

## کاربرد پلی آکریل آمید در مهار اثر چرخه انجماد- ذوب در خاک بر تولید رواناب و هدررفت خاک

مرتضی بهزادفر<sup>۱</sup>، سید حمیدرضا صادقی<sup>۲\*</sup> و محمد جواد خانجانی<sup>۳</sup>

### چکیده

این پژوهش با هدف بررسی اثر استفاده از سطوح مختلف مصرف پلی آکریل آمید (PAM) بر مهار تولید رواناب و هدررفت خاک، متأثر از چرخه انجماد- ذوب تحت شرایط شبیه سازی باران انجام شد. بدین منظور، اثر استفاده از سطوح ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ گرم بر متر مربع PAM آنیونی در قالب طرح کاملاً تصادفی با تیمار چرخه انجماد- ذوب و بدون PAM به عنوان شاهد و سه تیمار آزمایشی از سطوح مصرف PAM در مقیاس کرت کوچک آزمایشی بر زمان شروع و حجم کل رواناب و هدررفت خاک بررسی شد. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که کاربرد پلی آکریل آمید سطوح مختلف، سبب افزایش معنی دار زمان شروع رواناب شدند به طوری که سطوح مصرف ۰/۲۵ و ۰/۵ گرم بر مترمربع، به ترتیب ۴۹ و ۲۳ درصد تولید رواناب و ۷۷ و ۵۲ درصد هدررفت خاک را کاهش دادند. در مقابل بالاترین سطح مصرف به ترتیب ۱/۶۲ و ۴/۵ برابر تولید رواناب و هدررفت خاک را افزایش داد. بنابراین PAM با قابلیت هم آوری ذرات و افزایش نفوذپذیری، اثرات چرخه انجماد- ذوب در خاک را مهار کرده، حال آنکه به دلیل افزایش دافعه بین ذرات رس موجود در خاک به دلیل کاربرد مقادیر زیاد PAM (۰/۷۵ گرم بر مترمربع) تأثیر معکوس و افزایشی در تولید رواناب و هدررفت خاک داشته است.

**واژه های کلیدی:** افزودنی های خاک، پلی آکریل آمید، تولید رسوب، رواناب، فن آوری های نوین مدیریت خاک.

**ارجاع:** بهزادفر م. صادقی س. ح. ر. و خانجانی م. ج. ۱۳۹۵. کاربرد پلی آکریل آمید در مهار اثر چرخه انجماد- ذوب در خاک بر تولید رواناب و هدررفت خاک. مجله پژوهش آب ایران. ۲۰: ۳۹-۴۷.

۱- دانش آموخته دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس.

۲- استاد گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس.

۳- استاد گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

\* نویسنده مسئول: [sadeghi@modares.ac.ir](mailto:sadeghi@modares.ac.ir)

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۱۰/۰۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۴/۱۹

## مقدمه

فرسایش در مقیاس جهانی، سالانه ۷۵ میلیارد تن هدررفت خاک را به دنبال دارد (پیمنتال و همکاران، ۱۹۹۵). افت کیفیت و حاصل‌خیزی اراضی کشاورزی در اثر هدررفت مواد آلی خاک، افزایش هزینه‌هایی مانند استفاده از انواع حاصل‌خیزکننده‌ها و در نتیجه افزایش هزینه‌های احیاء و اصلاح خاک را در پی دارد. از طرف دیگر انتشار کربن<sup>۱</sup> تثبیت شده در خاک و بروز وقایعی مانند سیلاب‌های ترسناک از جمله پیامدهای درون<sup>۲</sup> و برون مزرعه‌ای<sup>۳</sup> مترتبط بر فرسایش خاک هستند (ورهیجن و همکاران، ۲۰۰۹). بنابراین به کارگیری فن‌آوری‌های مهار فرسایش خاک بسیار مهم است (محمود اواد و همکاران، ۲۰۱۲).

استفاده از ترکیباتی که بتواند ضمن اصلاح خصوصیات خاک و بهبود کیفیت آن، فرسایش‌پذیری خاک را نیز کاهش دهد، امروزه بسیار مورد توجه است (کومار و ساها، ۲۰۱۱). این ترکیبات با نام عمومی افزودنی‌های خاک<sup>۴</sup> شناخته می‌شوند و دارای تنوع بالایی هستند. به عنوان مثال می‌توان به کاربرد موادی مانند ژئوپیس (کومار و ساها، ۲۰۱۱)، بازائیت<sup>۵</sup> (کامئی و همکاران، ۲۰۱۲)، ژئولیت (ژیوبین و ژانبین، ۲۰۰۱)، افزودنی‌های آلی<sup>۶</sup> (عنابی و همکاران، ۲۰۱۱)، انواع پلیمرهای شیمیایی، زیستی<sup>۷</sup> و ترکیبی<sup>۸</sup> (محمود اواد و همکاران، ۲۰۱۲)، سوپلتاک<sup>۹</sup> (اکوو و همکاران، ۲۰۱۱)، قارچ‌ها<sup>۱۰</sup> (کلاریج و همکاران، ۲۰۰۹)، پلی‌وینیل‌استات (موحدان و همکاران، ۱۳۹۰) و ورمی کمپوست و کود دامی (اصغری و همکاران، ۱۳۸۹) اشاره کرد. در این میان، استفاده از ماده پلیمری موسوم به پلی‌آکریل‌آمید (PAM)<sup>۱۱</sup> از دهه ۱۹۹۰ مورد توجه جدی پژوهش‌گران حفاظت خاک بوده است (گرین و استات، ۲۰۰۱؛ لی و همکاران، ۲۰۱۱). PAM یک ماده پلیمری آلی با زنجیره مولکولی بلند است که به‌خوبی می‌تواند با هم‌آوری<sup>۱۲</sup> ذرات خاک، سبب افزایش نفوذپذیری،

