

## تاثیرپذیری تولید رواناب و رسوب خاک‌های تحت چرخه انجماد- ذوب در شرایط شبیه‌ساز باران

مرتضی بهزادفر<sup>۱</sup>، سید حمیدرضا صادقی<sup>۲\*</sup>، محمدجواد خانجانی<sup>۳</sup> و زینب حزباوی<sup>۴</sup>

- ۱) دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری؛ دانشکده منابع طبیعی؛ دانشگاه تربیت مدرس؛ ایران  
۲\*) استاد گروه مهندسی آبخیزداری؛ دانشکده منابع طبیعی؛ دانشگاه تربیت مدرس؛ ایران؛ نویسنده مسئول مکاتبات: sadeghi@modares.ac.ir  
۳) استاد گروه مهندسی عمران؛ دانشگاه شهید باهنر؛ کرمان؛ ایران  
۴) دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آبخیزداری دانشکده منابع طبیعی؛ دانشگاه تربیت مدرس؛ ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۲/۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۶/۲۰

### چکیده

عوامل متعددی بر تعیین و تغییر فرآیند تولید رواناب و ایجاد فرسایش خاک موثر هستند. لیکن نقش بسیاری از این عوامل مانند فرآیندهای انجماد و ذوب به‌خوبی مدنظر قرار نگرفته است. از این‌رو، پژوهش حاضر با هدف شبیه‌سازی و تبیین اثرات چرخه انجماد- ذوب در خاک تحت شرایط شبیه‌سازی باران بر تولید رواناب و رسوب انجام گرفت. پس از تحلیل شرایط دمای هوا و اعماق مختلف خاک حاکم بر منطقه مادری و تعیین عمق هدف ۱۰ سانتی‌متر و القاء انجماد به‌مدت سه روز و ذوب به‌مدت دو روز، واقعه بارشی با شدت ۱/۲ میلی‌متر در دقیقه و با تداوم ۳۰ دقیقه بر تیمارهای آزمایشی و در آزمایشگاه شبیه‌ساز باران و فرسایش خاک دانشگاه تربیت مدرس شبیه‌سازی شد. نتایج به‌دست آمده، رفتار معنی‌دار و متفاوت خاک متأثر از انجماد و چرخه انجماد- ذوب را تایید کردند. به‌نحوی که زمان شروع رواناب در تیمارهای انجماد و انجماد- ذوب به‌ترتیب ۲/۷۴ و ۳/۲۵ برابر نسبت به تیمار شاهد کاهش نشان داد. همچنین، تیمارهای مذکور به‌ترتیب ۱/۴۶ و ۱/۱۶ برابر، تولید رواناب و ۱۱/۹۲ و ۲/۶۵ برابر، تولید رسوب را افزایش دادند. عملکرد لنزهای یخی و جبهه یخ‌بندان و ایجاد رطوبت نزدیک به اشباع پس از تکمیل چرخه، از مهم‌ترین عوامل موثر در رفتار متفاوت خاک تحت چرخه انجماد- ذوب ارزیابی شدند.

واژه‌های کلیدی: دمای خاک؛ رواناب؛ فرسایش خاک؛ لنزهای یخی؛ یخ‌بندان خاک

### مقدمه

فرسایش خاک و فرسایش‌پذیری تقسیم‌بندی شوند، متغیرهای اقلیمی از دسته عواملی هستند که در هر دوی آن‌ها نقش موثری ایفا می‌کنند. نیم‌رخ خاک به‌ویژه در مناطق سرد و مرتفع، متأثر از تغییرات دمای محیط است. زمانی که دمای هوا کاهش می‌یابد، گرمای درونی خاک به‌دلیل شار گرمایی<sup>۱</sup> از سطح آن خارج شده و افت دمای خاک به اندازه کافی، انجماد

فرسایش خاک یکی از مهم‌ترین چالش‌های جهانی است که سالانه تاثیر منفی قابل توجهی به توسعه پایدار اقتصادی وارد می‌سازد (Jianping, 1999). فرسایش خاک، فرآیندی پویاست (Bryan, 2000) که چهار عامل اقلیم، توپوگرافی، خاک و کاربری اراضی در تعیین نوع و شدت آن دخالت دارند (Toy et al., 2001). چنانچه متغیرهای فرسایش در دو دسته

<sup>1</sup> Heat Flux

تحت شرایط آزمایشگاهی (Gatto and Ferrick, 2004)، تاثیر معنی دار اثرات چرخه بر توسعه آبکندهای موقتی در منطقه تبت چین (Zhang et al., 2007)، سهم ۶۰ درصدی بار رسوب معلق در رواناب ناشی از ذوب برف در حوزه آبخیز آزمایشی کوهستانی در ژاپن (Lida et al., 2012) از دیگر نتایج اشاره شده در مطالعات مرتبط با پژوهش است. همچنین صادقی و همکاران (۱۳۸۹) با نگاهی جامع به اثرات این پدیده بر خصوصیات فیزیکی خاک و تاکید بر نقش و اهمیت مطالعه این پدیده در ایران، به رفتار موثر و متفاوت یخزدگی بر تولید رواناب و رسوب خاک‌های تحت چرخه انجماد-ذوب اشاره کردند.

