

ترسیم دینامیک فرسایش آبکندی (گالی) در شرق ایران با استفاده از تصویربرداری پهپاد با وضوح بالا

امیر علیزاده^۱

زهرا عزیزی^{*۲}

zah_azizi@sbu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۷/۱۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۴/۳۰

چکیده

زمینه و هدف: منطقه دشتیاری در جنوب شرقی ایران دارای خندق‌های سطحی وسیعی است که عمدتاً کنترل نشده باقی می‌مانند و خسارت قابل توجهی به روستاها و زیرساخت‌ها وارد کرده‌اند. هدف این مطالعه توسعه روشی برای استخراج خودکار الگوهای خندق با استفاده از مدل ارتفاعی رقومی (DEM) مشتق از پهپاد با وضوح بالا و ترکیبی از شاخص‌های مورفومتریک است. تمرکز بر ارزیابی اثربخشی این شاخص‌ها در بهبود تشخیص الگوی خندق است، کاری که نیازمند اطلاعات دقیق و فرآیندهای مدل‌سازی پیچیده است که معمولاً برای افراد غیرمتخصص غیرقابل دسترس است.

روش بررسی: از شاخص‌های مورفومتریک ساده، از جمله شاخص عمق دره (VD)، شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI)، شاخص باز بودن مثبت (PO)، نقشه تصویر برجستگی قرمز (RRIM)، ارتفاع، درجه شیب، و ترکیب PO-DEM استفاده شد. استخراج فرستیا آبکندی با کمک الگوهای خندق استخراج شده به طور خودکار با نمونه‌های حقیقت زمینی برای ارزیابی همبستگی فضایی مقایسه شد. علاوه بر این، عملکرد این شاخص‌ها با مدل‌های درخت طبقه‌بندی (CT)، یک تکنیک یادگیری ماشینی قوی، با استفاده از همان شاخص‌های مورفومتریک مقایسه شد.

یافته‌ها: عملکرد تکنیک‌های استخراج الگو با استفاده از چهار معیار دقت ارزیابی شد: شاخص دقت، آمار مهارت واقعی (TSS)، کاپا کوهن، و ضریب همبستگی متیوز (MCC). نتایج نشان داد که شاخص‌های فردی مانند PO، TPI و RRIM برای تعیین قابل اعتماد الگوهای خندق کافی نیستند. با این حال، شاخص ترکیبی PO-DEM طبقه‌بندی بهتری از وجود و عدم وجود خندق ارائه کرد. مدل CT با در نظر گرفتن هر چهار معیار، عملکرد برتر را از نظر سازگاری و قدرت پیش‌بینی نشان داد.

بحث و نتیجه‌گیری: یافته‌ها نشان می‌دهد که در حالی که شاخص‌های مورفومتریک منفرد کاربرد محدودی در تشخیص دقیق الگوی خندق دارند، ترکیب شاخص‌ها، به ویژه PO-DEM، قابلیت اطمینان طبقه‌بندی را افزایش می‌دهد. عملکرد برتر مدل CT بر پتانسیل

۱- گروه سنجش از دور و GIS، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۲- گروه مهندسی نقشه برداری، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران* (مسئول مکاتبات)

تکنیک های یادگیری ماشین در تجزیه و تحلیل جغرافیایی تاکید می کند. علاوه بر این، بازده زمانی تکنیک های خودکار در مقایسه با ترسیم دستی، مزایای عملی ادغام تصاویر پهپاد و رویکردهای مدل سازی پیشرفته در نظارت و مدیریت فرسایش را برجسته می کند.

واژه های کلیدی: فرسایش خندقی، شاخص های مورفومتریک، یادگیری ماشین، درخت طبقه بندی، تحلیل فضایی.

Mapping Water Erosion Dynamics in East of Iran using High-Resolution UAV Imaging

Amir Alizadeh¹

Zahra Azizi^{2*}

zah_azizi@sbu.ac.ir

Date of Acceptance: October 9, 2024

Date of Submission: July 20, 2024

Abstract

Background and Objective: The Dashtiari region in southeastern Iran is characterized by extensive surface gullies, which remain largely unmonitored and have caused significant damage to villages and infrastructure. This study aims to develop a methodology for automatically extracting gully patterns using high-resolution UAV-derived digital elevation models (DEMs) and a combination of morphometric indices. The focus is on evaluating the effectiveness of these indices in improving gully pattern recognition, a task that requires detailed information and complex modeling processes typically inaccessible to non-experts.

Materials and Methods: We employed simple morphometric indices, including the Valley Depth Index (VD), Topographic Position Index (TPI), Positive Openness Index (PO), Red Relief Image Map (RRIM), elevation, slope degree, and the PO-DEM combination, to extract gully patterns. The automatically extracted gully patterns were compared with ground-truth samples to assess spatial correlation. Additionally, the performance of these indices was compared with that of classification tree (CT) models, a robust machine learning technique, using the same morphometric indices.

Findings: The performance of pattern extraction techniques was evaluated using four accuracy metrics: Accuracy Index, True Skill Statistic (TSS), Cohen's Kappa, and Matthews Correlation Coefficient (MCC). The results indicated that individual indices such as PO, TPI, and RRIM were insufficient to reliably delineate gully patterns. However, the PO-DEM combined index provided a better classification of gully presence and absence. The CT model, considering all four criteria, demonstrated superior performance in terms of adaptability and predictive power.

Discussion and Conclusion: The findings suggest that while individual morphometric indices have limited utility in accurate gully pattern recognition, combining indices, particularly PO-DEM, enhances classification reliability. The CT model's superior performance underscores the potential of machine learning techniques in geospatial analysis. Moreover, the time efficiency of automated techniques compared to manual delineation highlights the practical benefits of integrating UAV imagery and advanced modeling approaches in erosion monitoring and management.

Keywords: Gully erosion, morphometric indices, machine learning, classification tree, spatial analysis.

1- Department of Remote Sensing and GIS, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

2- Department of Geoinformation & Geomatics Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. **(Corresponding Author)*

مقدمه

فرسایش آبکندی (Gully erosion) نوعی از فرسایش آبی است که به عنوان واضح ترین شاخص تخریب و تنزل اراضی شناخته می شود و قابلیت تولید رسوب بسیار بالایی در حوزه های آبخیز دارد (۱). مطابق بر تعریف انجمن علوم خاک امریکا، آبکندها با خصوصیتی از جمله وجود هدکت (Headcut)، دیواره های جانبی عمودی و نقاط گود شده در طول مسیر مشخص می گردد که می تواند اندازه عمق آن ها به ۰/۵ تا ۳۰ متر برسد (Soil Science Society of America, 2001). آبکندها نسبتاً عمیق و کم عرض هستند و رسوبات زیادی را منتقل می کنند (۲) و اغلب رابطه ای بین دبی جریان و میزان رسوب انتقال یافته از آبکندها نمی توان یافت (۳). بر اساس مطالعات گذشته، فرسایش آبکندی و تشکیل لندفرم های آبکندی از سایر فرسایش ها جدا بوده و معمولاً در اراضی کم شیب و هموار (دشت ها) مشاهده می شوند (۴). فرسایش آبکندی مهم ترین عامل مؤثر در پرشدن مخازن سدها بوده که این نوع فرسایش در اثر بی توجهی به حوزه های آبخیز بالادست سدها اتفاق افتاده و اثرات زیان بار زیست محیطی و اقتصادی-اجتماعی برای مناطق پایین دست پدیده آورده است. مکانیسم و فرایند شکل گیری فرسایش های آبکندی در سه دسته آبکندهای ناشی از تشکیل حفره پایپینگ، تنش برشی و نشست زمین قابل تقسیم بندی است (۵).

