته‌های به‌دست آمده برای خاک‌های سایر مناطق مورد سنجش و ارزیابی قرار می‌گیرند.

است، به‌طوری‌که هدررفت آن از حوزه‌های آبخیز از جنبه کشاورزی به‌طور معمول مهم نیست. اما حتی هدررفت‌های زراعی اندک آن از لحاظ زیست محیطی اهمیت جدی دارد. در حقیقت، خاک‌هایی که در نتیجه کوددهی زیاد سطوح بالایی از فسفر را دارند، می‌توانند سرچشمه آغازین فسفر محلول رواناب، شکلی از فسفر که بلافاصله برای جذب به‌وسیله آبزیان در دسترس است، به‌شمار روند.

همبستگی بین روش‌های گوناگون اندازه‌گیری فسفر خاک و غلظت فسفر در رواناب‌های حوزه‌های آبخیز در بررسی‌های آزمایشگاهی و صحرایی نشان داده شده است (Shapley، ۱۹۹۵a؛ Yli-Hala و همکاران، ۱۹۹۵؛ Pote و همکاران، ۱۹۹۶ و ۱۹۹۹؛ Hooda و همکاران، ۲۰۰۰). به‌دلیل این همبستگی، مقادیر بالای فسفر خاک ممکن است غلظت فسفر رواناب را به اندازه کافی بالا ببرد و باعث رشد سریع جلبک‌ها و شکستگی جلبکی<sup>۱</sup> در پیکره‌های آبی شود که در آن‌ها فسفر عنصر محدود کننده به‌شمار می‌رود. این ارتباط می‌بایست در توسعه استراتژی‌های مدیریت فسفر که شکستگی جلبکی را محدود می‌کنند و در عین حال تولید محصول را در سطح بالایی نگه می‌دارند، در نظر گرفته شود. همچنین، از این ارتباط می‌توان برای تعیین سطح بحرانی فسفر خاک بهره برد. سطحی که در بالاتر از آن، فسفر اثر منفی بر کیفیت آب خواهد گذاشت. استراتژی دیگر برای مدیریت فسفر خاک-فسفر رواناب این است که این سطح بحرانی در خاک تعیین و از افزودن بیشتر کود فسفر شیمیایی یا دامی پیشگیری شود. به‌منظور بهره‌برداری کارا از روش‌ها و داده‌های آزمون خاک در حفاظت از کیفیت آب، می‌بایست سطوح آستانه غلظت فسفر خاک تعریف شوند. یک رویکرد نو در این رابطه، به‌کارگیری مدل خط شکسته<sup>۲</sup> می‌باشد. در این رویکرد، یک نقطه شکستگی رابطه بین فسفر خاک و فسفر موجود در زه‌آب‌های زیرسطحی (Hesketh و Brooks، ۲۰۰۰؛ McDowell و Sharpley، ۲۰۰۱؛ McDowell و Trudgill، ۲۰۰۰) یا رواناب‌های سطحی (McDowell و Sharpley، ۲۰۰۱) را به دو بخش

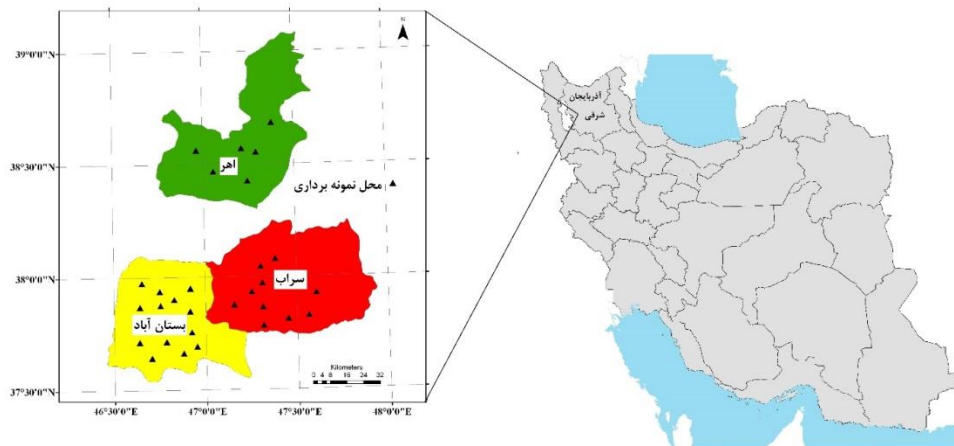
<sup>1</sup> Eutrophication

<sup>2</sup> Split-line models

## مواد و روش‌ها

نمونه‌های خاک از اطراف شهرستان‌های بستان-آباد، سراب و اهر در استان آذربایجان شرقی تهیه شدند (شکل ۱). کاربری زمین‌ها، مرتع و کشاورزی،

آبی و دیم، بود. تعداد ۳۰ نمونه خاک از این مناطق در تابستان سال ۱۳۹۴ پیش از کاربرد کودهای دامی یا شیمیایی از لایه سطحی (عمق صفر تا ۱۵ سانتی‌متر) به روش مرکب برداشت شد.