اهمیت مطالعه این پدیده در کشور از آنجا ناشی می‌شود که تقریباً ۵۴ درصد پهنه ایران را مناطق کوهستانی تشکیل داده و از طرفی، تحلیل الگوهای سینوپتیکی یخبندان‌های زمستانه ایران، وقوع یخبندان‌های شدید و فراگیر در ایران را نشان می‌دهد (فتاحی و صالحی‌پاک، ۱۳۸۸). حال آن‌که بررسی فرآیندهای یخزدگی و یا ذوب بسیار کم مورد توجه قرار گرفته است. از این رو مطالعه حاضر با هدف ارزیابی تاثیرپذیری تولید رواناب و رسوب خاک‌های تحت چرخه انجماد-ذوب در شرایط استفاده از کرت آزمایشی کوچک و شبیه‌سازی باران انجام شده است.

#### مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر با هدف شبیه‌سازی اثر چرخه انجماد-ذوب در خاک بر تغییرپذیری تولید رواناب و رسوب در شرایط شبیه‌سازی باران انجام گرفت. جزئیات روش انجام این پژوهش در ادامه ذکر شده است.

#### معرفی منطقه مادری خاک

خاک مورد مطالعه از منطقه‌ای با مختصات طول جغرافیایی ۱۱° ۵۷' شرقی و ۲۹° ۳۷' عرض شمالی موسوم به بدرانلو، واقع در ۱۰ کیلومتری غرب شهرستان بجنورد، مرکز استان خراسان شمالی تهیه و آماده‌سازی شد. ارتفاع محل نمونه‌برداری از سطح دریا، ۱۳۹۰ متر بوده که از نظر کشاورزی به‌عنوان قطب تولید انگور دیم مطرح می‌باشد.

آب درون جسم خاک را در پی دارد (Gatto, 2000). این وضعیت تا افزایش دوباره دمای هوا ادامه می‌یابد تا زمانی‌که خاک منجمد، شروع به ذوب شدن کند و این فرآیند به‌طور چرخه‌ای<sup>۱</sup>، بارها در نیم‌رخ خاک اتفاق می‌افتد. قاعده کلی تاثیر چرخه انجماد-ذوب را می‌توان این‌گونه تفسیر نمود که در مناطقی که درجه حرارت هوا در بخشی از سال زیر صفر باشد، آب موجود در خاک، یخ بسته و چون حجم یخ از آب حدود ۱۰ درصد بیش‌تر است، یخ ایجاد شده به خاک‌دانه‌ها فشار وارد ساخته و موجبات آماس یا ورآمدن خاک ناشی از یخبندان<sup>۲</sup> را به وجود می‌آورد (بای‌وردی، ۱۳۸۲).

انجماد در خاک اثرات قابل توجهی بر خصوصیات فیزیکی و فعالیت‌های میکروبی و بیولوژیکی خاک (Lipson and Schmidt, 2004; Six et al., 2004; Sjursen et al., 2005) میزان فرسایش‌پذیری و تولید رواناب و رسوب (Cook and McCool, 1990; Henry, 2007) و تغییرات زمانی فرسایش-پذیری خاک دارد (Wang et al., 2013). با این وجود هنوز روابط حاکم در رابطه با اثرات این چرخه بر فرسایش‌پذیری خاک، تولید رواناب و رسوب و کاربرد آن‌ها در مدل‌های فرسایش به‌طور جدی و هدف‌مند مورد مطالعه قرار نگرفته است (Papendick and Saxton, 1990). بررسی منابع نشان می‌دهد که غالب مطالعات انجام گرفته تاکید بر اثرات چرخه انجماد-ذوب بر خصوصیات مکانیکی و مهندسی خاک، به-ویژه پایداری خاک‌دانه‌ها (Lehrsch et al., 1991; Lehrsch, 1998; Oztas and Fayertorbay, 2003; Kværnø and Oygraden, 2006; Bing and He, 2011) و کنترل اثرات آن در خصوصیات مهندسی خاک (Yarbaşı et al., 2007; Jafari, 2013) دارند.

حداکثر شدن مقدار عامل فرسایش‌پذیری معادله جهانی فرسایش خاک بلافاصله پس از ذوب برف زمستانه (Young et al., 1990)، افزایش میزان شیاری شدن خاک در اثر تحمل دو چرخه انجماد-ذوب و تحت شرایط شبیه‌سازی باران (Gatto, 2000)، افزایش بار رسوب به میزان ۳/۰۳ برابر در اثر تحمل یک چرخه انجماد-ذوب در یک خاک سیلتی و

<sup>1</sup> Freeze-Thaw Cycle

<sup>2</sup> Frost Heaving

مطالعاتی در سامانه سرمایشی از کرت‌های مربعی کوچک با ابعاد ۰/۵ متر با قابلیت استقرار روی کرت‌های اصلی استفاده گردید.

### آماده سازی کرت

به‌منظور اجرای آزمایش، خاک منطقه مطالعاتی به آزمایشگاه منتقل و پس از هوا خشک کردن، از الک ۳ میلی‌متر عبور داده شد (Hawke et al., 2006). سپس با انجام کوبیدگی و غلتک زدن، وزن مخصوص نزدیک به شرایط طبیعی در خاک ریخته شده داخل کرت‌ها، ایجاد و با قرار دادن کرت‌ها در داخل حوضچه اشباع به مدت ۲۴ ساعت، شرایط رسیدن به رطوبت نسبی خاک به میزان متوسط ۳۵ درصد وزنی و متناسب با رطوبت زمان رخداد فرآیند در شرایط طبیعی فراهم شد (Ai-Ping et al., 2011). لازم به ذکر است لایه‌بندی خاک، با استفاده از شرایط واقعی حاکم بر منطقه مادری، عمق هدف یخ‌زدگی ۱۰ سانتی‌متر و قابلیت اجرای تیمارهای مختلف و امکان جابجایی راحت‌تر به سامانه سرمایشی انجام پذیرفت.