جلوگیری از آب‌بندی<sup>۱۳</sup> و سله‌بندی<sup>۱۴</sup> سطح خاک شده و میزان تولید رواناب و هدررفت خاک را کاهش دهد (لی و همکاران، ۲۰۱۱). PAM، به سه دسته آنیونی، کاتیونی و خنثی تقسیم‌بندی می‌شود (کومار و ساها، ۲۰۱۱). کاربرد حفاظتی این ماده پلیمری توسط پژوهشگران زیادی در زمینه تثبیت شیب‌ها (سپاسخواه و بذر افشان جهرمی، ۲۰۰۶)، مهار رواناب، هدررفت خاک و عناصر اصلی غذایی خاک (وانگ و همکاران، ۲۰۱۱؛ کومار و ساها، ۲۰۱۱؛ چائوین و همکاران، ۲۰۱۲؛ اصغری و همکاران، ۱۳۸۹ و حزباوی و همکاران، ۱۳۹۱) و بهبود خصوصیات هیدرولیکی خاک (لی و همکاران، ۲۰۱۱) بررسی شده است. نکته قابل تأمل دیگر در مباحث فرسایش‌پذیری خاک و مهار عوامل مؤثر بر تشدید آن، استفاده از روش‌هایی است که بتواند نقش عوامل تأثیرگذار بر فرسایش‌پذیری مانند چرخه انجماد- ذوب (کوک و مک کول، ۱۹۹۰؛ هنری، ۲۰۰۷ و وانگ و همکاران، ۲۰۱۳) در خاک را مهار کند. لازم به ذکر است افزایش مقاومت نفوذپذیری (آنگر، ۱۹۹۱)، کاهش میزان پایداری خاک‌دانه‌ها (اوزتاس و فایرتوربای، ۲۰۰۳)، کاهش مقاومت برشی خاک (وان کلورن، ۱۹۹۸) و افزایش معنی‌دار زمان شروع و حجم رواناب (بهزادفر و همکاران، ۱۳۹۱) و تولید رسوب (گاتو و فریک، ۲۰۰۴ و بهزادفر و همکاران، ۱۳۹۱) از جمله اثرات مخرب چرخه انجماد- ذوب در خاک هستند. بررسی سوابق موضوع نشان داد که بررسی‌های کمی انجام شده (یاربسی و همکاران، ۲۰۰۷؛ زایمقلو، ۲۰۱۰؛ کامئی و همکاران، ۲۰۱۲ و غزاوی و روستایی، ۲۰۱۳) بیشتر رویکرد مهندسی خاک داشته و به موضوع مهار تولید رواناب و هدر خاک متأثر از چرخه انجماد- ذوب با استفاده از افزودنی‌ها، پرداخته نشده است. از این‌رو این پژوهش با هدف بررسی نقش PAM بر مهار پیامدهای چرخه انجماد- ذوب با تأکید بر تولید رواناب و هدررفت خاک در مقیاس کرت‌های آزمایشی برنامه‌ریزی شد.

## مواد و روش‌ها

این پژوهش در مراحل ذیل و با هدف امکان‌سنجی استفاده از سطوح مختلف مصرف PAM بر مهار اثرات

- 1- CO2 Emission
- 2- In-Site
- 3- Off-Site
- 4- Soil Amendments
- 5- Bassanite
- 6- Organic Amendment
- 7- Biopolymer
- 8- Synthetic Polymer
- 9- Soiltac
- 10- Fungi
- 11- Polyacrylamide
- 12- Flocculation

13- Sealing  
14- Crusting

چرخه انجماد- ذوب و تحت شرایط شبیه‌ساز باران انجام شد.

### خاک مورد بررسی

خاک مورد استفاده در این پژوهش با بافت لومی سیلتی، ماده آلی ۰/۱۵۵ درصد، اسیدیته ۸/۲ و هدایت الکتریکی ۱۳۷/۳ میکروزیمنس بر متر، از منطقه‌ای با زمین‌شناسی نهشته‌های لسی و مختصات طول جغرافیایی ۱۱' ۵۷° شرقی و ۲۹' ۳۷° عرض شمالی، موسوم به بدرانلو، در ۱۰ کیلومتری غرب شهرستان بجنورد، مرکز استان خراسان شمالی تهیه و آماده‌سازی شد. خاک مذکور به سبب ایجاد شرایط مقایسه‌ای و نیز تعلق آن به منطقه‌ای برخوردار از چرخه‌های انجماد- ذوب انتخاب شد (ربانی و کرمی، ۱۳۸۸).

### تحلیل چرخه انجماد- ذوب در خاک

برای شبیه‌سازی شرایط طبیعی چرخه انجماد- ذوب در محیط آزمایشگاه، تحلیل فراوانی دمای اعماق مختلف خاک (۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متر) در مقیاس روزانه از ایستگاه سینوپتیک (بجنورد) واقع در فاصله ۷ کیلومتری از منطقه برداشت خاک، انجام شد. در این راستا، پس از تشکیل سری زمانی داده‌های موجود در طول دوره آماری ۱۹۹۲ تا ۲۰۰۷، وضعیت دمای یخبندان خاک (صفر درجه سانتی‌گراد و پایین‌تر) و دمای متناظر روزانه هوا تحلیل و عمق هدف بررسی مشخص شد.

