

ارزیابی حساسیت خاک به فرسایش خندقی با استفاده از مدل CART و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) (منطقه مورد مطالعه: حوضه آبخیز خسویه استان فارس)

رضا ذاکری نژاد* - استادیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا و برنامه ریزی، دانشگاه اصفهان.
عباس کهرانی - دانش آموخته کارشناسی ارشد رشته سنجش از دور و GIS، دانشکده جغرافیا و برنامه ریزی، دانشگاه اصفهان.
مژگان انتظاری - دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا و برنامه ریزی، دانشگاه اصفهان.

پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۲/۰۱ تأیید نهایی: ۱۴۰۲/۰۶/۰۸

چکیده

فرسایش خاک در هر مکان از عوامل مختلفی از جمله ویژگی‌های طبیعی و فعالیت‌های انسان تأثیر می‌پذیرد. از میان انواع فرسایش آبی، فرسایش خندقی را می‌توان مخرب‌ترین نوع آن قلمداد کرد که سالانه موجب ایجاد حجم عظیمی از رسوبات می‌شود. هدف این پژوهش شناسایی عوامل مؤثر بر وقوع فرسایش خندقی، پیش‌بینی و پهنه‌بندی احتمال وقوع خطر فرسایش خندقی در حوضه آبخیز خسویه در استان فارس با استفاده از مدل CART است. در ابتدا موقعیت خندق‌های شکل‌گرفته با استفاده از نرم‌افزار گوگل ارث و سیستم تعیین موقعیت جهانی ثبت شده‌اند. در این پژوهش از ۱۶ متغیر تأثیرگذار در فرسایش خندقی شامل شاخص‌های مربوط به توپوگرافی (ارتفاع، شیب، جهت شیب، طول شیب، قدرت جریان، عمق آبراهه، رطوبت توپوگرافی و انحنا طولی)، شاخص نرمال شده پوشش گیاهی، کاربری اراضی، فاصله از راه‌ها، فاصله از آبراهه، نقشه زمین‌شناسی، میزان بارش، نوع خاک و فرسایش‌پذیری خاک استفاده شده است. پس از تخصیص مقادیر مربوط به شاخص‌های مستقل به نقاط برداشت شده از خندق‌ها مدل‌سازی جهت پهنه‌بندی یا پیش‌بینی مناطق مستعد فرسایش خندقی در منطقه مورد مطالعه، در محیط نرم‌افزار SPM با استفاده از مدل CART انجام شد. مدل مذکور در فرایند مدل‌سازی از ۷۰ درصد داده‌ها به‌عنوان داده‌های آموزش و ۳۰ درصد داده‌ها به‌عنوان داده‌های آزمون استفاده کرده است. دقت مدل اجرا شده بر اساس شاخص R^2 برابر ۰/۹۰۷ بوده است. در نهایت نقشه پهنه‌بندی خطر فرسایش خندقی در ۵ کلاس؛ خطر خیلی زیاد، خطر زیاد، خطر متوسط، کم خطر و خیلی کم خطر، در محیط نرم‌افزار ArcGIS تهیه گردید، بر اساس این نقشه ۱۰ درصد از مساحت منطقه مورد مطالعه در کلاس خطر خیلی زیاد واقع شده است.

واژگان کلیدی: فرسایش خندقی، حوضه آبخیز خسویه، مدل CART، نرم‌افزار SPM.

مقدمه

فرسایش خاک در هر مکان از عوامل مختلفی از جمله ویژگی‌های طبیعی و فعالیت‌های انسان تأثیر می‌پذیرد. نظام بارشی مدیترانه‌ای و فرساینده‌ی زیاد آب، وسعت زیاد خاک‌ها و سازندهای حساس به فرسایش، پوشش گیاهی طبیعی تنک در بسیاری از مناطق کشور و شرایط ناهمواری‌ها شماری از عوامل طبیعی مهم مؤثر بر فرسایش خاک در ایران هستند (عرب خدری، ۱۳۹۳: ۱۷). به طوری که حدود ۱۲۵ میلیون هکتار از ۱۶۵ میلیون هکتار اراضی کشور در معرض فرسایش آبی قرار دارند (رفاهی، ۱۳۸۸: ۵۰). از میان انواع فرسایش آبی شامل فرسایش پاشمانی، ورقه‌ای، شیاری و بین شیاری، تونلی و خندقی، فرسایش خندقی مخرب‌ترین نوع فرسایش خاک است که معمولاً به صورت یک کانال عمیق است که به وسیله‌ی جریان آب متمرکز فرسایش یافته و خاک‌های سطحی و مواد آن از بین رفته و بزرگ‌تر از آن است که به وسیله‌ی عمل شخم زدن معمولی ایجاد شود، معمولاً زمانی ایجاد می‌شود که آستانه ژئومورفولوژیک به علت افزایش در قدرت فرساینده‌ی آب و یا فرسایش‌پذیری رسوب افزایش پیدا می‌کند (تووری^۱ و همکاران، ۲۰۱۲: ۷۸).

فرسایش خندقی مشکلی عمده برای مدیریت منابع طبیعی است که منجر به تخریب زمین و خسارات اقتصادی در سرتاسر جهان می‌شود (چاپلوت^۲، ۲۰۱۳: ۲). این پدیده باعث آسیب رساندن به زیرساخت‌ها مانند جاده و خطوط انتقال گاز و برق، منابع طبیعی و کشاورزی می‌شود (عرب عامری و پورقاسمی، ۲۰۱۹: ۹۳۰). این نوع از هدر رفت خاک به عنوان یکس از عوامل اصلی تخریب سرزمین و بیابان‌زایی خصوصاً در مناطق خشک و نیمه خشک می‌باشد (ذاکری نژاد، ۱۳۹۹: ذاکری نژاد و مرکز^۳، ۲۰۱۴). خندق‌ها از ویژگی‌های معمول شیب‌ها و مناطق تپه‌ماهوری هستند که عوامل زمین محیطی مختلفی مانند توپوگرافی، سنگ‌شناسی، بارندگی، خاک، کاربری اراضی و غیره در ایجاد آن‌ها مؤثر است (ال مائویی^۴، ۲۰۱۲: ۹۹). به طور کلی می‌توان بیان کرد که وقوع فرسایش خندقی از سازوکار پیچیده‌ای پیروی می‌کند و عوامل متعددی می‌توانند در ایجاد و تشدید آن دخالت داشته باشند.

تاکنون مطالعات گسترده‌ای در زمینه‌ی عوامل مؤثر، طبقه‌بندی، پهنه‌بندی و مدل‌سازی این فرآیند صورت گرفته است که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود: عماد الدین و همکاران (۱۴۰۰) در مقاله خود با عنوان ارزیابی فرسایش خندقی در حوضه آبخیز قویجق در استان گلستان با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی (ANN^۵) با ساختار چندلایه پرسپترون و روش (MLP^۶) با استفاده از متغیرهای مستقل شیب، جهت شیب و ارتفاع حوضه برگرفته از مدل رقومی ارتفاع، واحدهای اراضی، کاربری اراضی، فاصله از آبراهه، زمین‌شناسی و فاصله از راه به این نتیجه رسیدند که به ترتیب ۲۰، ۳۰، ۲۴، ۱۶ و ۱۰ درصد از مساحت منطقه مورد مطالعه در مناطق با طبقه بندی خطر بسیار زیاد، خطر زیاد، خطر متوسط، کم‌خطر و خیلی کم‌خطر قرار گرفته‌اند که بیشتر منطبق بر آبراهه‌ها، راه‌های ارتباطی و زمین‌شناسی بوده‌اند.

رنگزن و همکاران (۱۴۰۱) در مقاله خود با عنوان تعیین مناطق مستعد فرسایش خندقی با استفاده از تابع عضویت فازی در حوضه آبخیز شهر مهر، در جنوب استان فارس به تعیین نقاط مستعد فرسایش خندقی با استفاده از تابع عضویت فازی و مدل تحلیل سلسله مراتبی در شهر مهر، در جنوب استان فارس پرداخته‌اند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که مناطق واقع در مرکز منطقه مورد مطالعه (حدود ۱۸ درصد) دارای حساسیت بیشتری نسبت به فرسایش خندقی هستند. آن‌ها جهت اعتبار

1. Torri

2. Chaplot

3. Zakerinejad & Maerker

4. El Maaoui

5. Artificial Neural Networks

6. Multi Layer perceptron

سنجی مدل از منحنی (ROC^۱) استفاده کرده‌اند، مقادیر AUC^۲ نزدیک به ۸۵ نشان‌دهنده دقت بالای مدل برای پیش‌بینی نواحی مستعد فرسایش خندقی در حوضه آبخیز شهر مهر بوده است.

نوی‌آ و همکاران (۲۰۲۰) در مقاله خود با عنوان بررسی حساسیت فرسایش خندقی مبتنی بر GIS به شناسایی دقیق و پیش‌بینی مناطق مستعد فرسایش خندقی رودخانه شور در شمال غرب ایران پرداختند. در این پژوهش از سه مدل (AB)، (Bag) و (RS) استفاده شد نتایج حاصل از این تحقیق نشان داده است که بارش، ارتفاع و تراکم رودخانه مهم‌ترین عوامل برای بررسی حساسیت به فرسایش خندق در منطقه مورد مطالعه بوده است.

