

مقایسه اثر پلی‌اکریل‌آمید و پلی‌وینیل‌استات بر اصلاح ویژگی‌های فیزیکی خاک و بهبود جوانه‌زنی گندم در سازندهای ماری

علی‌رضا واعظی*^۱، ساناز توحیدلو^۲، سعیده مرزوان^۳

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۲/۰۷ تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۴/۲۸

^۱ دانشیار، گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان

^۲ دانشجوی سابق کارشناسی ارشد، گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان

^۳ دانشجوی دکتری، گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: vaezi.alireza@gmail.com

چکیده

مارن‌ها از مهمترین سازندهای زمین‌شناسی حساس به فرسایش هستند که به دلیل ناپایداری ساختمان خاک، حاصلخیزی کم و ذخیره رطوبتی اندک، استقرار پوشش گیاهی دایمی در آن‌ها دشوار است. پلی‌مرها به‌عنوان یکی از گزینه‌های اصلاحی برای حفظ منابع خاک در این عرصه‌ها قابل بررسی می‌باشند. این مطالعه به‌منظور مقایسه اثر پلی‌اکریل‌آمید و پلی‌وینیل‌استات در اصلاح ویژگی‌های فیزیکی خاک و بهبود جوانه‌زنی در سازندهای ماری انجام شد. پلی‌اکریل‌آمید و پلی‌وینیل‌استات در چهار سطح (صفر، ۳۳/۳، ۶۶/۶ و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار) به سطح نمونه‌های خاک در سه نوبت پاشیده شد. در کل ۳۲ جعبه تهیه و بذره‌های گندم در خاک پلی‌مری شده کشت شدند. ویژگی‌های فیزیکی خاک و جوانه‌زنی در خاک‌های پلیمری‌شده پس از پنج رخداد باران شبیه‌سازی‌شده (با شدت ۴۰ میلی‌متر بر ساعت به مدت ۳۰ دقیقه) اندازه‌گیری شدند. آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در چهار تکرار انجام گرفت. با افزایش مقدار مصرف هر دو پلی‌مر، اندازه خاکدانه، پایداری خاکدانه و هدایت هیدرولیکی اشباع روندی افزایشی نشان دادند و در مقابل جرم مخصوص ظاهری و مقاومت مکانیکی خاک به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافتند. ظرفیت نگهداری آب خاک و آب قابل دسترس با مصرف پلی‌اکریل‌آمید کاهش یافت ولی تحت تأثیر مصرف پلی‌وینیل‌استات قرار نگرفت. این پژوهش نشان داد که پلی‌وینیل‌استات اثر بخشی پایایی با پلی‌اکریل‌آمید در بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک ماری دارد و در مقابل موجب کاهش ظرفیت نگهداری آب خاک نمی‌گردد. بنابراین، پلی‌وینیل‌استات می‌تواند جایگزینی مناسب برای پلی‌اکریل‌آمید در عرصه‌های ماری در نظر گرفته شود.

واژه‌های کلیدی: اصلاح‌کننده‌های خاک، پلی‌مر دوست‌دار طبیعت، ساختمان خاک، گندم دیم، مقاومت سطح

Comparing the Influence of Polyacrylamide and Polyvinyle Acetate on Improving Soil Physical Properties and Wheat Germination in Marl Formations

AR Vaezi^{1*}, S Tohidlu², S Marzvan³

Received: 27 April 2015 Accepted: 18 July 2016

¹- Assoc. Prof., Soil Sci. Dept., Faculty of Agric., University of Zanjan, Iran

²- Former M.Sc. Student, Soil Sci. Dept., Faculty of Agric., University of Zanjan, Iran

³- Ph.D. Student, Soil Sci. Dept., Faculty of Agric., University of Zanjan, Iran

*Corresponding Author, Email: vaezi.alireza@gmail.com

Abstract

Marls are the most susceptible geological formation of erosion and keeping a permanent crop cover on the soil of this formation is difficult due to some limitations such as the instability of soil structure, poor soil productivity and low soil moisture storage. Polymers can be investigated as one of options to protect soil resources in these formations. This study was conducted to compare the effects of polyacrylamide (PAM) and polyvinyle acetate (PVAc) on improving soil properties and germination rate in the marl formations. PAM and PVAc were sprayed on the soil surface with 0.0, 33.3, 66.6, 100.0 kg ha⁻¹ amounts in three splits. In total 32 boxes of polymerized soil were provided and wheat seeds were planted in them. The soil physical properties along with the wheat germination percentage were evaluated in the polymerized soils after five rainfall simulations (40 mm h⁻¹ for 30 min). The experiment was conducted as factorial using a completely randomized design with three replications. With an increase in the two polymers rates, aggregate size, aggregate stability and saturated hydraulic conductivity were significantly improved whereas bulk density and soil surface resistance were strongly decreased in the prepared marl soil. Water holding capacity and available water of the soil decreased after the application of PAM while no significant differences were found after treating with the PVAc. This study revealed that the PVAc had the same role with the PAM in improvement of soil physical properties and in contrast it had no negative effect on the water holding capacity. Therefore, the PVAc can be successfully considered as a replacement for the PAM in the marl areas.

Keywords: Environmental friendly polymer, Rainfed wheat, Soil amendments, Soil structure, Surface resistance

اکثر نقاط ایران از جمله استان‌های خوزستان، ایلام، لرستان، کرمانشاه و زنجان قابل مشاهده می‌باشند (فیض‌نیا و همکاران ۱۳۸۶). مارن‌های ایران در دو دسته عمده شامل مارن‌های تبخیری و مارن‌های غیرتبخیری

مقدمه

در اصطلاح علمی، مارن به سازندهایی گفته می‌شود که دارای ۳۵ تا ۶۵ درصد رس و ۶۵ تا ۳۵ درصد کربنات هستند (پتی‌جون ۱۹۵۷). سازندهای مارنی در

کنار راه‌کارهای حفاظت بیولوژیک ضروری است. امروزه استفاده از اصلاح‌کننده‌های خاک به‌عنوان یکی از روش‌های مهم و نوظهور در مدیریت منابع آب و خاک توصیه می‌شود (حزباوی و صادقی ۱۳۹۲). پلی‌مرها که گروه خاصی از مواد آلی با وزن مولکولی بالا می‌باشند، از جمله گسترده‌ترین مواد اصلاح‌کننده خاک هستند. استفاده از پلی‌مرها در مدیریت منابع آب و خاک و مهار فرسایش خاک از دهه ۱۹۹۰ مورد توجه قرار گرفته است (پترسون و همکاران ۲۰۰۲).

پلی‌اکریل‌آمید (PAM) با ترکیب شیمیایی H_2-n (CH-CO-NH₂)، گسترده‌ترین پلیمر مورد استفاده برای اصلاح خصوصیات خاک و مهار فرسایش خاک است. این ماده با هم‌آوری ذرات ریز خاک مانند سیلت ریز و رس از تخریب خاکدانه‌های سست جلوگیری می‌کند و موجب افزایش نفوذ آب به خاک می‌شود (سوجکا و همکاران ۲۰۰۷، یونتس و همکاران ۲۰۰۳). این پلی‌مر به دو شکل آنیونی و کاتیونی وجود دارد که نوع آنیونی آن کاربرد بیشتری در هم‌آوری ذرات خاک دارد. کاتیون‌های تبادلی از جمله Ca^{2+} به‌عنوان پلی‌بین بار منفی سطح رس‌ها و بخش منفی مولکول PAM عمل کرده و موجب اتصال ذرات به یکدیگر می‌شوند (بنهور ۲۰۰۶). در ساخت پلی‌اکریل‌آمید یک ترکیب شیمیایی حدواسط (مونومر) اکریل‌آمید استفاده می‌شود که سرعت تجزیه آن در خاک بسیار کند است. این ماده برای سیستم عصبی سمی بوده و به‌عنوان یک عامل سرطان‌زا در حیوانات (حزباوی ۲۰۱۳) و آبزیان (فیلیپز ۲۰۰۷) شناخته شده است. به‌دلیل مشکلات زیستی بارز این پلی‌مر، استفاده از پلی‌مرهای دیگر اجتناب‌ناپذیر شده است. پلی‌وینیل‌استات (PVAc) با ترکیب شیمیایی $(C_4H_6O_2)_n$ پلی‌مری نسبتاً جدید است که به‌دلیل فقدان خطرات زیست‌محیطی مورد توجه قرار گرفته است. این پلی‌مر از مونومر وینیل‌استات از طریق پلیمری شدن یک رادیکال آزاد تشکیل می‌شود که می‌تواند به‌صورت مثبت، منفی و خنثی باشد. این پلی‌مر می‌تواند مقدار کمی آب جذب نماید