### سامانه سرمایشی

برای القاء شرایط یخبندان خاک، سامانه سرمایشی با قابلیت ایجاد سرما از بالا، مجهز به سیستم چرخش هوا، متناسب با دامنه تغییرات دمایی منطقه (۱۰- تا ۲۱ درجه سانتی‌گراد)، طراحی و ساخته شد.

### سامانه شبیه‌ساز باران

این پژوهش با شبیه‌ساز باران و در محیط آزمایشگاه شبیه‌ساز باران و فرسایش خاک دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تربیت مدرس انجام شد. نظر به ضرورت مهار شرایط انجماد و ذوب و نیز امکان جانمایی کرت‌ها در سامانه سرمایشی، کرت‌های کوچک مربعی شکل با طول ضلع ۰/۵ متر ساخته شد.

### خصوصیات بارش

شبیه‌سازی واقعه بارش در محیط آزمایشگاه، با استفاده از تحلیل منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی رگبارهای منطقه بررسی شد. بدین منظور منحنی‌های مربوط به ایستگاه سینوپتیک بجنورد تحلیل و واقعه بارشی با شدت ۱/۲ میلی‌متر در دقیقه و با تداوم ۳۰ دقیقه به‌عنوان خصوصیات واقعه هدف در محیط سامانه شبیه‌ساز بارش انتخاب شد.

### آماده‌سازی کرت

برای اجرای آزمایش و پس از انتقال خاک منطقه به آزمایشگاه، بر اساس روش ارائه شده توسط هاوکه و همکاران (۲۰۰۶)، هوا خشک و پس از عبور از الک ۳ میلی‌متر، با کوبیدگی و غلتک زدن، داخل کرت‌ها ریخته شدند. کرت‌ها آهنی با دیواره‌هایی از جنس پلی‌آکرلیک با توانایی بالا در تحمل فشار و عایق حرارتی و صفحه زهکش تحتانی بودند. برای فراهم شدن رطوبت نسبی ۳۵ درصد وزنی، کرت‌ها به مدت ۲۴ ساعت داخل حوضچه اشباع قرار داده شدند و سپس برای القاء شرایط یخبندان، به محیط سامانه سرمایشی منتقل شدند. با توجه به شیب محل نمونه‌برداری، کرت‌های کوچک با شیب ۲۰ درصد روی سامانه شبیه‌ساز استقرار یافتند.

### برداشت داده‌های رواناب و رسوب

نمونه‌برداری به‌صورت سری زمانی و در فواصل ۲ دقیقه (سه گام اول زمانی پس از شروع رواناب)، ۳ دقیقه (سه گام زمانی دوم)، ۵ دقیقه تا پایان واقعه بارش و ۵ دقیقه پس از پایان واقعه بارش انجام شد. در نهایت برای بررسی تغییرات زمانی حجم رواناب و رسوب در تیمارهای آزمایش، اندازه‌گیری حجم رواناب، با استفاده از استوانه مدرج و رسوب با روش ته‌نشینی و توزین انجام شد.

### پلی‌آکریل‌آمید (PAM)

در این پژوهش از پلی‌آکریل‌آمید آنیونی با قابلیت انحلال در آب و در سطوح مصرف ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ گرم بر مترمربع، به‌روش اسپری روی سطح خاک (وانگ و همکاران، ۲۰۱۱) به سبب قابلیت تهیه و نیز توزیع یکنواخت آن در سطح کرت‌ها، پس از پایان چرخه انجماد- ذوب استفاده شد.

## تحلیل آماری

این پژوهش در قالب طرح کاملاً تصادفی، با سه تکرار در هر تیمار انجام شد. تیمارهای پژوهش به ترتیب شامل چرخه انجماد- ذوب و بدون مصرف PAM با علامت اختصاری FT- No PAM به عنوان شاهد و سه تیمار آزمایشی با سطوح مصرف ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ گرم بر متر مربع و تحت تأثیر چرخه انجماد- ذوب، به ترتیب با علائم اختصاری PAM1، PAM2 و PAM3 استفاده شدند. در نهایت و نتایج آنالیز واریانس شده و میانگین هر مشخصه تحت تیمارهای مختلف مقایسه شدند (گری و کینیر، ۱۹۹۹).

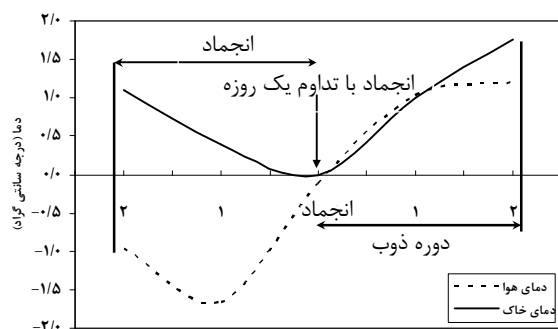
## نتایج و بحث

این پژوهش با هدف امکان‌سنجی استفاده از سطوح مختلف مصرف PAM در مهار اثرات چرخه انجماد- ذوب بر تولید رواناب و هدررفت خاک در شرایط شبیه‌ساز باران انجام و نتایج ذیل را به دنبال داشت.

## چرخه انجماد- ذوب

برای شبیه‌سازی چرخه در محیط آزمایشگاه به متغیرهای تداوم چرخه، عمق هدف، تعداد روزهای چرخه و دامنه تغییرات دمایی نیاز است. تحلیل فراوانی دمایی اعماق مختلف خاک نشان داد، معادل ۳۰ درصد یخبندان‌های منطقه تداوم یک روزه دارند. همچنین ۹۰ درصد یخبندان‌ها در عمق ۱۰ سانتی‌متری به وقوع پیوسته است. از طرفی بررسی وضعیت تغییرات دمایی روزانه هوا نشان داد، دو روز قبل از وقوع یخبندان در خاک دمایی هوا شروع به افت کرده و تا دو روز بعد از وقوع یخبندان، دما در عمق هدف (۱۰ سانتی‌متر) از انجماد خارج می‌شود. پس

چرخه‌های شامل سه روز انجماد و دو روز ذوب با متوسط دمایی روزانه ۱-، ۱/۷-، ۰/۱-، ۱ و ۱/۲ به‌عنوان معیاری برای القاء چرخه در سامانه سرمایه‌گذاری مد نظر قرار گرفت. شکل ۱ میانگین روند تغییرات هم‌زمان دمایی خاک و هوا در چرخه هدف را نشان می‌دهد.



