

ارزیابی تغییرات رخساره‌های فرسایش شیاری در سطح دامنه با استفاده از تصاویر صحرایی

محمد احمدی* - استادیار ژئومورفولوژی مرکز تحقیقات، آموزش کشاورزی و منابع طبیعی کرمانشاه
مسئوب حشمتی - دانشیار مرکز تحقیقات، آموزش کشاورزی و منابع طبیعی کرمانشاه

پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۳/۰۴ تأیید نهایی: ۱۴۰۱/۰۹/۰۲

چکیده

بررسی و اندازه‌گیری مقدار فرسایش شیاری در سطح زمین یکی از کارهای حساس و زمان‌بر در مدیریت فرسایش می‌باشد. دامنه فرسایشی در زیرحوضه سیب‌خور در جنوب غرب شهر کرمانشاه، با جهت شرقی و مقدار متوسط شیب طولی ۲۲ درصد، برای مطالعه انتخاب شد. هدف از این کار اندازه‌گیری فرسایش و حجم شیارها با استفاده از تحلیل تصویر بود. تصویرهای فول‌فریم با دوربین کانن مارک III از ۱۲ رویداد فرسایشی تهیه شدند. عکس‌ها در چهار ایستگاه در گام‌های ده متری تهیه و بزرگ‌نمایی و تست مقیاس از طریق نرم‌افزار ImageJ انجام شد. اندازه‌گیری پهنا و عمق شیارها با کولیس روی زمین و روی تصویر با کمک نرم‌افزار انجام شد. در این پژوهش، روشی نو برای محاسبه عمق فرسایش معرفی شد. علاوه بر داده‌های دو بعدی، از سایه دیواره شیارها برای اندازه‌گیری عمق فرسایش بهره گرفته شد. با اندازه‌گیری مستقیم روی خاک و غیرمستقیم در نرم‌افزار ابعاد شیارها محاسبه شد، داده‌های بدست آمده تحلیل آماری شدند. با کمک وزن مخصوص ظاهری خاک، حجم خاک به وزن بر حسب کیلوگرم تبدیل شد. نتایج نشان داد خطای بین مقدار مستقیم و غیرمستقیم ابعاد شیارها در محدوده ۵ درصد می‌باشد. داده‌های حاصل از تصویرهای فرسایشی نشان می‌دهد، که این روش در تعیین مورفومتری دقت خوبی دارد، و محدودیت‌های اندازه‌گیری مستقیم فرسایش شیاری نه تنها برطرف؛ بلکه با دقت و سرعت ابعاد شیارها اندازه‌گیری می‌شوند، و مبنایی برای محاسبه تلفات خاک در سطح پلات‌های تصویری می‌گردند. میانگین و میانه داده‌های تلفات خاک در سطح پلات‌های تصویری به ترتیب $2/3$ و $1/8 \text{ kg/m}^2$ برای دوازده رویداد فرسایشی بدست آمد.

واژگان کلیدی: فرسایش خاک، تحلیل تصویر، حجم شیار، حوضه سیب‌خور، کرمانشاه.

مقدمه

فرسایش شیاری در حدود ۵۰ تا ۷۰ درصد کل فرسایش خاک را در بر می‌گیرد (Morgan, ۲۰۰۵; Zheng و همکاران، ۱۹۹۷). در طول پنجاه سال گذشته تحقیقات فراوانی روی فرسایش شیاری و بین شیاری انجام شده است (Zhu و همکاران، ۲۰۱۱). هدر رفت خاک از دیواره‌های جانبی شیارها عمل مهمی در عریض شدن مقطع شیاری می‌باشد. عرض و عمق شیاری، تابعی از حجم و سرعت رواناب در شیاری بوده و بسیار کم مورد توجه قرار گرفته است (Li و همکاران ۲۰۰۳). بیان کردند که اندازه‌گیری مستقیم مشخصه‌های شیاری از جمله سطح مقطع و حجم شیاری شناخت بهتری از فرسایش شیاری در حوزه آبخیز فراهم می‌آورد (Casali و همکاران ۲۰۰۶).

فرسایش شیاری فرآیندی است که در آن ذرات خاک توسط جریان متمرکز آب کنده و جابجا می‌شوند (Bennett, ۱۹۳۹; Luo و همکاران، ۲۰۱۸). فرسایش بین شیاری، در فاصله بین شیارها اتفاق می‌افتد (Meyer و همکاران، ۱۹۷۵)، شامل فرسایش قطره بارانی و ذرات خاک جدا شده توسط باران است. فرسایش شیاری و بین شیاری مرحله اولیه فرآیند فرسایش است که می‌تواند منبع اولیه تلفات خاک بشمار آید (Cerdan و همکاران، ۲۰۰۲; Hansel و همکاران، ۲۰۱۶). در مراحل اولیه بارندگی، نرخ نفوذ بیشتر است و نرخ جریان سطحی کوچکتر است. بهرحال، با افزایش بارندگی وقتی خاک به مرحله اشباع می‌رسد درجه حساسیت و فرسایش افزایش می‌یابد (Wirtz و همکاران، ۲۰۱۲). اثرات افزایش شدت بارندگی در فرسایش شیاری بزرگ تر از افزایش درجه شیب دارند. چگالی شیارها و مصرف انرژی با گذشت زمان کاهش می‌یابد، که نشان می‌دهد مصرف انرژی یک پارامتر مفید برای توصیف ظهور شبکه شیاری در مقیاس آزمایشگاهی است (Berger و همکاران، ۲۰۱۰). روش جدیدی برای تجزیه و تحلیل داده‌های ریز ریلی ارائه شده است که توصیف سطح خاک را بهبود می‌بخشد و باید به اطلاعات بهتری در مورد فرآیندهای فیزیکی تحت تأثیر خاک‌ورزی منجر شود (Doren و همکاران، ۱۹۹۶). Poesen. در سال ۲۰۰۳، بررسی فرسایش آبی در نواحی مختلف دنیا انجام داده بود نتیجه گرفت که ممکن است سهم فرسایش شیاری و بین شیاری با هم تا ۹۰ درصد کل تلفات خاک باشد. بنابراین بسیار مهم است که به صورت جامع و فراگیر اصول فرسایش شیاری و بین شیاری درک شود تا به مدلی دقیق با اندازه‌گیری قابل تکرار منجر شود (Di Stefano و همکاران، ۲۰۱۷; Renard و همکاران، ۱۹۹۷). پلات رواناب و میخ‌های فرسایشی دو روش کلاسیک برای ارزیابی فرسایش شیاری و بین شیاری هستند (Hudson, ۱۹۹۵).

پلات‌های رواناب در ابتدا توسط اوالد والنی در دهه ۱۸۸۰ به عنوان ابزاری دقیق برای اندازه‌گیری فرسایش خاک معرفی شدند (Baver, ۱۹۳۸). معادله جهانی فرسایش خاک در قرن بیستم، بر اساس تعداد زیادی از این پلات‌ها در سراسر ایالات متحده بنیاد نهاده شد (Smith و Wischmeie, ۱۹۷۸). با این وجود، روش پلات رواناب نوعا رواناب و رسوب را جمع‌آوری می‌کند. در خروجی پلات تنها داده‌های خاک از دست رفته را به دست می‌دهد، که هیچ نشانی از توزیع فضایی جویبارها و فرسایش بین شیاری وجود ندارد. در مقابل، میخ‌های فرسایشی نرخ فرسایش را بر اساس تغییر ارتفاع سطح خاک قبل و بعد از یک رویداد یا رویداد فرسایش برآورد می‌کند. علیرغم موارد استفاده از این اینها، این روش‌ها، فرآیند فرسایش خاک را بیان نمی‌کنند (Casali و همکاران، ۲۰۰۶). برای اندازه‌گیری شیاری روش‌های سنتی دیگر مانند خط‌کش، زنجیر، پرکردن دقیق شیاری با خاک و مواد مصنوعی مانند ماسه و گچ نام برد (Di Stefano و همکاران، ۲۰۱۷). ارزیابی فرسایش شیاری نه تنها برای تخمین میزان آسیب مکانی فرسایش خاک استفاده می‌شود، بلکه به عنوان یک ابزار ارزیابی مقرون به صرفه و ساده برای برنامه‌ریزی و ارزیابی طرح و طراحی حفاظت آب و خاک استفاده می‌شود (Gizaw, ۲۰۱۰). در تلاشی برای یافتن عوامل مؤثر بر گسترش فرسایش شیاری در دامنه‌های مرتعی داشته‌اند، ده دامنه با شیب متفاوت و تحت فرسایش شیاری و فاقد پوشش گیاهی در حوزه آبخیز "تهم چای" در شمال غربی زنجان انتخاب نمودند و تمام مشخصات شیاری همراه با برخی ویژگی‌های خاک در آن‌ها را اندازه‌گیری نمودند. تفاوت مشخصه‌های شیاری، درجه شیب و ویژگی‌های خاک بین دامنه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. بجز طول شیاری،

سایر ویژگی‌های شیار تفاوت معنی‌دار بین دامنه‌ها نشان دادند. همچنین تفاوتی معنی‌دار بین خاک شیارها از نظر شن، سیلت، رس، هدایت الکتریکی اشباع و درصد سدیم تبادلی وجود داشت (واعظی و همکاران، ۱۳۹۴).

