



دوره ۳۵، شماره ۳، شماره‌ی پیاپی ۱۳۶، پاییز ۱۴۰۱، صفحه‌های ۱۳۰-۱۱۴
شناسه‌ی دیجیتال: 10.22092/WMRJ.2022.357484.1454

مقاله‌ی پژوهشی



پژوهش‌های آبخیزداری

عامل وزنی مناسب برای محاسبه‌ی شاخص پیوستگی رسوب در شرایط خاک شخم‌خورده

زهرا گرامی

دانشجوی دکتری مدیریت منابع خاک، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده‌ی کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

محمود عرب‌خدری

(نویسنده‌ی مسئول)* استاد پژوهشکده‌ی حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

احمد کریمی

استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده‌ی کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

حسین اسدی

دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه تهران، کرج، ایران

*رایانامه‌ی نویسنده‌ی مسئول: arabkhedri@scwmri.ac.ir

تاریخ دریافت: ۲۴ دی ۱۴۰۰ تاریخ پذیرش: ۲۵ اسفند ۱۴۰۰

چکیده

عامل وزنی شاخص پیوستگی رسوب جزء چالش‌برانگیز آن است و باید برای شرایط گوناگون به‌درستی تبیین شود. این پژوهش با هدف توسعه‌ی عامل وزنی مناسب برای محاسبه‌ی شاخص پیوستگی در خاک شخم‌خورده‌ی آیش با شبیه‌سازی و کاربرد نهر پایه‌دار آزمایشگاهی ۵/۸ مترمربع با شیب ۱۲٪ روی سه نمونه‌ی خاک دیم‌زار منطقه‌های کوهین، سرارود و گچساران انجام شد. دو بارش (R₁ و R₂) با فاصله‌ی چهار ساعت با شدت ۱۱۱ میلی‌متر بر ساعت در هر خاک شبیه‌سازی، و هدررفت خاک آن‌ها تعیین شد. پس از هر بارش مدل رقومی ارتفاع با اندازه‌ی پیکسل دو میلی‌متر با عکس‌برداری تهیه، و از آن شاخص پیوستگی با عامل وزنی ضریب زبری (RI) محاسبه شد. هدررفت خاک دو بارش به‌ترتیب در خاک گچساران ۴۷۹۶ و ۳۹۰۹ گرم، در کوهین، ۳۴۶۵ و ۲۴۶۴ گرم، و در سرارود ۲۶۷۹ و ۲۱۰۵ گرم به‌دست آمد. نتیجه نشان داد که با افزایش هدررفت خاک، میانگین IC برپایه‌ی RI کاهش می‌یابد، که نشان‌دهنده‌ی نامناسب بودن RI به‌تنهایی در جایگاه عامل وزنی است. برای توسعه‌دادن عامل وزنی جدید، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها در ترکیب با RI به‌کار برده شد. بهترین رابطه با هدررفت خاک با ضریب همبستگی ۰/۹۲ (P<0.01) در شاخص پیوستگی برپایه‌ی ترکیب سه ویژگی میانگین وزنی قطر خاک‌دانه، مقاومت فروری، و RI دیده شد. نقشه‌های شاخص پیوستگی برپایه‌ی عامل وزنی جدید نشان داد که این شاخص در R₂ نسبت به R₁ افزایش یافت. بررسی کارایی عامل وزنی توسعه‌یافته در پژوهش پیوستگی رسوب دامنه‌های شخم‌خورده در شناخت محل‌های بحرانی در دامنه توصیه می‌شود.

واژگان کلیدی: آیش، هدررفت خاک، ضریب زبری، نهر پایه‌دار آزمایشگاهی، مقاومت فروری، میانگین وزنی قطر خاک‌دانه

مقدمه

خاک یکی از مهم‌ترین اندوخته‌های طبیعی است که با فرسایش روبه‌رو است (پندی و همکاران ۲۰۲۱). انسان با تأثیر بر فرآیندهای فرسایش، باعث افزایش فراوان در شدت آن شده است (پوزن ۲۰۱۸). فرسایش خاک علاوه بر آسیب‌هایی که در محل روی داد فرسایش دارد، باعث ایجاد اثرهای نادرست و شدید مرتبط با رسوب تولیدشده در خارج از محل روی داد فرسایش (بوردمن و همکاران ۲۰۱۹) می‌شود، مانند رسوب‌گرفتنی زمین‌های کشاورزی، رسوب‌گذاری در مخزن‌های ذخیره‌ی آب، شکوفایی جلبک‌ها، و تشدید اثر سیلاب‌ها (فائو و پنل فنی بین‌دولتی در باره‌ی خاک‌ها ۲۰۱۵). بنابراین، آگاهی از اندازه‌ی رسوب‌دهی و شناسایی منطقه‌های آماده برای تولید رسوب ضروری است.

پیش‌بینی تولید رسوب به‌خصوص در مقیاس دامنه یکی از چالش‌های اصلی پژوهش‌های زمین‌ریخت‌شناسی است (پوزن ۲۰۱۸). دامنه‌ها نخستین محل‌های تولید و انتقال رسوب در فرآیند فرسایش و رساندن آن به پایاب است، و در سامانه‌ی آبخیز نقش کلیدی دارد. به‌این‌علت ویژگی‌های دامنه‌ها بر تهنشست و پیوستگی رسوب اثر می‌گذارد، و ازین رو در اندازه‌ی رساندن رسوب خالص به رودخانه‌ها و بستر دره‌ها نقش دارد (هوبن ۲۰۰۸). مفهوم پیوستگی رسوب به معنی انتقال آن از هم‌همی منبع‌های ممکن، به هم‌همی مخزن‌های ممکن در سامانه در تأثیر از فرآیندهای جداسدن، انتقال و تهنشستن است، و چگونگی حرکت آن را میان واحدهای زمین‌ریخت‌شناسی نشان می‌دهد (نجفی و همکاران ۲۰۱۸). پیوستگی در دامنه‌ها در تأثیر مجموعه‌ی از عامل‌های مرتبط مانند شیب، پوشش زمین، خندق‌ها، و جریان شیار اولیه است (وال و رونتری ۲۰۱۵). کمیت و ارزیابی اولیه از پیوستگی در مقیاس آبخیز، دامنه، و قطعه، به کمک تابع‌هایی مانند نسبت تحویل رسوب، موجودی آن، و شاخص‌های گوناگون انجام می‌شود (هکمن و همکاران ۲۰۱۸). یکی از آن‌ها شاخص پیوستگی (IC) است (بورسلی و همکاران ۲۰۰۸).

پیوستگی شاخصی رستری است که با دیدگاه اثر پستی‌بلندی و برخی اطلاعات سطح زمین محاسبه می‌شود، و دو بخش عامل سرآب و عامل پایاب دارد. برای تعیین شاخص، فاصله از مخزن رسوب (انتهای دامنه یا محل اتصال به آبراه اصلی)، ویژگی‌های مسیر حرکت رسوب، عامل‌های مؤثر بر جریان تجمعی روان‌آب، و شرایط محلی در هر بخش از جریان که (عامل وزنی W) در نظر گرفته می‌شود (بورسلی و همکاران ۲۰۰۸).

پیوستگی در زمان و مکان تغییر می‌کند. جنبه‌ی زمانی مربوط به بزرگی روی‌دادها و فراوانی فرآیندهای انتقال رسوب، تغییر کاربری زمین، و مدیریت زمین در طول زمان است. روی‌دادهای بزرگ یا چند روی‌داد پی‌درپی ممکن است با فزونی گرفتن از

آستانه‌های فیزیکی و زیستی مسیرهای جریان را درست کند، که پیونددهنده‌ی دامنه‌ها به مخزن‌های محلی است (بورسلی و همکاران ۲۰۰۸).

مقیاس مکانی از دو جنبه‌ی وضوح مکانی و منطقه‌ی مرجعی که شاخص پیوستگی برای آن محاسبه می‌شود، بررسی شده است (هکمن و همکاران ۲۰۱۸). وابستگی پیوستگی رسوب به وضوح مکانی و اطلاعات پستی‌بلندی سطح خاک به این علت است که بیش‌تر عامل‌های شاخص پیوستگی با شبکه‌ی داده‌های زمینی با مدل رقمی ارتفاع (DEM) محاسبه می‌شود (بالاگیورپینگ و همکاران ۲۰۱۷). در مدل رقمی ارتفاع ویژگی‌های پستی‌بلندی هست، و منبع مهمی برای تعیین پیوستگی ساختاری است (هکمن و همکاران ۲۰۱۸). محققان به‌دلیل دشواری‌های اندازه‌گیری پستی‌بلندی با جزئیات زیاد در سطح دامنه (زنگ و همکاران ۲۰۱۲)، به کمک شبیه‌سازی باران در نهر پایه‌دار آزمایشگاهی، علاوه بر بررسی جنبه‌های گوناگون فرسایش خاک و تولید رسوب (حامد و همکاران ۲۰۰۲)، پستی‌بلندی سطح خاک را با دقت بررسی می‌کنند. پژوهش‌های بسیاری برای کمی‌کردن فرسایش خاک و تهیه‌ی مدل رقمی ارتفاع در نهر پایه‌دار آزمایشگاهی، روش تصویرسنجی (فتوگرامتری) به‌کار برده شده‌است (دی استفانو و همکاران ۲۰۱۷؛ مسلینگ و همکاران ۲۰۱۷ و ونگ و لای ۲۰۱۸؛ هوهله ۲۰۰۹).

پژوهشگران شاخص پیوستگی رسوب را در منطقه‌های گوناگونی مانند آبخیزها با فراوانی زیاد زمین پست، پادگان‌ها و دشت‌های سیلابی (کنترول و همکاران ۲۰۱۸؛ گای و همکاران ۲۰۱۶؛ بارتمن و همکاران ۲۰۱۳)، آبخیزهای کوهستانی (زاناندا و همکاران ۲۰۱۹؛ سیسلاگی و بیسچتی ۲۰۱۹)، دامنه‌ها و دامنه‌های تأثیرگرفته از آتش‌سوزی (بورسلی و همکاران ۲۰۰۸؛ ویلیامز و همکاران ۲۰۱۶) بررسی کردند، و نتیجه‌های گوناگونی بر پایه‌ی ویژگی هر منطقه به‌دست آوردند. اغلب آنان با تأکید بر این که شاخص پیوستگی به پستی‌بلندی وابسته است، نشان دادند که بیش‌ترین پیوستگی رسوب در منطقه‌های با شیب زیاد دیده شد، و در منطقه‌های کم‌شیب‌تر کم‌تر بود. پیوستگی رسوب با افزایش پیچیدگی ریختی زمین کاهش یافت و میان پیچیدگی ریختی زمین و انتقال رسوب ارتباطی نا خطی بود (بارتمن و همکاران ۲۰۱۳). عامل‌های پستی‌بلندی در شاخص پیوستگی مانند شیب، طول مسیر، و ضریب زبری پیوستگی رسوب واقعی را در زمین پست به خوبی بازتاب نمی‌کند، و عامل‌های به‌کاررفته در محاسبه‌ی پیوستگی رسوب در پادگان‌ها، دره‌های V شکل، و دشت‌های سیلابی باید با هم متفاوت باشد (گای و همکاران ۲۰۱۶).