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

مترمکعب فشرده‌گی لازم بر آن‌ها اعمال شد. سپس نمونه‌های خاک 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 نیم ساعت بر این سینی‌ها اعمال شد. از آن جایی‌که عمده فرسایش و تولید رواناب و رسوب در شدت‌های بالا انجام می‌گیرد و در بیشتر پژوهش‌های مشابه انجام گرفته، شدت ۷۵ میلی‌متر بر ساعت به کار گرفته می‌شود، در پژوهش حاضر نیز از شدت یاد شده بهره‌گیری شد. دستگاه شبیه‌ساز باران به کار گرفته شده از سه قسمت آب‌پاش با تنظیم‌کننده فشار برای تولید بارش استاندارد، پایه برای آب‌پاش و قاب فلزی که سینی خاک در داخل آن قرار می‌گیرد، تشکیل شده است. بعد از شروع بارندگی، رواناب حاصل در فواصل زمانی گوناگون صفر تا سه، سه تا هفت، هفت تا ۱۲، ۱۲ تا ۲۰ و ۲۰ تا ۳۰ دقیقه جمع‌آوری شد. از آن جایی‌که در ابتدای شروع رواناب نسبت به زمان‌های پایانی در نظر گرفته شده، میزان بیشتری فسفر از سطح خاک شستشو پیدا می‌کند، 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

بعد از این‌که نمونه‌ها در آزمایشگاه خشک و کوبیده شدند، از غربال دو میلی‌متری گذرانده شده، برای انجام آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی نگه‌داری شدند. در آزمایشگاه، اسیدیته محلول نمونه‌های خاک با استفاده از دستگاه pH متر (Metrohm-744) در سوسپانسیون ۱:۱ خاک به آب مقطر (Thomas, ۱۹۹۶)، اندازه‌گیری مواد آلی با استفاده از روش والکلی-بلک (۱۹۳۴)، تعیین توزیع اندازه ذرات خاک به روش هیدرومتر (Gee و Bauder, ۲۰۰۲) و از روش تیتراسیون برای اندازه‌گیری درصد کربنات کلسیم معادل نمونه‌ها بهره گرفته شد (Jones, ۲۰۰۱).

فسفر فراهم خاک به روش‌های بی‌کربنات سدیم (Olsen و همکاران، ۱۹۵۴)، صافی آغشته به اکسید آهن (Chardon, ۲۰۰۰)، مهلیچ-۳ (Mehlich, ۱۹۸۴) و آمونیوم بی‌کربنات-دی‌تی‌پی (Soltanpour و Schwab, ۱۹۷۷) اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری غلظت فسفر در عصاره‌های یاد شده با دستگاه اسپکتروفتومتر (Jenway, 6705) با به‌کارگیری روش Murphy و Riley (۱۹۶۲) انجام گرفت.

برای انجام آزمایش‌های مربوط به باران‌ساز، نمونه‌های خاک درون سینی‌های به ابعاد ۳۰ در ۶۰ سانتی‌متر و دارای سوراخ‌های زهکشی ریخته، برای رساندن به چگالی ظاهری ۱۳۰۰ کیلوگرم بر

لیتر در ۱۰ دقیقه انتهایی رخداد بارندگی رسید. علت این نوسان‌های رواناب، تفاوت سرعت نفوذ به‌ویژه جریان‌های خلل و فرج درشت می‌باشد. با پیش‌رفت رخداد رواناب، میزان آب زیر لایه سطحی خاک افزایش می‌یابد، نرخ نفوذپذیری کاهش می‌یابد و پیامد آن افزایش میزان رواناب است (Pote و همکاران، ۱۹۹۶).

