

تشخیص خودکار سینک هول های کارستی با استفاده از داده های TanDEM-X، سنجش از دور شی گرا و داده کاوی (مطالعه موردی توده پراو-بیستون)

پریا آذربون - دانشجوی ژئومورفولوژی گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه فردوسی مشهد، آزمایشگاه علم/سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور دانشگاه فردوسی مشهد (GISSRS: Lab).
مسعود مینائی* - دانشیار سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه فردوسی مشهد، آزمایشگاه علم/سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور دانشگاه فردوسی مشهد (GISSRS: Lab)
فواد مینائی - کارشناس ارشد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه فردوسی مشهد، آزمایشگاه علم/سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور دانشگاه فردوسی مشهد (GISSRS: Lab)
فرشاد صفری - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، گروه جغرافیا، دانشگاه محقق اردبیلی
مجتبی نوری - مدیرکل دفتر تحقیق، توسعه و فناوری اطلاعات شرکت مدیریت منابع آب ایران
جیانلوکا نورینی - پژوهشگر مرکز تحقیقات ملی ایتالیا در میلان
محمود داودی - استادیار گروه جغرافیا، دانشگاه گیلان

پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۲/۲۴ تأیید نهایی: ۱۴۰۰/۱۱/۱۲

چکیده

پهنه‌های کارستی در بخش‌های وسیعی از کره زمین گسترده شده اند و آب‌های زیرزمینی کارست بخش بسیار مهمی از نیاز آبی جوامع بشری را تامین می نماید. بطوری که ۲۵ درصد از جمعیت جهان، آب مصرفی خود را از منابع آب کارست تأمین می کنند. از این رو با توجه به اهمیت شناسایی سینک هول‌ها و تهیه پایگاه داده جغرافیایی آنها برای مدیریت منابع آبی هدف این مطالعه شناسایی سینک هول‌های موجود در توده پراو-بیستون با استفاده از روش‌های داده کاوی مبتنی بر خوشه بندی (الگوریتم J48) به همراه سنجش از دور شی گرا است. داده‌های مورد استفاده در این روش‌ها لایه‌های اطلاعاتی ناهمواری‌ها، شیب، جهت شیب، جهت جریان، جریان تجمعی، انحنا سطح، انحنا سطح در بیشترین شیب، انحنا سطح عمود بر بیشترین شیب بودند که از داده‌های مدل رقومی ارتفاع TanDEM-X با قدرت تفکیک ۱۲ متر مشتق شدند. نتایج داده کاوی نشان داد متغیرهای جریان تجمعی، شیب، جهت جریان، ناهمواری‌ها، انحنا سطح عمود بر بیشترین شیب، Area, Max-diff, pxi، انحنا سطح در بیشترین شیب و جهت شیب به ترتیب اهمیت در تشخیص سینک هول‌ها دخالت داشته اند. استفاده از رویکرد ترکیبی داده کاوی و GEOBIA به همراه داده‌های TanDEM-X می تواند نتایج قابل قبولی با دقت تشخیص سینک هول که برابر با ۷۱/۳٪ بوده را ارائه دهد. این روش برای تشخیص سینک هول‌ها و از طرفی تشخیص مناطق نزدیک به سفره‌های زیر زمینی در توده‌های عظیم کارست مناسب است. چنین مطالعاتی می تواند تهیه پایگاه داده جغرافیایی سینک هول‌ها که غالباً در مناطقی غیر قابل دسترس و یا صعب العبور هستند، را امکان پذیر سازد و در نتیجه به مدیریت بهتر آنها کمک نماید.

واژگان کلیدی: سینک هول، TanDEM-X، داده کاوی، GEOBIA، پراو-بیستون.

مقدمه

پهنه‌های کارستی در مناطق مختلف دنیا گسترده شده و طبق برآورد فورد و ویلیامز^۱ (۲۰۰۷) حدود ۲۰٪ سطح قاره‌ها از کارست پوشیده شده که ۱/۴ جمعیت جهان را در خود جای داده‌اند. کارست علاوه بر منافی که برای بشر دارد می‌تواند در صورت عدم شناخت دقیق آن مخاطره‌آمیز نیز باشد. از جمله مخاطرات کارست می‌توان به فروزشینی و آسیب به تاسیسات شهری و روستایی، فرار آب از دریاچه سدها، اختلال در فعالیت‌های راه‌سازی و تونل‌های آب و همچنین پتانسیل بالای آلودگی منابع آب کارست اشاره کرد. با توجه به نقش و جایگاه منابع آب کارست برای جوامع انسانی مشکلات آنها نه با فرد یا افرادی خاص بلکه کل جامعه انسانی و سلامت آنها در نواحی مرتبط را درگیر خود می‌کند.

جنبه‌های مطرح شده و گسترش قابل توجه مناطق کارستی در نقاط مختلف جهان و همچنین در ایران (به ویژه در زاگرس و البرز) و برنامه‌های ملی دولت برای بهره‌برداری از این منابع آب ضرورت برنامه ریزی برای حفاظت بیشتر از آنها را دو چندان می‌کند (مدادی^۲، ۱۳۹۷؛ مرسلی^۳، ۱۳۹۷). از دیدگاه مدیریت منابع آب نیز از آنجا که لندفرم‌های کارستی، نقش اصلی را در تغذیه آبخوان‌های کارستی بر عهده دارند و این آبخوان‌ها نیز تأمین‌کننده آب جوامع شهری و روستایی اطراف خود هستند، آگاهی از شرایط آنها، نحوه مدیریت و مخاطراتی که این منابع آب با آن روبه‌رو هستند ضروری است. از پدیده‌های کارستی که در هر دو بحث تأمین منابع آب و امنیت منابع آب بسیار حائز اهمیت می‌باشد، سینکهل‌ها هستند. در واقع سینکهل یکی از شاخص‌های مهم ژئومورفولوژی می‌باشد که نقش مهمی در جذب، نفوذ، تغذیه و تخلیه آبخوان‌های کارستی، مسائل انسانی مانند کشاورزی، جذب جمعیت و... دارد. از جمله آنچنان که محمدی و همکاران (۱۳۹۷) اشاره می‌نمایند به ویژه در بیستون چشمه‌ها به عنوان یکی از منابع آبی مهم در معرض تغییرات آبی ناشی از ورودی‌های بارش هستند. موارد فوق‌الذکر باعث شده است تا شناسایی آنها و تهیه نقشه پراکنده‌شان بسیار با اهمیت باشد به ویژه اینکه گسترش سازنده‌های کربناته در استان کرمانشاه به ۳۰ درصد می‌رسد (وحدتی و همکاران، ۱۳۸۶؛ محمدی و همکاران (۱۳۹۷). علی‌رغم اهمیت شناسایی سینکهل‌ها و تهیه نقشه پراکنده‌ی آنها مطالعات اندکی در این زمینه انجام شده است. مطالعات انجام شده نیز بیشتر مبتنی بر استفاده از تکنولوژی لایدار می‌باشد که گران قیمت بوده و به ویژه در کشورهای در حال توسعه کمتر در دسترس می‌باشد.