پژوهش‌های پیشین شاخص‌های گوناگونی برای عامل وزنی W انتخاب کردند (بورسلی و همکاران ۲۰۰۸؛ تروپسانی و کوالی ۲۰۱۶؛ گای و همکاران ۲۰۱۶ و لویروینست و بن سالم ۲۰۱۹؛

نسبی هدررفت خاک یا رسوب خروجی در سطح زمین دیم شخم‌خورده‌ی بی پوشش که احتمال فرسایش در آن است را پیش‌بینی کند، تا بتوان با آگاهی‌یافتن از اندازه‌ی هدررفت خاک دامنه‌ها، به طراحی کردن کنش‌های حفاظت خاک در آن‌ها کمک کرد.

مواد و روش‌ها

سه نوع خاک گوناگون از دیدگاه بافت و ساختمان از سه منطقه‌ی دیم‌کاری سرارود در استان کرمانشاه، کوهین در استان قزوین، و گچساران در استان کهگیلویه و بویراحمد (جدول ۱) انتخاب، و دو تن نمونه‌ی خاک سطحی (۳۰ سانتی‌متر) دامنه برداشته‌شد. ساختمان خاک با مشاهده‌ی شکل خاک‌دانه‌ها و به‌کاربردن راهنمای دفترچه‌ی رنگ (مانسل ۱۹۷۵)، و جرم مخصوص ظاهری با استوانه‌های فلزی در محل نمونه‌برداری اندازه‌گیری شد (بلک و هارتج ۱۹۸۶). برخی از ویژگی‌های خاک در آزمایشگاه اندازه‌گیری شد (جدول ۱). نمونه‌های خاک پس از هوا خشک‌شدن و کوبیده‌شدن از الک ۲ میلی‌متر عبور داده شد. ماده‌ی آلی به‌روش والکی-بلاک (نلسون و سامرز ۱۹۹۶)، بافت خاک به‌روش آب‌سنجی (هیدرومتری) (جی و باودر ۱۹۸۶)، رطوبت اشباع با روش وزنی، رطوبت ظرفیت زراعی با دستگاه محفظه‌ی فشاری در مکش ۳۳ کیلوپاسکال (رینولدز و همکاران ۲۰۰۹)، میانگین وزنی قطر خاک‌دانه با روش الک تر با گروه الک‌ها (ون باول ۱۹۴۹)، کربنات کلسیم فعال با روش اگزالات آمونیوم (لئوپرت و سوارز ۱۹۹۶)، شاخص فرسایش‌پذیری بر پایه‌ی نتیجه‌ی عرب‌خدری و همکاران (۲۰۲۰) با معادله‌ی Dg^1 (رومکنز و همکاران ۱۹۹۷)، مقاومت فروروی با نفوذسنج جیبی (Soil Test Pocket Soil Penetrometer Model CL-) (700 by Soil Test Inc) (گچ با روش استون (نلسون ۱۹۸۲)، کربنات کلسیم معادل با روش خنثاسازی با اسیدکلریدریک و تیره‌کردن با باز (پای و کن ۱۹۸۶)، نفوذپذیری با شبیه‌ساز باران از تفاوت اندازه‌ی بارش و روان‌آب (ناواس و همکاران ۱۹۹۰)، و میانگین هندسی قطر ذره (Dg) با معادله‌ی شیرازی و بورسما (۱۹۸۴) اندازه گرفته شد.

عرب‌خدری و همکاران ۲۰۲۱؛ لوپزوینسنت و همکاران ۲۰۲۱؛ زاناندر و همکاران ۲۰۲۱). همه‌ی شاخص‌ها مقاومت در برابر روان‌آب و رسوب را نشان می‌دادند، که کارآیی رساندن رسوب به رودخانه‌ها را مدیریت می‌کند (بورسلی و همکاران ۲۰۰۸). شاخص‌های پوشش گیاهی، آستانه‌های تشکیل شیار و آب‌کند، مدیریت کاربری زمین (کنش‌های خاک‌ورزی، و زمان از آخرین کنش‌های خاک‌ورزی)، عامل C در مدل اصلاح‌شده‌ی جهانی فرسایش (بورسلی و همکاران ۲۰۰۸؛ عرب‌خدری و همکاران ۲۰۲۱، لیزاگا و همکاران ۲۰۱۷)، زبری سطحی (ترویسانی و کوالی ۲۰۱۶)، نفوذپذیری (گای و همکاران ۲۰۱۶)، فرسایش‌پذیری خاک، درجه و طول شیب (دی‌والکیو و همکاران ۲۰۱۷)، شکل تغییر یافته‌ی ضریب مانینگ (زاناندر و همکاران ۲۰۲۱)، و فرسایش‌پذیری باران (لوپزوینسنت و بن سالم ۲۰۱۹؛ لوپزوینسنت و همکاران ۲۰۲۱) در جایگاه عامل وزنی به‌کار برده شده است. ترکیبی از ویژگی‌های فرسایش‌پذیری، پوشش گیاهی و کنش‌های حفاظتی مدل RUSLE (لیو و همکاران ۲۰۲۲)، فرسایش‌پذیری، زبری سطحی، عامل C و نفوذپذیری (لوپزوینسنت و همکاران ۲۰۲۱)، عامل C، کل زیست‌توده‌ی هوایی و زبری سطحی (لیزاگا و همکاران ۲۰۱۷)، و روان‌آب سطحی تجمعی، شکل تغییر یافته‌ی ضریب مانینگ، بارش‌های پیشین (زاناندر و همکاران ۲۰۲۱) بسته به ویژگی‌های محل پژوهش و اطلاعات موجود پیشنهاد شده است.

عامل وزنی باید با ویژگی‌های دیدنی و اندازه‌گرفتنی کاربری و مدیریت زمین مرتبط باشد، و بتوان آن را در سرآب و پایاب هر جای مشخص در هر شیب اندازه گرفت. از دو زمین که پستی‌بلندی‌شان هم‌سان است، آن که پوشش بیشتری دارد، شاخص پیوستگی کم‌تر است. برای دو زمین هم‌سان شخم‌خورده که پوشش گیاهی ندارد باید عامل وزنی مناسبی تعریف کرد. این پژوهش به دنبال آن است که با شبیه‌سازی کردن بارش‌های استثنایی که توان ایجاد نهرهای شیاری (پیونددهنده‌ی دامنه‌ها به مخزن‌های محلی) دارد، عامل وزنی شاخص پیوستگی رسوب را متناسب با ویژگی‌های سطح به‌دست آورد، و با این شاخص با عامل وزنی تغییر یافته، بزرگی

جدول ۱- مختصه‌های جغرافیایی و برخی از ویژگی‌های نمونه‌ی خاک‌های آزموده.

منطقه			ویژگی
گچساران (کهگیلویه و بویراحمد)	سرارود (کرمانشاه)	کوهین (قزوین)	
E۵۰°۵۴'۵۵"	E۴۷°۱۷'۳۷"	E۴۹°۳۵'۲۱"	طول جغرافیایی
N۳۰°۱۷'۹"	N۳۴°۱۹'۵۶"	N۳۶°۲۲'۳۲"	عرض جغرافیایی
میان‌بافت	میان‌بافت رسی لای	میان‌بافت شنی	بافت
۵۷	۶۱	۵۰	لای + شن بسیار ریز (%)
بی ساختمان	دانه‌ی بسیار ریز	دانه‌ی ریز	ساختمان خاک
۳۷	۶۳	۲۲	سنگ‌ریزه‌ی درون خاک (<۲ mm) (%)
۱/۵۹	۱/۸۹	۰/۸۹	ماده‌ی آلی (%)
۱/۵	۱/۱	۱/۳	جرم مخصوص ظاهری (g cm ⁻³)
۵۲/۱	۳۱/۲	۲۴/۳	کربنات کلسیم معادل (%)
۷/۱	۱۷/۸	۱۲/۷	کربنات کلسیم فعال (%)
۰/۷۰	۱/۷۵	۱/۳۳	میانگین وزنی قطر خاک‌دانه با روش الک تر (mm)
۰/۰۷	۰/۰۱	۰/۱۶	میانگین هندسی قطر ذره (mm) (Dg)
۰/۰۳۷۳	۰/۰۳۶۴	۰/۰۲۷۸	فرسایش‌پذیری (K-Dg) (Mg h MJ ⁻¹ mm ⁻¹)
۱/۵	۰/۵	۰/۷۵	مقاومت فروروی بعد از شخم (kg cm ⁻²)
۰/۷۵	۰/۲	۰/۵	مقاومت فروروی ۴ ساعت بعد از بارش (kg cm ⁻²)
۰/۰۱۴	۰/۰۰۶	۰/۰۱۴	گچ (%)
۹/۷	۱۰/۵	۸/۲	نفوذپذیری (cms ⁻¹)

آمد. بر پایه‌ی نقش باران‌های فرساینده‌ی که توان جابه‌جا کردن ذره‌های خاک و ایجادکردن سریع‌تر شیار دارد (رفاهی ۲۰۱۶)، شدت باران میانگین ۱۱۱ میلی‌متر بر ساعت انتخاب شد. ایجاد بیش از ۵۰٪ از هدررفت خاک با روی‌دادهای استثنایی مانند بارش با شدت ۲-۳ میلی‌متر بر دقیقه (عرب‌خدری ۲۰۱۵)، و تجربه‌ی تحقیقات گذشته که نشان داد روان‌آب در بارش با شدت ۳۳ و ۶۴ میلی‌متر بر دقیقه (عرب‌خدری و همکاران ۲۰۲۰) به‌راه نمی‌افتد از علت‌های دیگر انتخاب‌کردن این شدت باران بود.

نهر پایه‌دار در دو مرحله‌ی زیرسازی و روسازی آماده شد. برای آماده‌کردن بخش زه‌کشی نهر پایه‌دار (زیرسازی) ابتدا سنگ ریزه با قطر ۱-۲ سانتی‌متر به ضخامت ۶ سانتی‌متر در کف نهر پایه‌دار ریخته، و برای جلوگیری از درهم‌شدن خاک و سنگ‌ریزه روی آن با گونی کفنی پوشانیده شد (خالدی‌درویشان و همکاران ۲۰۱۳؛ شریفی‌مقدم و همکاران ۲۰۱۵). برای آماده‌سازی خاک در نهر پایه‌دار (روسازی) ابتدا با هدف حفظ خاک‌دانه‌ها لایه‌ی ۵ سانتی‌متر از خاک (سرد ۱۵ میلی‌متر) در سطح ریخته و تسطیح شد (خالدی‌درویشان و همکاران، ۲۰۱۳). این کار برای سه لایه‌ی ۵ سانتی‌متر دیگر از هر خاک تا رسیدن به ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر از خاک

نتیجه‌ی تجزیه‌ی خاک سه دیم‌زار (جدول ۱) نشان می‌دهد که بافت خاک کوهین، گچساران، و سرارود به‌ترتیب بسیار سبک، میانه و بسیار سنگین بود. اندازه‌ی ماده‌ی آلی در کوهین بسیار کم، و در سرارود مناسب بود. بودن اندازه‌ی بسیار از لای و شن بسیار ریز (که ذره‌های فرسایش‌پذیر است) در سه خاک نیز از دیگر ویژگی‌های مهم آن‌ها بود. فرسایش‌پذیری خاک (K-Dg) نمونه‌ی گچساران و کوهین بیش‌ترین و کم‌ترین بود. ساختمان دو نمونه‌ی خاک سرارود و کوهین دانه‌ی، و نمونه‌ی گچساران بی ساختمان بود. میانگین وزنی قطر خاک‌دانه در نمونه‌ی خاک گچساران کم‌ترین بود، که با نبودن ساختمان در آن هم‌خوان است، اما با اندازه‌ی ماده‌ی آلی (۱/۶٪) متناسب نبود. نتیجه پس از تکرارکردن آزمایش ماده‌ی آلی خاک نیز تغییر نکرد.