گاین^۳ و همکاران (۲۰۲۰) در مقاله خود با عنوان مدل‌سازی فرسایش خندقی بر اساس جنگل تصادفی با استفاده از GIS و R. در مطالعات فرسایش خندقی از هند و مناطق اطراف آن؛ نقشه پتانسیل فرسایش خندقی حوضه رودخانه باکلاچارکند هند را با استفاده از مدل (RF^۵) تهیه کردند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داده است که مدل (RF) از دقت و پیش‌بینی بالایی برخوردار است. مقدار (AUC) در پایان تجزیه و تحلیل ۹۱ درصد بوده است، که نشان‌دهنده دقت بالای این مدل برای پیش‌بینی فرسایش خندقی در این منطقه است.

ذاکری نژاد و همکاران (۲۰۲۱) در مقاله خود با عنوان پیش‌بینی حساسیت‌های فرسایش خندقی با استفاده از مدل مکسنت به ارزیابی انواع فرسایش آبی (خندقی، شیبی و بدلند) در حوضه آبخیز جنوب سمیرم پرداختند که نتایج حکایت از دقت بالای مدل در شناسایی مناطق مستعد فرسایشی و همچنین شناسایی بالایی مدل در یافتن آستانه‌های بحرانی برای فاکتورهای تاثیر گذار در رخداد فرسایش می باشد.

خندقی با استفاده از مدل‌های ANN، CART^۶ و RF، فرسایش خندقی را با استفاده از ۳ مدل جنگل تصادفی (RF)، شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و درخت طبقه‌بندی و رگرسیون (CART) در شمال شرق استان گلستان را با در نظر گرفتن ۱۴ عامل شامل عوامل توپوگرافی، زمین‌شناسی، هیدرولوژیکی، انسانی و محیطی به‌عنوان عوامل مؤثر بر حساسیت در نظر گرفتند. نتایج نشان داد مدل جنگل تصادفی دقیق‌ترین مدل بوده که فاکتورهای فاصله از جاده، کاربری اراضی، ارتفاع از نزدیک‌ترین سطح زهکشی و میزان بارندگی مهم‌ترین متغیرهای مؤثر بر پیش‌بینی فرسایش خندقی هستند.

بورام‌تان^۷ و همکاران (۲۰۲۲) در مقاله خود با عنوان نقشه‌برداری تغییرپذیری و حساسیت فرسایش خندقی با استفاده از سنجش‌ازدور، تجزیه و تحلیل آماری چند متغیره و ماشین آموزش در ماتو گروسوی جنوبی (برزیل)، با بررسی پارامترهای محیطی و انسانی مؤثر بر فرسایش خندقی با استفاده از سه مدل (CART)، (LR^۹)، (MDA^۸) به این نتیجه رسیدند که رواناب‌های سطحی در اثر بارندگی‌های زیاد، شیب کم منطقه، ساخت‌وسازهای مسکونی در حومه شهر و توسعه کشاورزی از عوامل مؤثر بر توسعه فرسایش خندقی هستند. اعتبار سنجی نقشه پهنه بندی حساسیت شاخص > ROC^{۱۰} 0.8 را نشان داد.

هدف این پژوهش بررسی و پیش‌بینی فرسایش خندقی در حوضه آبخیز خسویه (استان فارس) که به دلیل تخریب پوشش گیاهی و خشکسالی‌های اخیر و بارندگی‌های سیل آسا تحت تاثیر فرسایش شدید آبی قرار دارد و به منظور شناسایی

1. Relative Operating Characteristic

2. Area under the ROC Curve

3. Nhu

4. Gayen

5. Random Forest

6. Classification And Regression Tree

7. Bouramthane

8. Multivariate Discriminant Analysis

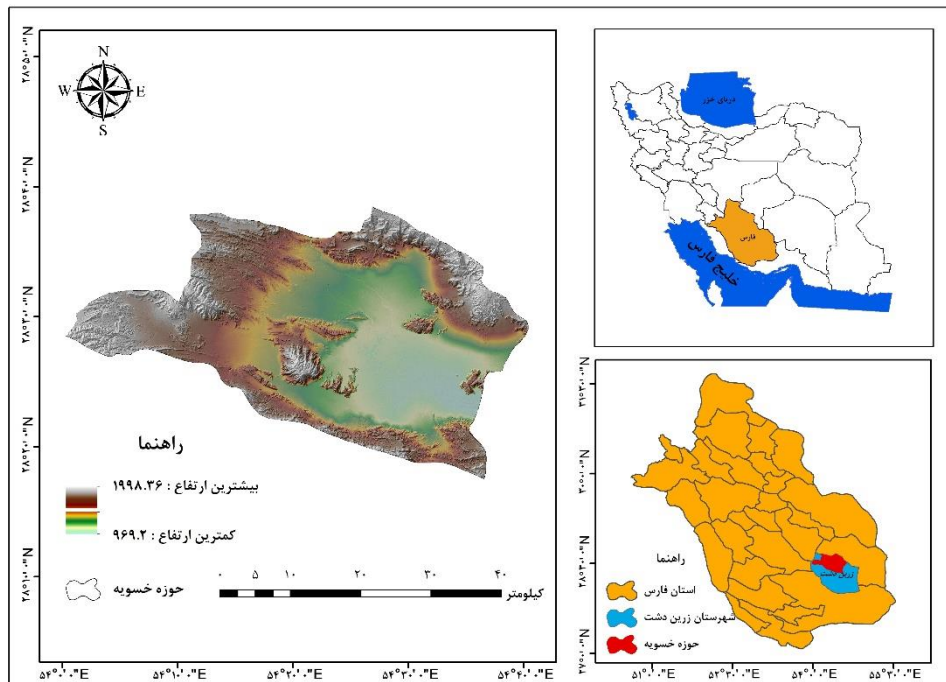
9. Logistic Regression

10. A receiver operating characteristic curve

نواحی پر خطر و همچنین شنایابی عوامل مؤثر بر وقوع آن با استفاده از مدل CART پرداخته می شود. در انتها پژوهش نیز راهکارهایی جهت کاهش خسارات محیطی وارده از طریق این نوع فرسایش آبی می باشد.

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز خسویه، با وسعتی برابر با ۱۳۶۶۲۲ هکتار در فاصله ۳۳۷ کیلومتری شهر شیراز در استان فارس شهرستان زرین دشت قرار دارد. از نظر موقعیت جغرافیای این حوضه بین طول های ۵۴ درجه و ۹ دقیقه تا ۵۴ درجه و ۴۲ دقیقه شرقی و عرض های جغرافیایی ۲۸ درجه و ۱۸ دقیقه تا ۲۸ درجه و ۳۹ دقیقه شمالی، نوار شمالی شهرستان زرین دشت را به خود اختصاص داده است. دمای متوسط سالانه و ماهانه این حوضه به ترتیب برابر ۲۱/۹۱ و ۱۹/۰۹ درجه سانتی گراد می باشد. همچنین بیشینه و کمینه دمای میانگین حوضه به ترتیب ۳۳/۰۹ و ۹/۷۸ درجه سانتی گراد مربوط به ماه های تیر دی، میانگین بارندگی سالانه ایستگاه خسویه ۲۲۱/۵۴ میلی متر و ارتفاع متوسط آن از سطح دریا حدود ۱۱۵۰ متر می باشد (شکل ۱).



شکل ۱: نقشه موقعیت جغرافیایی حوضه آبخیز خسویه

روش تحقیق

در این پژوهش، هدف پیش بینی فرسایش خندقی حوضه آبخیز خسویه با استفاده از داده های مدل رقومی TanDEM و مدل آماری CART می باشد. موقعیت خندق های شکل گرفته با استفاده از تصاویر ماهواره ای، نرم افزار گوگل ارث و سیستم تعیین موقعیت جهانی (GPS) ثبت شده اند. متغیرهای تأثیرگذار در فرسایش خندقی حوضه آبخیز خسویه شامل شاخص های مربوط به توپوگرافی (ارتفاع، شیب، جهت شیب، طول شیب، قدرت جریان، عمق آبراهه، رطوبت توپوگرافی و انحنای طولی)، از مدل رقومی ارتفاع (TanDEM) با قدرت تفکیک مکانی ۱۲ متر در نرم افزار ArcGIS 10.8^۲ و SAGAGIS^۳