در چند دهه اخیر، پیش‌گرهای لیزری و فتوگرامتری کاربرد وسیعی در ارزیابی فرسایش خاک داشته‌اند (Heng و همکاران، ۲۰۱۰؛ Esposito و همکاران، ۲۰۱۸؛ Deng و همکاران، ۲۰۱۸؛ Vinci و همکاران، ۲۰۱۵). سیستم‌های لیزری بر اساس شیوه جمع‌آوری داده‌ها و با مثلث‌یابی، سطح زمین بازسازی می‌شود. بر اساس زمان رفت و برگشت لیزر و زاویه بازتابی ذرات خاک سطح زمین اندازه‌گیری می‌شود. ابر نقاط سطح زمین با دقت و وضوح مکانی زیاد فراهم می‌شود (Jester و Klik، ۲۰۰۵). پیش‌گر لیزری به علت هزینه بالا و محدودیت ابزاری هنوز به صورت نقطه به نقطه استفاده می‌شود. فتوگرامتری سنتی ارزان‌تر است، اما استفاده از این تکنیک به سبب محدودیت و ملزومات سخت‌افزاری آن، هزینه تهیه و پردازش تصاویر، با اقبال همراه نبوده است (James و Robson، ۲۰۱۲). توسعه سامانه کامپیوتری و پردازش تصویر فتوگرامتری با ساختار متحرک در اواخر دهه ۱۹۹۰ ابداع شد (Westoby و همکاران، ۲۰۱۲). در مقابل فتوگرامتری سنتی، این روش جدید با هم‌پوشانی تصاویر زیاد ابر نقاط متراکم ایجاد می‌کند از این طریق نقاط سه بعدی از سطح عارضه حاصل می‌شود (Carrivick، ۲۰۱۶). اگرچه روش sfm^1 در دقت همپای فتوگرامتری نیست (James و Robson، ۲۰۱۲)، اما توانایی قابل توجهی در پردازش تصاویرهای جمع‌آوری شده از دوربین‌های معمولی را دارد، به همین سبب مورد توجه کارشناسان و سایر افراد واقع شده است (Eltner و همکاران، ۲۰۱۶). از زمانی که Niethammer و همکاران در سال ۲۰۱۰ برای اولین بار این تکنیک در فرسایش خاک بکار گرفت تا اکنون استفاده از این روش در فرسایش خاک رو به افزایش بوده است (Castillo و همکاران، ۲۰۱۲؛ Kaiser و همکاران، ۲۰۱۴؛ Li و همکاران، ۲۰۱۵؛ Gudino و همکاران، ۲۰۱۸). از زمان ظهور فتوگرامتری دیجیتال هوایی و دیجیتالی از فاصله نزدیک، این تکنیک قدرتمند به طور گسترده در به دست آوردن مدل‌های سطح خاک سه‌بعدی استفاده شده است (Nouwakpo، ۲۰۱۲؛ Goetz و همکاران، ۲۰۱۸). به این ترتیب، برای ارائه داده‌های قابل اعتماد در مورد تلفات خاک، چندین تکنیک برای پایش و کمی‌سازی فرسایش در حال حاضر در دسترس است، مانند بین‌های فرسایش، لیزرهای نوری، لیزر سیار و قابل حمل و تکنیک ابر نقاط متراکم (James و همکاران، ۲۰۱۴).

اندازه‌گیری مستقیم مشخصه‌های شیار از جمله سطح مقطع و حجم شیار شناخت بهتری از فرسایش شیاری در حوزه آبخیز فراهم می‌آورد. با این وجود این کار بسیار دشوار، زمان‌بر و پرهزینه است (Casali و همکاران، ۲۰۰۶). عرض و عمق شیار، تابعی از حجم و سرعت رواناب در شیار بوده و بسیار کم مورد توجه قرار گرفته است (Li و همکاران، ۲۰۰۳؛ Sofia و همکاران، ۲۰۱۷).

برای بررسی فرسایش خاک با استفاده از تصاویر فاصله نزدیک به روش فتوگرامتری مدل رقومی ارتفاعی تولید شده است (Guo و همکاران، ۲۰۱۶). بنابراین، با مدل رقومی ارتفاعی ساخته شده از این نوع تصاویر، امکان محاسبه حجم فرسایش و تغییرات میکروتوپوگرافی خاک در طول زمان فراهم می‌شود (Eltner و همکاران، ۲۰۱۸). تصاویری فرسایش خاک که از موقعیت‌های مختلف تهیه شده است و ارتفاع نسبتاً کم از سطح زمین برای فتوگرامتری بکار گرفته شد. وجود پوشش گیاهی سبز و ساقه‌های خشک گیاهی یکی از موانع کار با تصاویر از فاصله نزدیک است. دسته بندی مورفولوژی شیارها با کمک مدل رقومی ارتفاعی امکان‌پذیر است (Shen و همکاران، ۲۰۱۵).

در این مقاله، پردازش تصویر عکس‌های میدانی برای پوشش این کمبود پیشنهاد شده است. پردازش رقومی روی تصویر به دهه هشتاد میلادی بر می‌گردد. اولین عملیات کشف لبه‌ها تصویر در سال ۱۹۸۱ انجام گردید (Marr و Hildreth، ۱۹۸۰). از آن زمان استخراج عوارض خطی از تصویر بحث و چالش بیشتر نظام‌های علمی از جمله در

¹ Structure from Motion

تحقیقات پزشکی بوده است (Kapil, ۲۰۰۶). تقطیع تصویر یکی از کارهای اساسی و مشکل در پردازش تصویر است، که در آن تصویر به نواحی و یا اشیاء معنادار تقسیم می‌شوند (MissHetal, ۲۰۱۳). روش اُتسو. یک نوع آستانه‌گذاری کلی است که در آن مقدار مقیاس خاکستری تصویر اهمیت زیادی دارد. استفاده از این روش به دلیل سادگی و موثر بودن، هنوز ادامه دارد. بکارگیری روش اُتسو نتایج رضایت بخشی ببار آورده است (Liu, ۱۹۹۱).

روی تصاویر رقومی نحوه شکل‌گیری و انتشار درز و شکاف‌ها بررسی شده است (Shrive و Wang, ۱۹۹۵). ولی مطالعات اندکی در باره کاربرد رویکردهای پردازش و آنالیز تصویر در شناسایی و پهنه‌بندی عوارض خطی ژئومورفولوژی انجام گرفته است (Filin و Baruch, ۲۰۱۱). تصویرهای هوایی تهیه شده از سطح زمین لغزش با وضوح مکانی ۳۰ متر و ۱۰ متر به منظور بررسی الگوی مکانی شکاف‌ها و بافت تصویر سطح آن آنالیز شده است، و وقوع شکاف‌های سطحی در بدنه زمین لغزشی مشاهده گردیده است (Neithammer و همکاران، ۲۰۱۱)؛ نسبت به هم و از زمینه تصویر به اندازه کافی متمایز هستند، روش بر اساس تقطیع لبه انجام می‌گردد. در برخی مکان‌ها، فرآیندها باهم همپوشانی دارند و باعث ایجاد الگوهای ساختاری مخلوط می‌شوند مانند الگو شکاف‌های شعاعی که در نتیجه برش جانبی، تغییر شکل داده‌های توپوگرافی مورد نیاز در علوم زمین در گستره‌های چند کیلومتری طولی و تنش محلی همگرا حاصل می‌شوند (Stumpf و همکاران، ۲۰۱۱؛ Moser و همکاران، ۲۰۰۷). در حال حاضر داده‌های Lidar که با اسکنرهای لیزری تهیه می‌شوند، و همچنین داده‌های راداری جایگزین روش سنتی عکسبرداری هوایی شده‌اند. با این وجود، رهیافت استفاده از دوربین در بردارنده مزایای زیادی نسبت به لیزر است. غیر محتمل است که اسکنرها روی اشیاء پروازی کوچک نصب شوند در حالی که دوربین‌ها به آسانی روی کایت نصب می‌گردند (Smith, ۲۰۰۹).