شکل ۱- روند تغییرات هم‌زمان دمایی خاک و هوا در چرخه هدف

## زمان شروع رواناب

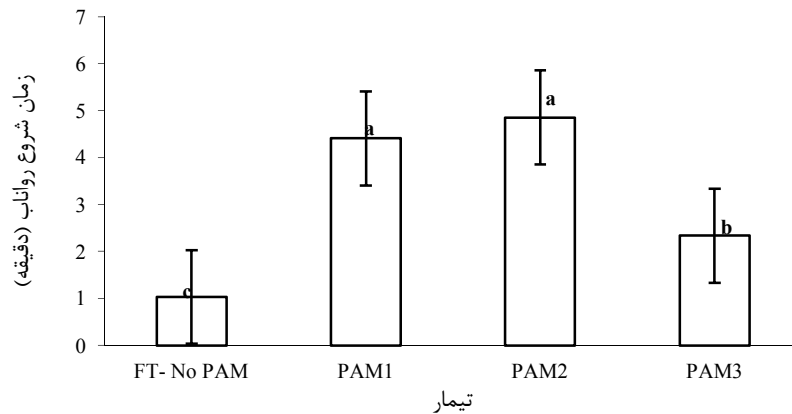
پس از شروع واقعه بارش با خصوصیات تشریح شده، زمان شروع رواناب پیوسته در محل سرریز کرت استقرار یافته روی سامانه شبیه‌ساز باران، به‌عنوان زمان شروع رواناب (دقیقه) ثبت شد. جدول‌های ۱، ۲ و شکل ۲ نتایج اندازه‌گیری زمان شروع رواناب در تیمارهای آزمایش را نشان می‌دهد. تحلیل‌های آماری اثر معنی‌دار ( $p=0/05$ ) استفاده از سطوح مختلف PAM در افزایش زمان شروع رواناب را در مقایسه با تیمار شاهد تأیید می‌کنند. به طوری که PAM1، PAM2 و PAM3 به ترتیب ۴/۲۵، ۴/۶۷ و ۲/۲۵ برابر زمان شروع رواناب را در مقایسه با تیمار شاهد افزایش دادند. البته میزان تأثیر PAM1 و PAM2 در افزایش زمان شروع رواناب با یکدیگر تفاوت معنی‌دار ( $p<0/05$ ) ندارد.

جدول ۱- تجزیه واریانس مقادیر زمان شروع رواناب (دقیقه) در تیمارهای آزمایش

| سطح معنی‌داری | F      | میانگین مربعات | درجه آزادی | مجموع مربعات |              |
|---------------|--------|----------------|------------|--------------|--------------|
| ۰/۰۰          | ۱۰۰/۷۴ | ۹/۶۳           | ۳          | ۲۸/۸۹        | بین گروه‌ها  |
|               |        | ۰/۰۹           | ۸          | ۰/۷۶         | درون گروه‌ها |
|               |        |                | ۱۱         | ۲۹/۶۵        | جمع          |

جدول ۲- زمان شروع رواناب (دقیقه) در تیمارهای آزمایش

| انحراف معیار | میانگین | تکرار |      |      | علامت اختصاری |
|--------------|---------|-------|------|------|---------------|
|              |         | ۳     | ۲    | ۱    |               |
| ۰/۰۳         | ۱/۰۴    | ۱/۰۷  | ۱/۰۵ | ۱/۰۰ | FT- No PAM    |
| ۰/۵۸         | ۴/۴۲    | ۴/۷۵  | ۴/۷۵ | ۳/۷۵ | PAM1          |
| ۰/۱۷         | ۴/۸۶    | ۴/۶۷  | ۵/۰۰ | ۴/۹۱ | PAM2          |
| ۰/۱۴         | ۲/۳۴    | ۲/۵۰  | ۲/۲۵ | ۲/۲۸ | PAM3          |



شکل ۲- مقایسه میانگین زمان شروع رواناب در تیمارهای آزمایش

PAM1 و PAM2 در کاهش حجم رواناب را تأیید می‌کنند. این سطوح توانسته‌اند به ترتیب ۴۹ و ۴۳ درصد حجم کل رواناب در مقایسه با تیمار شاهد را کاهش دهند. در مقابل PAM3 سبب افزایش معنی‌دار ( $p=0/05$ ) ۱/۶۲ برابری حجم کل رواناب شد.