^۱. Global Position System

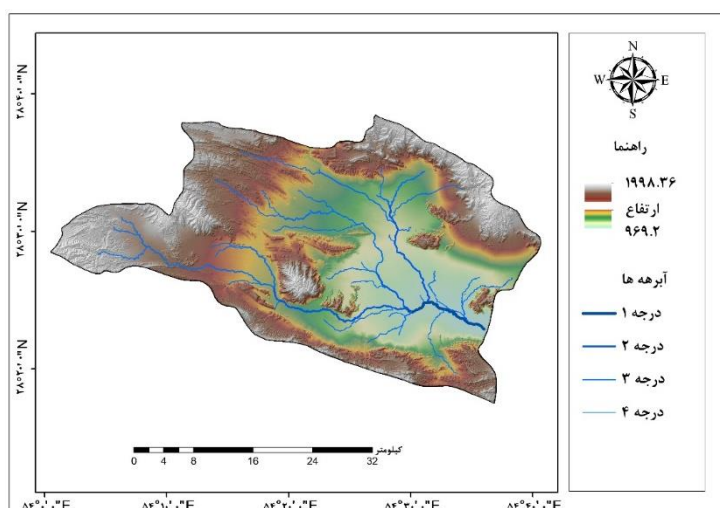
^۲. Geographic Information System

^۳. System for Automated Geoscientific Analysis

استخراج و تهیه گردیده‌اند. شاخص مربوط به تراکم پوشش گیاهی (NDVI^۱) و کاربری اراضی با استفاده از داده‌های مربوط به ماهواره سنتینل ۲^۲ و لندست ۳^۳ در محیط نرم‌افزار ArcGIS و R تهیه شده‌اند. همچنین آبراهه‌های موجود در منطقه در محیط نرم‌افزار ArcMap از مدل رقومی ارتفاع استخراج شد. نقشه مربوط به راه‌های ارتباطی از سایت www.openstreetmap.org دانلود گردید. در نهایت شاخص‌های مربوط به فاصله از راه‌ها و فاصله از آبراهه با استفاده از توابع فاصله اقلیدسی در محیط نرم‌افزار ArcMap تهیه شده‌اند. نقشه زمین‌شناسی (استخراج شده از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ زمین‌شناسی ایران)، میزان بارش برای دوره زمانی سی‌ساله ۱۳۵۱ الی ۱۳۸۱ (آمار سازمان هواشناسی کشور) و به روش رگرسیون خطی که میان ارتفاع و میزان بارش متوسط سالانه بسته شد تهیه گردید، نقشه نوع خاک و فرسایش‌پذیری خاک نیز در محیط نرم‌افزار ArcMap با استفاده از نمونه‌های خاک جمع‌آوری شده از منطقه مورد مطالعه تهیه شده‌اند. جهت تهیه نقشه فرسایش‌پذیری خاک با انجام آزمایشات مکانیک خاک بر روی ۲۰ نمونه خاک جمع‌آوری شده از منطقه مورد مطالعه، درصد ذرات خاک، میزان مواد آلی و بافت خاک حوضه آبخیز خسویه تعیین گردید، سپس جهت مشخص کردن عامل فرسایش از رابطه ۱، معرفی شده توسط ویشمایر و اسمیت، (۱۹۷۸) استفاده گردیده است.

$$K = \frac{2.1M^{1.14} \times 10^{-4} \times (12 - \%M) + 3.25(S-2) + 2.5(P-3)}{100} \quad \text{رابطه ۱}$$

در این رابطه K فرسایش‌پذیری خاک $MJ^{-1}mm^{-1}th^{-1}$ حاصل ضرب (رس - ۱۰۰) در (درصد سیلت + درصد شن ریز)، OM درصد ماده آلی، S کلاس ساختمان خاکدانه‌ها و P کلاس نفوذپذیری خاک است. نقشه متغیرهای مستقل پژوهش در ۴ مجموعه؛ توپوگرافی (ارتفاع، شیب، جهت شیب، عمق آبراهه، طول شیب، انحنای طولی) (اشکال ۷-۲)، اقلیم (رطوبت توپوگرافی، بارش، شاخص پوشش گیاهی) (اشکال ۱۰-۸)، انسانی (فاصله از راه، فاصله از آبراهه و کاربری زمین) (اشکال ۱۳-۱۱) و زمین‌شناسی (زمین‌شناسی، نوع خاک، نفوذپذیری خاک، و قدرت جریان) (اشکال ۱۷ و ۱۴) تقسیم بندی شدند.

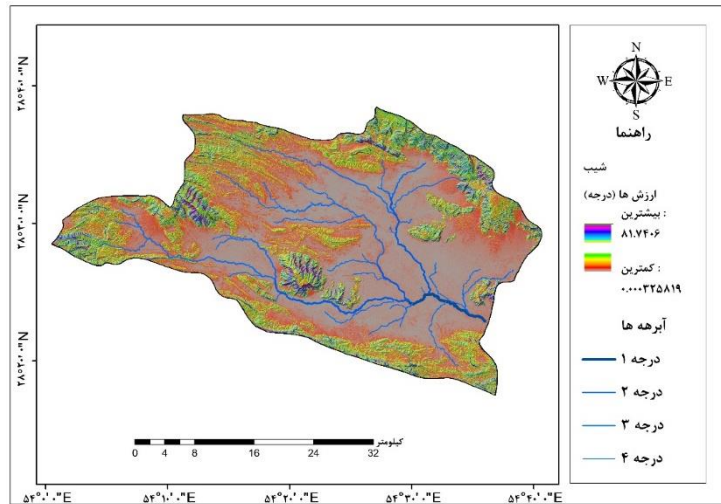


شکل ۲: نقشه ارتفاع حوضه آبخیز خسویه

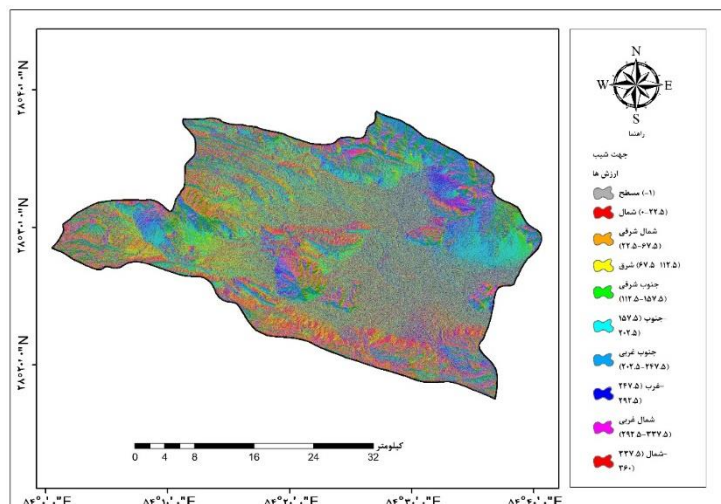
1. Normalized Difference Vegetation Index

