

ارزیابی و پهنه‌بندی فرسایش خاک در مناطق کارستی با استفاده از مدل SMLRK (مطالعه موردی: حوضه کارستی الوند، غرب استان کرمانشاه)

سمیه کریمی^۱

معصومه رجبی^۲

محمد حسین رضائی مقدم^۳

چکیده

فرسایش خاک پدیده مخربی است که نتایج زیانباری همچون بیابان‌زائی، کاهش حاصلخیزی خاک، افزایش سیلاب‌ها و بار رسوب آنها و تاثیرگذاری بر سازه‌های هیدرولیکی را به دنبال خواهد داشت. رخداد فرسایش خاک در نواحی کارستی باعث از دست رفتن خاک و ایجاد بیابان‌های سنگی شده و با تحت تاثیر قرار دادن سیکل هیدرولوژی کارست، کیفیت و کمیت منابع آب کارست را کاهش می‌دهد. در این پژوهش با استفاده از مدل SMLRK و با در نظر گرفتن شرایط ژئومورفولوژی کارست، اقدام به ارزیابی و پهنه‌بندی فرسایش خاک در سطح حوضه رودخانه الوند، در غرب استان کرمانشاه که از تپیک‌ترین مناطق کارستی ایران می‌باشد گردید. از مدل مذکور برای تهیه نقشه فرسایش خاک در دو حالت دخیل کردن پارامتر نفوذ (کارست) و عدم دخالت آن استفاده شده است. نتایج پژوهش نشان داد که در نقشه نهایی پهنه‌بندی فرسایش خاک با عدم دخالت پارامتر نفوذ و همچنین نقشه نهایی حاصل از دخالت پارامتر نفوذ در مدل SMLRK، به ترتیب حدود ۵۵٪ و ۶۱٪ مساحت حوضه الوند در طبقات فرسایشی متوسط، زیاد و خیلی زیاد قرار می‌گیرند. نتایج این مدل با دخالت پارامتر نفوذ و شرایط کارستی حوضه، از تطبیق بیشتری با وضعیت طبیعی حوضه برخوردار بوده و این مناطق دارای میزان فرسایش خاک بیشتری می‌باشند. شیب و بارش زیاد و خاک کم ضخامت مهمترین دلایل فرسایش زیاد خاک در نواحی کارستی حوضه بوده است.

واژگان کلیدی: پهنه بندی، فرسایش خاک، کارست، نفوذ، مدل SMLRK، حوضه الوند

مقدمه

فرسایش خاک فرایند جدا شدن ذرات خاک و حمل آنها توسط باد یا آب بوده و یکی از مهمترین شکل‌های تخریب خاک در سراسر جهان است که با ایجاد اثرات منفی زیست محیطی، توسعه پایدار منابع زمین را محدود می‌کند (مارکوس^۴ و همکاران، ۲۰۱۸، ۴۱۸). در واقع فرسایش خاک یک فرآیند تجمعی است که به عواملی مانند کاربری اراضی، پوشش گیاهی، اقلیم، توپوگرافی و خصوصیات فیزیکی خاک مانند بافت، مواد آلی، ساختار و تخلخل بستگی دارد (ژو^۵ و همکاران، ۲۰۱۷، ۱). این فرایند به دو نوع طبیعی و تسریعی تقسیم شده و فرسایش تسریع یافته خاک به دلیل تاثیرات آن روی اقتصاد و محیط زیست، به عنوان یک مشکل جهانی مطرح است (لیم^۶ و همکاران، ۲۰۰۵، ۶۵). هر ساله بیش از ۷۵ میلیارد تن خاک از سطح کره زمین فرسایش می‌یابد که برابر ۱۳۴ تن در هر کیلومترمربع است (سبحانی، ۱۳۸۱، ۱۸). در کشور ایران نیز سالانه نزدیک به ۲ میلیارد تن از خاک‌های با ارزش هدر رفته و میزان خسارات سالانه کشور از

^۱ دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی دانشگاه تبریز (نویسنده مسئول)