قرار می‌گیرند. سازندهای مارنی به‌دلیل وجود ذرات تخریبی (سیلت و رس بالا) و مواد شیمیایی (آهک، گچ و سایر نمک‌ها) نسبت به سایر سازندها از فرسایش‌پذیری آبی بالاتری برخوردارند (عبدی-نژاد و همکاران ۱۳۹۳). ناپایداری ساختمان خاک و عدم وجود رطوبت کافی طی دوره رشد به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک موجب شده است پوشش گیاهی مناسبی در این سازندها به‌وجود نیاید. وجود کانی‌های انبساط‌پذیر رس از جمله اسمکتایت در کنار نمک‌های انحلال‌پذیر از علل ناپایداری ساختمان خاک در این سازندها است. فرآیند فرسایش در سازندهای مارنی در مناطق خشک و نیمه‌خشک بسیار فعال است که منجر به هدررفت خاک، عناصر غذایی، تخریب سازه‌های انتقال آب و کاهش عمر مفید سدها می‌باشد. بنابراین بررسی خصوصیات این سازندها و ارائه راهکارهایی برای بهبود خصوصیات آن‌ها همواره مورد توجه پژوهشگران بوده است (واعظی و قره‌داغلی ۱۳۹۲).

وسعت زیادی از سطح کل استان زنجان در پهنه حوزه آبخیز سفیدرود واقع شده است. سازندهای مارنی حدود ۲۰ درصد از سطح استان زنجان را دربرگرفته‌اند و از منابع مهم تولید رسوب در حوزه آبخیز سفیدرود می‌باشند. پنج واحد مارنی شامل مارن پلیوسن، مارن کرتاسه، مارن ائوسن، مارن سازند قم و واحد مارنی قرمز در سطح استان زنجان وجود دارد (عبدی‌نژاد و همکاران ۱۳۹۳). یکی از ویژگی‌های عمده مارن‌های منطقه، ناپایداری ساختمان خاک می‌باشد. پراکنش نامنظم بارندگی از سوی دیگر منجر به ایجاد بستر نامناسب برای گسترش ریشه‌ها در خاک شده است. از این‌رو این عرصه‌ها فاقد پوشش گیاهی انبوه و دائمی می‌باشند و استقرار پوشش گیاهی در آن‌ها با دشواری‌هایی روبرو است (واعظی و قره‌داغلی ۱۳۹۲). این عوامل، سازندهای مارنی منطقه را به فرآیندهای فرسایش آبی بسیار حساس کرده است. از این‌رو انجام اقداماتی مانند استفاده از اصلاح‌کننده‌های شیمیایی نظیر پلی‌مرها در

۱۳۳۵ متر و بارندگی متوسط سالانه آن ۲۵۵/۴ میلی‌متر است. اقلیم منطقه بر اساس روش دومارتن نیمه‌خشک می‌باشد. از نظر زمین‌شناسی منطقه تحت سازندهای مارنی آهکی-گچی قرار دارد و شیل‌های آهکی و میکادار در این منطقه به فراوانی مشاهده می‌شوند (بی‌نام ۱۳۸۱). از دیدگاه فرسایش خاک، منطقه بسیار حساس به فرآیندهای فرسایش آبی بوده و شکل‌های مختلف فرسایش آبی به‌وضوح قابل مشاهده می‌باشد. در مواردی این سازندها تحت کشت محصولات زراعی دیم از جمله گندم پاییزه قرار دارند.

نمونه‌برداری خاک و افزودن پلی‌مرها

حدود ۵۰۰ کیلوگرم خاک مارنی از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر برداشت گردید. نمونه مذکور از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شده و برای انجام آزمایش‌های مختلف به آزمایشگاه منتقل گردید. هم‌چنین مقداری خاکدانه نیز برای انجام آزمایش پایداری خاکدانه با استفاده از الک‌های ۶ و ۸ میلی‌متری تهیه شد. برای تعیین چگالی ظاهری خاک، نمونه خاک دیگر با استفاده از استوانه فلزی به قطر ۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۷ سانتی‌متر برداشت شد. از دو پلی‌مر پلی‌اکریل‌آمید (آنیونی) و پلی‌ونیل استات برای بررسی نقش آن‌ها در بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک و کاهش فرسایش خاک استفاده شد. پلی‌مرها هر دو دارای چگالی ۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب و محلول در آب بوده و از پژوهشگاه پتروشیمی ایران تهیه شدند. محلول پلیمری پلی‌اکریل‌آمید و پلی‌ونیل-استات هر یک در چهار سطح صفر، ۳۳/۳۳، ۶۶/۶۶ و ۱۰۰ درصد و در چهار تکرار بر سطح خاک‌های مارنی آماده شده در آزمایشگاه پاشیده شدند. مقدار مصرف پلی‌مرها در سطح ۱۰۰ درصد برابر ۲۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک بود که مطابق با تحقیقات سوچکا و همکاران (۲۰۰۷) انتخاب گردید. هزینه تولید پلی‌ونیل‌استات کمتر از پلی‌اکریل‌آمید بوده و در حال حاضر تولید این پلیمر به ازای هر کیلوگرم، حدود ۲۰/۰۰۰ ریال می‌باشد (حمیدی‌نهرانی و واعظی، ۱۳۹۲). برای اجرای آزمایش، ۳۲ نمونه خاک

(نووا و همکاران ۲۰۰۴) و از نظر فرمولاسیون، سازگاری بسیار خوبی با محیط زیست دارد. هیچ‌گونه اثرات جانبی زیان‌آور در گیاهان، باکتری‌های موجود در خاک و قارچ‌ها تاکنون بر اثر کاربرد این پلی‌مر مشاهده نشده است (موحدان و همکاران ۲۰۱۲).

در پژوهش‌های مختلف به اثر پلی‌اکریل‌آمید در افزایش پایداری خاکدانه (نجو و همکاران ۲۰۱۲)، کاهش فرسایش آبی در عرصه‌های آتش گرفته (اینبار و همکاران، ۲۰۱۵) و در خاک‌های مارنی (اکبرزاده و همکاران ۱۳۸۸)، کاهش پراکندگی در خاک‌های سدیمی (کای و همکاران ۲۰۰۱؛ سیواپالان ۲۰۰۴)، افزایش سرعت نفوذ آب به خاک (قربانی‌واقعی و همکاران ۱۳۸۷) و بهبود جوانه‌زنی در خاک‌های مستعد به سله (شهبازی و همکاران ۱۳۸۸) پرداخته شده است. با این حال پژوهش‌ها در مورد تأثیر پلی‌ونیل‌استات بر بهبود خصوصیات خاک بسیار محدود بوده است. از جمله این پژوهش‌ها می‌توان به تأثیر پلی‌ونیل‌استات در مهار فرسایش بادی (هه و همکاران ۲۰۰۸؛ موحدان و همکاران ۲۰۱۲)، کاهش فرسایش آبی در خاک‌های مارنی (حمیدی‌نهرانی و واعظی ۱۳۹۲) و مهار فرسایش خاک و هدررفت فلزات (ژنگ ۲۰۱۱) اشاره کرد. با توجه به گستردگی سازندهای مارنی در کشور، دستیابی به نوع و مقدار مناسب پلی‌مر برای مدیریت منابع خاک ضروری است. هدف از پژوهش حاضر مقایسه تأثیر پلی‌اکریل‌آمید و پلی‌ونیل‌استات در بهبود برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک مارنی و بهبود جوانه‌زنی و یافتن مقدار بهینه کاربرد این مواد در سازندهای مارنی غرب زنجان بود.