با استفاده از تصاویر پهپادی اخذ شده با کیفیت بالا می توان با برداشتهای دوره ای پس از رخداد هر سیلاب اطلاعاتی با ارزش در جهت مطالعات دوره ای بدست آورد. تهیه نقشه با دقت بالا، این امکان را میدهد که بتوان نظارت بر پیشرفت سر پنجه ها، عرض و عمق گالی ها را در یک سیر زمانی در یک رخداد مشخص داشته باشیم. داده های دریافتی هر دوره با دوره قبل قابل مقایسه میباشد و مطالعه نتایج این قیاس در هر منطقه از ایران میتواند راهکارهای علمی، عملیاتی در جهت جلوگیری پیشرفت گالی و آسیب منطقه در اختیار ما قرار دهد. فرسایش آبکندی (خندقی) از اشکال پیشرفته و

حاد فرسایش آبی و از مخرب ترین آنهاست که دلالت بر تلفات خاک سطحی در اراضی دارد (۶).

فرسایش آبکندی از نظر تولید رسوب نسبت به فرسایش سطحی از اهمیت بیشتری برخوردار است (۷). به طوری که قادر است علاوه بر مشکلاتی که در محل فرسایش و خارج از آن ایجاد می کند تا ۵۰ برابر بیشتر رسوب تولید کند (۲). ایجاد سازه های بدون توجه به شرایط منطقه یا به طور کلی اکوسیستم، زمینه ایجاد و توسعه فرسایش خندقی یا آبکندی را فراهم می کند.

چندین مطالعه حساسیت فرسایش خندقی (GES) را با استفاده از مدل های مختلف ارتفاعی دیجیتال (DEMs) و تکنیک های یادگیری ماشین (ML) بررسی کرده اند. عرب عامری و همکاران (۸) ASTER, DEMs ALOS و AW3D30 را در استان سمنان، ایران مقایسه کرد. آنها دریافتند که مدل ALOS به دلیل وضوح فضایی بالاتر، دقیق ترین مدل را در پیش بینی آسیب پذیری فرسایش حوضه آبخیز دارد. این مطالعه تاکید کرد که ارتفاع، شیب و سنگ شناسی عوامل مهمی برای حساسیت به فرسایش هستند. حسن الزمان و همکاران (۹) یک مدل GES را با استفاده از روش هایی مانند AHP، نسبت فرکانس (FR)، جنگل تصادفی (RF) و XGBoost در حوضه رودخانه کائسباتی توسعه داد. یافته های آن ها LULC, NDVI, سنگ شناسی و شیب را به عنوان عوامل کلیدی در فرسایش برجسته کرد. Chowdhuri و همکاران (۱۰) از الگوریتم های ML، مانند رگرسیون بردار پشتیبان (SVR) با الگوریتم Bee، برای ایجاد نقشه های GES برای حوضه آبخیز Gandheswari در هند استفاده کرد. تحقیقات آنها به NDVI و انحنا ی پلان به عنوان عوامل مهم در فرسایش خندقی اشاره کرد. Mohebzadeh و همکاران (۱۱) استفاده از مدل های ML، به ویژه جنگل تصادفی (RF) و ماشین بردار پشتیبان (SVM) را برای ترسیم حساسیت به فرسایش بررسی کرد. آنها دریافتند که ترکیب مدل های ML با شاخص های توپوگرافی مانند ارتفاع، شیب و بارش، دقت

سیستان و بلوچستان، شهرستان چابهار، بخش مرکزی و پلان در منطقه دشتیاری واقع گردیده است.

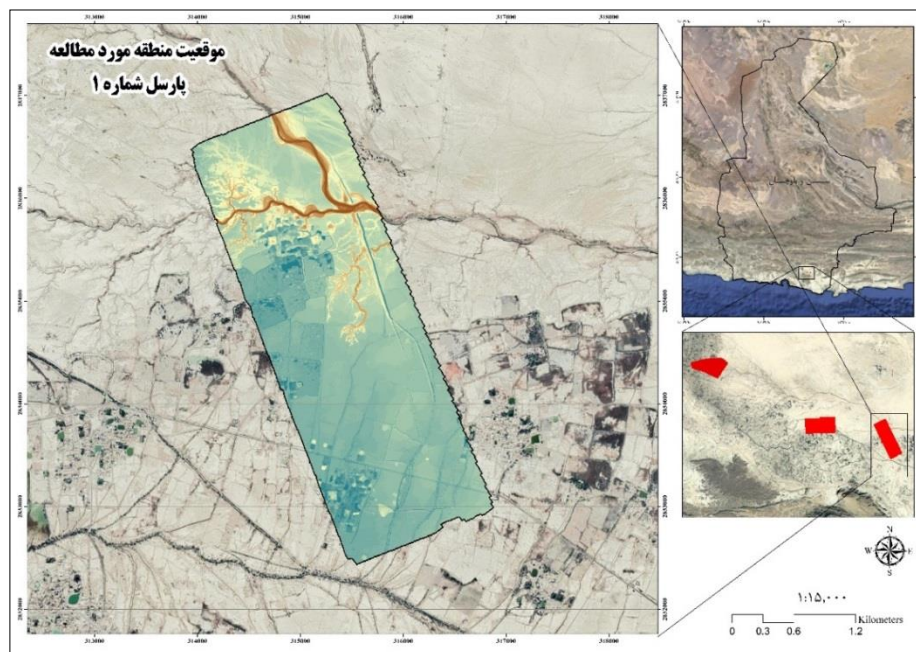
این منطقه در دو پارسل ۶۰۰ هکتاری (پارسل‌های ۲ و ۳) و یک پارسل ۶۶۰ هکتاری (پارسل شماره ۱) مورد مطالعه قرار گرفته شد. در پارسل‌های مطالعاتی کمترین ارتفاع ۱۷- متر از سطح دریا (مربوط به پارسل شماره ۱) و بیشترین ارتفاع ۱۸/۳ متر از سطح دریا (مربوط به پارسل شماره ۳) می‌باشد (شکل ۱).

از آنجاکه به دلیل نزدیکی رودخانه کاجو و برداشت مصنوعی آب از این رودخانه توسط ساکنین محلی در قالب دگار و نتیجتاً کاهش حجم آبدازی رودخانه کاجو و سرریز کردن آب مازاد از روی دگارها به محدوده هدکات گالی‌ها رسیده و سبب گسترش قابل توجه طولی، عرضی و عمقی گالی‌ها با خاک سیلانی حساس به فرسایش شده که این رشد طبیعتاً در محدوده غربی (پارسل شماره ۳) و نزدیک به جریان‌های سیلابی بیشتر نمود یافته است.

