

ارزیابی روند گسترش آبکندها در بازه زمانی ۵۶ ساله (۱۳۴۶-۱۴۰۲) و برآورد فرسایش و رسوب در حوزه آبخیز دشت جیحون شهرستان بندر خمیر

میثم صمدی^۱، مهتاب زمانی‌راد^{۲*}، پیمان رضائی^۳، امیرپیام مسلم^۴ و علیرضا کمالی^۵

۱- دکترای علوم و مهندسی آبخیزداری، گروه منابع طبیعی و آبخیزداری، شرکت مهندسی مشاور ایده‌پردازان توسعه، تهران، ایران

۲- دکترای مهندسی منابع آب، اداره مهندسی و مطالعات، اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان هرمزگان، بندرعباس، ایران

۳- دانشیار گروه زمین‌شناسی دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

۴- کارشناس مرتع و آبخیزداری، گروه منابع طبیعی و آبخیزداری، شرکت مهندسی مشاور ایده‌پردازان توسعه، تهران، ایران

۵- دکترای هواشناسی مخاطرات اقلیمی، اداره مهندسی و مطالعات، اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان هرمزگان، بندرعباس، ایران

نویسنده مسئول: iut_mahtab82@yahoo.com

دریافت: ۱۴۰۳/۳/۳۱ پذیرش: ۱۴۰۳/۶/۱۰

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

هدف از این پژوهش، بررسی روند گسترش آبکندها و تعیین مقدار فرسایش و رسوب در حوزه آبخیز دشت جیحون شهرستان بندر خمیر در استان هرمزگان است. برای این منظور، از عکس‌های هوایی سال‌های ۱۳۴۶ و ۱۳۷۳، تصاویر تاریخی گوگل ارث در سال ۱۳۹۱ و تصویربرداری پهپاد در سال ۱۴۰۲ استفاده شد. همچنین جهت برآورد فرسایش‌های سطحی از مدل‌های WaTEM/SEDEM و RUSLE استفاده شد. به منظور برآورد مقدار فرسایش آبکندها از تصویربرداری پهپاد با GSD ۳ سانتی‌متر استفاده و نقشه گسترش آبکندها استخراج شد. سپس با اندازه‌گیری مشخصات مورفومتریک آبکندها، مقدار هدررفت خاک ناشی از فرسایش آبکندها برآورد گردید. نتایج نشان داد، سطح آبکندها از ۱۳۲/۶۴ هکتار در سال ۱۳۳۶ به ۳۲۶/۳۹ هکتار در سال ۱۴۰۲ رسیده است که حاکی از نرخ پیشروی ۳/۴۶ هکتار در سال را دارد. مشخصات مورفومتری آبکندها در ۴۸۱ نقطه با استفاده از DEM پهپاد با دقت ۶ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد. متوسط عمق آبکندها ۱/۰۱ متر بوده و به طور کلی می‌توان گفت آبکندهای منطقه بیش‌تر آبکندهای کوچک و تا حدودی متوسط می‌باشند. همچنین نسبت عرض بالا به عمق آبکندها بزرگ‌تر از ۱ هستند و از نظر تخریب اراضی زراعی و زیرساخت‌ها حائز اهمیت هستند. یافته‌ها نشان می‌دهد که عامل اصلی پیشروی آبکندهای حوضه، سیلاب و رسیدن آب به این آبکندها می‌باشد. متوسط فرسایش خاک ناشی از فرسایش‌های سطحی در منطقه مورد مطالعه به طور متوسط حدود ۳/۴۰ تن در هکتار در سال است. مقدار کل هدررفت خاک در اثر فرسایش آبکندها به طور متوسط حدود ۵۲ هزار تن در سال، برآورد گردید. بر این اساس میانگین ۵۶ ساله (۱۳۴۶-۱۴۰۲) هدررفت خاک در اثر فرسایش آبکندها حدود ۱۲ تن در هکتار در سال محاسبه شد. در نهایت مقدار کل سالانه هدررفت خاک در اثر انواع فرسایش، معادل حدود ۱۵/۴ تن از هر هکتار در سال برآورد گردید.

واژگان کلیدی: آبکند، پهپاد، مدل‌های فرسایش، مورفومتری، مدل رقومی ارتفاع

۱- پیشگفتار

شیاری، آبکندها و آبراهه‌ای. فرسایش آبی می‌تواند در سرتاسر دنیا به عنوان یک از مهم‌ترین عوامل برای جابجایی توده خاک مشاهده شود. فرسایش آبکندها ایجاد و گسترش کانال‌های فرسایشی ناشی از تمرکز جریان آب است. کانال‌هایی با حداقل عمق و عرض ۳۰ سانتی‌متر و حد بالای آن بسته به ویژگی‌های محیطی هر اندازه‌ای می‌تواند باشد. آبکندها مرتبط با دامنه وسیعی از عوامل درون‌زاد و برون‌زاد از محل ایجاد و گسترش هستند. عوامل محلی می‌توانند شامل تلفات اراضی زراعی و منابع ملی

فرسایش خاک به عنوان مهم‌ترین عامل تخریب خاک (پاناگوس و همکاران، ۲۰۱۵) و یک عنصر کلیدی در بسیاری از مناطق دنیا معرفی شده است (سیدل و همکاران، ۲۰۱۹). فرآیند فرسایش خاک شامل جداسازی، انتقال و ته‌نشینی رسوبات در محلی دیگر است (فاستر و همکاران، ۱۹۷۷؛ ویشمیر و اسمیت، ۱۹۷۸). فرسایش به دو رده کلی آبی و بادی تقسیم می‌شود. انواع فرسایش آبی عبارتند از پاشمان، ورقه‌ای (سطحی یا بین‌شیاری)،

رسوبات (هارگوین و همکاران، ۲۰۰۶)، پر شدن کانال رودخانه (بندا و همکاران، ۲۰۰۳) و کاهش کیفیت آب (اوینز و همکاران، ۲۰۰۵) در منطقه می‌شود. فرسایش آبکندی یک فرآیند کلیدی برای تخریب سرزمین و بیابان‌زایی است که تهدید بزرگی برای تنوعی از اکوسیستم‌ها و خدمات آن‌ها به شمار می‌رود (ونمارک و همکاران، ۲۰۱۲ و ۲۰۲۱، کرون و همکاران، ۲۰۱۲، ۲۰۱۶). لذا با این تأثیرات فرسایش آبکندی، اعمال راهبردهای کاربری اراضی و مدیریت آبخیز لازم است تا بتوان مدیریت فرسایش آبکندی و تأثیرات آن را در آبخیز مورد نظر انجام داد. با توجه به مباحث ذکر شده فرسایش خاک بدون شک مهم‌ترین عامل تخریب خاک و محیط زیست (پانگوس و همکاران، ۲۰۱۵؛ رحمان و همکاران، ۲۰۱۵؛ پنوک، ۲۰۱۹) در سطح جهان (لال، ۱۹۹۴) و ایران (اسدی، ۱۴۰۱) است که دارای پیامدهای محیطی فراوان و گسترده‌ای است. فرسایش تشدیدی خاک در جامعه مدرن امروزی یک مسئله جهانی است که اثرات اقتصادی (پیمنتل و همکاران، ۱۹۹۵) و محیط‌زیستی (لال، ۱۹۹۴) فراوانی در پی دارد. فرسایش آبکندی منبع مهم تولید رسوب در زیست‌بوم‌های مختلف است (پوسن و همکاران، ۲۰۰۳). گرچه آبراه‌های آبکنند اغلب کمتر از ۵ درصد مساحت یک آبخیز را در بر می‌گیرند (یونیتا و همکاران، ۲۰۱۵). ولی با اتصال بالادست به پایین دست آبخیز می‌توانند سبب وقوع سیلاب و رسوب‌گذاری در محل ایجاد فرسایش و خارج از محل وقوع آن شوند (صوفی و همکاران، ۱۴۰۱). در پژوهش حاضر از سه روش به منظور برآورد فرسایش و رسوب حوزه آبخیز جیحون استفاده شد. با توجه به اینکه حوضه از دو بخش آبکندی و غیرآبکندی تشکیل شده است و مدل‌های رایج توانایی برآورد فرسایش آبکندی را ندارند، لذا فرسایش آبکندی به صورت جداگانه و با استفاده از تصاویر پهپاد برآورد شده و فرسایش سطحی با استفاده از مدل‌های WaTEM/SEDEM و RUSLE برآورد شده و در نهایت برآورد کلی از فرسایش‌های سطحی و آبکندی برای کل حوضه ارائه شد. توسعه راهبردهای مناسب برای کنترل فرسایش آبکندی نیاز به یک درک کلی و همه جانبه از دینامیک این نوع فرسایش و عوامل موثر بر ایجاد و گسترش آن دارد. مطالعات زیادی ثابت کرده‌اند که فرسایش آبکندی به عواملی نظیر تغییر کاربری و پوشش زمین (پروسر و اسلید، ۱۹۹۴؛ توری و پوسن،

نظیر جنگل‌ها و مراتع، اراضی متروکه، تخریب زیر ساخت‌های عمرانی نظیر مسکونی، مدرسه، راه، پل و آبگذر، کانال‌های انتقال آب، تخریب دکل‌های برق و لوله‌های انتقال نفت و گاز و آب هستند. این موارد قادرند فرصت‌های کشت و کار، زندگی و سایر اشکال اشتغال را دچار چالش کنند. فرسایش آبکندی می‌تواند سبب تلفات زیاد خاک و به دنبال آن کاهش کیفیت خاک شود (ژو و همکاران، ۲۰۱۶). تهدید بلند مدت امنیت غذایی و سایر خدمات اکوسیستم از جمله آثار فرسایش آبکندی است (برای مثال مونتگومری، ۲۰۰۷). آبکندها، آب‌شناسی سطحی و زیرسطحی را تغییر می‌دهند، به عبارت دیگر آبکندها با اتصال بالا دست به پایین دست آبخیز قادر به تخلیه سریع سیلاب‌ها و خشک شدن منطقه می‌شوند. تخلیه رطوبت خاک و آب زیرزمینی را سرعت داده لذا سبب کاهش تولیدات کشاورزی و مراتع و جنگل‌ها و خشک شدن گیاهان در اطراف آبکندها می‌شوند. این مسئله در مناطق خشک با توجه به تغییر اقلیم وقوع خشکسالی‌ها از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است (اونی، ۲۰۰۵؛ فرانکل و همکاران، ۲۰۱۳؛ پوسن، ۲۰۱۸). هم‌چنین، فرسایش آبکندی می‌تواند سبب شروع و تسریع فرآیندهای فرسایشی نظیر فرآیند تونلی شدن یا پایپینگ (برنتاک-ژاکیل و پوسن، ۲۰۱۸) و لغزش (یونیتا و همکاران، ۲۰۱۵) شود. با توجه به تأثیرات ذکر شده فرسایش آبکندی می‌توان گفت فرسایش آبکندی می‌تواند یک نیروی مهم برای تغییر کاربری اراضی باشد (والنتین و همکاران، ۲۰۰۵؛ زگلوبیکی و همکاران، ۲۰۱۵) و در حالت گسترش شدید، فرسایش آبکندی می‌تواند اراضی حاصل‌خیز را به بدلدند تبدیل کند (توری و همکاران، ۲۰۱۸). تأثیرات بالقوه فرسایش آبکندی در خارج از آبخیز می‌تواند شامل تغییر در آب‌شناسی آبخیز نظیر کاهش جریان پایه و افزایش دبی حداکثر سیلاب در رودخانه باشد (مارتینلی کستا و باکلر، ۲۰۰۷). از تأثیرات خارج از آبخیز می‌توان به عنوان منبع عمده تولید رسوب اشاره داشت که بدلیل سهم بالای آن در فرسایش آبخیز (بین ۲۰ تا ۸۰ درصد از متوسط تولید رسوب متوسط آبخیز) می‌باشد (پوسن و همکاران، ۱۹۹۶ و ۲۰۰۳؛ ونمارک و همکاران، ۲۰۱۲). اتصال بالادست آبخیز به پایین دست آن توسط آبکندها سبب افزایش مشکلات شامل سیلاب‌های گل‌آلود (ورستران و پوسن، ۱۹۹۹)، کاهش ظرفیت مخازن آبی به دلیل ته‌نشینی

آبکندها در حوزه‌های آبخیز زوجی در مناطق گودر، آبا گریما و دیباتیه در اتیوپی نمودند که نمایانگر اگروکولوژی‌های کوهستانی، میانی و دشتی در حوزه آبخیز بالایی بلو نیل اتیوپی هستند. از عکس‌های هوایی (۱۹۵۷، ۱۹۸۲)، تصاویر ماهواره‌ای با رزولوشن بسیار بالا (QuickBird, IKONOS, Worldview-2, SPOT-7, and Pleiades) از شش حوزه آبخیز همراه با بررسی‌های میدانی در تجزیه و تحلیل‌ها استفاده شد. عکس‌های هوایی با استفاده از نرم‌افزار ENVI 4.3 بررسی و اصلاح شده و نقشه آبکندها با تفسیر بصری در محیط Arc GIS تهیه شدند. نتایج آن‌ها نشان داد نرخ افزایش طول آبکند در گودر (۳۶/۹ متر در سال) و آبا گریما (۳۳/۶ متر در سال) تقریباً دو برابر دیباتیه (۱۷/۸ متر در سال) از سال ۱۹۵۷ تا ۲۰۱۶ یا ۲۰۱۷ و در همان زمان بوده است. تراکم آبکند به طور مشابه در گودر، آبا گریما و دیباتیه به ترتیب ۵/۹، ۵/۴ و ۳/۷ متر در هکتار افزایش یافته است. نرخ‌های بالاتر در گودر و آبا گریما نشان‌دهنده تاریخ طولانی کشاورزی و سکونت انسان در آن مناطق است. وانگ و همکاران (۲۰۲۱) اقدام به تعیین نرخ گسترش بلند مدت فرسایش آبکندی و واکنش آن به مداخلات انسانی در منطقه Tableland فلات لس چین نمودند. فرآیند فرسایش آبکندی در منطقه مورد مطالعه که یک منطقه کشاورزی پرجمعیت با توپوگرافی منحصر به فرد است، تحت تأثیر شرایط طبیعی و فعالیت‌های انسانی می‌باشد. به منظور بررسی نرخ گسترش بلندمدت آبکند و عوامل موثر و پتانسیل رشد آبکند، تصاویر ماهواره ای KH-4B، تصاویر Quickbird-2 و تصاویر پهپاد (UAV) از سال ۱۹۶۹ تا ۲۰۱۹ استفاده شد. اثرات رواناب، توپوگرافی و فعالیت‌های انسانی با اطلاعات به دست آمده از تصاویر تاریخی و تصاویر حاضر مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. ۹۵ آبکند مورد بررسی به چهار نوع تقسیم شدند: ۴۵ آبکند در حال گسترش، ۲۵ آبکند پایدار، ۲۱ آبکند پر شده و چهار آبکند گود شده. نرخ گسترش ۴۵ خندق در حال گسترش از ۰/۵ تا ۲۰/۹۴ متر مربع در سال، با میانگین ۵/۶۶ متر مربع در سال، از سال ۱۹۶۹ تا ۲۰۱۰ متغیر بوده است. سطح زهکشی فعلی، شیب محلی، شیب متوسط حوضه، رواناب سالانه و نسبت سطح همگی بین آبکندهای پایدار و در حال گسترش تفاوت معنی‌داری داشتند. راج و همکاران

