

## ارزیابی خطر فرسایش آبی حوزه آبخیز کسلیان با مدل ایکونا و فناوری‌های RS و GIS

حسین اسمعیلی قلم، حسن احمدی<sup>۲</sup>، ابوالفضل معینی<sup>۱\*</sup>، بهارک معتمد وزیری<sup>۱</sup>

۱- گروه جنگل، مرتع و آبخیزداری، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران  
۲- گروه احیای مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

(پژوهشی)

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۲۲ تأیید نهایی مقاله: ۱۴۰۰/۲/۱۴

### چکیده

رشد و توسعه فعالیت‌های بشری همراه با تغییر کاربری اراضی، تخریب منابع و متعاقب آن فرسایش خاک در طولانی مدت مانع توسعه پایدار محیط زیست خواهد شد. در این پژوهش با هدف بررسی خطر فرسایش و شناخت مناطق حساس به فرسایش آبی در حوزه آبخیز کسلیان، از فن‌آوری سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی در چارچوب مدل ایکونا استفاده گردید. این مدل با ۴ لایه شیب، زمین‌شناسی، پوشش گیاهی و کاربری اراضی آغاز و با تهیه دو لایه فرسایش پذیری و حفاظت خاک، پتانسیل خطر فرسایش را مورد ارزیابی قرار داد. حوزه مورد مطالعه با وجود کلاس شیب خیلی زیاد و سازند شمشک با خاک‌های حساس به هوازدگی، در کلاس فرسایش پذیری زیاد قرار دارد. اما وسعت بالای کلاس متوسط و خیلی زیاد حفاظت همراه با پوشش جنگل فرسایش را تعدیل کرده است. در مجموع، ۲۶/۲۶ درصد در کلاس متوسط خطر فرسایش، ۲۵/۴۴ درصد در کلاس خطر فرسایش کم، ۱۸/۸۳ درصد در کلاس خطر فرسایش خیلی کم، ۱۸/۵۵ درصد نیز در کلاس خطر فرسایش زیاد و ۱۰/۹۲ درصد از سطح حوزه کسلیان نیز در کلاس خطر فرسایش خیلی زیاد قرار دارد. مرتع و قسمت‌هایی از اراضی کشاورزی در رتبه اول وسعت کلاس خطر فرسایش خیلی زیاد و بخش‌های جنوبی اراضی جنگلی در کلاس خطر فرسایش زیاد قرار گرفته‌اند. این مدل می‌تواند مناطق مستعد فرسایش را با حداقل زمان، با سرعت و دقت کافی در حوزه‌های آبخیز نشان دهد و برای تصمیم‌گیران و برنامه‌ریزان حفاظت خاک در حوزه‌های آبخیز فاقد آمار مورد استفاده قرار گیرد.

**واژه‌های کلیدی:** پتانسیل خطر فرسایش، تغییر کاربری اراضی، توسعه پایدار، فرسایش آبی، فرسایش پذیری.

## مقدمه

توسعه جوامع بشری و افزایش فعالیت‌های بشر در شمال ایران تخریب اراضی جنگلی و تبدیل آنها به اراضی زراعی و مرتعی را در پی داشته است. این تغییرات کاربری و همچنین توسعه شبکه راه‌ها و مناطق مسکونی موجب افزایش فرسایش و رسوب شده است. آگاهی از میزان خطر فرسایش خاک در حوزه‌های آبخیز، امکان شناسایی نواحی بحرانی و اولویت‌بندی برنامه‌های مدیریتی و حفاظتی را فراهم می‌سازد، اما به علت نبود اطلاعات صحیح و قابل قبول از میزان کمی فرسایش خاک در حوزه‌های آبخیز اغلب نیاز به برآورد حساسیت یا پتانسیل مناطق مختلف حوزه از نظر شدت فرسایش خاک می‌باشد (نادری و همکاران، ۱۳۸۹). فرسایش خاک در ایران در سال‌های اخیر به علت تخریب عرصه‌های طبیعی شدت بیشتری یافته و تغییر کاربری‌ها نقش زیادی در بروز فرسایش و رسوب داشته است (محمدی و همکاران، ۱۳۹۷). به کارگیری فنون نوین سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی<sup>۱</sup> به همراه مدل کردن فرآیندهایی مانند فرسایش خاک موجب سرعت بخشیدن در شناخت، کنترل و مدیریت منابع طبیعی می‌شود. سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور تجزیه و تحلیل داده‌های مکانی را با سرعت بیشتر و به سادگی امکان‌پذیر کرده و ترکیب اطلاعات گسترده در زمینه‌های مختلف و از منابع مختلف را ممکن و مدیریت اطلاعات را ساده می‌کند (Reis et al, 2017). لذا یافتن راه‌حل‌های سریع و به موقع الزامی به نظر می‌رسد.

از جمله این راه‌حل‌ها کاربرد مدل ایکونا<sup>۲</sup> می‌باشد که توسط انجمن علمی حفاظت از طبیعت اسپانیا ارائه شده است. در میان بسیاری از روش‌ها برای پیش‌بینی فرسایش با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور، نتایج شبیه‌سازی این

مدل به صورت همگانی پذیرفته شده است (انتظاری، ۱۳۹۶). مدل ایکونا یکی از ساده‌ترین و قابل انعطاف‌ترین روش‌های کیفی برای ارزیابی و نقشه خطر فرسایش خاک است. این مدل یک روش ارزیابی خطر فرسایش است که با استفاده از قوانین تصمیم‌گیری کیفی و سازمان سلسله مراتبی از چهار ورودی اصلی است. این مدل در اتحادیه اروپا و کشورهای مدیترانه‌ای مانند ترکیه، تونس، مصر و سوریه استفاده می‌شود (Okou et al, 2016). نقشه خطر فرسایش تهیه شده با مدل ایکونا می‌تواند به عنوان چهارچوب قابل اعتمادی برای ارزیابی خطر فرسایش باشد (Zaz and Romshoo, 2012). این مدل با قابلیت انعطاف‌پذیری که دارد می‌تواند در تصمیم‌گیری برای حل معضلات فرسایش و تخریب خاک در شرایط خاص هر کشور یا منطقه مورد استفاده قرار گیرد (ICONA, 1997). مطالعه موردی که در حوزه آبخیز باتا در تونس توسط کیفی و همکاران (Kefi, 2009) با مدل ایکونا و استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی انجام شد، نشان داد که منطقه باتا به خصوص در مناطق با شیب بالا و پوشش گیاهی کم با مشکل بسیار جدی فرسایش آبی مواجه است. نقشه خطر فرسایش به منظور تعیین اولویت برای مداخله در اصلاح عرصه می‌باشد. این نقشه می‌تواند به محققان، طراحان و تصمیم‌گیرندگان در استراتژی‌های موثر مدیریت منابع آب و خاک در منطقه مورد مطالعه کمک کند (Okou et al, 2016). همچنین با پهنه‌بندی خطر فرسایش و شناسایی موقعیت فرسایش‌پذیری حوزه می‌توان مدیریت لازم جهت کنترل و کاهش فرسایش خاک را اعمال کرد (Olivares et al, 2011). البته گاهی شرایط پوشش، رخساره‌های سنگی و خاک بعضی حوزه‌ها به گونه‌ای است که سبب محدود شدن میزان شدت فرسایش می‌شود (چتر سیماب و

ارزیابی پتانسیل خطر فرسایش در حوزه کسلیان می‌باشد. برای صحت این مدل نیاز به اطلاعات دقیق از حوزه است. به همین علت حوزه کسلیان که یک حوزه معرف است انتخاب گردید تا صحت مدل ایکونا با واقعیت‌های موجود در حوزه بررسی شود. در نهایت نتایج مدل ایکونا را با مشاهدات مکرر صحرایی و داده‌های موجود در حوزه تطابق داده شد. این مدل می‌تواند مناطق مستعد فرسایش را با حداقل زمان، با سرعت و دقت کافی در حوزه‌های آبخیز نشان دهد. نتایج این مدل را می‌توان به عنوان یک نمونه برای ارزیابی پتانسیل خطر فرسایش در مدیریت حوزه در سایر حوزه‌های شمالی ایران مورد استفاده قرار داد.