### تیمارهای آزمایش

در پژوهش حاضر به‌منظور تبیین اثرات انجماد و چرخه انجماد-ذوب در خاک بر تولید رواناب و رسوب، یک تیمار شاهد و دو تیمار آزمایشی با سه تکرار تعیین شدند. تیمارهای آزمایشی، انجماد و چرخه انجماد-ذوب نام‌گذاری و به ترتیب، القاء انجماد به مدت سه روز و تحمل چرخه کامل شامل سه روز انجماد و دو روز ذوب برای آن‌ها در نظر گرفته شد. تیمار شاهد نیز بیان‌گر شرایط خاک بدون تحمل شرایط انجماد و ذوب بوده است.

### شبیه‌سازی بارش

بر اساس تحلیل منحنی‌های شدت-مدت- فراوانی رگبارهای ایستگاه سینوپتیک بجنورد، شدت بارش ۱/۲ میلی‌متر در دقیقه با دوام ۳۰ دقیقه به‌عنوان مشخصات رگبار هدف انتخاب و نمونه‌گیری رواناب و رسوب به‌صورت سری زمانی در فواصل ۲ دقیقه (سه گام زمانی اول پس از شروع رواناب)، ۳ دقیقه (سه گام زمانی دوم)، ۵ دقیقه تا پایان واقعه بارش و ۵ دقیقه از پایان واقعه بارش انجام و متغیرهای زمان شروع

خاک مورد مطالعه از اراضی کشاورزی دیم رها شده انتخاب شد. از نقطه نظر زمین‌شناسی، منطقه مادری خاک، از نهشته‌های لسی دوره کواترنری می‌باشد.

### تحلیل فراوانی دمای اعماق خاک

به‌منظور شبیه‌سازی شرایط واقعی چرخه انجماد-ذوب حاکم بر منطقه مادری خاک، آماره‌های اصلی دمای هوا و اعماق مختلف خاک (۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری) در مقیاس روزانه از نزدیک‌ترین ایستگاه سینوپتیک (بجنورد) واقع در فاصله ۱۰ کیلومتری محل نمونه‌برداری، در طول دوره آماره‌گیری ۲۰۰۷-۱۹۹۲ مطالعه شدند. پس از تشکیل سری زمانی داده‌های مربوط به دمای اعماق مختلف خاک و دمای هوای متناظر در آن روز، تحلیل فراوانی دمای انجماد خاک (صفر درجه سانتی‌گراد و کم‌تر از آن) انجام، و عمق هدف و چگونگی شبیه‌سازی شرایط القاء یخ‌بندان به خاک در آزمایشگاه مشخص شد.

### سامانه سرمایشی

پس از تحلیل فراوانی دمای یخ‌بندان هوا و خاک و استخراج دامنه تغییرات دما در منطقه مورد مطالعه، سامانه سرمایشی متناسب با دماهای به‌دست آمده با قابلیت کنترل تغییرات دما و ایجاد سرما از بالا، مجهز به سیستم چرخش هوا در داخل محیط سامانه طراحی و ساخته شد.

### سامانه شبیه‌ساز باران

این پژوهش تحت شرایط شبیه‌ساز باران و در محیط آزمایشگاه شبیه‌ساز باران و فرسایش دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تربیت مدرس انجام گرفت. این سامانه بزرگ‌ترین سامانه شبیه‌سازی فرآیندهای بارندگی، رواناب، فرسایش و تولید رسوب در کشور محسوب شده و مجهز به سه کرت با ابعاد ۶×۱×۰/۵ متر، سطح شبیه‌ساز باران معادل ۴۰ متر مربع، ارتفاع ریزش برابر با ۷ متر و با نازل‌های تحت فشار قادر به شبیه‌سازی بارندگی‌ها در تیپ‌ها، شدت‌ها و مدت‌های مختلف است. البته به‌دلیل شرایط خاص حاکم بر پژوهش حاضر و به‌خصوص امکان استفاده هم‌زمان از تیمارهای

فراهم آوردن شرایط ترسیب به مدت ۲۴ ساعت، جداسازی آب و رسوب انجام گرفت. وزن رسوب به دست آمده پس از قرار گرفتن در آون به مدت ۲۴ ساعت و تحمل دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد و توزین آن، ثبت شد (Gholami et al., 2013). نمایی از شرایط آزمایشگاهی ایجاد شده برای اجرای پژوهش حاضر در شکل ۱ نشان داده شده است.

رواناب (دقیقه)، حجم کل رواناب (لیتر) و تولید رسوب (گرم) اندازه‌گیری و ثبت شدند.

### برداشت داده‌های رواناب و رسوب

اندازه‌گیری حجم رواناب پس از نمونه‌برداری در طول واقعه بارشی، با استفاده از استوانه مدرج انجام گرفت. سپس با



شکل ۱- نمایی از شرایط آزمایشگاهی ایجاد شده برای اجرای پژوهش شامل چیدمان کرت‌ها در سامانه سرمایشی (الف)، اجرای آزمایش شبیه‌سازی باران (ب) و اندازه‌گیری مقادیر رسوب (ج)

خاک، ۲۳۵۹ مورد (معادل ۲/۳ درصد از کل مشاهدات) دمای یخبندان (صفر و کم‌تر از صفر درجه سانتی‌گراد) ثبت شده است. فراوانی واقعه یخبندان در اعماق ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۵۰ سانتی‌متر، به ترتیب ۶۶/۶۶، ۲۵/۸۵، ۹/۰۸، ۴/۲۹ و ۰/۱۲ درصد بودند. بنابراین با توجه به فراوانی دماهای یخبندان خاک تا عمق ۱۰ سانتی‌متر (۹۲/۵۱ درصد)، عمق هدف مطالعه ۱۰ سانتی‌متر برای پژوهش حاضر انتخاب و لذا نمونه‌برداری خاک از منطقه مادری از لایه ۱۰ سانتی‌متری و لایه‌بندی خاک در کرت آزمایشی نیز با توجه به آن انجام گرفت.