(۲۰۱۴) و شدت باران (ونمارک و همکاران، ۲۰۱۶؛ هایاس و همکاران، ۲۰۱۷) حساسیت دارد. لذا تغییر کاربری و پوشش زمین و تغییر اقلیم و مخصوصاً تأثیر آن بر افزایش شدت باران (پولاده و همکاران، ۲۰۱۴) احتمالاً سبب افزایش نرخ فرسایش آبکندی خواهد شد. (لی و فنگ، ۲۰۱۶؛ پانگوس و همکاران، ۲۰۱۷). برای آدرس دادن این چالش‌ها، نیاز به ابزارها و مدل‌هایی است که بتواند نرخ فرسایش آبکندی فعلی را کمی‌سازی کرده و آثار فرسایش آبکندی و پتانسیل سناریوهای تغییر اقلیم و تغییر کاربری زمین را نشان دهند (پنوک، ۲۰۱۹). با وجود این، در حال حاضر توانایی ما برای شبیه‌سازی فرسایش آبکندی و تأثیرات آن محدود است (بنت و ولز، ۲۰۱۹؛ سیدل و همکاران، ۲۰۱۹). هواگردهای بدون سرنشین^۱ (UAV) برای تهیه اطلاعات امروزه بسیار مشهور شده‌اند و فن‌آوری سنجنده‌های آن‌ها توسعه زیادی پیدا کرده (والوانیس و واخستونوس، ۲۰۱۵) و دارای هزینه و خطر کمی هستند (اندرسون و گاستون، ۲۰۱۳؛ تارولی، ۲۰۱۴). لیدارهای پهپادی و تصاویر هایپراسپیکترال برآوردهای بسیار دقیق‌تری از الگوها و فرآیندهای سطحی زمین برای مدل‌سازی هیدرولوژی و ژئومورفولوژی به منظور برآورد فرسایش خاک و تعیین تغییر شکل کانال رودخانه فراهم می‌کنند (هاتون و برازیئر، ۲۰۱۲). مارزولف و همکاران (۲۰۱۱) اقدام به پایش کوتاه‌مدت تا میان‌مدت گسترش آبکندها و تأثیر فعالیت‌های انسانی و تغییرپذیری فرسایش آبکندی در حوزه آبخیز منتخب دارای فرسایش آبکندی در اسپانیا نمودند. هشت آبکند فعال در حال پسروی واقع در حوزه‌های آبخیز اسپانیا تا ۱۱ سال با عکس‌های هوایی با رزولوشن بالا با استفاده پهپاد تحت پایش قرار گرفتند. نتایج تجزیه و تحلیل تغییرات تعیین سطح و حجم آبکندها با استفاده از سیستم‌های GIS و فتوگرامتری، تغییرات زیاد از میزان پسروی سالانه آبکند را هم بین آبکندها و هم بین دوره‌های مورد بررسی، نشان می‌دهد. به نظر می‌رسد تأثیرات متفاوت کاربری زمین و فعالیت‌های انسانی با تأثیرات مثبت یا منفی آن‌ها بر تولید و اتصال رواناب، مهم‌ترین نقش را در این مناطق مورد مطالعه، هم برای تغییرات کوتاه مدت و هم برای تغییرات میان مدت در توسعه آبکندها ایفا می‌کند. بیلنتال و همکاران (۲۰۱۹) اقدام به بررسی تغییرات مکانی و زمانی طول و تراکم

¹ Unmanned Aerial Vehicles

ساختاری زاگرس چین‌خورده قرار گرفته است. رخنمون‌های موجود در منطقه تنها بخشی از این پوشش رسوبی را که شامل واحدهای سنگ‌چینه‌ای دوران‌های پالئوزوئیک، مزوزوئیک و سنوزوئیک را در بر می‌گیرد. سری هرمز (پرکامبرین پسین-کامبرین پیشین) شامل انواع سنگ‌های آذرین و رسوبی کهن‌ترین توالی سنگی در غرب ناحیه مورد مطالعه است. دیگر واحدهای زمین‌شناسی حوزه به ترتیب قدمت شامل سازند پایده-گورپی، سازند آسماری-جهرم، واحدهای سازند گچساران، آهک‌های گوری، مارن‌های میشان و سازندهای تخریبی آگاجاری و بختیاری می‌باشد. نهشته‌های منفصل کواترنری نیز بخش عمده حوزه را در نیمه شرقی و شمال حوزه در بر گرفته است. نهشته‌های پادگانه‌ای آبرفتی (مخروط‌افکنه و رودخانه) عهد حاضر با گسترشی بالغ بر ۵۶۶۵ هکتار دارای بیش‌ترین گسترش سطحی در حوزه آبخیز می‌باشد و سازند پایده-گورپی با گسترشی در حدود ۱۷۵ هکتار کم‌ترین سطح را به خود اختصاص داده‌اند.

۲-۲- پیشینه آبکندها

گسترش آبکندها در سال ۱۳۴۶: برای تهیه نقشه آبکندها در سال ۱۳۴۶، از عکس‌های هوایی سازمان نقشه‌برداری کشور مربوط به این سال با مقیاس ۱:۲۰۰۰۰ استفاده شده است. عکس‌های هوایی مورد استفاده شامل بلوک‌های شماره B437 و B437 و هرکدام از بلوک‌ها شامل ۲۳ قطعه عکس بوده است. عکس‌های هوایی با استفاده از تکنیک اورتوفتو به صورت زمین مرجع تهیه شده و با استفاده از نرم‌افزار Arc GIS 10.8 و ابزار editor از طریق مشاهده چشمی، آبکندها به صورت رقومی استخراج شده و نقشه آبکندها در سال ۱۳۴۶ تهیه شد.

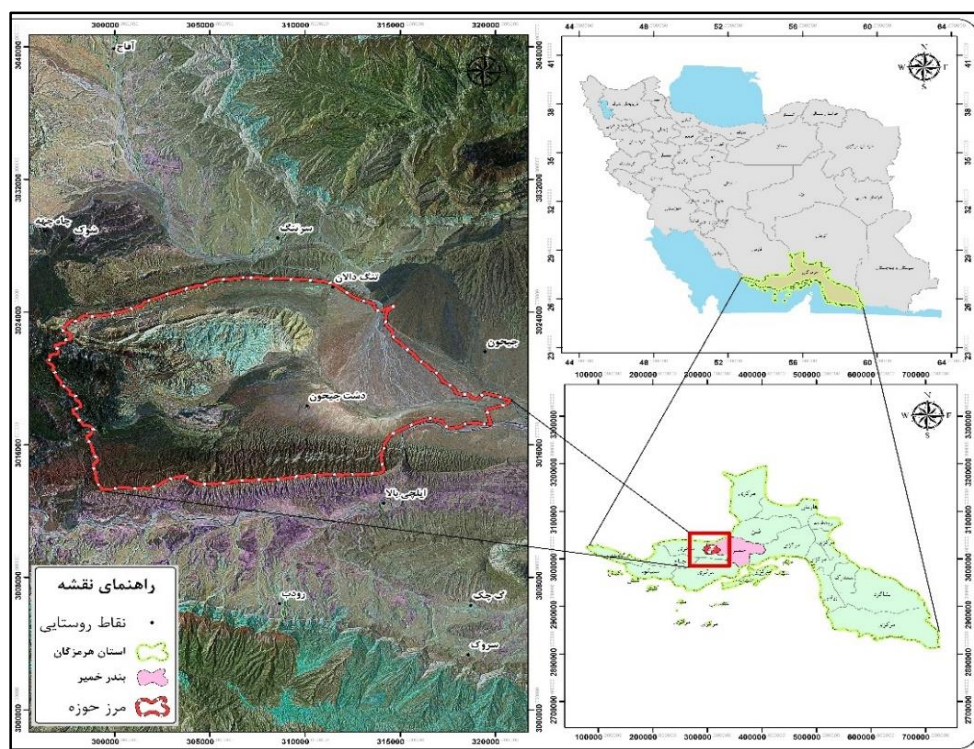
گسترش آبکندها در سال ۱۳۷۳: به منظور تهیه نقشه آبکندها در سال ۱۳۷۳، از عکس‌های هوایی سازمان نقشه‌برداری کشور با مقیاس ۱:۴۰۰۰۰ استفاده شده است. عکس‌های هوایی مورد استفاده شامل بلوک شماره B115 به تعداد ۲۰ قطعه عکس بوده است. در این مرحله نیز همانند دوره قبل عکس‌های هوایی با استفاده از تکنیک اورتوفتو به صورت زمین مرجع تهیه شده و با استفاده از نرم‌افزار Arc GIS 10.8 و ابزار editor از طریق مشاهده چشمی، آبکندها به صورت رقومی استخراج شده و نقشه آبکندها در سال ۱۳۷۳ تهیه شد.

در بدلندهای چمبال در هند مرکزی اقدام به بررسی حجم و نرخ فرسایش آبکندی نمودند. در این مطالعه استفاده از افزونه چندزمانی TerraSAR-X برای مدل‌های ارتفاعی بر گرفته از اندازه‌گیری ارتفاع (TanDEM-X) برای تعیین کمیت حجم فرسایش و تهیه نقشه حساسیت آبکند در مناطق بدلند چامبال در هند مرکزی مورد بررسی قرار گرفته است. متوسط حجم فرسایش آبکندی بر اساس روش تفریق DEM در منطقه مورد مطالعه 10.5×135 مترمکعب و نرخ تخمینی فرسایش خاک ۲۸۴ تن در هکتار در سال بوده است. نتایج مدل‌سازی نشان داد حدود ۴۰ درصد از منطقه به شدت تحت‌تاثیر فرسایش آبکندی قرار می‌گیرد. مدل‌های تجربی فرسایش خاک با نیاز داده‌ای کم، طراحی شده‌اند (نیگل و روگهوپوت، ۲۰۱۰). مدل RUSLE به طور گسترده‌ای در سراسر جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد (آمور و همکاران، ۲۰۰۴). گتو و همکاران (۲۰۲۲) به برآورد شدت فرسایش با استفاده از مدل RUSLE و GIS در حوزه آبخیز مگج، اتیوپی پرداختند. نتایج نشان داد میانگین سالانه هدررفت خاک حوزه ۳۲/۸۴ تن در هکتار در سال می‌باشد. از طرف دیگر مدل WaTEM/SEDEM مدل فرسایش خاک و رسوب‌دهی با توزیع مکانی می‌باشد. این مدل براساس معادله تجدیدنظرشده جهانی هدررفت خاک (RUSLE) استوار است و جهت پیش‌بینی تحویل رسوب در شبکه زهکشی از معادله ظرفیت انتقال رسوب استفاده می‌نماید (ورستران و همکاران، ۲۰۰۲).

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- ویژگی‌های جغرافیایی و زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه

حوزه آبخیز جیحون به مساحت ۲۰۲۷۶/۷۶ هکتار در مختصات جغرافیایی $35^{\circ} 56'$ تا $54^{\circ} 21'$ طول شرقی و $39^{\circ} 13'$ تا $27^{\circ} 40'$ عرض شمالی قرار دارد. بیش‌ترین و کم‌ترین ارتفاع منطقه به ترتیب ۱۲۲۹/۷۳ و ۲۹۷/۸۸ متر است. حوزه آبخیز جیحون در استان هرمزگان و شهرستان بندرخمیر واقع شده است. روستاهای داخل منطقه شامل دشت جیحون و تنگه دالان می‌باشد. شکل (۱) موقعیت منطقه مورد مطالعه را در کشور و استان هرمزگان نشان می‌دهد. بر اساس موقعیت جغرافیایی حوزه آبخیز مورد بررسی پهنه رسوبی-



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه
Fig. 1. Location of the Study Area

این پرنده در یک ساعت پرواز با دوربین ۴۲ مگاپیکسلی به صورت زیر است:

- نقشه برداری با $GSD = 3 \text{ cm}$ ارتفاع پروازی ۲۳۰ متر، ۲۰۰ تا ۲۵۰ هکتار در هر پرواز
- نقشه برداری با $GSD = 5 \text{ cm}$ ارتفاع پروازی ۳۸۰ متر، ۴۵۰ تا ۵۰۰ هکتار در هر پرواز
- نقشه برداری با $GSD = 8 \text{ cm}$ ارتفاع پروازی ۶۲۰ متر، ۱۰۰۰ تا ۱۲۰۰ هکتار در هر پرواز

تصویربرداری با پهپاد در مجموع در سطح ۲۴۸۶ هکتار از منطقه صورت گرفته است. محدوده تصویربرداری شده شامل محدوده گسترش آبکندها بوده است (شکل ۳).

۳- بحث و نتایج

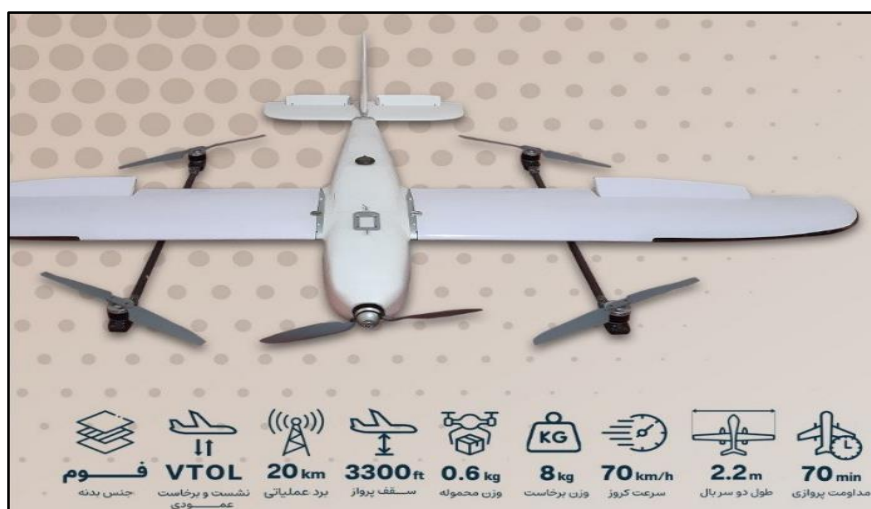
کیفیت بالای تصاویر اخذ شده با پهپاد و ارتوفتوی تهیه شده، امکان شناسایی دقیق وضعیت آبکندهای منطقه را فراهم نمود. عملیات پرواز پهپاد و تصویربرداری هوایی از یک ایستگاه کنترل زمینی (شکل ۴-۱) انجام شد و به طور موازی عملیات مشاهده نقاط چک و کنترل زمینی توسط تیم مربوطه انجام پذیرفت. وظیفه اصلی ایستگاه کنترل زمینی شامل کنترل و هدایت پهپاد در خطوط طراحی جهت تصویربرداری هوایی می‌باشد. از دیگر وظایف ایستگاه

گسترش آبکندها در سال ۱۳۹۱: جهت تهیه نقشه آبکندها در سال ۱۳۹۱ از تصاویر تاریخی گوگل ارث استفاده شده است. تصاویر محدوده به صورت زمین مرجع دانلود شده و با استفاده از نرم‌افزار Arc GIS 10.8 و ابزار editor از طریق مشاهده چشمی، آبکندها به صورت رقمی استخراج شده و نقشه آبکندها در سال ۱۳۹۱ استخراج گردید.

