

مرتع و آبخیزداری، مجله منابع طبیعی ایران
دوره ۶۸، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۷/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۱۲/۲۳

ص ۶۹۱-۷۱۰

ارزیابی پایداری خاکدانه‌ها و تعیین مکانیسم ناپایداری

خاک‌های حوضه آبخیز طالقان

- ❖ محسن آرمین*؛ استادیار دانشگاه یاسوج
- ❖ حسن احمدی؛ استاد دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران
- ❖ حسن روحی‌پور؛ دانشیار مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور
- ❖ علی سلاجقه؛ دانشیار دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران
- ❖ محمدحسین مهدیان؛ دانشیار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری
- ❖ وجیهه قربان‌نیا خیبری؛ دانشجوی دوره دکتری محیط زیست دانشگاه ملایر

چکیده

با توجه به محدودیت‌های موجود در تعیین میزان حساسیت خاک به فرسایش آبی یا فرسایش پذیری خاک از طریق آزمون‌های میدانی، کاربرد روش‌های آزمایشگاهی روی نمونه‌های کوچک خاک (کمتر از ۱۰۰ گرم)، افزون بر ساده‌بودن، نیازمند هزینه و وقت کمتری است. نتایج پژوهش‌های مختلف در این زمینه بیانگر آن است که از بین روش‌های مختلف آزمایشگاهی، مبنی بر استفاده از خصوصیات خاک، آزمون‌های مربوط به ساختمان خاک و پایداری خاکدانه‌ها مؤثرتر است و به آن‌ها بیشتر توجه شده است. در این تحقیق، با تکیه بر مشاهدات و تغییرات ماکروسکوپی در مقیاس واحدهای همگن، در بخشی از خاک‌های حوضه آبخیز طالقان، به وسعت ۳۲۶۰ هکتار، ۸۴ نقطه به عنوان نقاط نمونه‌برداری خاک انتخاب شد. به منظور تمایز بین مکانیسم‌های شکستگی خاکدانه‌ها و ارزیابی رفتار ساختمانی خاک‌ها در شرایط مختلف محیطی، پایداری خاکدانه‌ها با لحاظ کردن سه تیمار خیس شدن سریع خاکدانه‌ها، خیس شدن آهسته خاکدانه‌ها و شکستگی ناشی از تکان دادن خاک پس از خیس کردن اولیه و با استفاده از روش لی‌بیسونایس اندازه‌گیری شد. اثر اشکال مختلف فرسایش آبی بر پایداری خاکدانه‌ها نیز با استفاده از شاخص پایداری مرطوب خاکدانه‌ها بررسی شد. نتایج نشان داد مکانیسم‌های مختلف شکستگی خاکدانه‌ها اثر معنی‌داری در میزان شکستگی خاکدانه‌ها دارد. مکانیسم ناپایداری خاک‌های طالقان فرایند واریختگی است که در اثر فشار هوای محبوس شده در هنگام خیس شدن سریع خاکدانه‌ها ایجاد می‌شود و این شرایط هنگام وقوع باران‌های شدید روی خاک خشک رخ می‌دهد. همچنین، نتایج نشان داد اختلاف معنی‌داری بین پایداری مرطوب خاکدانه‌ها در اشکال مختلف فرسایش آبی وجود ندارد.

واژگان کلیدی: تغییر اقلیم، ریسک، عدم قطعیت، مونت‌کارلو، AOGCM.

۱. مقدمه

ارزیابی مناسب عوامل فرسایش نخستین مرحله در انتخاب راهکارهای کاهش و کنترل این پدیده مخرب است [۳۴]. تدوین و اجرای مؤثر برنامه‌های مهار فرسایش به درک کامل فرایندهای آن، توانایی اندازه‌گیری و برآورد شدت فرسایش، شناخت عمیق مسئله و اعمال تکنیک‌های علمی برای اندازه‌گیری آن نیاز دارد [۴۳]. پایداری خاکدانه‌ها^۱ توانایی اتصالات آن‌ها به منظور مقاومت در مقابل تنش‌های ناشی از فرایندهای پخشیدگی مثل شخم، فرایندهای انقباض و انبساط ذرات خاک و انرژی جنبشی قطره‌های باران است و تابعی از نیروهای جاذبه و دافعه ناشی از فعل و انفعالات بین مولکولی و الکترواستاتیک بین محلول خاک و ذرات خاک است [۳۵]. یکی از عوامل مؤثر در فرسایش‌پذیری خاک پایداری خاکدانه‌ها و عوامل مؤثر در تغییر آن است؛ در صورت تعیین عوامل مؤثر در پایداری خاکدانه‌ها می‌توان به رفع محدودیت‌های موجود در این زمینه اقدام کرد. شاخص پایداری خاکدانه‌ها برای توصیف حساسیت خاک‌ها به فرسایش آبی بسیار حائز اهمیت است [۴]. عدم پایداری خاکدانه‌ها عامل افزایش حساسیت خاک‌ها به فرسایش آبی است [۳۸]. پراکندگی خاکدانه‌ها به ایجاد اندود سطحی^۲ در سطح خاک منجر می‌شود و این مسئله موجب کاهش نفوذپذیری و افزایش رواناب می‌شود و سرانجام به افزایش پتانسیل فرسایش می‌انجامد [۴۷]. خاک‌هایی که خاکدانه‌های قوی‌ای دارند و میزان خاکدانه‌های درشت در آن‌ها زیاد است، پایدارند [۴۲].

اگرچه فقط اندازه‌گیری یکی از ویژگی‌های ساده خاک نمی‌تواند کاملاً بیانگر واکنش دقیق یک خاک از نظر فرسایش‌پذیری باشد [۲۳]، عملاً تعداد کمی از ویژگی‌های خاک، به‌ویژه تراکم خاک، واکنش فرسایشی خاک را کنترل می‌کند [۳]. در مطالعات مختلف گزارش شده است که در معادلات پیش‌بینی فرسایش خاک، به جای فرسایش‌پذیری خاک، که تعیین آن مستلزم آزمایش‌های پرهزینه و زمان‌بر است، می‌توان از شاخص پایداری خاکدانه‌ها استفاده کرد [۱، ۹، ۴۶]. در ایران، نتایج تحقیقی با عنوان «عوامل سیمان‌کننده و شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها به عنوان تخمینگر ضریب فرسایش‌پذیری بین‌شیاری»، نشان داد همبستگی معنی‌داری بین ضریب فرسایش‌پذیری بین‌شیاری و شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها نظیر MWD-Fw، MWD-Sw و MWD-Ws وجود دارد [۲۸]. شکستگی خاکدانه‌ها به وسیله آب ممکن است ناشی از مکانسیم‌های فیزیکی-شیمیایی و فیزیکی متعددی باشد و مقیاس‌های مختلفی از فعل و انفعالات ذرات رسی تا رفتار ماکروسکوپی خاکدانه‌ها را شامل شود [۱۱، ۳۲، ۴۱]. با استفاده از مطالعات متعددی که تا کنون صورت گرفته، چهار مکانیسم اصلی شکستگی خاکدانه‌ها، یعنی واریختگی^۳ [۲، ۳۳]، شکستگی ناشی از انبساط و انقباض نامتعادل ذرات خاک^۴ [۲۲]، شکستگی ناشی از ضربه قطره‌های باران [۲۹] و پخشیدگی فیزیکی-شیمیایی ناشی از فشار اسمزی [۱۲، ۳۷، ۴۰]، را می‌توان تعریف کرد [۲۶].

3. slaking
4. differential swelling

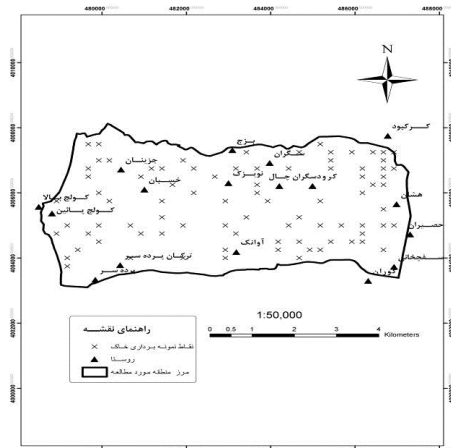
1. aggregate stability
2. surface sealing