### خصوصیات چرخه انجماد- ذوب

به‌منظور شبیه‌سازی چرخه انجماد- ذوب در شرایط آزمایشگاهی، شاخص‌های کمی چرخه مزبور شامل تداوم یخبندان و دامنه تغییرات دمای هوا قبل و بعد از وقوع یخبندان در عمق هدف تعیین شدند. تحلیل فراوانی تداوم‌های مختلف یخبندان در مقیاس روزانه نشان داد که تداوم یک روزه بیش‌ترین سهم فراوانی (معادل ۳۰ درصد) را به‌خود اختصاص داده است. همچنین حداقل، حداکثر و متوسط دمای روزانه هوا در تداوم یک روزه یخبندان در عمق ۱۰ سانتی‌متر

### تحلیل آماری

این پژوهش در قالب طرح کاملاً تصادفی با یک تیمار شاهد (بدون تحمل چرخه انجماد- ذوب) و با دو تیمار آزمایشی شامل انجماد و تحمل چرخه انجماد- ذوب با سه تکرار در هر تیمار انجام شد. در نهایت و به‌منظور مقایسه میانگین از آزمون آنالیز واریانس<sup>۱</sup> در صورت نرمال بودن داده‌ها و کروسکال والیز<sup>۲</sup> در صورت عدم نرمال بودن داده‌ها استفاده شد (Gray and Kinnear, 1999).

### نتایج

پژوهش حاضر با هدف شبیه‌سازی اثرات چرخه انجماد- ذوب در خاک و ارزیابی آن بر میزان تولید رواناب و رسوب تحت شرایط شبیه‌ساز باران انجام و نتایج زیر را به دنبال داشت.

### انتخاب عمق هدف

بر اساس تحلیل فراوانی دمای یخبندان در اعماق مختلف، حداکثر عمق یخبندان خاک، ۵۰ سانتی‌متر تعیین شد. از مجموع ۱۰۲۴۵۶ مورد داده مشاهده‌ای دمای اعماق مختلف

<sup>1</sup> Analysis of Variance (ANOVA)

<sup>2</sup> Kruskal-Walles

پس از آماده‌سازی کرت‌ها و استقرار آن‌ها روی کرت‌های اصلی سامانه شبیه‌ساز باران، واقعه بارش با خصوصیات تشریح شده، انجام گرفت. زمان ایجاد جریان پیوسته رواناب در محل سرریز کرت، به‌عنوان زمان شروع رواناب (دقیقه) ثبت شد. جدول ۱ و شکل ۲ نتایج اندازه‌گیری زمان شروع رواناب در تیمارهای پژوهش را نشان می‌دهد. بر این اساس تیمارهای انجماد و چرخه انجماد-ذوب به‌ترتیب و به‌طور میانگین، ۲/۷۴ و ۳/۲۵ برابر، زمان شروع رواناب را کاهش داده‌اند.

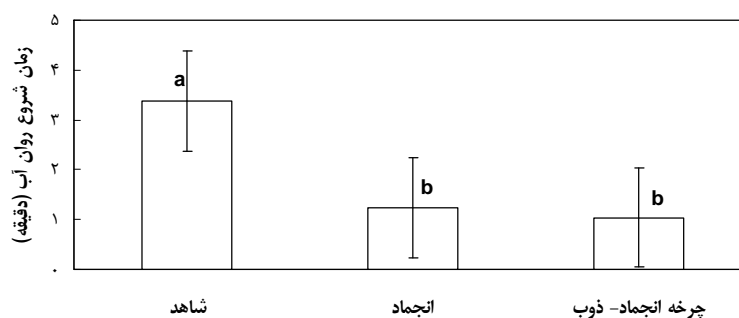
همچنین تحلیل‌های آماری تفاوت معنی‌دار ( $p = 0/05$ ) زمان شروع رواناب در تیمارهای انجماد و چرخه انجماد-ذوب با تیمار شاهد را تایید کردند.

به‌ترتیب ۵/۷-، ۴/۵ و ۰/۵- درجه سانتی‌گراد محاسبه شدند. تحلیل چرخه انجماد-ذوب در عمق هدف با تداوم یک روزه نشان داد که دو روز قبل از وقوع انجماد، دمای هوا شروع به کاهش کرده و پس از وقوع تداوم یک روزه، طی دو روز با افزایش دمای هوا، دما در عمق هدف از دمای انجماد خارج می‌شود. بنابراین چرخه‌ای با سه روز انجماد و دو روز ذوب برای آزمایش و القاء شرایط یخبندان انتخاب شد. دمای متوسط روزانه هوا طی این چرخه ۵ روزه به‌ترتیب روز ۱-، ۱/۷-، ۰/۱-، ۱ و ۱/۲ محاسبه و به‌عنوان معیاری جهت القاء شرایط یخبندان در سامانه سرمایشی مدنظر قرار گرفت.