مواد و روش‌ها

ویژگی‌های منطقه مورد مطالعه

منطقه سردهات از جمله گستره‌های دربرگیرنده سازندهای مارنی است که در ۵۰ کیلومتری غرب استان زنجان در محدوده ۵۷' ۳۶° عرض شمالی ۶۶' ۳۶° تا ۵' ۴۸° طول شرقی واقع شده است. ارتفاع متوسط منطقه

تعیین شدند. پس از افزودن پلی‌مر و پیش از اعمال باران-های، جرم مخصوص ظاهری به روش سیلندر (بلک و هارتگ ۱۹۸۶)، ظرفیت نگهداری آب یا رطوبت ظرفیت مزرعه (FC) در مکش ۰/۳۳ بار و رطوبت نقطه پژمردگی دائم (PWP) در مکش ۱۵ بار به ترتیب با استفاده از دستگاه صفحه فشار و غشای فشاری (کلوت ۱۹۸۶) تعیین شدند. مقدار آب قابل دسترس (AW) بر اساس رطوبت ظرفیت مزرعه (FC) و رطوبت نقطه پژمردگی دائم (PWP) محاسبه شد. متوسط اندازه خاکدانه (در حالت خشک) با محاسبه میانگین وزنی قطر خاکدانه با استفاده از سری الک‌ها (۰/۲۵، ۰/۵، ۲، ۴ و ۶ میلی‌متر) تعیین شد. پایداری خاکدانه بر اساس میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های پایدار در آب (MWD) به روش الک تر (یودر ۱۹۳۶) در زمان واسنجی شده ۱ دقیقه تعیین شد. هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s) به روش بار ثابت (کلوت و دیرکسن ۱۹۸۶) اندازه‌گیری شد. مقاومت مکانیکی خاک نیز به وسیله دستگاه فروسنج مدل 16-T017 ساخت آلمان در زمان جوانه‌زنی بذر که رطوبت خاک نسبتاً پایین بود، اندازه‌گیری شد.

تحلیل آماری داده‌ها

داده‌های حاصل از آزمایش برای بررسی اثر نوع (پلی‌اکریل‌آمید و پلی‌وینیل‌استات) و مقدار پلی‌مر (در چهار سطح) در چهار تکرار به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی تجزیه واریانس شد. مقایسه میانگین با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال ۹۵ درصد ($p < 0.05$) مورد تحلیل قرار گرفت. تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۰ انجام گرفت.

نتایج و بحث

ویژگی‌های خاک مارنی

خاک مورد مطالعه دارای بافت بینابین لوم رسی و لوم بود. خاک منطقه به لحاظ داشتن مقدار زیادی آهک (۳۶/۲۵ درصد) و گچ (۱۵/۵۲ درصد) جزء خاک‌ها آهکی

هر یک با وزن ۱۵ کیلوگرم بر روی پلاستیک پهن شدند. محلول‌های پلیمری در سه مرحله به سطح خاک پاشیده شدند. در مرحله اول یک سوم از محلول پلی‌مر به سطح خاک پاشیده شد و پس از ۲۴ ساعت یک سوم دیگر به سطح نمونه‌ها پاشیده شد. سپس، خاک‌ها تا عمق ۱۸ سانتی‌متر به واحدهای آزمایشی که شامل جعبه‌های پلاستیکی به ابعاد ۳۰ سانتی‌متر در ۵۰ سانتی‌متر با عمق ۲۵ سانتی‌متر بود، منتقل شدند. از یک لایه فیلتر شنی به ضخامت حدود ۳ سانتی‌متر برای زهکشی در کف جعبه-ها استفاده شد. بذرهای گندم (رقم آذر ۲) به فاصله ۵ سانتی‌متری از هم روی خاک داخل جعبه قرار گرفتند. در داخل هر جعبه ۴۰ بذر با در نظر گرفتن حاشیه ۵ سانتی-متر کاشته شد. پس از قرار دادن بذر، مجدداً بخش باقیمانده خاک‌های پلی‌مری شده تا ضخامت ۲ سانتی‌متر بر روی بذر ریخته شد و به این ترتیب ضخامت خاک داخل جعبه‌ها به ۲۰ سانتی‌متر رسید و چگالی ظاهری آن ۱/۲۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب بود. پس از کاشت بذور گندم، جهت پایداری خاک یک سوم باقی‌مانده محلول‌های پلیمری به سطح خاک جعبه‌ها پاشیده شدند. جعبه‌های محتوی خاک پلی‌مری شده تحت باران‌های ثابت شبیه‌سازی شده با شدت ۴۰ میلی‌متر بر ساعت به مدت ۳۰ دقیقه، به تعداد چهار رخداد با فاصله زمانی چهار روز قرار گرفتند. انتخاب چنین بارانی بر اساس باران‌های فرسایش‌زا در منطقه بود که فراوانی وقوع آنها حدود ۱۲ درصد بود. برای ایجاد باران از یک دستگاه شبیه‌ساز باران به ارتفاع ۲۸۰ سانتی‌متر با قابلیت تولید قطراتی با قطر حدود ۳ میلی‌متر استفاده گردید. پس از پایان مرحله جوانه‌زنی، درصد جوانه‌زنی بذر در هر جعبه بر اساس تعداد بذرهای جوانه زده و کل بذرهای کشت شده تعیین شد.

اندازه‌گیری ویژگی‌های خاک پیش و پس از افزودن پلی‌مرها پیش از افزودن پلیمرها، ابتدا توزیع نسبی اندازه ذرات به روش هیدرومتری (گی و بادر ۱۹۸۶) و جرم مخصوص حقیقی به روش پیکنومتر (بلک و هارتگ ۱۹۸۶)

بالا (۴ دسی‌زیمنس بر متر) بود. با توجه به پایداری خاکدانه‌ای ضعیف (۱/۲۲ میلی‌متر در یک دقیقه)، هدایت هیدرولیکی اشباع بسیار پایین (۱/۱۵ سانتی‌متر بر ساعت) و مقاومت مکانیکی سطح خاک نسبتاً زیاد (۷/۷۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع) می‌توان گفت که خاک مارنی شرایطی مناسب برای جوانه‌زنی و پرورش گیاه ندارد و اصلاح خصوصیات فیزیکی خاک می‌تواند گامی مؤثر در بهبود باروری خاک باشد.

و گچی بود. مقدار سدیم تبدیلی خاک ۱/۷۰ درصد اندازه‌گیری شد (جدول ۱). با توجه به مقدار جرم مخصوص حقیقی (۲/۴۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب) و جرم مخصوص ظاهری نسبتاً کم (۱/۲۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب)، خاک دارای ۴۸ درصد تخلخل بود. رطوبت ظرفیت مزرعه (۲۳/۵۴ درصد جرمی) و میزان آب قابل دسترس خاک (۸/۱۵ درصد جرمی) نسبتاً پایین و میزان ماده آلی خاک بسیار پایین (۰/۷۵ درصد) بود. درجه شوری خاک نسبتاً

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی خاک مارنی مورد مطالعه.