اخیراً، رویکرد بازسازی شکل سه بعدی بر پایه عنصر گرادیان مورفولوژیکی و تجزیه موجک پیشنهاد شده است (Mahmood و همکاران، ۲۰۱۰). برآورد عمق، پارامتری مهم برای بینایی ربات‌ها بشمار می‌آید، مدل‌سازی سه‌بعدی صحنه، حرکت و غیره با استفاده از یک دوربین یا چند دوربین انجام می‌شود. در تکنیک فوکوس یافتن عمق هر نقطه از پدیده تا لنز دوربین است (Malik و همکاران، ۲۰۱۱). استفاده از دوربین رقومی با وضوح زیاد برای جمع‌آوری اطلاعات توده‌های سنگی (رخساره‌ها و در داخل تونل‌ها) به منظور بررسی درز و شکاف، جهت یافتگی شکاف‌ها، شیب و امتداد لایه بررسی شده است (Gaich, ۲۰۰۶).

تفکیک (تقطیع) بافت تصویر، بافت عارضه فرسایشی و نويز در جای که شیار و شکاف‌های زیاد مشاهده شود، عملیات کشف و استخراج پیکسل‌ها را تسهیل می‌کند. میکروتوپوگرافی حاصل از فرسایش سطحی و شیارها با سایه‌های کشیده یا کوتاه به راحتی توسط تفسیر انسانی تفکیک می‌شوند چون تعداد عنصر انتخابی در برگیرنده هر شکل زیاد هستند. درک انسانی قادر به تفکیک آنها است (Otsu, ۱۹۷۹).

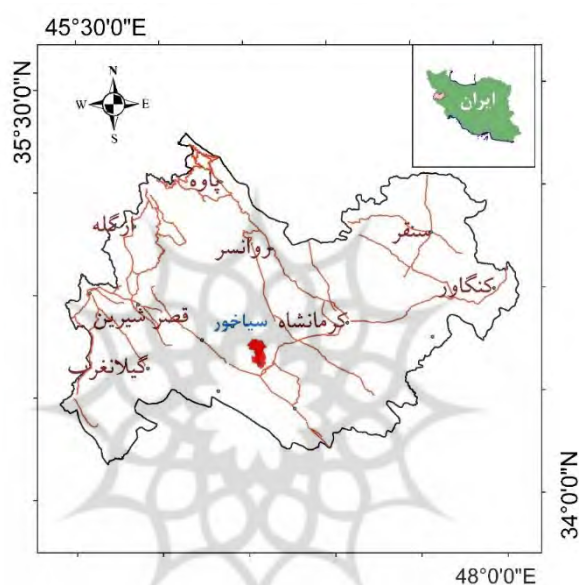
روش کلاسیک برای اندازه‌گیری دقیق ارتفاع اجسام عمودی، فتوگرامتری استریویی بوده است. با این حال، تحت شرایطی با تک عکس برای شناسایی و اندازه‌گیری ارتفاع اشیاء از سایه آن‌ها بهره گرفته می‌شود. برای تصویرهای که از دامنه‌های شیب دار و با جهات جغرافیایی مختلف تهیه می‌شوند می‌توان از جداول آلمانک استفاده کرد. اما برای منطقه با توجه به تغییرات آزیموت و ارتفاع خورشید و ثابت بودن آزیموت دامنه، شیب طولی و عرضی دامنه، سایه تیرک یک متری استخراجی از جداول استاندارد، لازم است اصلاح شود. برای دستیابی به حداکثر دقت، بر اساس معادلات مربوطه اقدام به اصلاح طول سایه گردید (Duncan و همکاران، ۱۹۷۹).

بطور خلاصه در این تحقیق سعی شده است با دوربین کانن مارک III تصاویر فرسایش شیاری ثبت شوند. ابعاد شیارها و حجم آنها که در تحقیقات پیشین به عنوان یک مشخصه مهم در برآورد فرسایش خاک مطرح شده بودند؛ در زمان کوتاه و با هزینه ناچیز اندازه‌گیری شوند. امتیاز این رویکرد ترکیبی، استفاده از دوربین، تصویر، نرم افزار برای پردازش داده‌ها است.

روش تحقیق

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در یک دامنه فرسایشی در حوضه سیاخور (سیه‌خور) در جنوب غرب شهر کرمانشاه واقع شده است (شکل ۱). مساحت دامنه حدود ۱۷۶ متر مربع می‌باشد. موقعیت جغرافیایی آن $30^{\circ} 46'$ طولی شرقی و $34^{\circ} 08'$ عرض شمالی است. در زون زمین شناسی زاگرس چین خورده واقع شده، غالباً از سازند کشکان و تله زنگ تشکیل یافته است. جهت شیب غالب دامنه مطالعاتی تقریباً شرق و متمایل به جنوب شرقی است. میانگین شیب طولی و بزرگترین شیب آن به ترتیب حدود ۲۲ و ۶۲ درصد است.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در غرب ایران و جنوب غرب شهر کرمانشاه

مواد و روشها

اساس این پژوهش بر مبنای تهیه تصویر از سطح خاک است. این تصویرها از فاصله بسیار نزدیک تهیه می‌گردند. پس از آن که موقعیت دامنه فرسایشی مشخص شد، در چندین نوبت اقدام به ثبت اطلاعات تصویری فرسایش شیاری گردید. برای ثبت اطلاعات دوربین، تاریخ و زمان در لحظه تصویربرداری در فرمت Raw ذخیره شدند. برای انجام این کار از یک دوربین کانون مارک III فول فریم استفاده شد. وسایل جانبی شامل لنز ماکرو ۱۰۰، لنز ۱۲۵ تمام اتوماتیک، سه پایه دوربین، شیب سنچ دیجیتال، کولیس و موقعیت یاب تک فرانسن ساوث^۱ بوده است.

^۱- GPS- South 750



شکل ۲: تصویر بالا سمت چپ، اندازه‌گیری مستقیم پهنا و عمق شیار؛ تصویر بالا سمت راست مقیاس گذاری و اندازه‌گیری روی تصویر شامل پهنای شیارها، طول سایه دیواره؛ تصویر پایین پردازش تصویر در نرم‌افزار ImageJ

برای تصویربرداری از رخسارهای فرسایش در ۱۲ نوبت اقدام به عکس‌برداری گردید. قبل از شروع فصل بارندگی تصویربرداری انجام شد. بعد از هر بارندگی موثر (بدون در نظر گرفتن برف) تصویرها تهیه شد. برای ثبت و نگهداری ویژگی لحظه عکس برداری از تصویری با فرمت غیره فشرده (Raw) استفاده شد. این فرمت توانایی ذخیره اطلاعات دوربین، لنز، روزنه دید، فاصله کانونی و ... تاریخ و زمان لحظه ای تصویربرداری دارد. تحلیل نرم‌افزاری و محاسبات هندسی روی تصویر به فرآیند درست مقیاس‌گذاری یعنی اندازه پدیده روی زمین به واحد متریک و اندازه همان پدیده روی تصویر بر حسب پیکسل برای نرم افزار نیاز دارد، این فرآیند در نرم‌افزار ImageJ انجام شد. اندازه پیکسل زمینی یک پدیده در رابطه با فاصله پدیده تا لنز دوربین، فاصله کانونی دوربین و اندازه پیکسل سنسور دوربین است. هر چه فاصله دوربین تا پدیده کوتاه‌تر باشد تعداد پیکسل‌های که آن پدیده را نمایش می‌دهند بیشتر خواهند شد. این رابطه به قرار زیر است:

$$\text{pixelsize}_{\text{terrain}} = \frac{\text{distance}}{f} * \text{pixelsize}_{\text{sensor}} \quad \text{رابطه (۱)}$$

اندازه حسگر دوربین مورد استفاده ۶/۲۵ میکرون یا ۰/۰۰۶۲۵ میلی‌متر است. با چنین حسگری امکان ثبت ابعاد شیارها در فاصله ۵۰ سانتیمتری و بیشتر فراهم می‌شود. در طرف راست معادله اندازه پیکسل زمینی معادل نسبت فاصله به فاصله کانونی ضربدر اندازه پیکسل حسگر دوربین تعریف شده است. اندازه حسگر دوربین خیلی اهمیت دارد. یک دوربین کامپکت و DSLR که هر دو میزان دقت (مگا پیکسل‌های) برابری دارند ولی سنسور یکی از آن‌ها از دیگری بزرگ‌تر است. مطمئناً عکس‌های دوربینی که سنسوری با ابعاد بزرگ‌تری دارد، از کیفیت بالاتری برخوردار است.