### حجم رواناب

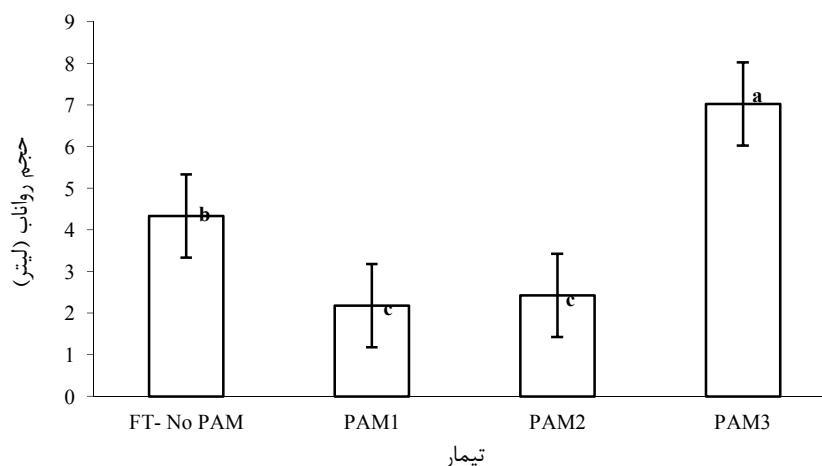
نمونه‌برداری رواناب در مقاطع زمانی تعیین شده در طول واقعه بارش انجام و در نهایت حجم کل رواناب (لیتر) برای هر تیمار آزمایش ثبت شد. جدول‌های ۳ و ۴ و شکل ۳ نتایج اندازه‌گیری حجم رواناب و شکل ۴ تغییرات زمانی حجم رواناب در طول واقعه بارش را نشان می‌دهد. تحلیل‌های آماری اثر معنی‌دار ( $p<0/05$ ) استفاده از

جدول ۳- تجزیه واریانس مقادیر حجم کل رواناب (لیتر) در تیمارهای آزمایش

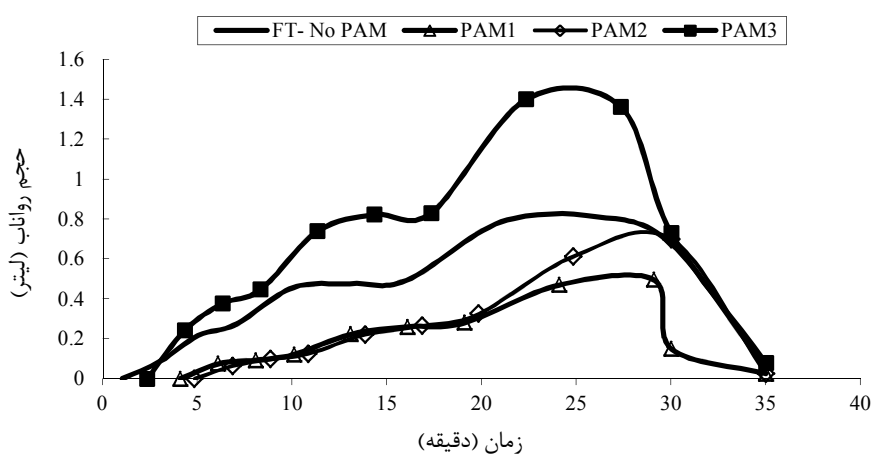
| سطح معنی‌داری | F     | میانگین مربعات | درجه آزادی | مجموع مربعات |              |
|---------------|-------|----------------|------------|--------------|--------------|
| ۰/۰۰          | ۴۰/۱۸ | ۱۵/۰۷          | ۳          | ۴۵/۲۲        | بین گروه‌ها  |
|               |       | ۰/۳۷           | ۸          | ۳/۰۰         | درون گروه‌ها |
|               |       |                | ۱۱         | ۴۸/۲۲        | جمع          |

جدول ۴- حجم کل رواناب (لیتر) در تیمارهای آزمایش

| انحراف معیار | میانگین | تکرار |      |      | علامت اختصاری |
|--------------|---------|-------|------|------|---------------|
|              |         | ۳     | ۲    | ۱    |               |
| ۰/۳۵         | ۴/۳۳    | ۴/۵۷  | ۴/۴۹ | ۳/۹۳ | FT- No PAM    |
| ۰/۷۴         | ۲/۱۸    | ۲/۱۸  | ۱/۴۵ | ۲/۹۲ | PAM1          |
| ۰/۱۶         | ۲/۴۴    | ۲/۵۸  | ۲/۴۶ | ۲/۲۷ | PAM2          |
| ۰/۹۰         | ۷/۰۳    | ۷/۸۲  | ۶/۲۴ | ۶/۰۵ | PAM3          |



شکل ۳- مقایسه میانگین حجم رواناب (لیتر) در تیمارهای آزمایش



شکل ۴- تغییرات زمانی حجم رواناب در تیمارهای آزمایش

PAM3 سبب افزایش معنی‌دار ( $p=0/05$ ) میزان هدررفت خاک به میزان ۴/۵ برابر تیمار شاهد شده است. لازم به ذکر است هر چند اثر استفاده از PAM1 و PAM2 در کاهش هدررفت خاک معنی‌دار ( $p=0/05$ ) نبود، با این وجود این سطوح توانستند به ترتیب ۷۷ و ۵۲ درصد میزان هدررفت خاک را کاهش دهند.

### هدررفت خاک

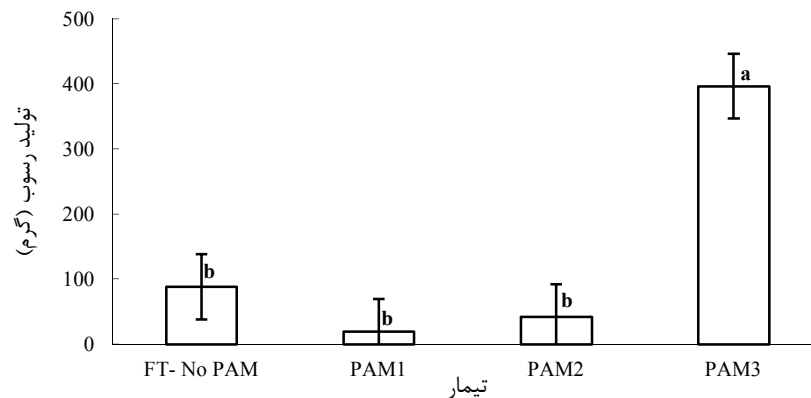
جدول‌های ۵ و ۶ و شکل ۵ نتایج اندازه‌گیری میزان هدررفت خاک (گرم) و شکل ۶ تغییرات زمانی رسوب در طول واقعه بارش در تیمارهای مختلف را نشان می‌دهد. تحلیل‌های آماری اثر معنی‌دار ( $p=0/05$ ) کاهش هدررفت خاک متأثر از چرخه انجماد- ذوب در سطوح مختلف PAM را تأیید نکردند. نتایج نشان دادند که استفاده از