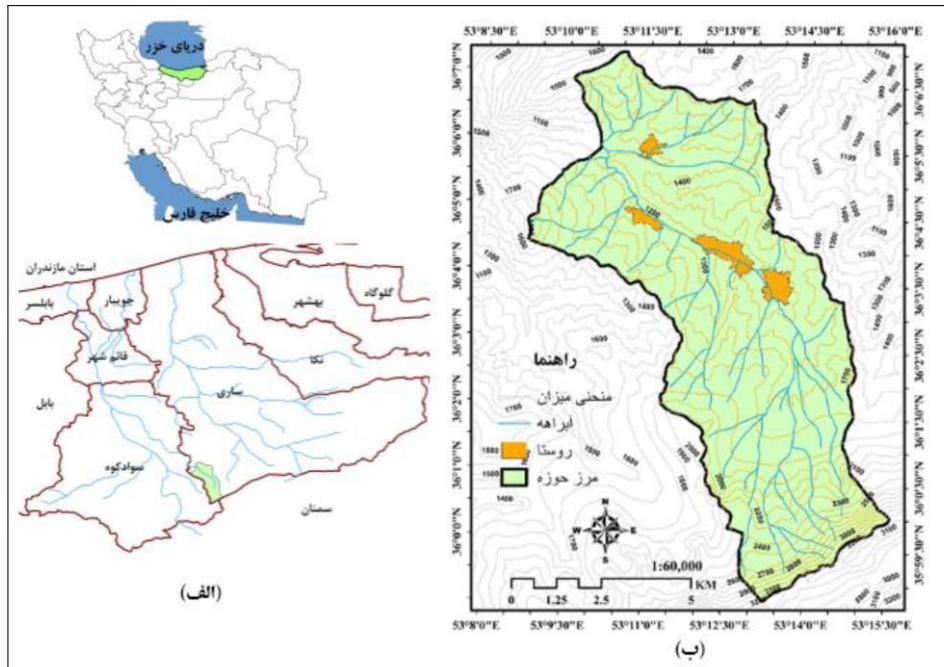
#### منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز کسلیان با وسعت ۶۷۵۰ هکتار در محدوده جغرافیایی  $30^{\circ} 1' 53''$  تا  $30^{\circ} 17' 53''$  طول شرقی و  $45^{\circ} 58' 35''$  تا  $45^{\circ} 07' 36''$  عرض شمالی و در جنوب شهرستان سوادکوه در استان مازندران واقع شده است. این حوزه یکی از حوزه‌های آبخیز معرف کشور می‌باشد و معرف مناطق وسیعی از قسمت‌های کوهستانی و جنگلی شمال البرز می‌باشد (شکل ۱). حوزه آبخیز کسلیان بین ارتفاعات ۱۱۰۰ تا ۲۹۰۰ متر از سطح آب‌های آزاد قرار گرفته است (فضل اولی، ۱۳۸۵). آب و هوای حوزه مورد مطالعه نیمه مرطوب و متوسط سالانه بارندگی ۶۰۰ میلی‌متر و متوسط درجه حرارت نیز ۱۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد (Esmaeeli, Gholzom and Gholami, 2012). آب و هوای این حوزه با توجه به ضریب اقلیمی دوماترن در گروه بسیار مرطوب و با توجه به ضریب اقلیمی آمبرژه در گروه اقلیم ارتفاعات قرار دارد (حسینی پژوه و همکاران، ۱۳۹۷). نفوذپذیری خاک در سطح حوزه آبخیز طبق طبقه‌بندی ارائه شده توسط سازمان

همکاران، ۱۳۹۶). صدیقی (۱۳۸۹) در پژوهشی که در حوزه آبخیز تنگ سرخ شیراز با به کارگیری مدل ایکونا بر مبنای فناوری‌های سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی انجام داده است، نقشه تغییرات کاربری اراضی با تصاویر ماهواره‌ای را در دو بازه‌ی زمانی ۱۹۸۸ و ۲۰۰۷ بررسی کرد. نتایج نشان داد که بر میزان وسعت مناطقی که در کلاس‌های فرسایش متوسط، زیاد و بسیار زیاد قرار گرفته‌اند، افزوده شده است که ناشی از تغییر کاربری شدید منطقه بوده است. کریمی و امین (۱۳۹۰) طی یک مطالعه، حوزه سد سیوند را با استفاده از مدل ایکونا و به وسیله تکنیک سنجش از دور پهنه‌بندی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که بر میزان فرسایش حوزه افزوده شده است و دلیل آن را تغییر کاربری اراضی در بالادست حوزه سد بیان کرده‌اند. آنان مکان‌های بحرانی از نظر فرسایش را مورد شناسایی و برنامه‌ی مدیریتی برای آن پیشنهاد دادند. طی مطالعه‌ای که کاظمی و همکاران (۱۳۹۱) انجام داد به این نتیجه رسید که کاربری اراضی نقش مهمی در تحلیل مدل ایکونا دارد. با تغییر کاربری مقدار خطر فرسایش مربوط به کلاس‌های خطر فرسایش خیلی کم و کم، کاسته شده و بر مقدار وسعت مناطقی که دارای خطر فرسایش متوسط، زیاد و بسیار زیاد هستند، اضافه می‌شود و این روند با بهره‌برداری بی‌رویه انسان از منابع طبیعی رخ می‌دهد. حوزه کسلیان در قسمت جنوبی شهرستان سوادکوه در استان مازندران می‌تواند معرف مناطق وسیعی از قسمت‌های کوهستانی و جنگلی شمال البرز در ایران باشد. مشکل اصلی این حوزه همانند سایر حوزه‌های شمال ایران، تغییر کاربری اراضی و افزایش حساسیت به فرسایش خاک است. هدف این تحقیق کاربرد مدل کیفی ایکونا و استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی برای

آبخیز کسلیان عمدتاً شامل جنگل، مرتع، کشاورزی، مسکونی و رخنمون سنگی می‌باشد.

حفاظت منابع طبیعی ایالات متحده<sup>۳</sup> در گروه C قرار دارد (روزخ، ۱۳۷۵). کاربری اراضی حوزه



شکل ۱: موقعیت حوزه آبخیز کسلیان در ایران (الف) و موقعیت جغرافیایی حوزه آبخیز کسلیان (ب)

با استفاده از الگوریتم فلش انجام شد. برنامه فلش اثرات جوی در طول موج‌های SWIR و VNIR را تصحیح می‌کند. این برنامه از معادله استاندارد برای تابش طیفی در سنجنده که برای محدوده‌های طول موج خورشیدی (به غیر از محدوده حرارتی) در سطوح لامبرتی در نظر گرفته شده است، استفاده گردید. بازنویسی تصاویر تصحیح شده نیز با استفاده از روش درونیایی نزدیک‌ترین همسایه انجام گرفت. برای تهیه نقشه کاربری نمونه‌های آموزشی آماده و سپس طبقه‌بندی نظارت شده انجام شد. برای این امر از روش‌های تفسیر بصری تصاویر و نقشه‌ها، تصاویر گوگل ارث، بازدیدهای میدانی و نقطه-برداری با GPS بهره گرفته شده است. در ادامه برای هر یک از طبقات کاربری، بیش از ۲۰ نمونه تعلیمی و شاهد انتخاب گردید. در مجموع ۵۰ درصد کل تعداد نمونه‌ها به عنوان نقاط شاهد در نظر گرفته

## مواد و روش‌ها

### داده‌های ماهواره‌ای

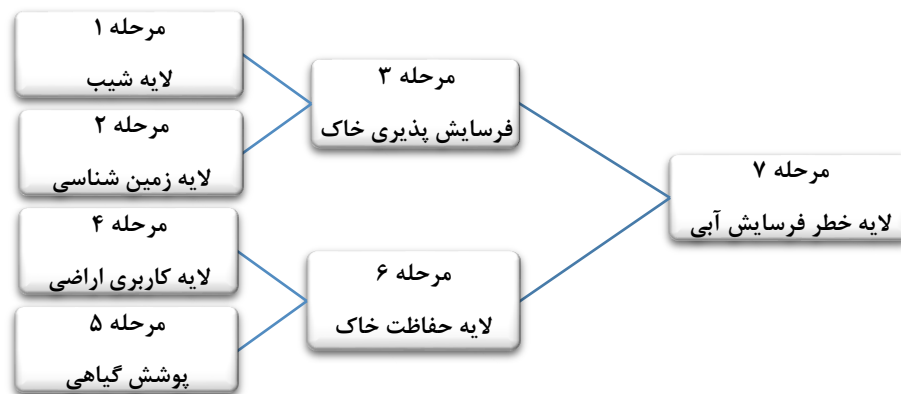
برای این پژوهش تصاویر ماهواره لندست ۸ منطقه مورد مطالعه در سال ۲۰۱۷ تهیه شد. این داده‌ها در هنگام برداشت زمینی توسط نقاط با مختصات معلوم به صورت خودکار به سیستم مختصات UTM و سیستم بیضوی WGS 1984 زمین مرجع می‌شوند. با این حال صحت تصحیح هندسی تصاویر با هم‌پوشانی داده‌های برداری راه‌های ارتباطی بر روی تصاویر رنگی کاذب ۲-۳-۴ و نقشه توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ و با اعمال فیلتر Gaussian بررسی شد. خطای متوسط<sup>۴</sup> به دست آمده برای تصحیح هندسی معادل ۰/۴۸ پیکسل برآورد گردید. برای انجام تصحیحات رادیومتریک تصاویر نیز از فرآیند دو مرحله‌ای ارائه شده توسط چاندر و همکاران (Chander, 2009) استفاده شد. تصحیح اتمسفریک

مدلی است برای تخمین درجه ریسک فرسایش در حوزه‌های آبخیز که براساس آن می‌توان درجه ریسک فرسایش را در مقیاس‌های بزرگ برآورد کرد. این مدل در کشورهای اروپایی و بسیاری از مناطق مدیترانه‌ای قابل استفاده بوده و در میان بسیاری از راه‌های موثر بر پیش‌بینی فرسایش با استفاده از سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، شبیه‌سازی این مدل در کشورهای مذکور با شرایط اقلیمی مشابه پذیرفته شده است (ICONA, 1991). مدل ایکونا شامل هفت مرحله می‌باشد که در شکل ۲ نشان داده شده است.

شد. در این پژوهش از روش حداکثر احتمال شباهت<sup>۵</sup> استفاده گردید که مناسب‌ترین روش برای طبقه‌بندی با نظارت است و نتایج طبقه‌بندی آن به صورت نقشه‌های کاربری تولید می‌گردد (Tehrany et al, 2013, 2014). بعد از طبقه‌بندی تصاویر و تولید نقشه‌های کاربری اراضی، میزان دقت طبقه‌بندی مشخص گردید.