برای ارزیابی تاثیر تغییر گرادیان شیب و حجم رواناب در فرآیند فرسایش شیاری، استفاده از تصویربرداری از فاصله نزدیک بررسی شد. بعلاوه برای درک بهتر رفتار فرسایش شیاری پارامترهای مورفولوژی شیارها برآورد شد. آنچه که در بررسی تصاویر صحرائی تولید با دوربین حاصل شد؛ نشان می‌دهد که نه تنها شکل و الگو، بلکه ابعاد شیارها تغییرات اساسی با عکس‌های قبل و بعد دارند. برای درک این که اندازه هندسی شیارها بعد از هر بارندگی در شیارها توسعه یافته و شیارهای اولیه چگونه تغییر می‌یابد، علاوه بر اندازه‌گیری روی تصویر، بطور مستقیم نیز انجام گردید پهنا، عمق شیارها با استفاده از کولیس و خط کش اندازه‌گیری شدند (شکل ۲).

تعیین ارتفاع یک شی عمودی با اندازه‌گیری طول سایه آن، و ضربش در یک مقدار ثابت به‌دست‌آمده از ارتفاع زاویه‌ای خورشید در بالای افق انجام می‌شود. اما اینجا برای اندازه‌گیری سایه تشکیل شده روی تصویر بایستی تصویر به درستی از اثرات توپوگرافیک دامنه رهایی یابد، این کار با کمک معادلات معرفی شده از سوی دانکن (۱۹۷۹) برای دستیابی به ارتفاع دیواره شیارها انجام شد:

$$SP = \frac{H}{\tan(A) + [S \cdot \cos(Az - W)]} \quad \text{معادله (۲)}$$

که در آن:

SP: سایه بروجکت شده، H: ارتفاع تیرک به متر، S: طول سایه تیرک، A: ارتفاع خورشید در لحظه تصویربرداری، Az: آزیموت خورشید در لحظه تصویربرداری، W: آزیموت دامنه مورد تصویربرداری
مهمترین چالش این پژوهش، اندازه‌گیری عمق شیارهای است، که در اینجا از داده‌های سایه دیواره شیارهای ثبت شده روی تصاویر میدانی برای اندازه‌گیری ارتفاع دیواره یا عمق متوسط شیارها استفاده شد.

نتایج و بحث

پس از اطمینان از صحت مقیاس‌گذاری تصاویر، پهنا و طول شیارهای فرسایشی در ۱۲ رویداد بارندگی اندازه‌گیری شد. بیش از ۲۴۵۰ ترانسکت در عرض و طول شیارها به منظور محاسبه پهنا، طول سایه دیواره و طول شیارها رسم شد (شکل ۲)، داده‌های اولیه این ترانسکتها در نرم‌افزار پردازش تصویر^۱ محاسبه شد. پارامترهای آماری داده‌های پهنای شیارها به همراه طول شیارها در نرم‌افزار مینی‌تب محاسبه شد (جداول ۱ تا ۳). بیش از ۱۲۰۰ قطعه تصویر تهیه گردید. در فرآیند بررسی، اندازه‌گیری‌های مستقیم و غیرمستقیم انجام شد (شکل ۳).



شکل ۳. نمونه از تحلیل‌های تصویری و استخراج اطلاعات از تصاویر میدانی: مقیاس گذاری، استخراج ویژگی‌های پهنا و طول سایه فرسایش شیاری؛ تصویر A رسم ترانسکت در عرض شیاریها، تصویر B مقاطع عرضی شیاریها به همراه اطلاعات خروجی؛ تصویر C اندازه‌گیری سایه و ارتفاع دیواره در صحرا با کولیس و مقایسه آن با ارتفاع دیواره شیاریها؛ تصویر D محاسبه سایه روی تصویر

همزمان با تصویربرداری از رویدادهای فرسایش شیاری، ابعاد شیاریها بطور مستقیم با کولیس و متر اندازه‌گیری شدند. (شکل ۲، قسمت C). روی همان تصاویر با کمک نرم‌افزار اندازه‌گیری غیرمستقیم انجام شد (شکل ۲ تصویر A, B, C, D). از اندازه‌گیری مستقیم روی زمین داده اول حاصل شد (جدول ۱ تا ۳). از اندازه‌گیری غیرمستقیم روی تصویر داده نوع دوم بدست آمد. داده نوع اول به عنوان داده کنترلی و واقعی فرض شد؛ که به کمک آن میزان دقت و صحت اندازه‌گیری روی تصویر سنجیده شد. با مقایسه داده‌های اندازه‌گیری مستقیم و داده‌های سنجش از دور (تحلیل تصویر) از سه رویداد بدست آمده بودند خطای اندازه‌گیری‌ها محاسبه شد.

جدول ۱: اندازه‌گیری مستقیم و غیرمستقیم ابعاد شیاریها مورخه ۱۵ بهمن ۱۳۹۸

اندازه-mm	تعداد	متوسط	خطای استاندارد	انحراف معیار	کمینه	چارک اول	میانه	چارک سوم	بیشینه
پهنای واقعی	۵۹	۸۹/۸	۷/۸۷	۶۰/۴۸	۵۹	۷۳	۸۵	۹۰	۱۲۰
عمق واقعی	۵۹	۲۸/۷۶	۴/۵۳	۳۴/۸	۲۰	۴۵	۳۶/۳	۶۳/۵	۸۲
پهنای برآوردی	۵۹	۸۵/۵	۶/۹۹	۵۳/۶۷	۷۵/۲	۷۸/۳	۸۰/۲	۱۰۵	۱۳۰/۱
عمق برآوردی	۳۶	۲۶/۴	۷/۶۵	۴۵/۹	۲۰/۹	۳۰/۲	۳۹/۵	۶۸/۷	۸۰/۸

جدول ۲: اندازه‌گیری مستقیم و غیرمستقیم ابعاد شیاریها تصویر ۱۱ اسفند ۱۳۹۸

بیشینه	چارک سوم	میانه	چارک اول	کمینه	انحراف معیار	خطای استاندارد	متوسط	تعداد	اندازه-mm
۲۷۰	۲۲۷/۵	۱۵۰	۳۹/۵	۱۹	۸۶/۳	۱۶/۳	۱۴۳/۴	۲۸	پهنای واقعی
۱۱۰	۳۷/۲۵	۲۹	۱۸/۲۵	۱۰	۲۰/۳	۳/۸	۲۳/۴	۲۸	عمق واقعی
۱۷۳	۱۴۹/۷	۱۴۱/۸	۱۳۰/۷	۱۲۱/۹۶	۱۲/۸	۲/۵۶	۱۴۱/۲۶	۲۵	پهنای برآوردی
۲۹/۵	۲۹/۴	۱۸/۱۴	۷/۷۸	۷/۳۹	۸/۳۳	۲/۰۶	۲۲/۰۶	۲۸	عمق برآوردی

جدول ۳: اندازه گیری مستقیم و غیر مستقیم ابعاد شیارها تصویر ۰۲ اردیبهشت ۱۳۹۹

بیشینه	چارک سوم	میانه	چارک اول	کمینه	انحراف معیار	خطای استاندارد	متوسط	تعداد	اندازه-mm
۱۱۶/۰۳	۹۰/۲	۷۵/۷	۶۰/۱	۵۳/۶۷	۱۸/۵۳	۵/۳۵	۸۵/۴۷	۹۱	پهنای واقعی
۵۳/۸۵	۴۶/۱۵	۳۷/۶۲	۳۱/۷	۲۷/۹۳	۱۴/۹۴	۴/۳۱	۲۲/۱۸	۹۱	عمق واقعی
۱۵۲/۶۳	۱۰۷/۲	۹۱/۱۶	۷۴/۲۸	۵۸/۶۴	۲۲/۳۵	۳/۱۳	۷۹/۵۱	۵۱	پهنای برآوردی
۳۷/۹	۲۴/۳	۱۸/۵	۱۵/۲	۱۰/۵	۷/۰۶	۰/۹۸	۲۰/۷۴	۵۱	عمق برآوردی

مقدار خطا

دقت اندازه‌گیری روی تصویر از روی میزان نزدیکی داده‌های اندازه‌گیری شده تصویر، به داده‌های روی زمین که با برچسب واقعی و برآوردی در جداول ۱ تا ۳ درج شدند؛ سنجیده می‌شود. صحت داده‌ها از نزدیکی داده‌های استخراج شده از تصویر فرسایش شیاری به یک مقدار واقعی داده‌های سنجیده شدند. مقدار خطا فاصله بین مقدار اندازه‌گیری شده با مقدار واقعی است؛ که در اینجا بسیار رضایت‌بخش است (جدول ۴).

$$Relative Error = \left| \frac{\text{مقدار واقعی} - \text{مقدار اندازه‌گیری شده}}{\text{مقدار واقعی}} \right|$$

جدول ۴: مقدار خطای اندازه‌گیری واقعی و اندازه‌گیری روی تصویر

تاریخ تصویر	خطای نسبی	متغیر
۱۵ بهمن ۱۳۹۸	۰/۰۵۲	عمق
۱۵ بهمن ۱۳۹۸	۰/۰۴۷	پهنا
۱۱ اسفند ۱۳۹۸	۰/۰۸۲	عمق
۱۱ اسفند ۱۳۹۸	۰/۰۱۴	پهنا
۰۲ اردیبهشت ۱۳۹۹	۰/۰۶۹	عمق
۰۲ اردیبهشت ۱۳۹۹	۰/۰۹۳	پهنا

با توجه به تفاوت کم بین داده‌های واقعی و اندازه‌گیری شده و محاسباتی در تصاویر سه گانه بهمن و اسفند ۱۳۹۸ و اردیبهشت ۱۳۹۹ خطای اندازه‌گیری نشان داد که نتایج استخراجی از تصاویر دوربین کانن مارک III در تحلیل فرسایش شیاری در این پژوهش قابل اعتماد است. بر این اساس، داده‌های سایر تصاویر وقایع فرسایشی با استناد به مقدار

کم خطای اندازه‌گیری بین مقادیر داده واقعی و داده اندازه‌گیری شده، بررسی گردیدند. فرآیند استخراج داده‌های پهنای شیپرها و عمق محاسبه شده ادامه داده شد.