غلظت فسفر محلول رواناب در تمام سینی‌ها طی رخداد بارندگی به‌طور ثابت کاهش یافت (شکل ۲-ب). میانگین غلظت فسفر رواناب نمونه‌های خاک مورد آزمایش، در ۱۰ دقیقه نخست ۲/۲ و در ۱۰ دقیقه انتهایی به ۰/۴ میلی‌گرم در لیتر کاهش یافت. این کاهش به‌طور اساسی به‌دلیل اثر رقت رواناب است (Pote و همکاران، ۱۹۹۶)، شامل آبی که تماس مستقیم با سطح خاک ندارد. به این مفهوم که با گذشت رخداد بارندگی، ذرات معلق خاک موجود در رواناب کاهش می‌یابد که پیامد آن کاهش غلظت فسفر محلول رواناب می‌باشد. همچنین، بخشی از کاهش غلظت فسفر محلول فعال مربوط به شستشوی فسفری می‌شود که در آغاز در محلول خاک وجود داشته است (Pote و همکاران، ۱۹۹۶؛ Andraski و Bundy، ۲۰۰۳).

**رابطه بین فسفر محلول رواناب و فسفر فراهم خاک:** غلظت میانگین فسفر محلول رواناب نمونه‌ها در دامنه ۰/۱۰ تا ۰/۶۵ میلی‌گرم بر لیتر قرار داشت و میانگین آن ۰/۲۲ میلی‌گرم بر لیتر بود. این دامنه به نسبت بالای فسفر رواناب محلول نشانگر نوسان‌های بالای غلظت فسفر فراهم خاک است (جدول ۱). Wortman و Walters (۲۰۰۶) نیز گزارش کردند که تغییرات فسفر فراهم خاک، باعث ۶۰ تا ۹۰ درصد نوسان‌ها در میزان فسفر محلول رواناب می‌شود. ضریب تبیین ( $R^2$ ) بین فسفر رواناب محلول و غلظت فسفر فراهم اندازه‌گیری شده خاک با چهار روش گوناگون در جدول ۲ آمده است. برای خاک‌های این پژوهش، مقادیر اندازه‌گیری شده فسفر به چهار روش گوناگون اندازه‌گیری فسفر به‌نام‌های اولسن، مهلیچ-۳، صافی آغشته به اکسید آهن و سلطان‌پور، همبستگی معنی‌دار با میزان فسفر رواناب محلول ( $p < 0.01$ ) نشان دادند. این چهار روش، برآورد به نسبت مشابهی

جمع‌آوری شد. نمونه‌های رواناب جمع‌آوری شده برای اندازه‌گیری میزان فسفر محلول به آزمایشگاه منتقل شدند. اندازه‌گیری فسفر محلول در رواناب نیز به‌وسیله دستگاه اسپکتروفتومتر Jenway با بهره‌گیری از روش Murphy و Riley (۱۹۶۲) انجام گرفت. فسفر محلول رواناب اشاره به بخشی از فسفر رواناب دارد که از صافی غشایی ۰/۴۵ میکرومتر عبور می‌کند. تجزیه و تحلیل‌های آماری انجام گرفته با به‌کارگیری نرم‌افزار Excel و تعیین نقطه شکستگی (نقطه عطف) 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 داده شده به تمام این نقاط دارای ضریب همبستگی پایین باشد، در حالی‌که منحنی برازش داده شده 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.

## 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 که خاک‌ها دارای واکنش قلیایی، میزان مواد آلی کم، درصد آهک نمونه‌ها کم تا متوسط و بافت خاک‌ها در دامنه لوم تا لوم رسی می‌باشند.

**داده‌های پایه باران‌ساز:** حجم رواناب نمونه‌های خاک درون سینی‌ها از ۳۰/۵ میلی‌لیتر (میانگین برای بافت‌های لوم رسی) تا ۲۴ میلی‌لیتر (میانگین برای بافت‌های رسی) نوسان داشت. خاک‌های دارای بافت رسی چون بافت سنگین‌تری از بافت لوم رسی دارند، نفوذپذیری کمتری داشته، حجم رواناب در آن‌ها بیشتر خواهد بود. طی روند ۳۰ دقیقه‌ای بارندگی، حجم رواناب سطحی برای تمام نمونه‌های خاک از کم تا زیاد نوسان داشت (شکل ۱-الف). به‌طوری‌که حجم میانگین رواناب سطحی نمونه‌های خاک مورد آزمایش، از پنج میلی‌لیتر در ۱۰ دقیقه نخست به ۱۰/۸ میلی-