2. sentinel 2

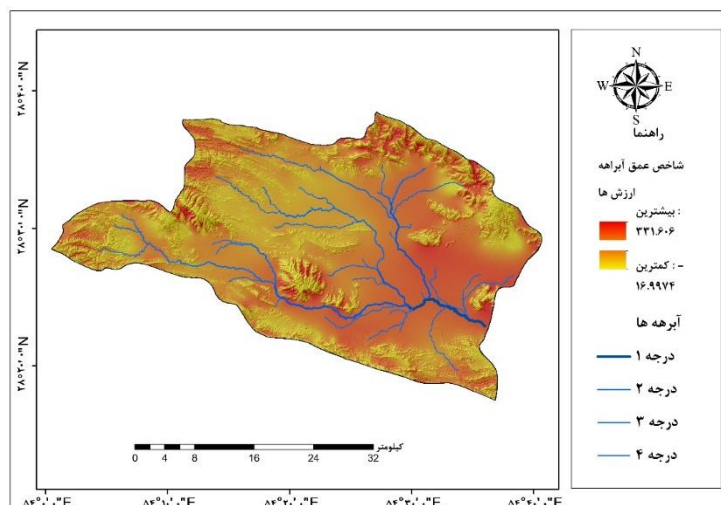
3. Landsat



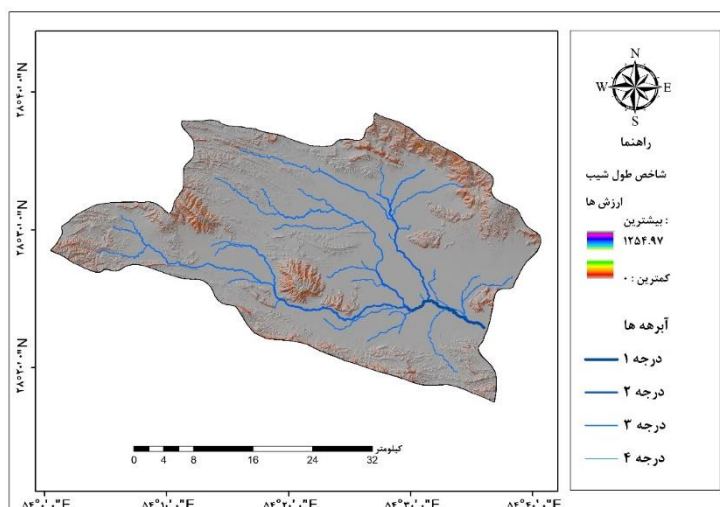
شکل ۳: نقشه شیب حوضه آبخیز خسویه



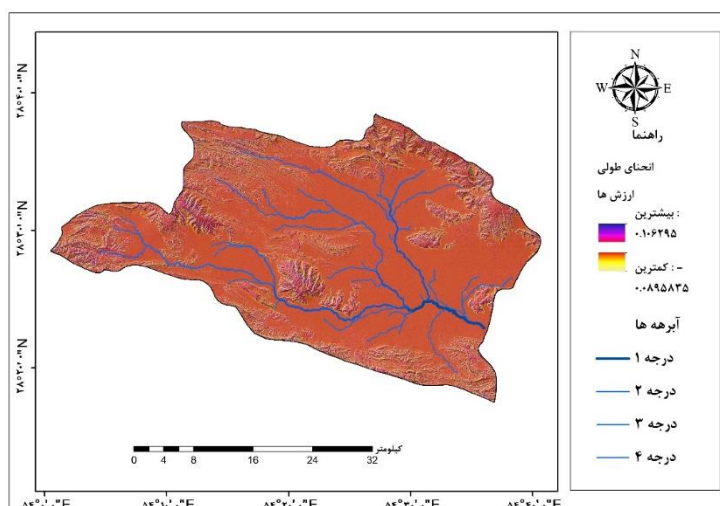
شکل ۴: نقشه جهت شیب حوضه آبخیز خسویه



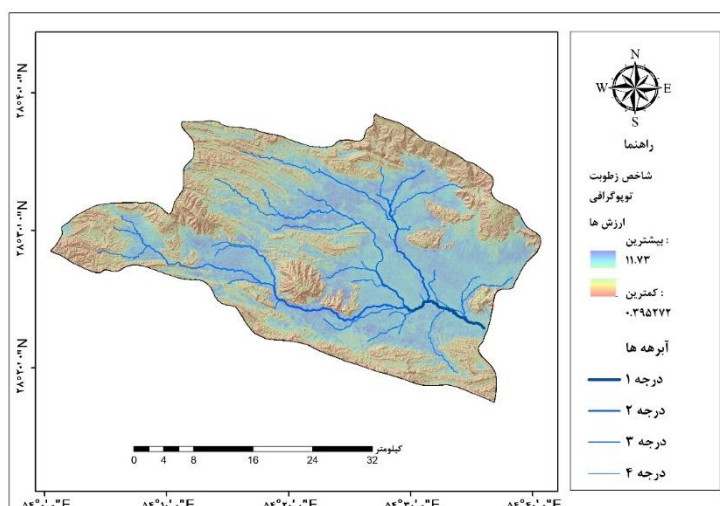
شکل ۵: نقشه عمق آبراهه حوضه آبخیز خسویه



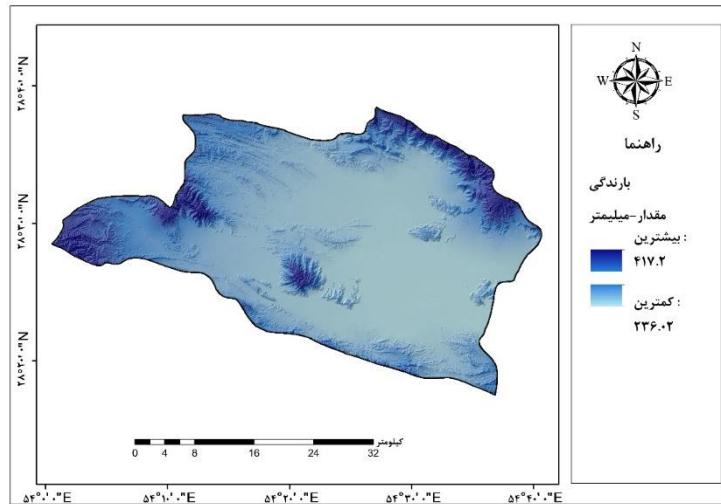
شکل ۶: نقشه طول شیب حوزه آبخیز خسویه



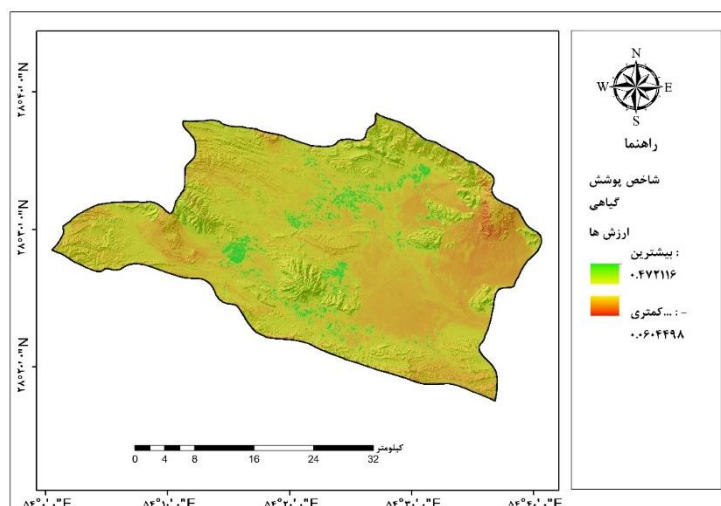
شکل ۷: نقشه انحنای طولی حوزه آبخیز خسویه



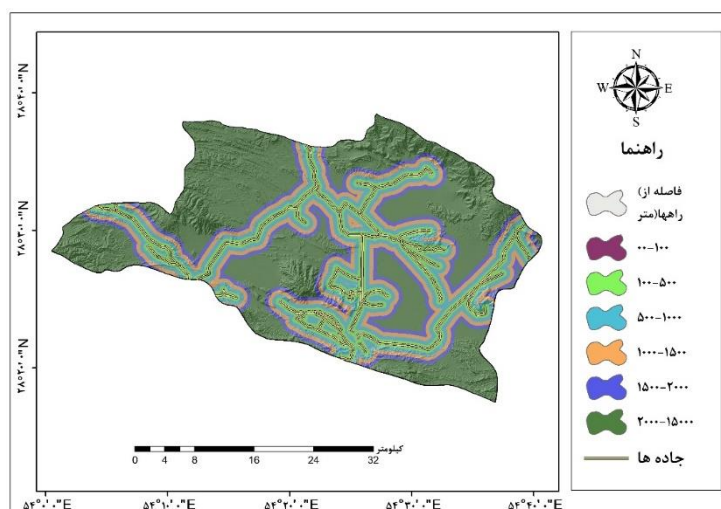
شکل ۸: نقشه رطوبت توپوگرافی حوزه آبخیز خسویه



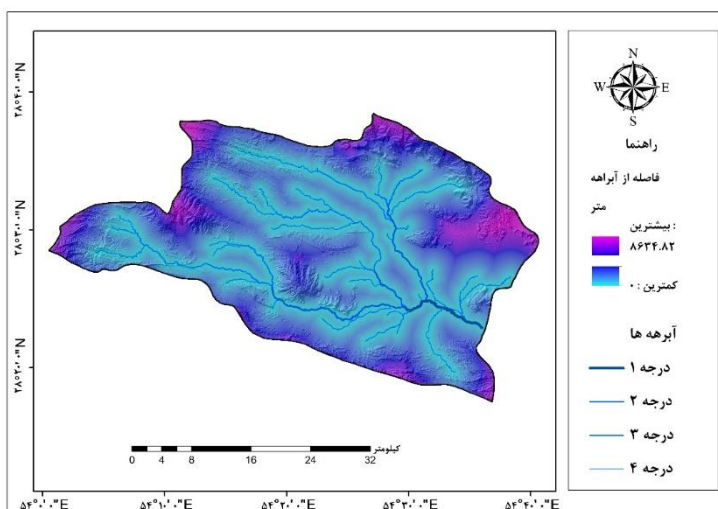
شکل ۹: نقشه بارش حوزه آبخیز خسویه



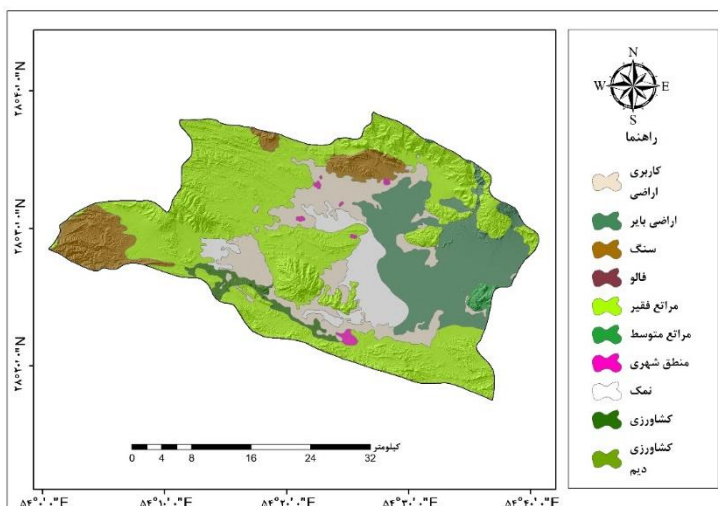
شکل ۱۰: نقشه شاخص پوشش گیاهی حوزه آبخیز خسویه