پیش‌بینی را بهبود می‌بخشد. در نهایت، بامو و همکاران (۱۲) از هفت مدل ML، از جمله SVM، RF، و XGBoost برای پیش‌بینی فرسایش در حوضه آبخیز تنسیفت، مراکش استفاده کرد. مطالعه آن‌ها سنگ‌شناسی، شیب، فاکتور LS و TPI را به عنوان عوامل حیاتی شناسایی کرد که ۲۸.۱۸ درصد از حوضه در معرض خطر فرسایش بالایی قرار داشت. این مطالعات در مجموع بر اهمیت ویژگی‌های زمین (ارتفاع، شیب، سنگ‌شناسی) و شاخص‌های محیطی (NDVI، LULC) در پیش‌بینی فرسایش خندقی تأکید می‌کنند، با مدل‌های ML که ابزارهای قوی برای نقشه‌برداری فرسایش ارائه می‌کنند.

مواد و روش کار

منطقه مورد مطالعه در طول ۲۹۴۰۶۴.۳ تا ۳۱۶۸۷۹.۲ شرقی و عرض ۲۸۳۲۴۳۳.۳ تا ۲۸۴۵۴۰۰.۵ شمالی سیستم جغرافیایی متریک و طول ۶۰° ۵۶' ۵۸" تا ۶۱° ۱۰' ۲۹" شرقی و عرض ۲۵° ۳۵' ۴۲" تا ۲۵° ۴۲' ۵۴" شمالی واقع گردیده است. همچنین از لحاظ موقعیت استراتژیک در استان



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه

Figure 1. The study area

پایش ادواری آبکندها

امروزه به مدد عکس‌های هوایی، تصاویر ماهواره‌ای، فتاوری پهپاد و اسکن لیزری، می‌توان گسترش آبکندها را با دقت مناسب پایش نمود. عکس‌های هوایی پوشش سرتاسری سازمان نقشه‌برداری کشور و جغرافیای ارتش و تصاویر با دقت مکانی بالا نظیر 1, 2, 3, 4, Ikonos, Worldview در Pleiades, GeoEye-1, QuickBird و Corona در این زمینه قابل تهیه و ارزیابی می‌باشند. در صورت استفاده از عکس‌های هوایی آرشو و تصاویر ماهواره‌ای دقیق، می‌توان از روش‌هایی نظیر ترسیم سه‌بعدی بر روی مدل سه‌بعدی حاصل از تصاویر استریو، طبقه‌بندی‌های نظارت‌شده و نشده (نظیر k-means) و الگوریتم‌های شیء‌گرا (در بسترهای نرم‌افزاری نظیر eCognition Developer) به استخراج دوبعدی و سه‌بعدی آبکندها اقدام نمود. شکل قابل‌دسترس‌تر

فتاوری‌های موجود معطوف به دو شاخه فتوگرامتری پهپاد و لیزر اسکن بوده که در ادامه به تفصیل شرح داده شده‌اند. پس از اجرای عملیات نقشه‌برداری زمینی و قرائت نقاط کنترل زمینی با پراکنش مناسب به‌منظور ایجاد یک مدل هندسی مستحکم از محدوده مطالعاتی، پرواز پهپاد طراحی و سپس طی عملیات فتوگرامتری محصولات متنوعی از جمله مدل رقومی زمین (DTM)، مدل رقومی سطح زمین (DSM)، ارتوفتو و مدل سه‌بعدی تهیه می‌گردد که به استخراج بسیار دقیق عوارض سطح زمین از جمله آبکندها کمک شایان توجهی می‌نماید. در شکل ۲، سه پارسل از آبکندهای دشتیاری که توسط پهپاد برداشت شده، ارائه می‌گردد.



شکل ۲- سه پارسل از آبکندهای دشتیاری، برداشت‌شده توسط پهپاد در تاریخ اردیبهشت ۱۳۹۸

(شرکت نوآوران علوم مکانی)

Figure 2. Three parcels of Dashtiari watersheds, collected by UAV in May 2018

متناوب رخ داده و طی سالیان متمادی سطح قابل‌توجهی را درگیر نموده و ایجاد خطر کند. امروزه با پیشرفت فناوری و امکان دسترسی به تصاویر ماهواره‌ای دقیق و تحول فتاوری

پایش و پیش‌بینی مکانی-زمانی-بزرگی^۱

به‌طورکلی، معمولاً فرسایش به شکل متمرکز رخ می‌دهد و شاید از نظر اندازه خیلی بزرگ نباشند، اما می‌توانند به‌طور

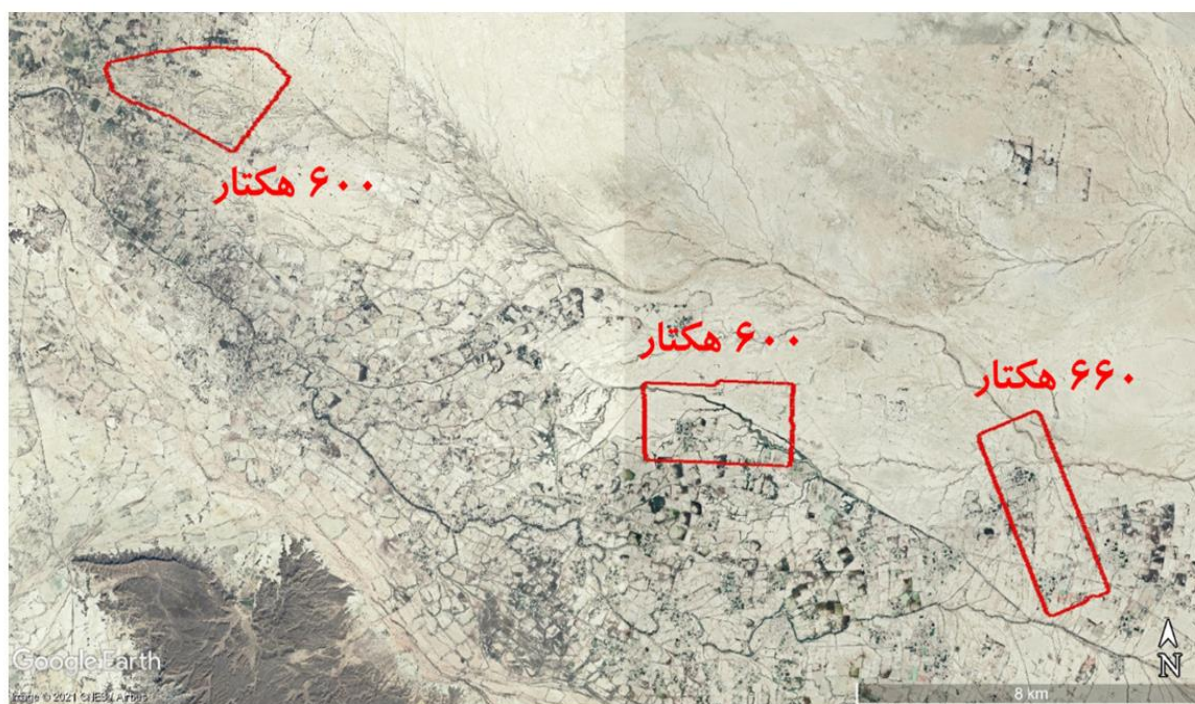
رقومی ارتفاع تحت عنوان شاخص‌های مورفومتریک شناخته شده و در مناطق فاقد داده، کاربردهای فراوانی دارند.