آزمایش‌ها در نهر پایه‌دار آزمایشگاهی (۵/۸ متر × ۱ متر) با شیب ۱۲٪ (عرب‌خدری و همکاران ۲۰۱۸)، در دو بارش با شدت ۱۱۱ میلی‌متر بر ساعت با فاصله‌ی چهار ساعت انجام شد (شکل ۱). نام‌های اختصاری K، G و S به‌ترتیب به خاک‌های کوهین، گچساران و سرارود و R_۱ و R_۲ به‌ترتیب به بعد از بارش اول و دوم داده‌شد. یک‌نواختی بارش شبیه‌ساز باران با رابطه‌ی کریستینسن (سولومن ۱۹۷۹) ۹۱٪ به‌دست

در مدل رقومی ارتفاع، برای از دست ندادن اطلاعات دقیق از سطح خاک، اندازه‌ی نقطه ۲ میلی‌متر انتخاب شد، که علاوه بر از دست نرفتن اطلاعات، سرعت پردازش نیز افزایش یابد. بیش‌تر پژوهش‌های انجام‌شده در نهر پایه‌دار بسته به هدف بررسی عارضه‌های جزئی، ابزارهای عکس‌برداری، اندازه‌ی نقطه‌ی عمودی (ارتفاع) و افقی (اندازه نقطه) کم‌تر از ۲ میلی‌متر (بالاگیورپینگ و همکاران ۲۰۱۷، ونگ و لیا ۲۰۱۸) را پیشنهاد کرده‌اند. اندازه‌ی نقطه‌ی مدل رقومی ارتفاع بسته به مقیاس پژوهش و دستگاه‌های اندازه‌گیری گوناگون است. در پژوهش‌های آزمایشگاهی به علت کوچک بودن سطح می‌توان مدل رقومی ارتفاع با قدرت تفکیک‌های بسیار کوچک در حد میلی‌متر تهیه کرد، اما در سطح دامنه یا آبخیز این امکان نیست، و نقطه‌ها را باید در اندازه‌ی سانتی‌متری تهیه کرد. نتیجه‌ی این پژوهش باید در سطح دامنه اجرا شود تا کارایی نتیجه‌ی آن بررسی شود.

برای تعیین درستی مدل رقومی ارتفاع در بعد ارتفاع (عمودی) و افقی برای هر خاک، ۱۹ نقطه و خط در محل نقطه‌های مرجع موجود در دیواره‌ی نهر پایه‌دار انتخاب شد. یکی از ضلع‌های نقطه‌های مرجع با کولیس اندازه‌گیری و اندازه‌های مشاهده‌شده‌ی آن در نظر گرفته شد. اندازه‌ی همان ضلع‌ها در مدل رقومی ارتفاع (برآوردشده) نیز اندازه‌گرفته شد. برای آگاهی از درستی ارتفاع‌های اندازه‌گرفته‌شده، ارتفاع مدل رقومی با دوربین نقشه‌برداری در محل نقطه‌های مرجع بررسی شد. آماره‌های جذر میانگین مربع‌های خطا و میانگین خطای مطلق برای دانستن درستی، و آماره‌ی ضریب تعیین (R^2) برای بررسی اندازه‌ی هم‌خوانی مشاهده‌ها با اندازه‌های برآوردشده به کار برده شد (رابطه‌ی ۱ تا ۳).

$$MSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n [Pi - Oi]^2 / n} \quad 1$$

$$MAE = \sum_{i=1}^n |[Pi - Oi]| / n \quad 2$$

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (Oi - \bar{O})(Pi - \bar{P}))^2}{\sum_{i=1}^n (Oi - \bar{O})^2 (\sum_{i=1}^n (Pi - \bar{P})^2)} \quad 3$$

P_i اندازه‌ی برآوردشده برای پیکسل i ام، O_i اندازه‌ی مشاهده‌شده برای نقطه‌ی i ام، و n تعداد پیکسل‌ها است. هر چه جذر میانگین مربع‌های خطا و میانگین خطای مطلق به ۰، و ضریب تعیین به ۱ نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده‌ی کم‌تر بودن اختلاف مدل رقومی ارتفاع با اندازه‌های واقعی است. برای ارتفاع جذر میانگین مربع‌های خطا برای مدل رقومی ارتفاع منطقه‌ی کوهین، سرارود و گچساران به ترتیب ۴/۱،

تکرار شد. سپس برای تحکیم خاک و رساندن آن به جرم مخصوص ظاهری خاک مزرعه (برگر و همکاران، ۲۰۱۰) به خاک در حد اشباع شدن (۵۲، ۴۳ و ۳۸٪ رطوبت به ترتیب در نمونه‌ی خاک‌های سرارود، کوهین و گچساران) آب افزوده شد. با تعیین اندازه‌ی رطوبت خاک، خاک‌ها در رطوبت ظرفیت زراعی ۳۳، ۲۵ و ۲۲٪ به ترتیب در نمونه خاک‌های سرارود، گچساران و کوهین، با بیل به ژرفای ۱۵ سانتی‌متر شخم زده شد (شکل ۱). برای اطمینان از رسیدن به شرایط خاک دامنه‌ی طبیعی، با کاربرد روش استوانه نمونه‌ی جرم مخصوص ظاهری گرفته شد (عرب‌خدری و همکاران ۲۰۱۸).

اولین و دومین شبیه‌سازی بارش تا برقرارشدن جریان پیوسته‌ی روان آب (به معنی مشارکت‌داشتن همه‌ی سطح نهر پایه‌دار در جریان خروجی و ایجاد جریان شیاری در کل سطح نهر پایه‌دار تا زمان به تعادل رسیدن اندازه‌ی روان آب همراه رسوب) ادامه داده شد. به جای در نظر گرفتن زمان ثابت برای بارش، زمان ثابت برای جریان پیوسته دو دقیقه گرفته شد. نتیجه‌ی پژوهش پیشین برای این سه نمونه‌ی خاک (عرب‌خدری و همکاران ۲۰۲۰) نشان داد که با زمان ثابت بارش در بارندگی هم‌سان، ممکن است در خاکی روان آب تولید نشود، اما در خاکی دیگر از نخستین دقیقه‌های اولیه روان آب جریان یابد.

روان آب دارنده‌ی رسوب و زه‌آب جداگانه در هر شبیه‌سازی بارش جمع‌آوری شد، حجم روان آب اندازه‌گرفته شد، و تا ۲۴ ساعت به حال خود گذاشته شد. سپس آب زلال رویین تخلیه، و همه‌ی بار ته‌نشین جمع آورده شد. رسوب جمع‌آورده در چند روز، بر پایه‌ی اندازه‌ی رطوبت آن، هواخشک شد، ۲۴ ساعت در کوره‌ی $105^\circ C$ گذاشته شد، و وزن خشک آن (هدررفت خاک) اندازه‌گرفته شد.

مدل رقومی ارتفاع در دو مرحله، بعد از بارش اول (R_1) و بعد از بارش دوم (R_2) در زمان ثابت‌شدن تغییر سطح خاک با عکس‌برداری دیجیتال (S Canon IXY ۱۴۱۰S مگاپیکسلی، اندازه‌ی حسگر $6/16 \times 4/62$ میلی‌متر، قدرت تفکیک 4330×3256 ، طول فوکوس ۴۴ میلی‌متر) از ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر تهیه شد. پانصد عکس در هر مرحله با ۸۰٪ هم‌پوشانی طولی و عرضی گرفته، و مدل رقومی ارتفاع (DEM) ابرنقطه‌های مترامک با ۱۱۰ تا ۱۳۸ میلیون نقطه در سه خاک با نرم‌افزار Agisoft phtoscan 1.5.5 تهیه شد. مختصه‌دادن به عکس‌ها و تعیین درستی مدل رقومی ارتفاع با ۳۸ نقطه‌ی مرجع ثابت با مختصه‌های مشخص، که در دو سوی نهر پایه‌دار گذاشته شده بود، انجام شد. برای انتخاب اندازه‌ی نقطه‌ی مناسب برای مدل رقومی ارتفاع، ابتدا مدل رقومی ارتفاع با اندازه پیکسل‌های یک، دو، پنج، هشت و ۱۲ میلی‌متر تهیه شد. با مقایسه‌ی تغییر میانگین ارتفاع

(اسکندر) لیزری در دامنه، جذر میانگین مربع‌های خطای ۳/۵۱ میلی‌متر، و ریک‌زپ و نیرینگ (۲۰۰۵) در پژوهش آزمایشگاهی فرسایش خاک با دوربین دیجیتال، جذر میانگین مربع‌های خطای ۱ میلی‌متر را گزارش کردند. اندازه‌ی خطای مدل رقومی ارتفاع تولیدشده بسته به ابزار به کاررفته، دقت نیازداشته، و مقیاس پژوهش گوناگون است. اندازه‌ی خطای مدل رقومی ارتفاع نمونه‌ی خاک‌ها در این پژوهش به دلیل دوربین دیجیتالی به کاررفته، و در مقایسه با نتیجه‌ی

۳/۷ و ۵/۲ میلی‌متر و برای عرض ۱/۱، ۰/۶ و ۰/۶ میلی‌متر بود. بیشینه و کمینه آماره‌ی میانگین خطای مطلق در بعد ارتفاع در منطقه‌ی گچساران (۰/۳ میلی‌متر) و سرارود (۰/۱ میلی‌متر) و در بعد عرضی در منطقه‌ی گچساران یا اندازه‌ی ۴/۰۳ و کوهین ۱/۲۶ میلی‌متر بوده است. ضریب تعیین در منطقه‌ی سرارود در بعد ارتفاع و عرض بیش‌ترین اندازه، و به ترتیب ۰/۷۸ و ۰/۹۸ بود. لو و همکاران (۲۰۱۹) در تعیین خطای مدل رقومی ارتفاع تولیدی با تصویرخوان



شکل ۱- الف: نهر پایه‌دار آزمایشگاهی، ب: خاک شخم‌خورده، پ: ارباهی عکس‌برداری در نهر پایه‌دار آزمایشگاهی.

پژوهش‌های پیش‌گفته پذیرفتنی است. شاخص پیوستگی (IC) با رابطه‌ی ۴ محاسبه شد (بورسلی همکاران ۲۰۰۸). طرح‌واره‌ی آن در شکل ۲ در مقیاس نهر پایه‌دار نشان داده شده است.