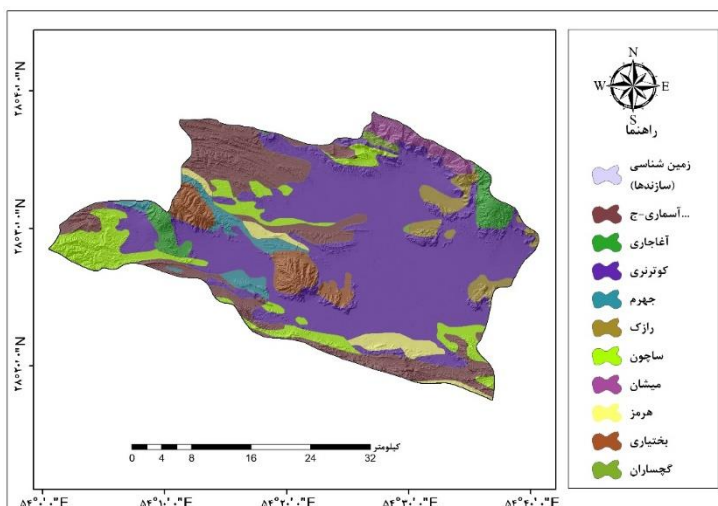
شکل ۱۱: نقشه فاصله از راهها حوزه آبخیز خسویه



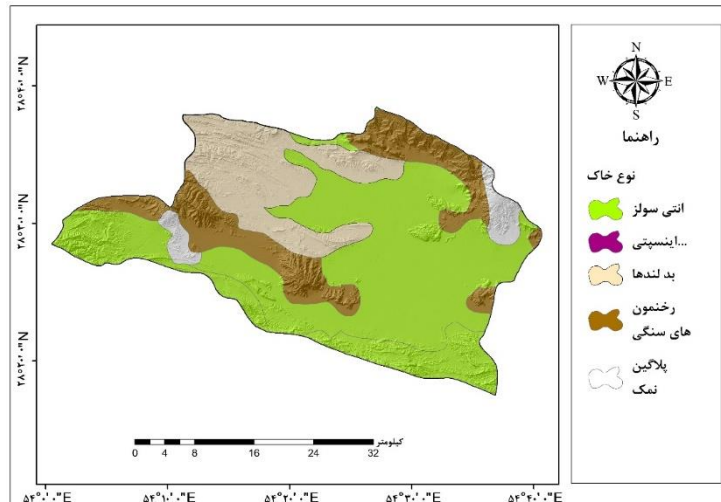
شکل ۱۲: نقشه فاصله از آبراهه حوضه آبخیز خسویه



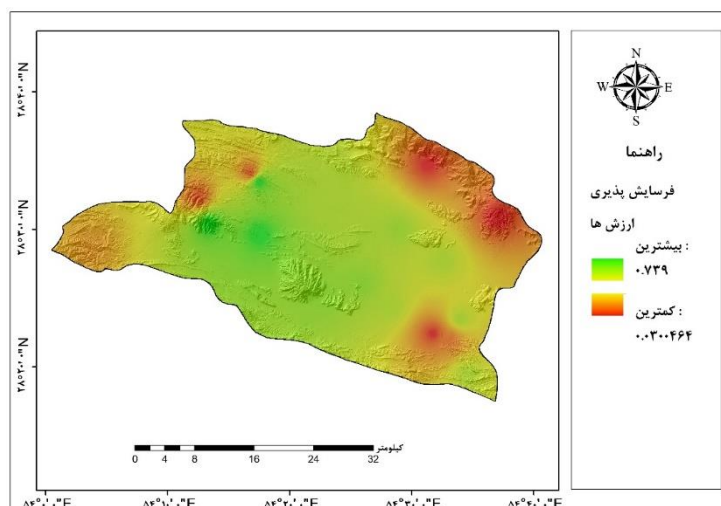
شکل ۱۳: نقشه کاربری اراضی حوضه آبخیز خسویه



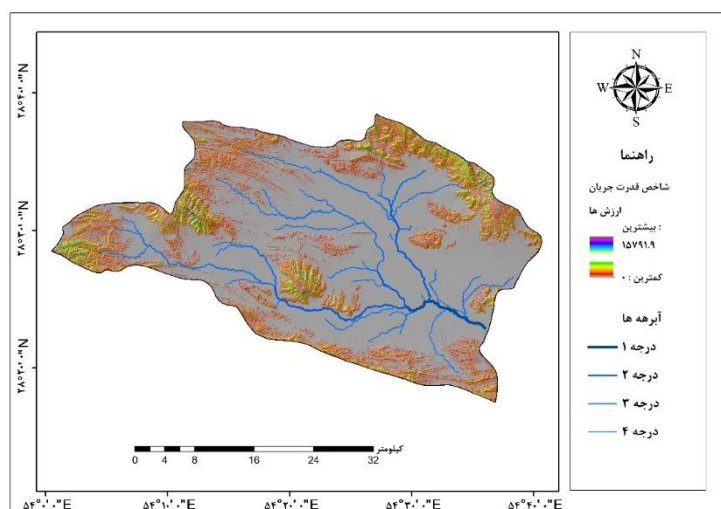
شکل ۱۴: نقشه زمین شناسی حوضه آبخیز خسویه



شکل ۱۵: نقشه نوع خاک حوضه آبخیز خسویه



شکل ۱۶: نقشه فرسایش پذیری خاک حوضه آبخیز خسویه



شکل ۱۷: نقشه قدرت جریان حوضه آبخیز خسویه

شکل ۲ مراحل انجام پژوهش را نشان می‌دهد.



شکل ۱۸: فلوجارت روش تحقیق

در این پژوهش در محیط نرم‌افزار SPM^۱ با اجرای مدل CART به مدل‌سازی و پیش‌بینی خطر فرسایش خندقی منطقه مورد مطالعه پرداخته شده است. نرم‌افزار SPM با معنای مدل‌های پیش‌بینی کننده سالفورد، توسط شرکت سالفورد برنامه‌نویسی و ارائه گردیده است و با بهره‌گیری از مدل‌هایی از جمله CART، MARS^۲، RF جهت طبقه‌بندی و پیش‌بینی موضوعات متفاوت در علوم مختلف کاربرد دارد. مدل CART اولین بار توسط بریمن^۳ و همکاران در سال ۱۹۸۴ معرفی شده است و به صورت درخت مرتبه‌ای دودویی^۴ می‌باشد که فضای مسئله را به قسمت‌های جزء تقسیم می‌کند. یک درخت تصمیم‌گیری است که برای داده‌کاوی و ایجاد مدل پیش‌بینی کننده مورد استفاده قرار می‌گیرد. در فرایند ساخت

¹. Salford Peredectie Modeler

². Multi Variate Adaptive Regression Spline

³. L. Breiman

⁴ Binary

درخت تصمیم CART، هر گره به دو گره تقسیم می‌شود. هر گره تا جای ممکن با بقیه گره‌ها متفاوت است و داده‌های درون هر گره تا جای ممکن یکنواخت می‌باشند. این فرآیند تقسیم شدن تا جایی ادامه پیدا می‌کند که در نهایت چند گره نهایی با کمترین خطا حاصل شود. تعداد گره‌های نهایی را سایز یا اندازه درخت گویند. این روش انعطاف خیلی بالایی داشته و می‌تواند روی طیف وسیعی از متغیرهای وابسته از جمله داده‌های کمی، کیفی، داده‌های اسمی یا رتبه‌بندی قابل اجرا باشد. نسبت به تغییرات یکنواخت متغیر مستقل تغییر نمی‌کند و به راحتی قابل اجرا است. CART برای اینکه بتواند بهترین سایز را با کمترین خطا انتخاب کند درخت‌های تصمیم‌گیری را با سرعت آرام به وجود می‌آورد و برای تشخیص بهترین سایز درخت تا جای ممکن درخت را تقسیم می‌کند سپس این درخت را هرس^۱ می‌کند تا به درخت‌های کوچک‌تر برگردد؛ و در نهایت به درختی می‌رسد که کمترین خطا را دارد. به این صورت این اطمینان حاصل می‌شود که روند توسعه درخت زود و یا دیر متوقف نشده است و بهترین سایز برای آن انتخاب شده است. این مدل جهت اعتبار سنجی از شاخص‌های آماری متعددی از جمله شاخص‌های RMSE (خطای جذر میانگین مربعات)، MSE (خطای میانگین مربعات)، MAD (میانگین خطای مطلق)، R^2 (ضریب همبستگی) استفاده می‌کند (www.Salford Predictive Modeler.com).