ویژگی‌های شیمیایی خاک		ویژگی‌های فیزیکی خاک	
۷/۵۹	اسیدیته	۳۲/۰۰	شن (%)
۴/۰۰	هدایت الکتریکی (dS m^{-1})	۴۰/۰۰	سیلت (%)
۳۴/۷۰	ظرفیت تبادل کاتیونی ($\text{meq } 100\text{g}^{-1}$)	۲۸/۰۰	رس (%)
۱/۷۰	سدیم تبدیلی (%)	۲/۴۷	جرم مخصوص حقیقی (g cm^{-3})
۰/۷۵	ماده آلی (%)	۱/۲۸	جرم مخصوص ظاهری (g cm^{-3})
۳۶/۲۵	آهک (%)	۱/۲۲	میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های پایدار (mm)
۱۵/۵۲	گچ (%)	۷/۷۰	مقاومت مکانیکی سطح (kg cm^{-2})
		۱/۱۵	هدایت هیدرولیکی اشباع (cm h^{-1})
		۰/۱۵	رطوبت نقطه پژمردگی دائم (g g^{-1})
		۰/۲۳	رطوبت ظرفیت مزرعه (g g^{-1})

مخصوص ظاهری و مقاومت مکانیکی سطح خاک شد. اندازه خاکدانه و پایداری خاکدانه با افزایش سطوح مصرف هر دو پلی‌مر با روندی تقریباً مشابه افزایش یافتند و بیشترین مقدار آن‌ها در سطح ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار پلی‌مرها مشاهده شد. این نتیجه بیانگر احتمال تأثیر مقادیر بیش‌تر پلیمر در بهبود ویژگی‌های ساختمانی در خاک مارنی می‌باشد. تأثیر پلیمرها بر افزایش پایداری خاکدانه نسبت به افزایش اندازه خاکدانه بارزتر بود. در سطح ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار با مصرف پلی‌آکریل‌آمید و پلی‌وینیل‌استات، اندازه خاکدانه به ترتیب ۲۹ و ۳۰ درصد نسبت به شاهد (۱/۲۲ میلی‌متر) و نیز پایداری خاکدانه به ترتیب ۳/۰۰ و ۲/۴۷ برابر نسبت به شاهد (۰/۵۳ میلی‌متر) افزایش نشان دادند. کنت و نوانکو (۲۰۰۱) در

مقایسه تأثیر سطوح پلی‌مرها

نتایج تجزیه واریانس برای مقایسه اثرات نوع، مقدار و برهمکنش پلی‌مرها (جدول ۲) نشان داد که پلی-آکریل‌آمید و پلی‌وینیل‌استات هر دو اثری معنی‌دار بر اندازه خاکدانه، پایداری خاکدانه‌ها، جرم مخصوص ظاهری، مقاومت مکانیکی سطح خاک، هدایت هیدرولیکی اشباع و جوانه‌زنی گندم داشتند. رطوبت نقطه پژمردگی دائم متغیری بود که تحت تأثیر مصرف هیچ یک از پلی-مرها قرار نگرفت. پلی‌آکریل‌آمید برخلاف پلی‌وینیل‌استات اثری معنی‌دار بر رطوبت ظرفیت مزرعه ($p \leq 0/01$) و آب قابل دسترس ($p \leq 0/05$) نشان داد. همان‌طور که شکل ۱ نشان می‌دهد مصرف هر دو پلی‌مر موجب افزایش قابل توجه در اندازه و پایداری خاکدانه‌ها، هدایت هیدرولیکی اشباع و جوانه‌زنی گندم و کاهش چشم‌گیر در جرم

پراکنش ذرات می‌شود. اکبرزاده و همکاران (۱۳۸۸) نشان دادند که استفاده از پلی‌اکریل‌آمید در خاک‌های مارنی باعث افزایش پایداری خاکدانه و کاهش تشکیل سله می‌شود. نوک و واتس (۲۰۰۵) نشان دادند که پلی‌مرها با ایجاد پل‌هایی بین ذرات، سبب چسبیدن آن‌ها به هم و تشکیل خاکدانه‌های درشت و پایداری می‌شود. موحدان و همکاران (۱۳۹۲) نشان دادند که مصرف پلی‌وینیل‌استات در مناطق تحت فرسایش بادی به صورت معنی‌داری مقدار پایداری خاکدانه (MWD) را افزایش داد.

پژوهش‌های خود دریافتند که پلی‌مرهایی نظیر پلی‌اکریل-آمید در ایجاد واکنش‌های شیمیایی و پیوند شیمیایی با ذرات خاک مؤثر بوده و باعث افزایش قطر خاکدانه‌ها شدند. پلی‌اکریل‌آمید با وزن ملکولی بسیار بالا مانند یک مایع چسبنده اطراف ذرات خاک و خاکدانه‌ها را فرا گرفته و مانع از تأثیر قطرات باران و گسستگی پیوند بین ذرات خاک می‌شود (شهبازی و همکاران ۱۳۸۸). تحقیقات فلناگن و همکاران (۲۰۰۲) نشان داد که مصرف ۸۰ کیلوگرم در هکتار پلی‌اکریل‌آمید در زمین‌هایی با شیب ۳۲ درصد باعث افزایش پایداری خاکدانه‌ها و کاهش

جدول ۲- تجزیه واریانس اثرات نوع و مقدار و برهمکنش پلی‌مرها بر ویژگی‌های مورد مطالعه.

منبع تغییر	درجه آزادی	اندازه خاکدانه	پایداری خاکدانه	جرم مخصوص ظاهری	مقاومت سطح	هدایت هیدرولیکی اشباع	رطوبت نقطه پژمردگی دائم	رطوبت ظرفیت مزرعه	آب قابل دسترس	جوانه‌زنی گندم
نوع پلی‌مر	۱	۰/۰۱ ^{ns}	۰/۰۱ ^{ns}	۰/۰۱ ^{ns}	۱/۷۵ ^{ns}	۰/۳۵ ^{ns}	۰/۰۱ ^{ns}	۶/۲۴*	۶/۲۳**	۷/۰۳ ^{ns}
مقدار پلی-مر	۳	۰/۱۸**	۱/۲۵**	۰/۱۸**	۲۴/۲۹**	۴/۸۷**	۰/۰۱ ^{ns}	۴/۳۳**	۴/۳۳*	۳۵/۳۹**
نوع × مقدار	۳	۰/۰۱**	۰/۱۳ ^{ns}	۰/۰۱*	۰/۹۲ ^{ns}	۰/۳۵**	۰/۰۱ ^{ns}	۰/۶۷ ^{ns}	۱/۶۷ ^{ns}	۶۳/۸۰*
خطا	۲۴	۰/۰۵	۰/۳۸	۰/۰۷	۸/۱۱	۱/۵۳	۰/۰۱	۰/۶۷	۱/۱۲	۹/۶۲
ضریب تغییرات (%)	-	۱۱/۴۷	۲۲/۹۷	۱۶/۱۰	۱۶/۹۰	۲۵/۲۹	۶/۳۴	۵/۲۲	۱۷/۱۷	۵/۲۷

^{ns} غیرمعنادار، * معناداری در سطح احتمال ۵ درصد، ** معناداری در سطح احتمال ۱ درصد.