از جمله این مطالعات می‌توان به پژوهش رجیبی^۴ (۲۰۱۸) اشاره نمود که در مطالعه خود به شناسایی و اندازه‌گیری سینکهل‌ها با استفاده از داده‌های لایدار در فلوریدا پرداخته است. بخش اول این مطالعه با هدف ایجاد روشی برای شناسایی سینکهل‌ها در فلوریدا با استفاده از داده‌های لایدار انجام شده است. ایشان معتقدند پارامترهای ریخت‌سنجی مانند شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI)، شاخص همگرایی (CI)، صفحه شیب (SI) و مدل رقومی ارتفاع (DEM)، با توجه به شرایط محلی زمین و منطقه مورد مطالعه، پتانسیل بالایی برای کمک به تشخیص سینکهل‌ها دارند. در قسمت دوم این مطالعه، یک مدل نیمه خودکار در ArcMap برای شناسایی سینکهل‌ها و همچنین تخمین ویژگی‌های هندسی سینکهل‌ها (به عنوان مثال عمق، طول، مساحت و حجم) ایجاد شده است. در پژوهشی دیگر یانگ‌جی کیم^۵ و همکاران، (۲۰۱۹) در خصوص، شناسایی و بررسی مشخصات سینکهل با استفاده از مدل رقومی ارتفاع حاصل از داده‌های لایدار با رگرسیون لجستیک (منطقه فلات اسپرینگ فیلد، قسمت جنوب غربی ایالت میسوری) مطالعاتی انجام دادند. در این مطالعه از میان ۱۶ پارامتر مورفومتریک، ۹ پارامتر برای رگرسیون لجستیک انتخاب شدند، که برای تشخیص سینکهل‌ها استفاده شوند. در این مطالعه مشخصات هندسی مانند: عمق، طول، مساحت و حجم مورد بررسی

1. Ford and Williams

2. Medadi

3. Morsali

4. Amirarsalan Rajabi

5. Yong Je Kim

قرار گرفتند. در پژوهش دیگر، ژانگ^۱ و همکاران، (۲۰۱۹) به تشخیص و تهیه نقشه از سینک‌هول‌ها با استفاده از لایدار هوایی در منطقه جنوب شرقی نیومکزیکو (شهر Carlsbad) پرداختند. این پروژه تحقیقاتی در زمینه شناسایی و نقشه برداری از سینک‌هول‌ها مبتنی بر لایدار که دقیق و سریع است متمرکز می‌باشد. ایشان همچنین از داده‌های کمکی برای بهبود دقت روش‌های تشخیص سینک‌هول مبتنی بر مورفولوژی و پیاده‌سازی این موارد با توسعه ابزارهایی که می‌توانند در سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) استاندارد استفاده شوند، بهره‌برداری نمودند.

در منطقه مورد مطالعه، پژوهش‌هایی انجام شده است که برخی از آنها همچون محمودی و ملکی (۱۳۸۰)، محمدی و همکاران (۱۳۹۷)، زنگنه تبار و قدیمی (۱۳۹۸)، ملکی و همکاران (۱۳۹۸)، خوش‌رفتار و همکاران (۱۳۹۸)، قدیمی و زنگنه تبار (۱۳۹۸)، به بررسی چشمه‌ها، آبخوان‌ها و پتانسیل منابع آبی پرداخته‌اند. تعدادی دیگر از پژوهش‌ها پهنه‌بندی توسعه کارست را مورد توجه قرار داده‌اند مانند پژوهش‌های مقصودی و همکاران (۱۳۸۸) که توسعه کارست را براساس ضرایب فرود، زمان مرگ چشمه‌ها و تحلیل نتایج ایزوتوپی و شیمیایی در توده پراو-بیستون انجام دادند. جعفری‌گل و همکاران (۱۳۹۰)، که ایشان در این پژوهش به مطالعه استفاده از مدل رقومی ارتفاع در تحلیل مورفوتکتونیک فروچاله‌های کارستی توده پراو-بیستون پرداختند. در این تحقیق با استفاده از مدل رقومی ارتفاع و پردازش داده‌های رقومی شده نسبت به استخراج اطلاعات توپوگرافی و هیدرولوژی اقدام گردید. یافته‌های تحقیق نشان از اشکال آگزوکارست در فرم‌ها و ابعاد مختلف که تیپیک‌ترین این اشکال یعنی فروچاله‌ها در امتداد درز و گسل‌های کششی ناحیه قرار گرفته‌اند، دارند. در پژوهشی دیگر، که به شناسایی نواحی مستعد شکل‌گیری فروچاله‌ها پرداخته است عابدینی و همکاران (۱۳۹۴) عوامل موثر در شکل‌گیری فروچاله را بررسی کردند، تفسیر ضرایب و نتایج حاصل از آنان نشان داد که لیتولوژی مهم‌ترین نقش را در توسعه کارست بر عهده دارد و بعد از آن به ترتیب لایه‌های گسل، بارش، ارتفاع، دما، شیب و جهات شیب در درجات بعدی اهمیت قرار می‌گیرند. انتظاری و آقایی پور (۱۳۹۷) نیز به پهنه‌بندی توسعه کارست سطحی در منطقه پراو-بیستون در چهار طبقه کم تا خیلی زیاد پرداخته‌اند. جهانفر و همکاران (۱۳۹۷) که موفومتری و موفولوژی اووالا در توده آهکی پراو-بیستون را مورد ارزیابی قرار داده‌اند. دسترنج و همکاران (۱۳۹۸) که با روش فازی توسعه کارست را پهنه‌بندی نموده‌اند.

بررسی پیشینه تحقیق نشان می‌دهد دور از دسترس بودن سینک‌هول‌ها و قرار گرفتنشان در مناطق صعب‌العبور کوهستانی به همراه عدم دسترسی به داده‌های با قدرت تفکیک بالا و دقیق مانند داده‌ی لایدار در بسیار از کشورهای در حال توسعه و همچنین ایران از مطالعات شناسایی سینک‌هول‌ها جلوگیری کرده است. از سوی دیگر، تولید داده‌های مدل رقومی ارتفاع به نام TanDEM-X با قدرت تفکیک ۰/۴ ثانیه جغرافیایی (تقریباً ۱۲ متر) فرصتی جدید را پیش روی کشورهای در حال توسعه در زمینه‌های مطالعات مبتنی بر مدل‌های رقومی ارتفاع گشوده است. بنابراین، این مقاله درصدد آن است که امکان تشخیص سینک‌هول‌ها با کمک داده‌های TanDEM-X، و لایه‌های اطلاعاتی مشتق از آن و بهره‌گیری از روش‌های داده‌کاوی و سنجش از دور شی گرا (GEOBIA)^۲ را ارزیابی نموده و نقشه پراکندگی سینک‌هول‌های منطقه را تهیه نماید.

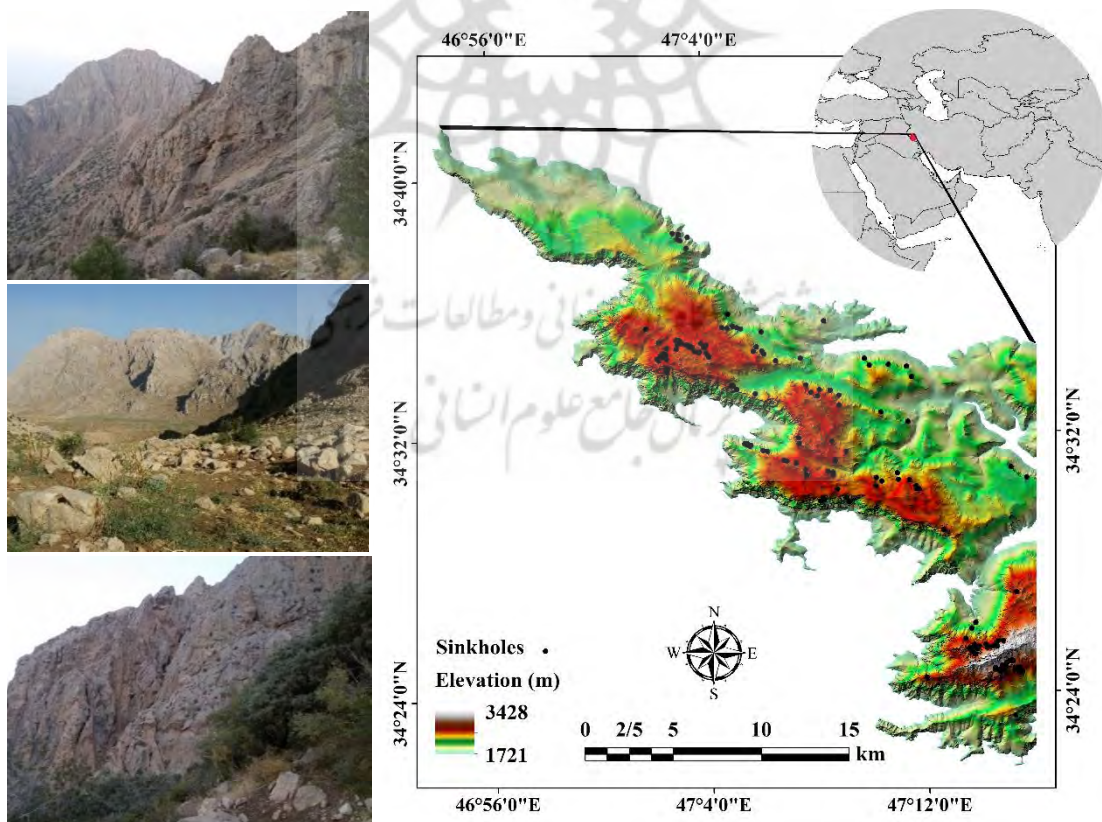
منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه یک توده سنگ آهکی و بخشی از زاگرس رورانده در غرب ایران می‌باشد که در استان کرمانشاه و شمال شهر کرمانشاه واقع شده و به ناهمواری‌های پراو-بیستون مشهور است. این توده کوهستانی با مختصات عرض‌های