اندازه‌گیری غیرمستقیم

پس از اطمینان از صحت و دقت اندازه‌گیری ویژگی‌های استخراجی فرسایش شیپری در سه مقطع زمانی، مشخصات فرسایشی سایر وقایع استخراج و محاسبه شد. ویژگی‌های پهنای طول و سایه دیواره شیپرها اندازه‌گیری شدند. پس از اصلاح و پروجکت سایه دیواره‌ها، طول واقعی سایه‌ها اصلاح شدند، و عمق شیپرها از این طریق محاسبه شدند (جدول ۵).

جدول ۵: خلاصه آماری اندازه‌گیری غیرمستقیم ابعاد هندسی رخساره فرسایش شیپری - میلی‌متر

تاریخ تصویر	میانگین پهنای شیپرها به میلی‌متر	میانگین عمق شیپرها به میلی‌متر	مجموع طول شیپرها به میلی‌متر	حجم شیپرها به سانتی‌متر مکعب
۷ آبان ۱۳۹۷	۵۱/۹۶	۲۸/۱۳	۹۱۷۵۵	۱۳۴۱۱۲/۳۰
۲۸ آبان ۱۳۹۷	۶۲/۶۴	۳۳/۰۴	۸۸۸۳	۱۸۲۸۴/۴۸۴
۰۲ دی ۱۳۹۷	۲۳/۰۷	۲۵/۰۹	۵۲۳۶۹	۳۰۳۱۲/۵۵۴
۰۳ اسفند ۱۳۹۷	۴۲/۹۲	۳۶/۱۹	۶۲۳۰	۹۶۷۹۱۵۷
۱۵ اسفند ۱۳۹۷	۵۸/۵۲	۱۹/۳۹	۷۲۶۰	۸۲۳۷/۹۴
۰۸ اردیبهشت ۱۳۹۸	۵۵/۵۴	۲۳/۷۶	۶۳۳۱	۸۳۵۴/۵۸
۱۸ آبان ۱۳۹۸	۳۳/۹	۲۲/۱۷	۲۶۹۷۹/۶۴	۲۰۲۷۶/۸۹۹
۱۰ دیماه ۱۳۹۸	۵۶/۵۶	۳۵/۶۸	۲۶۶۳۷	۵۳۷۵۵/۰۸
۲۵ آذر ۱۳۹۸	۷۵/۰۲	۵۸/۹۹	۱۸۲۵۳	۸۰۷۷۷/۳۷
۱۵ بهمن ۱۳۹۸	۸۵/۵	۲۶/۴	۱۴۲۳۶	۳۲۱۳۳/۶۷
۱۱ اسفند ۱۳۹۸	۱۴۱/۲۶	۲۲/۳۱	۱۹۵۱۱	۶۱۴۸۹/۱۲۳
۰۲ اردیبهشت ۱۳۹۹	۹۴/۲۷	۲۰/۷۴	۱۴۷۵۲	۲۸۸۴۲/۵۷۱
میانگین	۶۱/۹۴	۲۷/۱۳	۲۴۳۹۲	۳۵۴۷۰
میانه	۵۷/۵	۲۴/۴۲	۱۴۴۹۴	۲۶۴۰۳

همانطور که جدول (۵) نشان می‌دهد پهنای شیپرها بین ۲۳/۷ تا ۱۴۱/۲۶ میلی‌متر و عمق آنها بین ۱۹/۳۹ تا ۵۸/۹۹ میلی‌متر می‌باشد و طول آنها از ۶۲۳۶ تا ۹۱۷۵۵ میلی‌متر متغیر بود. پهنای و عمق شیپرها شاخص‌های مناسب برای ارزیابی توسعه شیپرها می‌باشند. در واقع در ارزیابی استفاده از تصاویر میدانی برای اندازه‌گیری ویژگی‌های شیپرها، ورود داده‌های کمی و موقعیت خورشید و دامنه در لحظه تصویربرداری استفاده شد. با ورود این عوامل کمی در استخراج داده عمق شیپرها؛ فاصله بین داده‌های واقعی و داده‌های اندازه‌گیری شده روی تصویر، میزان خطای آنها را به حداقل رساند (جدول ۴). بیشترین میانگین شیپرها در رویداد فرسایشی ۲۵ آذر ۱۳۹۸ مشاهده گردید.

در بین مشخصه‌های فرسایش شیپری اندازه‌گیری پهنای و طول شیپرها آسانتر از عمق شیپرها بود. چون که اندازه‌های دو بعدی را به آسانی می‌توان روی پیکسل‌های تصویر اندازه‌گیری نمود. اما بعد سوم یا عمق روی تصویر مستقیماً قابل اندازه‌گیری نبود؛ برای دستیابی به این مقدار، از متغیر سایه دیواره شیپرها و بهره‌گیری از معادله (۸) استفاده شد. در این معادلات طول سایه‌های تیرک عمودی یک متری که به شدت تحت تأثیر موقعیت خورشید در لحظه تصویربرداری و آزیموت دامنه قرار می‌گیرد، اصلاح شد. تفاوت مطلق آزیموت جهت دامنه و خورشید و ارتفاع آن در محاسبه عمق شیپرها

از طریق سایه نقش مهمی دارند. لذا با دقت و تکیه بر اطلاعات روز و ساعت تصویربرداری این اطلاعات از سایت نجومی معتبر استخراج شدند؛ در نهایت با اصلاح سایه تیرک عمودی، سایه تیرک عمودی در شرایط دامنه مطالعاتی شبیه‌سازی شد و از آن برای تبدیل سایه دیواره شیارها به داده‌های عمق شیار (ارتفاع دیواره) بر حسب میلی‌متر بهره گرفته شد. دانکن و همکاران، ۱۹۹۷ با کمک معادله (۸) اقدام به محاسبه ارتفاع اشیاء نموده بودند. نتایجی که برای تعیین عمق شیارها به کمک سایه انجام شد مشابه با اندازه‌گیری ارتفاع اشیاء بود؛ برای محاسبه ارتفاع دیواره شیارها، ابتدا طول سایه دیواره شیارها از تصویر اندازه‌گیری شد و سپس با کمک معادله که دانکن معرفی کرده بود ارتفاع دیواره شیارها محاسبه گردید. داده‌های حاصل از این محاسبه با داده‌هایی که از سطح زمین و با کولیس اندازه‌گیری شده بودند، مقایسه شدند (جدول ۱ تا ۴). بدین ترتیب چالش مهم یعنی محاسبه عمق شیارها با کمک روش غیرمستقیم حل شد.

برای اندازه‌گیری ویژگی‌های فرسایش شیاری در روش‌های سنتی از خط‌کش، زنجیر، پرکردن شیارها با خاک و مواد مصنوعی دیگر استفاده می‌شد، هنوز هم کاربرد دارند اما فاقد توانایی بررسی تغییرات و توزیع مکانی شیارها هستند اما در این روش که در دامنه فرسایشی سیاخور بکار گرفته شد امکان تعیین پارامترهای مورفومتری شیار فراهم شد، که در روش‌های سنتی تنها امکان محاسبه حجم خاک از دست رفته فراهم می‌شود. اندازه‌گیری از طریق عکس‌های زمینی و تحلیل آنها نه تنها سرعت و دقت را بالا می‌برد بلکه امکان بررسی توزیع مکانی را فراهم می‌نماید، افزون بر آن، تخمین میزان آسیب‌پذیری مکانی ناشی از فرسایش خاک فراهم می‌شود. همانطور که دی استفانو و همکاران در سال ۲۰۱۷ و رنارد و همکاران در سال ۱۹۹۷ بیان کردند برای رسیدن به یک مدل دقیق لازم است فرسایش شیاری و بین شیاری درست درک شود، همانطور که پوسن در سال ۲۰۰۳ بیان داشت این دو فرسایش با هم تا ۹۰ درصد کل تلفات خاک را در برمی‌گیرند. اما روش‌های کلاسیک اندازه‌گیری، بسیار خسته‌کننده، زمان‌بر و پرهزینه هستند (هادسن و همکاران، ۱۹۹۰؛ بیور، ۱۹۳۸؛ وشمایر، ۱۹۷۸)، تنها داده‌های خاک از دست‌رفته را می‌توانستند فراهم کنند و مورفولوژی شیارها مورد توجه قرار نمی‌گرفت. در این پژوهش امکان اندازه‌گیری هر سه پارامتر عمق، پهنا و طول شیار روی تصویر فراهم شد.