گسترش آبکندها در سال ۱۴۰۲: با هدف تهیه نقشه پیشروی آبکندها در سال ۱۴۰۲، از تصاویر پهپاد استفاده گردید. پهپاد مورد استفاده با عنوان SAHAB E2- Vertical Take-off and Landing Fixedwing (شکل ۲ و شکل ۴-۱)، از نوع بال ثابت عمود پرواز و ساخت کشور چین بوده، که در حال حاضر یکی از بهترین هواگردهای نقشه برداری هوایی در ایران است. این پرنده قابلیت نشست و برخاست عمودی دارد و به همین دلیل برای پرواز نیازی به باند پرواز ندارد. همچنین مهم‌ترین ریسک پرواز در فازهای نشست و برخاست به حداقل خواهد رسید و نیاز به خلبان حرفه‌ای برای پرواز نیز از بین خواهد رفت. تعریف ماموریت در این پرنده کاملاً خودکار است. توانایی پرواز تا ۷۵ دقیقه به صورت رکورد و ۶۰ دقیقه عملیاتی را دارد. دوربین‌های این پهپاد از نوع ۴۲ مگاپیکسل و ۶۰ مگاپیکسل است. به صورت حدودی قدرت تصویربرداری

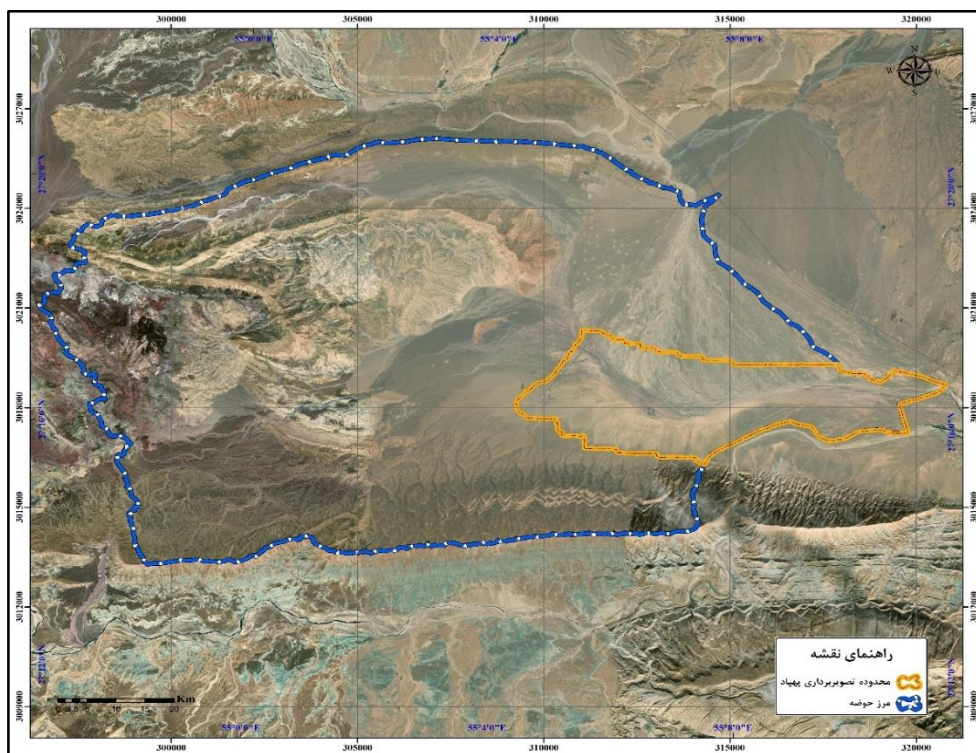
تصویری نظیر ارتوفتوموزائیک، DSM، DTM و PointCloud در دستور کار قرار گرفت. نرم‌افزارهای پردازشی در این حوزه از تنوع بالایی برخوردارند. به همین دلیل، برای تهیه خروجی‌هایی با کیفیت هندسی و بصری بالا و بهره‌مندی از سرعت بالای پردازش، از نرم‌افزار Agisoft Metashape جهت تهیه خروجی‌های مورد نیاز استفاده شد. استخراج آب‌کندها با استفاده از تفسیر بصری و از روی ارتوفتونی تهیه شده از تصاویر پهپاد صورت گرفت.

کنترل زمینی می‌توان به رصد شرایط محیطی پرواز مانند میزان و جهت باد و میزان روشنایی اشاره نمود تا از کاهش دقت بر اثر این عوامل بر روی دقت نهایی خروجی‌ها جلوگیری گردد. یک گیرنده GNSS به عنوان ایستگاه مرجع (شکل ۴-د) جهت استفاده در محاسبه مراکز تصویر به روش PPK در ایستگاه کنترل زمینی جهت برداشت اطلاعات موقعیت در مد استاتیک استقرار داده شد. پس از اتمام عملیات میدانی تصویربرداری با پهپاد با ۳ GSD سانتی‌متر، پردازش تصاویر جهت دستیابی به خروجی‌های



شکل ۲. تصویر و مشخصات پهپاد SAHAB E2- Vertical Take-off and Landing Fixed wing

Fig. 2. Image and Specifications of the SAHAB E2 Drone - Vertical Take-off and Landing Fixed-Wing



شکل ۳. محدوده تصویربرداری پهپاد

Fig. 3. Drone Imaging Area



شکل ۴. تصاویری از مراحل تصویربرداری با پهپاد (a: پهپاد SAHAB E2 مورد استفاده در تصویربرداری، b: آماده‌سازی پهپاد جهت پرواز، c: تصویر پهپاد از ایستگاه کنترل زمینی و d: گیرنده GNSS برداشت استاتیک به عنوان مرجع محاسبات PPK)

Fig. 4. Images of UAV Imaging Stages (a: SAHAB E2 Drone Used for Imaging, b: Preparing the Drone for Flight, c: Drone Image from the Ground Control Station, and d: GNSS Receiver for Static Surveying as the Reference for PPK Calculations)

استفاده شد. عامل فرساینده بر حسب مگاژول میلی‌متر بر هکتار ساعت سال (MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ y⁻¹) از معادله رینارد و فریموند (۱۹۹۴) برآورد گردید:

$$R - Factor = 0.07397MF^{1.847} \quad (1)$$

که در آن، MF شاخص فورنیه اصلاح شده است و از معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$MF = \frac{\sum_{i=1}^{12} P_i^2}{P} \quad (2)$$

که در آن، MF شاخص فورنیه اصلاح شده، Pi بارش ماهانه و P متوسط بارندگی در دوره‌ی ۲۳ ساله می‌باشد.

عامل پوشش گیاهی (C): در منطقه مورد مطالعه عامل C با استفاده از شاخص SAVI (معادله ۴) که متناسب با مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌باشد، محاسبه و نقشه آن در محیط ArcMap تهیه گردید.

$$SAVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED + L} (1 + L) \quad (3)$$

که در آن، SAVI شاخص گیاهی با تعدیل اثر خاک، NIR میزان انعکاس تصویر در باند مادون قرمز نزدیک، RED میزان انعکاس تصویر در باند قرمز و L فاکتور تصحیح برای تراکم‌های مختلف پوشش گیاهی بعد از محاسبه شاخص‌های گیاهی تصاویر ماهواره‌ای در دو تاریخ متفاوت

۳-۱- برآورد مقدار فرسایش‌های سطحی با استفاده

از مدل WaTEM/SEDEM

برای برآورد میزان فرسایش‌های سطحی (ورقه‌ای و شیاری) در منطقه مورد مطالعه از مدل WaTEM/SEDEM، استفاده شد. ورودی‌های مدل عبارتند از: (۱) مدل رقومی ارتفاع (DEM): به منظور تهیه نقشه DEM کل محدوده از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری کشور استفاده شد. (۲) رتبه‌بندی آبراهه (Stream Order): جهت تهیه نقشه رتبه‌بندی آبراهه‌ها از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری کشور استفاده شد. به منظور رتبه‌بندی آبراهه‌ها نیز از متداول‌ترین روش یعنی روش استرالر استفاده شد. (۳) نقشه طبقه‌بندی اراضی (Parcel Map): این نقشه مجموع نقشه کاربری اراضی و نقشه رودخانه‌های منطقه می‌باشد که طبق راهنمای مدل برای هر طبقه کد مخصوص به خود (مناطق مسکونی و غیرقابل فرسایش: ۱- رودخانه و آبراهه: ۲- مناطق خارج از محدوده: صفر، اراضی کشاورزی: ۱۰، باغات: ۱۰۰۰۰ و مراتع: ۲۰۰۰۰، اختصاص پیدا می‌کند و پارامترهای مدل RUSLE شامل: (۴) فرساینده‌ی باران (R): برای برآورد فرساینده‌ی باران از آمار بارندگی ۲۳ ساله ایستگاه‌های تنگ دالان و ایلچی

۳-۳- برآورد مقدار فرسایش آبکندی با استفاده از تصاویر پهپاد

به منظور برآورد مقدار فرسایش آبکندی در منطقه مورد مطالعه، از آبکندهای استخراج شده از تصاویر پهپاد استفاده شد. بدین منظور ویژگی‌های مورفومتری آبکندها شامل عمق با استفاده از DSM پهپاد و در نرم‌افزار Global Mapper در ۴۸۱ نقطه از آبکندها اندازه‌گیری شد. جهت تعیین کل هدر رفت خاک ناشی از فرسایش آبکندی از متوسط عمق و گسترش سطحی آبکندها شد. هم‌چنین جهت تعیین تناژ فرسایش آبکندی از مقدار گسترش فرسایش آبکندی در بازه زمانی ۱۳۷۷ تا ۱۴۰۲ استفاده شد. بدین منظور نقشه گسترش آبکندها در سال ۱۳۷۷ با استفاده از عکس‌های هوایی سازمان نقشه‌برداری با مقیاس ۱:۲۰۰۰۰ تهیه و با نقشه گسترش آبکندها در سال ۱۴۰۲ مقایسه و میزان گسترش آبکندها محاسبه گردید. سپس با استفاده از متوسط عمق و گسترش سطحی آبکندها مقدار تناژ فرسایش آبکندی برآورد شدند.

۴-۳- نتایج بررسی گسترش آبکندها

برای تهیه نقشه آبکندها و هم‌چنین مقایسه پیشروی آبکندهای منطقه در دوره‌های زمانی مختلف، از عکس‌های هوایی با مقیاس ۱:۲۰۰۰۰ در سال ۱۳۴۶، عکس‌های هوایی با مقیاس ۱:۴۰۰۰۰ در سال ۱۳۷۳، تصاویر تاریخی ماهواره‌ای گوگل‌ارث در سال ۱۳۹۱، و تصاویر پهپاد سحاب E2 با GSD ۳ تا ۶ سانتی‌متر در سال ۱۴۰۲ استفاده شده است. بر اساس نتایج حاصل، سطح آبکندهای حوضه در سال ۱۳۴۶، برابر با ۱۳۲/۶۴ هکتار بوده است که این آبکندها به عبارتی ۰/۶۵ درصد از سطح حوزه آبخیز جیحون را در بر گرفته است. هم‌چنین، سطح آبکندهای حوضه در سال ۱۳۷۳، برابر با ۱۶۷/۳۲ هکتار بوده است که این آبکندها در سال ۱۳۷۳، ۰/۸۳ درصد از سطح حوزه آبخیز جیحون را در بر گرفته است. سطح آبکندهای حوضه در سال ۱۳۹۱، برابر با ۲۴۷/۳۶ هکتار بوده و در سال، آبکندها ۱/۲۲ درصد از سطح حوزه آبخیز جیحون را در بر گرفته است. سطح آبکندهای استخراج شده از تصاویر پهپاد در حوضه در سال ۱۴۰۲، برابر با ۳۲۶/۳۹ هکتار بوده است. از سوی دیگر در سال ۱۴۰۲، آبکندها ۱/۶۱ درصد از سطح حوزه آبخیز جیحون را در بر گرفته است (شکل ۵ و جدول ۱).