بین ذرات کلوئیدی هنگام خیس شدن خاک است [۱۲، ۴۰]. این مکانیسم‌ها از لحاظ ماهیت اتصالات بین ذرات و انرژی درگیر در شکستگی آن‌ها [۲۰، ۴۴]، شرایط فیزیکی و شیمیایی مورد نیاز برای شکستگی خاکدانه‌ها، میزان انرژی جنبشی فرایند شکستگی، نوع خصوصیات خاک اثرگذار بر مکانیسم شکستگی و ماهیت و توزیع اندازه قطعات خاک تولیدشده از فرایند شکستگی [۷، ۱۴، ۲۴، ۳۶] با هم متفاوت‌اند. مطالعات انجام‌شده و شواهد عینی نشان می‌دهد که خاک‌های حوضه آبخیز طالقان با شدت زیادی در حال فرسایش است و از این طریق خسارات جبران‌ناپذیری وارد می‌شود. از آنجا که در حوضه آبخیز طالقان، مانند بسیاری از آبخیزهای کشور، در بیشتر مطالعات و پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه فرسایش خاک، از روش‌های تجربی برای برآورد شدت فرسایش خاک و تولید رسوب و بالاخره تهیه نقشه حساسیت اراضی به فرسایش استفاده می‌شود؛ به طوری که اغلب نیز، به دلیل عدم بومی‌سازی روش‌های تجربی برآورد فرسایش و رسوب، تهیه نقشه‌های خطر فرسایش و حساسیت خاک و اراضی به فرسایش از دقت و کارایی مورد انتظار برخوردار نیست، بنابراین، اجرای تحقیقات پایه‌ای در زمینه فرسایش خاک و ارائه یک شاخص مناسب فرسایش‌پذیری خاک به عنوان یکی از نیازها و ابزارهای اساسی و اصلی در تعیین راهبردها و راهکارهای مدیریت منابع خاک، که به سهولت نیز قابل حصول باشد، از ضروریات است. در این زمینه، به نظر می‌رسد استفاده از شاخص‌های پایداری

واریختگی به دلیل فشار هوای محبوس‌شده در درون خاکدانه‌ها در هنگام خیس شدن سریع ایجاد می‌شود [۱۲، ۱۸، ۳۳]. این مکانیسم زمانی اتفاق می‌افتد که خاکدانه‌ها در آب غوطه‌ور شده یا به سرعت خیس شوند. اثر هوای محبوس‌شده به حجم هوای درون خاکدانه‌ها، سرعت خیس شدن [۶] و مقاومت برشی خاکدانه‌های خیس بستگی دارد [۲۹]. اگرچه تکان دادن خاک، به دلیل ایجاد شکستگی مکانیکی اضافی و پخشیدگی، اثر واریختگی را افزایش می‌دهد، واریختگی حتی بدون هر گونه تکان دادن خاک در آب اتفاق می‌افتد. انبساط و انقباض نامتعادل ذرات خاک در هنگام خیس شدن و خشک شدن رس خاک به ایجاد ریزشکاف‌هایی^۱ در خاکدانه‌ها منجر می‌شود [۲۲]. اگرچه بعضی از محققان اصطلاح واریختگی را برای هر دو مکانیسم به کار برده‌اند، به دلیل فرایندهای فیزیکی و شیمیایی متفاوت در این دو مکانیسم، باید بین آن‌ها تمایز قائل شد [۲۶]. شکستگی مکانیکی خاکدانه‌ها در اثر ضربه قطره‌های باران معمولاً همراه با دیگر مکانیسم‌ها و زمانی که انرژی جنبشی قطره‌های باران به اندازه کافی زیاد باشد رخ می‌دهد [۲]. اهمیت این اثر به طور واضح با نقش پوشش گیاهی یا مالچی که سطح خاک را در مقابل چنین اثری محافظت می‌کند ثابت می‌شود. نقش شکستگی مکانیکی ناشی از ضربه قطره‌های باران در خاک‌های خیس بیشتر است، زیرا زمانی که خاک‌ها خیس‌ترند، خاکدانه‌ها ضعیف‌ترند. پخشیدگی فیزیکو- شیمیایی نیز ناشی از کاهش نیروی جاذبه

1. microcracking

موقعیت کلی منطقه مورد مطالعه و نقاط نمونه برداری را نشان می دهد.



شکل ۱. موقعیت کلی منطقه مورد مطالعه و نقاط نمونه برداری

خاکدانه‌ها می‌تواند راهگشای معضل مورد بحث در کشور باشد. با توجه به مطالب فوق، این تحقیق با هدف دستیابی به اهداف زیر طراحی شده است:

- بررسی پایداری خاکدانه‌ها در حوضه آبخیز طالقان؛
- ارزیابی مکانیسم‌های شکستگی خاکدانه‌ها و تعیین مکانیسم ناپایداری خاکدانه‌ها در طالقان؛
- بررسی پایداری خاکدانه‌ها در اشکال مختلف فرسایش آبی در طالقان.

۲. روش شناسی

۱.۲. منطقه مورد مطالعه

با توجه به اینکه نتایج حاصل از مطالعات انجام شده در حوضه آبخیز طالقان حاکی از فرسایش پذیری قابل ملاحظه اراضی با سنگ بستر انواع مارن است، گستره این تحقیق محدود به بخشی از حوضه آبخیز طالقان به وسعت ۳۲۶۰ هکتار است. این محدوده عمدتاً دارای سنگ بستر مارنی مربوط به دوران سوم زمین شامل زیرواحدهای سنگی GY (گل سنگ قرمز و سیلت ژیبسی) و NGM (گل سنگ قرمز و سیلت) و رسوبات آبرفتی شامل Q1 (نهشته پلیستوسن قدیمی) و Q2 (رسوبات آبرفتی و سیلابی عهد حاضر) است. این منطقه در محدوده ۳۶ درجه و ۱۰ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۱۳ دقیقه عرض شمالی و ۵۰ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۵۱ دقیقه طول شرقی قرار دارد. منطقه فوق از غرب به روستای کولج، از شرق به روستای کرکبود، از جنوب به رودخانه طالقان و از شمال به مرز واحدهای سنگی مارن و گدازه بازی (Ekv) محدود می‌شود. شکل ۱

۲.۲. تهیه نقشه واحدهای همگن

نقشه واحدهای همگن از تلفیق سه نقشه کلاس‌های شیب، کلاس‌های جهت جغرافیایی و سنگ‌شناسی حاصل شد. نقشه شیب با استفاده از نقشه توپوگرافی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ تهیه شد. در این نقشه، کلاسه‌بندی بر اساس فراوانی شیب‌های موجود در منطقه (۰، ۱۲، ۲۵، ۲۵ - ۴۰ و < ۴۰) صورت گرفت. بیشترین کلاس شیب مربوط به شیب بیشتر از ۴۰ درصد و کمترین آن مربوط به شیب ۱۲ - ۲۵ درصد است که به ترتیب ۴۳٫۰۹ و ۱۴٫۷۲ درصد از کل منطقه را به خود اختصاص داده‌اند. نقشه جهت جغرافیایی نیز با استفاده از نقشه توپوگرافی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ تهیه شد. کلاسه‌بندی نقشه جهت جغرافیایی بر اساس جهت‌های جغرافیایی منطقه مورد مطالعه صورت گرفت؛ یعنی، در واقع، مساحت جهت‌های جغرافیایی فرعی (شمال شرق، شمال غرب، جنوب شرق و جنوب غرب) در منطقه بسیار

۲۳ نمونه برای بررسی اثر اشکال فرسایش آبی بر روی پایداری خاکدانه‌ها برداشت شد و در فرسایش آبراهه‌ای از دو افق سطحی و عمقی نمونه‌برداری شد.

۳.۲. اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی -

شیمیایی نمونه‌های خاک

نمونه‌ها به آزمایشگاه خاک‌شناسی دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران انتقال یافت، سپس هوا خشک شد^۲، کلوخه‌های بزرگ به آرامی با دست خرد شد^۳ و از الک دو، سه و پنج میلی‌متر عبور داده شد. از خاکدانه‌های بزرگ‌تر از سه میلی‌متر برای آزمایش‌های پایداری خاکدانه‌ها و ذرات کوچک‌تر از دو میلی‌متر برای بررسی خصوصیات فیزیکی - شیمیایی استفاده شد. خصوصیات فیزیکی - شیمیایی نمونه‌های خاک با استفاده از روش‌های معمول اندازه‌گیری شد. هدایت الکتریکی (EC25) و اسیدیته (pH) در عصاره ۱:۱ خاک اندازه‌گیری شد. بافت خاک به روش هیدرومتری و با متلاشی کردن نمونه خاک در ۱۰۰ میلی‌لیتر هگزامتافسفات سدیم ۴۰ درصد تعیین شد [۱۶]. مقدار ماده آلی به روش والکی - بلاک تعیین شد [۳۰]. آهک به روش کلسیمتری اندازه‌گیری شد.