جدول ۵- تجزیه واریانس مقادیر هدر رفت خاک (گرم) در تیمارهای آزمایش

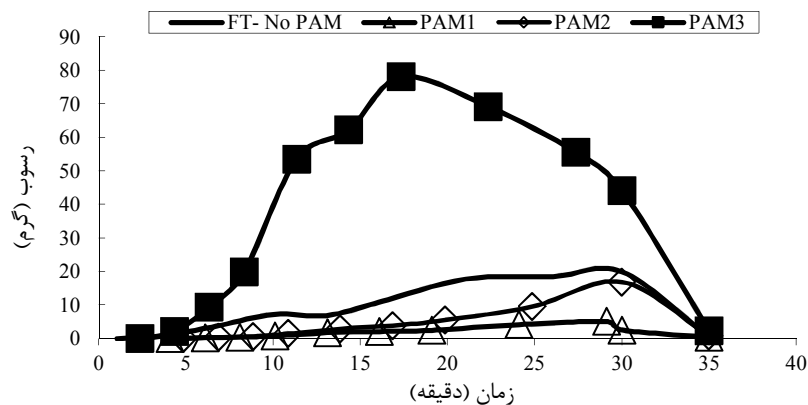
| سطح معنی‌داری | F     | میانگین مربعات | درجه آزادی | مجموع مربعات |              |
|---------------|-------|----------------|------------|--------------|--------------|
| ۰/۰۰          | ۲۴/۹۲ | ۹۲۶۵۳/۲۸       | ۳          | ۲۷۷۹۵۹/۸۴    | بین گروه‌ها  |
|               |       | ۳۷۱۷/۴۰        | ۸          | ۲۹۷۳۹/۲۷     | درون گروه‌ها |
|               |       |                | ۱۱         | ۳۰۷۶۹۹/۱۱    | جمع          |

جدول ۶- میزان تولید رسوب (گرم) در تیمارهای آزمایش

| انحراف معیار | میانگین | تکرار  |        |        | علامت اختصاری |
|--------------|---------|--------|--------|--------|---------------|
|              |         | ۳      | ۲      | ۱      |               |
| ۴۵/۹۸        | ۸۸/۱۴   | ۶۸/۶۰  | ۱۴۰/۶۶ | ۵۵/۱۵  | FT- No PAM    |
| ۱۳/۶۰        | ۱۹/۴۹   | ۱۸/۳۶  | ۶/۴۷   | ۳۳/۶۶  | PAM1          |
| ۴/۶۵         | ۴۲      | ۴۶/۴۹  | ۴۲/۲۹  | ۳۷/۲۱  | PAM2          |
| ۱۱۲/۰۲       | ۳۹۶/۶۸  | ۵۰۱/۴۶ | ۴۰۹/۹۷ | ۲۷۸/۶۱ | PAM3          |



شکل ۵- مقایسه میانگین تولید رسوب (گرم) در تیمارهای آزمایش



شکل ۶- تغییرات زمانی رسوب در تیمارهای آزمایش

هدررفت خاک را کاهش دهند. نتایج پژوهش نشان داد که PAM می‌تواند با قابلیت هم‌آوری کردن، افزایش ضریب زبری و نفوذپذیری تأثیر معنی‌داری در کاهش تولید رواناب داشته باشد. لی و همکاران (۲۰۱۱) نیز در پژوهشی به اثر استفاده از PAM بر خصوصیات هیدرولیکی خاک در اراضی شیب‌دار پرداخته و بر این قابلیت PAM تأکید داشته‌اند. همچنین بررسی کارایی استفاده از سطوح مختلف مصرف PAM نشان داد که اثر این ماده شیمیایی در افزایش زمان شروع رواناب و کاهش تولید رواناب معنی‌دار و در کاهش هدررفت خاک غیرمعنی‌دار است که

### نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف بررسی تأثیر سطوح مختلف مصرف PAM در مهار اثرات چرخه انجماد- ذوب بر تولید رواناب و هدررفت خاک تحت شرایط شبیه‌ساز باران انجام شد. نتایج این پژوهش، مؤید تأثیر معنی‌دار سطوح مختلف مصرف PAM در مهار زمان شروع رواناب و حجم رواناب است. اما نتایج اثر معنی‌دار کاربرد سطوح مختلف PAM در مهار هدررفت خاک متأثر از چرخه انجماد- ذوب را تأیید نکردند. هرچند سطوح مصرف ۰/۲۵ و ۰/۵ گرم بر مترمربع توانستند به ترتیب ۷۷ و ۵۲ درصد میزان

رواناب را به طور معنی‌داری کاهش دهد. پس می‌توان در مناطقی که چرخه انجماد- ذوب، پدیده‌ای غالب تلقی می‌شود، با هدف مهار رواناب استفاده از سطح مصرف ۰/۲۵ گرم بر مترمربع را به عنوان سطح بهینه مد نظر داشت. پس با توجه به افزایش دافعه بین ذرات رس موجود در خاک به دلیل کاربرد مقادیر زیاد پلی آکریل آمید آنیونی و همچنین منفی بودن بار خالص رس‌های موجود در خاک‌های بیشتر مناطق ایران، استفاده از ترکیبات دارای بار مثبت در پژوهش‌های بعدی توصیه می‌شود. با این وجود ارائه جمع‌بندی‌های جامع و کامل منوط بر انجام پژوهش‌های بیشتر در این زمینه و دست‌یابی به ابعاد متفاوت این فرآیند پیچیده است.