نمود کاربردی این مفهوم در استخراج خودکار الگوی مکانی فرسایش آبکندی منطقه دشتیاری واقع در جنوب استان سیستان و بلوچستان نمود پیدا کرد. طی یک پروژه مطالعاتی، از سه عرصه با مساحت تقریبی ۱۸۶۰ هکتاری تصاویر متعدد پهپاد تهیه شد که از آن‌ها محصولات متنوعی از جمله مدل‌های رقومی عوارض و سطح زمین (DSM & DTM)، مدل‌های سه‌بعدی، تصاویر ارتوفتو و ابر نقاط ارتفاعی متراکم استخراج گردید.

پهپاد و لیزر اسکن، بخشی از بار عملیات سنگین میدانی کم شده است.

نتایج

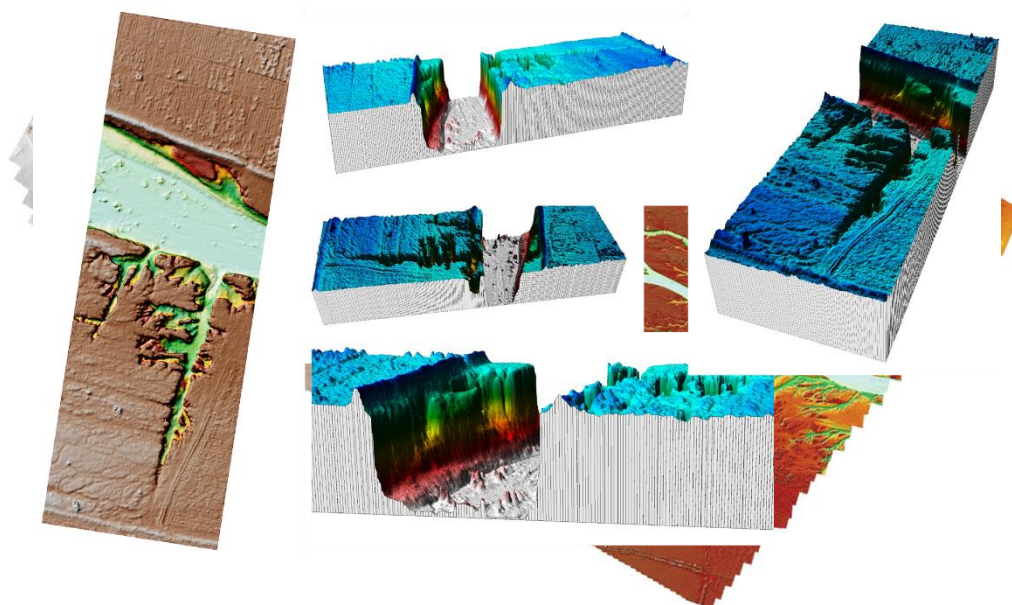
به‌طوری‌که بخش اعظم مدل‌های شبیه‌سازی فرآیندهای طبیعی بر پایه لایه مدل رقومی ارتفاع دقیق بنا شده‌اند. علت این امر را می‌توان در ماهیت این داده توپوگرافی جست، به شکلی که کاربر قادر است از بطن آن به مجموعه وسیعی از داده‌های ثانویه با دلالت ضمنی هیدرولوژیک، اقلیمی، پوشش، خاک، زمین‌شناسی و زمین‌ریخت‌شناسی (ژئومورفولوژیک) دست یابد. لذا، مدل رقومی ارتفاع امروزه تحت عنوان پروکسی یا رابط شناخته می‌شود. این نوع از مشتقات مدل



شکل ۳- آبکندهای برداشت‌شده توسط پهپاد

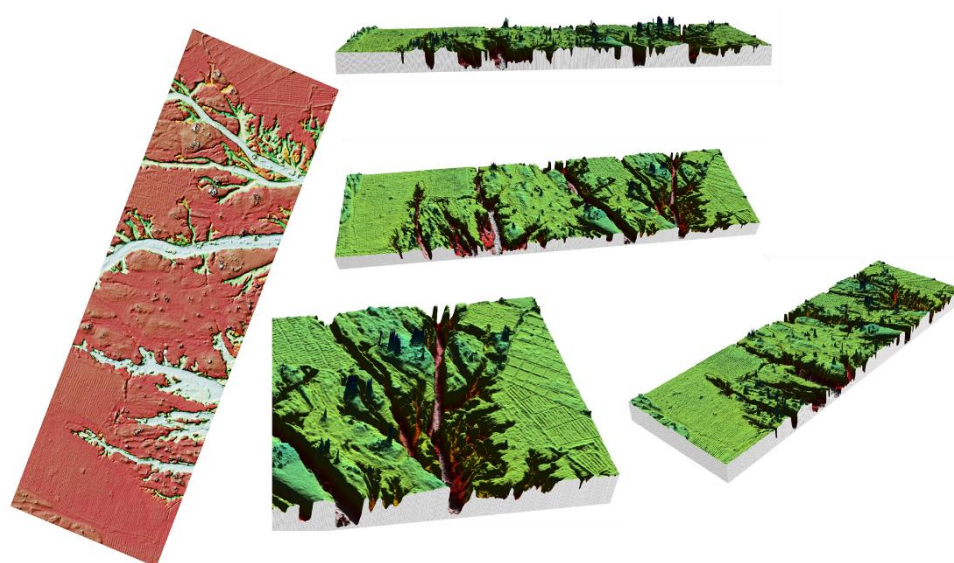
Figure 3. Waterholes taken by UAV

به منظور استخراج خودکار الگوی مکانی آبکندها، یکی از پارسل‌های ۶۰۰ هکتاری انتخاب گردید.



شکل ۴- استخراج خودکار آبکندها در منطقه شماره ۱

Figure 4. Automatic extraction of water bodies in area No 1.



شکل ۵- استخراج خودکار آبکندها در منطقه شماره ۲

Figure 5. Automatic extraction of waterholes in area No. 2

گردید که در جدول ۱ ارائه شده و رابطه علت و معلولی هر شاخص با پدیده فرسایش آبکندی ذکر گردیده است.