^۱. Zhang

^۲. Geographic Object based image analysis (GEOBIA)

جغرافیایی $34^{\circ}21'$ تا $34^{\circ}44'$ شمالی و طول های جغرافیایی $46^{\circ}53'$ تا $47^{\circ}27'$ شرقی از همه طرف بوسیله دشت هایی باز احاطه شده و مساحت آن برابر با 1033 کیلومتر مربع است (شکل ۱). توده آهکی بیستون از شمال به دشت میانراهان، از جنوب به دشت کامیاران و رازآور و از مشرق به دشت بیستون (دینه ور) محدود می شود (محمودی و همکاران، ۱۳۸۰). حداکثر ارتفاع آن، کوه پرآو با 3385 متر ارتفاع می باشد. این توده ی کوهستانی به تبعیت از جهت کلی زاگرس از شمال غربی به جنوب شرقی کشیده شده است. متوسط عرض آن 15 کیلومتر و طول آن 60 کیلومتر است. مرز مشترک بین دشتهای و توده کوهستانی در بیشتر جهات، به ویژه دامنه های شرقی و جنوبی، به صورت دیوارهای عمود با شیب زیاد به صورت پرتگاه گسلی می باشد. با توجه به بررسی تحول کارست در منطقه زاگرس بیش از 69 هزار کیلومتر مربع از مساحت زاگرس از کارست کامل، حدود 4000 کیلومتر مربع کارست نارس و 31000 کیلومتر مربع کارست بینابین پوشیده شده است (طالقانی و رحیم زاده، ۱۳۸۹). وجود غار معروف پرآو با عمق 751 متر و وجود 26 حلقه چاه در این غار نشانه ای از حجم بالای مغاره های زیرزمینی و توسعه کارستی در منطقه است. بر اساس ردیابی های صورت گرفته توسط وزارت نیرو که ورودی غار پرآو را به عنوان محل تغذیه و انجام عملیات ردیابی لحاظ کرده اند ارتباط فیزیکی بین غار پرآو و سراب طاق بستان تایید گردیده است. در منطقه مورد مطالعه گاه آ عمق فروچاله ها به ده ها متر می رسد. توسعه کارستی و انحلال و بهم پیوستگی فروچاله ها شکل توسعه یافته تر و وسیعتری از فروچاله ها را که با نام علمی اووالا شناخته می شود در منطقه نشان می دهد.



شکل ۱: منطقه مورد مطالعه و نمایی از ناهمواری های آن

مواد و روش‌شناسی

در انجام پژوهش حاضر داده‌ها و روش‌های مختلف در کنار یکدیگر و در ترکیب با هم مورد استفاده قرار گرفتند تا با شکل‌دهی به یک فرآیند، استخراج سینک‌هول‌ها را ممکن سازند. پژوهش حاضر بر مبنای روش تجربی انجام گرفته است و داده‌های آن از بازدیدهای میدانی، مطالعات کتابخانه‌ای و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور تهیه شده است. نخست برای آشنایی با ادبیات کارست و مخاطرات سینک‌هول‌ها، پیشینه تحقیق بررسی و مورد مطالعه قرار گرفت. سپس با بازدیدهای میدانی و شناسایی و بررسی سینک‌هول‌ها و با استفاده از دوربین عکاسی، مترهای ساده و لیزری و GPS در مناطقی که قابلیت دسترسی دارد، سینک‌هول‌ها شناسایی شده و مورفومتری سینک‌هول‌ها (قطر بزرگ، قطر کوچک، عمق) مورد ارزیابی قرار گرفت. در ادامه داده‌های TanDEM-X به عنوان لایه مدل رقومی ارتفاع که لایه‌های مختلف دیگر از آن مشتق خواهند شد، تهیه شده و مراحل پیش پردازش و استخراج لایه‌های اطلاعاتی مورد نیاز انجام گردید. داده مدل رقومی ارتفاع مورد استفاده با ۱۲ متر قدرت تفکیک فضایی و دقت عمودی ۲ متر در نواحی مسطح و چهار متر در نواحی شیب دار (کریگر^۱ و همکاران، ۲۰۰۷) هستند. این مدل رقومی ارتفاع به روش اینترفرومتری و توسط آژانس فضایی آلمان تهیه شده است. مجموعه داده با استفاده از داده‌های SAR باند X از دو ماهواره با مدار قطبی در فاصله سالهای ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۴ تهیه شده اند. در ادامه، قطعه بندی داده‌ها^۲ و تشخیص اشیاء انجام گردید. پس از آن با استفاده از داده کاوی قوانین لازم برای تشخیص سینک‌هول‌ها از بین لایه‌های اطلاعاتی و ویژگی‌های آنها با دقت قابل قبول استخراج گردید. با اعمال قوانین بر روی مجموعه داده‌ها سینک‌هول‌ها استخراج گردیدند. در نهایت ارزیابی دقت طبقه بندی انجام شد. خلاصه فرآیند پیاده سازی شده در شکل ۲ ارائه شده است و اجزای برجسته این فرآیند در ادامه به تفصیل تشریح خواهند گردید.



شکل ۲: فرآیند کلی روش شناسی

^۱ Krieger

^۲ Segmentation

لایه های اطلاعاتی

برای شناسایی سینک هول های منطقه مورد مطالعه، لایه های اطلاعاتی مختلف مبتنی بر مدل رقومی ارتفاع TanDEM-X استخراج گردید. هر یک از این متغیرها به نوعی در استخراج سینک هول موثرند که متناسب با آن، اقدام به تهیه نقشه های مربوط به هر کدام از متغیرها در محیط GIS گردید. نقشه ارتفاع (شکل ۳ الف) که در بسیاری از عوامل مانند اقلیم، میزان و نوع بارش، تراکم و نوع پوش گیاهی، شدت و نوع فرسایش موثر است. در ارتفاعات علاوه بر اینکه بارش بیش از دیگر مناطق می باشد، نوع بارش معمولاً به صورت برف است. همچنین رفتار سنگ آهک در مقابل عوامل فرساینده و عوامل موثر در انحلال آن در ارتفاعات مختلف متفاوت است (علیزاده، ۱۳۸۸). در مناطق مرتفع تر، آب و هوا سردتر است و در نتیجه هوازندگی فیزیکی موثرتر است. همین طور آب دریافتی از طریق بارشها بیشتر است. همچنین به دلیل سرد بودن، رشد گیاهان انبوه و دارای ریشه عمیق، کم می شود.