از صفر تا یک تعیین می‌شود، عدد صفر نشان‌دهنده منطقه با پوشش گیاهی بالا، ۰/۵ مختص پوشش گیاهی متوسط و عدد یک برای مناطق با پوشش گیاهی خیلی کم می‌باشد.

$$C = \frac{(1 - SAVI)}{2} \quad (4)$$

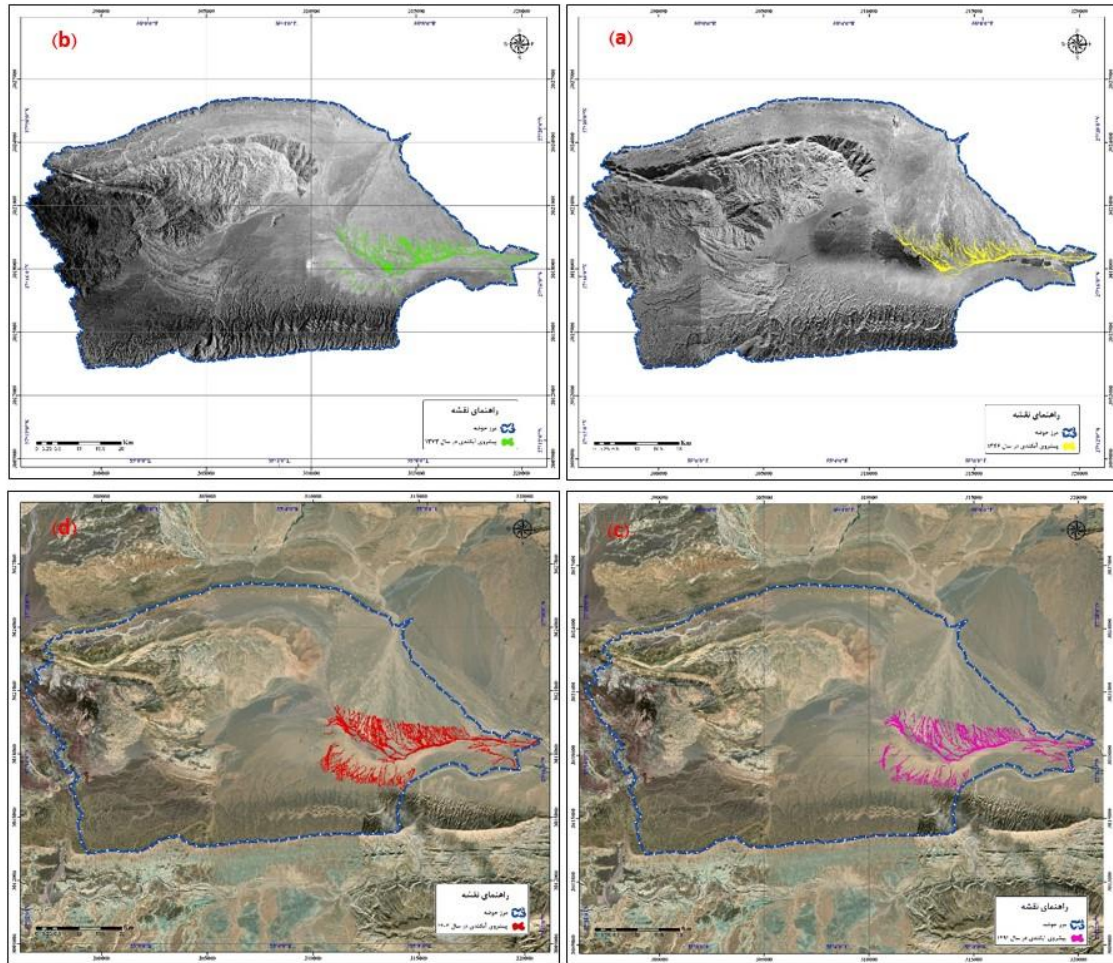
در اینجا نیز C عامل پوشش گیاهی و SAVI شاخص گیاهی مذکور است. (۶) عامل فرسایش‌پذیری خاک (K): عامل فرسایش‌پذیری خاک بر اساس نقاط مطالعاتی پروفیل‌های مطالعه خاک‌شناسی (ایده‌پردازان توسعه، ۱۴۰۲) با استفاده از رابطه شارپ و ویلیامز (۱۹۹۷) (معادله ۵) برآورد شد:

$$K = \left(0.2 + 0.3e^{-0.0256SAN(1-\frac{SIL}{100})} \right) \times \left(\frac{SIL}{CLA+SIL} \right)^{0.3} \times \left[1 - \frac{0.25C}{C + e^{(3.72-2.95C)}} \right] \times \left[1 - \frac{0.7SN_1}{SN_1 + e^{(22.9SN_1-5.51)}} \right] \quad (5)$$

که در آن، SAN درصد شن و ماسه، درصد ماده آلی، SIL درصد سیلت، $SN_1 = (1 - SAN/100)$ ، CLA، درصد رس و OM درصد ماده آلی می‌باشد. (۷) عامل توپوگرافی (LS): عامل توپوگرافی با استفاده از نقشه DEM و در نرم‌افزار SAGA GIS تهیه شد. (۸) عامل حفاظتی (P): این عامل که نشان‌دهنده عملکرد حفاظتی می‌باشد با استفاده از نظر کارشناسی تعیین گردید. نقشه‌های پارامترهای ورودی مدل پس از تهیه در محیط نرم‌افزار ArcMap، به فرمت ورودی ایدرسی (*.rst) درآمدند. در این مدل لازم است کل داده‌های ورودی دارای پیکسل سایز یکسان ۲۰ در ۲۰ متر و تعداد ردیف و ستون‌های برابر بوده، به نحوی که تمام سلول‌ها کاملاً بر هم منطبق باشند.

۲-۳- تهیه نقشه واحدهای همگن فرسایش‌های سطحی با استفاده از مدل RUSLE

مدل RUSLE (رنارد و همکاران، ۱۹۹۴) طبق مطالعات انجام شده از توسعه معادله جهانی هدررفت خاک که جهت برآورد نرخ فرسایش شیاری و ورقه‌ای در اراضی کشاورزی توسط ویشمایر و اسمیت (۱۹۷۸)، در ۲۶ ایالت آمریکا با جمع‌آوری اطلاعات فرسایش خاک از ۳۶ ایستگاه تحقیقاتی به دست آمده بود، حاصل شده است. در این مدل پس از ضرب لایه‌ها در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.8، مقدار متوسط هدررفت خاک بر حسب تن بر هکتار به دست آمد.



شکل ۵. نقشه گسترش آبکندها در سال‌های a- ۱۳۴۶، b- ۱۳۷۳، c- ۱۳۹۱ و d- ۱۴۰۲
 Fig. 5. Map of Gully Expansion in the Years a- 1967, b- 1994, c- 2012, and d- 2023

جدول ۱. سطح آبکندها در سال‌های مختلف

Table 1. Area of Gullies in Different Years

سال	مساحت آبکندها (هکتار)	درصد از مساحت حوضه
۱۳۴۶	۱۳۲/۶۴	۰/۶۵
۱۳۷۳	۱۶۷/۳۲	۰/۸۳
۱۳۹۱	۲۴۷/۳۶	۱/۲۲
۱۴۰۲	۳۲۶/۳۹	۱/۶۱

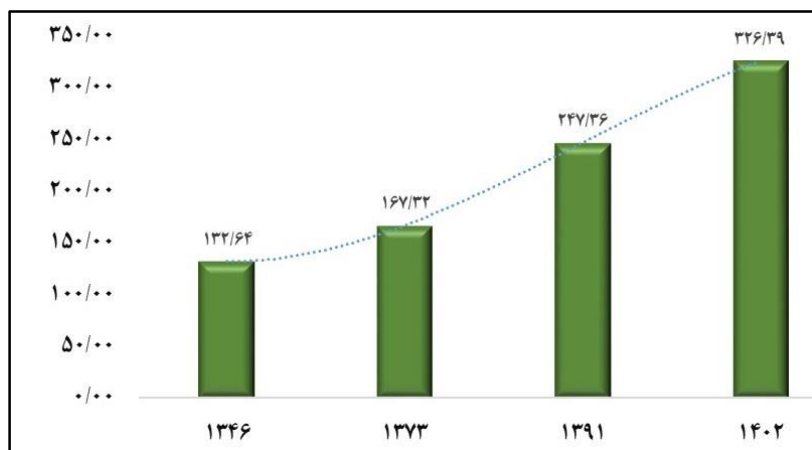


شکل ۶. تصاویر پهپاد از آبکندهای منطقه مورد مطالعه
 Fig. 6. Drone Images of Gullies in the Study Area

۳-۵- تعیین نرخ رشد آبکندها در سری‌های زمانی مختلف
 نرخ پیشروی آبکندها در حوزه آبخیز جیحون به صورت پیشروی سطحی بررسی شده است. بر این اساس پیشروی در حد فاصل سال‌های ۱۳۴۶ تا ۱۳۷۳، ۱۳۷۳ تا ۱۳۹۱، ۱۳۹۱ تا ۱۴۰۲ و نهایتاً در کل دوره زمانی ۵۶ ساله (۱۳۴۶ تا ۱۴۰۲) بررسی و در جداول (۲) تا (۵) و شکل (۷) آورده شده است.

۳-۶- برآورد مقدار فرسایش و رسوب ناشی از فرسایش‌های سطحی و آبکندی
 جهت تعیین فرسایش‌های سطحی از مدل‌های WaTEM/SEDEM و RUSLE استفاده شد. نقشه‌های پارامترهای ورودی مدل‌های WaTEM/SEDEM و

RUSLE که در محیط نرم‌افزار ArcMap تهیه شده است در شکل ۸ نشان داده شده است. با اجرای مدل WaTEM/SEDEM 2004 برای متوسط دوره‌ی ۲۳ ساله و همچنین سال‌های پربارش (اوج فرسایندگی) متوسط هدررفت خاک و رسوبدهی ناشی از فرسایش‌های سطحی محاسبه شد که نتایج حاصل در جدول (۶) آمده است. در مدل RUSLE پس از ضرب لایه‌ها در محیط نرم‌افزار ArcMap، مقدار متوسط هدررفت خاک طبق (شکل ۹) ۳/۳ تن بر هکتار به دست آمد. بر اساس این نقشه، مناطق با فرسایش کلاس A ۰-۲ تن در هکتار در سال، مناطق با فرسایش کلاس B ۲-۵ تن در هکتار در سال، مناطق با فرسایش کلاس C ۵-۸ تن در هکتار در سال، مناطق با فرسایش کلاس D ۸-۱۰ تن در هکتار در سال و مناطق E ۱۰-۱۳ تن در هکتار در سال فرسایش دارند.



شکل ۷. روند گسترش آبکندهای گستره مورد مطالعه در بازه‌های زمانی مورد بررسی

Fig. 7. Trends in Gully Expansion in the Study Area over the Examined Time Periods

جدول ۲. نرخ پیشروی آبکندی در فاصله زمانی ۱۳۴۶ تا ۱۳۷۳

Table 2. Rate of Gully Expansion from 1967 to 1994

نرخ پیشروی (مترمربع در سال)	نرخ پیشروی (هکتار در سال)	سطح پیشروی (هکتار)	سطح آبکندها در سال ۱۳۷۳ (هکتار)	سطح آبکندها در سال ۱۳۴۶ (هکتار)
۱۲۸۴۷	۱/۲۸	۳۴/۶۹	۱۶۷/۳۲	۱۳۲/۶۴

جدول ۳. نرخ پیشروی آبکندی در فاصله زمانی ۱۳۷۳ تا ۱۳۹۱

Table 3. Rate of Gully Expansion from 1994 to 2012

نرخ پیشروی (مترمربع در سال)	نرخ پیشروی (هکتار در سال)	سطح پیشروی (هکتار)	سطح آبکندها در سال ۱۳۹۱ (هکتار)	سطح آبکندها در سال ۱۳۷۳ (هکتار)
۴۴۴۶۵	۴/۴۵	۸۰/۰۴	۲۴۷/۳۶	۱۶۷/۳۲

جدول ۴. نرخ پیشروی آبکندی در فاصله زمانی ۱۳۹۱ تا ۱۴۰۲

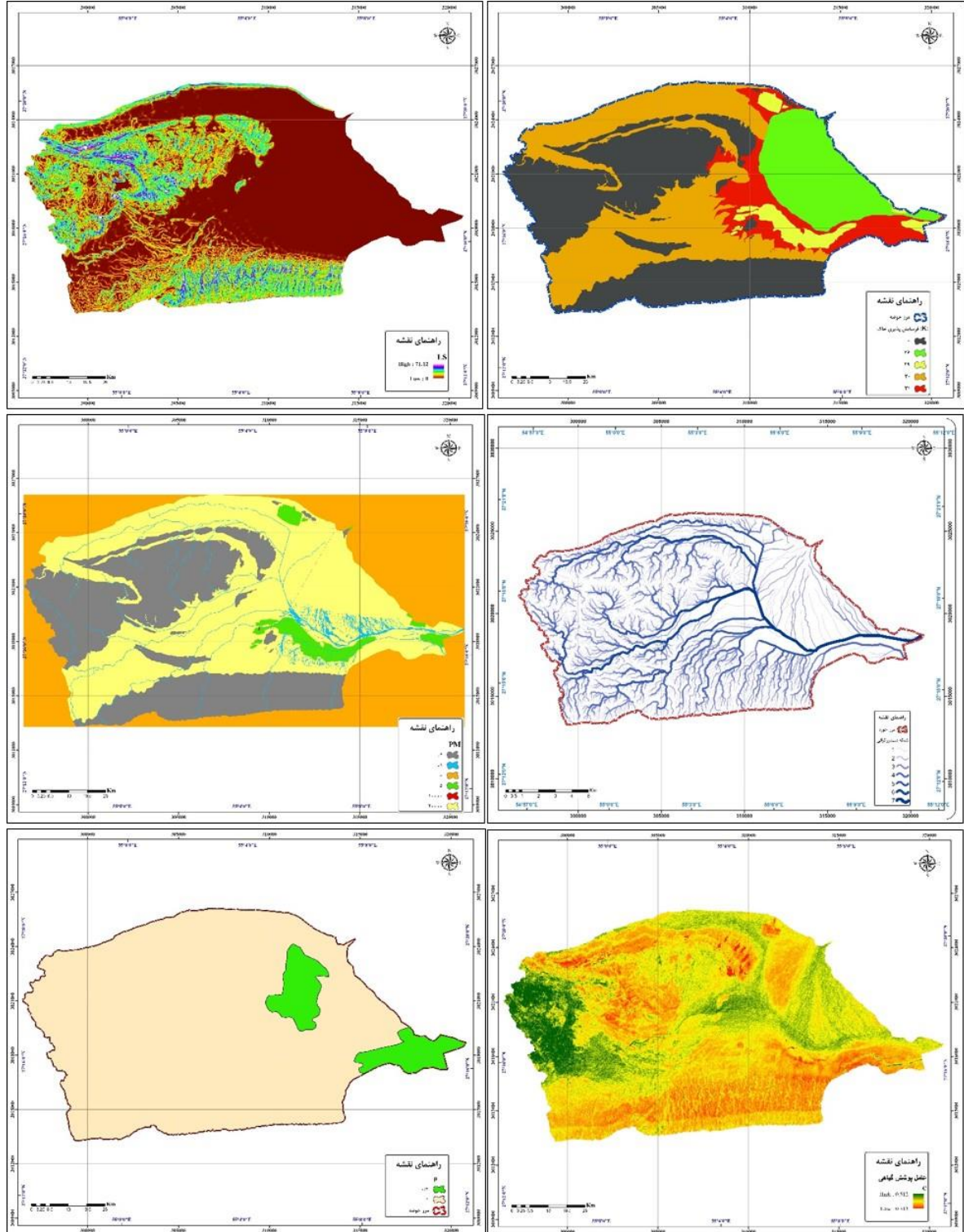
Table 4. Rate of Gully Expansion from 2012 to 2023

نرخ پیشروی (مترمربع در سال)	نرخ پیشروی (هکتار در سال)	سطح پیشروی (هکتار)	سطح آبکندها در سال ۱۴۰۲ (هکتار)	سطح آبکندها در سال ۱۳۹۱ (هکتار)
۷۱۸۴۵	۷/۱۸	۷۹/۰۳	۳۲۶/۳۹	۲۴۷/۳۶