به منظور استخراج سریع آبکندها بدون نیاز به صرف هزینه و زمان برای جمع‌آوری داده‌های زمینی گسترده، تنها از مدل رقومی ارتفاع (DEM) و مشتقات مورفومتریک آن استفاده

جدول ۱- شاخص‌ها مورفومتریک استفاده‌شده و ارتباط آن‌ها با پدیده فرسایش آبکندی

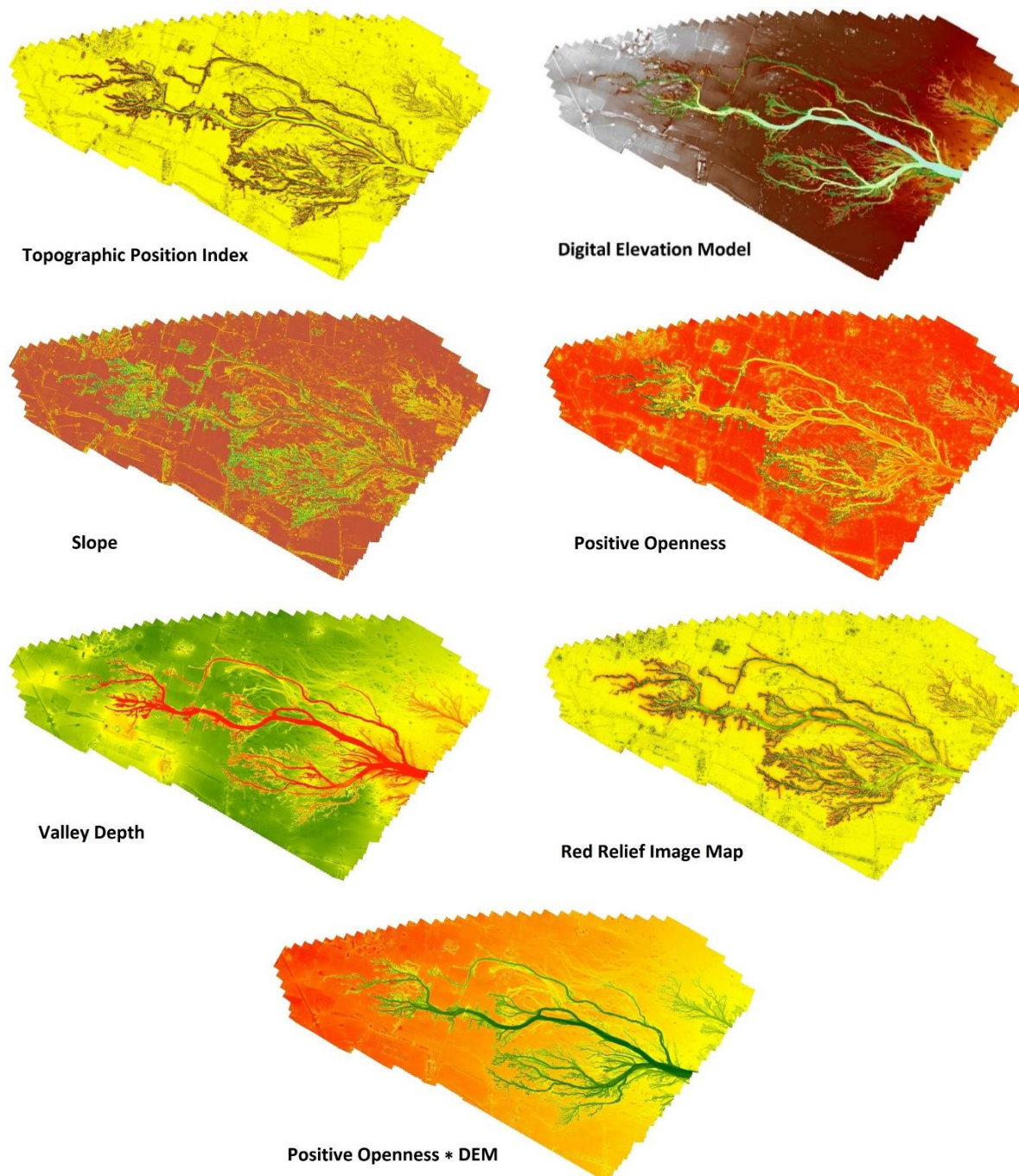
Table 1. The morphometric indices used and their relationship with the phenomenon of hydrostatic erosion

شاخص	تأثیر شاخص بر وقوع آبکند
عمق دره	تفکیک یال و دره
موقعیت توپوگرافی	تفکیک شیب‌های بالایی، میانی و پایینی
بازشدگی مثبت	تفکیک عوارض محدب و مقعر (تقعر آبکند)
نقشه پستی و بلندی شبه استریو و اغراق شده	تجسم شبه استریو از عوارض زمین حاصل از ترکیب با شیب، درک بهتر پستی و بلندی
مدل رقومی ارتفاعی	ارتفاع از سطح دریا، تفکیک مناطق پست (کف آبکند) از مناطق مرتفع
درجه شیب	تغییر ناگهانی زاویه شیب (لبه آبکندها)
ضریب ارتفاع در بازشدگی مثبت	ترکیب ارتفاع و تحدب-تقعر به منظور تفکیک بهتر آبکندها

Receiver Characteristic Curve) با علامت اختصاری AUROC، دقت طبقه‌بندی را می‌سنجد. این طبقه‌بندی خودکار آن‌قدر تکرار می‌شود تا مقدار AUROC بیشینه گردد؛ بدین معنی که آستانه طبقه‌بندی انتخاب‌شده در بهینه‌ترین حالت ممکن بوده و بیشترین تطابق را با واقعیت زمینی (الگوی توسعه مکانی آبکندها) دارد. مقدار آستانه طبقه‌بندی بهینه برای هر شاخص متفاوت بوده و بالطبع، موفقیت و دقت هر شاخص در استخراج الگوی آبکندها نیز متفاوت خواهد بود. در نهایت شاخصی که بیشترین مقدار AUROC را دریافت کرده، به عنوان بهترین شاخص برای پیش‌بینی الگوی توسعه مکانی آبکندها انتخاب می‌شود.