### منابع

۱. اصغری ش. نیشابوری م. ر. عباسی ف. علی اصغر زاده ن. و اوستان ش. ۱۳۸۹. تأثیر پلی آکریل آمید، کود دامی، ورمی کمپوست و لجن بیولوژیکی بر پایداری خاک‌دانه‌ها، مقاومت فروروی و آب قابل استفاده در یک خاک لوم شنی. مجله دانش آب و خاک. ۲۰/۱ (۳): ۱۵-۲۹.
  ۲. بهزادفر م. صادقی س. ح. ر. خانجانی م. ج. و حزباوی ز. ۱۳۹۱. تأثیرپذیری تولید رواناب و رسوب خاک‌های تحت چرخه انجماد- ذوب در شرایط شبیه‌ساز باران. نشریه حفاظت منابع آب و خاک. ۲ (۱): ۱۳-۲۲.
  ۳. حزباوی ز. صادقی س. ح. ر. و یونسی ح. ا. ۱۳۹۱. تحلیل و ارزیابی تأثیرپذیری مؤلفه‌های رواناب از کاربرد سطوح مختلف پلی آکریل آمید. نشریه حفاظت منابع آب و خاک. ۲ (۲): ۱-۱۲.
  ۴. ربانی ف، کرمی ف. ۱۳۸۸. بررسی روند تعداد روزهای یخبندان در استان خراسان شمالی. فصل‌نامه جغرافیای طبیعی. ۱ (۴): ۸۵-۹۴.
  ۵. موحدان م. عباسی ن. و کرامتی م. ۱۳۹۰. بررسی آزمایشگاهی تأثیر پلیمر پلی‌وینیل استات بر مهار فرسایش بادی خاک‌ها. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۲۵ (۳): ۶۰۶-۶۱۶.
  6. Annabi M. Le Bissonnais Y. Le Villio-Poitrenaud M. and Houot S. 2011. Improvement of soil aggregate stability by repeated applications of organic amendments to a cultivated silty loam soil. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 144(1): 382-389.
- با نتایج سپاسخواه و بذرفشان جهرمی (۲۰۰۶) هماهنگی ندارد. ایشان اثر سطوح مختلف مصرف PAM در شیب‌های مختلف (۲/۵، ۵ و ۷/۵ درصد) و تحت شرایط شبیه‌سازی آبیاری بارانی و دفعات مختلف آبیاری را بررسی کردند. از دیگر نتایج این پژوهش می‌توان به کاهش کارایی بالاترین سطح مصرف PAM (۰/۷۵) گرم بر مترمربع) در مقایسه با سایر سطوح اشاره کرد که با نتایج به‌دست آمده توسط وانگ و همکاران (۲۰۱۱) و حزباوی و همکاران (۱۳۹۱) هماهنگی دارد. ایشان اسیدپته نسبتاً بالای خاک آزمایشی (pH=۷/۹۱) را دلیلی بر کاهش کارایی PAM در سطوح بالای مصرف می‌دانند. لازم به ذکر است اسیدپته خاک مورد استفاده در این پژوهش، ۸/۱ و در PAM مورد استفاده، ۷ بود. از طرف دیگر به دلیل قابلیت انحلال PAM در آب، با افزایش سطح مصرف PAM، میزان غلظت آن در آب افزایش و به دنبال آن لزجت<sup>۱</sup> افزایش می‌یابد که در نتیجه، کاهش نفوذپذیری در سطح خاک اتفاق افتاده و تولید رواناب افزایش و هدررفت خاک، به دلیل افزایش نیروی بازدارنده<sup>۲</sup> در اثر تقویت نیروی اتصال در مرز میانی خاک- آب، افزایش می‌یابد (لی و همکاران، ۲۰۱۱ و وانگ و همکاران، ۲۰۱۱). از دیگر دلایل افزایش میزان هدررفت خاک در سطوح بالای مصرف PAM را می‌توان به تشکیل خاک‌دانه‌های با ابعاد بزرگ‌تر نسبت داد (راس و همکاران، ۲۰۰۳) که در نتیجه حجم قابل دسترس رسوب<sup>۳</sup> برای انتقال توسط رواناب افزایش می‌یابد. نکته قابل توجه در خصوص مقایسه نتایج حاصل از این پژوهش با سایر بررسی‌های انجام شده، محوریت پدیده چرخه انجماد- ذوب در روش پژوهش است. همان‌طور که در بالا نیز اشاره شد، این پدیده اثرات مخرب و معنی‌داری بر خصوصیات فیزیکی و مهندسی خاک دارد که می‌تواند تولید رواناب و هدررفت خاک را به طور معنی‌داری تغییر دهد. از طرفی به دلیل وجود سوابق کم تحقیقات مرتبط با موضوع این پژوهش که به بررسی استفاده از PAM در مهار اثرات چرخه انجماد- ذوب بر تولید رواناب و هدررفت خاک می‌پردازد، امکان تطبیق نتایج به طور دقیق وجود ندارد. با این وجود نتایج این پژوهش مؤید این مطلب است که استفاده از سطوح مختلف PAM می‌تواند زمان شروع رواناب و حجم