لایه اطلاعاتی دیگر مورد استفاده لایه ناهمواری ها^۱ است. این لایه نقشه ناهمواری های منطقه را نشان می دهد (شکل ۳ ب). از جمله مشتقات دیگر مورد استفاده می توان به نقشه های شیب و جهت شیب اشاره نمود. شیب یک عامل مهم کنترل کننده سیستم جریان آب سطحی و زیرزمینی است (شکل ۳ پ). پارامتر شیب رابطه معکوس با ایجاد و توسعه فروچاله ها دارد. در کل هر چه شیب بیشتر باشد میزان توسعه کارست کاهش می یابد. در شیب کمتر از ۱۰ درجه بیشترین میزان توسعه فروچاله ها رخ می دهد و از شیب ۵۰ درجه به بالا به ندرت فروچاله ای دیده می شود. گسترش پدیده کارست در شیب های کم در حوزه کارستی به دلیل تماس بیشتر آب با آهک و پدیده انحلال در این شیب ها، بیشتر می شود. جهت شیب (شکل ۳ ت) نیز بر گسترش سینک هول ها تاثیر گذار است. جهت شیب از نظر تأثیر بر فرآیندهای هیدرولوژیک موثر بر فرسایش، مانند ذوب برف ها و تنوع پوش گیاهی در حوضه آبریز حائز اهمیت است. در جهات شیب شمالی به دلیل این که کمتر در معرض نور آفتاب هستند و بیشتر اوقات روز دارای سایه می باشند، تبخیر کمتر است و همچنین برف های باریده شده روی آنها دیرتر ذوب شده و فرصت کافی برای نفوذ را در اختیار دارند (علیزاده، ۱۳۸۸).

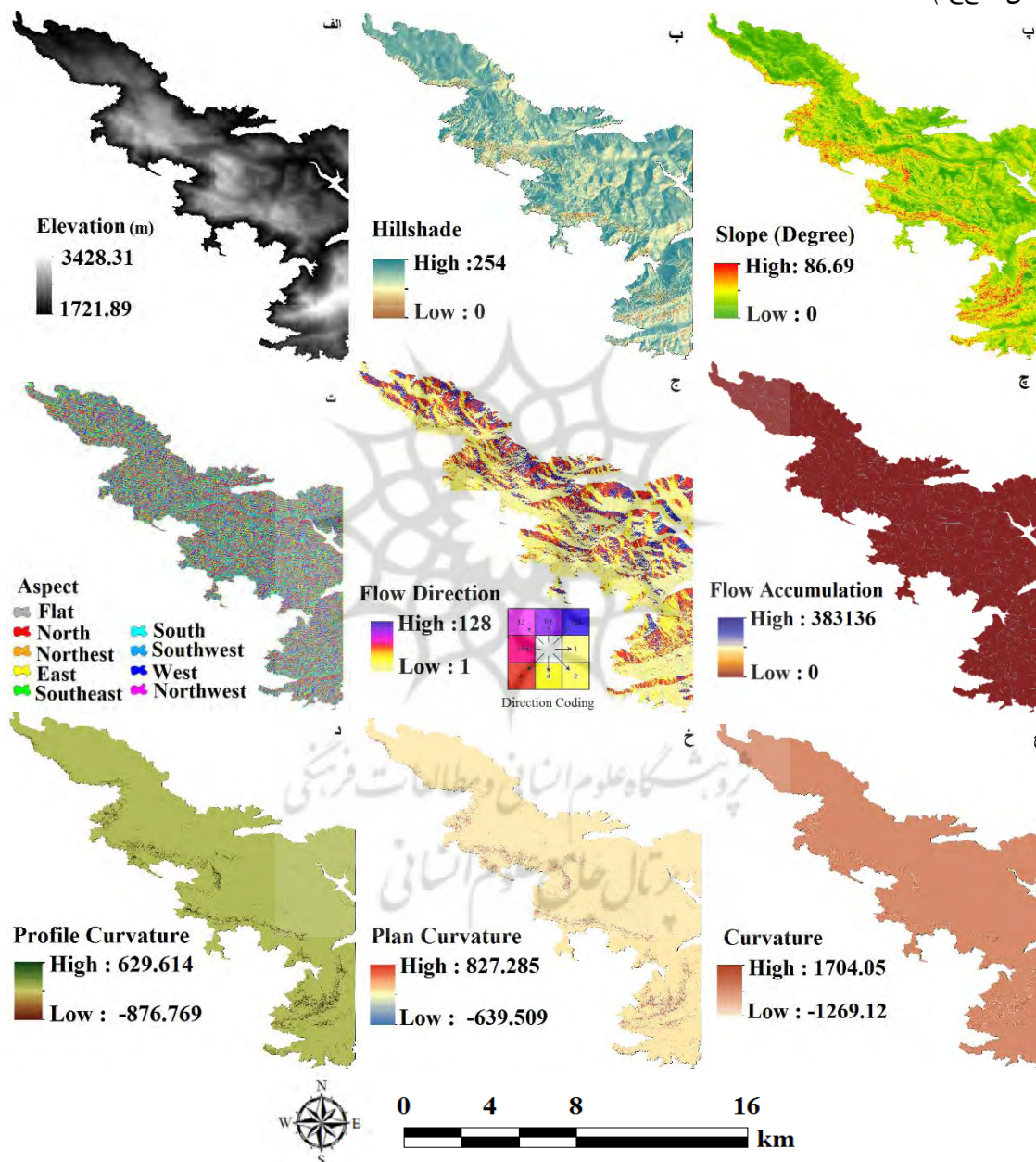
نقشه جهت جریان^۲، مسیرهای حرکت رواناب ها را نشان می دهد (شکل ۳ ج). سینک هول ها نیز می بایست در انتها یا امتداد این مسیرهای جریان، شکل گرفته باشند. با این حال ممکن است فروچاله ها در واقعیت وجود نداشته باشند و قدرت تفکیک مدل رقومی ارتفاع نیز بر انطباق این لایه با واقعیت تاثیر گذار است. این در حالی است که نقشه جریان تجمعی^۳، جریان تجمعی در آبراهه ها را نشان می دهد. این نقشه یکی از مهمترین مراحل تعیین حوزه آبخیز و به دست آوردن آبراهه ها از نقشه ارتفاعی است (شکل ۳ چ). شکل دامنه، محور مطالعات ژئومورفولوژیکی برای مدت طولانی بوده است. دامنه ها نه تنها بخش اعظم مناظر طبیعی را شامل می شوند، بلکه قسمت کاملی از سیستم زهکشی، آب و رسوبات را برای رودخانه تامین می کنند. انحنا دامنه ها به منزله یک خاصیت سه بعدی از سطح است و نشان دهنده میزان انحراف سطح از صاف بودن و یا به عبارتی محدب یا مقعر بودن دامنه را نشان می دهد. حضور شکاف های باز یا بسته ارتباط مستقیمی با انحنا دامنه ها دارد زیرا با افزایش انحنا، نیروی کششی در طول سطح افزایش می یابد و باعث تولید شکستگی ها می شود. انحنا سطح می تواند به صورت عرضی یا طولی در دامنه وجود داشته باشد. در نقشه های انحنا سطح، مقادیر مثبت نشان دهنده انحنا محدب (ستیخ ها) و مقادیر منفی نشان دهنده انحنا مقعر (گودال ها) است.