پلی‌مرها موجب کاهش مقاومت سطح خاک شد. کمترین مقدار با مصرف ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار پلی‌اکریل‌آمید و پلی‌وینیل‌استات مشاهده شد که به ترتیب ۵۱ درصد و ۵۸ درصد کمتر از شاهد بود. این موضوع نشان‌دهنده نقش پلی‌مرها در کاهش تولید سله در خاک‌های حساس می‌باشد (ویو و همکاران ۲۰۱۰). مصرف هر دو پلی‌مر موجب افزایش هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s) شد. در تیمار ۱۰۰ کیلوگرم مصرف پلی‌اکریل‌آمید و پلی‌وینیل‌استات مقدار K_s به ترتیب ۲/۳۸ درصد و ۲/۸۴ برابر شاهد (۱/۱۵ سانتی‌متر بر ساعت) بود. در مطالعه‌ای لی (۲۰۰۶) نشان داد که با مصرف ۲۰ کیلوگرم در هکتار پلی‌اکریل‌آمید در خاک لومی سیلتی تحت بارانی با شدت ۵۵ میلی‌متر بر

مصرف پلی‌مرها موجب کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک شد. بهبود شاخص‌های ساختمان خاک (اندازه و پایداری خاکدانه) با مصرف پلی‌مرها عامل اصلی کاهش جرم مخصوص ظاهری بود. در هر دو پلی‌مر، با افزایش سطح مصرف آن، جرم مخصوص ظاهری با روندی تقریباً مشابه کاهش یافت. در سطح ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار پلی‌اکریل‌آمید و پلی‌وینیل‌استات، جرم مخصوص ظاهری به ترتیب ۳۳ درصد و ۲۹ درصد نسبت به شاهد (۱/۰۸ گرم بر سانتی‌مترمکعب) کاهش یافت. در مطالعه شهبازی و همکاران (۱۳۸۸)، بیشترین تأثیر در کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک با کاربرد ۲۵ کیلوگرم در هکتار این پلی‌مر مشاهده شد. مصرف

تیمار ۲۰ کیلوگرم در هکتار میزان ظهور جوانه‌ها نسبت به شاهد ۳/۵ برابر بود. این تفاوت نسبت به تحقیق حاضر می‌تواند در کنار تفاوت در نوع بذر و نوع خاک عمدتاً به دلیل تفاوت در رطوبت خاک در مرحله جوانه‌زنی باشد. چنانچه مقدار بارندگی در آزمایش حاضر کم بود و رطوبت خاک در مرحله جوانه زنی بذرهای گندم به شدت پایین بود، نقش پلی‌مر در کاهش مقاومت مکانیکی سطح خاک و بهبود سبز شدن جوانه‌ها بارزتر می‌شد. با افزایش سطح مصرف پلی‌وینیل‌استات، جوانه‌زنی بذر گندم روندی فزاینده نشان داد. در سطح ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار این پلی‌مر نسبت به شاهد درصد جوانه‌زنی حدود ۸/۲ درصد بیشتر بود (۹۵/۵ درصد) و تفاوت آن با سطح ۶۶/۶۶ کیلوگرم در هکتار (۹۱/۲ درصد) معنی‌دار ($p \leq 0.01$) بود. بنابراین اگر هدف، تنها افزایش جوانه‌زنی گندم در خاک‌های ماری باشد، مصرف ۳۳ کیلوگرم در هکتار پلی‌اکریل‌آمید از نظر اقتصادی بهتر خواهد بود و چنانچه هدف، دستیابی به عملکرد بالا در کنار رعایت مسائل زیست‌محیطی باشد، مصرف پلی‌وینیل‌استات به میزان ۱۰۰ کیلوگرم بر هکتار بهتر خواهد بود.

اثر ویژگی‌های خاک بر سبز شدن جوانه‌ها

برای بررسی روابط بین متغیرهای مورد بررسی (ویژگی‌های فیزیکی خاک و جوانه‌زنی) تحت تأثیر مصرف پلی‌مرها، از روش ماتریس همبستگی استفاده شد (جدول ۳). جرم مخصوص ظاهری، مقاومت سطح و هدایت هیدرولیکی اشباع از جمله ویژگی‌های فیزیکی خاک ماری بودند که با مصرف هر دو پلی‌مر و در نتیجه‌ی بهبود تشکیل خاکدانه‌ها و افزایش پایداری آن‌ها تحت تأثیر قرار گرفتند به طوری که همبستگی منفی بین مشخصات ساختمان (اندازه خاکدانه و پایداری خاکدانه) با جرم مخصوص ظاهری و مقاومت سطح و همبستگی مثبت با هدایت هیدرولیکی اشباع مشاهده شد.

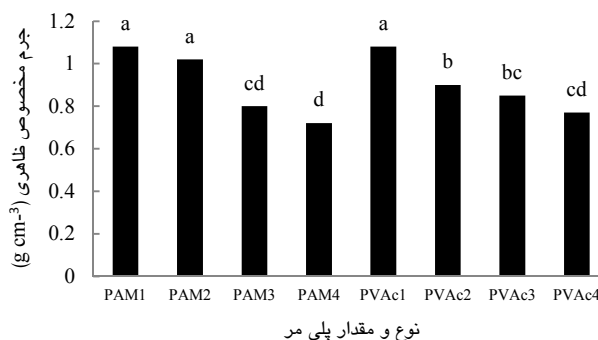
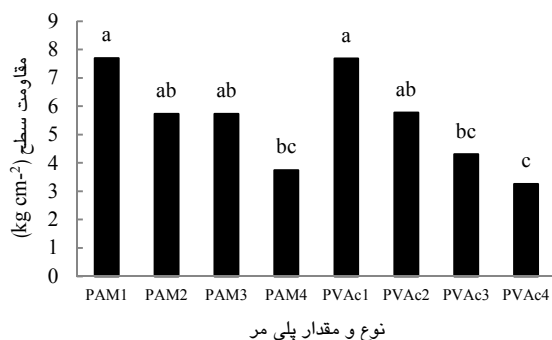
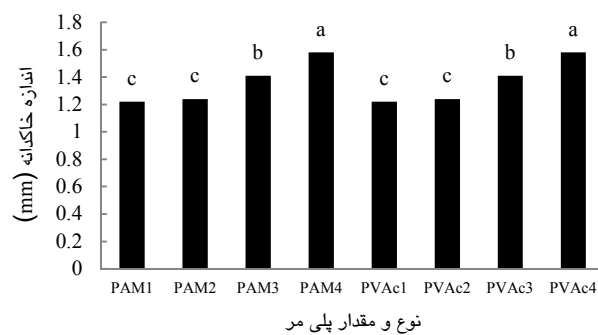
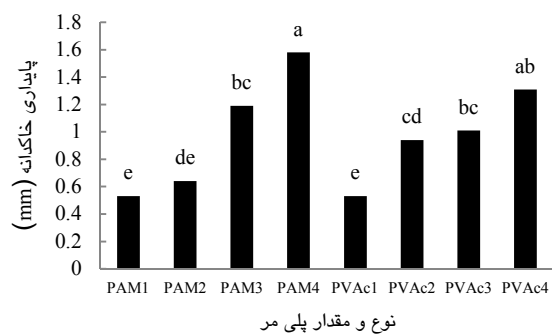
ساعت، تشکیل سله کاهش و هدایت هیدرولیکی اشباع حدود ۲۰ تا ۴۱ درصد افزایش یافت. قربانی واقعی و همکاران (۱۳۸۷) نشان دادند که استفاده از غلظت ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم پلی‌اکریل‌آمید تأثیر بهینه‌ای در افزایش سرعت نفوذ آب در خاک‌های با بافت رسی و لوم رسی داشت.