جدول ۵. نرخ پیشروی آبکندهی در فاصله زمانی ۱۳۴۶ تا ۱۴۰۲

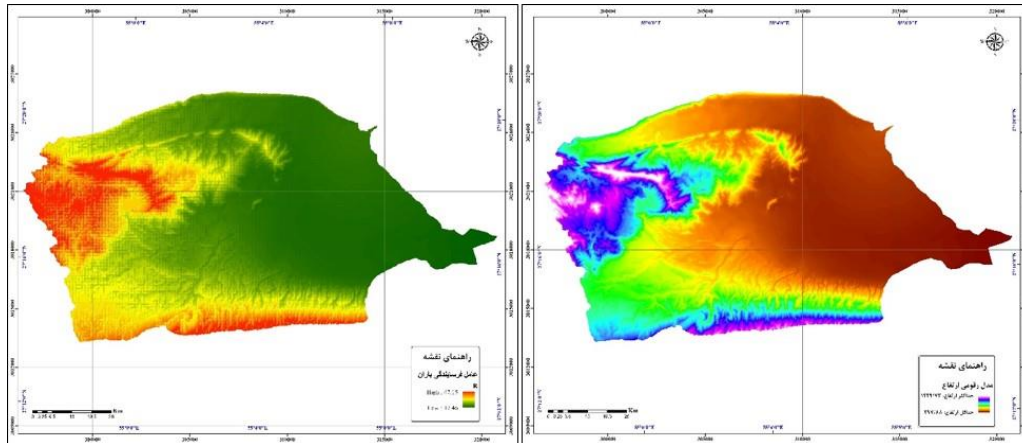
Table 5. Rate of Gully Expansion from 1967 to 2023

نرخ پیشروی (مترمربع در سال)	نرخ پیشروی (هکتار در سال)	سطح پیشروی (هکتار)	سطح آبکندها در سال ۱۴۰۲ (هکتار)	سطح آبکندها در سال ۱۳۴۶ (هکتار)
۳۴۵۹۸	۳/۴۶	۱۹۳/۷۵	۳۲۶/۳۹	۱۳۲/۶۴



شکل ۸. ورودی‌های مدل‌های WaTEM/SEDEM و RUSLE

Fig. 8. Continuation. Inputs for the WaTEM/SEDEM and RUSLE Models



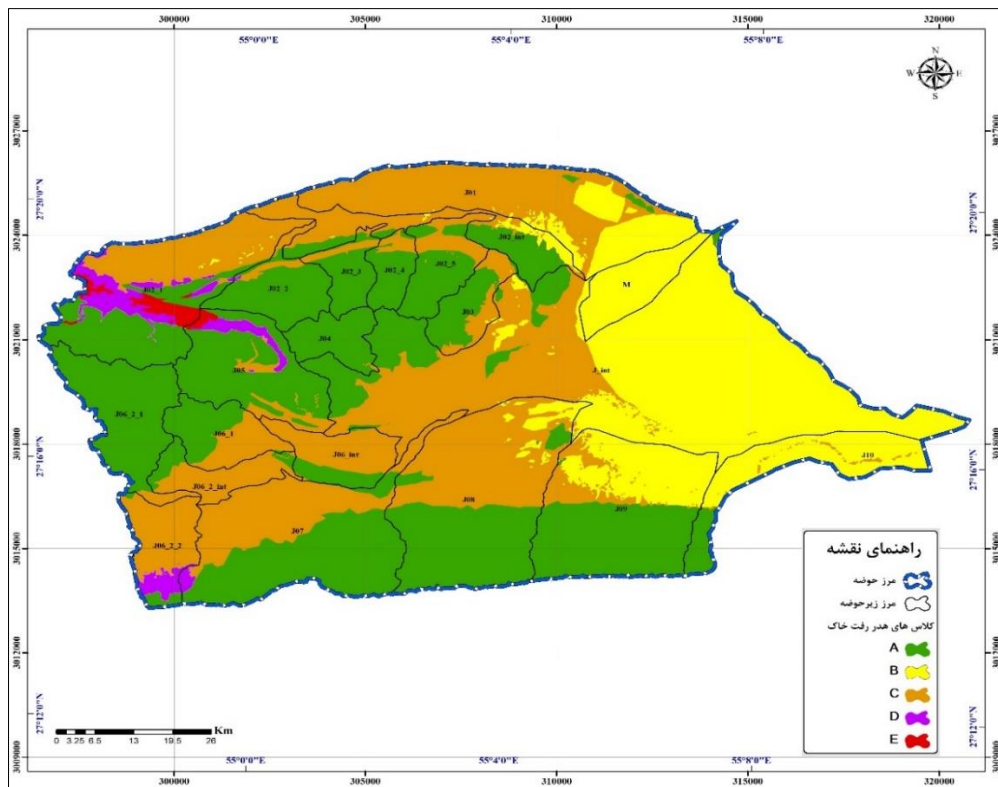
ادامه شکل ۸. ورودی‌های مدل‌های WaTEM/SEDEM و RUSLE

Fig. 8. Continuation. Inputs for the WaTEM/SEDEM and RUSLE Models

جدول ۶. متوسط فرسایش و رسوبدهی ناشی از فرسایش‌های سطحی

Table 6. Average Erosion and Sediment Yield from Surface Erosions

دوره زمانی	مقدار فرسایش (t ha-1)	رسوب خروجی از رودخانه (t ha-1)
۱۳۸۴-۱۳۸۳	۷/۴۹	۰/۸۳
۱۳۸۸-۱۳۸۷	۸/۸۵	۰/۹۸
۱۳۹۵-۱۳۹۴	۵/۴۵	۰/۶۰
۱۳۹۶-۱۳۹۵	۱۴/۳۰	۱/۵۸
۱۳۹۸-۱۳۹۷	۳/۷۴	۰/۴۱
۱۳۹۹-۱۳۹۸	۶/۴۷	۰/۷۱
متوسط دوره‌ی ۲۳ ساله	۳/۴۰	۰/۳۸

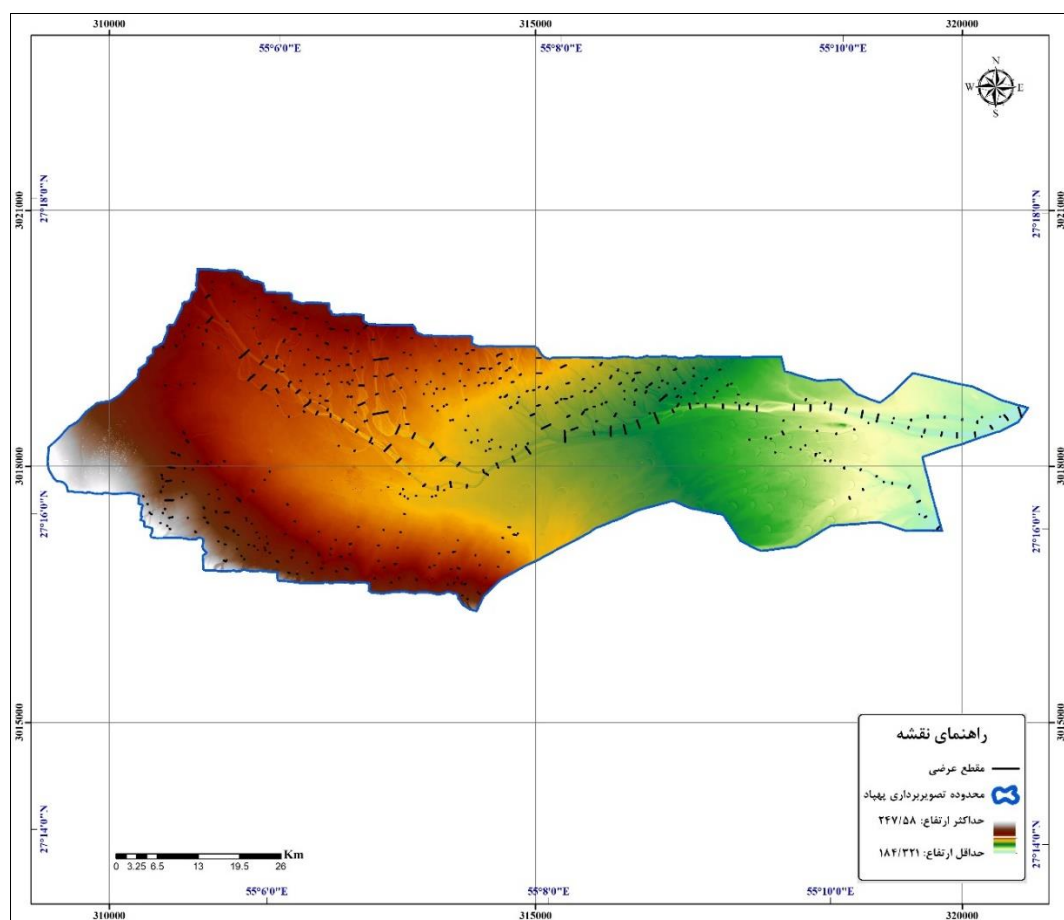


شکل ۹. کلاس‌های هدر رفت خاک ناشی از فرسایش‌های سطحی (مدل RUSLE)

Fig. 9. Soil Erosion Loss Classes from Surface Erosions (RUSLE Model)

عمق آبکند و شیب دیواره‌های آبکندها استخراج شده است. در مجموع در کل آبکندهای حوضه ۴۸۰ مقطع عرضی اندازه‌گیری شده است (شکل ۱۰). لازم به ذکر است به توجه به وجود DEM پهباد با دقت ۶ سانتی‌متر از کلیه آبکندهای حوضه، استخراج کلیه مقاطع عرضی با استفاده از این DEM و در محیط نرم‌افزار Global Mapper صورت پذیرفت.

همانگونه که بیان شد جهت تعیین فرسایش آبکندی از ویژگی‌های مورفومتریک آبکندها استفاده شد. به منظور اندازه‌گیری ویژگی‌های مورفومتریک آبکندهای حوضه، از سرشاخه‌های مختلف این آبکندها به فاصله ۲۰۰ متر اولین مقطع زده شده و سپس به فواصل ۲۰۰ متر برای کلیه سرشاخه‌ها و شاخه‌های اصلی کلیه آبکندها، مقاطع عرضی اندازه‌گیری و اطلاعات مربوط به عرض بالا، عرض پایین،

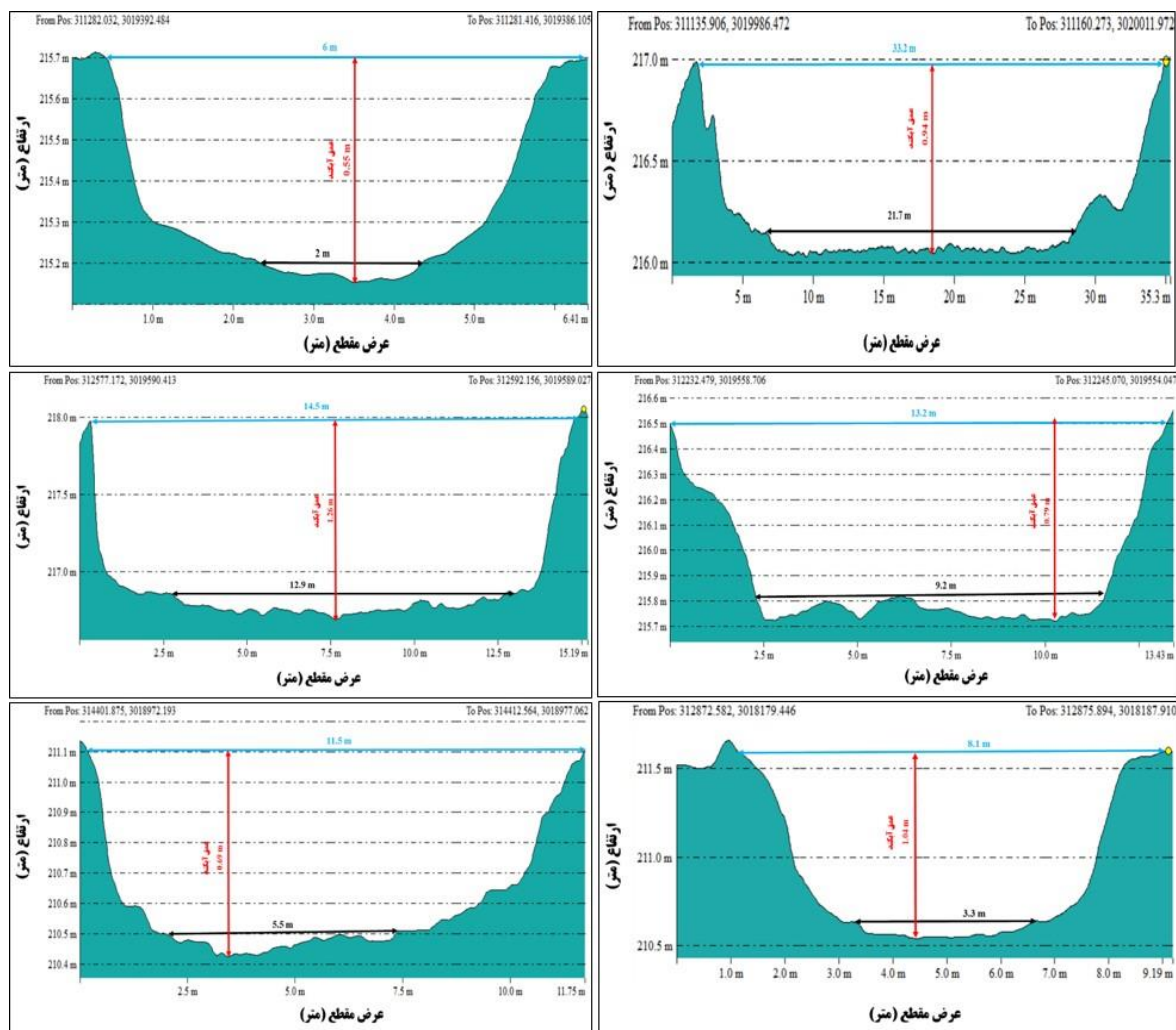


شکل ۱۰. موقعیت مقاطع عرضی بر روی DEM پهباد

Fig. 10. Location of Cross-Sections on the DEM Derived from Drone Images

پنجاهی، پلان عمومی آبکندهای منطقه بوده و پلان راس آبکندها با توجه به نوع پیشروی آبکندها متفاوت می‌باشد. پلان میانی و راس آبکندهای منطقه عمدتاً شاخه‌ای بوده و همین امر موجب پیشروی آبکندها از راس آن‌ها و همچنین به صورت شاخه شاخه از کناره آبراهه‌ها می‌گردد. با توجه به اینکه عمده آبکندهای حوضه در راستای آبراهه‌ها بوده و یا در مواردی آبراهه‌ها به مرور تبدیل به آبکند شده‌اند، پلان شاخه‌ای در آبکندهای منطقه به وضوح قابل مشاهده می‌باشد. و همچنین پلان ابتدایی آبکندهای قسمت جنوبی حوضه عموماً از نوع خطی است (شکل ۱۱).