۱. Hillshade

۲. Flow direction

۳. Flow accumulation

همچنین انحنا دامنه تاثیر زیادی روی سرعت جریان و حالت تقعر و تحدب دامنه‌ها دارد و با افزایش آن حالت مقعر شده و سرعت جریان کاهش می‌یابد و سرعت نفوذ بیشتر می‌شود، بنابراین در دامنه‌های مقعر و همگرا احتمال نفوذ آب بیشتر و فروچاله‌ها در این مناطق بیشتر وجود دارند. از این رو در این مطالعه لایه‌های اطلاعاتی انحنا^۱ به صورت کلی، انحنا^۲ سطح در بیشترین شیب دامنه^۲ و انحنا^۳ سطح عمود بر بیشترین شیب دامنه^۳ مورد استفاده قرار گرفتند (شکل ۳ خ د).



۱. Curvature

۲. Profile curvature

۳. Plan curvature

شکل ۳: لایه های اطلاعاتی شامل: الف) TanDEM-X نشان دهنده ارتفاع، ب) ناهمواری ها^۱، پ) شیب، ت) جهت شیب، ج) جهت جریان، چ) جریان تجمعی، ح) انحنا سطح، خ) انحنای سطح در بیشترین شیب، د) انحنای سطح عمود بر بیشترین شیب

پردازش تصویر شیء گرا جغرافیایی (GEOBIA)^۲

سنجش از دور به یکی از منابع اساسی در مطالعات جغرافیایی بدل شده است. در این راستا روش های مختلفی برای شناسایی پدیده های جغرافیایی توسعه داده شده اند. یکی از این روش ها که جدیدتر بوده و کاربردهای بسیاری نیز امروزه یافته است روش GEOBIA یا به عبارتی سنجش از دور شیء گرا جغرافیایی است. GEOBIA با مفهوم تقسیم بندی تصویر ارتباط دارد و یک استراتژی مشخص اما مبتنی بر جغرافیا است (بلاشکه^۳ و همکاران، ۲۰۱۴؛ مینائی و کینز^۴، ۲۰۱۶). این GEOBIA به عنوان الگوی جدیدی برای تجزیه و تحلیل با وضوح بالا ایجاد شده است (چن^۵ و همکاران، ۲۰۱۸). این روش در دو دهه گذشته با پیشرفت های حاصل شده در سنسورها، فناوری کامپیوترها و علم اطلاعات جغرافیایی^۶ برخی از محدودیت ها و چالش های روش های سنتی مبتنی بر پیکسل مانند تاثیر نمک و فلفل را از بین برده است. در روش شیء گرا واحدهای اصلی پردازش، اشیاء تصویر یا قطعات هستند و نه پیکسل های مجزا. از این رو در الگوی شیء گرا برای آنالیز تصاویر، اولین مرحله همیشه ساختن واحدهای پردازش به وسیله قطعه بندی تصویر می باشد. که در این مورد پیکسل هایی که در کنار هم بر اساس معیاری به یکدیگر شبیه هستند، به عنوان یک قطعه در نظر گرفته می شوند. GEOBIA یک چهارچوب سیستماتیک برای تشخیص اشیاء جغرافیایی است. GEOBIA به عنوان یک بخش جدید توسعه یافته در علم اطلاعات جغرافیایی همانند چشم و مغز انسان عمل می نماید. در این روش ویژگی های اشیاء مانند رنگ، مساحت، بافت، شکل، روابطش با سایر اشیاء فضایی و بسیاری ویژگی های دیگر مورد استفاده قرار می گیرند تا آنچه انسان می بیند را تشخیص داده و تحلیل نماید. در پژوهش حاضر طبقه بندی شیء گرا بوسیله نرم افزار eCognition انجام شد. ابتدا تمامی لایه های ذکر شده پیشین برای سگمنت سازی مورد استفاده قرار گرفت. روش سگمنت سازی با تفکیک فضایی چندگانه^۷، ناهمگنی متوسط اشیاء تصویر را به صورت محلی به حداقل می رساند. این روش را می توان در سطح اشیاء تصویری یا سطح پیکسل برای ایجاد اشیاء تصویر جدید براساس معیارهای مقیاس، رنگ و شکل به کار گرفت (مینائی و کینز، ۲۰۱۶). در پژوهش حاضر مقادیر مختلف برای تشخیص اشیاء مورد آزمون قرار گرفت که در نهایت مقیاس مناسب سگمنت سازی با مقدار ۲، ضریب شکل ۰/۸ و ضریب فشردگی ۰/۹ تایید شد و براساس آنها اشیاء برای استفاده در مراحل بعدی ایجاد شدند.

داده کاوی

داده کاوی یک فرایند تحلیلی است که جهت کاوش داده ها و جستجوی الگوهای پایدار یا روابط سیستماتیک بین متغیرها بکار می رود و سپس با اعمال الگوهای شناسایی شده به زیر مجموعه های جدید، صحت داده های بدست آمده بررسی می

^۱. Hillshade

^۲. Geographic Object Based Image Analysis (GEOBIA)

^۳. Blaschke

^۴. Kainz

^۵. Chen

^۶. Geographic Information Science (GIScience)

^۷. Multi-resolution segmentation

گردد. این فرآیند تکنیک‌هایی از هوش مصنوعی را بر روی مقادیر زیادی داده اعمال می‌کند تا روندها، الگوها و روابط مخفی را کشف کند (یان اچ ویتن^۱ و همکاران، ۲۰۰۰). برای انجام پژوهش، ۲۰۰ نمونه که از بازدید میدانی منطقه پرآو-بیستون، استفاده از تصاویر ماهواره ای با قدرت تفکیک بالا و مقالات منتشر شده تهیه شده بودند در دو دسته ۷۰ درصد و ۳۰ درصد برای تعلیم و آزمون تفکیک دو کلاس سینکهل و غیرسینکهل تقسیم گردیدند. با توجه به نیازهای طبقه بندی، ویژگی‌های مختلف فضایی، بافتی و طیفی اشیاء برای استفاده در داده کاوی از لایه‌های اطلاعاتی که پیشتر مطرح شد برای ۱۴۰ مورد از نمونه‌ها محاسبه گردید. در مجموع ۱۱ ویژگی اشیاء وارد فرآیند داده کاوی گردید (جدول ۱). در ادامه از بسته نرم افزاری WEKA^۲ و الگوریتم J48 برای کاوش در داده‌ها و تولید مجموعه قوانین و حدود آستانه استفاده شد. الگوریتم (J48) یکی از پرکاربردترین الگوریتم‌های داده کاوی است که در زمینه طبقه بندی، در حوزه‌های مختلف داده‌ها کاربردهای فراوانی دارد (یان اچ ویتن و همکاران، ۲۰۰۰؛ مینائی و کینز، ۲۰۱۶). این الگوریتم، با مقادیر از دست رفته، به صورت مقادیر مجزا برخورد کرده و شاخه سومی از درخت توسعه می‌دهد. الگوریتم J48 نمایانگر اجرای C0.25-M2 است که یک ویژگی را برای تقسیم داده‌ها به دو زیر گروه بر اساس بالاترین میزان افزایش اطلاعات عادی (تفاوت در مفهوم آنتروپی اطلاعات) تقسیم می‌کند. سپس تکرار فرآیند بر روی هر زیر مجموعه اعمال می‌شود تا زمانی که تمام موارد در هر زیر مجموعه در همان کلاس قرار بگیرند. ارزیابی دقت داده کاوی با استفاده از روش K-fold cross-validation با حدآستانه‌های ۹۰ درصد انجام گردید. پس از آن، براساس اطلاعات حاصل از داده کاوی مجموعه قوانین^۳ طبقه بندی و حدود آستانه ایجاد گردید و طبقه بندی بر روی تصویر انجام شد. مرحله پایانی ارزیابی دقت تصویر طبقه بندی شده در شناسایی سینکهل‌ها است. ارزیابی دقت در این مرحله با استفاده از ۳۰ درصد نمونه‌های برداشت شده (۶۰ نمونه) با اشیاء سینکهل تشخیص داده شده براساس ارزیابی دقت کلی انجام گردید.