### مدل ایکونا

مدل ایکونا، مدلی است که توسط موسسه حفاظت طبیعی اسپانیا پیشنهاد و تکامل یافته است و نام خود را نیز از همین موسسه گرفته است (Bayramin, 2003; ICONA, 1997). این مدل،



شکل ۲: مراحل مختلف مدل ایکونا

با توجه به کیفی بودن مدل ایکونا، به جهت مقایسه و صحت نتایج این مدل با واقعیت‌های موجود در عرصه، این عمل را با بررسی‌های میدانی، بازدیدهای مکرر صحرائی، با شناسایی انواع فرسایش و مناطق حساس، نقشه اشکال فرسایش تهیه شد. سپس این نقشه را با نتایج مدل ایکونا تطابق و مورد ارزیابی قرار داده‌ایم. صحت نقشه خطر فرسایش یک جنبه مهم تجزیه و تحلیل مدل است. این امر می‌تواند از طریق ارزیابی کمی مانند اندازه‌گیری فرسایش نیز انجام گیرد (Verieling et al, 2006; Stroosnijder et al, 2003; Olivares et al, 2011;

پتانسیل خطر فرسایش در هر یک از کاربری‌های موجود را نیز مورد بررسی قرار داده‌ایم. ساختار نقشه‌ها در مدل ایکونا (۱) نقشه شیب به منظور تهیه نقشه شیب حوزه آبخیز مورد مطالعه، از اطلاعات رقومی نقشه‌های ۱/۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری کشور استفاده شد. بعد از تهیه مدل رقومی ارتفاع حوزه مورد مطالعه، نقشه شیب در محیط ArcGIS 10-3 به دست آمد. سپس لایه

و خیلی زیاد (EX) قابل تقسیم می‌باشند (جدول ۱، پنل I).

#### ۴ نقشه کاربری اراضی

برای تهیه نقشه کاربری اراضی از تصاویر ماهواره‌ای و تکنیک‌های سنجش از دور استفاده شده است. در این تحقیق، از تصاویر ماهواره‌ای لندست سنجنده OLI با قدرت تفکیک زمینی ۳۰ متر و دارا بودن باندهای طیفی استفاده گردید. نتایج ارزیابی دقت معمولاً به صورت ماتریس خطا ارائه می‌شود که در این صورت انواع پارامترها و مقادیری که بیانگر دقت و یا نوعی خطا در نتایج هستند از این ماتریس استخراج می‌شوند.

#### ۵ نقشه پوشش گیاهی

در این مطالعه از شاخص نرمال پوشش گیاهی<sup>۷</sup> برای تعیین وضعیت پوشش گیاهی استفاده شد و چهار طبقه مقادیر NDVI را برای تجزیه و تحلیل به صورت (۱) کم (۰-۲۵ درصد، ۲) متوسط (۲۵-۵۰ درصد، ۳) زیاد (۲۵-۷۵ درصد و ۴) خیلی زیاد (>۷۵ درصد) مورد استفاده قرار گرفت (ICONA, 1997).

#### ۶ نقشه حفاظت خاک

با تلفیق لایه اطلاعاتی کاربری اراضی و میزان پوشش گیاهی می‌توان لایه اطلاعاتی مربوط به حفاظت خاک را در یک ماتریس ۵×۵ تهیه نمود. کلاس وضعیت حفاظت خاک با توجه به نوع کاربری و میزان پوشش گیاهی (MA) حفاظت خیلی زیاد، (A) حفاظت زیاد، (M) حفاظت متوسط، (B) حفاظت کم و (MB) حفاظت خیلی کم است (جدول ۱، پنل II).

#### ۷ نقشه خطر فرسایش

در آخرین مرحله مدل ایكونا، برای به وجود آوردن نقشه خطر فرسایش خاک، نقشه حفاظت خاک و نقشه فرسایش‌پذیری خاک در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی تلفیق و هم‌پوشانی شدند.

شیب حوزه تولید و در پنج کلاس شیب کم و مسطح (۰-۳ درصد)، شیب متوسط (۳-۱۲ درصد)، شیب زیاد (۱۲-۲۰ درصد)، شیب خیلی زیاد (۲۰-۳۵ درصد) و شیب فوق العاده زیاد (>۳۵ درصد) طبقه‌بندی شد.

#### ۲ نقشه زمین‌شناسی

خاک، به عنوان سر منشأ تمامی تحولات بعدی در هر حوزه شناخته شده بوده و بررسی وضعیت خاک بسیار اهمیت دارد. واحدهای سنگ‌شناسی رخنمون شده در گستره حوزه مورد مطالعه بر طبق مقاومت فیزیکی و شیمیایی به هوازگی است (ICONA, 1997) در پنج گروه طبقه‌بندی و کلاس هر یک تعیین گردید. در این مدل در واقع به انواع مختلف خاک تاکید دارد. چرا که خاک اغلب در سطح فرآیندهای فرسایش درگیر هستند و منابع بسیار ارزشمند و تولید محوری را تشکیل می‌دهند و بخاطر همین طبقه‌بندی می‌بایست براساس ویژگی‌های خاک منطقه و عامل فرسایش‌پذیری خاک نیز باشد (Okou et al, 2016). مقدار فاکتور فرسایش‌پذیری خاک‌ها با استفاده از نمودار فرمول جهانی فرسایش<sup>۶</sup> تعیین شده است (Zaz and Romshoo, 2012; Bayramin, 2003). در این تحقیق از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی استفاده شده است.

#### ۳ نقشه فرسایش‌پذیری

از تلفیق و روی هم‌گذاری دو لایه سطوح سنگی و شیب، لایه فرسایش‌پذیری خاک تهیه شد. نقشه فرسایش‌پذیری در واقع بیانگر پتانسیل (ریسک) فرسایش حوزه می‌باشد. به‌طور کلی، تلفیق و روی هم‌اندازی دو نقشه شیب و زمین‌شناسی، با توجه به ویژگی کلاس‌های هر یک از نقشه‌ها، ماتریس ۵×۵ را تشکیل می‌دهند که در مجموع در ۵ کلاس خیلی کم (EN)، کم (EB)، متوسط (EM)، زیاد (EA)

در نتیجه طبق جدول ۱ و پنل III، با توجه به ویژگی کلاس‌های هر یک از نقشه‌ها، ماتریکس ۵×۵ را به‌وجود می‌آورند که در مجموع نقشه خطر فرسایش در ۵ کلاس خطر فرسایش (۱ خیلی کم، ۲ کم، ۳ متوسط، ۴ زیاد و ۵ خیلی زیاد) ایجاد می‌شود.

جدول ۱: ماتریس نقشه‌هایی که تلفیق شده‌اند.

I					
طبقات شیب	سطوح سنگی				
	a	b	c	d	e
کم تا کم (۰ - ۳٪)	EN	EN	EN	EN	EB
متوسط (۳ - ۱۲٪)	EN	EN	EB	EM	EM
زیاد (۱۲ - ۲۰٪)	EB	EB	EM	EA	EA
خیلی زیاد (۲۰ - ۳۵٪)	EM	EM	EA	EX	EX
فوق‌العاده زیاد (>۳۵٪)	EA	EA	EX	EX	EX

II					
پوشش خاک	درصد پوشش گیاهی				
	۰ - ۲۵٪	۲۵ - ۵۰٪	۵۰ - ۷۵٪	>۷۵٪	
	دیم		MB	MB	B
دیم رها شده		MB	MB	B	M
جنگل طبیعی		M	A	MA	MA
جنگل دست کاشت		B	M	A	MA
مرتع		MB	B	M	A
مسکونی		MB	M	A	MA
صخره‌ای		MA	MA	MA	MA

III					
حفاظت خاک	فرسایش پذیری خاک				
	EN	EB	EM	EA	EX
MA	۱	۱	۱	۲	۲
A	۱	۱	۲	۳	۴
M	۱	۲	۳	۴	۴
B	۲	۲	۳	۵	۵
MB					
	۲	۳	۴	۵	۵

طبقات خاک: (a) بدون هوازدگی، (b) شکستگی و یا متوسط، (c) کمی بهم فشردده متوسط، (d) نرم، مقاومت کم به هوازدگی و شکاف عمیق، (e) رسوبات شل، غیر چسبنده/خاک و مواد شسته شده. کلاس فرسایش پذیری: کلاس خیلی کم (EN)، کم (EB)، متوسط (EM)، زیاد (EA) و خیلی زیاد (EX). کلاس حفاظت: (MB) حفاظت خیلی کم، (B) حفاظت کم، (M) حفاظت متوسط، (A) حفاظت زیاد و (MA) حفاظت خیلی زیاد. کلاس خطر فرسایش: (۱) خیلی کم، (۲) کم، (۳) متوسط، (۴) زیاد و (۵) خیلی زیاد.

## بحث و نتایج

## لایه‌های حاصل از مدل ایکونا

با توجه به کیفی بودن مدل ایکونا، ورودی‌های مدل شامل نقشه‌هایی است که از حوزه استخراج، تلفیق، تحلیل و در نهایت حساسیت عرصه‌ها را نسبت به فرسایش نشان می‌دهند. نتایج مربوط به مراحل مختلف محاسبه مدل ایکونا به ترتیب به شرح زیر توضیح داده شده است.

## ۱) نقشه شیب

با توجه به (شکل ۳ الف) و جدول ۲، بخش عمده‌ای از سطح حوزه مورد مطالعه دارای شیب خیلی زیاد (۲۰-۳۵ درصد) معادل ۵۳/۸ درصد است. کلاس شیب زیاد (۱۲-۲۰ درصد) نیز در رده دوم و معادل ۲۰/۲ درصد از حوزه را در بر دارد. همچنین شیب فوق‌العاده زیاد هم در رده سوم (۱۷/۹ درصد) قرار دارد. در حالی که سطح محدودی از حوزه دارای شیب کم و مسطح می‌باشد.