۴.۲. اندازه‌گیری پایداری خاکدانه‌ها با

استفاده از روش لی بیسونایس^۴

از دهه آخر سال ۱۹۳۰ تا کنون، چندین روش برای اندازه‌گیری پایداری خاکدانه‌ها استفاده شده است. این موضوع، از یک طرف، نشان‌دهنده گرایش

ناچیز است. بیشترین کلاس جهت جغرافیایی مربوط به جهت جنوبی و کمترین آن مربوط به جهت شمالی است که به ترتیب ۳۶/۰۲ و ۰/۸۷ درصد از کل منطقه را به خود اختصاص داده‌اند. نقشه سنگ‌شناسی منطقه مورد مطالعه از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی کشور استخراج شد. در این نقشه واحد سنگی NGM با ۴۰/۴۷ درصد بیشترین مساحت منطقه را اشغال کرده است. بر این اساس، پنجاه واحد همگن با مساحت ۹/۸ تا ۳۰۷/۸ هکتار شناسایی شد. بنابراین، در این تحقیق، با تکیه بر مشاهدات و تغییرات ماکروسکوپی در مقیاس واحدهای همگن، ۸۴ نقطه به عنوان نقاط نمونه‌برداری خاک انتخاب شد. شایان ذکر است که فراوانی نقاط نمونه‌برداری بر اساس مساحت واحدهای همگن بوده است. با استفاده از نرم‌افزار DNRGarmin نقاط نمونه‌برداری به دستگاه موقعیت‌یاب جهانی^۱ منتقل شد و به برداشت نمونه‌های خاک از عمق سطحی پنج سانتی‌متر اول خاک در اردیبهشت‌ماه اقدام شد. برای بررسی پایداری خاکدانه‌ها، می‌توان از لایه یک تا سه سانتی‌متری خاک سطحی نمونه برداشت کرد [۵]، زیرا این لایه تحت تأثیر باران طبیعی است و نقش تعیین‌کننده‌ای در فرایندهای فرسایش دارد. از آنجا که قرار شد در این تحقیق اثر اشکال مختلف فرسایش آبی بر پایداری خاکدانه‌ها نیز بررسی شود، در هنگام پیمایش‌های صحرایی و نمونه‌برداری، علاوه بر برداشت نمونه‌های مربوط به شبکه نمونه‌برداری، دقیقاً از محل هر یک از اشکال فرسایش آبی (فرسایش شیبی، فرسایش آبراهه‌ای، حرکت توده‌ای و خندق) نیز نمونه‌برداری شد. به این ترتیب، جمعاً

2. air-dried
3. crushed
4. le bissonnais

1. global position system

آزمایش انتخاب شدند. اندکی پیش از اجرای تیمارها، خاکدانه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در حرارت ۴۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند تا اینکه مقدار رطوبت و در نتیجه وزن آن‌ها ثابت شود.

تیمار یک: خیس شدن سریع (FW)^۱

غوطه‌ورکردن خاکدانه‌ها در آب ساده‌ترین راه برای بررسی پایداری آن‌هاست. این روش ممکن است به عنوان یک آزمایش میدانی خیلی ساده، سریع و کیفی توصیه شود. اگرچه از این روش به دلیل تأکید بر مکانیسم واریختگی در مقایسه با دیگر مکانیسم‌های شکستگی خاکدانه‌ها اغلب انتقاد می‌شود، به نظر می‌رسد این انتقاد تقریباً به همه روش‌ها وارد است. این روش یک روش خوب برای مقایسه دامنه وسیعی از خاک‌ها در شرایط خیس شدن سریع (باران‌های رگباری شدید در تابستان) است. پنج گرم خاکدانه به مدت ۱۰ دقیقه در یک بشر ۲۵۰ سانتی‌متر مکعبی، که حاوی ۵۰ سانتی‌متر مکعب آب مقطر است، به آرامی غوطه‌ور می‌شود. پس از این مدت زمان، با استفاده از پیمت آب مقطر خارج می‌شود. برای اندازه‌گیری توزیع اندازه خاکدانه‌ها، خاکدانه‌ها به الک ۰٫۰۵ میلی‌متری، که قبلاً در اتانول غوطه‌ور شده، انتقال می‌یابند.

تیمار دو: خیس شدن آهسته (SW)^۲

خیس شدن آهسته با میزان مکش کنترل شده متناسب با شرایط میدانی خیس شدن خاکدانه‌ها تحت یک باران با شدت ملایم است. پنج گرم خاکدانه روی یک کاغذ صافی قرار داده می‌شود. سپس، کاغذ صافی به

محققان در بررسی این ویژگی خاک و، از طرف دیگر، فقدان یک روش استاندارد رضایت‌بخش است. این روش بیشتر جنبه‌های درخور توجه در روش‌های رایج را در بر می‌گیرد. دستورالعمل این روش از چندین روش موجود [۱۷، ۱۸، ۲۱] اقتباس شده است. برای اینکه این روش در دامنه وسیعی از خاک‌ها و شرایط مختلف محیطی قابل اجرا باشد، اندازه‌گیری‌ها با لحاظ کردن سه تیمار مختلف انجام می‌شود. تیمارها با هدف تمایز بین مکانیسم‌های شکستگی خاکدانه‌ها، تفکیک فرایندهای شکستگی و اندازه‌گیری نتایج و ارائه خلاصه‌ای از شاخص‌ها- که بتوان به طور مستقیم برای تشریح رفتار خاک از آن‌ها استفاده کرد- طراحی شده‌اند.

در این روش به چند دلیل از اتانول استفاده شده است [۱۸]. خصوصیات اتانول و ویژگی‌های فعل و انفعالات بین خاک و اتانول دو پیامد مهم برای آزمایش دارد: اولاً، هنگامی که خاکدانه‌های خشک در اتانول غوطه‌ور می‌شوند واریختگی تا حد زیادی کاهش می‌یابد؛ ثانیاً، پس از خیس شدن خاکدانه‌ها در اتانول یا دیگر حلال‌های آلی، ذرات خاک در هنگام خشک شدن دوباره به شکل خاکدانه در نمی‌آیند [۲۷]. آثار اتانول روی واریختگی در نتیجه تغییر مکش سطحی، ویسکوزیته و زاویه تماس است. هنگامی که خاکدانه‌های پیش‌تیمار شده با اتانول در آب غوطه‌ور می‌شوند سرعت خیس شدن، انبساط و میزان آن کاهش می‌یابد [۶، ۱۳].

۱.۴.۲. آماده‌سازی نمونه

چنانکه بیان شد، خاکدانه‌های سه تا پنج میلی‌متر برای

1. fast wetting
2. slow wetting

اندازه‌گیری توزیع اندازه خاکدانه‌ها، مخلوط آب و خاک باقی‌مانده به یک الک ۰/۰۵ میلی‌متری، که قبلاً در اتانول غوطه‌ور شده، انتقال می‌یابد.

۵.۲. اندازه‌گیری توزیع اندازه خاکدانه‌ها

هدف از این بخش از آزمایش اندازه‌گیری نتایج شکستگی اتفاق افتاده برای تیمارها با حداقل شکستگی اضافی است. اندازه‌گیری به دو بخش تقسیم می‌شود: ۱. الک کردن تر^۳ در اتانول با استفاده از الک ۰/۰۵ میلی‌متری؛ ۲. الک کردن خشک^۴ با استفاده از شش الک با کلاس قطری مختلف.

نخست الک ۰/۰۵ میلی‌متری، که قبلاً در اتانول غوطه‌ور شده و حاوی خاکدانه‌های تیمار شده است، ۲۰ بار به صورت دستی بالا و پایین برده می‌شود تا خاکدانه‌های کمتر از ۰/۰۵ میلی‌متر و بیشتر از ۰/۰۵ میلی‌متر از هم تفکیک شوند. با اینکه مقدار زیادی اتانول نیاز است، برای الک تر باید از اتانول استفاده کرد، زیرا اتانول شکستگی اضافی را کاهش می‌دهد. البته، می‌توان با فیلتر کردن دوباره از اتانول مصرف شده استفاده کرد. اگر مقدار زیادی اتانول موجود نباشد، می‌توان برای الک کردن از آب استفاده کرد (در این حالت معمولاً یک شکستگی اضافی اتفاق می‌افتد)، اما، برای جلوگیری از سیمان‌شدگی دوباره ذرات و خاکدانه‌ها در طی فرایند خشک شدن، باید پیش از خشک کردن خاکدانه‌های بزرگ‌تر از ۰/۰۵ میلی‌متر در آن، آن‌ها را در مقدار کمی اتانول غوطه‌ور کرد. در مرحله بعد، خاکدانه‌های باقی‌مانده

مدت ۳۰ دقیقه روی جعبه شبیه‌سازی شرایط مرطوب شدن آهسته با مکش ۰/۳- کیلوپاسکال قرار داده می‌شود. برای اندازه‌گیری توزیع اندازه خاکدانه‌ها، خاکدانه‌ها به الک ۰/۰۵ میلی‌متری، که قبلاً در اتانول غوطه‌ور شده، انتقال می‌یابند.

تیمار سه: شکستگی مکانیکی ناشی از تکان دادن خاک بعد از خیس کردن اولیه (WS)^۱

هدف از خیس کردن اولیه بررسی چسبندگی مکانیکی مرطوب خاکدانه‌ها به صورت مستقل از فرایند واریختگی است. بنابراین، پیش از اعمال انرژی باید هوای درون خلل و فرج خاکدانه‌ها را خارج کرد؛ این عمل با خیس کردن در شرایط خلأ یا خیس کردن با یک مایع غیرقطبی انجام می‌شود. اتانول برای این هدف خیلی مؤثر است [۱۸]. پنج گرم خاکدانه به مدت ۱۰ دقیقه در بشر ۲۵۰ سانتی‌متر مکعبی، که حاوی ۵۰ سانتی‌متر مکعب اتانول است، به آرامی غوطه‌ور می‌شود. پس از این مدت زمان، با استفاده از پیپت اتانول خارج می‌شود. خاکدانه‌ها به ارلن ۲۵۰ سانتی‌متر مکعبی، که حاوی ۵۰ سانتی‌متر مکعب آب مقطر است، انتقال داده می‌شوند. پس از انتقال خاکدانه‌ها به ارلن، حجم آب مقطر درون آن به ۲۰۰ سانتی‌متر مکعب رسانده می‌شود. در ارلن با چوب‌پنبه بسته می‌شود. سپس، در مدت ۱ دقیقه، ۲۰ بار به حالت سر و ته شدن^۲ تکان داده می‌شود. پس از این مرحله، به منظور رسوب‌گذاری، ذرات درشت ارلن به مدت ۳۰ دقیقه به حال خود رها می‌شوند. آب اضافی با استفاده از پیپت خارج می‌شود. برای

3. wet sieving
4. dry sieving

1. wetting stirring
2. end-over-end

که در آنها MWD_{FW} ، MWD_{WS} و MWD_{SW} به ترتیب میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در تیمار خیس شدن سریع، تیمار شکستگی مکانیکی ناشی از تکان دادن خاک پس از خیس کردن اولیه و تیمار خیس شدن آهسته است.