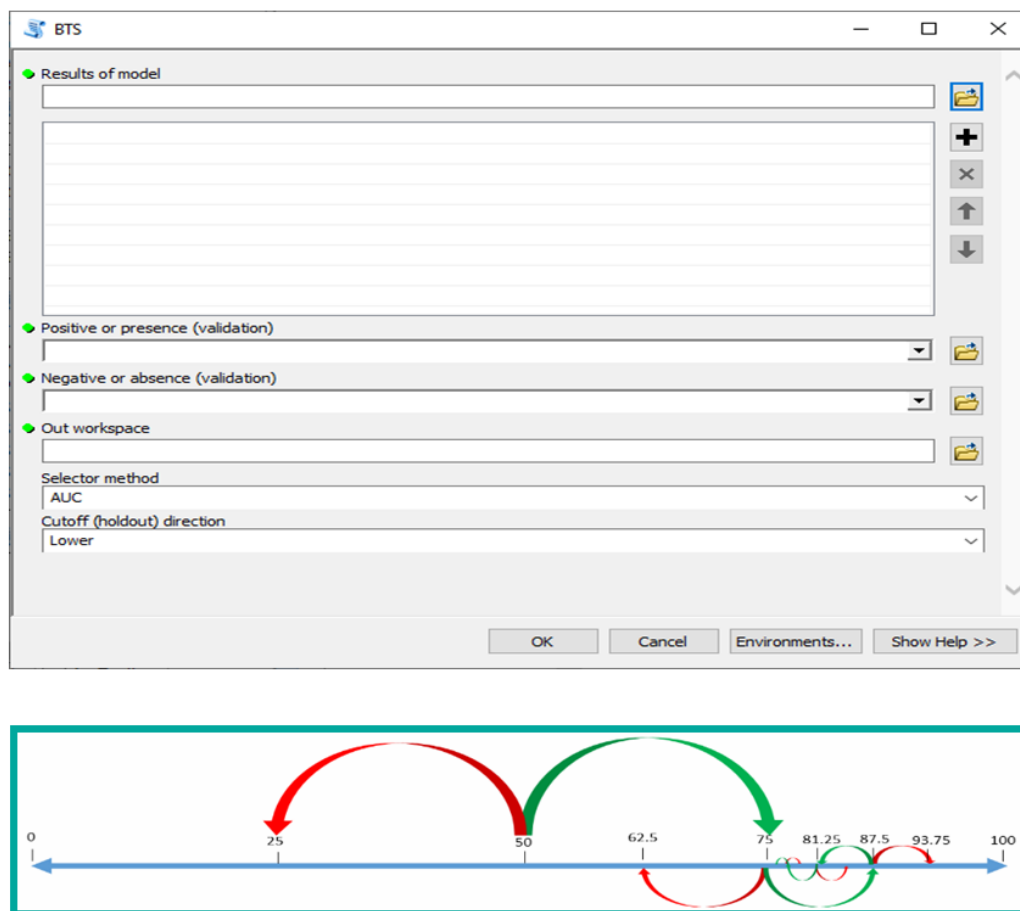
پس از استخراج شاخص‌های مورفومتریک، نیاز به تعیین حد آستانه برای طبقه‌بندی لایه هر شاخص به دو گروه دارای گالی و فاقد گالی می‌باشیم. از آنجاکه ماهیت عددی شاخص‌های مورفومتریک پیوسته است و از یک بازه مشخص از اعداد اعشاری تشکیل شده، تعیین آستانه طبقه‌بندی دقیق نیازمند صرف زمان و آزمون و خطای زیادی است که لزوم توسعه یک ابزار خودکارسازی را یادآور می‌شود.

بدین منظور، ابزار (BTS (Best Threshold Selector در زبان برنامه‌نویسی پایتون در محیط ArcGIS توسعه داده شد. این ابزار پس از هر بار طبقه‌بندی لایه مدنظر، بر اساس یک شاخص اعتبارسنجی تحت عنوان مساحت زیرمنحنی مشخصه عملکرد نسبی سیستم (Area Under the



شکل ۶- شاخص‌های مورفومتریک حاصل از مدل رقومی ارتفاع پهپاد

Figure 6. Morphometric indices obtained from the digital model of the height of the UAV



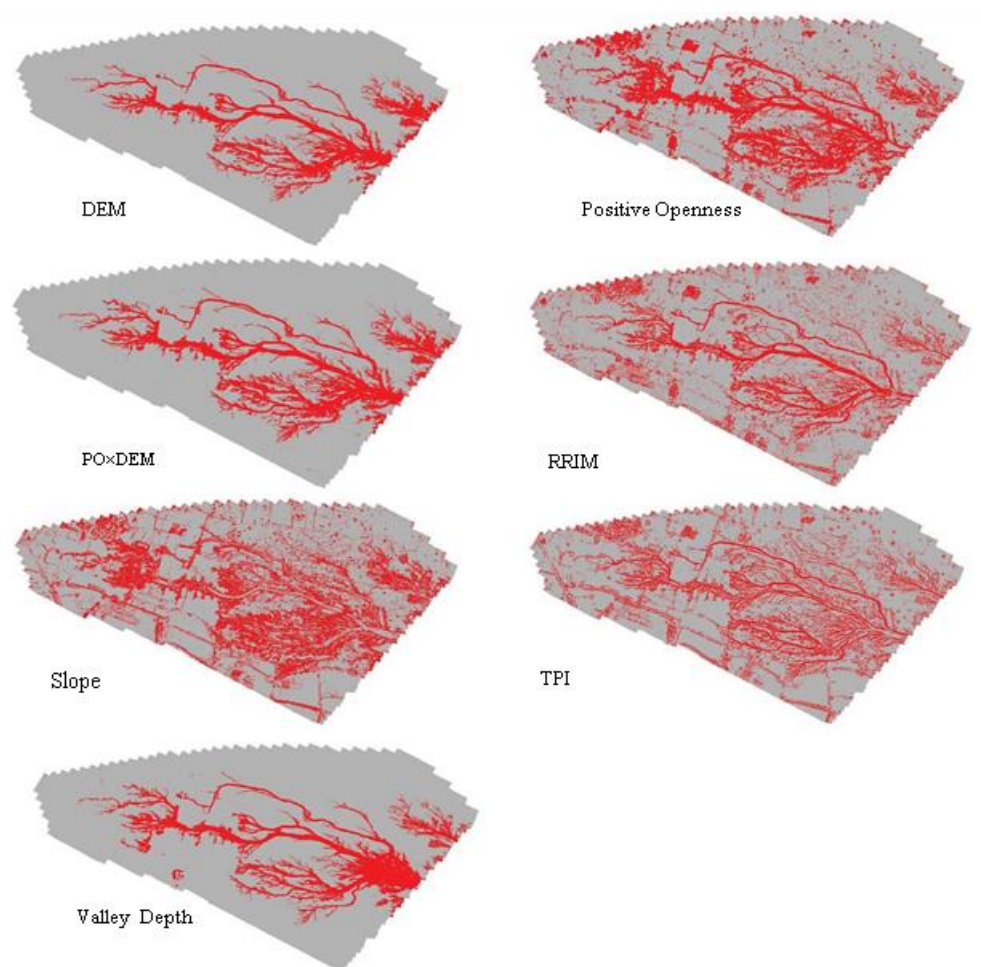
شکل ۷- شمایی از الگوریتم جستجوی خودکار آستانه طبقه‌بندی شاخص‌ها و رابط گرافیکی کاربری (اینترفیس) ابزار

BTS در محیط ArcGIS

Figure 7. A summary of the automatic search algorithm for the index classification threshold and the graphical user interface (interface) of the BTS tool in the ArcGIS environment