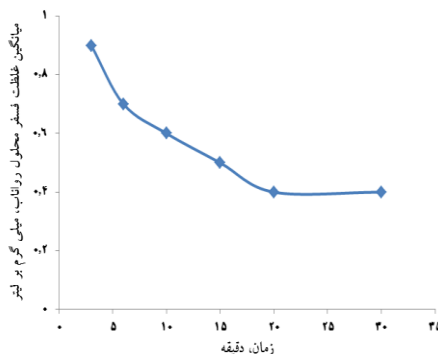
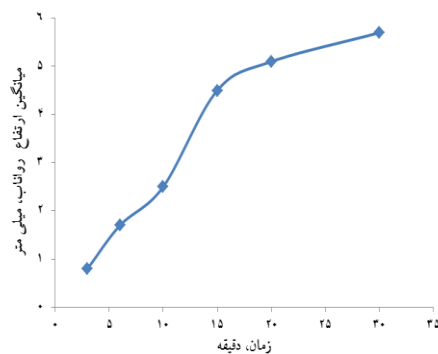
آغشته به اکسید آهن، همبستگی معنی‌داری ( $p < 0.001$ ) با غلظت فسفر رواناب محلول در کرت-های رواناب داشت و این همبستگی برای فسفر صافی آغشته به اکسید آهن بیشترین مقدار بوده است.

(بالای ۸۰ درصد) از فسفر رواناب محلول نشان دادند. Pote و همکاران (۱۹۹۶) برای خاک‌های دارای واکنش اسیدی با مواد آلی کم و بافت لوم سیلتی نشان دادند که میزان فسفر اندازه‌گیری شده به روش‌های گوناگون شامل مهلیج-۳، اولسن و صافی

جدول ۱- کمینه، بیشینه، میانگین و انحراف استاندارد برخی ویژگی‌های پایه در ۳۰ نمونه 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 (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	۱۱/۷	۲۴۰/۸	۶۶/۱	۱۴/۰
غلظت فسفر مهلیج-۳ (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	۱۶/۱	۴۲۰/۷	۱۱۷/۰	۳۴/۰
غلظت فسفر صافی آغشته به اکسید آهن (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	۱۲/۸	۱۰۰/۷	۴۸/۰	۱۸/۲
غلظت فسفر سلطان‌پور (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	۵/۹	۹۱/۳	۳۷/۵	۷/۸

Sharpley و همکاران (۱۹۹۶) نیز فسفر صافی آغشته به کسید آهن را دقیق‌ترین برآورد فسفر رواناب محلول گزارش کردند. برای خاک‌های آهکی و مواد آلی متوسط و دارای میزان رس بالا در منطقه Minnesota نشان داده شد که بین مقادیر اندازه‌گیری شده فسفر به روش‌های صافی آغشته به اکسید آهن، اولسن، بری، هیدروکسید سدیم و مهلیج-۳، روش‌های اولسن و مهلیج-۳، همبستگی معنی‌داری با فسفر رواناب محلول داشته‌اند (Fang و همکاران، ۲۰۰۲). Alen و همکاران (۲۰۰۶) برای خاک‌های اسیدی و آهکی با بافت لومی تا لوم رسی خاک‌های غرب میانه ایالات متحده همبستگی بالای روش‌های اولسن و صافی آغشته به اکسید آهن نسبت به روش‌های مهلیج-۳ و بری-۱ با فسفر محلول رواناب را به-دست آوردند. این روش همچنین، برآورد بهتری از



شکل ۱- تغییرات زمانی میانگین ارتفاع رواناب و میانگین غلظت فسفر محلول رواناب برای ۳۰ نمونه خاک

میزان فسفر فراهم خاک اندازه‌گیری شده به‌وسیله چهار روش اندازه‌گیری فسفر فراهم به‌کار گرفته شده در این پژوهش و غلظت فسفر رواناب محلول که با کاربرد دستگاه شبیه‌ساز باران بر روی سینی‌ها اعمال شده است را نشان می‌دهد.

فراهمی زیستی فسفر در رسوبات رواناب‌های کشاورزی ارائه می‌دهد (Sharpley و همکاران، ۱۹۹۴). در بین روش‌های گوناگون اندازه‌گیری فسفر فراهم در این پژوهش، روش اندازه‌گیری اولسن بیشتر مورد توجه قرار گرفته است، چون روش توصیه‌شده زراعی برای بیشتر خاک‌های ایران است. شکل ۲، رابطه بین

**جدول ۲- ضریب تبیین غیرخطی بین مقادیر اندازه‌گیری شده غلظت فسفر فراهم به‌روش‌های گوناگون با غلظت فسفر محلول رواناب**

روش‌های اندازه‌گیری فسفر فراهم	ضریب تبیین ( $r^2$ ) با فسفر رواناب محلول
اولسن	۰/۸۵***
مهلیج-۳	۰/۸۷***
صافی آغشته به اکسید آهن	۰/۸۳***
سلطان‌پور	۰/۸۸***