در دوازده رویداد فرسایشی که از آبان ۹۷ تا ادیبهشت ۹۹ اندازه‌گیری شدند، هریک الگوی فرسایشی متفاوتی داشتند. به عبارتی سطح مقطع فرسایش‌های شیاری در این وقایع شیاری بسیار متفاوت بود. همانطور که بنت در سال ۱۹۳۹ و لو در سال ۲۰۱۸ به تمرکز در جریان آب در به وجود آمدن فرسایش شیاری اشاره نموده بودند در اینجا نیز تمرکز جریان آب و حجم بارندگی سبب این نوع الگوهای فرسایشی شد. سطح مقطع شیارها در رویدادهای مختلف نشان داد که با تغییرات مقدار و شدت بارندگی پارامترهای پهنا و عمق شیارها تغییر نمود است (جدول ۵).

یکی از ویژگی‌های مهم تصویر برداری زمین با دوربین این است که محدودیت‌های روش‌های پیچیده را که در تحقیقات قبلی اشاره شده است (هنگ و همکاران، ۲۰۱۰؛ اسپاشیو و همکاران، ۲۰۱۸؛ وینسی و همکاران، ۲۰۱۵) ندارد. با توسعه نرم افزار و ابزارهای اندازه‌گیری تولید تصاویر با ابر نقاط مترکم مورد توجه محققان زیادی قرار گرفته است که در کنار رشد روش‌ها داده‌های قابل اعتماد در مورد تلفات خاک، پایش و کمی‌سازی فرسایش در حال انجام است.

همانطور که کاسالی و همکاران در سال ۲۰۰۶ کردند اندازه‌گیری دقیق ویژگی‌های شیار شامل سطح مقطع و حجم شیار کاری سخت و دشوار کمتر مورد توجه قرار گرفته است، اما در این روش با مقیاس‌گذاری تصاویر هر رویداد فرسایشی اندازه‌گیری ویژگی‌های شیار با کمک نرم‌افزار انجام شد. معمولاً حرکت روی دامنه فرسایشی و اندازه‌گیری مستقیم آن در شیب راحت و آسان نخواهد بود اما با ثبت تصاویر فراوان و تحلیل آنها در نرم افزار محدودیت کار میدانی نه تنها بر طرف شد، بلکه دقت آن مشابه اندازه‌گیری روی زمین است. به طوری که همزمان با تصویربرداری از رویدادهای فرسایشی در سه تاریخ از همان وقایع، اندازه‌گیری پهنا و عمق با کولیس انجام شد، نتایج نشان داد که اختلاف بین اندازه‌گیری مستقیم و غیر مستقیم در حدود خطای کمتر از ۵ درصد است. برای ادامه اندازه‌گیری‌ها و تحلیل‌ها این یافته، بسیار قابل اعتماد

است و بدین ترتیب آن محدودیتی که محققان خارجی و داخلی به آن اشاره کرده بودند برطرف شد. در اندازه‌گیری‌های مستقیم برای رویداد ۷ آبان ۱۳۹۷، ۱۶۰ اندازه‌گیری مستقیم پهنای شیار انجام شد که میانگین و میانه داده‌ها به ترتیب ۵۵/۶۱ میلی‌متر و ۴۸/۶۷ میلی‌متر شد. در ۱۵ بهمن ۱۳۹۸ متوسط پهنای روی تصویر ۸۵/۵ میلی‌متر و روی زمین ۸۹/۸ میلی‌متر شد، عمق شیارها روی تصویر ۲۶/۱۴ میلی‌متر و عمق روی زمین ۲۸/۷۶ میلی‌متر به دست آمد و همینطور در تصاویر ۱۱ اسفند ۱۳۹۸ و ۲ اردیبهشت ۱۳۹۹ این اندازه‌گیری‌ها تکرار شد؛ آن مقدار خطایی که در بالا به آن اشاره شد مربوط به این سه رویداد فرسایشی است بدین ترتیب اطمینان لازم از صحت روش حاصل شد.

هدرفت خاک

پس از این که از نتایج محاسبات ابعاد شیارها اطمینان حاصل شد (جدول ۵)، از آنها برای برآورد تلفات خاک در سطح پلات تصویربرداری اقدام شد. رابطه بین مساحت پلات‌ها تصویربرداری و مجموع طول شیارها خطی بود، ضریب همبستگی ۰/۷ بین مساحت پلات‌ها و مجموع طول شیارها در سطح (p-value 0.004) مشاهده شد. لذا تغییرات اندازه سطح تصویر بصورت خطی روی متغیر طول شیارها اثر می‌گذارد. بنابراین تنوع مساحت پلات‌ها در برآورد حجم تلفات خاک در واحد سطح اثر خطی دارد. با در نظر گرفتن میانگین وزن مخصوص ظاهری خاک دامنه مورد مطالعه (۱/۱۸) حجم شیارها و خاک از دست رفته بر حسب کیلوگرم در سطح پلات محاسبه شد. بیشترین و کمترین تلفات خاک در روز ۱۰ دیماه ۱۳۹۸ و ۱۵ اسفند ۱۳۹۷ مشاهده شد.

جدول ۶: محاسبات حجم رخساره فرسایش شیبی و تلفات خاک بر حسب وزن در واحد سطح

روز تصویربرداری (۱)	حجم شیار به متر مکعب (۲)	مساحت تصویر m^2 (۳)	تلفات خاک در سطح تصویر (kg) ستون ۲ * (وزن مخصوص ظاهری خاک * ۱۰۰۰) (۴)	Kg/m^2
۷ آبان ۱۳۹۷	۰/۱۳۴۱۰۳	۵۰/۲	۱۵۸/۲۴۱	۳/۱۵
۲۸ آبان ۱۳۹۷	۰/۰۱۸۳۸۴	۲۰	۲۱/۶۹۳	۱/۰۸
۰۲ دی ۱۳۹۷	۰/۰۳۱۱۴۰	۳۲/۳۸	۳۶/۷۶۴	۱/۱۳
۰۳ اسفند ۱۳۹۷	۰/۰۰۹۶۷۶	۲۳/۸۲	۱۱/۴۱۸۷	۰/۴۸
۱۵ اسفند ۱۳۹۷	۰/۰۰۸۳۳۹	۲۳/۸۲	۹/۷۲۰	۰/۴۱
۰۸ اردیبهشت ۱۳۹۸	۰/۰۰۸۳۵۵	۱۰/۶۴	۹/۸۵۸۴	۰/۹۳
۱۸ آبان ۱۳۹۸	۰/۰۱۹۴۸۸	۱۸/۱	۲۲/۹۸	۱/۲۷
۲۵ آذر ۱۳۹۸	۰/۰۳۸۷۲۱	۱۱/۴۸	۴۵/۸۰۸	۴/۵۶
۱۰ دیماه ۱۳۹۸	۰/۰۴۲۳۳۷	۹/۸۸	۴۹/۸۴	۵/۰۴
۱۵ بهمن ۱۳۹۸	۰/۰۳۲۱۲۳	۱۶/۱۷	۲۳/۴۴۹	۲/۳۴
۱۱ اسفند ۱۳۹۸	۰/۰۶۱۴۸۹	۲۳/۹۳	۷۲/۵۵۷۱	۳/۰۷
۰۲ اردیبهشت ۱۳۹۹	۰/۰۲۱۶۶۷	۷/۲۶	۲۵/۵۵۶	۳/۵۲
میانگین	۰/۰۳۵۵	۲۰/۶	۴۰/۷	۲/۳
میانه	۰/۰۲۶۴	۱۹/۰۵	۲۴/۵	۱/۸

فرسایش شیبی در حدود ۵۰ تا ۷۰ درصد کل فرسایش خاک را در بر می‌گیرد (Morgan, ۲۰۰۵; Zheng و همکاران، ۱۹۹۷). در فواصل بین بارندگی تغییرات مورفومتری شیارها شدید است، بنابراین شکلی ناپایدار دارند. هدف از