در این تحقیق، با این فرض که مکانیسم‌های اصلی شکستگی خاکدانه‌ها در فرسایش آبی خاک‌های مورد مطالعه، واریختگی ناشی از خیس شدن سریع و شکستگی مکانیکی ناشی از ضربه قطره‌های باران است، یک شاخص دیگر پایداری خاکدانه‌ها نیز محاسبه شد [۱۵]. این شاخص مکانیسم‌های اصلی شکستگی خاکدانه‌ها را ترکیب می‌کند و می‌توان آن را با استفاده از فرمول ۴ محاسبه کرد:

$$K_a = RSI \times RMI \quad (۴)$$

۶.۲. اندازه‌گیری پایداری مرطوب خاکدانه‌ها^۴

پایداری مرطوب خاکدانه‌ها بر این اساس تعیین می‌شود که خاکدانه‌های ناپایدار هنگام غوطه‌ور شدن در آب آسان‌تر از خاکدانه‌های پایدار شکسته می‌شوند. برای تعیین پایداری، هشت الک (با توری ۶۰ مش) با مقدار مشخصی از خاکدانه‌های خاک پُر می‌شود. این الک‌ها در یک قوطی، که با آب مقطر پُر شده، قرار داده می‌شوند و در مدت زمان خاصی بالا و پایین می‌شوند. خاکدانه‌های ناپایدار از هم جدا می‌شوند و از توری‌های الک عبور می‌کنند و در قوطی‌های پُر شده از آب، که در زیر الک‌ها قرار

روی الک ۰/۰۵ میلی‌متری در حرارت ۴۰ درجه سانتی‌گراد در آون خشک می‌شود و به صورت دستی و ستونی از شش الک شامل الک‌های ۲، ۱، ۰/۵، ۰/۲۵، ۰/۱۲۵ و ۰/۰۵ میلی‌متر به آرامی و به صورت خشک الک می‌شوند. سپس، خاکدانه‌های باقی‌مانده روی هر الک وزن می‌شود، وزن خاکدانه‌های کمتر از ۰/۰۵ میلی‌متر اختلاف بین وزن خاک اولیه و مجموع وزن خاکدانه‌های باقی‌مانده روی شش الک است. پایداری خاکدانه‌ها برای هر مکانیسم شکستگی با محاسبه میانگین وزنی قطر (MWD)^۱ بیان می‌شود که میانگین وزنی قطر وزن خاکدانه‌های باقی‌مانده روی هر الک ضرب در میانگین قطر دو الک مجاور است [۲۱]. فرمول محاسبه میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها به صورت فرمول ۱ است:

$$MWD = \sum_{i=1}^{n+1} \frac{r_{i-1} + r_i}{2} \times m_i \quad (۱)$$

$$r_0 = r_1 \text{ و } r_n = r_{n+1}$$

که در آن r_i قطر آامین الک (میلی‌متر) است، m_i وزن خاکدانه‌های باقی‌مانده روی آامین الک (گرم) تقسیم بر وزن کل نمونه خاک، و n تعداد الک‌ها.

برای بررسی مقاومت خاکدانه خاک‌های مورد مطالعه به مکانیسم‌های واریختگی و شکستگی مکانیکی، از دو شاخص واریختگی نسبی (RSI)^۲ و شکستگی مکانیکی نسبی (RMI)^۳ استفاده می‌شود [۴۸]:

$$RSI = \frac{MWD_{SW} - MWD_{FW}}{MWD_{SW}} \quad (۲)$$

$$RMI = \frac{MWD_{SW} - MWD_{WS}}{MWD_{SW}} \quad (۳)$$

1. Mean Weight Diameter

2. Relative Slaking Index

3. Relative Mechanical Breakdown Index

4. wet aggregate stability

برای تشخیص داده پرت از معیار $M \pm 3S.D.$ استفاده شد؛ M میانگین متغیر و $S.D.$ انحراف معیار متغیر است. مشاهده‌هایی که خارج از این دامنه باشند از لحاظ آماری پرت به شمار می‌آیند؛
- بررسی نرمال بودن توزیع داده‌ها با استفاده از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف^۲؛

- بررسی اثر واحد سنگ‌شناسی، مکانیسم‌های شکستگی خاکدانه‌ها (تیمارها) و اثر متقابل آن‌ها بر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها با استفاده از آزمون تجزیه واریانس دوطرفه^۳؛

- اجرای آزمون مقایسه میانگین دانکن در صورت معنی‌داری اثر واحد سنگ‌شناسی یا مکانیسم‌های مختلف شکستگی خاکدانه‌ها بر روی میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها؛

- بررسی اثر واحد سنگ‌شناسی بر روی پایداری مرطوب خاکدانه‌ها با استفاده از آزمون تجزیه واریانس یک‌طرفه و اجرای آزمون مقایسه میانگین دانکن در صورت معنی‌داری اثر واحد سنگ‌شناسی؛
- بررسی اثر اشکال فرسایش آبی بر روی شاخص پایداری مرطوب خاکدانه‌ها با استفاده از آزمون تجزیه واریانس یک‌طرفه.

۳. نتایج

۱.۳. آماره‌های ویژگی‌های فیزیکی- شیمیایی

نمونه خاک‌های

جدول ۱ آماره‌های ویژگی‌های فیزیکی- شیمیایی نمونه خاک‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

گرفته‌اند، جمع می‌شوند. پس از این زمان خاص، قوطی‌ها برداشته می‌شوند و با یک مجموعه قوطی دیگر، که با آب حاوی متلاشی‌کننده پُر شده‌اند، جایگزین می‌شوند. سپس، الک کردن تا زمانی ادامه می‌یابد که همه خاکدانه‌ها منهدم شوند. ذرات ماسه و قطعات ریشه گیاهان روی الک باقی می‌ماند و فقط خاکدانه‌ها بررسی می‌شوند. پس از خشک کردن قوطی‌های حاوی خاکدانه‌ها، وزن خاکدانه‌های پایدار و ناپایدار تعیین می‌شود. این شاخص با استفاده از فرمول ۵ محاسبه می‌شود:

$$WAS = \frac{Wds}{(Wds + Wdw)} \quad (5)$$

که در آن WAS شاخص پایداری مرطوب خاکدانه‌ها، Wds وزن خاکدانه‌های متلاشی شده در محلول متلاشی‌کننده (گرم) و Wdw وزن خاکدانه‌های متلاشی شده در آب مقطر (گرم) است.

۷.۲. تجزیه و تحلیل داده‌ها

با استفاده از نسخه ۱۶ نرم‌افزار SPSS تجزیه و تحلیل داده‌ها به صورت زیر انجام گرفت:

- آزمون تشخیص داده‌های پرت^۱. برای داده‌های شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها (میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها و پایداری مرطوب خاکدانه‌ها) داده‌های پرت مشاهده‌هایی متفاوت از دیگر داده‌ها هستند. این داده‌ها نتایج تحلیل‌های آماری را تحت تأثیر قرار می‌دهند و باید قبل از هر آزمونی داده‌های پرت شناسایی شوند و توجیه پذیر بودن یا نبودن و در نتیجه حذف یا عدم حذف آن‌ها بررسی شود. در این تحقیق

2. Kolmogorov-Smirnov
3. Two Way ANOVA

1. outliers

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی نمونه خاک‌های مورد مطالعه

ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی	آماره‌ها			
	میانگین	حداکثر	حداقل	انحراف معیار
ماده آلی	۱,۳۹	۴,۵۲	۰,۰۹	۰,۹۱
اسیدیته	۷,۷	۸,۲	۶,۵	۰,۲۴
هدایت الکتریکی	۰,۷۳	۳,۴۷	۰,۰۸	۰,۷
آهک	۱۶,۵۶	۲۵	۰,۶	۵,۹۲
رس	۴۵,۲۷	۸۰	۱۸,۲	۱۴,۶۶
سیلت	۱۹,۵۸	۵۳,۶	۱,۲	۱۴,۳۴
شن	۳۵,۱۵	۷۶,۶	۱,۴	۲۰,۷۲

چنانکه در جدول ۱ مشاهده می‌شود، توزیع اندازه ذرات به گونه‌ای است که مقدار رس از ۱۸,۲ تا ۸۰، مقدار سیلت از ۱,۲ تا ۵۳,۶ و مقدار شن از ۱,۴ تا ۷۶,۶ درصد متغیر است. بر اساس طبقه‌بندی بافت خاک آمریکایی [۱۹] بیش از ۵۰ درصد از نمونه‌های خاک مورد مطالعه متعلق به بافت رسی است. آهک از ۰,۶ تا ۲۵ درصد، اسیدیته خاک از ۶,۵ تا ۸,۲ و هدایت الکتریکی از ۰,۰۸ تا ۳,۴۷ میلی‌موس بر سانتی‌متر متغیر است. در ۸۴ نمونه خاک مورد بررسی مقدار ماده آلی از ۰,۰۹ تا ۴,۵۲ درصد متغیر است. بنابراین، خاک‌های مورد مطالعه آهکی و بیشتر آن‌ها دارای بافت رسی است و مقدار ماده آلی آن‌ها کم است.