جدول ۲: درصد مساحت کلاس‌های شیب براساس مدل ایکونا

طبقات شیب	درصد شیب	مساحت (هکتار)	درصد مساحت
مسطح تا کم	۰-۳٪	۲۶/۹۸	۰/۴
متوسط	۳-۱۲٪	۵۲۱/۴	۷/۷۳
زیاد	۱۲-۲۰٪	۱۳۶۳	۲۰/۲
خیلی زیاد	۲۰-۳۵٪	۳۶۳۶	۵۳/۸
فوق‌العاده زیاد	>۳۵٪	۱۲۰۷	۱۷/۹

## ۲) نقشه زمین‌شناسی

نقشه زمین‌شناسی حوزه آبخیز کسلیان (شکل ۳ ب) نشان می‌دهد که بخش زیادی از سطح حوزه یعنی ۷۲/۶ درصد از شیل خاکستری تیره و ماسه سنگ تشکیل شده است (جدول ۳). این خاک‌ها از

سازند شمشک بوده و جزو خاک‌های با هوازگی متوسط تا سست هستند. همچنین ۲۰/۳ درصد نیز مربوط به سازند کشف رود است که در مقابل هوازگی مقاوم هستند.

جدول ۳: لایه سازندهای زمین‌شناسی حوزه آبخیز کسلیان براساس مدل ایکونا

طبقات	نوع مواد و جنس خاک براساس مقاومت به هوادیدگی	فاکتور K	مساحت (هکتار)	درصد مساحت
بدون هوازگی (a)	کنگلو، ماسه سنگ ناهمگن، و شیل با فسیل و رگه‌های نازک ذغال سنگ (سازند کشف رود)	-	۱۳۷۱	۲۰/۳
شکستگی و یا متوسط (b)	سنگ آهک توده‌ای ضخیم خاکستری روشن (سازند لار)	$0.05 < 0.07$	۳۷۷/۹	۵/۶
کمی به فشرده متوسط (c)	شیل خاکستری تیره و ماسه سنگ (سازند شمشک)	$0.1 < 0.2$	۴۸۹۸	۷۲/۶
نرم، مقاومت کم به هوازگی و شکاف عمیق (d)	آهک‌های خاکستری متمایل به سبز با لایه‌های میانی شیل کلسیتی (سازند دلیچال)	$0.2 \sim$	۵۷/۳۲	۰/۸۵
رسوبات شل، غیر چسبنده/خاک و مواد شسته شده (e)	توف‌های سبز با یک مجموعه ناهمگن از شیل دریایی (سازند کرج)	$> 0.6$	۴۵/۶۶	۰/۶۸



متوسط قرار می‌گیرد و تنها ۱۴/۷۱ درصد سطح حوزه دارای فرسایش پذیری خیلی زیاد می‌باشد. (شکل ۳پ) و (جدول ۴) وضعیت فرسایش پذیری حوزه مورد مطالعه را نشان می‌دهند.

### ۳) نقشه فرسایش پذیری

نقشه فرسایش‌پذیری خاک نشان می‌دهد که ۴۲/۴۶ درصد از سطح حوزه مورد مطالعه کلاس فرسایش پذیری زیاد قرار دارد. همچنین ۳۰/۵۸ درصد از سطح حوزه نیز در کلاس فرسایش پذیری

جدول ۴: کلاس‌های فرسایش‌پذیری براساس مدل ایکونا

طبقات	برچسب	فرسایش پذیری	مساحت (هکتار)	درصد مساحت
۱	EN	خیلی کم	۱۸۶/۳۶	۲/۷۶۱
۲	EB	کم	۶۴۱	۹/۴۹۶
۳	EM	متوسط	۲۰۶۴/۱	۳۰/۵۸
۴	EA	زیاد	۲۸۶۵/۸	۴۲/۴۶
۵	EX	خیلی زیاد	۹۹۲/۷۸	۱۴/۷۱

روش حداکثر احتمال بیشترین میزان دقت را در طبقه‌بندی داده‌های ماهواره‌ای دارد. نتایج حاصل از (شکل ۳ت) و جدول ۵، نشان می‌دهد که بیشترین درصد کاربری از کل حوزه مورد مطالعه مربوط به کاربری جنگل با ۶۷/۶ درصد و بعد از آن اراضی کشاورزی در رتبه دوم قرار دارد. حداقل کاربری نیز مربوط به کاربری مناطق مسکونی با ۱/۲۲ درصد می‌باشد.

### ۴) نقشه کاربری اراضی

بعد از طبقه‌بندی تصاویر و تولید نقشه‌های کاربری اراضی، میزان دقت طبقه‌بندی مشخص گردید. بدین منظور برای تصویر تولید شده میزان ضریب کاپا، صحت کلی، دقت کاربر و دقت تولید کننده محاسبه شد. میزان کارایی هر روش طبقه‌بندی با محاسبه دو شاخص صحت کلی (۸۲/۲۶) و ضریب کاپا (۰/۷۵) بررسی گردید. نتایج نشان دادند که

جدول ۵: کلاس‌های کاربری اراضی براساس مدل ایکونا

کاربری	مساحت (هکتار)	درصد مساحت
کشاورزی	۱۵۱۲	۲۲/۴
جنگل	۴۵۶۴	۶۷/۶
مرتع	۳۳۶	۴/۹۸
مسکونی	۱۵۰	۲/۲۲
برونزد سنگی	۱۸۷	۲/۷۷

هر پیکسل تصاویر ماهواره‌ای استفاده می‌گردد. بنابراین شاخص نرمال پوشش گیاهی اطلاعات لازم در مورد توزیع مکانی و زمانی پوشش گیاهی (سبزی) با فعالیت فتوسنتزی و بهره‌وری (Tucker et al, 1985; et al, 1994) و نیز میزان تخریب اراضی در اکوسیستم‌های مختلف را هم

### ۵) نقشه پوشش گیاهی

گیاهان در محدوده طول موج ۰/۷ تا ۱/۳ میکرومتر دارای بالاترین میزان انعکاس هستند. براساس این خصوصیت انعکاس طیف گیاهان سبز برای استخراج نقشه پوشش گیاهی از فرایند تقسیم یا نسبت باندهای مادون قرمز نزدیک به باند قرمز برای

نشان می‌دهد (Thiam and Holm et al, 2003). با توجه به نتایج ارائه شده در (شکل ۳) و جدول ۶، بیشترین درصد پوشش گیاهی براساس شاخص نرمال پوشش گیاهی مربوط به کلاس زیاد (۷۵-۵۰ درصد) با ۱۹/۶۳ درصد از مساحت کل حوزه می‌باشد.

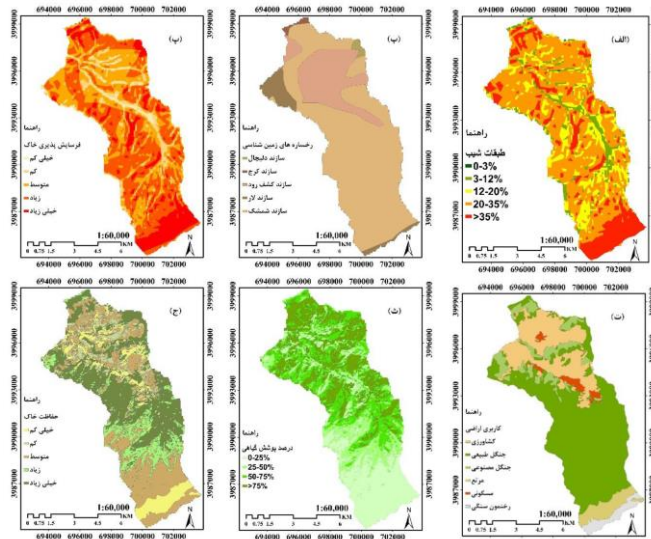
جدول ۶: کلاس‌های پوشش گیاهی براساس شاخص نرمال پوشش گیاهی

طبقات	مساحت (هکتار)	درصد مساحت
کم (۰-۲۵٪)	۱۸۵۱/۶	۲۷/۴۳
متوسط (۲۵-۵۰٪)	۱۳۲۵	۱۹/۶۳
زیاد (۵۰-۷۵٪)	۲۰۵۵	۳۰/۴۴
خیلی زیاد (>۷۵٪)	۱۵۱۸/۴	۲۲/۵

۶) نقشه حفاظت خاک با توجه به (شکل ۳ج) و جدول ۷، ۳۲/۱۷ درصد از حوزه دارای حفاظت متوسط دارد. این در حالی است که ۳۰/۹۱ درصد حوزه نیز دارای شرایط حفاظتی خیلی زیاد می‌باشد. در عین حال تنها ۱۲/۱۱ درصد حوزه در شرایط حفاظتی کم قرار دارد. بنابراین بخش قابل توجهی از حوزه در شرایط حفاظتی خوبی قرار دارد.