روش دیگر در حدود سه برابر بوده است. 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 (۲۰۱۰) بر روی شش سری خاک از ایالت Ontario 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 و روش‌های گوناگون اندازه‌گیری غلظت فسفر فراهم خاک شامل اولسن، مهلیج-۳، صافی آغشته به اکسید آهن و بری-۱، نقطه شکستگی فقط برای روش صافی آغشته به اکسید آهن مشاهده شده است. Sims (۲۰۰۲) نشان داد که بعد از این‌که غلظت فسفر مهلیج-۳ خاک از میزان ۱۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم فراتر رفت، میزان افزایش فسفر رواناب محلول افزایش سریع‌تری پیدا کرد. Bundu و Andraski (۲۰۰۳) گزارش کردند، افزایش خطی برای غلظت فسفر رواناب محلول با افزایش فسفر خاک در پژوهش انجام گرفته به‌وسیله دستگاه شبیه‌ساز باران وجود داشته است. Casson و همکاران (۲۰۰۶) برای خاک‌های با واکنش خنثی تا قلیایی مورد پژوهش خود، همبستگی خطی ضعیفی را بین روش‌های گوناگون اندازه‌گیری فسفر گزارش کردند.

**حدود بحرانی زیست‌محیطی غلظت فسفر:** آژانس مهار آلودگی Minnesota در ایالات متحده، حد ۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم فسفر عصاره‌گیری شده با آب

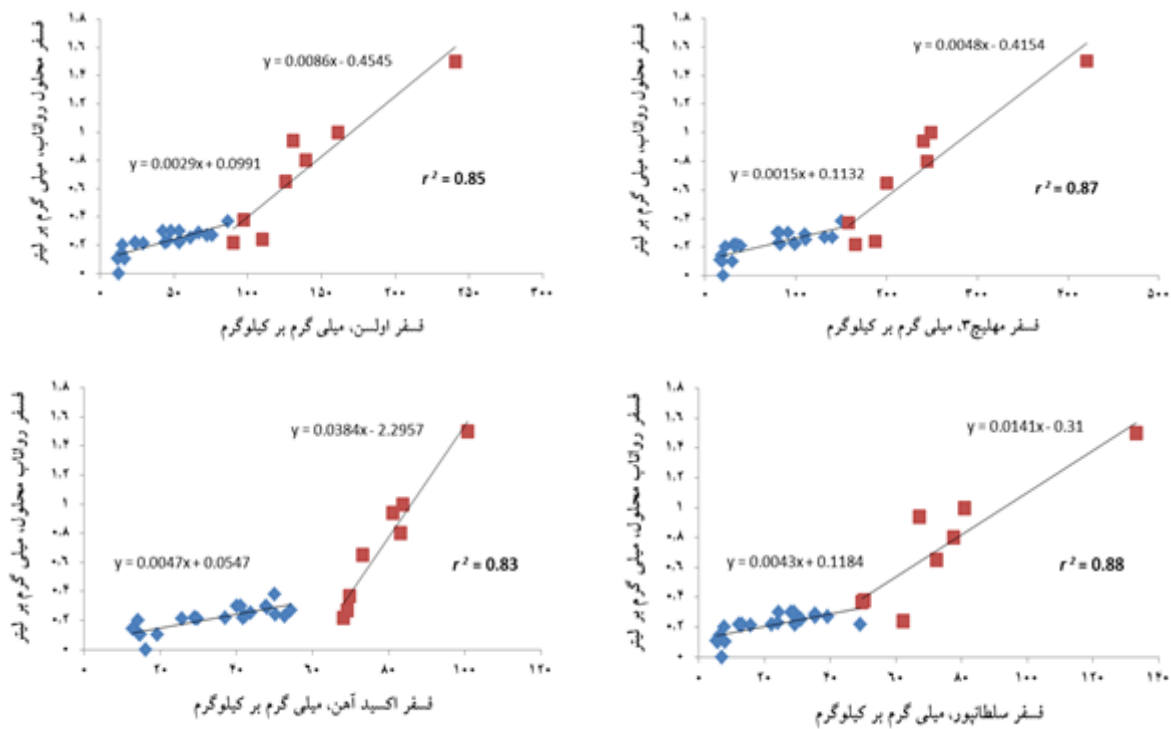
همان‌گونه که در شکل ۱ دیده می‌شود، روش اولسن همبستگی بالایی با فسفر رواناب محلول نشان داد. عصاره‌گیر اولسن ( $\text{pH}=8/5$ ;  $\text{NaHCO}_3$  ۰/۵ مولار) با انحلال بیشتر کانی‌های فسفردار خاک، باعث رهاسازی فسفر به محلول خاک می‌شوند. در نتیجه برای خاک‌های آهکی، این روش اندازه‌گیری فسفر برای شناسایی وضعیت فسفر فراهم گیاه بهترین روش به‌شمار می‌رود (Sims، ۲۰۰۰). با این وجود، مطالعه‌های گذشته اثرهای ناپایدار واکنش خاک را برای پیش‌گویی هدررفت فسفر رواناب محلول نشان داده‌اند.