۲.۳. شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها

همان‌طور که در بخش روش‌شناسی آمده است، در این تحقیق دو شاخص میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها و پایداری مرطوب خاکدانه‌ها اندازه‌گیری شد.

شاخص میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در سه تیمار خیس‌شدن سریع خاکدانه‌ها، خیس‌شدن آهسته خاکدانه‌ها و شکستگی مکانیکی ناشی از تکان‌دادن خاک پس از خیس‌کردن اولیه اندازه‌گیری شد. علاوه بر این، دو شاخص دیگر، یعنی واریختگی نسبی و شکستگی مکانیکی نسبی، نیز از نتایج میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در سه تیمار مختلف شکستگی خاکدانه‌ها استخراج شد. یک شاخص دیگر نیز از حاصل‌ضرب دو شاخص واریختگی نسبی و شکستگی مکانیکی نسبی به دست آمد که در ادامه این بخش به تشریح دقیق نتایج هر یک از این شاخص‌ها پرداخته می‌شود. جدول ۲ نتایج آزمون کولموگروف-اسمیرنوف توزیع مقادیر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها تحت مکانیسم‌های مختلف شکستگی خاکدانه‌ها را نشان می‌دهد. نتایج جدول ۲ نشان می‌دهد که توزیع‌های مقادیر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در تیمار W_s و W_s نرمال است، ولی در تیمار F_w غیرنرمال است.

جدول ۲. نتایج آزمون کولموگروف-اسمیرنوف برای مقادیر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در تیمارهای مختلف

Asymp.Sig.(2-tailed)	Kolmogorov-Smirnov Z	میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها
۰/۰۴۸	۱/۳۹	MWD-Fw
۰/۰۰۹	۱/۲۳	MWD-Sw
۰/۰۹۵	۰/۵۱	MWD-Ws

جدول ۳. اطلاعات مربوط به تشخیص داده پرت برای میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها

حد پایین	حد بالا	انحراف معیار	میانگین	میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها
-	۱/۳۱	۰/۲۵	۰/۵۶	MWD-Fw
۰/۲۶	۲/۵۴	۰/۳۸	۱/۴	MWD-Sw
-	۲/۱۲	۰/۳۶	۱/۰۴	MWD-Ws

خاکدانه‌های این نقاط بررسی شود. در این زمینه، مشخص شد که به کار بردن اصطلاح خاکدانه برای این نمونه خاک‌ها چندان مناسب نیست. در همین زمینه، محققان گزارش کرده‌اند چنانچه یک قطعه خاک تحت اثر فشار یک میله یا فشار شیر آب شکسته نشود، در این حالت باید اصطلاح سیمانی شدن^۱ را برای آن خاک به کار برد [۲۱]. بنابراین، بر اساس این یافته، این سه داده از آنالیزها کنار گذاشته شد. با حذف این سه داده، توزیع مقادیر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در تیمار Fw نیز نرمال شد؛ به طوری که سطح معنی‌داری توزیع از ۰/۰۴۸ به ۰/۳۶ رسید. جدول ۴ مقادیر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در نقاط نمونه‌برداری ۹۱، ۱۲۳ و ۱۹۵ را در سه تیمار مورد بررسی نشان می‌دهد.

برای تشخیص داده‌های پرت مقادیر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در تیمارهای مختلف از معیار ارائه شده در بخش روش‌شناسی استفاده شد. بر اساس این معیار، مقادیر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در هیچ یک از تیمارهای مورد بررسی پرت نیست. جدول ۳ اطلاعات مربوط به تشخیص داده پرت برای میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها را نشان می‌دهد.

پس از اعمال تیمارهای مختلف بر روی خاکدانه‌ها، به نظر می‌رسید که خاکدانه‌های نقاط نمونه‌برداری شماره ۹۱، ۱۲۳ و ۱۹۵ رفتاری متفاوت از رفتار خاکدانه‌های سایر نقاط نمونه‌برداری دارند و بسیار مقاوم‌اند؛ به طوری که حتی تیمار خیس شدن سریع هم نتوانست واریختگی چندان در آن‌ها ایجاد کند. بنابراین، تصمیم بر آن شد تا دلیل مقاومت زیاد

جدول ۴. مقادیر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در تیمارهای مختلف^۱

MWD-Ws	MWD-Sw	MWD-Fw	نقاط نمونه‌برداری
۱/۷۹	۱/۸۹	۱/۴۸	۹۱
۱/۷۷	۱/۸۲	۱/۶۹	۱۲۳
۱/۸۹	۱/۹۵	۱/۹۲	۱۹۵

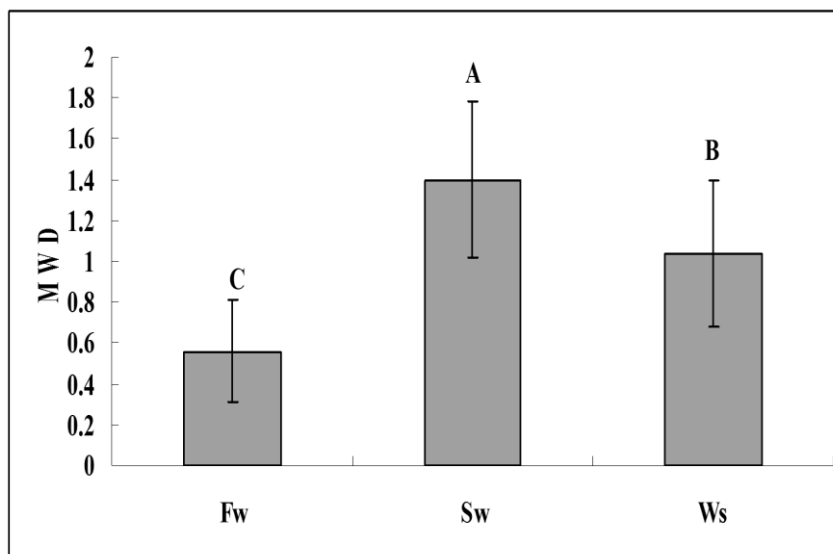
معنی دار بین حداقل یکی از تیمارهای مورد بررسی با دیگر تیمارهاست. بنابراین، باید مشخص کرد که از لحاظ مقدار این تیمارها بین کدام یک از تیمارها اختلاف معنی دار وجود دارد. برای بررسی این موضوع از آزمون مقایسه میانگین‌ها استفاده می‌شود. بر اساس نتایج آزمون مقایسه میانگین دانکن، اختلاف معنی داری بین میانگین هر سه تیمار برای میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در سطح احتمال پنج درصد وجود دارد. شکل ۲ میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در تیمارهای مورد بررسی را نشان می‌دهد.

جدول ۵ نتایج تجزیه واریانس دوطرفه مربوط به اثر مکانیسم‌های مختلف شکستگی خاکدانه‌ها (تیمارها) و واحد سنگ‌شناسی روی مقدار میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها را نشان می‌دهد. نتایج جدول ۵ نشان می‌دهد که مکانیسم‌های مختلف شکستگی خاکدانه‌ها اثر معنی داری در پایداری خاکدانه‌ها در سطح احتمال پنج درصد دارد. اثر واحد سنگ‌شناسی و اثر متقابل واحد سنگ‌شناسی و مکانیسم‌های مختلف شکستگی خاکدانه‌ها در میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها معنی دار نیست.