جدول ۷: کلاس‌های حفاظت خاک براساس مدل ایکونا

طبقات	برچسب	حفاظت خاک	مساحت	درصد
۱	MA	خیلی زیاد	۲۰۸۶/۵	۳۰/۹۱
۲	A	زیاد	۹۶۷/۶۷	۱۴/۳۴
۳	M	متوسط	۲۱۷۱/۳	۳۲/۱۷
۴	B	کم	۷۰۷/۲۴	۱۰/۴۸
۵	MB	خیلی کم	۸۱۷/۲۸	۱۲/۱۱

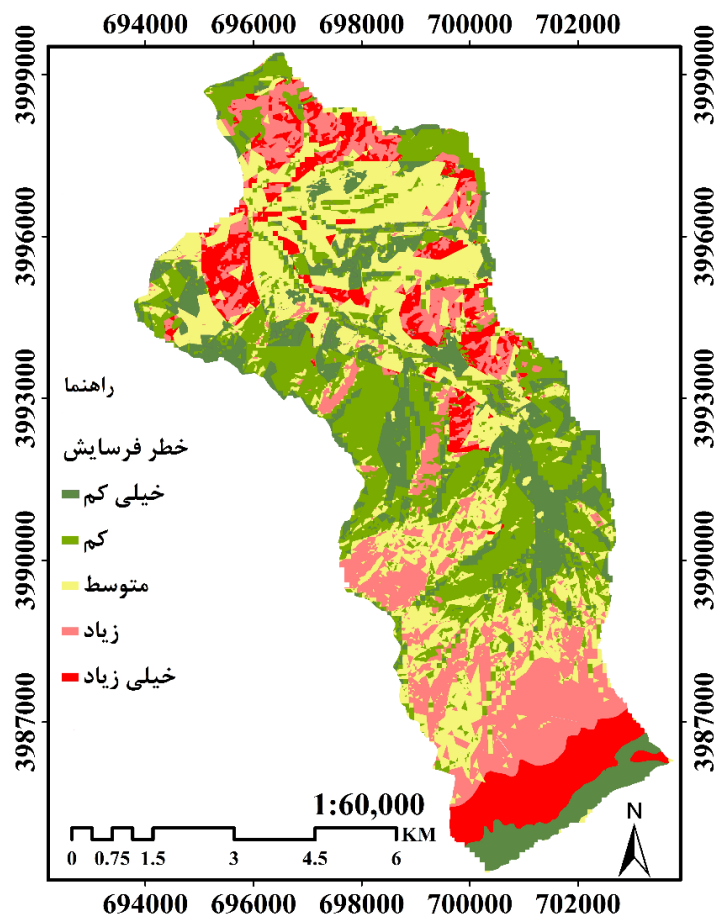


شکل ۳: نقشه‌های مدل ایکونا: الف) شیب، ب) زمین‌شناسی، پ) فرسایش پذیری، ت) کاربری اراضی، ث) پوشش گیاهی و ج) حفاظت خاک.

۷) نقشه خطر فرسایش کلاس متوسط خطر فرسایش بیشترین درصد (۲۶/۲۶ درصد) سطح حوزه را به خود اختصاص داده است. از طرفی کلاس خطر فرسایش کم نیز بخش قابل توجهی (۲۵/۴۴ درصد) از سطح حوزه را شامل می‌شود. بنابراین بخش قابل توجهی از سطح حوزه دارای خطر فرسایش متوسط تا کم می‌باشد. تنها ۱۰/۹۲ درصد از سطح حوزه را کلاس خطر فرسایش خیلی زیاد تشکیل می‌دهد. نتایج حاصل از نقشه خطر فرسایش در (شکل ۴) و (جدول ۸) نشان داده شده است.

جدول ۸: کلاس‌های خطر فرسایش براساس مدل ایکونا

طبقه	خطر فرسایش	مساحت (هکتار)	درصد مساحت
۱	خیلی کم	۱۲۷۰/۸	۱۸/۸۳
۲	کم	۱۷۱۷/۳	۲۵/۴۴
۳	متوسط	۱۷۷۲/۴	۲۶/۲۶
۴	زیاد	۱۲۵۲/۵	۱۸/۵۵
۵	خیلی زیاد	۷۳۶/۹۷	۱۰/۹۲



شکل ۴: نقشه خطر فرسایش حوزه آبخیز کسلیان

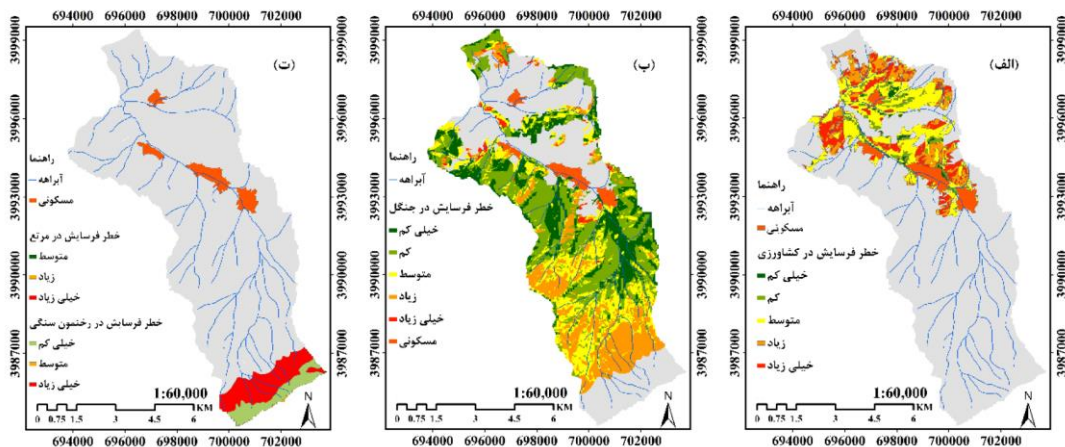
زیاد قرار دارد (شکل ۵ب). در اراضی مرتعی تقریباً ۱۰۰ درصد از این کاربری در کلاس فرسایش خیلی زیاد قرار دارد. این درصد در واقع نزدیک به ۵ درصد از کل حوزه شامل می‌شود (شکل ۵ج). در بخش اعظم رخصاره‌های سنگی یعنی ۹۹ درصد (۲/۷۴ درصد از کل اراضی حوزه) در کلاس خطر فرسایش خیلی کم قرار گرفته است (شکل ۵ج). همچنین اراضی مسکونی در واقع در بطن اراضی زراعی قرار دارد و به‌طور کلی کل مساحت کلاس‌های خطر فرسایش در این کاربری کمتر از یک درصد از مساحت کل حوزه را به خود اختصاص داده است.

تلفیق نقشه کاربری اراضی با نقشه خطر فرسایش نتایج حاصل از تلفیق در جدول ۹ آمده است. براساس جدول ۹، بیشترین کلاس خطر فرسایش در اراضی کشاورزی در کلاس متوسط (۱۰/۳ درصد از کل حوزه) قرار گرفته است (شکل ۵الف). حداکثر اراضی جنگل (طبیعی) در کلاس فرسایش کم (۲۰/۱ درصد) و در اراضی جنگل دست کاشت نیز در کلاس کم (۳/۰۶ درصد) قرار گرفته است. در حالی که ۱۳/۲ درصد از جنگل طبیعی (۸۹۱ هکتار) به خصوص در قسمت‌های جنوبی آن (با کاهش پوشش گیاهی) در کلاس خطر فرسایش

جدول ۹: تلفیق نقشه کاربری اراضی با نقشه خطر فرسایش حوزه آبخیز کسلیان

کاربری اراضی	خطر فرسایش	مساحت (هکتار)	مساحت هر کاربری (درصد)	مساحت نسبت به کل منطقه (مورد مطالعه (درصد))
کشاورزی	زیاد	۳۲۲	۲۱/۳	۴/۷۷
	کم	۱۲۵	۸/۲۶	۱/۸۵
	متوسط	۶۹۴	۴۵/۹	۱۰/۳
جنگل طبیعی	خیلی زیاد	۳۲۳	۲۱/۴	۴/۷۹
	خیلی کم	۴۸۱	۳/۱۸	۰/۷۱
	زیاد	۸۹۱	۱۹/۵	۱۳/۲
	کم	۱۳۶۰	۲۹/۸	۲۰/۱
	متوسط	۸۵۰	۱۸/۶	۱۲/۶
جنگل مصنوعی	خیلی زیاد	۳۶/۹	۰/۸۱	۰/۵۵
	خیلی کم	۷۹۲	۱۷/۴	۱۱/۷
	زیاد	۴۵/۹	۱	۰/۶۸
	کم	۲۰۷	۴/۵۳	۳/۰۶
	متوسط	۱۶۹	۳/۷	۲/۵
مسکونی	خیلی زیاد	۳۱	۰/۶۸	۰/۴۶
	خیلی کم	۱۸۱	۳/۹۸	۲/۶۹
	زیاد	۱/۵۶	۱/۰۴	۰/۰۲
	کم	۳۳/۹	۲۲/۶	۰/۵
	متوسط	۶۶	۴۴	۰/۹۸
	خیلی زیاد	۶/۹۸	۴/۶۵	۰/۱
مرتع	خیلی کم	۴۱/۷	۲۷/۸	۰/۶۲
	زیاد	۰/۰۷	۰/۰۲	۰
	کم	۰	۰	۰
	متوسط	۰/۰۸	۰/۳	۰
خیلی زیاد	۳۳۶	۱۰۰	۴/۹۸	

•	•	•	خیلی کم	
•	•	•	زیاد	
•	•	•	کم	برون زد سنگی
۰/۰۳	۱/۲۶	۲/۳۵	متوسط	
•	•	۰/۰۱	خیلی زیاد	
۲/۷۴	۹۹	۱۸۵	خیلی کم	