Fang و همکاران (۲۰۰۲) و Hi و همکاران (۲۰۰۶) نشان دادند، روش اولسن نسبت به سایر روش‌ها برآورد دقیق‌تری از غلظت فسفر رواناب محلول در خاک‌های با واکنش بیشتر از هفت داشته است. در مقابل آن، بررسی‌های Shiriar و همکاران (۲۰۰۶) نشان داد که روش اولسن نسبت به روش مهلیج-۳ دقت کمتری در برآورد غلظت فسفر محلول خاک‌های دارای واکنش ۷/۸ تا ۷/۹ دارد.

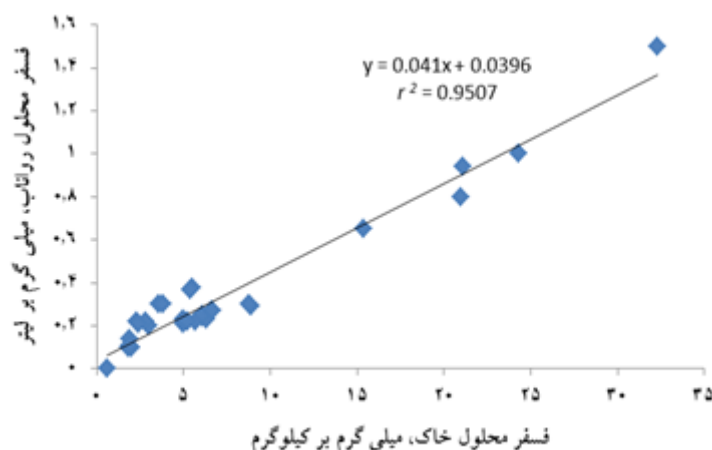
در این پژوهش، در رابطه بین فسفر رواناب محلول و روش‌های گوناگون اندازه‌گیری این عنصر، نقطه شکستگی برای تمام روش‌های اندازه‌گیری فسفر دیده شد، گرچه وضوح آن در روش اندازه‌گیری نوارهای کاغذی آغشته به اکسید آهن بیش از سایر روش‌ها بود (شکل ۲). زیرا اختلاف شیب دو خط برای روش صافی آغشته به اکسید آهن در حدود هشت برابر و برای سه

برای خاک‌ها بررسی شد. نتیجه در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود، ضریب تبیین ۰/۹۵ به دست آمد که در سطح ۰/۰۰۱ معنی‌دار است. بنابراین، می‌توان غلظت حد فسفر محلول خاک (۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) را در معادله به دست آمده جایگزین کرد که به این ترتیب، میزان فسفر رواناب ۰/۴۵ میلی‌گرم بر لیتر به دست می‌آید. بر پایه شکل ۲، در تمام نمونه خاک‌های این پژوهش نیز به‌طور تقریبی در بالاتر از این اندازه (۰/۴۵ میلی‌گرم بر لیتر فسفر رواناب محلول معادل ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر محلول خاک) غلظت فسفر خاک افزایش زیادی پیدا می‌کند که نشان می‌دهد، در بالاتر از این غلظت امکان بیشتر شکستگی جلبکی برای آب‌های منطقه وجود دارد.