جدول ۱: شاخص‌های اشیاء مورد استفاده در فرایند داده کاوی.

| ردیف | شاخص | ردیف | شاخص |
|------|------------------------|------|------------------------|
| ۱ | Max.Diff index | ۷ | Mean flow direction |
| ۲ | Mean Slope | ۸ | Mean flow accumulation |
| ۳ | Mean profile curvature | ۹ | Mean curvature |
| ۴ | Mean hillshade | ۱۰ | Mean aspect |
| ۵ | Area pxl | ۱۱ | Mean plan curvbature |
| ۶ | Mean brightness | | |

شاخص اختلاف حداکثر^۴ برابر است با تفاوت مطلق بین حداکثر و حداقل میانگین شیء تقسیم بر میانگین روشنایی شیء.

بحث و یافته‌ها

نتایج حاصل از دقت طبقه بندی در مرحله داده کاوی ۸۷/۶ درصد بود که قابل قبول به نظر می‌رسد. بنابر نتایج به دست آمده متغیرهای مورد استفاده در تعریف قوانین نهایی عبارت بودند از جریان تجمعی، شیب، جهت جریان، ناهمواری‌ها، انحنا سطح عمود بر بیشترین شیب، Max-diff، Area pxl، انحنا سطح در بیشترین شیب و جهت شیب که از طریق داده

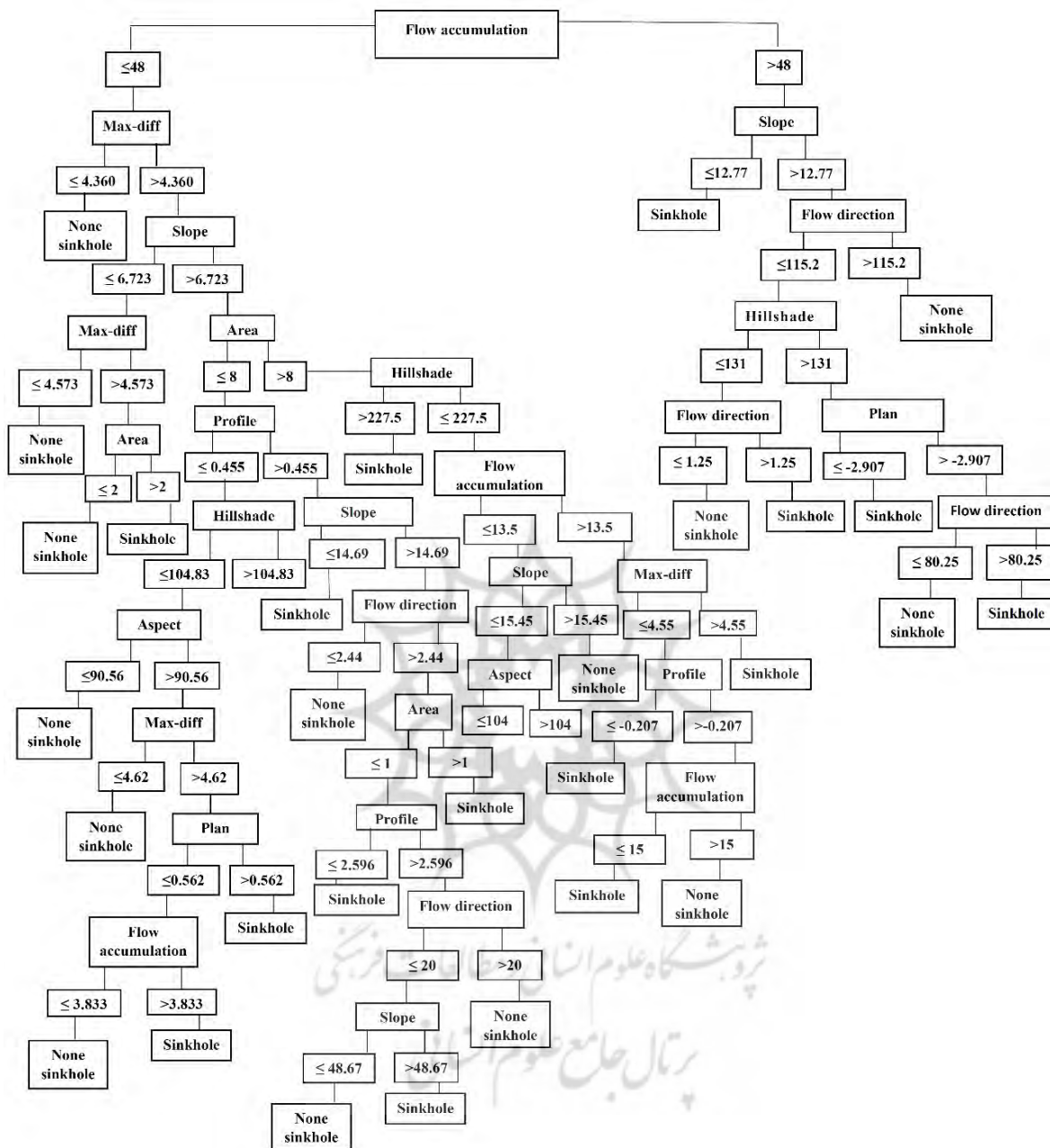
^۱. Ian H. Witten

^۱. Waikato Environment for Knowledge Analysis (WEKA)

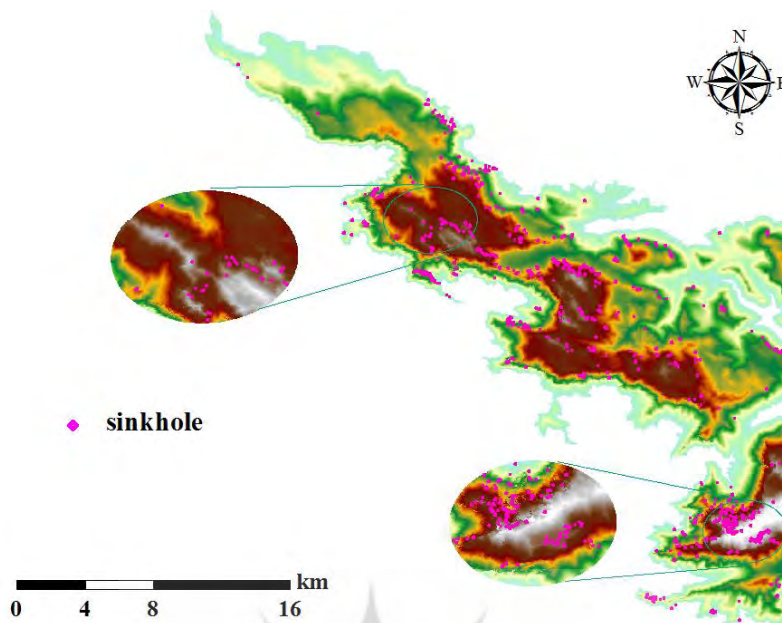
^۲. RuleSet

^۳. Max.Diff index: The absolute difference between the minimum object mean and the maximum object mean divided by the mean object brightness.