آبکندها بر اساس پلان عمومی به انواع خطی، حبابی، شاخه‌ای، موازی، پنجاهی و مرکب تقسیم‌بندی می‌شوند. بر اساس بررسی آبکندها بر روی عکس‌های هوایی، تصاویر ماهواره‌ای و تصاویر پهباد، آبکندهای منطقه بر اساس پلان عمومی به سه دسته پلان پنجاهی، پلان شاخه‌ای و پلان خطی طبقه‌بندی می‌شوند. پلان عمومی شبکه آبکندهای منطقه عمدتاً به صورت پنجاهی می‌باشد و بیش‌تر مربوط به مناطق دشتی با شیب کم هستند که رواناب یا سیلاب تولیدی قادر به حرکت در سطح وسیع و ایجاد آبکند در نقاط مختلف و مرتبط و متصل به هم است. در نتیجه پلان



شکل ۱۱. نمونه‌هایی از مقاطع عرضی در آبکندهای منطقه و استخراج ویژگی‌های مورفومتریک

Fig. 11. Examples of Cross-Sections in the Gullies of the study area and Extraction of Morphometric Features

۴۸۱ نقطه اندازه‌گیری شده و نتایج این اندازه‌گیری نشان می‌دهد که متوسط عمق آبکندها ۱/۰۱ متر می‌باشد. بنابراین بر اساس طبقه‌بندی فائو آبکندهای حوزه آبخیز دشت جیحون جزو آبکندهای متوسط طبقه‌بندی می‌گردند، هم‌چنین بر مبنای طبقه‌بندی رفاهی (۱۳۸۵) آبکندهای منطقه در طبقه عمق کم‌تر از ۲ متر قرار گرفته و در دسته آبکندهای کوچک قرار می‌گیرند. بنابراین به طور کلی می‌توان گفت آبکندهای منطقه بیش‌تر آبکندهای کوچک و تا حدودی متوسط می‌باشند. آبکندهای منطقه از نوع آبکندهای دارای عرض بالا می‌باشند به طوری که متوسط عرض بالای آبکندها ۱۸ متر می‌باشد. هم‌چنین نسبت عرض بالا به عمق آبکندها بزرگ‌تر از ۱ هستند. این نسبت عرض به عمق نشان می‌دهد که عرض آبکندها بزرگ‌تر از عمق آن‌ها است و از نظر تخریب اراضی زراعی و روستاها و ابنیه حائز اهمیت هستند. نسبت عرض به عمق

اندازه‌گیری ویژگی‌های مورفومتریک یا شکل‌شناسی آبکندها شامل عمق، عرض بالا، عرض پایین، نسبت عرض به عمق و... اطلاعات ارزشمندی را در خصوص آبکندها فراهم می‌کند که از این اطلاعات به خصوص در زمینه اولویت‌بندی آبکندها به منظور اجرای اقدامات حفاظتی در جهت جلوگیری از پیشروی آبکندها می‌توان بهره جست. در منطقه مورد مطالعه همان‌گونه که بیان شد تصویربرداری با پهپاد در محدوده گسترش آبکندها و در سطح ۲۴۸۶ هکتار انجام شد و مدل رقومی ارتفاع (DEM) با دقت ۶ سانتی‌متر تهیه گردید. لذا با استفاده از این DEM می‌توان نسبت به استخراج اطلاعات مورفومتریک اقدام نمود. طبقه‌بندی آبکندها توسط پژوهشگران مختلفی معرفی شده است، که طبقه‌بندی فائو (۱۹۸۲) بر اساس عمق و مساحت و رفاهی (۱۳۸۵) آبکندها را بر اساس عمق می‌باشد. همان‌گونه که در بالا بیان شد عمق آبکندها در

فرسایش آبکندی در حوزه آبخیز جیحون، در جدول (۸) آورده شده است. با توجه به این جدول، مقدار کل حجم فرسایش آبکندی برابر با ۳/۲۹۶/۵۲۳ مترمکعب بوده که با فرض وزن مخصوص ۱/۵ برای خاک‌های منطقه، مقدار هدرفت خاک در اثر فرسایش آبکندی در حوضه، برابر با ۴/۹۴۴/۷۸۴ تن می‌باشد. بر اساس نتایج مدل RUSLE و برآورد فرسایش آبکندی نقشه شدت فرسایش در حوزه آبخیز دشت جیحون تهیه گردید (شکل ۱۲). حوزه آبخیز جیحون دارای ۵ کلاس فرسایشی می‌باشد.

با حرکت از پائین دست منطقه و آبکندها به سمت پیشانی آنها افزوده می‌گردد و در برخی از نقاط به نسبت‌های بزرگ‌تر از ۱۰ و حتی ۲۰ می‌رسد. متوسط نسبت عرض به عمق آبکندها در آبکندهای اندازه‌گیری شده، ۱۹/۰۱ می‌باشد. بررسی روند ۵۶ ساله گسترش آبکندهای حوزه آبخیز جیحون نشان می‌دهد در طی این ۵۶ سال این آبکندها ۱۹۳/۷۵ هکتار پیشروی داشته است که در اثر آن حجم خاکی معادل ۱/۹۵۶/۸۸۹ متر مکعب معادل ۲/۹۳۵/۳۳۳ تن فرسایش پیدا کرده و از دسترس خارج شده است (جدول ۷). مقدار کل هدرفت خاک در اثر

جدول ۷. برآورد فرسایش آبکندی در بازه زمانی ۵۶ ساله (۱۳۴۶ تا ۱۴۰۲)

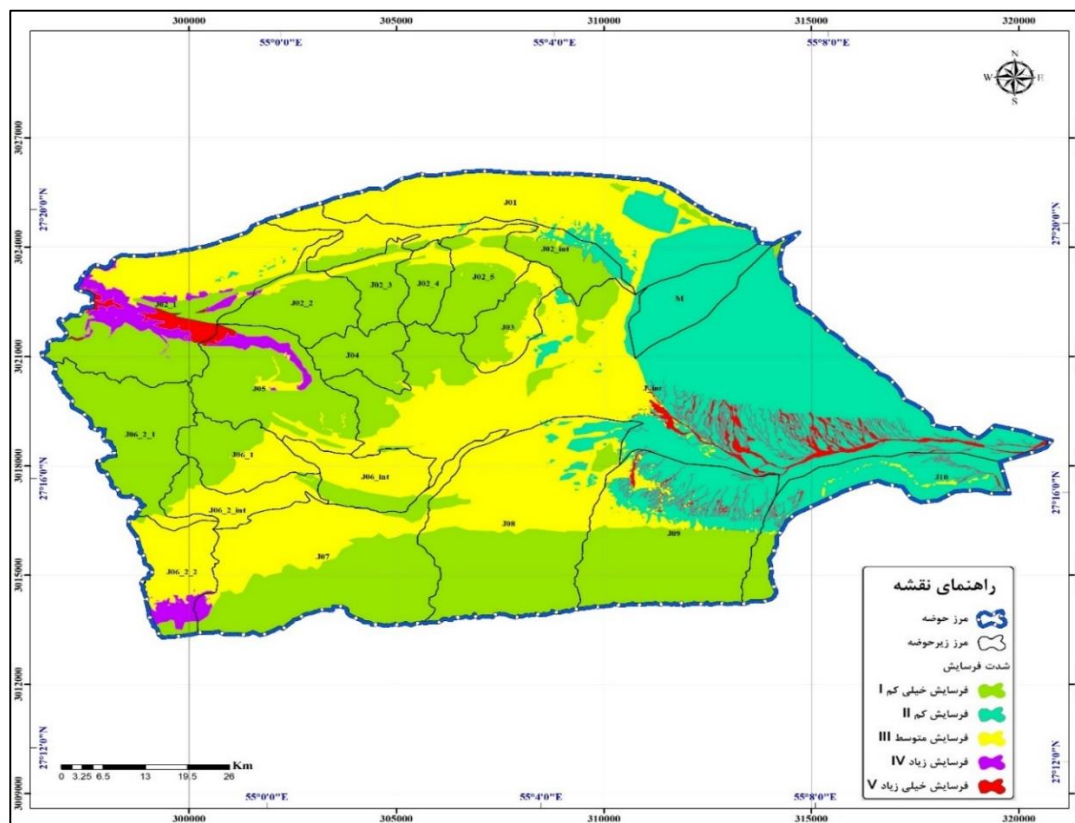
Table 7. Estimation of Gully Erosion over a 56-Year Period (1967 to 2023)

سطح آبکند در سال ۱۳۴۶ (هکتار)	سطح آبکند در سال ۱۴۰۲ (هکتار)	گسترش آبکندها بین سال‌های ۱۳۴۶ تا ۱۴۰۲ (هکتار)	گسترش آبکندها بین سال‌های ۱۳۴۶ تا ۱۴۰۲ (مترمربع)	میانگین عمق آبکند (متر)	حجم فرسایش آبکندی در سری زمانی ۱۳۴۶ تا ۱۴۰۲ (مترمکعب)	وزن خاک از دست رفته در سری زمانی ۱۳۴۶ تا ۱۴۰۲ (تن)
۱۳۲/۶۴	۳۲۶/۳۹	۱۹۳/۷۵	۱/۹۳۷/۵۱۳	۱/۰۱	۱/۹۵۶/۸۸۹	۲/۹۳۵/۳۳۳

جدول ۸. برآورد مقدار هدرفت خاک ناشی از فرسایش آبکندی در بازه زمانی ۵۶ ساله (۱۳۴۶ تا ۱۴۰۲)

Table 8. Estimation of Soil Loss from Gully Erosion over a 56-Year Period (1967 to 2023)

سطح آبکندهای حوضه (هکتار)	سطح آبکندهای حوضه (مترمربع)	میانگین عمق آبکند (متر)	حجم فرسایش آبکندی (مترمکعب)	مقدار هدرفت خاک (تن)
۳۲۶/۳۹	۳/۲۶۳/۸۸۴	۱/۰۱	۳/۲۹۶/۵۲۳	۴/۹۴۴/۷۸۴



شکل ۱۲. نقشه شدت فرسایش

Fig. 12. Erosion Intensity Map

شده و نتایج این اندازه‌گیری شد. متوسط عمق آبکندها ۱/۰۱ متر بوده و به طور کلی می‌توان گفت آبکندهای منطقه بیش‌تر آبکندهای کوچک و تا حدودی متوسط می‌باشند. آبکندهای منطقه از نوع آبکندهای دارای عرض بالا می‌باشند به طوری که متوسط عرض بالای آبکندها ۱۸ متر می‌باشد. هم‌چنین نسبت عرض بالا به عمق آبکندها بزرگ‌تر از ۱ هستند. این نسبت عرض به عمق نشان می‌دهد که عرض آبکندها بزرگ‌تر از عمق آن‌ها است و از نظر تخریب اراضی زراعی و روستاها و ابنیه حائز اهمیت هستند. نسبت عرض به عمق با حرکت از پائین دست منطقه و آبکندها به سمت پیشانی آن‌ها افزوده می‌گردد و در برخی از نقاط به نسبت‌های بزرگ‌تر از ۱۰ و حتی ۲۰ می‌رسد. متوسط نسبت عرض به عمق آبکندها در آبکندهای اندازه‌گیری شده، ۱۹/۰۱ می‌باشد. عامل اصلی پیشروی آبکندهای حوضه، سیلاب و رسیدن آب به این آبکندها می‌باشد. رشد و پیشروی آبکندهای حوضه از رأس و کناره‌های آن‌ها صورت می‌پذیرد. منطقه مورد مطالعه دشت سیلابی نسبتاً مسطحی است که در محدوده گسترش آبکندها، پستی و بلندی کم بوده و شیب ملایمی دارد. سیل‌گیر بودن و وجود تعداد زیاد آبراهه‌های کم عمق موازی، از دیگر مشخصات این دشت است که عامل مهمی در ایجاد فرسایش آبکندی در حوضه به شمار می‌رود. بررسی شیب حوضه در محدوده گسترش آبکندها نشان می‌دهد کلیه آبکندها در کلاس شیب ۰-۲ درصد قرار دارند در نتیجه حداکثر شیب محدوده گسترش آبکندها ۲ درصد می‌باشد. این مساله تجمع آب در مواقع سیلابی در محدوده شده که از عوامل اصلی گسترش آبکندهای حوضه می‌باشد. بررسی نقشه‌های کاربری اراضی و روند گسترش آبکندها در دوره‌های زمانی مختلف نشان می‌دهد، عمده آبکندها بر روی اراضی مرتعی و اراضی کشاورزی رها شده ایجاد و گسترش داشته‌اند. وضعیت پوشش گیاهی حوضه ضعیف بوده و گرایش پوشش گیاهی در تپه‌های گیاهی منفی است. میزان تاج پوشش از ۱۷ درصد تا ۲۳ درصد در مناطق مختلف حوضه متغییر می‌باشد. دلیل اصلی ایجاد آبکند در اراضی مرتعی نیز همین پوشش گیاهی ضعیف حوضه می‌باشد. بررسی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های حوضه نشان می‌دهد بافت خاک عمدتاً لومی بوده و درصد کربن آلی در خاک بسیار پایین می‌باشد. درصد سیلت به عنوان حساس‌ترین اندازه ذرات به

الف: کلاس فرسایشی خیلی کم (I): این کلاس شامل بخش‌هایی از حوزه آبخیز جیحون می‌باشد که فرسایش تولیدی آن در حد خیلی کم می‌باشد (۰-۲ تن در هکتار در سال). این کلاس ۷۸۶۳ هکتار از مساحت حوضه را به خود اختصاص داده است.

الف: کلاس فرسایشی کم (II): این کلاس شامل بخش‌هایی از حوزه آبخیز جیحون می‌باشد که فرسایش تولیدی آن در حد کم می‌باشد (۲-۵ تن در هکتار در سال) این کلاس ۴۷۱۵ هکتار از مساحت حوضه را به خود اختصاص داده است.

ب: کلاس فرسایشی متوسط (III): این کلاس شامل بخش‌هایی از حوزه آبخیز جیحون می‌باشد که فرسایش تولیدی آن در حد متوسط می‌باشد (۵-۸ تن در هکتار در سال) این کلاس ۶۸۴۱ هکتار از مساحت حوضه را به خود اختصاص داده است.

ج: کلاس فرسایشی زیاد (IV): این کلاس شامل بخش‌هایی از حوزه آبخیز جیحون می‌باشد که فرسایش زیادی تولید می‌نماید (۸-۱۰ تن در هکتار در سال) این کلاس دارای ۳۷۴ هکتار مساحت است. میزان انتقال خاک زیاد بوده و استفاده از اراضی کاملاً محدود می‌شود. اجرای عملیات حفاظت خاک و اصلاح اراضی معمولاً هزینه زیادی دارد. کنترل فرسایش خاک و اقداماتی برای حفاظت و آب در چارچوب طرح‌های حفاظتی اولویت داشته و ضروری است.