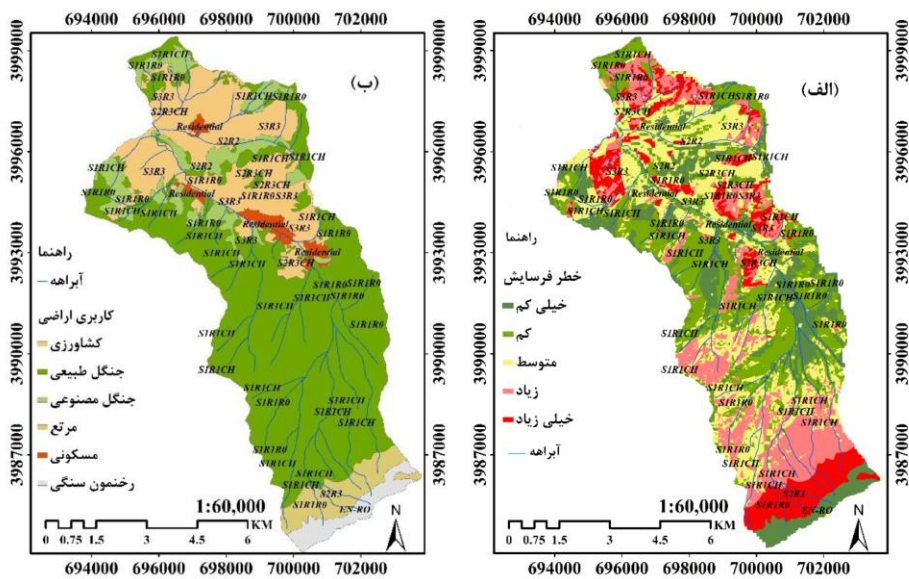


شکل ۵: نقشه تلفیق کلاس‌های خطر فرسایش با کاربری اراضی

### صحت و ارزیابی پتانسیل خطر فرسایش

توجه به شکل ۶ الف، حساسیت اراضی در کاربری مرتع و قسمت‌هایی از اراضی کشاورزی بیشتر بوده و در کلاس خطر فرسایش خیلی زیاد قرار گرفته است. اما در رخنمون سنگی کلاس خطر فرسایش خیلی کم و فرسایش انحلالی نیز دیده می‌شود که حساسیت به فرسایش را بیشتر کرده است. در بخش‌های مرتفع و جنوبی اراضی جنگلی نیز خطر فرسایش در کلاس زیاد قرار دارد که ناشی از کاهش پوشش گیاهی و شیب زیاد می‌باشد. براساس شکل ۶ ب، عمده اشکال فرسایشی از نوع فرسایش سطحی و شیاری با شدت و ضعف‌های متفاوت در کاربری‌های مختلف حوزه وجود دارد.

نتایج حاصل از بازدیدهای مکرر از حوزه مورد مطالعه، شاهد وجود تنوع و ظهور انواع مختلف فرسایش هستیم که نمایانگر تاثیر فاکتورهای متفاوت با شدت و ضعف‌های گوناگون در کنار تاثیر عوامل انسانی می‌باشد (شکل ۶). این فاکتورها شامل نوع سازندهای زمین‌شناسی و درجات حساسیت آنها به فرسایش، نوع خاک، آب و هوا، جریان‌ات سطحی، شیب، پوشش گیاهی و سایر عوامل موثر در فرسایش می‌باشد. نحوه کاربری اراضی و چگونگی رعایت و یا اخلال در قواعد و اصول صحیح بهره‌برداری، جاده‌سازی و سایر عملیات ساختمانی نیز به نحوی در بروز اشکال مختلف فرسایش نقش ویژه‌ای را ایفا می‌نمایند. با



شکل ۶: نقشه تلفیق اشکال فرسایش با (الف) پتانسیل خطر فرسایش و (ب) کاربری اراضی

R: فرسایش شیاری، S: فرسایش سطحی، EN: فرسایش انحلالی، RO: ریزش توده سنگی، CH: فرسایش کنار رودخانه‌ای  
 EN-RO: فرسایش انحلالی و توده سنگی، SIR1CH: سطحی، شیاری با شدت خیلی کم و کنار رودخانه‌ای، SIRIRO:  
 سطحی، شیاری با شدت خیلی کم و ریزش توده سنگی، S2R2: سطحی و شیاری با شدت کم، S2R3CH: سطحی شدت  
 کم، شیاری شدت متوسط و کنار رودخانه‌ای، S3R3: سطحی و شیاری با شدت متوسط، Residential: مسکونی.

### نتیجه گیری

لایه فرسایش پذیری (شیب، زمین شناسی) و حفاظت خاک (پوشش گیاهی، کاربری اراضی)، نقشه خطر فرسایش تهیه می‌شود. این مدل با استفاده از فناوری‌های سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، امکان ارزیابی خطر فرسایش را با حداقل پارامتر، سرعت زیاد در محاسبه فرسایش، هزینه کم، در زمان اندک، با کیفیت و دقت خوب فراهم می‌سازد. در عین حال دو عامل موثر طول و جهت شیب در فرسایش خاک که به خصوص در مناطق خشک و نیمه خشک اهمیت دارند، در این مدل در نظر گرفته نمی‌شوند. به همین علت این مدل برای مناطق مدیترانه‌ای و نیمه مدیترانه‌ای کاربرد بیشتری دارد. نتایج حاصل از مطالعه در حوزه آبخیز کسلیان نشان داد که کلاس متوسط خطر فرسایش بیشترین درصد (۲۶/۲۶ درصد) مساحت حوزه را به خود اختصاص داده است. کلاس خطر فرسایش کم (۲۵/۴۴

ارزیابی فرسایش خاک برای هر طرح طولانی مدت حفاظت خاک در حوزه‌های آبخیز ضروری است. در عین حال برای حوزه‌های وسیع، پرهزینه و زمان بر می‌باشد. نقشه خطر فرسایش این امکان را می‌دهد تا با شناسایی نقاط حساس بتوان برنامه‌های درست مدیریت و حفاظت خاک را به ویژه در حوضه‌های آبخیز بدون آمار اولویت بندی کرد. مدل ایکونا یکی از مدل‌های فرسایش خاک است که برای ارزیابی پتانسیل خطر فرسایش در حوزه آبخیز کسلیان مورد استفاده قرار گرفت. در این مدل برای جمع-آوری و نظارت بر پوشش زمین و اطلاعات مربوط به زمین از سنجش از دور همچنین برای تهیه و پردازش داده‌های مکانی دقیق از سیستم اطلاعات جغرافیایی به نحو مطلوبی استفاده گردید. این مدل با چهار لایه اطلاعات (شیب، زمین شناسی، پوشش گیاهی و کاربری اراضی) آغاز، با تهیه و تلفیق دو

پوشش جنگلی (۶۷/۶۰ درصد) در کل سبب تعدیل فرسایش شده است. این نتایج با تلفیق دو نقشه حفاظت و فرسایش پذیری حاصل شد. چون پوشش گیاهی بالا اثر شیب را تعدیل کرده، در کل بیشترین سطح کلاس خطر فرسایش را در کلاس متوسط قرار داده است. این موضوع با نتایج میرزایی و همکاران (۱۳۹۷) در حوزه آبخیز گرگان رود، که بیان کردند با افزایش شیب در این حوزه فرسایش افزایش می‌یابد اما در بعضی از واحدها با افزایش شیب، شدت فرسایش کاهش یافته است که علت آن را تراکم پوشش گیاهی دانسته‌اند مطابقت دارد. در عین حال بخش‌های جنوبی و مرتفع‌تر اراضی جنگلی حوزه کسلیان در کلاس خطر فرسایش زیاد (۸۹۱ هکتار) قرار دارد که به علت کاهش پوشش گیاهی و شیب می‌باشد. این در حالی است که بخش اعظم اراضی جنگلی به دلیل خاک دانه‌های پایدار، مقدار ماده آلی زیاد و پوشش گیاهی مطلوب، مقدار مقاومت خاک در برابر فرسایش آبی و روان آب زیاد است (علی جانپور شلمانی و همکاران، ۱۳۹۸). در مجموع کاربری جنگل با خطر فرسایش کم مواجه هست و بیشترین سطح را در کلاس خطر فرسایش کم دارد. این تحقیق با بررسی کاربری اراضی در حوزه کسلیان تاثیر مثبت پوشش گیاهی طبیعی را در کاهش فرسایش پذیری و خطر فرسایش نشان می‌دهد. این نتایج با نتایج لو و همکاران (Luo et al, 2014) و اروک و همکاران (Uruk et al, 2012) مطابقت دارد. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که مناطق با پوشش گیاهی کمتر از فرسایش بیشتر خاک رنج می‌برند. همچنین یافته‌های تحقیق نشان داد که میزان خطر فرسایش در مناطق مرتعی با شیب بالا و حفاظت کم، خیلی زیاد است. این نتیجه با نتایج کفی و همکاران (Kefi et al, 2009) مطابقت دارد. این موضوع (تاثیر شیب بالا و حفاظت کم) از شواهد مطالعات انجام شده