### زمان شروع رواناب

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

تیمار	تکرار			میانگین	انحراف معیار
	۳	۲	۱		
شاهد	۳/۶۷	۳/۲۲	۳/۲۷	۳/۳۸	۰/۲۵
انجماد	۱/۰۳	۱/۲۲	۱/۴۳	۱/۲۳	۰/۲۰
چرخه انجماد-ذوب	۱/۰۰	۱/۰۵	۱/۰۷	۱/۰۴	۰/۰۳



شکل ۲- مقایسه میانگین زمان شروع رواناب در تیمارهای آزمایش

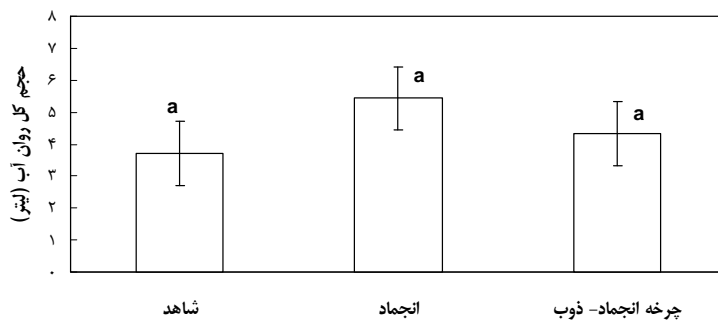
### حجم رواناب

پس از نمونه‌برداری حجم رواناب در گام‌های زمانی تعیین شده طی واقعه بارش، حجم کل روان آب (لیتر) در هر یک از تیمارهای آزمایش ثبت شد. جدول ۲ و شکل ۳ نتایج اندازه‌گیری حجم کل رواناب و شکل ۴ وضعیت تغییرات

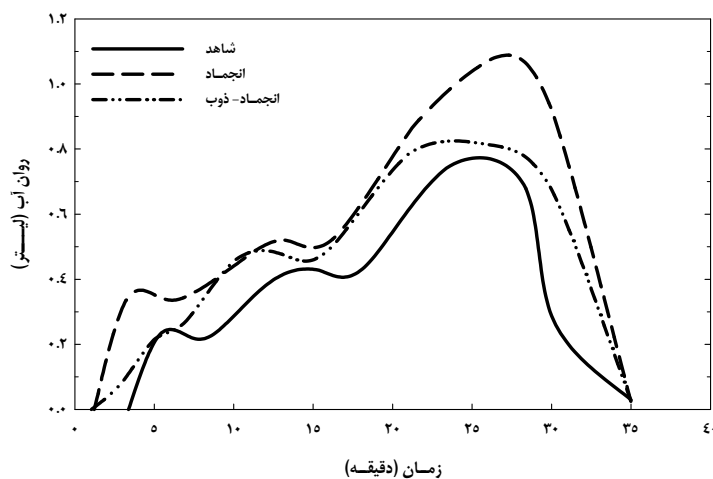
زمانی آن در طول واقعه بارش را نشان می‌دهد. هر چند نتایج تحلیل‌های آماری تفاوت معنی‌دار ( $p = 0/05$ ) بین تیمارهای آزمایش را تایید نکردند، اما تیمارهای انجماد و چرخه انجماد-ذوب به‌ترتیب و به‌طور میانگین، حجم رواناب را ۱/۴۶ و ۱/۱۶ برابر افزایش داده‌اند.

جدول ۲- حجم کل رواناب (لیتر) در تیمارهای آزمایش

تیمار	تکرار			میانگین	انحراف معیار
	۱	۲	۳		
شاهد	۳/۶۶	۴/۰۳	۳/۴۴	۳/۷۱	۰/۳
انجماد	۶/۹۳	۳/۷۸	۵/۵۹	۵/۴۳	۱/۵۸
چرخه انجماد- ذوب	۳/۹۳	۴/۴۹	۴/۵۷	۴/۳۳	۰/۳۵



شکل ۳- مقایسه میانگین حجم رواناب در تیمارهای آزمایش



شکل ۴- تغییرات زمانی حجم رواناب در تیمارهای آزمایش

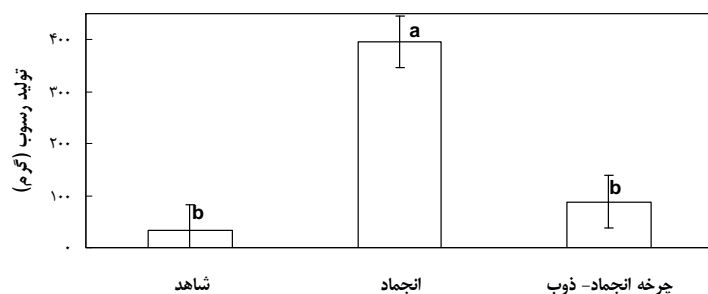
تفاوت معنی‌دار ( $p = 0/05$ ) میانگین تولید رسوب در تیمار انجماد با دو تیمار شاهد و چرخه انجماد ذوب را تایید کردند. همچنین شیارهای ناشی از تمرکز جریان و الگوی آبراهه‌ای ایجاد شده و نیز حرکت توده‌ای و مینیاتوری ناشی از یخ‌زدگی لایه سطحی خاک در کرت‌های آزمایشی در شکل ۷ نشان داده شده است.