نتایج آزمون تجزیه واریانس حاکی از اختلاف

جدول ۵. نتایج تجزیه واریانس اثر واحد سنگ‌شناسی و مکانیسم‌های شکستگی خاکدانه‌ها در میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها

Sig.	F	منبع
۰٫۳۹۰	۰٫۷۴۲	واحد سنگ‌شناسی
۰٫۰۰۰	۸۷٫۶۴۹	تیمار
۰٫۹۱۰	۰٫۰۹۴	تیمار* واحد سنگ‌شناسی



شکل ۲. میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در تیمارهای مورد بررسی

جدول ۶. شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها

شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها	آماره				
	میانگین	حداکثر	حداقل	انحراف معیار	ضریب تغییرات
MWD-Fw	۰٫۵۶	۱٫۱۷	۰٫۱۷	۰٫۲۵	۴۵
MWD-Sw	۱٫۴	۱٫۹۷	۰٫۵۱	۰٫۳۸	۲۷
MWD-Ws	۱٫۰۴	۱٫۸۵	۰٫۳	۰٫۳۶	۳۴
RSI	۰٫۵۹	۰٫۸۷	۰٫۰۳	۰٫۲	۳۰
RMI	۰٫۲۵	۰٫۵۵	۰٫۰۰۵	۰٫۱۴	۵۶
Ka	۰٫۱۶	۰٫۴	۰٫۰۰۲	۰٫۱	۶۲

جدول ۷. حدود بالا و پایین تشخیص داده پرت برای پایداری مرطوب خاکدانه‌ها

شاخص پایداری	میانگین	انحراف معیار	حد بالا	حد پایین
WAS	۰٫۵۵	۰٫۱۳	۰٫۹۴	۰٫۱۶

جدول ۸. نتایج آزمون کولموگروف-اسمیرنوف برای پایداری مرطوب خاکدانه‌ها

شاخص پایداری	Kolmogorov-Smirnov Z	Asymp.Sig.(2-tailed)
WAS	۱٫۰۱۲	۰٫۲۵۷

جدول ۸ نشان می‌دهد که توزیع داده‌های پایداری مرطوب خاکدانه‌ها نرمال است.

جدول ۹ نتایج مربوط به تجزیه واریانس یک‌طرفه اثر واحد سنگ‌شناسی روی پایداری مرطوب خاکدانه‌ها را نشان می‌دهد. نتایج این جدول نشان می‌دهد که واحد سنگ‌شناسی تأثیر معنی‌داری در مقدار پایداری مرطوب خاکدانه‌ها ندارد. جدول ۱۰ آماره‌های پایداری مرطوب خاکدانه‌ها را نشان می‌دهد. چنانکه در جدول ۹ مشاهده می‌شود، پایداری مرطوب خاکدانه‌ها در منطقه مورد مطالعه از ۰٫۱۹ تا ۰٫۸۱ متغیر است. هرچه مقدار این شاخص بیشتر باشد خاکدانه‌ها پایدارترند.

جدول ۶ آماره‌های پایداری خاکدانه‌ها تحت مکانیسم‌های مختلف شکستگی را نشان می‌دهد. در جدول ۶ واحد شاخص‌های Fw، Sw و Ws میلی‌متر است و شاخص‌های RSI، RMI و Ka نیز بی‌تعدد هستند. ضریب تغییرات نیز به درصد بیان شده است.

با توجه به حد بالا و پایین معیار ارائه‌شده برای تشخیص داده پرت، از لحاظ آماری مشاهده پرتی در داده‌های پایداری مرطوب خاکدانه‌ها وجود ندارد. جدول ۷ این حدود را نشان می‌دهد. جدول ۸ نتایج آزمون کولموگروف-اسمیرنوف توزیع داده‌های پایداری مرطوب خاکدانه‌ها را نشان می‌دهد. نتایج

جدول ۹. نتایج تجزیه واریانس اثر واحد سنگ‌شناسی در پایداری مرطوب خاکدانه‌ها

Sig.	F	شاخص پایداری
۰/۵۳۲	۰/۶۳۶	WAS

جدول ۱۰. آماره‌های پایداری مرطوب خاکدانه‌ها

شاخص پایداری	آماره				
	میانگین	حداکثر	حداقل	انحراف معیار	ضریب تغییرات (درصد)
WAS	۰/۵۵	۰/۸۱	۰/۱۹	۰/۱۳	۲۳/۶

اساس نتایج جدول ۱۲ و با توجه به مقدار Sig. برای آزمون لیون، که ۰/۸۳۶ (بزرگ‌تر از ۰/۰۵) است، بنابراین، واریانس دو گروه با هم برابرند و باید از بخش Equal variance assumed (برابری واریانس‌ها) مقدار Sig. آزمون T را تعیین کرد که بیشتر از ۰/۰۵ است. از این رو، نتیجه گرفته می‌شود که بین اعماق مختلف آبراهه از نظر شاخص پایداری مرطوب خاکدانه‌ها اختلاف معنی‌داری وجود ندارد.

۳.۳. اثر اشکال فرسایش آبی در پایداری مرطوب خاکدانه‌ها

جدول ۱۱ نتایج تجزیه واریانس اثر اشکال فرسایش آبی بر پایداری مرطوب خاکدانه‌ها را نشان می‌دهد. نتایج این جدول نشان می‌دهد که اختلاف معنی‌داری در مقدار پایداری مرطوب خاکدانه‌ها در اشکال مختلف فرسایش آبی وجود ندارد. شایان ذکر است که اثر عمق آبراهه در میزان پایداری مرطوب خاکدانه نیز با استفاده از آزمون T مستقل^۱ بررسی شد. بر

جدول ۱۱. نتایج تجزیه واریانس اثر اشکال فرسایش آبی در پایداری مرطوب خاکدانه‌ها

Sig.	F	شاخص پایداری
۰/۰۶۷	۲/۸۲۱	WAS

جدول ۱۲. نتایج آزمون T مستقل اثر عمق آبراهه بر شاخص پایداری مرطوب خاکدانه‌ها

Sig.	Levene's Test for Equality of Variance		شاخص پایداری
	Sig	F	
۰/۷۲۲	۰/۸۳۶	۰/۰۴۶	WAS

جدول ۱۳. آماره‌های پایداری مرطوب خاکدانه‌ها در اشکال مختلف فرسایش آبی

WAS	آماره				
	میانگین	حداکثر	حداقل	انحراف معیار	ضریب تغییرات
حرکت توده‌ای	۰,۳۳	۰,۸	۰,۱	۰,۲	۶۰
فرسایش شیاری	۰,۳۹	۰,۴۷	۰,۲۸	۰,۰۸	۲۰,۵
فرسایش خندقی	۰,۶۳	۰,۹	۰,۴۷	۰,۱۶	۲۵,۴
فرسایش آبراهه‌ای	۰,۳۹	۰,۸۱	۰,۲	۰,۲۴	۶۱,۵

WS به ترتیب از ۰,۱۷ تا ۱,۱۷، ۰,۵۱ تا ۱,۹۷ و ۰,۳ تا ۱,۸۵ میلی‌متر بود. دامنه مقادیر RSI و RMI به ترتیب ۰,۰۳ تا ۰,۸۷ و ۰,۰۰۵ تا ۰,۵۵ بود. دامنه مقادیر RSI و RMI در تحقیقی مشابه به ترتیب از ۰,۰۵ تا ۰,۸۵ و ۰,۰۱ تا ۰,۷۸ بود [۲۸]. افزایش RSI و RMI خاکدانه‌ها به ترتیب نشان‌دهنده حساسیت زیاد به واریختگی و شکستگی مکانیکی است [۴۸]. میانگین مقادیر RSI و RMI به ترتیب ۰,۵۹ و ۰,۲۵ بود و مقدار RSI در ۸۰ نمونه خاک بیشتر از مقدار RMI بود. این موضوع نشان می‌دهد که فرایند واریختگی، مکانیسم اصلی شکستگی خاکدانه‌ها در منطقه مورد مطالعه است. چنانکه ملاحظه می‌شود، مقادیر RSI در این تحقیق اختلاف چندانی با مقادیر RSI در تحقیق دیگر [۲۸] را ندارد و این موضوع نشان می‌دهد که حساسیت خاک‌های مورد بررسی در این دو تحقیق نسبت به فرایند واریختگی یکسان است. با مقایسه مقادیر RMI در این تحقیق و تحقیق دیگر [۲۸]، می‌توان استنباط کرد که حساسیت خاکدانه‌های مورد بررسی در این تحقیق نسبت به شکستگی مکانیکی بیشتر از خاکدانه‌های مورد بررسی در تحقیق مذکور [۲۸] است.

نتایج مربوط به توزیع اندازه ذرات نشان داد که

جدول ۱۳ آماره‌های مربوط به پایداری مرطوب خاکدانه‌ها در اشکال مختلف فرسایش آبی را نشان می‌دهد. چنانچه در این جدول مشاهده می‌شود، بیشترین و کمترین پایداری مرطوب خاکدانه‌ها به ترتیب مربوط به اشکال فرسایش خندقی و حرکت‌های توده‌ای است.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج جدول ۱، می‌توان گفت که دامنه و تغییرات ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه به اندازه‌ای است که درجه و ماهیت پایداری ساختمانی این خاک‌ها را نشان دهد.

با در نظر گرفتن اینکه مقدار ماده آلی دو درصد یک آستانه مهم برای پایداری خاکدانه‌هاست [۳۱، ۵]، مقدار ماده آلی در ۸۰ درصد از نمونه خاک‌های مورد مطالعه کمتر از دو درصد است و این نشان می‌دهد که پایداری ساختمانی خاک‌ها از این نظر ضعیف است.