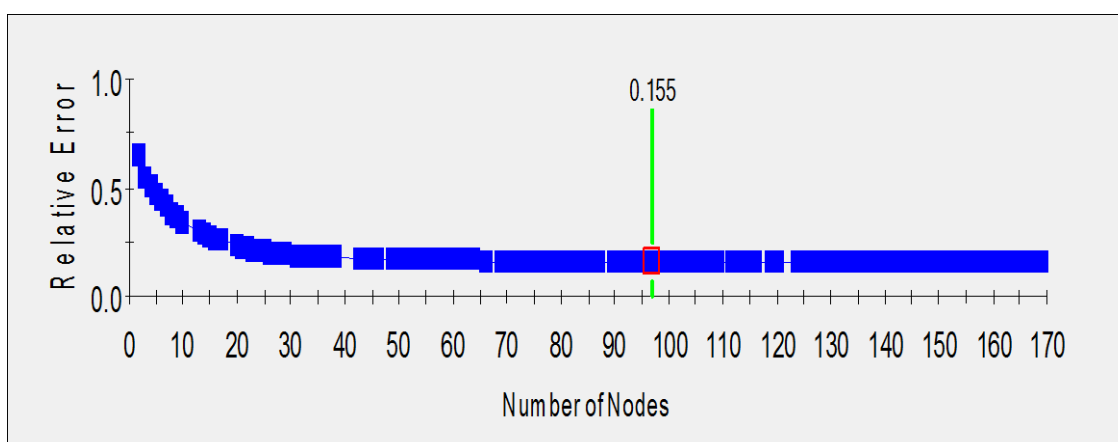
یافته‌ها

از میان ۱۶ متغیر مستقل تأثیرگذار در این پژوهش، متغیرهای کاربری اراضی، زمین‌شناسی و نوع خاک متغیرهای کیفی بوده‌اند که در گام نخست می‌بایست این متغیرها برای مدل مشخص گردد تا مدل، زمان پردازش داده‌ها با آن‌ها به‌عنوان متغیر کیفی برخورد کند. وجود متغیر وابسته یا هدف طی بازدید میدانی و با استفاده از موقعیت‌یاب جهانی (GPS) و همچنین نقاط شناسایی و ترسیم‌شده در محیط نرم‌افزار گوگل ارث ثبت گردید. درحالی که نقشه شناسایی مناطق عدم وجود خندق‌ها با اجرای طرح نمونه‌برداری تصادفی نقطه‌ای در مناطق بدون خندق حوضه خسویه با استفاده از نرم‌افزار برنامه‌نویسی R تهیه گردید. در انتها مجموعه‌ای از ۵۰۰۰ نقطه وقوع و ۲۰۰۰۰ هزار نقطه عدم وقوع خندق در سطح منطقه شناسایی و مشخص شد. در اجرای مدل CART ۳۰ درصد نقاط شناسایی شده (وقوع و عدم وقوع خندق) را به‌عنوان داده‌های آزمون^۲ و ۷۰ درصد نقاط را به‌عنوان داده‌های آموزش^۳ در نظر گرفته شد. مدل CART در حوضه خسویه جهت شناسایی مناطق حساس به فرسایش خندقی درخت تصمیم‌گیری که بزرگ‌ترین سایز آن دارای ۱۷۰ گره نهایی بود ایجاد کرد، سپس شروع به هرس کردن درخت کرده تا به درختی با سایز ۹۷ به‌عنوان درخت بهینه با کمترین خطای نسبی، ۰/۱۵۵ درصد رسیده است (شکل ۱۹). این نمودار روند توسعه درخت کارت را نشان می‌دهد که دارای دو محور افقی و عمودی بوده که محور افقی تعداد درخت‌ها با سایزهای مختلف و محور عمودی دقت مدل را نشان می‌دهد.

1. Porunn

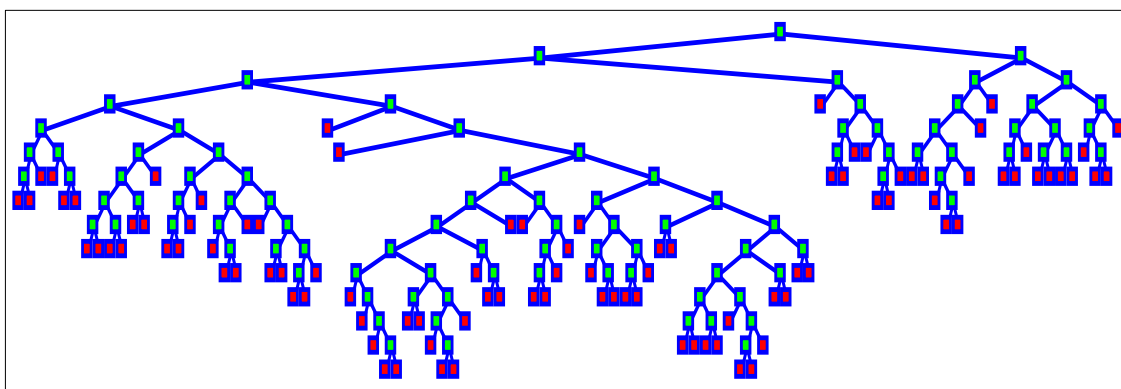
2. Testing

3. Learning



شکل ۲: نمودار خطای نسبی درخت تصمیم‌گیری مدل CART بر اساس شاخص‌های مورد مطالعه

در این فرایند متغیرهای مستقل ارتفاع، فاصله از آبراهه، طول شیب و بارندگی به‌عنوان مهم‌ترین گره‌ها در ریشه زنی درخت تصمیم‌گیری CART انتخاب شده‌اند و متغیرهای فاصله از آبراهه، نفوذپذیری خاک، عمق آبراهه و پوشش گیاهی گره‌های انتهایی درخت را جهت شناسایی محل‌های ایجاد خندق تشکیل داده‌اند (شکل ۲۰).



شکل ۳: درخت تصمیم‌گیری CART بر اساس شاخص‌های مورد مطالعه

شاخص‌های ارزیابی دقت مدل CART میزان ضریب همبستگی یا R^2 را برای داده‌های آموزش برابر ۰/۹۰۴ و برای داده‌های آزمون برابر ۰/۸۴۵ نشان داد که اعداد به دست آمده دقت بالای مدل در پیش‌بینی نقاط مستعد ایجاد خندق را نشان می‌دهد (جدول ۱).

جدول ۲: شاخص‌های ارزیابی دقت مدل (بر اساس داده‌های آموزش و آزمون)

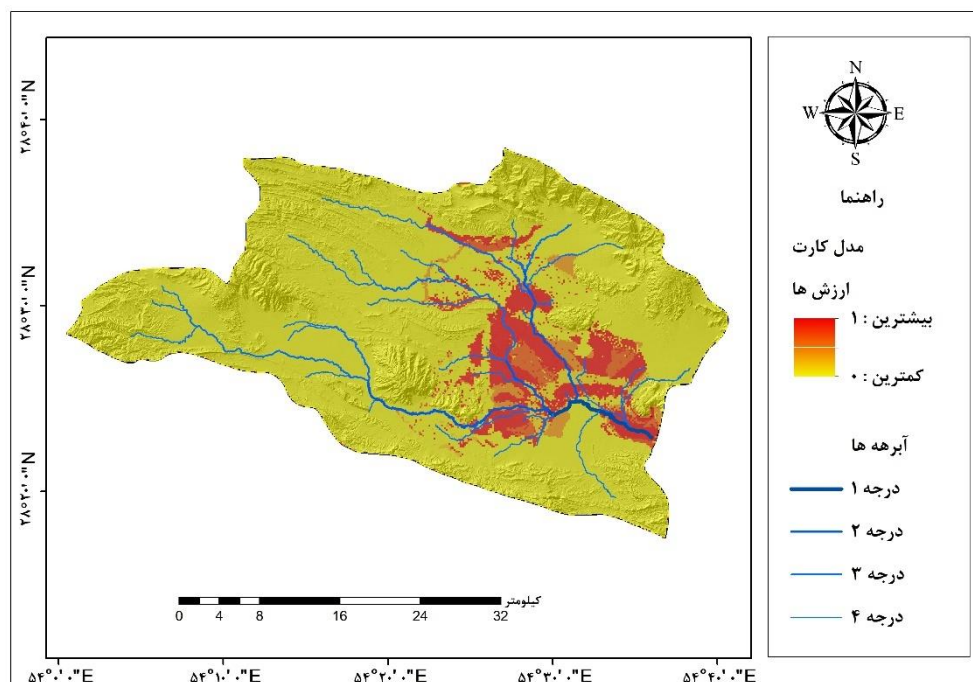
ردیف	نام شاخص	داده‌های آموزش	داده‌های آزمون
1	RMSE	۰/۱۳۴	۰/۱۵۷
2	MSE	۰/۰۱۵	۰/۰۲۵
3	MAD	۰/۰۳۱	۰/۰۴
4	MAPE	۰/۰۷۷	۰/۰۹۹
5	SSY	۲۸۱۵/۵۹	۱۰۱۸۳/۱۱
6	SSE	۲۷۱/۵۰	۱۸۳/۱۳
7	R-Sq	۰/۹۰۴	۰/۸۴۵
8	R-Sq Norm	۰/۹۰۴	۰/۸۴۶
9	AIC	-۷۳۰۱۸۱/۲۹	-۲۷۵۱۷/۵۳
10	AICc	-۷۳۰۱۸۱/۲۵	-۲۷۵۱۷/۴۴
11	BIC	-۷۳/۰۴۹/۴۲	-۲۷۳۹۹/۹۸
12	Relative Error	۰/۰۹۶	۰/۱۵۵

از نظر میزان اهمیت نسبی هر کدام از متغیرهای مستقل شرکت‌کننده در فرایند مدل‌سازی CART چنانچه در جدول ۲ مشاهده می‌گردد، به ترتیب متغیرهای ارتفاع، میزان بارش، فاصله از آبراهه و کاربری اراضی با مقادیر بالای ۵۰ درصد بیشترین ارزش را به خود اختصاص داده و متغیرهای جهت شیب، انحنای طولی، رطوبت توپوگرافی از کمترین ارزش برخوردار بوده‌اند.