درصد) نیز در رتبه دوم از سطح حوزه را شامل می‌شود. کلاس خطر فرسایش خیلی کم ۱۸/۸۳ درصد و ۱۸/۵۵ درصد نیز در کلاس خطر فرسایش زیاد از سطح حوزه کسلیان را شامل می‌شود. همچنین ۱۰/۹۲ درصد از سطح حوزه در کلاس خطر فرسایش خیلی زیاد قرار دارد. با توجه به نتایج می‌توان گفت که حدود ۲۹/۵ درصد حوزه با خطر فرسایش زیاد و خیلی زیاد مواجه است که در صورت عدم توجه به این موضوع پایداری منابع طبیعی منطقه، با خطر مواجه خواهد شد. حوزه آبخیز کسلیان با توجه به خصوصیات مورفولوژی و توپوگرافی، حوزه‌ای است با تراکم شدید و کشیده با مساحت زیاد کلاس شیب خیلی زیاد (۲۰-۳۵ درصد)، سازندهای حساس به فرسایش آبی خاک حوزه با بافت سنگین تا نیمه سنگین و گروه هیدرولوژیکی خاک C می‌باشد. بنابراین فرسایش در نقاط حساس حوزه پیش‌بینی و مشاهده می‌گردد. این نتایج با نتایج تحقیقات انتظاری و خدادادی (۱۳۹۶) در حوزه آبخیز طالقان رود مطابقت دارد. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که سطوحی که باعث فرسایش در حوزه‌های آبخیز می‌شوند، عموماً اراضی با شیب بالا، خاک‌های سنگین و با گروه هیدرولوژیکی C و D و اراضی با پوشش گیاهی کمتر هستند که قابلیت نگهداری رطوبت و نفوذپذیری آن به مراتب پایین‌تر از اراضی طبیعی با میزان تاج پوشش بالا و دست نخورده می‌باشد. یافته‌های تحقیق در حوزه مورد مطالعه نشان می‌دهد که کلاس شیب خیلی زیاد (۲۰ تا ۳۵ درصد) با وسعت ۳۶۳۲ هکتار و سازند شمشک با گسترشی بیش از ۷۲ درصد (دارای خاک‌های با حساسیت در برابر هوازدگی)، سطح منطقه را از نظر فرسایش‌پذیری، در کلاس زیاد فرسایش‌پذیری قرار می‌دهد (طبق نقشه فرسایش‌پذیری حوزه). اما بالا بودن درصد پوشش حفاظتی همراه با درصد بالای

اکوسیستم‌های حساس‌تری مثل مرتع و رخنمون سنگی هستند، حساسیت سطوح به فرسایش به وضعیت خاک، شیب و نوع پوشش حفاظتی زمین بستگی دارد. در حوزه آبخیز مورد مطالعه شاهد تنوع و ظهور انواع مختلف فرسایش می‌باشیم که نمایانگر تاثیر فاکتورهای متفاوت با شدت و ضعف‌های گوناگون در کنار تاثیر عوامل انسانی می‌باشد. نتایج بررسی‌های صحرایی انجام شده در حوزه نشان می‌دهد که بخش اعظم اشکال فرسایش از شدت تخریب برخوردار نیستند و این نتیجه با نقشه پتانسیل خطر فرسایش حاصل از مدل ایکونا که پتانسیل خطر فرسایش را در کلاس فرسایش متوسط قرار داده است، مطابقت دارد. این مطلب بیانگر صحت و اعتبار استفاده از مدل ایکونا در حوزه آبخیز کسلیان می‌باشد. نتایج تحقیق نشان داد که سیستم اطلاعات جغرافیایی قابلیت فوق‌العاده‌ای برای پهنه‌بندی میزان فرسایش فراهم می‌کند که این یافته با نتایج ریس (Reis, 2017) مطابقت دارد. همچنین با استفاده از مدل ایکونا می‌توان به شناسایی مکان‌های با حساسیت زیاد به فرسایش دست یافت تا در این مناطق بتوان کارهای مدیریتی انجام داد که این یافته با نتایج الیورز و همکاران (Olivares et al, 2011) تطبیق دارد. نتایج کلی تحقیق مبنی بر اینکه این مدل دارای توانایی زیادی در زمینه پهنه‌بندی فرسایش است با یافته‌های چتر سیماب و همکاران (۱۳۹۶ و ۱۳۹۷)، مقیم و همکاران (۱۳۹۲)، کاظمی و همکاران (۱۳۹۱) مطابقت دارد. این پژوهش نشان می‌دهد که نقشه پتانسیل خطر فرسایش تهیه شده با مدل ایکونا با بهره‌گیری از تکنیک‌های سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی در حوزه کسلیان از دقت کافی برخوردار است. این مدل می‌تواند به عنوان چهارچوب قابل اعتمادی برای ارزیابی خطر فرسایش باشد و امکان شناسایی مناطق مستعد

توسط گتیب و لارابی (Gatib and Larabi, 2014) در مراکش و ولکا و همکاران (Volka et al, 2015) در اتیوپی که روی خطر فرسایش کار کرده‌اند نیز گزارش شده است. اگرچه شرایط آب و هوایی حوزه کسلیان با شرایط این مناطق متفاوت است اما با بررسی‌های انجام شده در حوزه کسلیان، مناطق با شیب بیش از ۳۵ درصد، به میزان ۱۷/۹ درصد از مساحت حوزه مورد مطالعه را تشکیل می‌دهد. در این مناطق از حوزه مورد مطالعه خطر فرسایش در سطوحی که دارای پوشش بالا در شیب بالا هستند کم هست. یافته‌های تحقیق نشان می‌دهد که اراضی رخنمون سنگی که در ارتفاعات بالادست حوزه وجود دارد، دارای شیب بیش از ۳۵ درصد می‌باشد. این اراضی در کلاس خطر فرسایش خیلی کم قرار گرفته است. این نتایج با نتایج اوکویو و همکاران (Okou et al, 2014) مطابقت دارد. به اعتقاد آن‌ها شیب بالاتر می‌تواند یک حفاظت طبیعی در برابر فرسایش خاک نیز به وجود آورد. نتایج تحقیق در کاربری‌های مختلف اراضی در حوزه مورد مطالعه نشان می‌دهد که مرتع و بخش‌هایی از اراضی کشاورزی (به خصوص در دیمزارهای رها شده) در رده اول از نظر پتانسیل خطر فرسایش خیلی زیاد قرار می‌گیرند. در بخش جنوبی و قسمت بالادست اراضی جنگلی نیز در رده دوم، دارای کلاس خطر فرسایش زیاد هستند. با بررسی‌های صحرایی مشخص شد که عملیات نامناسب کشاورزی در اراضی شییدار، بهره‌برداری بی‌رویه از مراتع همراه با کلاس شیب خیلی زیاد، کاهش پوشش گیاهی، کاهش پوشش حفاظتی و ضخامت خاک حساسیت این کاربری‌ها را به فرسایش زیاد کرده است. این نتایج با نتایج استنچی و همکاران (Stanchi et al, 2013) مطابقت دارد. آن‌ها با مطالعه‌ای که بر روی خاک‌های آلپ انجام دادند، دریافتند که در بخش‌های مرتفع‌تر حوزه که دارای



باشد. این مدل می‌تواند برای تصمیم‌گیران و برنامه‌ریزان حفاظت خاک به خصوص در حوزه‌های آبخیز فاقد آمار در حوزه‌های آبخیز شمال البرز مورد استفاده قرار گیرد.

فرسایش را فراهم سازد. همچنین به عنوان یک روش سریع، کاربردی با کاهش در هزینه و زمان، دارا بودن دقت و قابلیت انعطاف پذیری خوب می

## پانویس

1-Remote sensing (RS) and geographic information system(GIS)  
2-ICONA model (Institute for the Conservation of the Nature)  
3-Natural Resources Conservation Service

4-Root Mean Square Error  
5-Maximum Likelihood  
6-USLE  
7-Normalized Difference Vegetation Index

## منابع

هشدار دهنده سیل و تعیین پهنه‌های خطر سیل در حوزه آبخیز معرف کسلیان، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، رشته آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران.  
-صدیقی، م.ر.، ۱۳۹۰. پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد پهنه‌بندی خطر فرسایش آبی با به کارگیری مدل ICONA بر مبنای فناوری‌های GIS&RS (مطالعه موردی حوزه آبخیز تنگ سرخ شیراز)، دانشگاه علوم و تحقیقات تهران، ۱۲۰ ص.  
-علی جانپور شلمانی، ع.، واعظی، ع.ر. و طباطبایی، م.ر.، ۱۳۹۸. مقایسه پایداری خاکدانه در دو اقلیم خیلی مرطوب و نیمه خشک (مطالعه موردی: حوزه‌های آبخیز کسلیان و سعیدآباد چای)، شانزدهمین کنگره علوم خاک ایران، زنجان.  
-فضل اولی، ر.، ۱۳۸۵. مدل شبیه‌سازی بارش-رواناب با استفاده از شاخص بارش پیشین مطالعه موردی: حوزه آبخیزهای کسلیان و امامه، رساله دکتری، رشته هیدرولوژی و منابع آب، دانشکده علوم و مهندسی آب، دانشگاه شهید چمران، ۲۵۲ ص.  
-کازمی، م.، نوحه‌گر، ا. و لگزبان، ف.، ۱۳۹۱. ارزیابی تاثیر تغییر کاربری اراضی بر خطر فرسایش آبی با تاکید بر فنون سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی، مطالعه موردی حوزه تنگ