برای همه نمونه‌های خاک میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در هر سه تیمار مورد بررسی روند یکسانی را نشان داد. به این ترتیب که مقدار آن در تیمار $Fw < Ws < Sw$ و به ترتیب دارای میانگین ۱,۴، ۱,۰۴ و ۰,۵۶ میلی‌متر بود. دامنه مقادیر FW ، SW و

خاکدانه‌های تولیدشده از فرایند واریختگی (تیمار یک) عمدتاً خاکدانه‌های ریزی هستند. در حالی که خاکدانه‌های تولیدشده از فرایندهای انبساط و انقباض نامتعادل ذرات خاک (تیمار دو) و شکستگی مکانیکی (تیمار سه) عمدتاً خاکدانه‌های درشت هستند. به عبارت دیگر، فرایندهای انبساط و انقباض نامتعادل ذرات خاک و شکستگی مکانیکی تخریب کمتری نسبت به فرایند واریختگی ایجاد می‌کنند. در تحقیقی مشابه تأکید می‌شود که میزان فرسایش نه تنها به وسیله شکستگی خاکدانه‌ها کنترل می‌شود، بلکه تحت تأثیر اندازه قطعات خاک جداشده است [۱۴]. شکستگی خاکدانه‌ها، علاوه بر اینکه دلیل اصلی سلبستن^۱ خاک است، عامل تولید خاکدانه‌های ریز و ذراتی است که به آسانی به وسیله رواناب و پاشمان انتقال می‌یابند. این اثر دومی شکستگی خاکدانه‌ها به‌ویژه در فرسایش بین شیار، در جایی که ظرفیت جداشدگی رواناب محدود است، مهم است. در واقع، اندازه قطعات خاک جداشده تعیین‌کننده خصوصیات فیزیکی سله (تخلخل و نفوذپذیری) و قابلیت انتقال قطعات خاک است.

چندین روش برای اندازه‌گیری پایداری خاکدانه‌ها توسعه پیدا کرده است. اغلب آن‌ها فقط پایداری خاکدانه‌ها را در رابطه با فرایندهای خیس‌شدگی یا اثر ضربه قطره‌های باران بررسی می‌کنند. اما، تعداد بسیار کمی از این روش‌ها این آثار را به طور هم‌زمان بررسی می‌کنند. در روش لی بیسونایس هر دو فرایند فروپاشی خاکدانه در طی فرسایش عملاً در اندازه‌گیری‌های شاخص‌های پایداری، یعنی میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، لحاظ می‌شود.

می‌توان استدلال کرد که شاخص Ka مقاومت خاکدانه‌های خاک به فرایند واریختگی در فرسایش سطحی و همچنین مقاومت ذرات خاک به جداشدگی و انتقال در اثر ضربه قطره‌های باران را با هم نشان می‌دهد؛ مقاومت ذرات خاک به جداشدگی و انتقال در اثر ضربه قطره‌های باران فرایند غالب در فرسایش بین‌شیاری است. به طور ایده‌آل، خاکدانه‌های کاملاً پایدار کمترین مقدار Ka را دارند. به عبارت دیگر، $Ka=0$ است و در حالتی که خاکدانه‌ها کاملاً ناپایدارند $RSI=1$ ، $RMI=1$ و در نتیجه $Ka=1$ است. در تحقیق حاضر، مقادیر Ka از ۰/۰۰۲ تا ۰/۴ متغیر بود و در بیش از ۵۰ درصد نمونه‌ها مقدار آن از میانگین کل نمونه‌ها کمتر بود. بر اساس نتایج نشان‌داده‌شده در جدول ۶، می‌توان ادعا کرد که حساسیت خاک‌های مورد مطالعه نسبت به تیمارهای SW و WS بسیار کمتر از تیمار FW است. بنابراین، می‌توان گفت که ترکیب آثار این تیمارها در قالب شاخص Ka به منظور تشریح پایداری ساختمانی و فرسایش‌پذیری این خاک‌ها معقول نیست. به عبارت دیگر، کم‌بودن مقادیر شاخص Ka حاکی از پایداری خاکدانه‌ها در منطقه مورد مطالعه نیست. دامنه مقادیر Ka در مطالعه‌ای [۲۸] نیز از ۰/۰۰۲ تا ۰/۵۶ بود؛ این موضوع نیز دلالت دارد بر نامناسب بودن این شاخص برای بیان فرسایش‌پذیری خاک‌های مورد بررسی در مطالعه ایشان.

اگرچه نتایج هر سه تیمار مورد بررسی برای پایداری خاکدانه‌ها اغلب روند یکسانی را نشان می‌دهد، رتبه‌بندی متفاوت خاک‌ها برای تیمارهای مختلف نشان‌دهنده آن است که خاک‌ها در اقلیم‌ها و شرایط محیطی مختلف رفتار متفاوتی نشان می‌دهند.

مختلف آبی تفکیک ایجاد کند؛ ۲. به دلیل تغییرات فصلی پایداری خاکدانه‌ها، زمان نمونه‌برداری از اشکال مختلف فرسایش آبی زمان مناسبی نبوده است. شاید نیاز باشد در مواقع دیگری از سال، به‌ویژه در فصل زمستان، و موقع بارندگی‌ها، که این فرسایش‌ها فعال‌اند، از آن‌ها نمونه‌برداری شود.

بر اساس نتایج حاصل از تحقیق و همچنین موضوعاتی که گمان می‌رود نتایج تحقیق را تحت تأثیر قرار داده، به منظور بهبود تحقیقات آینده موارد زیر پیشنهاد می‌شود:

با توجه به موضوع تغییرات فصلی پایداری خاکدانه‌ها و بهترین شرایط ممکن از نظر نمونه‌برداری خاک، که در بیشتر تحقیقات به آن اشاره شده، پیشنهاد می‌شود، به‌ویژه، به منظور بررسی اثر اشکال فرسایش آبی بر پایداری خاکدانه‌ها، در زمان‌های دیگری از سال نیز نمونه‌برداری انجام شود و نتایج آن با نتایج این تحقیق مقایسه شود.

با توجه به نتایج این تحقیق که نشان داد شاخص پایداری مرطوب خاکدانه‌ها در اشکال مختلف فرسایش آبی تفاوت معنی‌داری ندارد، پیشنهاد می‌شود از دیگر شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها استفاده شده و این موضوع بررسی شود.

با توجه به شاخص پایداری ضریب آسیب‌پذیری ارائه شده توسط محققان [۴۵]، پیشنهاد می‌شود تأثیر اندازه خاکدانه‌های اولیه در توزیع نهایی اندازه خاکدانه‌ها بررسی شود. شاخص مطالعه‌ای [۴۵] نشان می‌دهد که، در اثر اعمال مکانیسم شکستگی مورد بررسی، اندازه خاکدانه‌های اولیه چند برابر کاهش می‌یابد. این شاخص نسبت میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های اولیه به میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها پس از اعمال مکانیسم شکستگی است.

باید ذکر کرد که منظور از اقلیم‌ها و شرایط محیطی مختلف همان تیمارهای به‌کاربرده شده در اندازه‌گیری توزیع اندازه خاکدانه‌هاست. مثلاً، در تیمار خیس شدن سریع خاکدانه‌ها رفتار خاکدانه‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک، که در معرض باران‌های شدید و رگباری قرار می‌گیرند، شبیه‌سازی می‌شود.

به دلیل شرایط آستانه، ممکن است که فقط یک تیمار تفکیک خوبی برای گروه خاصی از خاک‌ها ارائه کند. مثلاً، در خاک‌هایی با مواد آلی زیاد تیمار خیس شدن سریع نسبت به تیمار خیس شدن آهسته تفکیک بهتری ایجاد می‌کند. در مقابل، در خاک‌هایی با خاکدانه‌های ضعیف تیمار خیس شدن آهسته با انرژی تخریبی کمتر تفکیک بهتری ایجاد می‌کند [۲۶]. نتایج این تحقیق با این یافته همخوانی داشت و تیمار خیس شدن آهسته تفکیک بهتری بین نمونه‌های خاک ایجاد کرد.

مشخص شده که در خاک‌های بسیار ناپایدار و بسیار پایدار مقدار میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در دو تیمار خیس شدن سریع و شکستگی مکانیکی پس از خیس کردن اولیه معمولاً مشابه است و این نشان می‌دهد که پایداری ساختمانی آن‌ها تقریباً مستقل از شرایط خارجی است.

فرایند واریختگی، مکانیسم اصلی ناپایداری در خاک‌های مارنی حوضه آبخیز طالقان است؛ این وضعیت معمولاً هنگام وقوع باران‌های شدید روی خاک خشک رخ می‌دهد.