پژوهش‌های پیش‌گفته پذیرفتنی است. شاخص پیوستگی (IC) با رابطه‌ی ۴ محاسبه شد (بورسلی همکاران ۲۰۰۸). طرح‌واره‌ی آن در شکل ۲ در مقیاس نهر پایه‌دار نشان داده شده است.

$$IC_k = \log_{10} \left(\frac{D_{up,k}}{D_{dn,k}} \right) = \log_{10} \left(\frac{\overline{W}_K \overline{S}_K \sqrt{A_K}}{\sum_{i=k, nk} \overline{W}_i \overline{S}_i} \right) \quad 4$$

D_{up} جزء سرآب، D_{dn} جزء پایاب، d_i طول مسیر به سوی پایاب دامنه در نقطه‌ی i ام نقشه‌ی شبکه‌ی به کاررفته W_i ، عامل وزنی نقطه‌ی i ام (بی‌بعد)، S_i تندی شیب نقطه‌ی i ام (W_K)، میانگین عامل وزنی تراز مشارکت سرآب دامنه (بی‌بعد)، (S_K) میانگین تندی شیب تراز مشارکت سرآب دامنه (m/m)، و A_k تراز مشارکتی سرآب (m^2) است.

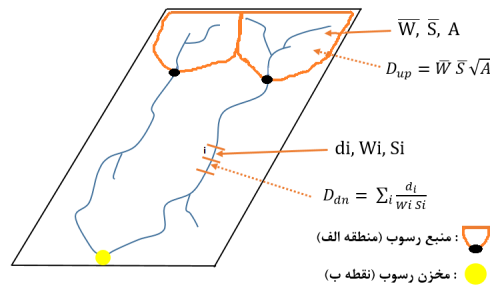
کمینه‌ی اندازه‌ی A برابر با سطح نقطه‌ی مرجع (اندازه‌ی یاخته) است. زیرنویس k نشان می‌دهد که هر یاخته اندازه‌ی شاخص پیوستگی خود را دارد که بر پایه‌ی این معادله محاسبه شده است. شاخص پیوستگی اندازه‌های میان مثبت تا منفی بی‌نهایت می‌گیرد، و اندازه‌های بزرگ‌تر آن افزایش پیوستگی رسوب را نشان می‌دهد. برای محاسبه‌ی شاخص پیوستگی

۵

$$RI = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - X_m)^2}{N}}$$

X_i اندازه‌ی ارتفاع نقطه‌ی i ام در پنجره‌ی متحرک (mm)، میانگین اندازه‌های ارتفاع یاخته‌های بررسی‌شده در پنجره‌ی متحرک (mm)، و N عدد یاخته‌های بررسی‌شده مدل رقومی ارتفاع در پنجره‌ی متحرک 5×5 نقطه‌ی است.

- 2 -Pits Removed
- 3 -Smoothed Digital Elevation Model



شکل ۲- بخش‌های سرآب (منطقه‌ی الف، منبع رسوب) و پایاب (نقطه‌ی ب، مخزن رسوب) در رابطه‌ی IC و متغیرهای مربوط به آن در دامنه‌ی شبیه‌سازی شده در نهر پایه‌دار (برگرفته از بورسلی و همکاران ۲۰۰۸، با تغییر).

ذره‌های خاک در برابر جابه‌جایی می‌شود. فرسایش پذیری نشان‌دهنده‌ی حساسیت خاک در برابر جدا شدن به وسیله‌ی باران یا برش جریان سطحی است (عرب‌خدری و همکاران ۲۰۲۰).

این ویژگی‌ها به علت کم‌بودن تعداد داده‌ها (۶)، به همراه بانک داده‌یی از ویژگی‌های خاک‌های زمین دیم که از منبع‌های گوناگون در کشور مانند مقاله، گزارش نهایی و پایان‌نامه جمع‌آوری شد، با رابطه‌ی ۶ (کوالی و همکاران ۲۰۱۳) بهنجار شد. داده‌های بهنجار شده پس از آن در ضریب زبری ضرب شد، و همچون یکی از ورودی‌ها در جایگاه عامل وزنی در شاخص پیوستگی به کار برده شد.

$$X_{Norm} = 1 - \left(\frac{X}{X_{Max}} \right) \quad 6$$

X_{Norm} ویژگی بهنجار شده، X ویژگی دل‌خواه، و X_{Max} بیشینه‌ی اندازه‌ی آن ویژگی است.

روند میانگین شاخص پیوستگی با اندازه‌ی هدررفت خاک (اندازه‌های مشاهده‌شده) در همه‌ی آزمایش‌ها برای هر ویژگی مقایسه شد. هر ویژگی که روند منطقی و ضریب تعیین بیش‌تری داشت، در جایگاه یکی از ویژگی‌های مناسب برای عامل وزنی پذیرفته شد. به دلیل کم‌بودن تعداد آزمایش‌ها (۶) اندازه‌ی همبستگی میان داده‌ها تعیین نشد، و بیش‌تر بر روند مناسب، به معنی نزدیکی نقطه‌ها به خط وایازی، در رابطه‌ی میان میانگین شاخص پیوستگی با اندازه‌ی هدررفت خاک تأکید شد. پس از انتخاب ویژگی‌های نهایی برای عامل وزنی، ترکیب این عامل‌ها نیز عامل وزنی ترکیبی گرفته شد، و با روند هدررفت خاک مقایسه، و اندازه‌ی ضریب همبستگی محاسبه شد.

نقشه‌ی خروجی شاخص پیوستگی در مقطعی برای هم‌خوان

کاوالی و همکاران (۲۰۱۳) ضریب زبری را در جایگاه عامل وزنی اولیه در محاسبه‌ی شاخص پیوستگی به کار بردند. در محاسبه‌ی ضریب زبری به وضعیت ناهمواری توجه می‌شود، که ظاهر آن در خاک‌های گوناگون شخم‌خورده همسان است. به همین علت، در این پژوهش عامل وزنی جدیدی با ترکیب متغیرهای دیگر با ضریب زبری ساخته شد. ویژگی‌هایی که بر فرآیندهای روان‌آب و جریان رسوب در آبخیز یا دامنه تأثیر می‌گذارد، یا نشان‌دهنده‌ی مانعی برای روان‌آب و جریان رسوب است که کارایی رساندن رسوب به جریان روان‌آب را مدیریت می‌کند، مناسب است (بورسلی و همکاران ۲۰۰۸). بنابراین، ابتدا روند تغییر (مستقیم یا معکوس) میانگین وزنی قطر خاک‌دانه‌ها با روش الگ تر^۴، سنگ‌ریزه‌ی درون خاک^۵، مقاومت فروری^۶، کربنات کلسیم فعال، ماده‌ی آلی، فرسایش‌پذیری (K-Dg) گچ، کربنات کلسیم معادل، مجموع لای و شن بسیارریز، نفوذپذیری، و میانگین هندسی قطر ذره (Dg) که عامل‌های مؤثر بر فرسایش و مانعی در برابر روان‌آب و جریان رسوب است، با هدررفت خاک در سه خاک بررسی شد. سنگ‌ریزه‌ی درون خاک با کاهش سطح مقطع جریان آب در خاک و نفوذ آب در خاک باعث افزایش روان‌آب، برداشته شدن ذره‌ها با آن، و هدررفت خاک می‌شود (وو و همکاران ۲۰۲۱). مقاومت فروری با کاستن از نفوذ آب و افزایش روان‌آب، رابطه‌ی مستقیمی با هدررفت خاک دارد. افزایش میانگین وزنی قطر خاک‌دانه موجب سنگین شدن خاک‌دانه‌ها و مقاومت در برابر جابه‌جایی و تهنشست آن‌ها می‌شود (پیوسته و همکاران ۲۰۱۰). کربنات کلسیم فعال با افزودن بر واکنش‌پذیری با ذره‌های رس، باعث بهتر شدن ساختمان و مقاومت به جدا شدن می‌شود (باقریان کلات و همکاران ۲۰۱۹). ماده‌ی آلی با بهتر کردن ساختمان و تشکیل دادن خاک‌دانه در خاک موجب افزایش مقاومت

- 4- Mean Weight Diameter (MWD)
- 5- Rock Fragment Content (RFC)
- 6- Penetration Resistance (PR)

شاخص پیوستگی در سه خاک و دو بارش R_1 و R_2 از نظر ویژگی بیشینه، کمینه و میانگین مقایسه شد. نقشه‌های شاخص پیوستگی در نهر پایه‌دار به ۱۱ طبقه (جدول ۲) تقسیم کرده شد. فاصله‌ی طبقه‌ها ثابت بود و برپایه‌ی میانگین محدوده‌ی اندازه‌های شاخص پیوستگی (اختلاف بیشینه و کمینه) در سه خاک و دو بارش R_1 و R_2 انتخاب، و روند تغییر طبقه‌های آن در طول بارش R_1 و R_2 بررسی شد.

کردن با واقعیت در بخش‌های گوناگون مانند آب‌راه‌های شپاری یا منطقه‌های رسوب‌گذاری با تصویر راست عکس (ارتوموزاییک) آن مقایسه شد تا تفاوت اندازه‌های شاخص پیوستگی در بخش‌هایی که شاخص پیوستگی آن زیاد یا کم است با واقعیت ارزیابی شود. در مدل‌های رقومی ارتفاع سطح نهر پایه‌دار در سه خاک بررسی شده، ۲۰ سانتیمتر از انتهای نهر پایه‌دار برای حذف اثر برگشت یا نگاه‌داشت رسوب ناشی از لبه در خروجی نهر پایه دار حذف کرده شد. نقشه‌های

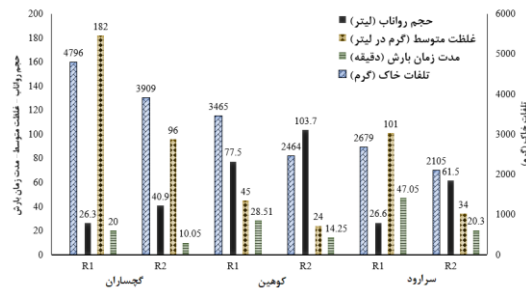
جدول ۲- محدوده‌ی طبقه‌های نقشه‌های شاخص پیوستگی.