-انتظاری، م. و خدادادی، ف.، ۱۳۹۶. ارزیابی خطر فرسایش آبی حوزه آبخیز طالقان رود با استفاده از مدل ICONA. مجله مخاطرات محیط طبیعی، شماره (۱۳) ۶، ص ۳۱-۴۸.  
-چتر سیماب، ز.، بلوری، س.، میردار هریجانی، ف. و رحمانی، م.، ۱۳۹۷. ارزیابی نقشه خطر فرسایش با استفاده از مدل ICONA، GIS/RS (مطالعه موردی: حوزه آبخیز سلج انبار)، کنفرانس بین المللی مدیریت منابع طبیعی در کشورهای در حال توسعه.  
-چتر سیماب، ز.، قره‌گزلو، ع.، بلوری، س. و میردار هریجانی، ف.، ۱۳۹۶. ارزیابی نقشه خطر فرسایش با استفاده از مدل ICONA، GIS/RS (مطالعه موردی: حوزه آبخیز آقاگیر)، اولین همایش بین-المللی جاده ابریشم، دانشگاه اصفهان.  
-حسینی پژوه، ن.، احمدالی، خ. و شکوهی، ع.، ۱۳۹۷. ارزیابی شاخص‌های بارش استاندارد شده و بارش-تبخیر-تغرق استاندارد شده در تشخیص ترسالی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، جلد ۲۵، شماره ۱۵-۲۹.  
-روزخس، ب.، ۱۳۷۵. کاربرد GIS در سیستم‌های

خسروشیرین، حوضه آبخیز سد ملاصدرا در چارچوب مدل ICONA و به کارگیری فن آوری GIS و RS. مجموعه مقالات نهمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، یزد، دانشگاه یزد. -میرزائی، ن.، کاویان، ع. و چوبین، ب.، ۱۳۹۷. ارزیابی خطر فرسایش آبی با استفاده از مدل ICONA (مطالعه موردی: حوزه آبخیز گرگانرود)، ششمین کنگره بین‌المللی توسعه و ترویج علوم و فنون بنیادین در جامعه، تهران. -نادری، ف.، کریمی، ح. و ناصری، ب.، ۱۳۸۸. پهنه‌بندی پتانسیل فرسایش خاک در حوزه آبخیز آسمان آباد ایلام به روش شاخص فرسایش، پژوهش‌های آبخیزداری (پژوهش و سازندگی)، شماره ۸۹، ص ۴۴-۵۱.

بستانک شیراز، مجموعه مقالات هشتمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری، لرستان، دانشگاه لرستان.

-کریمی، ل. و امین، س.، ۱۳۹۱. پهنه‌بندی خطر فرسایش حوزه سد سیوند در مدل ICONA به وسیله تکنیک RS، شانزدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، شیراز، انجمن زمین‌شناسی ایران، دانشگاه شیراز.

-محمدی، ش.، کریم زاده، ح. و علیزاده، م.، ۱۳۹۷. برآورد مکانی فرسایش خاک کشور ایران با استفاده از مدل RUSLE، نشریه اکوهیدرولوژی، دوره ۵، شماره ۲۸-۳۹.

-مقیم، ح.، رئوفت، م.ر. و خلیلی، ع.، ۱۳۹۲. پهنه‌بندی خطرپذیری فرسایش آبی منطقه‌ی

-Bayramin, I., Dengiz, O., Baskan, O. and Parlak, M., 2003. Soil Erosion risk assessment with ICONA model: Case study: Bey pazari area. Turk. J. Agric, For 27, p. 105-116. <https://dergipark.org.tr/en/pub/tbtkagriculture/issue/11640/138624>.  
-Chander, G., Markham, B. and Helder, D., 2009. Summary of Current Radiometric Calibration Coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+ and EO-A Ali Sensors. Remote Sensing of the Environment, v. 113, p. 893-903. <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=200900278842020-04-16T17:01:26+00:00Z>.  
-Esmaeeli Gholzom, H. and Gholami, V., 2012. A comparison between natural forests and reforested lands in terms of runoff generation potential and hydrologic response, case study: Kasilian Watershed, Soil Water Res, v. 4, p. 166-173. <https://doi.org/10.17221/18/2012-SWR>.  
-Gaatib, R. and Larabi, A., 2014. Integrated evaluation of soil hazard and risk management in the Oued Beht

watershed using remote sensing and GIS techniques: impacts on El Kansra Dam Siltation (Morocco). J. Geogr. Inf. Syst, v. 6, p. 677-742. ID:52287,12 pages 10.4236/jgis.2014.66056

-Holm, A.M., Cridland, S.W. and Roderick, M.L., 2003. The use time – integrated NOAA NDVI data and rainfall to assess landscape degradation in the arid shrubland of Western Australia. Remote Sens. Environ, v. 85, p. 145-158. DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00199-2. v. 25(6), p. 207-222. DOI. 10.22069/JWSC.2019.15175.3036  
-ICONA, 1991. Plan Nacional De Restauracion Hydrologico- Forestal Para Control De La Erosion. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentacion, Madrid.

-ICONA, 1997. Guidelines for Mapping and Measurement of Rainfall-induced Erosion Processes in the Mediterranean Coastal Areas. Priority action programme regional activity centre, Split, Croatia.

- Kefi, M., Yoshino, K., Zayani, K. and Isoda, H., 2009. Estimation of Soil Loss by using Combination of Erosion Model and GIS: Case of Study Watersheds in Tunisia. *Journal of Arid Land Studies*, v. 19(1), p. 287-290.
- Luo, Z., Deng, L. and Yan, C., 2014. Soil erosion under different plant cover types and its influencing factors in Napahai Catchment, Shangri – La County, Yunnan province, China. *Int. J. Sustain. Dev. World Ecol*, <https://doi.org/10.1080/13504509.2014.924448>
- Oruk, E.O., Eric, N.J. and Ogogo, A.U., 2012. Influence of soil textural properties and land use cover type on soil erosion of a characteristic ultisols in Betem, Cross River State, Nigeria. *J. Sustain. Dev.* 5  
DOI:10.5539/jsd.v5n7p104.
- Okou, F.A.Y., Tente, B., Bachmann, Y. and Sinsin, B., 2016. Regional erosion risk mapping for decision support: A case study from West Africa. *Elsevier Land Use Policy*, v. 56, p. 27-37.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.04.036>.
- Okou, F.A.Y., Assogbadji, A.E., Bachmann, Y. and Sinsin, B., 2014. Ecological factors influencing physical soil degradation in the Atacora Mountain chain in Benin: West Africa. *Mt. Res. Dev.* 34, p. 157-166,  
DOI: 10.1659/MRD-JOURNAL-D-13-00030.1.
- Olivares, B., Verbist, K., Vargas, D., Lobo, R. and Silva, O., 2011. Evaluation of the USLE Model to Estimate Water Erosion in an Alfisol. *J Soil Sci. Plant Nutr*, v. 11(2), p. 71-84.  
<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162011000200007>
- Reis, M., Bolat, N. and Savaci., G., 2017. Soil Erosion Risk Assessment Using GIS and ICONA, A Case Study: in Kahramanmaras. *Turkey Journal of agricultural faculty of gaziosmanpasa university*, v. 34(1), p. 64-75.  
doi:10.13002/jafag4208, 2017.
- Reed, B.C., Brown, J.F., Vander Zee, D., Loveland, T.R., Merchant, J.W. and Ohlen, D.O., 1994. Measuring phenological variability from satellite imagery. *J. Veg. Sci*, v. 5, p. 703-714.  
<https://doi.org/10.2307/3235884>.
- Stanchi, S., Freppaz, M., Godone, D. and Zanini, E., 2013. Assessing the susceptibility of alpine soils to erosion using soil physical and site indicators. *Soil Use Manag*, v. 29, p. 586-596.  
<https://doi.org/10.1111/sum.12063>
- Stroosnijder, L., 2003. Technologies for improving green water use efficiency in West Africa. In: *Water Conservation Technologies for Sustainable Dryland Agriculture in Sub-Saharan Africa Symposium and Workshop*, Bloemfontein, South Africa, p. 92-102.
- Tehrany, M.S., Pradhan, B. and Jebur, M.N., 2013. Remote sensing reveals eco-environmental changes in urban areas of Klang Valley, Malaysia: contribution from object based analysis. *J. Indian Soc. Remote Sens*, v. 41, p. 981-991.  
doi:10.1007/s12524-013-0289-9.
- Tehrany, M.S., Pradhan, B. and Jebur, M.N., 2014. A comparative assessment between object and pixel – based classification approaches for land use/land cover mapping using SPOT 5 imagery. *Geocarto Int*, v. 29, p. 351-369.  
<https://doi.org/10.1080/10106049.2013.768300>.
- Thiam, A.K., 2003. The causes and spatial pattern of land degradation risk in southern Mauritania using multitemporal AVHRR-NDVI imagery and field data. *Land Degradation & Development*, v. 14, p. 133-142.  
<https://doi.org/10.1002/ldr.533>
- Tucker, C.J., Townshend, J.R.G. and Goff, T.E., 1985. African land-cover classification using satellite data.

Science, v. 227, p. 369-375.  
DOI:10.1126/science.227.4685.369  
-Verieling, A., Sterk, G. and Vigiak, O.,  
2006. Spatial evaluation of soil erosion  
risk in the West Osambara Mountains,  
Tanzania. Land Degrad. Dev, v. 17, p.  
301-319.  
<https://doi.org/10.1002/ldr.711>  
-Wolka, K., Tadesse, H., Garedeu, E.  
and Yimer, F., 2015. Soil erosion risk

assessment in the Chaleleka wetland  
watershed, Central Rift Valley of  
Ethiopia. Environ. Syst. Res, v. 4, p.1-  
12. <https://doi.org/10.1186/s40068-015-0030-5>.  
-Zaz, S. and Romshoo, S., 2012.  
Assessing the geoinicators of land  
degradation in the Kashmir Himalayan  
region India. Nat.Hazards, v.64, p.1219-  
1245. DOI 10.1007/s11069-012-0293-3.