کاوی در نرم افزار WEKA به دست آمد. مطالعه محدودی و ملکی (۱۳۸۰) نیز شیب، زمین شناسی، شکل ناهمواری، بارش و درجه حرارت را عوامل تاثیر گذار می دانند که تاحدودی با نتایج داده کاوی همخوان است. پس از اعمال فرآیند داده کاوی بر روی نمونه‌ها نتیجه فهرستی از ویژگی‌های اشیاء و حدود آستانه‌ای است که در شناسایی سینکهل‌ها و ساخت درخت طبقه بندی مورد استفاده قرار خواهند گرفت (شکل ۴). با اعمال نتیجه حاصل از فرآیند داده کاوی در قالب مجموعه قوانین بر روی مجموعه تصاویر شناسایی سینکهل‌ها انجام گردید (شکل ۵). ارزیابی دقت کلی طبقه بندی با داده‌های واقعیت زمینی در این مرحله برابر با $71/3$ درصد بوده است. ارزیابی پراکنش فضایی سینکهل‌های شناسایی شده در نتایج نشان می دهد بیشتر فروچاله‌ها در مناطقی با ارتفاع 2400 تا 3500 قرار گرفته اند. در همین راستا، جعفریگلو و همکاران (۱۳۸۹) به نقل از ملکی (۱۳۸۰) بر ادامه فرآیندهای کارستی در ارتفاعات بالای 2500 متر اشاره نموده اند. همچنین در شیب‌های کمتر از 10 درجه بیشترین میزان توسعه فروچاله‌ها رخ داده است که 13 درصد منطقه واجد این شرایط است. انتظاری و همکاران (۱۳۹۷) و جهانفر و همکاران (۱۳۹۷) نیز گسترش کارست‌های سطحی در منطقه را در شیب‌های 0 تا 5 درجه و 2 تا 3 درجه اعلام می کنند. در درجات شیب دیگر به ندرت فروچاله ای دیده می شود. از نظر جهات جغرافیایی نیز، فروچاله‌ها در مناطق شمالی و شرقی بیش از مناطق جنوبی و غربی تشخیص داده شده اند که با یافته‌های انتظاری و همکاران (۱۳۹۷) منطبق می باشد. این در حالی است که جهات شیب شمالی $13/25$ درصد و شیب‌های شرقی $11/54$ درصد از منطقه مورد مطالعه را به خود اختصاص داده اند. همچنین پراکنش سینکهل‌ها با اووال‌های تشخیص داده شده توسط جهانفر و همکاران (۱۳۹۷) انطباق دارد. بطور کلی نتایج نشان می دهد استفاده از رویکرد ترکیبی داده کاوی و GEOBIA به همراه داده‌های TanDEM-X می تواند نتایج قابل قبولی با دقت تشخیص سینکهل ارائه دهد. نتایج این تحقیق با نتایج جعفریگلو و همکاران (۱۳۸۹) که به شناسایی سینکهل‌ها پرداخته است نیز هم راستا می باشند. بدین صورت که در این مطالعه با استفاده از مدل رقومی ارتفاع (DEM) و پردازش داده های رقومی نسبت به استخراج فروچاله ها اقدام کرده اند و در این پژوهش نقاط مشابهی با این مطالعه شناسایی شده است. در مقایسه با روش‌های پیکسل مبنا علی رغم اینکه هر کدام مزیت‌های خود را دارند، با توجه به ماهیت و شکل سینکهل‌ها روش شیء‌گرا می تواند بهتر عمل نماید. همچنین از ایجاد تداخل نمک و فلفل در نتایج نیز جلوگیری می نماید. همچنین بهره گیری از توانایی‌های داده کاوی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین فرآیند تعریف قوانین را که با آزمون و خطا بسیار دشوار است، بسیار تسهیل می نماید. نکته قابل توجه دیگر در زمینه انتخاب حدود آستانه برای تشخیص اشیاء است که داده کاوی به این مهم بسیار کمک می نماید. همچنین توانایی روش شیء گرا در اعمال ترکیبی ویژگی‌های طیفی و رنگی با ویژگی‌های بافت، اندازه و هندسه در فرآیند طبقه بندی می تواند بسیار مفید و راهگشا باشد.



شکل ۴: درخت تصمیم شماتیک حاصل از فرآیند داده کاوی به منظور تشخیص سینک هول‌ها



شکل ۵: نقشه پراکندگی سینک هول ها در منطقه مورد مطالعه حاصل از پیاده سازی ترکیبی داده کاوی و GEOBIA بر روی داده های TanDEM-X

تقدیر و تشکر

تشکر فراوان از مرکز فضایی آلمان برای در اختیار گذاشتن داده های مدل رقومی ارتفاع TanDEM-X در قالب پروژه شماره DEM_OTHER1257.

نتیجه گیری

آبخوان پرآو - بیستون به عنوان جزئی از زون زاگرس مرتفع، در محدوده سنگ های کربناته سازند آهکی بیستون که قابلیت انحلالی زیادی دارد قرار گرفته و با توجه به ارتفاع زیاد و بارش فراوان زمینه را برای شکل گیری و توسعه اشکال کارستی فراهم نموده است. ژئومورفولوژی و اشکال توسعه یافته کارستی مانند فروچاله ها، اووالاها و غارهای این منطقه موید این امر است. این مطالعه با هدف استخراج و شناسایی فروچاله ها با استفاده از داده های سنجنش از دور در توده پرآو-بیستون واقع در کرمانشاه انجام شد. مزیت این مطالعه در استفاده از داده TanDEM-X و ترکیب روش های داده کاوی و GEOBIA می باشد که باعث بالا رفتن دقت و شناسایی بهتر پدیده های مورد نظر می شود. استفاده از رویکرد ترکیبی داده کاوی و GEOBIA به همراه داده های TanDEM-X توانست نتایج قابل قبولی با دقت تشخیص سینک هول که برابر با $71/3\%$ بوده را ارائه دهد. نتایج ما نشان می دهد که رویکرد شناسایی فروچاله با استفاده از داده های TanDEM-X، راهی مؤثر برای شناسایی فروچاله ها در مناطق وسیع و یا غیرقابل دسترسی فراهم می کند، که شاید به صورت زمینی بسیار دشوار و زمان بر بوده و همچنین شناسایی فروچاله هایی که حتی در مقیاس کوچک بوده یا هنوز به طور کامل توسعه نیافته اند را ممکن ساخته است. استفاده از این رویکرد با توجه به ارتباط منابع آب کارست با مناطق توسعه یافته کارست در هر منطقه می تواند به شناسایی توسعه در کارست های زیر سطح نیز کمک نماید. طبقه بندی با استفاده از ویژگی های مختلف برای کلاس های خاص به عنوان یکی از مزایای روش شیء-گرا، این روش را به روشی کارآمد و قابل اعتماد تبدیل کرده است. این روش برای تشخیص سینک هول ها مناسب و از طرفی تشخیص مناطق نزدیک به سفره های زیرزمینی در توده های عظیم کارست را نیز میسر می سازد. با توجه به تاکید پژوهش های مرتبط در زمینه ارتباط مستقیم سینک هول ها با منابع آب منطقه مورد مطالعه و لزوم حفاظت از آنها در پایان پیشنهاد می شود که از

روش‌ها و داده‌های متفاوت و جدیدتر برای تولید پایگاه‌های داده جغرافیایی دقیق‌تر و همچنین ارتباط سنجش بین سینک‌هول‌ها و منابع آب استفاده گردد. همچنین پژوهش‌های آتی می‌توانند به بررسی انطباق مکان سینک‌هول‌ها با نقشه‌های آسیب پذیری آب‌خوان‌ها پردازند.