طبقه	۱	۲	۳	۴	۵	۶
محدوده‌ی طبقه	$> -2/5$	$-3/4$ تا $-2/5$	$-4/3$ تا $-3/4$	$-5/2$ تا $-4/3$	$-6/1$ تا $-5/2$	$-7/0$ تا $-6/1$
طبقه	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	
محدوده‌ی طبقه	$-7/9$ تا $-7/0$	$-8/8$ تا $-7/9$	$-9/7$ تا $-8/8$	$-10/6$ تا $-9/7$	$-10/6$ تا $-9/7$	$< -10/6$

غلظت رسوب نیز در سه نمونه‌ی خاک، در بارش دوم از بارش اول کاهش یافت، که نشان‌دهنده‌ی کم‌شدن ذره‌های دست رس برای جابه‌جاشدن به‌وسیله‌ی روان‌آب و قطره‌های باران است (عرب‌خدری و همکاران ۲۰۱۸). بیش‌ترین غلظت رسوب در بارش اول و دوم در نمونه‌ی خاک گچساران به‌ترتیب ۱۸۲ و ۹۶ گرم در لیتر در لیتر بود. همان‌طور که انتظار می‌رفت طولانی‌ترین زمان برای تشکیل جریان پیوسته در نمونه‌ی خاک سرارود بود، که در R_1 و R_2 به‌ترتیب در دقیقه‌های ۴۷ و ۲۰ روی داد. ماده‌ی آلی زیاد (۱/۸۹٪) و ساختمان دانه‌ی این خاک موجب افزایش پایداری ساختمان خاک و نفوذپذیری آب در خاک شده است. پژوهش عرب‌خدری و همکاران (۲۰۲۰) بر سه نمونه‌ی خاک نشان داد که نمونه‌ی خاک سرارود کم‌ترین و گچساران بیش‌ترین فرسایش‌پذیری را داشت، و اندازه‌ی هدررفت خاک نمونه‌ی خاک گچساران در بارشی با شدت ۱۱۰ میلی‌متر بر ساعت نزدیک به دو برابر خاک‌های کوهین و سرارود بود. اندازه‌ی هدررفت خاک در این پژوهش در نمونه‌ی خاک گچساران در R_1 از نمونه‌ی خاک کوهین و سرارود به‌ترتیب ۱/۴ و ۱/۸ برابر و در R_2 ۱/۶ و ۱/۹ برابر به‌دست آمد.

نتایج و بحث

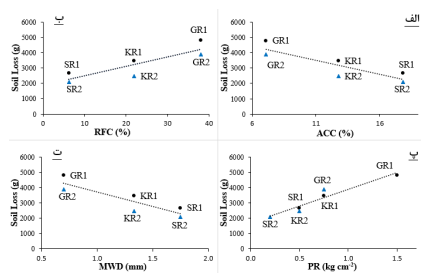
نتیجه‌ی شبیه‌سازی باران (شکل ۳) نشان می‌دهد که هدررفت خاک در نمونه‌ی خاک گچساران با اندازه‌های ۴۷۹۶ و ۳۹۰۹ گرم به‌ترتیب در R_1 و R_2 از دو خاک دیگر بیش‌تر است. اندازه‌ی هدررفت خاک دو بارش در نمونه‌ی خاک کوهین ۳۴۶۵ و ۲۴۶۴ گرم، و در نمونه‌ی سرارود ۲۶۷۹ و ۲۱۰۵ گرم اندازه‌گیری شد. اندازه‌ی بسیار هدررفت خاک در نمونه‌ی خاک گچساران ممکن است به‌علت نبود ساختمان و داشتن ۵۷٪ مجموع لای و شن بسیارریز (که بسیار فرسایش‌پذیر است (مورگان ۲۰۰۵)) باشد. اندازه‌ی روان‌آب در سه خاک در بارش دوم بیش‌تر از بارش اول بود (شکل ۳)، که تفاوت نفوذ آب در خاک به‌علت تشکیل سلهی سطحی و اندازه‌ی رطوبت در بارش اول و دوم (خالدی‌درویشان و همکاران ۲۰۱۵) است. اندازه‌ی روان‌آب در کوهین از دو خاک دیگر بسیار بیش‌تر بود، که احتمالاً به‌علت تشکیل سلهی سطحی و کاهش سطح نفوذ است. رطوبت در بارش اول در حد ظرفیت زراعی و در بارش دوم نزدیک به اشباع بود. اسلامی و واعظی (۲۰۱۶) نیز نشان دادند که رطوبت خاک در بارش‌های متناوب شبیه‌سازی زیاد و در حد اشباع است، و زمان برای کاسته‌شدن از رطوبت نیست.



شکل ۳- مقایسه‌ی سه خاک آزموده از دیدگاه زمان بارش، حجم روان آب، هدررفت خاک، و غلظت میانگین برای دو بارش.

از دید زمین ریخت‌شناسی نبوده است، و باید ویژگی‌هایی مانند نفوذپذیری، فرسایش‌پذیری، و دیگر ویژگی‌های سطح خاک مانند عامل C مدل USLE را در عامل وزنی شاخص پیوستگی به کار گرفت.

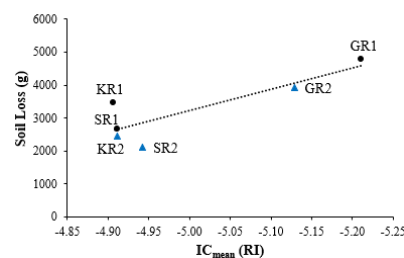
رابطه‌ی ویژگی‌های سنگ‌ریزه‌ی درون خاک، کربنات کلسیم فعال، میانگین وزنی قطر خاک‌دانه، مقاومت فروری، ماده‌ی آلی، فرسایش‌پذیری، گچ، آهک، مجموع لای و شن بسیارریز، نفوذپذیری و میانگین هندسی قطر ذره (Dg) با هدررفت خاک در سه خاک بررسی شد. میان ویژگی‌های ماده‌ی آلی، فرسایش‌پذیری، گچ، کربنات کلسیم معادل، مجموع لای و شن بسیارریز، نفوذپذیری و میانگین هندسی قطر ذره (Dg)، روند مناسب و خطی (مستقیم و یا معکوس) با هدررفت خاک نبود. به این دلیل این ویژگی‌ها از بررسی کنار گذاشته‌شد. سنگ‌ریزه‌ی درون خاک و مقاومت فروری با هدررفت خاک رابطه‌ی مستقیم، و کربنات کلسیم فعال و میانگین وزنی قطر خاک‌دانه با آن روندی مناسب و معکوس داشت (شکل ۵). وو و همکاران (۲۰۲۱)، باقریان کلات و همکاران (۲۰۱۹) و پیوسته و همکاران (۲۰۱۰) نیز مانند این روند را میان ویژگی‌های سنگ‌ریزه‌ی درون خاک، مقاومت فروری، کربنات کلسیم فعال، و میانگین وزنی قطر خاک‌دانه با هدررفت خاک نشان دادند.



شکل ۵- تغییر هدررفت خاک (Soil Loss) در برابر ویژگی‌های سنگ‌ریزه‌ی درون خاک (RFC)، کربنات کلسیم فعال (ACC)، میانگین وزنی قطر خاک‌دانه (MWD)، و مقاومت فروری (PR) در سه خاک.

کربنات کلسیم فعال، میانگین وزنی قطر خاک‌دانه، و مقاومت فروری در ترکیب با RI در برابر هدررفت خاک در سه خاک

رابطه‌ی میانگین شاخص پیوستگی با هدررفت خاک در سه نمونه‌ی خاک با عامل وزنی اولیه RI (شکل ۴) نشان می‌دهد که با افزایش هدررفت خاک اندازه‌ی شاخص در نمونه‌ی خاک گچساران کوچک‌تر (منفی‌تر) از سرارود و کوهین بود. انتظار می‌رفت که در نتیجه‌ی تشکیل آب‌راه‌های شیار، کم‌بودن پایداری خاک‌دانه‌ها، و زیادبودن اندازه‌ی ذره‌های فرسایش‌پذیر در خاک گچساران، اندازه‌ی شاخص پیوستگی بیش‌تر (مثبت‌تر) باشد. در نمونه‌ی خاک سرارود با ساختمان خاک خوب، نفوذپذیری زیاد، و هدررفت خاک کم‌تر از دو خاک دیگر، میانگین شاخص پیوستگی کوچک‌تر باشد، اما رابطه‌ی آن با هدررفت خاک در سه نمونه‌ی خاک و دو بارش (R1 و R2) عکس آن‌چه انتظار می‌رفت بود، و با افزایش هدررفت خاک اندازه‌ی شاخص منفی‌تر شد. کاوالی و همکاران (۲۰۱۳) نشان دادند که در خاک‌های لخت بهتر است ویژگی‌های سطح خاک که زبری را نشان می‌دهد و مقاومت در برابر جریان ایجاد می‌کند، به کار برده‌شود. آن‌ها RI را برای آبخیز کوهستانی بی پوشش به کار بردند. منبع‌های دیگر (گای و همکاران ۲۰۱۶؛ دی والکیو و همکاران ۲۰۱۷؛ زاناندر و همکاران ۲۰۲۱؛ لویزویسنست و بن سالم ۲۰۱۹؛ لویزویسنست و همکاران ۲۰۲۱) نیز نشان دادند که RI به‌تنهایی عامل وزنی مناسبی در منطقه‌های گوناگون



شکل ۶- روند تغییر میانگین شاخص پیوستگی برپایه‌ی عامل وزنی اولیه (RI) در برابر هدررفت خاک در سه خاک.

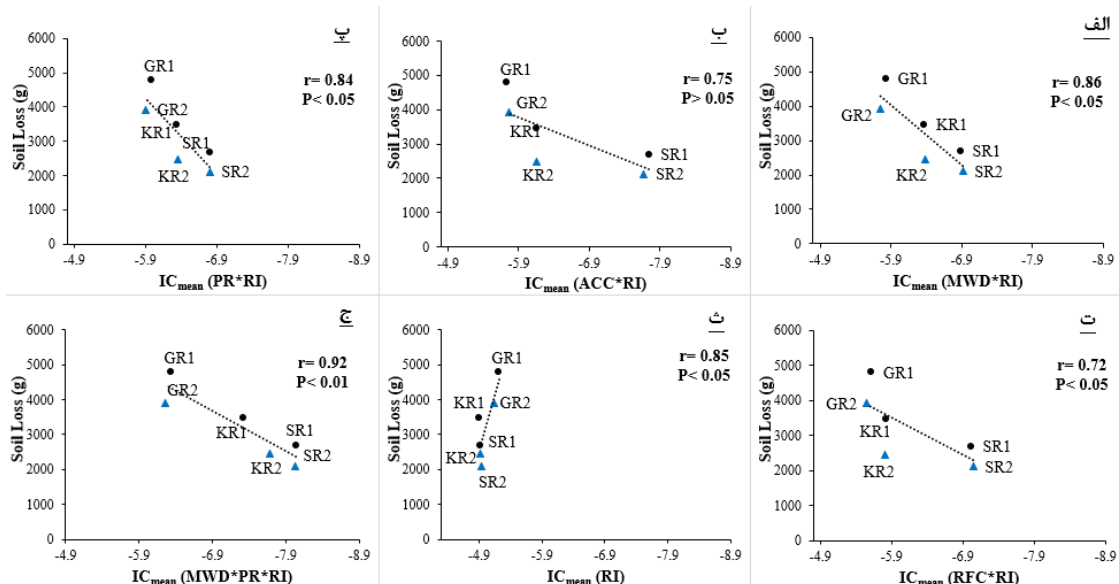
شکل ۶ (الف تا ت) روند تغییر میانگین شاخص‌های پیوستگی جدید را برپایه‌ی عامل‌های وزنی سنگ‌ریزه‌ی درون خاک،