شاید معنی‌دار نشدن اختلاف بین پایداری مرطوب خاکدانه‌ها در اشکال مختلف فرسایش آبی مربوط به دو دلیل باشد: ۱. شاخص پایداری مرطوب خاکدانه‌ها به‌خوبی نتوانسته بین پایداری خاکدانه‌ها در اشکال

References

- [1] Barthès, B. and Roose, E. (2002). Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion; validation at several levels, *Catena*, 47, 133-149.
- [2] Boiffin, J. (1984). La dégradation structure des couches superficielles du sol sous l'action des pluies, These de Docteur-Ingenieur, Institute National Agronomique-Paris Grignon.
- [3] Bryan, R.B. (2000). Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope, *Geomorphology*, 32, 385-415.
- [4] Cammeraat, L.H. and Imeson, A.C. (1998). Deriving indicators of soil degradation from soil aggregation studies in southeastern Spain and southern France, *Geomorphology*, 23, 307-321.
- [5] Cerdá, A. (1998). Soil aggregate stability under different Mediterranean vegetation types, *Catena*, 32, 73-86.
- [6] Concaret, J. (1967). Etude des mecanismes de destruction des agregats de terre au contact de solutions aqueuses, *Annales Agronomiques*, 18, 99-144.
- [7] Chan, K.Y. and Mullins, C.E. (1994). Slaking characteristics of some Australian and British soils, *European Journal of soil Science*, 45, 273-283.
- [8] De Ploey, J. and Poesen, J. (1985). Aggregate stability, runoff generation and interrill erosion, In: Richards, K.S., Arnett, R.R., Ellis, S. (Eds.), *Geomorphology and Soils*, George Allen & Unwin, London, pp. 99-120.
- [9] Dimoyiannis, D. (2011). *Wet aggregate stability as affected by excess carbonate and other soil properties*, Land Degradation Development, Published online in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com) DOI: 10.1002/ldr.1085.
- [10] Dunne, T., Zhang, W. and Aubry, B.F. (1991). Effects of rainfall, vegetation and microtopography on infiltration and runoff, *Water Resources Research*, 27, 2271-2285.
- [11] Elliot, E.T. (1986). Aggregate structure and carbon, nitrogen and phosphorus in native and cultivated soils, *Soil Science Society of America Journal*, 50, 627-633.
- [12] Emerson, W.W. (1967). A classification of soil aggregate based on their coherence in water, *Australian Journal of Soil Research*, 5, 47-57.
- [13] Emerson, W.W. and Greenland, D.J. (1990). Soil aggregate formation and stability, In: *Soil colloids and their association in aggregates* (Eds M. De Boodt, M. Hayes, A. Herbillon), pp. 485-511. Plenum Press, New York.
- [14] Farres, P.J. (1987). The dynamics of rainsplash erosion and the role of soil aggregate stability, *Catena*, 14, 119-130.
- [15] Feng-Ling, Y., Zhi-Hua, S., Zhao-Xia, L. and Chong-Fa, Cai. (2008). Estimating interrill soil erosion from aggregate stability of Ultisols in subtropical China, *Soil and Tillage Research*, 34-41.
- [16] Gee, G.W. and Bauder, J.W. (1986). Particle-size analysis, In: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis, part I. Physical and Mineralogical Methods*, 2nd edition, Agronomy 9, American Society of Agronomy, Madison, WI, pp. 383-411.
- [17] Grieve, I.C. (1980). The magnitude and significance of soil structural stability declines under cereal cropping, *Catena*, 7, 79-85.

- [18] Henin, S., Monnier, G. and Combeau, A. (1958). Method pour l'étude de la stabilité structurale des sols, *Annales Agronomiques*, 9, 73-92.
- [19] Hillel, D. (2004). *Introduction to environmental soil physics*, Elsevier Academic Press, Amsterdam, 949 p.
- [20] Kemper, W.D. and Rosenau, R.C. (1984). Soil cohesion as affected by time and water content, *Soil Science Society of American Journal*, 48, 1001-1006.
- [21] Kemper, W.D. and Rosenau, R.C. (1986). Aggregate stability and size distribution, In: *Method of Soil Analysis*, part 1, *Agronomy Monographs 9* (ed. A. Klute). American Society of Agronomy, Madison, WI.
- [22] Kheyrabi, W.D. and Monnier, G. (1968). Etude expérimentale de l'influence de la composition granulométrique des terres sur leur stabilité structurale, *Annales Agronomiques*, 19, 129-152.
- [23] Lal, R. (1990). *Soil Erosion in the Tropics*, Principles and Management, McGraw-Hill, New York.
- [24] Le Bissonnais, Y. (1988). Analyse des mécanismes de désagrégation et de la mobilisation des particules de terre sous l'action des pluies, Thèse de Doctorat, Université d'Orléans.
- [25] Le Bissonnais, Y. (1989). Contribution à l'étude de la dégradation structure superficielle: analyse des processus de microfissuration des agrégats par l'eau, *Science du Sol*, 27, 187-199.
- [26] Le Bissonnais, Y. (1996). Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology, *European Journal of Soil Science*, 47, 425-437.
- [27] Merzouk, A. and Blake, G.R. (1991). Indices for estimation of interrill erodibility of Moroccan soils, *Catena*, 18, 537-550.
- [28] Mohammad Zadeh, Z. (2011). Cementing factors and aggregate stability indices as an estimate of the coefficient of inter-rill erodibility, Soil Science M.Sc Thesis, University of Tabriz.
- [29] Nearing, M.A. and Bradford, H.M. (1985). Single waterdrop splash detachment and mechanical properties of soils, *Soil Science Society of America Journal*, 49, 547-552.
- [30] Nelson, D.W. and Sommers, L.E. (1982). Total carbon, organic carbon, and organic matter, In: Page, L.A., Miller, R.H., Kenney, D.R. (Eds.), *Methods of Soil Analysis*, Part 2, *Chemical and Microbiological Methods*, 2nd edition, American Society of Agronomy, Madison, WI, pp. 539-579.
- [31] Oades, J.M. (1988). The retention of organic matter in soils, *Biogeochemistry*, 5, 35-70.
- [32] Oades, J.M. and Waters, A.G. (1991). Aggregate hierarchy in soils, *Australian Journal of Soil Research*, 29, 815-828.
- [33] Panabokke, C.R. and Quirk, J.P. (1957). Effect of initial water content on stability of soil aggregates in water, *Soil Science*, 83, 185-195.
- [34] Rejman, J., Turski, R. and Paluszek, J. (1998). Spatial and temporal variations in erodibility of loess soil, *Soil and Tillage Research*, 46, 61-68.
- [35] Rengasamy, P. and Olsson, K.A. (1991). Sodicty and soil structure, *Australian Journal of Soil Research*, 29, 935-952.
- [36] Romkens, M.J.M., Roth, C.B. and Nelson, D.W. (1977). Erodibility of selected clay subsoils in relation to physical and chemical properties, *Soil Science Society of American Journal*, 41, 954-960.
- [37] Shainberg, I. (1992). Chemical and mineralogical components of crusting, In: *Soil crusting: Physical and Chemical Processes* (Eds M.E. Sumner and B.A. Stewart), pp. 33-54. Lewis, Boca Raton, Florida.

- [38] Six, J., Elliott, E.T. and Paustian, K. (2000). Soil structure and soil organic matter: II. A Normalized stability index and the effect of mineralogy, *Soil Science Society of American Journal*, 64, 1042-1049.
- [39] Statistical Package for the Social Sciences Inc. (2008). SPSS Advanced Statistics 16.0.2 SPSS Inc., Chicago.
- [40] Sumner, M.E. (1992). The electrical double layer and clay dispersion, In: *Soil crusting: Physical and Chemical Processes* (Eds M.E. Sumner and B.A. Stewart), pp. 1-31. Lewis, Boca Raton, Florida.
- [41] Tisdall, J.M. and Oades, J.M. (1982). Organic matter and water-stable aggregates in soils, *Journal of Soil Science*, 33, 141-163.
- [42] Topp, G.C., Reynolds, W.D. and Carter, M.R. (1997). Physical attributes of soil quality, In: Gregorich, E.G. and M.R. Carter (eds), *Soil Quality for Crop Production and Ecosystem Health*, PP. 81-114, Elsevier Science, Amsterdam, The Netherlands.
- [43] Toy, T.J., Foster, G.R. and Renard, K.G. (2002). *Soil erosion: processes, prediction, measurement and control*, New York, NY: John Wiley & Sons.
- [44] Truman, C.C., Bradford, J.M. and Ferris, J.E. (1990). Antecedent water content and rainfall energy influence on soil aggregate breakdown, *Soil Science Society of American Journal*, 54, 1385-1392.
- [45] Valla, M., Kozák, J. and Ondráček, V. (2000). Vulnerability of aggregates separated from selected anthrosols developed on reclaimed dumpsites, *Rostlinna Vyroba*, 46, 563-568.
- [46] Valmis, S., Dimoyiannis, D. and Danalatos, N.G. (2005). Assessing interrill erosion rate from soil aggregate instability index, rainfall intensity and slope angle on cultivated soils in central Greece, *Soil and Tillage Research*, 80, 139-147.
- [47] Unjer, P.W., Fulton, J.L. and Jones, O.R. (1990). Land-leveling effects on soil texture, organic matter content, and aggregate stability, *Journal of Soil and Water Conservation*, 412-415.
- [48] Zhang, B. and Horn, R. (2001). Mechanisms of aggregate stabilization in Ultisols from subtropical China, *Geoderma*, 99(1-2), 123-145.
- [49] Zhi-Hua, S., Feng-Ling, Yan., Lu, Li., Zhao-Xia, Li. and Chong-Fa, Cai. (2010). Interrill erosion from disturbed and undisturbed samples in relation to topsoil aggregate stability in red soils from subtropical China, *Catena*, 81, 240-248.