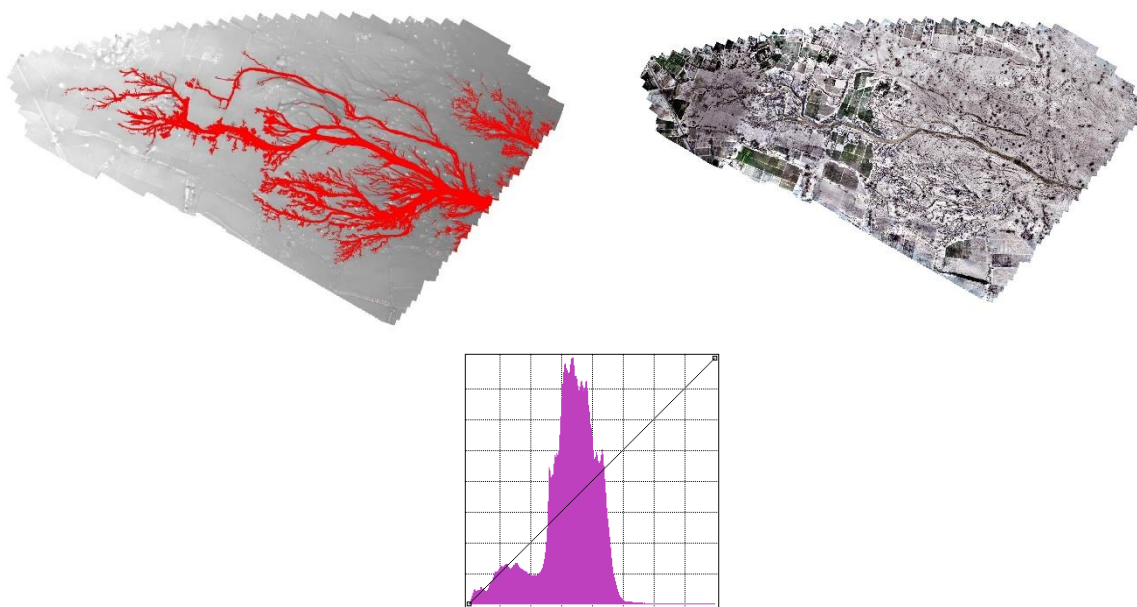
شاخص مورفومتریک بسیار ناچیز است، می‌توان نقش شاخص‌های مورفومتریک و همچنین کارایی ابزار BTS در طبقه‌بندی بهینه شاخص را امیدوارکننده دانست. لازم به ذکر است، ترسیم دستی الگوی آبکندها در محدوده مطالعاتی نیازمند صرف زمان ۳ تا ۶ ماه می‌باشد.

تصویر زیرالگوی مکانی آبکندهای مستخرج از هر شاخص می‌باشد. بر اساس انطباق با واقعیت زمینی مبتنی بر شاخص AUROC، مشخص گردید شاخص ترکیبی ارتفاع و بازشدگی مثبت ($PO \times DEM$) با دقت ۹۸ درصد قادر به استخراج الگوی توسعه مکانی آبکندهای دشتیاری است. با توجه به آنکه زمان موردنیاز برای تولید و ضرب این دو



شکل ۸- الگوی مکانی آبکندهای مستخرج از هر شاخص

Figure 8. Spatial pattern of water bodies extracted from each index



شکل ۹- طبقه‌بندی نهایی و آبکندهای مستخرج از شاخص ترکیبی POxDEM

Figure 9. The final classification and watersheds extracted from the POxDEM composite index

گونه‌های درختی در برداشت جدید بوده که بایستی با صرف زمان قابل ملاحظه حذف شده و مقایسات بعدی صرفاً مبتنی بر مدل رقومی پستی و بلندی زمین (DTM: Digital Terrain Model) باشد. لذا، کلیه تحلیل‌های (DOD (DEM of Difference برای شناسایی الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری بایستی مبتنی بر تفریق DTM و حذف پوشش‌های طبیعی و مصنوعی از لایه DSM باشد. در ادامه مقایسه دو برداشت از پارسل ۲ ارائه شده است.

همان‌طور که در دو شکل ۱۰ و ۱۱ مشهود است، بخش اعظم فرسایش بستر در بخش غربی پارسل ۳ مشرف به رودخانه کاجو رخ داده که پیش از رخداد سیلاب فاقد هرگونه رشد آبکند بوده است. این الگو در بخش‌های مرکزی که پیشتر نیز شاهد گسترش گالی‌ها بودیم به صورت فرسایش کناری و لغزش‌های کم‌عمق دیواره گالی و رسوبگذاری‌های محلی در میانه بستر گالی قابل مشاهده است. هرچند بخش اعظم الگوی رسوب‌گذاری ارائه‌شده در شکل ۹ ناشی از تغییر و رشد الف

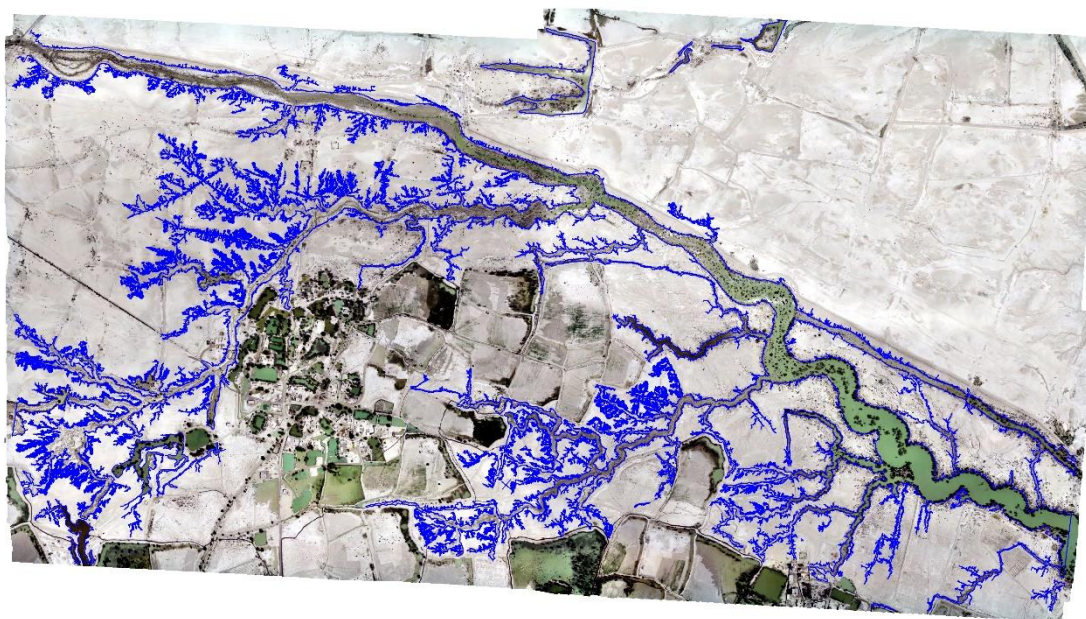


ب



شکل ۱۰- مقایسه دو برداشت پهپاد در پارسل ۲ قبل (الف) و بعد (ب) از رخداد بارش/سیلاب

Figure 10. Comparison of two UAV images in Parcel 2 before (a) and after (b) the rain/flood event



شکل ۱۱- ترسیم گالی‌ها در پارسل ۲

Figure 11. Drawing the galleys in parcel 2

همان‌طور که در دو شکل ۱۰ و ۱۱ مشهود است، گالی‌ها در پارسل ۲ فاقد هرگونه توسعه طولی، عرضی و یا عمقی بوده که ناشی از فاصله قابل‌توجه از رودخانه کاجو به عنوان محرک هیدرولوژیک اصلی توسعه گالی‌های دشتیاری می‌باشد.