#### تولید رسوب

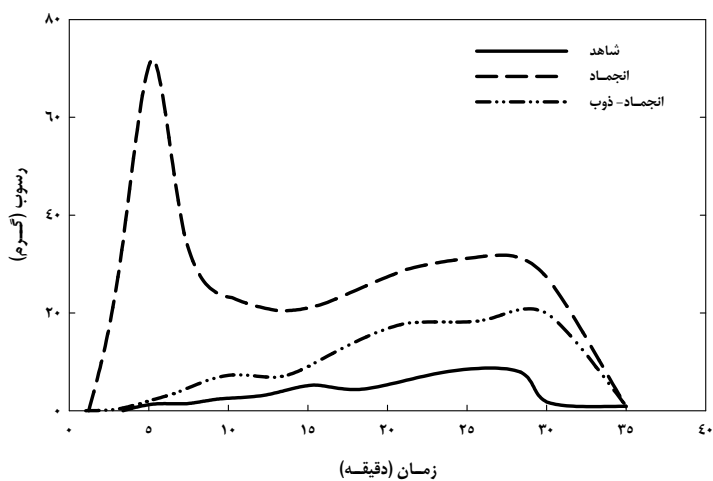
جدول ۳ و شکل ۵ نتایج اندازه‌گیری رسوب کل و شکل ۶ تغییرات زمانی تولید رسوب در تیمارهای پژوهش را نشان می‌دهد. بر این اساس تیمارهای انجماد و چرخه انجماد- ذوب به ترتیب و به‌طور میانگین، ۱۱/۹۲ و ۲/۶۵ برابر، میزان تولید رسوب را افزایش داده‌اند. نتایج تحلیل‌های آماری وجود

جدول ۳- میزان تولید رسوب (گرم) در تیمارهای آزمایش

تیمار	تکرار			میانگین	انحراف معیار
	۱	۲	۳		
شاهد	۴۵/۴۷	۳۷/۶۲	۱۶/۵۴	۳۳/۲۱	۱۴/۹۶
انجماد	۶۰۰/۴۷	۱۱۴/۷۳	۴۷۲/۴۱	۳۹۵/۸۷	۲۵۱/۷۵
چرخه انجماد- ذوب	۵۵/۱۵	۱۴۰/۶۶	۶۸/۶۰	۸۸/۱۴	۴۵/۹۸



شکل ۵- مقایسه میانگین تولید رسوب در تیمارهای آزمایش



شکل ۶- تغییرات زمانی تولید رسوب در تیمارهای آزمایش



شکل ۷- شیباری شدن با الگوی پنجه‌ای در تیمارهای انجماد و ذوب (راست) و لایه یخ‌زده در عمق حدود ۱/۵ سانتی‌متر (چپ)

### بحث و نتیجه‌گیری

نتایج به‌دست آمده از پژوهش حاضر موید رفتار معنی‌دار و متفاوت خاک در اثر القاء انجماد و همچنین چرخه انجماد-ذوب در زمان شروع روان‌آب، حجم روان‌آب و تولید رسوب در شرایط شبیه‌سازی باران بوده است. به‌طوری‌که وجود لایه یخ‌زده در سطح خاک و تشکیل لزه‌های یخی<sup>۱</sup> در فضای بین ذره‌های خاک‌دانه‌ها، باعث افزایش مقاومت به نفوذ<sup>۲</sup> آب در تیمار انجماد می‌شود. Unger (۱۹۹۱) نیز در پژوهش خود به این موضوع به‌عنوان یکی از اثرات مخرب چرخه انجماد-ذوب در خاک اشاره دارد. از طرف دیگر در اثر ذوب خاک در تیمار چرخه انجماد-ذوب و تجمع رطوبت در لایه سطحی، موجب ایجاد شرایط نزدیک به اشباع در سطح خاک و کاهش زمان تولید روان‌آب شده است. در مقابل کاهش زمان تولید روان‌آب در تیمارهای انجماد و چرخه انجماد-ذوب، زمینه را برای تولید روان‌آب بیش‌تر به‌دلیل تاثیر فرآیند انجماد و ذوب در خاک فراهم کرده است. همچنین به‌دلیل کاهش مقاومت برشی خاک در اثر تخریب ساختمان خاک‌دانه‌ها در اثر انجماد و چرخه انجماد-ذوب (Van Klaveren, 1998)، شیباری شدن با الگوی پنجه‌ای (شکل ۷) پس از پایان واقعه بارش در دو تیمار انجماد و چرخه انجماد-ذوب را در پی داشت که

افزایش معنی‌دار میزان تولید رسوب را باعث شده است. این یافته‌ها با نتایج Ferrick و Gatto (۲۰۰۴) مطابقت دارد. ایشان نیز دلیل تولید رسوب بالا در خاک‌های یخ‌زده را به تشکیل لزه‌های یخی در تیمار انجماد و بالا آمدگی و ایجاد حالت تورم در خاک نسبت داده‌اند. همچنین افزایش ۲/۶۵ درصدی میزان تولید رسوب در تیمار چرخه انجماد-ذوب در مقایسه با تیمار شاهد با مقدار ۳/۰۳ برابر گزارش شده توسط ایشان تطابق خوبی دارد. این ساختارهای یخی، دودکشی‌های مخروطی شکلی هستند که جدایش خاک‌دانه‌ها از سطح را موجب شده و با افزایش قابلیت در دسترس بودن رسوب<sup>۳</sup>، شرایط را برای حمل آسان‌تر ذرات فراهم می‌نمایند. از طرف دیگر در تیمار چرخه انجماد-ذوب، تجمع رطوبت در سطح خاک، ایجاد شرایط نزدیک به اشباع را به‌دنبال داشته و جریان روان‌آب، خاک‌دانه‌های آماده حمل ناشی از تخریب ساختمان در اثر انجماد را جابه‌جا می‌نماید. Oztas و Fayetorbay (۲۰۰۳) نیز در مطالعه خود به اثر چرخه انجماد-ذوب در کاهش میزان پایداری خاکدانه‌ها تا حد ۷۵ درصد اشاره داشتند که می‌تواند افزایش ۱۱/۹۲ برابری میزان تولید رسوب در تیمار انجماد در مقایسه با شاهد را در پژوهش حاضر تبیین نماید. از دیگر یافته‌های پژوهش حاضر می‌توان به‌وجود لایه فعال ذوب<sup>۴</sup> به عمق ۱/۵