مقطر موجود در خاک، در عصاره خاک به آب ۱:۱۰ را حد آلودگی آب‌های این منطقه تعیین کرده است. خاک‌های نمایانگر حوزه آبخیز Minnesota در رده مالی‌سول قرار داشته، آهکی بوده، دارای میزان رس بالا از ۳۳ تا ۵۹ درصد و مواد آلی کم از ۴/۷ تا ۸/۳ درصد می‌باشند. بنابراین، ویژگی‌های خاک‌های این حوزه با خاک‌های پژوهش حاضر شباهت دارند (جدول ۱). در صورتی‌که همین میزان حد برای خاک‌های این پژوهش در نظر گرفته شود (برای اندازه‌گیری غلظت فسفر محلول خاک‌های پژوهش حاضر نیز همین نسبت عصاره به کار گرفته شده است)، برای بررسی این موضوع که آیا این میزان حد آلودگی برای خاک‌های این پژوهش نیز صادق است یا خیر، نخست رابطه بین فسفر محلول خاک با فسفر محلول رواناب



شکل ۲- رابطه بین غلظت فسفر فراهم خاک اندازه‌گیری شده به چهار روش اندازه‌گیری و فسفر رواناب محلول (ضریب تبیین نشان داده شده مربوط به منحنی برازش داده شده به داده‌ها با بالاترین ضریب تبیین می‌باشد، تمام ضریب‌های تبیین در حد ۰/۰۰۱ معنی‌دار هستند)



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

### نتیجه گیری

با توجه به موارد یاد شده، مشخص می شود که غلظت آستانه می تواند به عنوان ابزار مدیریتی در حوزه های آبخیز برای تعیین میزانی از فسفر یا درجه اشباع فسفر خاک که خطر هدررفت فسفر را افزایش می دهد، کاربرد داشته باشد. به این صورت که در حوزه های آبخیز، خاک هایی که غلظت فسفر فراهم آن ها بالاتر از حد آستانه باشد (به عنوان مثال فسفر اولسن بالاتر از ۸۶ میلی گرم بر کیلوگرم)، غلظت فسفر محلول در آب آن ها با شیب خیلی بالاتری نسبت به غلظت های پایین تر افزایش می یابد و دارای توانایی بالای هدررفت فسفر محلول از طریق جریان های سطحی و آبشویی هستند و امکان تشدید غنی شدن در آب های این حوضه ها بالا است. بنابراین، برای کاهش مخاطره غنی شدن ناشی از فسفر در آب های این زیرحوضه، باید کودپاشی فسفره را به اندازه ای انجام داد که مقدار این عنصر در خاک پایین تر از اندازه یاد شده قرار گیرد. همچنین، می بایست متناسب با ویژگی های گوناگون حوضه نظیر ویژگی های آب-شناختی، زمین شناختی و خاک شناختی عملیات مدیریتی در آن اعمال شود.

همچنین، همان گونه که در این شکل دیده می شود، غلظت های آستانه زیست محیطی برای فسفر اندازه گیری شده به روش های اولسن، مهلیچ-۳، صافی آغشته به اکسید آهن و سلطان پور به ترتیب برابر ۸۶، ۱۴۰، ۵۲ و ۴۹ میلی گرم بر کیلوگرم به دست می آید. یافته های پژوهشی Hesketh و همکاران (۱۹۹۵) نشان داد، زمانی که غلظت فسفر اولسن خاک کمتر از ۶۰ میلی گرم بر کیلوگرم خاک بود، غلظت فسفر در زهاب ها، پایین آمد، تا جایی که این غلظت به طور سریع افزایش پیدا کرد تا زمانی که غلظت فسفر فراهم خاک از ۶۰ میلی گرم بر کیلوگرم فراتر رفت، یعنی غلظتی که نقطه عطف نام دارد. آن ها پیشنهاد کردند که در غلظت های پایین تر از ۶۰ میلی گرم بر کیلوگرم، فسفر معدنی بر روی مکان های پر انرژی جذب می شود و در غلظت های بالاتر از این مقدار، به وسیله مکان های کم انرژی نگه داشته می شود. با توجه به این که غلظت آستانه زراعی فسفر اولسن برای خاک های کشاورزی ایران ۱۵ تا ۳۰ میلی گرم بر کیلوگرم است، معلوم می شود که غلظت آستانه زیست محیطی به دست آمده در این پژوهش (۸۶ میلی گرم بر کیلوگرم) بالاتر از غلظت آستانه زراعی این عنصر می باشد.

### منابع مورد استفاده

1. Bundy, L.G., T.W. Andraski and J.M. Powell. 2001. Management practice effects on phosphorus losses in runoff in corn production systems. *Journal of Environmental Quality*, 30: 1822-1828.
2. Chardon, S.R. and L.E. Sommers. 2000. FeO-P. In: *Methods of Soil Analysis, Part 2, 2nd ed. Chemical and Microbiological Properties*. A.L. Page, R.H. Miller and D.R. Keeney (Eds.). ASA, Madison, WI, pp. 403-430.