اقتصادی خاک ازدست‌رفته برای هر تن خاک معادل ۴۰ یورو برآورد شده است که در یک عرصه آهکتاری رقمی معادل ۱۶۰,۰۰۰ یورو خواهد بود. این میزان ارزش اقتصادی در عرصه ۶۰۰ هکتاری مورد پایش در منطقه دشتیاری ۱۰۰ میلیون یورو و در کل محدوده ۱۳۰,۰۰۰ هکتاری ۲۰ میلیارد یورو معادل ۱۰ برابر بودجه اختصاص‌یافته کشور هلند در بخش کشاورزی در سال ۲۰۲۱ میلادی می‌باشد. در بخش صادرات محصولات کشاورزی هلند رتبه ۱ اتحادیه اروپا را دارد و پس از آمریکا رتبه ۲ در جهان است (۱۳). در تصاویر ماهواره‌ای که مقارن با رخداد بارندگی ثبت شده است علاوه بر خسارت‌های جبران‌ناپذیری که در عرصه کشاورزی، اقتصادی اجتماعی و زیرساخت‌های شهری داشته اثرات زیست‌محیطی زیادی در خلیج گواتر را شاهد هستیم. بهره‌برداری از فناوری‌های نوین و فناورانه و همچنین به‌کارگیری نیروی متخصص در حوزه‌های فناوری می‌تواند در پایش پدیده‌ها و رخدادهای ارزیابی اثربخشی اجرای اقدامات آب‌خیزداری و آبخوان‌داری بسیار مؤثر و کارآمد باشد. در تحقیقات پیشین نیز اهمیت به‌کارگیری تصاویر ماهواره‌ای و پهنپای نشان داده شده است (۱۴ و ۱۵).

بحث و نتیجه‌گیری

فرسایش آب‌بندی یا خندقی که در اصطلاح محلی به آن گرگرو گفته می‌شود، در محدوده دشتیاری استان سیستان و بلوچستان وسعتی بالغ بر ۱۳۰,۰۰۰ هکتار را تحت تأثیر خود قرار داده است. در پایش صورت گرفته با فناوری پهپاد / لیزراسکن در محدوده ۶۰۰ هکتاری (محدوده پرواز شماره ۳) در دو بازه زمانی قبل و بعد از رخداد سیلاب را نشان می‌دهد که حجمی بالغ بر ۱,۶۰۰,۰۰۰ مترمکعب معادل ۲,۵۰۰,۰۰۰ تن خاک در این عرصه فرسایش یافته است. این میزان هدر رفت خاک که معادل ۴,۰۰۰ تن در هکتار در یک رخداد بارندگی (۱۱۰ میلی‌متر) است، اهمیت حفاظت خاک، انجام اقدامات آب‌خیزداری و آبخوان‌داری را در منطقه دشتیاری را بیش‌ازپیش نشان می‌دهد. بر اساس آخرین نتایج ارائه‌شده در سمپوزیوم جهانی فرسایش خاک (ایتالیا، ۲۰۱۹) میزان ارزش

6. Zhang, S., Wang, X., Xiao, Z., Qu, F., Wang, X., Li, Y., Aurangzeib, M., Zhang, X., & Liu, X. (2020). Quantitative studies of gully slope erosion and soil physiochemical properties during freeze-thaw cycling in a Mollisol region. *The Science of the total environment*, 707, 136191.
7. Chen, Z., Guo, M., Zhou, P., Wang, L., Liu, X., Wan, Z., & Zhang, X. (2024). Gully regulates snowmelt runoff, sediment and nutrient loss processes in Mollisols region of Northeast China. *The Science of the total environment*, 940, 173614.
8. Arabameri, A., Rezaie, F., Pal, S. C., Cerda, A., Saha, A., Chakraborty, R., & Lee, S. (2021). Modelling of piping collapses and gully headcut landforms: Evaluating topographic variables from different types of DEM. *Geoscience Frontiers*, 12(6), 101230.
9. Hasanuzzaman, M., & Shit, P. (2024). Assessment of gully erosion susceptibility using four data-driven models AHP, FR, RF and XGBoosting machine learning algorithms. *Natural Hazards Research*.
10. Chowdhuri, I., Pal, S. C., Arabameri, A., Saha, A., Chakraborty, R., Blaschke, T., ... & Band, S. S. (2020). Implementation of artificial intelligence based ensemble models for gully erosion susceptibility assessment. *Remote Sensing*, 12(21), 3620.
11. Mohebzadeh, H., Biswas, A., Rudra, R., & Daggupati, P. (2022). Machine learning techniques for gully erosion susceptibility mapping: a review. *Geosciences*, 12(12), 429.
12. Bammou, Y., Benzougagh, B., Abdessalam, O., Brahim, I., Kader,

References

1. Modak, P., Mandal, M., Mandi, S., & Ghosh, B. (2023). Gully erosion vulnerability modelling, estimation of soil loss and assessment of gully morphology: a study from cratonic part of eastern India. *Environmental science and pollution research international*, 30(55), 116656–116687.
2. Yibeltal, M., Tsunekawa, A., Haregeweyn, N., Adgo, E., Meshesha, D. T., Zegeye, A. D., Andualem, T. G., Oh, S. J., Lee, J. C., Kang, M. W., & Lee, S. S. (2023). Analyzing the contribution of gully erosion to land degradation in the upper Blue Nile basin, Ethiopia. *Journal of environmental management*, 344, 118378.
3. He, N., Han, R., Hu, G., Yang, Z., Xu, L., & Gurkalo, F. (2024). Evaluation of highway debris flow hazard based on geomorphic evolution theory coupled with material response rate. *Scientific reports*, 14(1), 13533. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-64279-y>.
4. Cen, Y., Zhang, B., Luo, J., Deng, Q., Liu, H., & Wang, L. (2022). Influence of Topographic Factors on the Characteristics of Gully Systems in Mountainous Areas of Ningnan Dry-Hot Valley, SW China. *International journal of environmental research and public health*, 19(14), 8784. <https://doi.org/10.3390/ijerph19148784>.
5. Wang, D., Fan, H., & Fan, X. (2017). Distributions of recent gullies on hillslopes with different slopes and aspects in the Black Soil Region of Northeast China. *Environmental monitoring and assessment*, 189(10), 508.

- Panagopoulos, T.; Sardooi, E.R. 2019. Modeling the Impact of Climate Change and Land Use Change Scenarios on Soil Erosion at the Minab Dam Watershed. *Sustainability*, 11, 3353.
15. Pérez-Vega, A., Mas, J. F., & Ligmann-Zielinska, A. (2012). Comparing two approaches to land use change modeling and their implications for the assessment of biodiversity loss in a deciduous tropical forest. *Environmental Modelling and Software*, 29(1), 11–23.
<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.09.011>
- S., Spalevic, V., ... & Ercişli, S. (2024). Machine learning models for gully erosion susceptibility assessment in the Tensift catchment, Haouz plain, Morocco for sustainable development. *Journal of African Earth Sciences*, 213, 105229.
13. Pawlak, K., Hagemeyer, J., Michalek, J. J., & Dunin-Wasowicz, M. (2022). How big a drop in agricultural exports to the United Kingdom after Brexit? Simulations for sensitive products of four Visegrad countries. *PloS one*, 17(9), e0274462.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0274462>.
14. Azimi Sardari, M.R.; Bazrafshan, O.;