مقاومت فروروی در RI در جایگاه عامل وزنی در شاخص پیوستگی گذاشته شد (شکل ۶). با وجود اثر معکوس میانگین وزنی قطر خاک‌دانه و اثر مستقیم مقاومت فروروی بر فرسایش خاک، روند میانگین شاخص پیوستگی با هدررفت خاک در سه خاک بهبود یافت، و رابطه در سطح ۱٪ معنی‌دار شد. عرب‌خدری و همکاران (۲۰۲۱) نیز ارتباط مستقیم و معنی‌دار رسوب‌دهی خروجی آبخیز را با شاخص پیوستگی در آبخیزهای با سیمای فرسایش یکسان گزارش کردند. مقایسه‌ی میانگین شاخص پیوستگی برپایه‌ی عامل وزنی به‌دست آمده از ترکیب دو ویژگی میانگین وزنی قطر خاک‌دانه و مقاومت فروروی با RI (شکل ۶-ج) با میانگین شاخص پیوستگی برپایه‌ی عامل وزنی RI به تنهایی (شکل ۶-ث) نشان می‌دهد که RI در خاک‌های شخم‌خورده و بی‌پوشش متفاوت به تنهایی بازتابنده‌ی تغییر نیست، و به‌کار بردن متغیرهای دیگر برای دستیابی به آن درست‌تر است. بسیاری از پژوهش‌ها (لیو و همکاران، ۲۰۲۲؛ لوپز‌وینسنت و همکاران ۲۰۲۱؛ زاناندر و همکاران ۲۰۲۱؛ لوپز‌وینسنت و بن سالم ۲۰۱۹؛ گای و همکاران ۲۰۱۶) که در آبخیز انجام شد، نشان داد که RI به تنهایی عامل وزنی مناسبی در منطقه‌های گوناگون نبود، و پیوستگی رسوب را به‌خوبی نمایش نداد. این محققان در پژوهش‌های خود ویژگی‌هایی مانند نفوذپذیری و فرسایش‌پذیری خاک، ضریب مانینگ تغییرشکل یافته، و دیگر ویژگی‌های سطح خاک مانند عامل C مدل USLE را در عامل وزنی شاخص پیوستگی به‌کار گرفتند.

نشان می‌دهد. علت ترکیب‌شدن این ویژگی‌ها با RI آن است که هر یک از آن‌ها در خاکی معین، اندازه‌ی ثابت برای کل نهر پایه‌دار دارد. این علت باعث شد که اندازه‌ی هر ویژگی در RI که اندازه‌ی آن برای هر نقطه در نهر پایه‌دار متفاوت است، ضرب شود تا اندازه‌ی عامل وزنی شاخص پیوستگی برای هر نقطه یگانه باشد.

بر خلاف روند معکوس رابطه‌ی شاخص پیوستگی برپایه‌ی RI با هدررفت خاک، بررسی این رابطه در خاک‌های آزموده برای عامل‌های وزنی جدید روندی منطقی (رابطه‌ی مستقیم) نشان داد. برای نمونه، اندازه‌ی شاخص پیوستگی خاک گچساران با هدررفت بیش‌تر و عامل وزنی مقاومت فروروی مثبت‌تر بود. اندازه‌های میانگین شاخص پیوستگی با عامل وزنی مقاومت فروروی در نمونه‌ی خاک گچساران، کوهین و سرارود در R₁ به‌ترتیب -۵/۹۸، -۶/۳۴ و -۶/۸۰ بود. مقایسه‌ی نتیجه‌ی چهار عامل وزنی سنگ‌ریزه‌ی درون خاک، کربنات کلسیم فعال، میانگین وزنی قطر خاک‌دانه، و مقاومت فروروی نشان می‌دهد که هنگامی که میانگین وزنی قطر خاک‌دانه و مقاومت فروروی عامل وزنی شاخص پیوستگی باشد، رابطه‌ی میانگین شاخص پیوستگی با هدررفت خاک مناسب‌تر است، و ضریب همبستگی بیش‌تری از سنگ‌ریزه‌ی درون خاک و کربنات کلسیم فعال دارد.

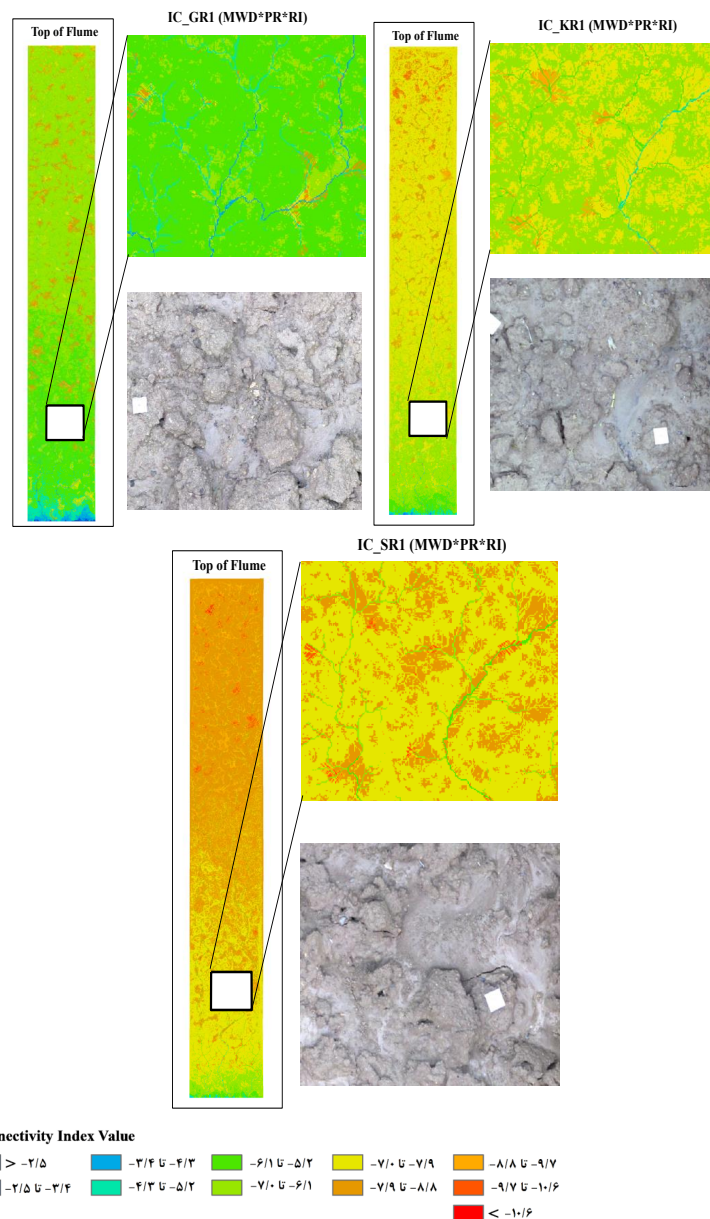
دو ویژگی میانگین وزنی قطر خاک‌دانه و مقاومت فروروی در مجموع عامل‌های وزنی مناسب‌تری برای محاسبه‌کردن شاخص پیوستگی در خاک شخم‌خورده دانسته شد. در گام بعدی، ترکیب دو ویژگی میانگین وزنی قطر خاک‌دانه و



شکل ۶- روند میانگین شاخص پیوستگی با هدررفت خاک در سه خاک با عامل‌های وزنی میانگین وزنی قطر خاک‌دانه (MWD)، کربنات کلسیم فعال (ACC)، مقاومت فروروی (PR)، سنگ‌ریزه‌ی درون خاک (RFC) در ترکیب با RI، ضریب زبری (RI)، و ترکیب میانگین وزنی قطر خاک‌دانه، مقاومت فروروی، و RI.

منبع و خروجی نهر پایه‌دار (مخزن) بیش‌تر به هم متصل می‌شود. از این‌رو، شاخص پیوستگی رسوب در خروجی نهر پایه‌دار بیش‌تر است. پیوستگی آن در مسیر آبراه به علت آسانی جابه‌جاشدن رسوب بسیار است. پیوستگی رسوب در بخش‌هایی که ذره‌های آن پشت برآمدگی‌های به‌دست‌آمده از شخم متوقف شد، یا جریان قدرت تشکیل آبراه یا شیار را نداشت، کم‌تر است. عرب‌خدری و همکاران (۲۰۲۱)، زاناندر و همکاران (۲۰۲۱)، لویزوینسنت و همکاران (۲۰۲۱) و کوالی و همکاران (۲۰۱۳) نیز نشان دادند که اندازه‌ی شاخص پیوستگی در خروجی آبخیز و رودخانه‌های اصلی بیش‌تر از منطقه‌های سرآب است، زیرا جابه‌جایی رسوب در این منطقه‌ها راحت‌تر است.

نقشه‌ی شاخص پیوستگی با عامل وزنی ترکیبی میانگین وزنی قطر خاک‌دانه، مقاومت فروری، و RI در حالت R1 در سه خاک به همراه بزرگ‌نمایی مقطعی از نقشه و تصویر راست‌عکس همان محدوده در شکل ۷ نشان داده شده‌است. کم‌تر بودن اندازه‌ی شاخص پیوستگی در بالای نهر پایه‌دار به معنی کم‌تر بودن احتمال رسیدن ذره‌های فرساییده به خروجی نهر پایه‌دار است. به عبارت دیگر، بسیاری از ذره‌های فرساییده در همان محل ته‌نشین می‌شود. در برابر، هر چه به‌سوی خروجی نهر پایه‌دار حرکت کنیم، اندازه‌ی شاخص پیوستگی بیش‌تر می‌شود، که به معنی احتمال بیش‌تر انتقال ذره‌های فرساییده به خروجی است. علت آن است که هر چه جریان روان‌آب راحت‌تر به خروجی نهر پایه‌دار برسد،



شکل ۷- نقشه‌ی شاخص پیوستگی با عامل وزنی ترکیبی میانگین وزنی قطر خاک‌دانه، مقاومت فروری، و RI. در حالت R1 در سه خاک به همراه بزرگ‌نمایی مقطعی از نقشه و تصویر راست‌عکس همان محدوده.

شاخص پیوستگی را کاهش داده باشد. در مجموع کاهش اندازه‌ی میانگین شاخص پیوستگی در R۲ در کوهین ۶/۸ بود که اندازه‌ی مهمی نیست. نتیجه‌ی پژوهش لو و همکاران (۲۰۱۹) نیز نشان داد که تفاوت‌هایی در میانگین و میانه‌ی شاخص پیوستگی در دو سال هست، که دلیل آن تغییر زیاد شاخص پیوستگی است و از نظر آماری معنی‌دار نیست. شاخص پیوستگی در دو سال در پژوهش لو و همکاران (۲۰۱۹) حدود ۴٪ تغییر کرد.

طبقه‌بندی نقشه‌های شاخص پیوستگی در شش آزمایش در سه خاک در جدول ۳ نشان می‌دهد که بیش‌ترین فراوانی داده‌ها در طبقه‌ی ششم هر دو تیمار R۱ و R۲ نمونه‌ی خاک گچساران بود. در نمونه‌ی خاک کوهین فراوانی طبقه‌ی هفتم در R۱ و R۲ به ترتیب ۶۱/۸۲ و ۹۱/۲۲٪ بود، و عددها به سوی منفی گرایش داشت. در نمونه‌ی خاک سرارود فراوانی طبقه‌ی هشتم در R۱ و R۲ به ترتیب ۵۴/۸۷ و ۵۶/۵۸٪ بود. در مجموع فراوانی اندازه‌های بزرگ‌تر در خاک گچساران در R۱ و R۲ بیش‌تر از خاک‌های دیگر در دو بارش بود.