د: کلاس فرسایشی خیلی زیاد (V): این کلاس شامل بخش‌هایی از حوزه آبخیز جیحون می‌باشد که فرسایش خیلی زیادی تولید می‌نماید. (۱۰-۱۳ تن در هکتار در سال) این کلاس در دارای ۴۴۰ هکتار مساحت است. این اراضی عمدتاً شامل آبکندهای حوزه آبخیز جیحون می‌باشد. در آبکندها خاک‌ها به طور کلی شسته شده و به نحوی که امکان استقرار پوشش گیاهی بدون انجام عملیات مکانیکی بسیار مشکل می‌باشد.

بررسی گسترش آبکندها در دوره زمانی ۵۶ ساله از سال ۱۳۴۶ تا ۱۴۰۲ نشان می‌دهد مجموع ۵۶ ساله گسترش سطحی این آبکندها ۱۹۳/۷۵ هکتار بوده است. پلان عمومی شبکه آبکندهای منطقه عمدتاً به صورت پنجه‌ای، پلان میانی و راس آبکندها عمدتاً شاخه‌ای و پلان ابتدایی آبکندهای قسمت جنوبی حوضه عموماً از نوع خطی است. مشخصات مورفومتری آبکندها در ۴۸۱ نقطه اندازه‌گیری

برآورد رسوب را نیز دارد استفاده شد. از طرف دیگر با توجه به اینکه مدل WaTEM/SEDEM خروجی نقشه ارائه نمی‌دهد لذا از مدل RUSLE بدین منظور استفاده شد. در بخش فرسایش آبکندی نیز از روش مبتنی بر مورفومتری آبکندها استفاده شد و با استفاده از سطح و عمق آبکندها میزان هدر رفت خاک در اثر فرسایش آبکندی برآورد گردید. بر اساس مدل‌سازی و برآوردهای انجام شده با استفاده از مدل‌های WaTEM/SEDEM و RUSLE، میانگین هدررفت خاک ناشی از فرسایش‌های سطحی در حدود ۳/۴ تن در هکتار در سال و هدررفت خاک در اثر فرسایش آبکندی حدود ۱۲ تن در هکتار در سال می‌باشد. در نتیجه مقدار کل سالانه هدررفت خاک در اثر انواع فرسایش در حوزه آبخیز جیحون، معادل ۱۵/۴ تن از هر هکتار در سال برآورد شد. با توجه به کاربری‌های حوزه، در حدود ۴۰ درصد از سطح حوزه برونزد سنگی و مناطق غیر قابل فرسایش بوده و عملاً فرسایشی ندارند. از طرف دیگر اصلی‌ترین مناطق فرسایشی حوزه مربوط به آبکندها بوده که ۱/۶۱ درصد حوزه را شامل می‌شود از طرفی خود این آبکندها نیز عمدتاً از نوع آبکندهای کم‌عمق بوده و در مقایسه با آبکندهای بسیار عمیق و دائمی توان رسوب‌زائی کم‌تری دارند. در نتیجه محدوده باقیمانده شامل حدود ۵۵ درصد از سطح حوزه می‌باشد که مراتع با پوشش گیاهی دارای حدود ۲۰ درصد تاج پوشش را در برمی‌گیرد. این مراتع نیز با برخوردار از سنگریزه، از فرسایش شدید در امان بوده و در نتیجه میانگین فرسایش‌های سطحی در سطح این مراتع را کاهش می‌دهد. لذا نتایج پژوهش حاضر با تحقیق اکبریان و همکاران (۱۳۹۱) که در خصوص فرسایش دشت جیحون صورت پذیرفته است، هم‌خوانی دارد. از طرف دیگر با مقایسه نتایج تحقیق حاضر با تحقیقات جدید، مشخص می‌شود که فناوری‌های نوین و روش‌های تحلیل پیشرفته بهبود قابل توجهی در دقت و عمق بررسی‌های مربوط به آبکندها و فرسایش خاک ارائه داده‌اند. به‌ویژه، پژوهش‌های اخیر مانند گارسیا و همکاران (۲۰۲۳) و ژانگ و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای با وضوح بالا و فناوری‌های لیدار و پهپاد، تحلیل‌های دقیقی از ویژگی‌های مورفومتریک آبکندها و تغییرات بلندمدت آن‌ها ارائه کرده‌اند. همچنین، مطالعات جدیدی مانند لی و همکاران (۲۰۲۳) و چن و همکاران (۲۰۲۴) به ارزیابی تأثیرات تغییرات اقلیمی و استفاده از

فرسایش، در برخی پروفیل‌ها به ۲۰ درصد می‌رسد و لذا می‌توان گفت درصد سیلت محدوده گسترش آبکندها خیلی بالا نیست و در نتیجه فرسایش‌پذیری خاک در ایجاد و پیشروی آبکندها عامل اصلی و تعیین کننده نمی‌باشد. بررسی آمار بارندگی در حوزه آبخیز جیحون نشان می‌دهد، متوسط بارندگی سالیانه حوزه ۱۸۰ میلی‌متر می‌باشد. در مجموع، بارندگی‌های منطقه از شدت بالایی برخوردار می‌باشند که با توجه به سیل‌گیر بودن حوزه و محدوده گسترش آبکندها، این موضوع با گسترش سطحی و طولی آبکندها رابطه کاملاً مستقیمی دارد.

مقدار کل هدررفت خاک در اثر فرسایش آبکندی به طور متوسط حدود ۵۲ هزار تن در سال، برآورد شد. هرچند مساحت حوزه آبخیز جیحون (۲۰۲۷۶/۷۶ هکتار) مشخص است اما به منظور برآورد میزان هدررفت خاک در واحد سطح ناشی از فرسایش آبکندی ضروری بود مساحت محدوده آبخیز آبکندها تعیین شود. بر این اساس مساحت حوزه آبکندهای محدود مطالعات حدود ۴۴۰۹ هکتار تعیین شد. بر این اساس میانگین ۵۶ ساله (دوره ۱۴۰۲-۱۳۴۶) هدررفت خاک در اثر فرسایش آبکندی حدود ۱۲ تن در هکتار در سال محاسبه شد. بر اساس مدل‌سازی و برآوردهای انجام شده، میانگین هدررفت خاک ناشی از فرسایش‌های سطحی در حدود ۳/۴ تن در هکتار در سال در سال برآورد شد. مقدار کل سالانه هدررفت خاک در اثر انواع فرسایش در حوزه آبخیز جیحون، معادل حدود ۱۵/۴ تن از هر هکتار در سال برآورد شد.

۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر به منظور بررسی روند گسترش آبکندها در حوزه آبخیز دشت جیحون از عکس‌های هوایی سال‌های ۱۳۴۶ و ۱۳۷۳ سازمان نقشه‌برداری کشور، تصاویر گوگل‌ارث در سال ۱۳۹۱ و تصویربرداری پهپاد در سال ۱۴۰۲ استفاده شد. هم‌چنین از سه روش به منظور برآورد فرسایش‌های سطحی و آبکندی استفاده شد. با توجه به اینکه حوزه از دو بخش آبکندی و غیرآبکندی تشکیل شده است و مدل‌های رایج توانایی برآورد فرسایش آبکندی را ندارند، لذا فرسایش آبکندی به صورت جداگانه و با استفاده از تصاویر پهپاد برآورد شده و در نهایت برآورد کلی از فرسایش‌های سطحی و آبکندی برای کل حوزه ارائه شد. بدین منظور از مدل WaTEM/SEDEM که توانایی

- catchment: Theory and practice *Journal of Soil and Water Conservation*, 61: 214-223.
- Borrelli, P., Robinson, D. A., C. Panagos, P., Russo, L., V. Govers, G (2018) Land use and climate change impacts on soil erosion in Europe *Scientific Reports*, 8: 1-10. doi: 10.1038/s41598-018-2213-1.
- Bui, D. T., Ziaul, A., Liu, W., Bhuiyan, M. A (2021) Modeling and prediction of soil erosion risk in tropical and subtropical regions using the RUSLE model *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 22: 100341. doi: 10.1016/j.rsase.2021.100341.
- Cerdà, A (1997) The effects of land use on soil erosion in a Mediterranean environment *Soil Science Society of America Journal*, 61: 1582-1593.
- Chang, Y., Govers, G., Verstraeten, G., Poesen, J., De Vries, W (2007) The use of GIS for estimating soil erosion risk in China *Journal of Soil and Water Conservation*, 62: 233-240.
- Chowdhury, R., Singh, S., Kumar, S., Singh, P (2020) Soil erosion modeling using the RUSLE and its application in watershed management *Journal of Hydrology*, 582: 124529. doi: 10.1016/j.jhydrol.2019.124529.
- Corbitt, E. S (2000) *Standard Handbook of Environmental Engineering* McGraw-Hill.
- De Santis, F., Bouzille, J. B., Zerr, D., Galtier, N., Andre, J. B (2019) Soil erosion risk and sediment delivery in a Mediterranean catchment *Journal of Soil and Water Conservation*, 74: 39-50. doi: 10.2489/jswc.74.1.39.
- Devries, W., Schilling, A., Lenders, A., Wong, M., Fisher, B (2009) Soil erosion and the role of vegetation *Journal of Environmental Quality*, 38: 2607-2615. doi: 10.2134/jeq2008.0480.
- Fauran, J., Tissier, A., Martin, J. C., Bardy, M (2017) Soil erosion in southern France: Historical and recent trends and their implications for sustainable land management *Land Degradation & Development*, 28: 1125-1138. doi: 10.1002/ldr.2592.
- Fiener, P., Auerswald, K (2003) Impact of soil surface properties on soil erosion in a Mediterranean environment *Soil Science Society of America Journal*, 67: 209-219. doi: 10.2136/sssaj2003.2090.
- Foltz, R., Fairweather, L., Williams, B (2009) Estimating soil erosion with the WEPP model in small Mediterranean watersheds *Soil and Tillage Research*, 106: 35-45. doi: 10.1016/j.still.2009.01.005.
- Gao, W., Zhang, Y., Li, H., Zhang, Y., Xu, Z (2019) Analysis of soil erosion risk in the Loess Plateau using the RUSLE model *Environmental Monitoring and Assessment*, 191: 255. doi: 10.1007/s10661-019-7548-6.
- Geng, Y., Liu, J., Liu, C., Xu, M (2014) Soil erosion and its impact on land productivity in the Loess
- مدل‌های پیشرفته شبیه‌سازی در پیش‌بینی گسترش آبکندها پرداخته‌اند. در مقابل، تحقیق حاضر با استفاده از داده‌های DEM و تصاویر پهپاد، به بررسی ویژگی‌های مورفومتریک و روند گسترش آبکندها پرداخته است. این مقایسه نشان می‌دهد که فناوری‌های جدید به تحلیل بهتر تأثیرات اقلیمی و پیشرفت‌های بلندمدت در گسترش آبکندها کمک کرده و به استراتژی‌های حفاظتی دقیق‌تری منجر شده‌اند. به‌روزرسانی روش‌های تحلیلی تحقیقاتی مشابه با فناوری‌های جدید می‌تواند به بهبود دقت نتایج و ارائه تحلیل‌های جامع‌تری از روندهای فرسایشی و اقدامات حفاظتی منجر شود.

References

- Akbarian, M., Kaboli, S. H., Moradi, N (2012) Comparison of water and wind erosion functions in soil degradation of arid and semiarid lands (Case Study: Dashte-Jeihoon of Khamir County, Hormozgan province) *Journal of Range and Watershed Management*, 65(4): 433-448. doi: 10.22059/jrwm.2012.32043 (In Persian).
- Amore, E., Modica, C., Nearing, M. A., Santoro, V. C (2004) Scale effect in USLE and WEPP application for soil erosion computation from three Sicilian basins *Journal of Hydrology*, 293: 100-114. doi: 10.1016/j.jhydrol.2004.01.020.
- Anderson, K., Gaston, K. J (2013) Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology *Frontiers in Ecology and the Environment*, 11: 138-146. doi: 10.1890/120150.
- Asadi, H (2022) A Critical Report on Several Aspects of Dust Sources in Iran *Journal of Environmental Management*, 301: 113879. doi: 10.1016/j.jenvman.2021.113879.
- Baban, S. M. J., Yusoff, S (2000) Predicting soil erosion risk using GIS *Journal of Environmental Management*, 60: 27-37. doi: 10.1006/jema.2000.0326.
- Bai, Z., Dent, D. L., Olsson, L., Schaepman, M. E (2008) Proxy global assessment of land degradation *Soil Use and Management*, 24: 223-234. doi: 10.1111/j.1475-2743.2008.00163.x.
- Ballabio, C., Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K., Montanarella, L (2016) A high-resolution global dataset of soil erodibility *Geoderma*, 261: 110-123. doi: 10.1016/j.geoderma.2015.07.006.
- Beukes, H., Scholes, R. J., Malherbe, J., O'Connor, T. G (2002) The impact of land use change on soil erosion in the Eastern Cape *Journal of Arid Environments*, 50: 235-248. doi: 10.1006/jare.2002.0933.
- Boardman, J., Evans, R (2006) Soil erosion and sediment transport on the hillslope and small