جدول ۲: میزان اهمیت نسبی متغیرهای مستقل

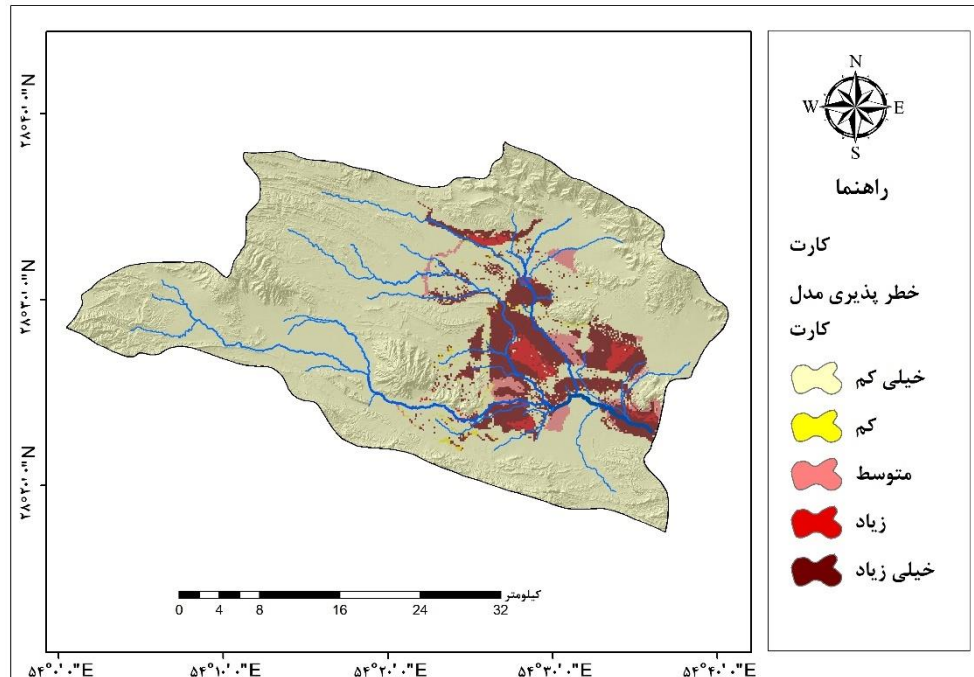
شاخص‌ها	درصد مشارکت	اهمیت نسبی متغیرهای مستقل
ارتفاع	۰۰/۱۰۰	
بارندگی	۰۰/۱۰۰	
فاصله از آبراهه	۹۵/۸۷	
کاربری اراضی	۸۴/۸۲	
عمق آبراهه	۰۲/۵۲	
فرسایش‌پذیری	۸۸/۳۸	
نوع خاک	۸۵/۳۶	
پوشش گیاهی	۰۳/۳۶	
فاصله از راه	۳۰/۱۸	
شیب (درجه)	۹۸/۱۵	
طول شیب	۶۵/۱۵	
قدرت جریان	۲۹/۱۳	
زمین‌شناسی	۲۲/۱۲	
رطوبت توپوگرافی	۶۲/۹	
انحنای طولی	۵۷/۵	
جهت شیب	۱۰/۲	

در نهایت پس از پیش‌بینی مقادیر متغیر وابسته (وقوع و عدم وقوع خندق) با استفاده از روش‌های داده‌کاوی CART، بر اساس ساختار رستری و ارزش‌های تخصیص داده‌شده به هر نقطه نمونه‌برداری شده (نقاط انتخاب‌شده از متغیرهای مستقل و وابسته) نقشه پهنه‌بندی پتانسیل وقوع فرسایش خندقی حوضه خسویه در محیط نرم افزار ArcGIS تهیه شد (شکل ۲۰).



شکل ۴: نقشه پهنه‌بندی خطر فرسایش خندقی حوضه آبخیز خسویه

شکل ۲۰ نقشه پهنه‌بندی خطر وقوع فرسایش خندقی حوضه خسویه خروجی مدل CART را نشان می‌دهد. این نقشه شدت احتمال وقوع فرسایش خندقی را بر اساس طیف رنگی از قسمت‌های زردرنگ (کمترین احتمال) تا قرمز رنگ (بیشترین احتمال) نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۲۰ می‌توان عنوان کرد که بیشترین احتمال وقوع فرسایش خندقی در مناطق کم ارتفاع حوضه و نواحی مرکزی در مجاورت آبراهه‌ها اتفاق خواهد افتاد. در نهایت نقشه پهنه‌بندی خطر فرسایش خندقی منطقه مورد مطالعه در پنج کلاس خطر؛ خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی کم طبقه بندی شد و میزان مساحت هر کلاس باهم مقایسه گردید (شکل ۲۱ و جدول ۳).



شکل ۵: نقشه کلاس بندی خطر فرسایش خندقی حوضه آبخیز خسویه

جدول ۳: مساحت هر کلاس و در درصد آن نسبت به مساحت کل

مدل CART	کلاس بندی خطر فرسایش خندقی				
	خیلی کم	کم	متوسط	زیاد	خیلی زیاد
مساحت هر کلاس (هکتار)	۱۱۷۹۵۸	۷۰۵	۲۶۴۶	۲۲۵۳	۱۳۰۶۰
درصد مساحت هر کلاس نسبت به مساحت کل	۸۶/۳۴	۰/۵۲	۱/۹۴	۱/۶۵	۹/۵۶

همان طور که جدول ۳ نشان می دهد بیشترین مساحت منطقه با ۸۶/۳۴ درصد در کلاس خطر خیلی کم قرار دارد و ۹/۵۶ درصد از مساحت منطقه در کلاس فرسایش خندقی خیلی زیاد قرار دارند، این سطح از خطر ۱۳۰۶۰ هکتار از سطح منطقه را در بر میگیرد.

بحث و نتیجه گیری

در این پژوهش با استفاده از مدل آماری CART به پیش بینی احتمال وقوع خطر فرسایش خندقی در محدوده حوضه آبخیز خسویه پرداخته شده است. جهت مدل سازی احتمال وقوع فرسایش خندقی از ۱۶ متغیر مستقل شامل: ارتفاع، شیب، جهت شیب، طول شیب، انحنای طولی، قدرت جریان، رطوبت توپوگرافی، عمق آبراهه ها، فاصله از آبراهه، فاصله از راه، کاربری اراضی، زمین شناسی، فرسایش پذیری خاک، شاخص پوشش گیاهی، میانگین بارش سالانه و نوع خاک و متغیر وابسته (نقشه وجود و عدم وجود خندق ها) استفاده شده است. نتایج حاصل از مدل سازی نشان داد که بیش از ۸۰ درصد از مساحت منطقه که در بخش های مرتفع شمالی واقع شده در طبقه خطر خیلی کم قرار دارد. در حالی که مناطق پرخطر در نواحی مسطح و کم ارتفاع و جنوب شرق منطقه قرار دارد. دقت مدل بر اساس شاخص های RMSE (خطای جذر میانگین مربعات)، MSE (خطای میانگین مربعات)، MAD (میانگین خطای مطلق)، R2 (ضریب همبستگی) مورد ارزیابی قرار