اندازه‌های بیشینه، کمینه و میانگین شاخص پیوستگی با عامل وزنی ترکیبی میانگین وزنی قطر خاک‌دانه، مقاومت فروری، و RI در شش آزمایش در سه خاک (جدول ۳) نشان داد که مثبت‌ترین اندازه‌ها در نمونه‌ی خاک گچساران در R۱ و R۲، و منفی‌ترین در خاک سرارود (با بیشینه‌ی شاخص پیوستگی ۰/۹۲- و ۰/۸۵- در R۱ و R۲) بود. مقایسه‌ی اندازه‌های بیشینه، کمینه و میانگین شاخص پیوستگی در R۱ و R۲ نشان داد که در R۲ مثبت‌تر از R۱ است، که به معنی کاهش آن است. انتظار می‌رود که در بارش دوم با افزایش آبراه‌های شیبی، تشکیل اندوده‌ی سطحی، کاهش فرورفتگی‌ها، و بسته‌شدن ترک‌های احتمالی نفوذ آب در خاک کم شود و پیوستگی رسوب افزایش یابد، اما پیوستگی در این پژوهش در خاک کوهین افزایش نیافت. علت ممکن است تثبیت بستر باشد، به این معنی که ذره‌های آماده برای جابه‌جاشدن کاهش یافته باشد، و ذره‌های با قطر بزرگ‌تر در برابر جابه‌جایی با جریان و قطره‌های باران مقاومت کند. احتمال بسته‌شدن برخی آبراه بر اثر تشکیل‌شدن آبراه جدید اما کوچک‌تر نیز هست که با ایجاد اتصال‌های پراکنده و پخشیده، اندازه‌ی میانگین

جدول ۳- اندازه‌های بیشینه، کمینه، میانگین شاخص پیوستگی و طبقه‌بندی نقشه‌های شاخص پیوستگی در حالت ترکیب میانگین وزنی قطر خاک‌دانه، مقاومت فروری، و RI در شش آزمایش در سه خاک با عامل وزنی نهایی (رنگ‌پوش خاکستری در هر ستون طبقه‌ی با بیشترین شاخص پیوستگی را نشان می‌دهد).

محدوده طبقه	طبقه	GR1	GR2	KR1	KR2	SR1	SR2
> -۲/۵	۱	۰/۱۱	۰/۱۰	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱
-۲/۵ تا -۳/۴	۲	۰/۱۸	۰/۲۲	۰/۰۵	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۲
-۳/۴ تا -۴/۳	۳	۱/۱۲	۱/۱۱	۰/۱۹	۰/۰۲	۰/۱۱	۰/۱۱
-۴/۳ تا -۵/۲	۴	۴/۸۳	۵/۱۳	۰/۸۴	۰/۱۰	۰/۳۳	۰/۲۹
-۵/۲ تا -۶/۱	۵	۳۱/۸۳	۳۶/۷۶	۳/۸۵	۰/۳۹	۱/۱۲	۱/۰۷
-۶/۱ تا -۷/۰	۶	۵۱/۵۳	۴۷/۶۳	۲۳/۱۹	۲/۰۹	۵/۵۴	۵/۶۷
-۷/۰ تا -۷/۹	۷	۳/۷۹	۳/۰۹	۶۱/۸۲	۹۱/۲۲	۳۱/۹۵	۳۰/۴۱
-۷/۹ تا -۸/۸	۸	۶/۵۹	۵/۵۹	۷/۶۷	۵/۶۷	۵۴/۸۷	۵۶/۵۸
-۸/۸ تا -۹/۷	۹	۰/۰۳	۰/۰۲	۱/۶۳	۰/۲۵	۳/۶۲	۴/۲۷
-۹/۷ تا -۱۰/۶	۱۰	.	.	۰/۷۶	۰/۲۵	۲/۴۲	۱/۵۷
< -۱۰/۶	۱۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱
بیشینه		۰/۰۴	-۰/۴۱	-۰/۳۱	-۰/۹۵	-۰/۹۲	-۰/۸۵
کمینه		-۹/۶	-۹/۵	-۱۰/۲۶	-۱۰/۹۵	-۱۱/۱۱	-۱۱/۲۹
میانگین		-۶/۳۴	-۶/۲۶	-۷/۲۸	-۷/۶۸	-۸/۰۳	-۸/۰۳

وزنی اولیه برپایه‌ی ضریب زبری (RI) با هدررفت خاک نشان داد که بر خلاف انتظار با افزایش هدررفت خاک، میانگین شاخص پیوستگی کاهش یافت، که نشان‌دهنده‌ی نامناسب بودن RI در جایگاه عامل وزنی شاخص پیوستگی در خاک شخم خورده بود. کاربرد ویژگی‌های سنگ‌ریزه‌ی درون

نتیجه‌گیری

در این پژوهش عامل وزنی مناسب برای محاسبه‌کردن شاخص پیوستگی خاک بی‌پوشش و شخم‌خورده در سه خاک در دو حالت بارش اول و دوم معرفی شد. رابطه‌ی میانگین شاخص پیوستگی به‌دست‌آمده از به‌کارگیری عامل

با تغییر بسیار ناشی از فعالیت‌های انسانی مانند شخم‌زدن زمین دیم نیز ممکن می‌شود. یکی از محدودیت‌های این پژوهش ثابت‌بودن اندازه‌ی هر ویژگی برای کل نهر پایه‌دار به‌علت هم‌گن‌بودن خاک بود. در بررسی‌های میدانی می‌توان ویژگی‌های اندازه‌گرفتنی سطح خاک با تغییر مکانی را نیز در فهرست آورد. پیشنهاد می‌شود در سطح دامنه‌ی شخم‌خورده‌ی آیش و زیر بارش طبیعی، کارآیی عامل‌های وزنی معرفی‌شده در این پژوهش ارزیابی شود. برای ارزیابی کردن اثر کنش‌های حفاظتی، گسترش عامل‌های وزنی مرکب بر پایه‌ی ناهمواری، خاک، و پوشش توصیه می‌شود.

سیاس‌گذاری

هزینه‌ی اجرای این پژوهش از طرح پژوهشی «بررسی مناطق فرسایشی و رسوب‌گذاری در خاک شخم‌خورده با شاخص اتصال رسوب» (۹۹۰۱۱۷-۰۰۲-۲۹-۲) در پژوهشکده‌ی حفاظت خاک و آبخیزداری تأمین شد. از این پژوهشکده تشکر می‌شود.

خاک، کربنات کلسیم فعال، میانگین وزنی قطر خاک‌دانه، مقاومت فروروی، ماده‌ی آلی، فرسایش پذیری، گچ، کربنات کلسیم معادل، مجموع لای و شن بسیارریز، نفوذپذیری، و میانگین هندسی قطر ذره (Dg)، در ترکیب با RI نتیجه‌ی منطقی‌تری از RI تنها دارد. ترکیب سه ویژگی میانگین وزنی قطر خاک‌دانه، مقاومت فروروی، و RI بهترین رابطه با هدررفت خاک (اندازه‌ی مشاهده‌شده)، با ضریب همبستگی $0.92 (P < 0.01)$ نشان داد. می‌توان عامل وزنی مناسب با سطح خاک را در دامنه‌های شخم‌خورده شناسایی کرد، و به پیش‌بینی واقعی‌تری از اندازه‌ی فرسایش، هدررفت خاک، و رسوب تولیدشده از آن‌ها دست یافت.

اندازه‌های زیاد پیوستگی رسوب به‌ویژه اندازه‌های مثبت در نقشه‌ی تهیه‌شده نشان‌دهنده‌ی ظرفیت بسیار در انتقال رسوب است. در این جاها می‌توان با انجام‌دادن کنش‌های حفاظتی مانند کشت روی خط‌های تراز، از کاهش پیوستگی رسوب پیش‌گیری کرد. می‌توان جاهای حساس اولیه‌ی منبع‌های تولید رسوب را نیز که به آب‌راه‌های اصلی می‌پیوندند شناسایی کرد. به‌این ترتیب پایش رسوب خروجی از دامنه‌ها به کمک تغییر پیوستگی رسوب در منطقه‌های

فهرست منابع

- Arabkhedri M, Gerami Z, Shadfar S, Bayat R, Parvizi Y, Nabipay Lashkarian S. 2020. Comparing the performance of several erodibility indices equations of USLE model at laboratory condition. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(7): 1725–1736. (In Persian).
- Arabkhedri M, Heidary K, Parsamehr MR. 2021. Relationship of sediment yield to connectivity index in small watersheds with similar erosion potentials. *Journal of Soils and Sediments*, 21(7): 2699–2708.
- Arabkhedri M, Mahmoodabadi M, Taghizadeh Sh, Zoratipour A. 2018. Causes of severe erosion in a clayey soil under rainfall and inflow simulation. *Ecopersia*, 6(4): 225–233.
- Arabkhedri M. 2015. The possibility of estimation of long-term average annual erosion based on measurements of erosion from a few rainfall events. *Extension and Development of Watershed Management*, 3(11): 7–15. (In Persian).
- Baartman JEM, Masselink R, Keesstra SD, Temme AJAM. 2013. Linking landscape morphological complexity and sediment connectivity. *Earth Surface Processes and Landforms*. 38(12): 1457–1471.
- Bagherian Kalat A, Lashkaripour G, Ghafoori M, Abbasi A. 2019. Investigation on effects of lithology on soil erosion and sediment yield in Sangerd Drainage Basin. *Watershed Engineering and Management*, 10(4): 671–686. (In Persian).
- Balaguer-Puig M, Marqués-Mateu A, LuisLerma J, Ibáñez-Asensio S. 2017. Estimation of small-scale soil erosion in laboratory experiments with structure from motion photogrammetry. *Geomorphology*, 295: 285–296.
- Berger C, Schulze M, Rieke-Zapp D, Schlunegger F. 2010. Rill development and soil erosion: A laboratory study of slope and