این پژوهش بررسی امکان اندازه‌گیری تغییرات مورفومتری عمق، پهنا و طول شیارها روی تصویر می‌باشد. سرعت و سهولت اندازه‌گیری و کم‌هزینه بودن روش بسیار اهمیت دارد. همانطور که واعظی و همکاران در سال ۱۳۹۴، بین ویژگی شیارها در دامنه‌ها و خاک تفاوت معنی‌داری مشاهده کرده بودند؛ یعنی بین خاک شیارها از نظر میزان شن، سیلت، رس و هدایت الکتریکی با خصوصیات هندسی شیارها ارتباط مشاهده شده بود، با وجود چنین روابطی از یک طرف، و افزایش سرعت محاسبات غیرمستقیم پارامترهای فرسایش شیاری از طرف دیگر، نمی‌توان براحتی از آن برای تیپ‌بندی شیارها در واحدهای مکانی و آسیب‌پذیر استفاده نمود. آنچه که پیشتر به عنوان محدودیت اندازه‌گیری ویژگی‌های مورفومتری فرسایش شیاری و بین شیاری بیان شده بود (Casali و همکاران، ۲۰۰۶) در این پژوهش با استفاده از تصاویر میدانی از فاصله نزدیک و نرم‌افزار ImageJ ویژگی‌های مورفومتری شیارها با هزینه کم، دقت خوب و سرعت مناسب استخراج شدند.

اندازه‌گیری دقیق ویژگی‌های شیار شامل سطح مقطع و حجم شیار کاری سخت و دشوار است و کمتر مورد توجه قرار گرفته است، اما در این روش با هم مقیاس‌گذاری تصاویر در هر واقعه فرسایشی، زمینه اندازه‌گیری ویژگی‌های شیار با کمک نرم‌افزار انجام شد؛ پیش از آن که در واقعه بارندگی بعدی آثار شیارمحو گردد، یا این‌که، در اثر انبساط و انقباض دما خاک ناپدید شوند، مطالعه تغییرات رفتار فرسایشی فراهم می‌شود.

نتیجه‌گیری

معمولاً حرکت روی دامنه فرسایشی و اندازه‌گیری مستقیم آن در شیب راحت و آسان نخواهد بود، اما استفاده از دوربین برای ثبت تصاویر فراوان و تحلیل آنها در نرم‌افزار محدودیت کار میدانی نه تنها بر طرف نمود، بلکه به دقت اندازه‌گیری روی زمین نیز منجر شد به طوری که همزمان با تصویربرداری از رخساره‌های فرسایش شیاری در سه تاریخ همزمان با آن، با کولیس پهنا و عمق شیارها اندازه‌گیری شد، نتایج نشان داد که اختلاف بین اندازه‌گیری مستقیم و غیرمستقیم در حدود خطای کمتر از ۵ درصد است. این داده‌ای قابل اعتماد برای ادامه اندازه‌گیری‌ها و تحلیل‌ها شد؛ و بدین ترتیب آن محدودیتی که محققان خارجی و داخلی به آن اشاره کرده بودند برطرف شد.

از آنجا که سرعت و دقت اندازه‌گیری این روش قابل اعتماد است؛ لذا می‌توان نه تنها فرآیند زمانی و مکانی تغییرات مورفولوژی فرسایش شیاری بلکه میزان تلفات خاک در سطح دامنه اندازه گرفت. کار اندازه‌گیری فرسایش شیاری را در دامنه‌های فرسایشی مختلف با سرعت تکرار نمود. از طرفی دیگر هزینه اجرای چنین عملیاتی به نسبت سایر روش‌های ارزان می‌باشد. چرا که نصب ابزار و وسایل در سطح دامنه‌ها نیاز به نگرهبانی و قربان دارد. با توجه به شرایط اجتماعی و اقتصادی این بسیار پرهزینه است. اما در این روش، نیاز به نصب ابزار و تجهیزاتی در محل نیست.

تلفات خاک در سطح دامنه مورد مطالعه با به کارگیری پارامترهای پهنا، عمق و طول شیارها محاسبه شد. میانگین پلات‌های تصویری ۲۰/۶ متر مربع بود؛ میانگین تلفات خاک در سطح اینها، برای ۱۲ رویداد فرسایشی (جدول ۶) طی سال‌های زراعی ۱۳۹۷ الی ۱۳۹۹ $2/3 \text{ kg/m}^2$ حاصل شد. میانه داده‌ها مورفومتری از نظر آماری بیش از میانگین آنها ثابت دارد، از این نظر میانه پلات‌های تصویری نیز عددی مشابه به میانگین بود یعنی میانه مساحت تصاویر گرفته شده از رویدادهای فرسایشی $19/05 \text{ m}^2$ بود، میانه تلفات خاک در سطح اینها $1/8 \text{ kg/m}^2$ بدست آمد. از این نظر، این مقدار تلفات خاک در سطح دامنه فرسایشی مورد مطالعه با خصوصیات سنگ‌شناسی از نوع تله‌زنگ و کشکان که غالباً از مارن و سیلتستون تشکیل شده، منطقی به نظر می‌رسد.

منابع

- واعظی، علیرضا؛ حکیمه، قره‌داغی؛ ۲۰۱۱. کمی‌سازی گسترش فرسایش شیاری در خاک‌های ماری در حوزه آبخیز زنجانرود در شمال غرب زنجان. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۸۷۲-۸۸۱
- Baruch, A, and S Filin. 2011. Detection of Gullies in Roughly Textured Terrain Using AirBorne Laser Scanning Data. *Journal of Photogrametry and Remote Sensing* 578-564.
- Baver, L.D. 1938. 'Ewald Wollny: a pioneer in soil and water conservation research. *Soil Sci. Soc. Am. Proc* 3: 330-333.
- Bennett, H H. 1939. *Soil Conservation*. New York: McGraw-Hill Book Company.
- Berger, C., Schulze, M., Rieke-Zapp, D., and Schlunegger, F. 2010. Rill development and soil erosion: a laboratory study of slope and rainfall intensity, *Earth Surf. Proc. Land.*, 35, 1456-1467, Bird, S., Hogan, D., Schwab, J.,. 2010. Photogrammetric monitoring of small streams under a riparian forest canopy. *Earth Surf. Process. Landf* 35: 952-970.
- Carrivick, J L, M W Smith, and D J Quincey. 2016. *Structure From Motion in the Geosciences*. Oxford, UK: Wiley-Blackwell.
- Casali, , J, J Loizu, , and M A Campo,. 2006. Accuracy of methods for field assessment of rill and ephemeral gully erosion. *Catena* 128-138.
- Castillo, C., Pérez, R., James, M.R., Quinton, J.N., Taguas, E.V., Gómez, J.A.,. 2012. Comparing the accuracy of several field methods for measuring gully erosion. *Soil Sci. Soc. Am. J* 76: 1319-1332.
- Cerdan, O. ; Le Bissonnais, Y. ; Souchère, V. ; Martin, P. ; Lecomte, V. 2002. Sediment concentration in interrill flow: interactions between soil surface conditions, vegetation and rainfall. *Earth Surface Processes & Landforms*, 27 (2) : 193-205
- Deng, L., Mao, Z., Li, X., Hu, Z., Duan, F., Yan, Y.,. 2018. UAV-based multispectral remote sensing for precision agriculture: A comparison between different cameras. *ISPRS-J. Photogramm. Remote Sens.* 146: 124-136.
- Di Stefano, c, V Ferro, V Palmeri, and V Pampalona. 2017. Measuring rill erosion using structure from motion: a plot experiment. *Catena* 156: 383-392.
- Doren, D R, and D M Van Linden. 1996. Parameters for Characterizing Tillage-induced Soil Surface Roughness. *Soil Sci. Soc. Am. J* 50: 1-5.
- Duncan, C.N. and McEwen, D.J., 1979. Photometric studies of the postnoon dayside cleft region. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 84(A11), pp.6533-6539.
- Eltner, A, A Kaiser, C Castillo, and G Ne Rock. 2016. Image-based surface reconstruction in geomorphometry: merits, limits and developments. *Earth Surf. Dynam* 4: 359-389.
- Eltner, A, H G Maas, and D Faust. 2018. Soil micro-topography change detection at hillslopes in fragile Mediterranean landscapes. *Geoderma* 313: 217-232.
- Esposito, G, R Salvini, F Matano, and M Sacchi. 2018. Evaluation of geomorphic changes and retreat rates of a coastal pyroclastic cliff in the Campi Flegrei volcanic. *J.coast. Conserve.* 22: 957-972.
- Gizaw Desta . 2010. Research Report for Q505 project supported by Eastern and Southern Africa Partne rship Program (ESAPP) <https://doi.org/10.7892/boris.69286> | downloaded: 2.11.2021
- Gaich, A. 2006. *Basics and application of 3D imaging systems with conventional and*. Graz: Institute for Rock Mechanics and Tunnelling, Graz University of Technology, Graz, Austria.
- Goetz, J, Brenning, A, Marcer, M., Bodin, X.,. 2018. Modeling the precision of structure-from-motion multi-view stereo digital elevation models from repeated close-range aerial surveys. *Remote Sens. Environ* 210: 208-216.