3. Cox, F.R. and S.E. Hendricks. 2000. Soil test phosphorus and clay content effects on runoff water quality. *Journal of Environmental Quality*, 29: 1582–1586.
4. Daniel, J., R.C. Hird and R. Lawrie. 1997. Effects of animal effluents on the phosphorus sorption characteristics of soils. *Australian Journal of Soil Research*, 35: 365–373.
5. Fang, J., P. Dick and J. Baham. 2002. Organic amendments and phosphorus dynamics: I. phosphorus chemistry and sorption. *Soil Science*, 161: 426–435.
6. Gee, G.W. and J.W. Bauder. 1986. Particle-size analysis. In A. Klute (ed.) *Methods of soil analysis. Part 1*. 2nd ed. Agron Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI. p. 383–423.
7. Guidry, A.R., F.V. Schindler, D.R. German, R.H. Gelderman and J.R. Gerwing. 2006. Using simulated rainfall to evaluate field and indoor surface runoff phosphorus relationships. *Journal of Environmental Quality*, 35: 2236–2243.
8. Hesketh, N. and P.C. Brookes. 1995. Development of an indicator for risk of phosphorus leaching. *Journal of Environmental Quality*, 29: 105–110.
9. Hi, J., B. Bar-Yosef, R. Rosenberg and G. Spósito. 1988. Phosphorus adsorption by kaolinite and Montmorillonite: II. Organic anion competition. *Soil Science Society of America Journal*, 52: 1585–1589.
10. Hooda, P.S., A.R. Rendell, A.C. Edwards, P.J.A. Withers, M.N. Aitken and V.W. Truesdale. 2000. Relating soil phosphorus indices to potential phosphorus release to water. *Journal of Environmental Quality*, 29: 1166–1171.
11. Jones, B. 2001. *Conducting soil testing and plant analysis*. CRC press, LLC.
12. 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.
13. Little, M. 1988. Seasonal patterns in ulvoid algal biomass, productivity and key environmental factors in the Northeast Pacific. *Botanica Marina*, 46: 263–275.
14. McDowell, R.W. and L.M. Trudgill. 2000. Developing a predictor for phosphorus loss from soil. p. 153–164. In L.D. Currie (ed.) *Best soil management practices for production. Fertilizer and Lime Res. Centre 12th Annual Workshop, Palmerston North, New Zealand. 10–13 Feb. 1999*. Massey Univ., Palmerston North, New Zealand.
15. 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.
16. Mehlich, A. 1984. Mehlich III soil test extractant: A modification of Mehlich II extractant. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 15: 1409–1416.
17. Minnesota Pollution Control Agency. 2000. NPDES/ SDS Permits—permitting process for surface-water dischargers. *Water/Wastewater (NPDES/SDS) Permit No. 1, October 2, 2000*. Minn. Pollution Control Agency, St. Paul.
18. 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.
19. 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*. USDA, Washington, DC.
20. Olsen, S.R. and L.E. Sommers. 1982. Phosphorus. In *Methods of Soil Analysis, Part 2, 2nd ed. Chemical and Microbiological Properties*. A.L. Page, R.H. Miller and D.R. Keeney (eds.). ASA, Madison, WI, pp. 403–430.
21. 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.
22. 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.
23. Sharpley, A.N., J. McDowell and J.R. Waaland. 1994. Seasonality of eelgrass, epiphyte and grazer biomass and productivity in sub tidal eelgrass meadows subjected to moderate tidal amplitude. *Aquatic Botany*, 56: 51–74.
24. Sharpley, A.N. 1995. Dependence of runoff phosphorus on extractable soil phosphorus. *Journal of Environmental Quality*, 24: 920–926.
25. Shiriar, E.J., D.B. Beegle, P.E. Fixen, S.C. Hodges, B.C. Joern, A.P. Mallarino, R.O. Miller, J.T. Sims, R. Ward and A.M. Wolf. 2000. Relevance of soil testing to agriculture and the environment. *Council for Agricultural Science and Technology (CAST), Issue Paper No. 15*.
26. Sims, J.T. 2002. Environmental soil testing for phosphorus. *Journal of Production Agriculture*, 6: 501–507.

27. 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.
28. Thomas, G.W. 1996. Soil pH and soil acidity. In: Sparks, D.L. (ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 3, Chemical Methods*. SSSA Book Ser. SSSA, Madison, WI, pp. 475-490.
29. 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.
30. 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.
31. 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.