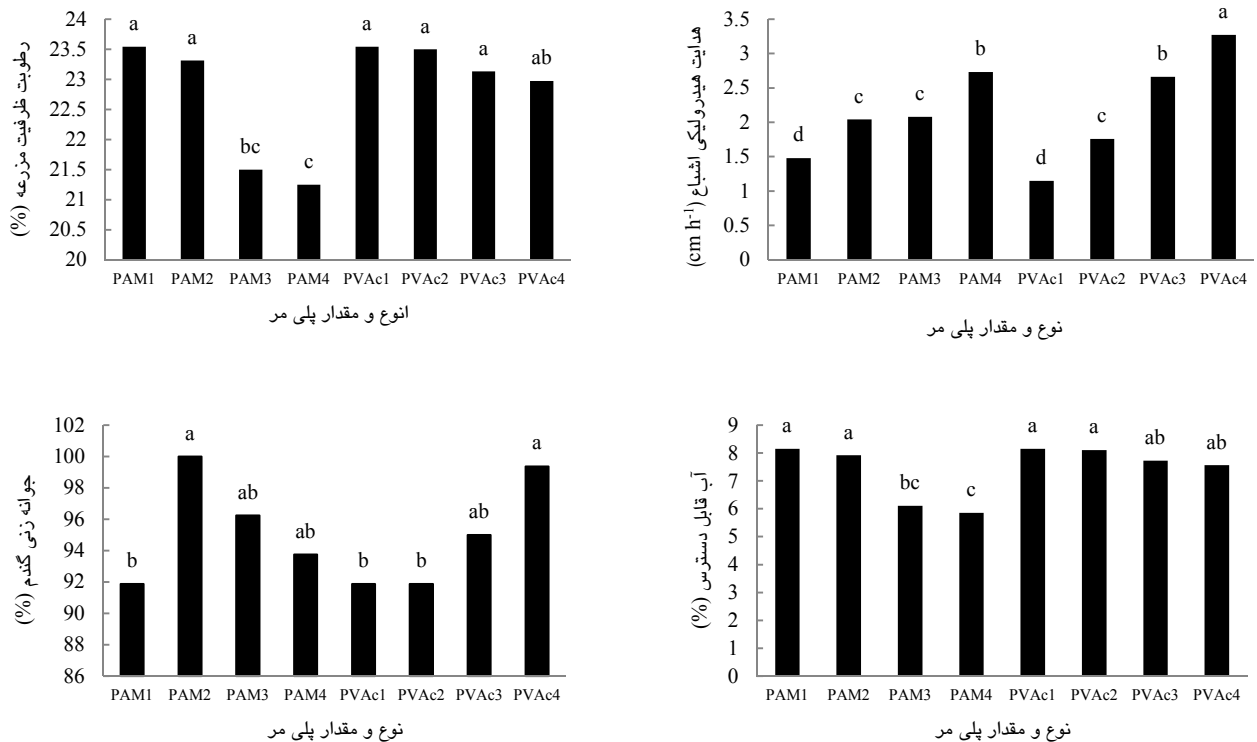
رطوبت ظرفیت مزرعه و در پی آن آب قابل دسترس برعکس پلی‌اکریل‌آمید، تحت تأثیر پلی‌ونیل-استات قرار نگرفت. با افزایش مصرف پلی‌اکریل‌آمید، هر دو ویژگی به طور معنی‌دار کاهش یافت (شکل ۲). تیمار ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار پلی‌اکریل‌آمید، کمترین رطوبت ظرفیت مزرعه (۲۱/۲۵ درصد) و آب قابل دسترس (۵/۸۶ درصد جرمی) را نشان داد که به ترتیب ۱۰ و ۲۸ درصد کمتر از شاهد بود. اگرچه در خاک‌های شنی نتایج از تأثیر افزایشی پلی‌اکریل‌آمید از نظر ظرفیت نگهداری آب مشاهده شده است (سیوآپالان ۲۰۰۶)، کاهش میزان ظرفیت نگهداری آب در خاک ماری پس از مصرف پلی‌اکریل‌آمید را می‌توان به ساختمان این پلی‌مر نسبت داد. پلی‌اکریل‌آمید دارای ساختمان غیرشبکه‌ای می‌باشد و عملاً آب‌گریز است (حقنیا ۱۳۷۴). مصرف هر دو پلی‌مر موجب بهبود جوانه‌زنی بذر شد. در تیمارهای تحت مصرف پلی‌اکریل‌آمید و پلی‌وینیل‌استات، جوانه‌زنی گندم به ترتیب ۵/۳ و ۳/۹ درصد نسبت به شاهد (۸۸/۲ درصد) افزایش پیدا کرد. تیمار ۳۳/۳۳ کیلوگرم در هکتار پلی‌اکریل‌آمید بیشترین تأثیر را در بهبود جوانه‌زنی داشت به طوری که این سطح از پلی‌مر افزایشی چشمگیر (حدود ۸/۸ درصد) نسبت به شاهد نشان داد. شهبازی و همکاران (۱۳۸۸) با بررسی تأثیر مقادیر صفر تا ۳۰ کیلوگرم در هکتار پلی‌اکریل‌آمید بر ظهور جوانه‌های کلزا و برخی از خصوصیات خاک نشان دادند که در کلیه مقادیر مصرفی پلی‌اکریل‌آمید ظهور جوانه‌های کلزا افزایشی معنی‌دار پیدا کرد. آن‌ها عنوان کردند که در

جدول ۳- همبستگی متغیرهای مورد بررسی در خاک مارنی تحت تأثیر مصرف پلی‌اکریل‌آمید و پلی‌وینیل‌استات (n=۳۲).

پلی‌مر	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
۱- اندازه خاکدانه	۱						
	PAM						
	PVAc						
۲- پایداری خاکدانه	۰/۸۹**	۱					
	PAM						
	PVAc	۰/۶۶*					
۳- جرم مخصوص ظاهری	-۰/۸۳*	-۰/۸۸**	۱				
	PAM						
	PVAc	-۰/۷۲**	-۰/۷۹**				
۴- مقاومت سطح	-۰/۵۸*	-۰/۵۸*	۰/۵۰*	۱			
	PAM						
	PVAc	-۰/۶۱*	-۰/۹۰**	-۰/۶۷*			
۵- هدایت هیدرولیکی اشباع	۰/۷۳**	۰/۷۳**	-۰/۷۵**	-۰/۸۹**	۱		
	PAM						
	PVAc	۰/۸۸**	۰/۶۷*	-۰/۸۹**	-۰/۶۱*		
۶- رطوبت ظرفیت مزرعه	-۰/۷۸**	-۰/۷۶**	۰/۶۲*	۰/۵۵*	-۰/۶۱*	۱	
	PAM						
	PVAc	-۰/۲۲	-۰/۱۷	۰/۲۶	۰/۳۶	-۰/۳۱	
۷- جوانه‌زنی	-۰/۲۴	-۰/۰۹	۰/۰۸	-۰/۳۰	۰/۱۶	۰/۰۸	۱
	PAM						
	PVAc	۰/۶۹**	۰/۶۱*	-۰/۵۹*	-۰/۶۴*	-۰/۷۱**	-۰/۰۶

* معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد و ** معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد.





شکل ۱- مقایسه میانگین اثرات نوع و سطح مصرف پلی‌اکریل‌آمید (PAM) و پلی‌وینیل‌استات (PVAc) بر ویژگی‌های فیزیکی خاک و جوانه‌زنی گندم.

اثرات متقابل نوع و سطح مصرف پلیمر با استفاده از آزمون دانکن انجام گرفت و حروف لاتین متفاوت روی ستون‌ها نشان دهنده وجود تفاوت معنی‌دار است. شماره‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ در کنار نام هر پلی‌مر، سطح مصرف پلی‌مر را به ترتیب با مقدار صفر، ۳۳/۳، ۶۶/۶ و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار نشان می‌دهد.