منابع

- انتظاری، م.، آقایی پور، ی.، ۱۳۹۷، پهنه بندی توسعه کارست سطحی با استفاده از مدل آنتروپی مطالعه موردی: توده کوهستانی پراو بیستون. جغرافیا و برنامه ریزی محیطی (مجله پژوهشی علوم انسانی دانشگاه اصفهان)، ۲۹ (۲) (پیاپی ۷۰)، ۱۲۹ - ۱۴۰.
- ثروتی، م.، رستمی، م.، نصرتی، ک.، احمدی، م.، ۱۳۹۳، شناخت عوامل موثر بر پراکنش و رخداد فروچاله‌ها در منطقه گازورخانی کرمانشاه با استفاده از رگرسیون لجستیک. جغرافیا و توسعه، شماره ۳۶، ۱۹۴-۱۸۱.
- جعفر بیگلر، م.، مقیمی، ا.، صفری، ف.، ۱۳۸۹، استفاده از DEM در تحلیل مورفوتکتونیک فروچاله‌های کارستی توده پراو - بیستون، مجله جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، شماره ۲۲.
- جهانفر، ع.، بهرامی، ش.، زنگنه اسدی، م.، ۱۳۹۷، تحلیل مورفومتري و مورفولوژی اووالا در توده آهکی پراو-بیستون. فضای جغرافیایی، ۱۸ (۶۳)، ۱۶۵-۱۸۰.
- خوش رفتار، ر.، جعفری، غ.، فیض اله پور، م.، آرین تبار، ح.، مرادی، پ.، ۱۳۹۸، ارزیابی ارتباط گسل‌ها با چشمه‌های کارستی در توده کوهستانی پراو بیستون-کرمانشاه. تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی (علوم جغرافیایی)، شماره ۵۴، ۲۲-۱.
- دسترنج، ع.، و نوحه گر، ا.، و رفیع شریف آباد، ج.، ۱۳۹۸، پهنه بندی توسعه ی کارست سطحی در توده آهکی بیستون با استفاده از مدل منطق فازی. آمایش جغرافیایی فضا، ۹ (۳۲)، ۸۹-۱۰۶.
- زنگنه تبار، س.، و قدیمی، م.، ۱۳۹۸، بررسی پتانسیل منابع آبی کارست پراو-بیستون به عنوان منابع تأمین آب پایدار اکوسیستم‌های زاگرس. اکوهیدرولوژی، ۶ (۱)، ۱۱۱-۱۲۳.
- علائی طالقانی، م.، رحیم زاده، ز.، ۱۳۸۹، بررسی تحول کارست در منطقه زاگرس، نخستین کنفرانس پژوهش‌های کاربردی منابع آب ایران.
- علیزاده، ا.، ۱۳۸۸، اصول هیدرولوژی کاربردی، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد.
- قبادی، م.، ساعدی، ب.، مهدی آبادی، ن.، احمدزاده، ج.، ۱۳۹۲، معرفی پدیده‌های ژئومورفولوژی کارست توده آهکی بیستون پراو، هشتمین همایش زمین شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، دانشگاه فردوسی مشهد.
- قدیمی، م.، و زنگنه تبار، س.، ۱۳۹۸، ارزیابی مناطق مناسب تغذیه آبخوان کارستی پراو-بیستون با استفاده از مدل KARSTLOP. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۸ (۱)، ۱-۱۵.
- قربانی، م.، محمودی، ف.، یمانی، م.، مقیمی، ا.، ۱۳۸۹، نقش تغییرات اقلیمی کواترنر در تحول ژئومورفولوژیکی فروچاله‌های کارستی (مطالعه موردی: ناهمواری‌های شاهو، غرب ایران)، فصلنامه پژوهش‌های جغرافیایی، ۷۴.
- محمدی، س.، و ملکی، ا.، و کریمی، ح.، و زینتی زاده، ع.، ۱۳۹۷، تحلیل کیفی چشمه‌های کارستی استان کرمانشاه با استفاده از مدل‌های آماری و هیدروشیمیایی (مطالعه موردی: آبخوان کارستی توده‌های پراو-بیستون و حوضه الوند). جغرافیای طبیعی، ۱۱ (۲) (پیاپی ۴۰)، ۶۳-۸۳.
- محمودی، ف. و ملکی، ا.، ۱۳۸۰، تحول کارست و نقش آن در منابع آب زیرزمینی در ناهمواری‌های بیستون-پراو (کرمانشاه)، پژوهش‌های جغرافیایی، دوره ۴۰، شماره ۴۰، ۱۰۵-۹۳.

- مقصودی، م.، کریمی، ح.، صفری، ف.، چهارراهی، ذ.، ۱۳۸۸، بررسی توسعه کارست در توده پرآو-بیستون با استفاده از ضرایب فرود، زمان مرگ چشمه ها و تحلیل نتایج ایزوتوپی و شیمیایی، پژوهش های جغرافیای طبیعی، شماره ۶۹، ۶۵-۵۱.
- ملکی، ا.، و باقری سیدشکری، س.، و مطاعی، س.، ۱۳۹۸، ارزیابی آسیب پذیری آبخوان های کارستی دشت کرمانشاه و توده بیستون- پرآو با استفاده از مدل COP. تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی (علوم جغرافیایی)، ۱۹(۵۲)، ۱۲۹-۱۴۵.
- ملکی، م.، جوزک، ع.، سدیدی، ج.، ۱۳۹۹، شناسایی مناطق مستعد فروچاله در حوضه کارستی بیستون-پرآو، فصلنامه مطالعات جغرافیایی مناطق کوهستانی، شماره ۳.
- وحدتی، س. م.، و طاهری، ک.، ۱۳۸۶، دسته بندی ساختاری چشمه های کارستی حوضه الوند جنوب غربی استان کرمانشاه. کنفرانس بررسی منابع آب استان، شرکت آب منطقهای کرمانشاه، صص ۸۷-۹۹.
- Blaschke, T., Hay, G. J., Kelly, M., Lang, S., Hofmann, P., Addink, E. & Tiede, D. (2014). *Geographic object-based image analysis-towards a new paradigm. ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 87, 180-191.
- Chen, G., Weng, Q., Hay, G. J., & He, Y. (2018). *Geographic object-based image analysis (GEOBIA): emerging trends and future opportunities. GIScience & Remote Sensing*, 55(2), 159-182.
- *Ecognition Developer 2012: User guide, Ecognition Developer imaging.*
- Ford, D. C., Williams, P.W (2007). *Karst Hydrology and Geomorphology. Chic he ster*(85).
- Gang Chen, Qihao Weng, Geoffrey J. Hay & Yinan He (2018) , *Geographic Object-based Image Analysis (GEOBIA): Emerging trends and future opportunities, GIScience & Remote Sensing.*
- Ian H. Witten. & Eibe Frank. & Mark A.Hall. (2000). *Fourth Edition DATA MINING Practical Machine Learning Tools and Techniques.*
- Kim, Y. J., Nam, B. H., & Youn, H. (2019). *Sinkhole Detection and Characterization Using LiDAR-Derived DEM with Logistic Regression. Remote Sensing*, 11(13), 1592.
- Krieger, G., Moreira, A., Fiedler, H., Hajnsek, I., Werner, M., Younis, M., & Zink, M. (2007). *TanDEM-X: A satellite formation for high-resolution SAR interferometry. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(11), 3317-3341.
- Minaei, M., & Kainz, W. (2016). *Watershed land cover/land use mapping using remote sensing and data mining in Gorganrood, Iran. ISPRS International Journal of Geo-Information*, 5(5), 57
- Minaei, Masoud, and Wolfgang Kainz. "Watershed land cover/land use mapping using remote sensing and data mining in Gorganrood, Iran." *ISPRS International Journal of Geo-Information* 5.5 (2016): 57.
- Piotr Wezyk , Pawel Hawrylo , Marta Szostak , Marcin Pierzchalski , Roeland de kok , (2016) , "USING GEOBIA AND DATA FUSION APPROACH FOR LAND USE AND LAND COVER MAPPING" , *QUAESTIONES GEOGRAPHICAE* 35.
- Rajabi, A. (2018). *Sinkhole Detection and Quantification Using LiDAR Data.*
- Wang, Y., Lv, H., Deng, R., & Zhuang, S. (2020). *A Comprehensive Survey of Optical Remote Sensing Image Segmentation Methods. Canadian Journal of Remote Sensing*, 1-31.
- Zhang, S., Baros, S., & Bogus, S. (2019). *Karst sinkhole detecting and mapping using airborne LiDAR.*