- Gomez-Gutiérrez Á, Schnabel S, Berenguer-Sempere F, Lavado-Contador F, Rubio-Delgado J. 2014. Using 3D photo-reconstruction methods to estimate gully headcut erosion. *Catena* 120: 91–101. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.04.004>.
- Gudino-Elizondo, N, T.W Biggs, C Castillo, R L Bingner, E J Langendoen, K T Taniguchi, T Kretschmar, Y Yuan, and D Liden. 2018. Measuring ephemeral gully erosion rates and topographical thresholds in an urban watershed using unmanned aerial systems and structure from motion photogrammetric techniques. *Land Degrad. Dev.* 29: 1896–1905.
- Guo, M., Shi, H., Zhao, J., Liu, P., Welbourne, D., Lin, Q.,. 2016. Digital close range photogrammetry for the study of rill development at flume scale. *Catena* 143: 265–274.
- Hansel, P., Marcus, S., Eltner, A., Kaiser, A., Schmidt, J., 2016. Feasibility of High-Resolution Soil Erosion Measurements by Means of Rainfall Simulation and SfM Photogrammetry. *Hydrology* 3,38: 1-16
- Heng, B.C p, J H Chandler, and A Armstrong. 2010. Applying close range digital photogrammetry in soil erosion studies. *Photogram* 25: 240–265.
- Hudson, N. 1995. *Soil Conservation*. Ames, IA.: Iowa State University Press.
- Huo, Y, Sh Wu, and H Feng. 2011. Dynamic process of slope rill erosion based on three-dimensional laser scanner. *Science of Soil and Water Conservation* 9 (2): 32–37.
- James, M R, and S Robson. 2012. Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: accuracy and geoscience application. *J. Geophys. Res. Earth Surf* 100-117.
- James, M.R., Quinton, J.N.,. 2014. Ultra-rapid topographic surveying for complex environments: the hand-held mobile laser scanner. *Earth Surf. Process. Landf* 39: 138–142.
- Jester, W, and A Klik. 2005. Soil surface roughness measurement: methods, applicability, and surface representation. *Catena* 64: 174–192.
- Kaiser, A, F Neugirg, G Rock, C Müller, F Haas, J Ries, and J Schmidt. 2014. Small-scale surface reconstruction and volume calculation of soil erosion in complex Moroccan gully morphology using structure from motion. *Remote Sens.* 6: 7050–7080.
- Kapil, A. and Shukla, S., Brain Tumor Recognition from MRI Images using Multiple OTSU Thresholding and Cross Correlation. *Journal for Engineering | Volume 2 | Issue 5 | April 2017 ISSN: 2455-57.3*
- Li, J, C, Q Q Liu, and J F Zhou. 2003. Environmental mechanics in China. *Adva. in Appl. Mecha.* 39: 217-306.
- Li, J, B Li, F Liu, and Z Li. 2015. "Generating 3D model of slope eroded gully based on photoreconstruction technique. *Trans. CSAE* 31: 125–132.
- Liu, Jianzhuang, Wenqing Li, and Yupeng Tian. 1991. Automatic thresholding of gray-level pictures using two-dimension Otsu method. *International Conference on Circuits and Systems. China: Shenzhen.* 325-327.
- Liu, B, Y Yang, and S Lu. 2018. Discriminations on common soil erosion terms and their implications. *Sci. Soil Water Conserv* 16: 9-16.
- Luo, J., Zheng, Z., Li, T., He, S., 2018. Assessing the impacts of microtopography on soil erosion under simulated rainfall, using a multifractal approach. *Hydrol. Process.* 32 (16), 2543–2556. <https://doi.org/10.1002/hyp.13170>.
- Mahmood, Fahad, Jawad Mahmood, and Waqar Shahid Qureshi. 2010. "3-D Shape Recovery from Image Focus Using Rank Transform. *International Symposium on Visual Computing. Springer.* 514-523.
- Malik, Aamir Saeed, Humaira Nisar, and Sun Choib Taen. 2011. A Fuzzy-Neural approach for estimation of depth map using focus. *Applied Soft Computing* 1837-1850.
- Marr, D, and E Hildreth. 1980. Theory of edge detection. *Proceedings of the Royal Society of London. London.*

- Meyer, L D, G R Foster, and M.J M Römken. 1975. Source of soil eroded by water from upland Proceedings of the Sediment Yield Workshop. London: Oxford, MI, pp. 177–189.
- MissHetal, J. 2013. A Review on Otsu Image Segmentation. International Journal of Advance Research in Computer Engineering and Technology 389-387.
- Morgan, R.P.C. 2005. Soil erosion and conservation. Malden, MA: Blackwell Publishing.
- Moser, K., Ahn, C., Noe, G.,. 2007. Characterization of microtopography and its influence on vegetation patterns in created wetlands. Wetlands 27: 1081–1097.
- Neithammer, U, M R James, J Travelletti, and M Joswig. 2011. UAV-based remote sensing of the super_suaze landslide. Engineering Geology.
- Niethammer, U, S Rothmund, M R James, J Travelletti, and M Joswig. 2011. UAV-based remote sensing of landslides. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Info. Sci. 38: 496–501.
- Nouwakpo, S.K., Huang, C.-H.,. 2012. A simplified close-range photogrammetric technique for soil erosion assessment. Soil Sci. Soc. Am. J. 76: 70–84.
- Nouwakpo, S.K., James, M.R., Weltz, M.A., Huang, C.-H., Chagas, I., Lima, L.,. 2014. Evaluation of structure from motion for soil microtopography measurement. Photogramm. Rec. 29: 297–316.
- Otsu, N. (1979). A Thresould Selection Method From Gray level Histogram. IEEE Transactions on system, man and Sybernetic, 66-62.
- Poesen, J.; Nachtergaele, J.; Verstraeten, G.; Valentin, C. 2003. Gully erosion and environmental change: Importance and research needs. Catena, 50, 91–133
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K., Yoder, D.C.,. 1997. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil. Washington, DC: Department of Agriculture.
- Shen H, Zheng F, Wen L, Lu J, Jiang Y. 2015. An experimental study of rill erosion and morphology. Geomorphology 231: 193–201.
- Smith, M.J., Chandler, J. and Rose, J., 2009. High spatial resolution data acquisition for the geosciences: kite aerial photography. Earth Surface Processes and Landforms, 34(1), pp.155-161.
- Smith, M. W., Carrivick, J. L. & Quincey, D. J. 2015. Structure from motion photogrammetry in physical geography. Progress in Physical Geography 40 (2), 247–275
- Sofia, G., Di Stefano, C., Ferro, V., Tarolli, P. 2017. Morphological similarity of channels: from linear erosional features (rill, gully) to alpine rivers. Land Degrad. Dev 28: 1717–1728.
- Stumpf, A., Philipe, J. & kerle, N., 2011. Mapping Landslide Surface Fissures With Matched filtering and Object Orinted image Analysis. Rio de Ganeiro, p. 285.
- Vinci, A., Brigante, R., Todisco, F., Mannocchi, F., Radicioni, F.,. 2015. Measuring rill erosion by laser scanning. Catena 124: 97–108.
- Wang, E.Z. and Shrive, N.G., 1995. Variations of the effective elastic material properties of a brittle solid with distributed void propagation. Engineering fracture mechanics, 50(2), pp.219-230.
- Westoby, M J, J Brasingtos, N F Glasser, M J Hambrey, and J M Reynolds. 2012. "Structure-from-Motion" photogrammetry: a low-cost, effective tool for geoscience applications. Geomorphology 179: 300–314.
- Wirtz, S., Seeger, M., Ries, J.B.,. 2012. The rill experiment as a method to approach a quantification of rill erosion process activity. Z- Geomorphol 54: 47–64.
- Wischmeie, W H, and D D Smith. 1978. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. Agriculture Handbook No. 537. U.S. Department of Agriculture.

- Zheng, F.L., Tang, K.L., 1997. Rill erosion process of steep slope land of the Loess Plateau. *International Journal of Sediment Research* 12: 52-59.
- Zhu, Y, Y Wang, and M Shao. 2010. Using soil surface gray level to determine surface soil water content. *Science China Earth Sciences* 53: 1527-1532.
- Zhu, Y, Y Wang, M Shao, and R Horton. 2011. Estimating soil water content from surface digital image gray level measurements under visible spectrum. *Canadian Journal of Soil Science* 91: 69-76.