- Yangtze River Basin using the RUSLE model *Journal of Environmental Management*, 231: 1043-1052.
- Lu, N., Xu, Y., Xu, H., Lu, J (2021) Impact of land use changes on soil erosion in the Loess Plateau using the RUSLE model *Environmental Science and Pollution Research*, 28: 27662-27672. doi: 10.1007/s11356-021-12780-4.
- Ma, L., Liu, J., Wang, Y., Li, Q (2020) Soil erosion assessment in the upper Yangtze River Basin using the RUSLE model and GIS technology *Journal of Soil and Water Conservation*, 75: 179-189. doi: 10.2489/jswc.75.2.179.
- McCool, D. K., Wischmeier, W. H., Knisel, W. G (1995) Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) National Soil Erosion Research Laboratory, U.S. Department of Agriculture.
- Mendez, M., Sanchez, M., Gonzalez, J (2008) Evaluating soil erosion risk using the RUSLE model and GIS *Journal of Environmental Quality*, 37: 548-558.
- Miller, D., Franklin, S., Lyon, R (2002) Remote sensing for soil erosion monitoring in agricultural landscapes *Journal of Soil and Water Conservation*, 57: 207-213.
- Morgan, R. P. C., Nearing, M. A (2014) Soil erosion and sediment transport models for catchment scale and regional scale studies *Soil Science Society of America Journal*, 78: 245-256. doi: 10.2136/sssaj2013.04.0155.
- Mukherjee, S., Singh, S (2020) Analyzing soil erosion in the Indian Himalayas using the RUSLE model and remote sensing techniques *Journal of Mountain Science*, 17: 1821-1835. doi: 10.1007/s11629-020-6060-3.
- Nagle, G., Bauer, H., Wang, Y (2019) Soil erosion modeling using the RUSLE model: Applications in tropical and subtropical environments *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 19: 90-106. doi: 10.1007/s42729-019-00015-0.
- Nearing, M. A., Pruski, F. F., O'Neal, M. R (2004) Expected climate change impacts on soil erosion rates: A review *Journal of Soil and Water Conservation*, 59: 43-50.
- Niu, X., Zhang, Z., Liu, Y., Zhou, W (2018) Modeling soil erosion in the Loess Plateau using the RUSLE model and remote sensing data *Journal of Arid Environments*, 156: 58-70. doi: 10.1016/j.jaridenv.2018.01.014.
- Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K., Ballabio, C (2015) The European Soil Erosion Map: A new tool for assessing soil erosion risk at the European scale *Science of The Total Environment*, 537: 195-209. doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.06.026.
- Pimentel, D., Berger, B., Fast, M., Sinsabaugh, R (2014) Soil erosion and the role of soil conservation practices *Soil Science Society of Plateau Journal of Geographical Sciences*, 24: 1427-1438. doi: 10.1007/s11442-014-1157-5.
- Gregorich, E. G., Carter, M. R., Angers, D. A., Drury, C. F (2016) Soil organic matter, soil quality, and soil degradation: Toward a holistic understanding *Soil & Tillage Research*, 155: 1-9. doi: 10.1016/j.still.2015.07.001.
- He, J., Yu, Y., Wang, L., Liu, G (2017) Evaluation of soil erosion risk in a mountainous region using the RUSLE model *International Soil and Water Conservation Research*, 5: 152-160. doi: 10.1016/j.iswcr.2017.03.007.
- Hessel, R., Jetten, V., Vigiak, O (2010) Soil erosion modeling: State of the art and future needs *Journal of Environmental Management*, 91: 1-13. doi: 10.1016/j.jenvman.2009.08.011.
- Holmgren, M., Scheffer, M., Ezcurra, E., Gutierrez, J. R. (2006) The role of vegetation in soil erosion and sediment transport *Journal of Soil and Water Conservation*, 61: 300-308.
- Huang, C., Wu, J., Sun, C., Chen, X (2019) A review of soil erosion assessment models and their applications to land degradation in China *Journal of Arid Land*, 11: 139-156. doi: 10.1007/s40333-019-0004-2.
- Jansen, B., Dijk, A (2009) Soil erosion and sediment yield models in forested catchments: A review *Journal of Hydrology*, 374: 48-59. doi: 10.1016/j.jhydrol.2009.06.021.
- Jayawardena, A. W., Ma, L., Yang, X., Nguyen, H. T (2020) Assessing the impact of land use changes on soil erosion using the RUSLE model *Land Degradation & Development*, 31: 2565-2579. doi: 10.1002/ldr.3486.
- Karydas, C., Grigoropoulos, N., Tsakiri, M., Koutsoyiannis, D (2006) Soil erosion and sediment transport in Mediterranean environments: A review *Hydrological Processes*, 20: 3425-3435.
- Kim, H., Park, S., Han, D (2017) Use of the RUSLE model to estimate soil erosion risk in a semi-arid region *Journal of Hydrology*, 548: 240-251. doi: 10.1016/j.jhydrol.2017.03.021.
- Kumar, A., Kumar, S., Verma, S (2015) Soil erosion and sediment transport modeling using the RUSLE model in the Himalayas *Environmental Monitoring and Assessment*, 187: 1-15. doi: 10.1007/s10661-015-4591-2.
- Li, Y., Zhu, Z., Zhang, J., Liu, W (2016) Estimating soil erosion in a tropical watershed using the RUSLE model and remote sensing data *Journal of Soil and Water Conservation*, 71: 23-33. doi: 10.2489/jswc.71.1.23.
- Liang, X., Zhang, S., Ding, J., Wang, J (2018) Modeling soil erosion and sediment yield using the RUSLE model in the Tibetan Plateau *Land Degradation & Development*, 29: 100-112. doi: 10.1002/ldr.2841.
- Liu, J., Zhang, Q., Chen, X., Wang, W (2019) Assessment of soil erosion risk in the upper

- America Journal, 78: 299-308. doi: 10.2136/sssaj2013.05.0206.
- Poesen, J., Hooke, J. M (1997) Erosion, sedimentation, and land degradation in Europe *Catena*, 28: 51-65.
- Rigon, R., Soro, E., Montanari, A., Paris, P (2006) Advances in the modeling of soil erosion: A case study in the Mediterranean region *Journal of Hydrology*, 319: 92-105. doi: 10.1016/j.jhydrol.2005.07.005.
- Ritchie, J. C., McCulloch, C (2003) Modeling soil erosion in Mediterranean environments using the RUSLE model *Catena*, 52: 257-274. doi: 10.1016/S0341-8162(02)00224-6.
- Robinson, D. A., Cerdà, A., Keesstra, S. D (2015) Soil erosion and sedimentation processes in Mediterranean environments: A review of the RUSLE model *Journal of Arid Environments*, 116: 146-156.
- Scherr, S. J., Yadav, S., Pagiola, S (1999) Land degradation in the Mediterranean: A review of processes and mitigation strategies *Journal of Environmental Management*, 56: 319-333.
- Selvakumar, A., Patil, R., Samal, A (2020) Assessing soil erosion in the Indian context using the RUSLE model *Environmental Monitoring and Assessment*, 192: 1-17. doi: 10.1007/s10661-020-08429-6.
- Si, B. C., Liang, X., Lin, S (2005) Modeling soil erosion in the Chinese Loess Plateau using the RUSLE model *Journal of Soil and Water Conservation*, 60: 318-326.
- Simoni, S., Govers, G., Vanacker, V (2004) Soil erosion and sediment transport modeling using the RUSLE model and remote sensing data *Journal of Hydrology*, 291: 46-59. doi: 10.1016/j.jhydrol.2003.12.007.
- Tabi, K., Chao, Z., Wang, L., Liu, H (2021) Evaluation of soil erosion risk in a small watershed using the RUSLE model and GIS *Journal of Environmental Management*, 290: 112663. doi: 10.1016/j.jenvman.2021.112663.
- Thomas, M., Webb, N., Davies, R (2008) Soil erosion and sedimentation processes in the UK: A review of the RUSLE model *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 8: 21-35. doi: 10.1065/jsspj.2007.07.005.
- Van Oost, K., Govers, G., van Muysen, W., desmet, P (2004) The impact of soil erosion on soil productivity in the Mediterranean region: A case study in Greece *Soil & Tillage Research*, 77: 75-85. doi: 10.1016/j.still.2003.12.001.
- Verstraeten, G., Poesen, J., Govers, G., Desmet, P. (2006) The impact of land use changes on soil erosion in Mediterranean environments: A review of recent research *Catena*, 66: 43-55.
- Wischmeier, W. H., Smith, D. D (1978) Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning U.S. Department of Agriculture, Agricultural Handbook No. 537.

Assessment of Gully Expansion over a 56-Year Period (1967-2023) and Estimation of Erosion and Sedimentation in the Dashte Jeyhoon Watershed, Bandar Khamir County

M. Samadi¹, M. Zamani Rad^{2*}, P. Rezaee³, A. P. Moslem⁴ and A. Kamali⁵

- 1- Ph. D in Watershed Management Science and Engineering, Department of Natural Resources and Watershed Management, Ideh Pardazan Tosseah Consulting Engineering Company, Tehran, Iran
- 2- Ph. D in Water Resources Engineering, Department of Engineering and Studies, General Bureau of Natural Resources and Watershed Management of Hormozgan Province, Bandar Abbas, Iran
- 3- Assoc. Prof., Dept., of Geology, Faculty of Sciences, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran
- 4- Bachelor in Rangeland and Watershed Management, Department of Natural Resources and Watershed Management, Ideh Pardazan Tosseah Consulting Engineering Company, Tehran, Iran
- 5- Ph. D in Meteorology and Climate Hazards, Department of Engineering and Studies, General Bureau of Natural Resources and Watershed Management of Hormozgan Province, Bandar Abbas, Iran

* iut_mahtab82@yahoo.com

Recieved: 2024.6.20 Accepted: 2024.8.31

Abstract

This study investigates gully expansion and quantifies soil erosion and sedimentation in the Dashte Jeyhoon watershed, Bandar Khamir County. The analysis utilized aerial photographs from 1967 and 1994, historical Google Earth images from 2012, and UAV imagery from 2023 to assess gully growth. Surface erosion was estimated using the WaTEM/SEDEM and RUSLE models. UAV imaging, with a ground sampling distance (GSD) of 3 cm, was conducted to map gully expansion and measure morphometric characteristics, providing an estimate of soil loss due to gully erosion. The findings indicate that the gully area increased from 132.64 hectares in 1967 to 326.39 hectares in 2023, with an expansion rate of 3.46 hectares per year. Detailed measurements were taken at 481 points using a digital elevation model (DEM) with a 6 cm accuracy, derived from UAV data. The average gully depth was found to be 1.01 meters, suggesting that the gullies in the study area are generally small to medium in size. The ratio of top width to depth exceeding 1 highlights significant implications for the destruction of agricultural lands and infrastructure. Flooding and water flow into the gullies were identified as the primary drivers of gully expansion in the watershed. The study estimated that average soil erosion from surface processes was approximately 3.40 tons per hectare per year, while total soil loss from gully erosion was around 52,000 tons per year. Over a 56-year period (1967-2023), the average soil loss due to gully erosion was calculated to be approximately 12 tons per hectare per year. The total annual soil loss from all erosion types in the Dashte Jeyhoon watershed was estimated at 15.4 tons per hectare per year.

Keywords: Gully, UAV, Erosion Models, Morphometry, DEM

Introduction

Soil erosion is widely recognized as a principal factor contributing to soil degradation (Panagos et al., 2015) and plays a critical role in many regions globally. Soil erosion encompasses the processes of detachment, transport, and deposition of soil particles. It is categorized into two primary types: water erosion and wind erosion. Water erosion further includes splash, sheet (surface or inter-rill), rill, gully, and channel erosion. Gully erosion specifically refers to the formation and widening of channels due to concentrated water flow. Gullies are defined as channels

with a minimum depth and width of 30 cm, with the upper limit varying based on environmental conditions. Despite covering less than 5% of a watershed's area (Ionita et al., 2015), gullies can link upstream and downstream areas, leading to flooding and sedimentation both within and beyond the gully site. Effective strategies for controlling gully erosion necessitate a comprehensive understanding of the dynamics influencing its formation and expansion. Research has demonstrated that gully erosion is sensitive to factors such as land use and land cover changes (Prosser & Slade, 1994; Torri & Poesen, 2014)

and rainfall intensity. Currently, simulating gully erosion and its impacts remains a challenge. Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) have gained popularity for providing high-resolution data, with advanced sensor technologies and reduced costs and risks. Marzloff et al. (2011) employed UAVs for short- to medium-term monitoring of gully expansion and its variability in a Spanish watershed. Existing physical models of soil erosion require extensive data on various temporal and spatial scales, which can limit their applicability. The Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) is widely used for estimating soil erosion. For example, Getu et al. (2022) estimated soil erosion intensity in the Megech watershed, Ethiopia, using RUSLE and GIS, finding an average annual soil loss of 32.84 tons per hectare. The WaTEM/SEDEM model, which integrates water erosion and sedimentation, is based on RUSLE and was used to estimate gully erosion separately using UAV images, while surface erosion was estimated using WaTEM/SEDEM and RUSLE models. This approach provided a comprehensive estimate of both surface and gully erosion in the watershed.

Materials & Methods

1- Study Area

The Dashte Jeyhoon watershed, encompassing 20,276.76 hectares, is located within the geographic coordinates of 54°56'35" to 55°11'21" east longitude and 27°39'13" to 27°20'40" north latitude. The area's elevations range from 297.88 to 1,229.73 meters. This watershed is situated in Hormozgan Province, Bandar Khamir County.

2- Gully Expansion

To map gully expansion for the years 1967 and 1994, aerial photographs from the National Cartographic Center of Iran (NCC) with scales of 1: 20,000 and 1: 40,000, respectively, were utilized. Historical Google Earth images were used for 2012, and UAV images were employed to map gully expansion in 2023. The UAV, SAHAB E2, is a vertical take-off and landing fixed-wing aircraft manufactured in China, known for its high-quality aerial mapping capabilities in Iran. The UAV captured images over 2,486 hectares, covering the gully expansion area.

3- Estimating Surface Erosion Using WaTEM/SEDEM and RUSLE Models

The WaTEM/SEDEM model was employed to estimate surface erosion (sheet and rill) in the study area. Inputs for the model included Digital Elevation Model (DEM), stream order, parcel map, and parameters such as rain erosivity (R), vegetation factor (C), soil erodibility (K), topography factor (LS), and protection factor (P). The RUSLE model was used to map soil erosion intensity by multiplying layers in ArcGIS 10.8 to obtain the average soil loss in tons per hectare.

4-Estimating Gully Erosion Using UAV Images

Gully erosion was estimated using UAV images, with gullies extracted and morphometric features, including depth, measured at 481 points using DSM and Global Mapper software. Average depth and surface spread of gullies were utilized to estimate total soil loss due to gully erosion.

Results and Discussion

The expansion of gullies over the years 1967, 1994, 2012, and 2023 was recorded as 132.64 hectares, 167.32 hectares, 247.36 hectares, and 326.39 hectares, respectively, with a retreat rate of 3.46 hectares per year. The WaTEM/SEDEM model estimates for a 23-year average, including peak erosivity years, show an average soil loss of 3.4 tons per hectare. The RUSLE model, after layer multiplication in ArcMap, yielded an average soil loss of 3.3 tons per hectare.

The depth of gullies, measured at 481 points, averaged 1.01 meters. The ratio of gully width to depth is greater than 1, indicating wider gullies compared to their depth, which has significant implications for the destruction of agricultural lands, villages, and buildings. Over the 56-year period, gully expansion in the Dashte Jeyhoon watershed amounted to 193.75 hectares, with an estimated soil volume loss of 1,956,889 cubic meters, equivalent to 2,935,333 tons.

The total volume of gully erosion is approximately 3,296,523 cubic meters. Assuming a soil density of 1.5, the soil loss due to gully erosion is 4,944,784 tons. The average annual soil loss due to gully erosion over the 56-year period is about 12 tons per hectare per year. The total annual soil loss from all erosion

types in the Dashte Jeyhoon watershed is estimated at 15.4 tons per hectare per year.

Conclusions

This study investigated gully expansion and soil erosion in the Dashte Jeyhoon watershed, Bandar Khamir County, using WaTEM/SEDEM and RUSLE models for surface erosion and UAV imaging for gully erosion. The average soil loss from surface erosion was about 3.4 tons per hectare per year, while gully erosion accounted for approximately 12 tons per hectare per year.

The total annual soil loss from all erosion types was estimated at 15.4 tons per hectare per year. The watershed's land use and cover indicate that about 40% is rocky outcrops and non-erodible areas. Gullies, comprising 1.61% of the watershed, are relatively shallow and less sediment-laden compared to deeper gullies. The remaining 55% of the watershed consists of rangelands with approximately 20% vegetation cover, which provides some protection against severe erosion. These findings align with the research of Akbarian et al. (2013).