<sup>3</sup> Sediment Availability

<sup>4</sup> Active Soil Thawing Layer

<sup>1</sup> Frost Lenses

<sup>2</sup> Penetration Resistance



فتاحی، ا.، صالحی پاک، ت. ۱۳۸۸. تحلیل الگوهای سینوپتیکی یخبندان های زمستانه ایران. مجله جغرافیا و توسعه، ۱۳: ۱۲۷-۱۳۶.

Ai-Ping, W., Fa-Hu, L. and Sheng-Min, Y. 2011. Effect of polyacrylamide application on runoff, erosion and soil nutrient loss under simulated rainfall. *Pedosphere*, 21 (5): 628-638.

Bing, H. and He, P. 2011. Experimental investigations on the influence of cyclical freezing and thawing on physical and mechanical properties of saline soil. *Journal of Environ Earth Science*, 64:431-436.

Bryan, R.B. 2000. Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope. *Geomorphology*, 1: 385-415.

Carey, S.K. and Woo, M.K. 2001. Slope runoff processes and flow generation in a subarctic, subalpine catchment. *Journal of Hydrology*, 253: 110-129.

Cook, H. and McCool, D.K. 1990. Freeze thaw effects on soil strength. *CRREL Special Report 90-1*, Hanover, NH, pp. 70-76.

Gatto, L.W., 2000. Soil freeze-thaw-induced changes to a simulated rill: potential impacts on soil erosion. *Geomorphology*, 32:147-160.

Gatto, L.W., and Ferrick, M.G. 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*.

Gary, Collin D. and Kinnear, P.R. 1999. *SPSS for windows made simple release 10 (3rd Edition)*. Psychology Press Ltd., 382 p.

Gholami, L., Sadeghi, S.H.R. and Homae, M. 2013. Straw mulching effect on splash erosion, runoff and sediment yield from eroded plots. *Soil Science Society of America*, 77: 268-278.

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: 237-246.

Henry, H.A.L. 2007. Soil freeze-thaw cycle experiments: Trends, methodological weaknesses and suggested improvements. *Soil Biology and Biochemistry*, 39: 977-986.

Jafari, M. and Esna-Ashari, M. 2013. Effect of waste tire cord reinforcement on unconfined compressive strength of lime stabilized clayey soil under freeze-thaw condition. *Cold Regions Science and Technology*, 82: 21-29.

سانتی متر اشاره کرد. تغییرات این لایه قادر است تاثیرات قابل ملاحظه‌ای در میزان تولید روان‌آب و رسوب داشته باشد. به طوری که افزایش ۱/۴۶ و ۱/۱۶ برابری تولید روان‌آب به ترتیب در تیمارهای انجماد و چرخه انجماد-ذوب در این پژوهش با افزایش دو برابری نسبت تولید روان‌آب به دلیل کاهش عمق لایه فعال ذوب، گزارش شده توسط Carey و Woo (۲۰۰۱) تطابق خوبی دارد.

با این حال به دلیل سوابق کم مطالعات مرتبط با پژوهش حاضر امکان تطبیق نتایج به دست آمده با پژوهش‌های مشابه وجود ندارد. لازم به ذکر است که چرخه انجماد-ذوب می‌تواند، خصوصاً در مناطق کوهستانی و مرتفع به آن درجه از اهمیت برسد که حتی به عنوان یکی از انواع فرسایش‌های موثر در منطقه محسوب شود. عواملی چون نوع و خصوصیات خاک، رطوبت پیشین، فشار روباره ناشی از برف، پوشش گیاهی، عوامل فیزیوگرافی، درجه و شدت سرد شدن هوا، خصوصیات بارش، تعداد چرخه‌های انجماد-ذوب و عمق لایه فعال ذوب از مهم‌ترین عوامل موثر در چگونگی تاثیر پدیده چرخه انجماد-ذوب بر فرآیندهای تولید روان‌آب و رسوب هستند که طبعاً ضرورت انجام تحقیقات گسترده‌تر را توجیه می‌نماید. لذا با توجه به شرایط کوهستانی ایران، پژوهش حاضر توانسته است ضمن گشودن دریچه‌ای تازه در زمینه تحقیقات مرتبط با فرسایش خاک، بستری برای انجام تحقیقات بیشتر در این خصوص را فراهم آورد.

#### فهرست منابع

بای بوردی، م. ۱۳۸۲. فیزیک خاک. ویرایش هفتم، انتشارات دانشگاه تهران (۱۶۷۲)، ۶۷۱ ص.

صادقی، س. ح.، اسلامیان، س. س.، موسوی، س. ف.، صادقی، س. ح. ر. ۱۳۸۹. نگاهی جامع به اثرات پدیده یخ‌زدگی و ذوب بر خصوصیات فیزیکی خاک. مجموعه مقالات اولین همایش ملی برف، یخ و بهمن، شهرکرد، ۱۸ و ۱۹ اسفند، ۳۴۳-۳۵۱ ص.