جرم مخصوص ظاهری ($r = 0.71$ ، $p \leq 0.05$) و 0.59 ، $r = 0.76$ ، $p \leq 0.05$)، مقاومت سطح ($r = 0.71$ ، $p \leq 0.05$) و هدایت هیدرولیکی اشباع ($r = 0.71$ ، $p \leq 0.05$) نشان داد. در واقع با مصرف پلی‌وینیل‌استات و بهبود ساختمان خاک، مقاومت سطح خاک کاهش یافت. تحت این شرایط، مقاومت سطح خاک که به‌عنوان عامل مکانیکی در برابر سبز شدن بذرها به‌ویژه در خاک ماری ناپایدار می‌باشد، به‌شدت کاهش یافت و جوانه‌زنی بذرها بیش‌تر شد. مطالعات حمیدی‌نهرانی و واعظی (۱۳۹۲) نشان داد که مصرف پلی‌وینیل‌استات سبب افزایش هدایت هیدرولیکی اشباع و نفوذپذیری خاک ماری شده و به‌دنبال آن تولید رواناب و هدررفت خاک به‌شدت کاهش یافت. اگرچه مصرف پلی‌اکریل‌آمید در بهبود ساختمان خاک و کاهش

نتایج نشان داد که در تیمارهای تحت مصرف پلی‌اکریل‌آمید همبستگی معنی‌دار بین جوانه‌زنی بذرها و ویژگی‌های فیزیکی خاک شامل اندازه خاکدانه، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های پایدار در آب، جرم مخصوص ظاهری، مقاومت سطح، هدایت هیدرولیکی اشباع و رطوبت ظرفیت مزرعه در خاک ماری وجود نداشت. با این وجود شهبازی و همکاران (۱۳۸۸) با بررسی تأثیر پلی‌اکریل‌آمید در خاک‌های مستعد تشکیل سله نشان دادند که مصرف این پلی‌مر باعث افزایش ظهور جوانه‌های کلزا و کاهش جرم مخصوص ظاهری و به تبع آن افزایش نفوذپذیری خاک می‌شود. در حالی که در تیمارهای تحت مصرف پلی‌وینیل‌استات، جوانه‌زنی بذرها همبستگی مثبت با اندازه خاکدانه ($r = 0.79$ ، $p \leq 0.05$) میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های پایدار در آب ($p \leq 0.05$) و

آب قابل دسترس خاک به‌طور قابل توجهی کاهش پیدا کند.

مقاومت مکانیکی سطح مؤثر بود، محدودیت‌های آب-گریزی این پلی‌مر موجب شد رطوبت ظرفیت مزرعه و



(ج)



(ب)



(الف)

شکل ۲- مقایسه جوانه‌زنی گندم در جعبه‌های کشت در خاک ماری در تیمارهای بدون مصرف پلی‌مر (الف)، با مصرف ۳۳/۳۳ کیلوگرم در هکتار پلی‌اکریل‌آمید (ب) و مصرف ۳۳/۳۳ کیلوگرم در هکتار پلی‌وینیل‌استات (ج).

دسترس خاک مشاهده نگردید و بیش‌ترین میزان جوانه‌زنی، در بالاترین سطح مصرف پلی‌مر مشاهده گردید. این نتایج بیانگر آن است که برخلاف پلی‌اکریل‌آمید، پلی‌وینیل‌استات اثری سوء بر ظرفیت نگهداری آب خاک و در نتیجه آب قابل دسترس خاک که عاملی مهم در استقرار گیاه در خاک ماری می‌باشد، ندارد.

نتیجه‌گیری کلی

مصرف پلی‌اکریل‌آمید و پلی‌وینیل‌استات موجب شد ویژگی‌های فیزیکی خاک و جوانه‌زنی گندم تغییر پیدا کند. در تیمارهای تحت مصرف این دو پلی‌مر، با افزایش مقدار مصرف پلی‌مر، اندازه خاکدانه، پایداری خاکدانه و هدایت هیدرولیکی اشباع روندی افزایشی نشان دادند و جرم مخصوص ظاهری و مقاومت مکانیکی خاک به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافتند. با توجه به خصوصیات آب‌گریزی مولکول پلی‌اکریل‌آمید، با افزایش مقدار مصرف این پلی‌مر ظرفیت نگهداری آب خاک کاهش یافت. تیمار ۳۳/۳۳ کیلوگرم در هکتار پلی‌اکریل‌آمید بیشترین

مقایسه اثربخشی دو پلی‌مر

نتایج مقایسه میانگین نشان داد که بین دو پلیمر از نظر بهبود اندازه خاکدانه، پایداری خاکدانه، کاهش جرم مخصوص ظاهری، کاهش مقاومت سطح، افزایش هدایت هیدرولیکی اشباع و نیز افزایش سبز شدن بذرها تفاوتی معنی‌دار وجود نداشت و این تفاوت تنها از نظر رطوبت ظرفیت مزرعه و آب قابل دسترس می‌باشد ($p \leq 0.05$) (جدول ۲). در مقادیر بالای مصرف پلی‌اکریل‌آمید (۶۶/۶۶ و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار)، مقدار رطوبت ظرفیت مزرعه و آب قابل دسترس خاک به شدت کاهش یافت. در تیمار ۳۳/۳۳ کیلوگرم در هکتار پلی‌اکریل‌آمید، عملاً اندازه خاکدانه‌ها و رطوبت ظرفیت مزرعه و آب قابل دسترس خاک تغییری قابل توجه نسبت به شاهد پیدا نکردند اما بهبود پایداری خاکدانه‌ها (۲۱ درصد افزایش نسبت به شاهد) موجب شد بیشترین میزان جوانه‌زنی اتفاق بیافتد (شکل ۲).

با افزایش مقدار مصرف پلی‌وینیل‌استات، تغییری قابل توجه در مقدار رطوبت ظرفیت مزرعه و آب قابل

تأثیر را در بهبود جوانه‌زنی داشت به طوری که حدود ۸/۸ درصد نسبت به شاهد افزایش نشان داد. این افزایش به این دلیل بود که از یک سو ویژگی‌های فیزیکی خاک بهبود یافت و از سوی دیگر ظرفیت نگهداری آب خاک دچار کاهش اساسی نگردید. با افزایش مقدار مصرف پلی-وینیل استات، جوانه‌زنی گندم روندی افزایشی نشان داد که این نتیجه به دلیل افزایش بهبود ساختمان خاک و کاهش مقاومت سطح بود. در تیمار ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار، جوانه‌زنی گندم به اندازه ۸/۲ درصد بیش‌تر از تیمار شاهد بود. بین دو پلیمر از نظر بهبود اندازه خاکدانه، پایداری خاکدانه، کاهش چگالی ظاهری، کاهش مقاومت سطح، افزایش هدایت هیدرولیکی اشباع و افزایش جوانه‌زنی گندم، تفاوتی معنی‌دار مشاهده نشد و تنها

تفاوت بین دو پلی‌مر از نظر تأثیر بر ظرفیت نگهداری آب و آب قابل دسترس خاک بود. پلی‌وینیل استات برخلاف پلی‌اکریل‌آمید، عملاً نقشی در تغییر ظرفیت نگهداری آب خاک و آب قابل دسترس نشان نداد. به‌طور کلی این پژوهش نشان داد که پلی‌وینیل استات اثربخشی پایایی با پلی‌اکریل‌آمید در بهبود خصوصیات فیزیکی خاک مارنی دارد و در مقابل نقشی در کاهش ظرفیت نگهداری آب خاک ندارد. بنابراین با توجه به مشکلات زیست‌محیطی استفاده از پلی‌اکریل‌آمید، به‌کارگیری پلی‌وینیل-استات به عنوان پلیمر دوستدار طبیعت، در اصلاح خصوصیات فیزیکی خاک در عرصه‌های مارنی مناسب‌تر است.