گرفت. مقدار عددی ضریب همبستگی $0/67$ درصد ملاک تعیین دقت بالای مدل تعریف شده است (چاین^۱ و همکاران، ۱۹۹۸). شاخص ضریب همبستگی در مدل CART $0/904$ برای داده‌های آموزش و $0/845$ برای داده‌های آزمون ثبت شده است که نشانگر دقت بالای مدل می‌باشد. نتایج مدل‌سازی حاکی از این است که از میان شاخص‌های تأثیرگذار شرکت‌کننده در فرآیند مدل‌سازی به ترتیب شاخص ارتفاع، بارش فاصله از آبراهه، عمق آبراهه و کاربری اراضی از اهمیت بیشتری در فرآیند مدل‌سازی برخوردار بوده‌اند. ارتفاع با احتمال وقوع فرسایش نسبت معکوس دارد. به گونه‌ای که هرچه ارتفاع کمتر باشد احتمال وقوع رخداد فرسایش خندقی بیشتر است و بالعکس. بیشترین خندق‌ها در مناطق کم ارتفاع حوضه، ۹۰۰ متر اتفاق افتاده‌اند. مطالعات سایر پژوهشگران نیز نشان داده‌اند که با کاهش ارتفاع درصد ایجاد و پراکنش خندق‌ها افزایش پیدا می‌کند (ابراهیمی و همکاران، ۱۳۹۴؛ ذاکری نژاد، ۱۴۰۲). بیشتر خندق‌ها در مجاورت آبروهای حوضه خسویه اتفاق می‌افتد و این به دلیل اختلاف ارتفاع کف آبروها با سطح زمین‌های هم‌جوار است. آب بر اثر بارندگی و یا آبیاری نامنظم زمین‌های مجاور در سطح جاری شده و در نهایت به این آبروها می‌رسد، وجود اختلاف ارتفاع سطح زمین با کف آبرو سرعت آب را بیشتر و به مرور زمان باعث آب شستگی کناره‌ها، فرسایش شیاری و در نهایت فرسایش خندقی در این محدوده‌ها می‌گردد. بر اساس مطالعات صورت گرفته در نتیجه فرسایش کناری دامنه‌های مشرف به آبراهه، تعادل این دامنه‌های به هم‌خورده و حساسیت به ایجاد فرسایش خندقی در کنار آبراهه افزایش پیدا می‌کند (شاد فر، ۱۳۹۳؛ انتظاری و همکاران، ۱۳۹۲). معمولاً میزان بارش در مناطق مرتفع نسبت به مناطق مسطح و کم ارتفاع بیشتر است ولی تمامی بارش‌های که در مناطق مرتفع صورت می‌گیرد به واسطه عوامل دیگر مانند توپوگرافی، شیب و جهت شیب منطقه بخصوص در حوضه آبخیز خسویه که مناطق مرتفع فاقد پوشش گیاهی مناسب است به سمت مناطق کم ارتفاع جریان پیدا می‌کنند. در حالت کلی میزان بارش جز شاخص‌هایی است که باید با سایر شاخص‌های دیگر، مورد بررسی قرار گیرد. بیشترین کاربری‌های تأثیرگذار در رخداد فرسایش خندقی مراتع ضعیف (نمکزارها) و زمین‌های کشاورزی بوده‌اند. استفاده بیش از حد از زمین، آبیاری نامنظم باعث افزایش روان آب در سطح می‌گردد که خود دلیلی محکم بر احتمال وقوع فرسایش خندقی در این مناطق می‌باشد. در حوضه آبخیز خسویه در مناطقی که فرسایش‌پذیری خاک بیشتر است احتمال وقوع فرسایش خندقی نیز بیشتر می‌باشد. در این مناطق به علت جنس خاک، عدم وجود پوشش گیاهی مناسب و ارتفاع کم نسبت به بقیه نواحی حوضه که باعث به دام افتادن آب‌های سطحی در این نواحی می‌شود، فرسایش بیشتری صورت می‌گیرد. نبود پوشش گیاهی مناسب باعث جاری شدن آب در سطح شده و به دلیل نوع و جنس خاک سطح‌رویی خاک شسته شده و باعث ایجاد فرسایش شیاری می‌شود. تکرار این فرآیند به مرور زمان شیارهای ایجاد شده را وسیع‌تر و به خندق تبدیل می‌نماید. بررسی نوع خاک حوضه نشان داد که بیش از ۹۰ درصد حوضه آبخیز خسویه دارای بافت خاک لومی می‌باشد. خصوصیات فیزیکی خاک سطحی نقش مهمی بر روی نفوذ خاک، مقاومت خاک به فرسایش و نرخ رواناب و ایجاد فرسایش خندقی دارد (ذاکری نژاد و همکاران ۲۰۲۱؛ سیرجانی و همکاران، ۲۰۱۹). با بررسی نتایج به دست آمده از مدل آماری اجرا شده و نقشه‌های زمین‌شناسی حوضه آبخیز خسویه مشخص گردید که بیشترین خندق‌ها در محل‌های متشکل از سازند کواترنری رخ داده است. سازند کواترنری شامل نهشته‌های آبرفتی و رسوبی و لسی می‌باشد. به دلیل انحلال‌پذیری زیاد این نوع سازند حساسیت آن به فرسایش آبی و به خصوص به فرسایش خندقی بسیار زیاد است.

^۱. Chin

منابع

- انتظاری، م.، ملکی، ا.، مرادی، خ.، الفتی، س.، ۱۳۹۲، پهنه بندی فرسایش خندقی در حوضه آبریز دیره با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی AHP، برنامه ریزی و آمایش فضا، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس، دوره ۱۷، شماره ۴، صص ۸۶-۶۳.
- رفاهی، ح. ق.، ۱۳۸۸، فرسایش آبی و کنترل آن، انتشارات دانشگاه تهران، تهران، صص ۶۷۲-۱.
- رنگزن، ک.، مکرم، م.، ۱۴۰۱، تعیین مناطق مستعد فرسایش خندقی با استفاده از تابع عضویت فازی در حوضه آبخیز شهر مهر، در جنوب استان فارس، مجله پژوهش های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۱۰، شماره ۴، صص ۷۴-۵۶.
- شادفر، ص.، ۱۳۹۳، کاربرد منطق فازی در بررسی فرسایش خندقی با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) در حوضه طرود، مجله اطلاعات جغرافیایی، دوره ۲۳، شماره ۹۲، صص ۴۲-۳۵.
- عرب خدری، م.، ۱۳۹۳، مروری بر عوامل مؤثر بر فرسایش آبی خاک در ایران، نشریه مدیریت اراضی، دوره ۲، شماره ۱، صص ۲۶-۱۷.
- عمادالدین، س.، امید، م.، آرخی، ص.، کرم، ام.، ۱۴۰۰، ارزیابی فرسایش خندقی در حوضه آبخیز قویجق در استان گلستان، مجله مخاطرات طبیعی، دوره ۱۰، شماره ۳۰، صص ۳۳-۱۷.
- محمد ابراهیمی، م.، ۱۳۹۴، شناسایی علل وقوع فرسایش خندقی با تاکید بر خصوصیات خاک در حوضه آبخیز آق امام، نشریه حفاظت منابع آب و خاک، دوره ۷، شماره ۲، صص ۱۳-۱.
- ذاکری نژاد، ر.، ۱۳۹۹، ارزیابی مدل‌های رقومی ارتفاع جهت تهیه نقشه پتانسیل فرسایش خندقی با استفاده از مدل مکسنت و سامانه اطلاعات جغرافیایی در حوضه آبخیز سمیرم، جنوب استان اصفهان؛ نشریه سنجش از دور سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی؛ ۱۱(۳)، ۱۲۲-۱۰۶.
- ذاکری نژاد، ر.، الوندی، پ.، ۱۴۰۲. پیشبینی فرسایش خندقی با استفاده از داده‌های X-TanDEM و مدل حداکثر آنتروپی (مطالعه موردی: حوضه آبخیز خسویه). پژوهش های فرسایش محیطی، ۴۹ (۱): ۱۳.
- Arabameri, A., Pradhan, B., & Rezaei, K. (2019). Gully erosion zonation mapping using integrated geographically weighted regression with certainty factor and random forest models in GIS. *Journal of environmental management*, 232, 928-942.
- Asadi Nalivan, O., Rabet, A., Vakili Tajareh, F., Ramezani, M., Momeni, M., & Heydari, K. (2022). Zoning Gully Erosion Susceptibility Using CART, ANN and RF Models. *Watershed Engineering and Management*.
- Bouramtane, T., Hilal, H., Rezende-Filho, A. T., Bouramtane, K., Barbiero, L., Abraham, S., ... & Morarech, M. (2022). Mapping gully erosion variability and susceptibility using remote sensing, multivariate statistical analysis, and machine learning in South Mato Grosso, Brazil. *Geosciences*, 12(6), 235.
- Breiman, L., Friedman, J., Olshen, R., & Stone, C. (1985). *0. L. DAVIES & PL GOLDSMITH, 1984 pp. 478 The appearance of the fourth edition of this book in paperback format will be welcomed by teachers and practising statisticians alike. Prepared by from ICI, the book first appeared in 1947 and quickly established itself as.*
- Chaplot, V. (2013). Impact of terrain attributes, parent material and soil types on gully erosion. *Geomorphology*, 186, 1-11.
- Chin, W. W. (1998). The partial least squares approach to structural equation modeling. *Modern methods for business research*, 295(2), 295-336.

- El Maaoui, M. A., Felfoul, M. S., Boussema, M. R., & Snane, M. H. (2012). Sediment yield from irregularly shaped gullies located on the Fortuna lithologic formation in semi-arid area of Tunisia. *Catena*, 93, 97-104.
- Gayen, A., Haque, S. M., & Saha, S. (2020). Modeling of gully erosion based on random forest using GIS and R. *Gully Erosion Studies from India and Surrounding Regions*, 35-44.
- Nhu, V. H., Janizadeh, S., Avand, M., Chen, W., Farzin, M., Omidvar, E., ... & Lee, S. (2020). GIS-based gully erosion susceptibility mapping: a comparison of computational ensemble data mining models. *Applied Sciences*, 10(6), 2039.
- Sirjani, E., Sameni, A., Moosavi, A. A., Mahmoodabadi, M., & Laurent, B. (2019). Portable wind tunnel experiments to study soil erosion by wind and its link to soil properties in the Fars province, Iran. *Geoderma*, 333, 69-80.
- Torri, D., Poesen, J., Borselli, L., Bryan, R., & Rossi, M. (2012). Spatial variation of bed roughness in eroding rills and gullies. *Catena*, 90, 76-86.
- Zakerinejad, R & Märker, M. (2014) Prediction of Gully Erosion Susceptibilities using detailed Terrain Analysis and Maximum Entropy Modeling: A case study in the Mazayjan Plain, Southwest Iran, *Geografia Fisicae Dinamica Quaternaria*, 37(1): 67-76
- Zakerinejad, R., & Maerker, M. (2015). An integrated assessment of soil erosion dynamics with special emphasis on gully erosion in the Mazayjan basin, southwestern Iran. *Natural Hazards*, 79: 25-50.
- Zakerinejad, R., Christian, S., Volker, H., Michael, M. (2021). Spatial Disterbution of Water Erosion Using Stochastic Modeling in The Southern Isfahan Province, Iran, *Geogr FIS DIN QUAT* 44 (2): 203–216.