- matter dynamics. *Soil and Tillage Research*, 79: 7–31.
- Sjursen, H., Michelsen, A. and Holmstrup, M. 2005. Effects of freeze-thaw cycles on microarthropods and nutrient availability in a sub-Arctic soil. *Applied Soil Ecology*, 28: 79–93.
- Toy, T.J., Foster, G.R. and Renard, K.G. 2001. *Soil erosion: processes, prediction, measurement and control*. New York, John Wiley and Sons, 338p.
- Unger, P.W., 1991. Over winter changes in physical-properties of no-tillage soil. *Soil Science Society of America Journal*, 55: 778–782.
- Van klaveren, R. W. 1987. Hydraulic erosion resistance of thawing soil. Ph.D. Dissertation. Washington State University, Pullman.
- Van Vliet-Lanoč, B. 1998. Frost and soils: implications for paleosols, paleoclimates and stratigraphy. *Catena*, 34: 157-183.
- Wang, B., Zheng, F., Römken, M. J. M. and Darboux, F. 2013. Soil erodibility for water erosion: A perspective and Chinese experiences. *Geomorphology*, 187: 1-10.
- Yarbaşı, 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.
- Young, R.A., Römken, M. J. M., and McCool, D. K. 1990. Temporal Variations in Soil Erodibility. *Catena*, 17: 41–53.
- Zhang, Y., Wu, Y., Liu, B., Zheng, Q. and Yin, J. 2007. Characteristics and factors controlling the development of ephemeral gullies in cultivated catchments of black soil region Northeast China. *Soil and Tillage Research*, 96: 28-41.
- Jianguo, Z., Shuzhen, L. and Siquan, Y. 2007. The classification and assessment of freeze-thaw erosion in Tibet. *Journal of Geographical Science*, 165-174.
- Jianping, Z. 1999. Soil erosion in Guizhou province of China: a case study in Bijie prefecture. *Soil Use Management*, 15: 68–70.
- Kværnø, S.H. and Øygarden, L. 2006. The influence of freeze-thaw cycles and soil moisture on aggregate stability of three soils in Norway. *Catena*, 67: 175-182.
- Lehrsch, G.A. 1998. Freeze-thaw cycles increase near surface aggregate stability. *Soil science*, 163 (1): 63-70.
- Lehrsch, G.A., Sojka, R.E., Carter, D.L. and Jolley, P.M. 1991. Freezing effects on aggregate stability by texture, mineralogy, and organic matter. *Soil Science Society of American Journal*, 55 (5): 1401-1406.
- Lida, T., Kajihara, A., Okubo, H. and Okajima, K. 2012. Effect of seasonal snow cover on suspended sediment runoff in a mountainous catchment. *Journal of Hydrology*, 428–429: 116–128.
- Lipson, D.A. and Schmidt, S.K. 2004. Seasonal changes in an alpine soil bacterial community in the Colorado Rocky Mountains. *Applied Environmental Microbiology*, 70: 2867–2879.
- Oztas, T., and Fayetorbay, F. 2003. Effect of freezing and thawing processes on soil aggregate stability. *Catena*, 52: 1-8.
- Papendick, R.I. and Saxton, K.E. 1990. Frozen soil impacts: research needs. *CRREL Special Report 90-1*, Hanover, NH, pp. 220 – 223.
- Six, J., Bossuyt, H., Degryse, S. and Denef, K. 2004. A history of research on the link between microaggregates, soil biota, and soil organic



## Effectability of runoff and sediment yield from soils induced by freezing and thawing cycle under simulated rainfall condition

Morteza Behzadfar<sup>1</sup>, Seyed Hamid Reza Sadeghi<sup>2\*</sup>, Mohamad Javad Khangani<sup>3</sup> and Zeinab Hazbavi<sup>4</sup>

1) PhD Student of Watershed Management Engineering Department, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Iran

2\*) Professor, Watershed Management Engineering Department, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Iran, corresponding author email: sadeghi@modares.ac.ir

3) Professor, Civil Engineering Department, Shahid Bahonar University, Iran

4) MSc Student of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Iran

Received: 22-04-2012

Accepted: 11-09-2012

### Abstract

Many factors affect soil erosion and runoff generation. However, the role of some factors such as freeze-thaw (FT) processes has not been well considered yet. The present study therefore aimed to simulate and explain the effect of FT cycle on runoff generation and sediment yield under rainfall simulation condition. Towards this attempt, air and different soil depth temperatures were analyzed in natural condition and 10 cm soil depth was targeted for the soil laboratory experiments. A FT cycle with three and two days for freezing and thawing was taken place. The rainfall storm with 1.2 mm/min and 30 min duration was simulated and conducted for three treatments in soil erosion and rainfall simulation laboratory of Tarbiat Modares University. The results showed that the induced FT cycle soil had a distinct and significant behavior and different from that seen for the control plot. So that, the times of runoff generation in frozen and FT cycle treatments were 2.74 and 3.25 times less, respectively, compared to that reported for the control plots. The runoff volume and sediment yield were also respectively reported in turn of 1.46 and 1.16 and, 11.92 and 2.65 times more for frozen and FT cycle induced treatments compared to those recorded for control plots. Ice lenses and frost heaves plus creating situations close to soil saturation after FT cycle were the most effective factors in distinct behavior of soil induced by Freezing and FT cycle.

**Keywords:** ice lenses; runoff; soil erosion; soil freezing; soil temperature