- rainfall intensity. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35(12): 1456–1467.
- Blake GR, Hartge KH. 1986. Bulk density. In Klute A, (ed.) *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods*, 2nd ed. Agronomy Monograph no. 9. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, WI. pp. 363–382.
- Boardman J, Vandaele K, Evans R, Foster IDL. 2019. Off-site impacts of soil erosion and runoff: why connectivity is more important than erosion rates. *Soil Use and Management*, 35(2): 245–256.
- Borselli L, Cassi P, Torri D. 2008. Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment. *Catena*, 75(3): 268–277.
- Cantreul V, Biielders C, Calsamiglia A Degré A. 2018. How pixel size affects a sediment connectivity index in central Belgium. *Earth Surface Processes and Landforms*, 43(4): 884–893.
- Cavalli M, Trevisani S, Comiti F, Marchi L. 2013. Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments. *Geomorphology*, 188: 31–41.
- Cislaghi A, Bischetti GB. 2019. Source areas, connectivity, and delivery rate of sediments in mountainous-forested hillslopes: A probabilistic approach. *Science of The Total Environment*, 652: 1168–1186.
- De Walque B, Degré A, Maugnard A, and Biielders CL. 2017. Artificial surfaces characteristics and sediment connectivity explain muddy flood hazard in Wallonia. *Catena*, 158: 89–101.
- Di Stefano C, Ferro V, Palmeri V, Pampalone V. 2017. Measuring rill erosion using structure from motion: A plot experiment. *Catena*, 156: 383–392.
- Eslami SF, Vaezi AR. 2016. Runoff and sediment production under the similar rainfall events in different aggregate sizes of an agricultural soil. *Journal of Water and Soil*, 29(6): 1590–1600. (In Persian).
- FAO and ITPS. 2015. Status of the World's Soil Resources (SWSR). Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils.
- Gay A, Cerdan O, Mardhel V, Desmet M. 2016. Application of an index of sediment connectivity in a lowland area. *Journal of Soils Sediments*, 16(1): 280–293.
- Gee GW, Bauder JW. 1986. Particle size analysis hydrometer methods. In: Sparks DL. et al. (Eds). *Method of Soil Analysis. part 1. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America. Madison. WI. USA. pp: 383–411.*
- Hamed Y, Albergel J, Pepin Y, Asseline J, Nasri S, Zante P, Berndtsson R, Niazzy M, Balah M. 2002. Comparison between rainfall simulator erosion and observed reservoir sedimentation in an erosion sensitive semiarid catchment. *Catena*, 50(1): 1–160.
- Heckmann T, Cavalli M, Cerdan O, Foerster S, Javaux M, Lode E, Smetanová A, Vericat D, Brardinoni F. 2018. Indices of sediment connectivity: opportunities, challenges and limitations. *Earth-Science Reviews*, 187: 77–108.
- Hohle J. 2009. DEM generation using a digital large format frame camera. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 75(1): 87–93.
- Houben P. 2008. Scale linkage and contingency effects of field-scale and hillslope-scale controls of long-term soil erosion: Anthropogeomorphic sediment flux in agricultural loess watersheds of Southern Germany. *Geomorphology*, 101(1-2): 172–191.
- Khaledi Darvishan A, Sadeghi SHR, Homae M, Arabkhedri M. 2013. Measuring sheet erosion using synthetic colorcontrast aggregates. *Hydrological Processes*, 27(16): 2225–2382.
- Khaledi Darvishan AV, Sadeghi SHR, Homae M, Arabkhedri M. 2014. Affectability of runoff threshold and coefficient from rainfall intensity

- and antecedent soil moisture content in laboratory erosion plots. *Iranian Water Research Journal*, 8(2): 41–49. (In Persian).
- L'opez-Vicente M, Kramer H, Keesstra S. 2021. Effectiveness of soil erosion barriers to reduce sediment connectivity at small basin scale in a fire-affected forest. *Journal of Environmental Management*, 278(1): 1–14.
- Leopert RH, Suarez DL. 1996. *Methods of Soil Analysis, Chemical Methods*. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America Madison WI.
- Liu W, Shi C, Ma Y, Wang Y. 2022. Evaluating sediment connectivity and its effects on sediment reduction in a catchment on the Loess Plateau, China. *Geoderma*, 408: 1–11.
- Lizaga I, Quijano L, Palazón L, Gaspar L, Navas A. 2017. Enhancing Connectivity Index to Assess the Effects of Land Use Changes in a Mediterranean Catchment. *Land Degradation & Development*, 29(3): 663–675.
- López-Vicente M, Ben-Salem N. 2019. Computing structural and functional flow and sediment connectivity with a new aggregated index: A case study in a large Mediterranean catchment. *Science of the Total Environment*, 651(1): 179–191.
- Lu X, Li Y, Washington-Allen RA, Li Y. 2019. Structural and sedimentological connectivity on a rilled hillslope. *Science of the Total Environment*, 655: 1479–1494.
- Masselink RJH, Heckmann T, Temme AJAM, Anders NS, Gooren HPA, Keesstra SD. 2017. A network theory approach for a better understanding of overland flow connectivity. *Hydrological Processes*, 31(1): 207–220.
- Morgan RPC. 2005. *Soil Erosion and Conservation*. Blackwell Publishing.
- Munsell A. 1975. *Munsell Soil Color Charts*. Munsell Color Company. Baltimore.
- Najafi S, Sadeghi SHR, Heckmann T. 2018. Analyzing structural sediment connectivity pattern in Taham Watershed, Iran. *Journal of Watershed Engineering and Management*, 10(2): 192–203. (In Persian).
- Navas EL, Alberto E, Maehin J, Galhn ZA. 1990. Design and operation of a rainfall simulator for field studies of runoff and soil erosion. *Soil Technology*, 3(4):385–397.
- Nelson DW, Sommers LE. 1996. Total organic carbon and organic matter. p 961-1010. In: Sparks DL. et al. (ed.), *Method of Soil Analysis: Part 3, Chemical and Microbiological Properties*. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America Madison WI.
- Nelson RE. 1982. Carbonate and gypsum.. In: Miller RH, Keeney DR. (ed.), *Methods of Soil Analysis: Part 2, Chemical and Microbiological Properties*. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America Madison. WI. pp. 181–197
- Pandey S, Kumar P, Zlatic M, Nautiyal R, Panwar VP. 2021. Recent advances in assessment of soil erosion vulnerability in a watershed. *International Soil and Water Conservation Research*, 9(3): 305–318.
- Paye AL, Kenne HR. 1986. *Methods of Soil Analysis. Part2. Chemical and Mineralogical Properties*, American Society of Agronomy and Soil Science Society of America Madison. WI.
- Peyvasteh F, Asadi H, Akef M. 2010. Relationship between Aggregate Stability and Surface Sealing Formation and its Effect on Soil Erosion in the Laboratory Condition. *Iranian Journal of Watershed Management Science*, 4(10): 1–8. (In Persian).
- Poesen J. 2018. Soil erosion in the anthropocene: research needs. *Earth Surface Processes and Landforms*, 43(1): 64–84.
- Refahi HGH. 2016. *Water erosion and its control*. University of Tehran Press. (In Persian).
- Reynolds WD, Drury CF, Tan CS, Fox CA, Yang XM. 2009. Use of indicators and pore volume–function characteristics to quantify soil physi-

- cal quality. *Geoderma*, 152(3-4): 252–263.
- Rieke-Zapp DH, Nearing MA. 2005. Digital close range photogrammetry for measurement of soil erosion. *The Photogrammetric Record*, 20(109): 69–87.
- Romkens MJM, Young RA, Poesen JWA, McCool DK, El-Swaify SA, Bradford JM. 1997. Soil erodibility factor. In: Renard KG, Foster GR, Weesies GA, McCool DK, and Yoder DC. (ed.), *Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Equation (RUSLE)*, Agriculture Handbook No. 703, United States Department of Agriculture.
- Sharifi Moghadam E, Sadeghi SHR, Khaledi Darvishan A. 2015. Small plot soil hydrolic components as affected by application of vinasse organic residue. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 45(4):499-508. (In Persian)
- Shirazi MA, Boersma L. 1984. A unifying quantitative analysis of soil texture. *Soil Science Society of American Journal*, 48(1): 142–147.
- Solomon K. 1979. Variability of sprinkler coefficient of uniformity test results. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 22(5):1078–1086.
- Trevisani S, Cavalli M. 2016. Topography-based flow-directional roughness: potential and challenges. *Earth Surface Dynamics*, 4(2): 343–358.
- Van Bavel CHM. 1949. Mean weight diameter of soil aggregates as a statistical index of aggregation. *Soil Science Society of America, Proceedings*, 14(C): 23–20.
- Waal BW, Rowntree KM. 2015. Assessing sediment connectivity at the hillslope, channel and catchment scale. Department of Geography. Rhodes University, 141 p.
- Wang YC, Lia CC. 2018. Evaluating the erosion process from a single-stripe laser-scanned topography: a laboratory case study. *Water*, 10(7): 956.
- Williams CJ, Pierson FB, Robichaud PR, Al-Hamdan OZ, Boll J, Strand EK. 2016. Structural and functional connectivity as a driver of hillslope erosion following disturbance. *International Journal of Wildland Fire*, 25(3): 306–321.
- Wu X, Meng Z, Dang X, Wang J. 2021. Effects of rock fragments on the water infiltration and hydraulic conductivity in the soils of the desert steppes of Inner Mongolia, China. *Soil & Water Research*, 16(3): 151–163.
- Zanandrea F, Michel GP, Kobiyama M, Cardozo GL. 2019. Evaluation of different DTMs in sediment connectivity determination in the Mascarada River Watershed, southern Brazil. *Geomorphology*, 332(1): 80–87.
- Zanandrea F, Michel GP, Kobiyama M, Censi G. 2021. Spatial-temporal assessment of water and sediment connectivity through a modified connectivity index in a subtropical mountainous catchment. *Catena*, 204: 1–12.
- Zheng ZC, He, SQ and Wu FQ. 2012. Relationship between soil surface roughness and hydraulic roughness coefficient on sloping farmland. *Water Science and Engineering*, 5(2): 191–201.



An Appropriate Weighting Factor for Calculating Sediment Connectivity Index in Bare Tilled Soils

Zahra Gerami

Ph.D. Candidate in Soil Resource Management, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

Mahmood Arabkhedri

(Correspond Author)*Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Tehran, Iran

Ahmad Karimi

Assistant Professor, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

Hossein Asadi

Associate Professor, Department of soil Engineering and Science, Terhan University, Karaj, Iran

Corresponding Author's Email: arabkhedri@scwmri.ac.ir

Received: 14 January 2022 Accepted: 19 March 2022

Abstract

The weighting factor of the sediment connectivity index (IC) is a challenging component of this index and must be properly explicated for different situations. The aim of this study is to develop a proper weighting factor for calculating IC based on experiments on three tilled soils from dry-farming fields in Kouheen, Sararud, and Gachsaran regions under a 111 mm/h rainfall simulation using a 5.8 m² laboratory flume with a slope of 12%. For each soil sample, two rain events (R1 and R2) were simulated with an interval of 4 hours, and the soil losses were measured. In addition, a digital elevation model with a pixel size of 2 mm was prepared by accurate photography after each rain followed by calculating the IC based on roughness coefficient (RI) as the weighting factor. Measured soil losses of two rainfalls were 4796 and 3909 g for Gachsaran soil, 3465 and 2464 g for Kouheen soil, and 2679 and 2105 g for Sararud soil, respectively. The result shows that with increasing IC based-RI, soil loss was decreased which indicates the inadequacy of RI alone as a weighting factor. To develop a new weighting factor, several physical and chemical characteristics of soils were used in combination with RI. A comparison of the results showed that the IC based on a weighting factor obtained from the combination of mean weighted aggregate diameter, penetration resistance, and RI, has the highest coefficient of correlation with soil losses (0.92, $P < 0.01$). Examination of the new IC maps showed that the IC in R2 increased compared to R1. It is recommended to study the possibility of using the developed weighting factor in calculating the IC of hillslopes after tillage in determining critical points in the hillslope.

Keywords: laboratory flume, mean weight diameter, penetration resistance, roughness coefficient, soil loss