منابع مورد استفاده

- اکبرزاده ع، رفاهی ح، روحی پور ح و گرجی م، ۱۳۸۸. ارزیابی کارایی پلی‌اکریل‌آمید (PAM) در افزایش پایداری خاکدانه و کاهش فرسایش خاک‌های مارنی اراضی شیب‌دار استان زنجان. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، جلد ۴۰، شماره ۲، صفحه‌های ۱۱۹ تا ۱۳۱.
- بی‌نام، ۱۳۸۱. طرح مطالعات تفضیلی اجرایی حوزه آبخیز چپ‌چپ. مدیریت آبخیزداری زنجان، سازمان جهاد کشاورزی استان زنجان. حزابوی ز و صادقی س، ۱۳۹۲. نظری بر سابقه و کاربرد افزودنی‌های خاک در مدیریت منابع خاک و آب. نشریه ترویج و توسعه آبخیزداری، جلد ۱، شماره ۲، صفحه‌های ۷ تا ۱۴.
- حوقنیا غ، ۱۳۷۴. دشواری‌های نفوذ آب در خاک (ترجمه). انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد.
- حمیدی نهرانی س و واعظی ع، ۱۳۹۲. تأثیر پلی‌وینیل‌استات بر هدایت هیدرولیکی و تولید رسوب و رواناب در یک خاک مارنی. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد ۲۷، شماره ۴، صفحه‌های ۷۹۲ تا ۸۰۱.
- شهبازی ع، یزدی پور ع و رؤفی م، ۱۳۸۸. بررسی تأثیر پلی‌اکریل‌آمید بر برخی از خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک و ظهور جوانه‌های کلزا در خاک مستعد تشکیل سله. مجله آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد ۲۳، شماره ۲، صفحه‌های ۴۵ تا ۳۸.
- عبدی‌نژاد پ، فیض‌نیا س و پیروان ح، ۱۳۹۳. مقایسه فرسایش‌پذیری خاک اراضی مارنی استان زنجان با استفاده از دستگاه شبیه‌ساز باران. نشریه پژوهش‌های خاک (علوم خاک و آب)، جلد ۲۸، شماره ۲، صفحه‌های ۴۰۷ تا ۴۱۹.
- فیض‌نیا س، حشمتی م، احمدی ح و قدوسی ج، ۱۳۸۶. بررسی فرسایش آبکندی سازند مارنی آجاجاری و میشان در منطقه قصر شیرین. مجله پژوهش و سازندگی، جلد ۷۴، شماره ۱، صفحه‌های ۳۲ تا ۴۰.
- قربانی واقعی ح، بهرامی ح، غفاریان مقرب م، شهاب ح و طلیعی طبری ف، ۱۳۸۷. کارایی پلی‌اکریل‌آمید در افزایش سرعت نفوذ آب به خاک. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، جلد ۳۹، شماره ۱، صفحه‌های ۷۷ تا ۸۴.

- موحدان م، عباسی ن و کرامتی م، ۱۳۹۲. بررسی آزمایشگاهی اثر پلی وینیل استات بر فرسایش بادی خاک های مختلف در برابر ماسه. مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، جلد ۲۰، شماره ۱، صفحه‌های ۵۵ تا ۷۵.
- واعظی‌ع و قره‌داغلی ح، ۱۳۹۲. کمی‌سازی گسترش فرسایش شیاری در خاک‌های مارنی در حوزه آبخیز زنجان‌رود در شمال‌غرب زنجان. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد ۲۷، شماره ۵، صفحه‌های ۸۷۲ تا ۸۸۱.
- Ben-Hur M, 2006. Using synthetic polymers as soil conditioners to control runoff and soil loss in arid and semi-arid regions - a review. *Australian Journal of Soil Research* 44: 191-204.
- Blake GR and Hartge KH, 1986. Bulk density, Pp. 363-375. In: Klute I, (Ed). *Methods of Soil Analysis. Part 1 - Physical and Mineralogical Methods Second Edition*. American Society of Agronomy, Madison WI.
- Cay E, Sivapalan S and Chan KY, 2001. Effect of polyacrilamide on reducing the dispersive properties of sodic soils when flood irrigated. *Proceeding of the Irrigation Association of Conference*, 11-12 July. Toowoomba.
- Copeland LO and McDonald MB, 1995. *Seed Science and Technology*. Third edition, Chapman and Hall, New York and London.
- Flanagan DC, Chudhari K and Norton LD, 2002. Polyacrylamide soil amendment effects on runoff and sediment yield on steep slopes: natural rainfall conditions. *Transactions of American Society of Agricultural Engineers* 45: 1339-1351.
- Gee GW and Boudier, JW, 1986. Particle size analysis. In: *Methods of soil analysis*. Pp. 383-411. In: Klute I, (Ed). Part 1. *Agron. Monogr. 9*. I.S.I. Madison. WI.
- Hazbavi Z, 2013. Soil erosion control by application of polyacrylamide to minimize its cropping systems. *A Review. Agriculture Ecosystems and Environment* 164: 32-52.
- He JJ, Cai OG and Tang ZJ, 2008. Wind tunnel experimental study on the effect of PAM on soil wind erosion control. *Environmental Monitoring and Assessment* 145: 185-193.
- Inbar A, Ben-Hur M, Sternberg M and Lado M, 2015. Using polyacrylamide to mitigate post-fire soil erosion. *Geoderma* (239–240): 107–114.
- Kenneth NN and Wankwo PE, 2001. Polyacrylamide as a soil stabilizer for erosion control. Wisconsin department of transportation. Report No: W160-98. 29 p.
- Klute A, 1986. Water retention- laboratory methods. Pp. 635-662. In: Klute I, (Ed). *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.
- Klute A and Dirksen C, 1986. Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods. Pp. 687-732. In: Klute I, (Ed). *Method of Soil Analysis. Part 1. Physical Soil Science Society American*, Madison, WI.
- Lee SS, 2006. Soil surface-seal measurement using HIGH-resolution x-ray computed tomography (HRCT). M. Sc. Thesis, The faculty of the Graduate School, University of Missouri Columbia.
- Movahedan M, Abbasi N and Keramati M, 2012. Wind erosion control of soils using polymeric materials. *Eurasian Journal of Soil Science* 2: 81-86.
- Ngo YH, Li D, Simon GP and Garnier G, 2012. Effect of cationic polyacrylamide on the aggregation and SERS performance of gold nanoparticles-treated paper. *Journal of Colloid and Interface Science* 392: 237-246.
- Novak J and Watts D, 2005. Influence of added organic matter and polyacrylamide on physical properties of Norfolk loamy sand. Management impact on soil properties. Part of 105. USDA-ARS, Coastal Plains, Soil, Water and Plant Research Center. Report No: 2611. 105 p.
- Novoa GAG, Heinamaki J, Mirza S, Antikainen O, Colarte AI, Paz AS and Yliruusi J, 2004. Physical solid-state properties and dissolution of sustained-release matrices of polyvinylacetate. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics* 95: 343-350.
- Peterson JR, Flanagan DC and Tishmak JK, 2002. PAM application method and electrolyte source effects on plot-scale runoff and erosion. *American Society of Agricultural Engineers* 45: 1859- 1867.
- Pettijohn FJ, 1957. *Sedimentary Rocks*. 2ed Harper, New York. 718p.
- Phillips SH, 2007. Effect of polyacrylamides on the physical properties of some light textured soils. M. Sc. Thesis, The University of Adelaide, School of Erath and Environmental Science.
- Sivapalan S, 2004. Response of soybeans to amelioration of sodic soils with polyacrylamides. Pp. 1-5. *Proceeding of 13th International Conference on Soil Conservation Organization*. July, Brisbane.
- Sivapalan S, 2006. Benefits of treating sandy soil with a cross linked-type polyacrylamide. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 46: 579-584.

- Sojka RE, Bjorneberg DL, Entry Rd, Lentz S and Orts WJ, 2007. Polyacrylamide in agriculture and environmental land management. *Advances in Agronomy* 92: 75-162.
- Wu SF, Wu PT, Feng H and Bu CF, 2010. Influence of amendments on soil structure and soil loss under simulated rainfall chinas loess plateau. *African Journal of Biotechnology* 9: 6116-6121.
- Yoder RE, 1936. A direct method of aggregate analysis and a study of a physical nature of erosion losses. *Journal of American Agronomy* 28: 337-351.
- Yonts CD, Eisenhauer BE and Varner, D, 2003. Managing furrow irrigation systems. *Water Resources Management* 6: 215-222.
- Zheng M, 2011. A technology for enhanced control of erosion, sediment and metal leaching at disturbed land using polyacrylamide and magnetite nanoparticles. M. Sc. Thesis, USA, Auburn University. 104p.