1- Viscosity  
2- Drag Force  
3- Sediment Availability



- polyacrylamide, biopolymer, and biochar on decomposition of soil organic matter and plant residues as determined by  $^{14}\text{C}$  and enzyme activities. *European Journal of Soil Biology*. 48: 1-10.
21. Oztas T. and Fayetorbay F. 2003. Effect of freezing and thawing processes on soil aggregate stability. *Catena*. 52(1): 1-8.
  22. Pimentel D. Harvey C. Resosudarmo P. Sinclair K. Kurz D. McNair M. Crist S. Shpritz L. Fitton L. Saffouri R. and Blair R. 1995. Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. *Science*. 267(5201): 1117-1123.
  23. Ross C. W. Sojka R. E. and Foerter J. A. 2003. Scanning electron micrographs of polyacrylamide-treated soil in irrigation furrows. *Journal of Soil Water Conservation*. 58(5): 327-331.
  24. Sepaskhah A. R. and Bazrafshan-Jahromi A. R. 2006. Controlling Runoff and Erosion in Sloping Land with Polyacrylamide under a Rainfall Simulator. *Biosystems Engineering*. 93(4): 469-474.
  25. Unger P. W. 1991. Over winter changes in physical-properties of no-tillage soil. *Soil Science Society of America Journal*. 55(3): 778-782.
  26. Van Klaveren R. W. 1987. Hydraulic erosion resistance of thawing soil. Ph.D. diss. Wash. State. Univ., Pullman, 436 p.
  27. Verheijen F. G. A. Jones R. J. A. Rickson R. J. and Smith C. J. 2009. Tolerable versus actual soil erosion rates in Europe. *Earth Science Review*. 94(1-4): 23-38.
  28. Wang A. P. Li F. H. and Yang S. M. 2011. Effect of polyacrylamide application on runoff, erosion, and soil nutrient loss under simulated rainfall. *Pedosphere*. 21(5): 628-638.
  29. Wang B. Zheng F. Römkens M. J. M. and Darboux F. 2013. Soil erodibility for water erosion: A perspective and Chinese experiences. *Geomorphology*. 187: 1-10.
  30. Xiubin H. Zhanbin H. 2001. Zeolite application for enhancing water infiltration and retention in loess soil. *Resources, Conservation and Recycling*. 34(1): 45-52.
  31. Yarbasi N. Kalkan E. and Akbulut S. 2007. Modification of the geotechnical properties, as influenced by freeze-thaw, of granular soils with waste additives. *Cold Region Science and Technology*. 48: 44-54.
  32. Zaimoglu A. S. 2010. Freezing-thawing behavior of fine-grained soils reinforced with polypropylene fibers. *Cold Regions Science and Technology*. 60(1): 63-65.
  7. Chao-Yin D. Fa-Hu L. and Wu L. S. 2012. Soil erosion as affected by polyacrylamide application under simulated furrow irrigation with saline water. *Pedosphere*. 22(5): 681-688.
  8. Claridge A. W. Trappe J. M. and Hansen K. 2009. Do fungi have a role as soil stabilizers and remediators after forest fire?. *Forest Ecology and Management*. 257(3): 1063-1069.
  9. Cook H. and McCool D. K. 1990. Freeze thaw effects on soil strength. *CRREL Special Report 90-1*. Hanover NH. pp.70-76.
  10. Ekwue E. I. Birch R. and Bethel S. 2011. Effect of Soiltac on wash erosion by overland flow of some Trinidadian soils. *Biosystems Engineering*. 108: 87-94.
  11. Gary C. D. and Kinnear, P. R. 1999. *SPSS for windows made simple release 10* (3rd Edition). Psychology Press Ltd. 382 p.
  12. Ferrick M. G. and Gatto L. W. 2004. Quantifying the effect of a freeze-thaw cycle on soil erosion: Laboratory experiments. *Cold Regions Research and Engineering Laboratory. ERDC/CRREL LR-04-16*.
  13. Ghazavi M. and Roustaei M. 2013. Freeze-thaw performance of clayey soil reinforced with geotextile layer. *Cold Regions Science and Technology*. 89: 22-29
  14. Green V. S. and Stott D. E. 2001. Polyacrylamide: A Review of the use, Effectiveness, and Cost of a Soil Erosion Control Amendment. 10th International Soil Conservation Meeting. May 24-29. 1999. Purdue University and the USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory. 6 p.
  15. Hawke R. M. Price A. G. and Bryan R. B. 2006. The effect of initial soil water content and rainfall intensity on near-surface soil hydrologic conductivity: a laboratory investigation. *Catena*. 65(3): 237-246.
  16. Henry H. A. L. 2007. Soil freeze-thaw cycle experiments: Trends, methodological weaknesses and suggested improvements. *Soil Biology and Biochemistry*. 39(5): 977-986.
  17. Kamei T. Ahmed A. and Shibi T. 2012. Effect of freeze-thaw cycles on durability and strength of very soft clay soil stabilized with recycled Bassanite. *Cold Regions Science and Technology*. 82:124-129.
  18. Kumar A. and Saha A. 2011. Effect of Polyacrylamide and gypsum on surface runoff, sediment yield and nutrient losses from steep slopes. *Agricultural Water Management*. 98(6): 999-1004.
  19. Li Y. Shao M. and Horton R. 2011. Effect of Polyacrylamide Applications on Soil Hydraulic Characteristics and Sediment Yield of Sloping Land. *Procedia Environmental Sciences*. 11(Part B): 763-773.
  20. Mahmoud Awad Y. Blagodatskaya E. Ok Y. S. and Kuzyakov Y. 2012. Effects of