Email: kgeo1363@gmail.com -Tel: 09183352273

^۲ استاد گروه ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز

^۳ استاد گروه ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز

1 Marques et al.

2 Zhou et al.

3 Lim et al.

فرسایش خاک، ۵۶ میلیارد دلار است (غلامی، ۱۳۸۲، ۳۰). مناطق کارستی به علت شرایط خاص هیدرولوژیکی و ژئومورفولوژیکی از نظر فرسایش خاک دارای شرایط خاص خود می‌باشند. کارست توپوگرافی مشخصی است که نتیجه عملکرد انحلال در سنگ بستر قابل حل بوده و به شکل‌گیری یک چشم‌انداز مشخص شیاردار و حفره‌دار در سطوح سنگی، شفت‌های عمودی، سینک‌هول‌ها، جریان‌های مستغرق، چشمه، سیستم‌های زهکشی زیرسطحی و غارها منجر می‌شود. حوضه‌های کارستی به علت شرایط هیدرولوژی کارست و وجود زمین‌های سنگی یکپارچه و خاک کم عمق دارای آسیب‌پذیری بالایی از نظر فرسایش خاک هستند. فرسایش خاک در مناطق حساس کارستی منجر به پدیده بیابان‌زائی سنگی می‌شود که طی آن خاک، به طور کامل فرسایش یافته (کیوهاو و یانلونگ^۱؛ ۱۱۷۳، ۲۰۰۶) و منطقه را که قبلاً تحت پوشش گیاهان و خاک بوده، به یک چشم‌انداز سنگی تبدیل می‌کند (یوان^۲؛ ۱۹۹۷، ۸۴). همچنین این امر باعث گرفتگی شبکه‌ی کارست با رسوبات خاک شده و در سیستم هیدرولوژی کارست اختلال ایجاد کرده و آنها را متروک و در نهایت کل اکوسیستم مناطق کارستی را متضرر می‌کند. مطالعات فرسایش خاک در نواحی کارستی عمدتاً بر ویژگی‌ها (فو^۳ و همکاران؛ ۲۰۰۷، ۴۰)، علت (درو^۴؛ ۱۹۸۳، ۱۱۵)، فرآیند (جین^۵ و همکاران؛ ۲۰۱۳، ۸۳۵) و ارزیابی ریسک فرسایش (یانگ^۶؛ ۲۰۱۴، ۲۸۹) متمرکز شده است. روش‌های جدید ردیاب Cs^{۱۳۷} (فو و همکاران؛ ۲۰۰۷)، مدل‌سازی فازی (یانگ و همکاران؛ ۲۰۱۴)، مدل‌های بر پایه تغییرات کاربری اراضی (هانگ و همکاران؛ ۲۰۱۶) و دخیل کردن پارامترهای درونی و بیرونی موثر در فرسایش خاک (خیر^۷ و همکاران؛ ۲۰۰۸) در طی چند دهه گذشته نیز در این مورد به کار رفته‌اند. در این رابطه تحقیقات محدودی در سطح جهان انجام شده است که نتایج آنها حاکی از تاثیر حذف پوشش جنگلی، بهره برداری‌های شدید، شدت بارش، شیب توپوگرافی، میزان نفوذ و اقدامات حفاظتی بر فرسایش خاک مناطق کارستی بوده است. مدل‌های تجربی مرسوم (EPM, PSIAC, FAO) ویژگی‌های ژئومورفولوژی کارست را در برآورد فرسایش خاک مد نظر قرار نداده‌اند و این امر می‌تواند منجر به ایجاد خطا در برآورد و پهنه‌بندی فرسایش خاک گردد. لذا با توجه به اهمیت اشکال کارستی و نقش آنها در عامل نفوذ که می‌تواند اثرات قابل توجهی بر مقدار فرسایش خاک بگذارد لازم است از مدل‌هایی استفاده گردد که به نقش عامل کارست توجه ویژه داشته باشند. از جمله تحقیقات انجام شده در این زمینه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: ژو و همکاران (۲۰۱۷) توزیع فضایی فرسایش خاک در کوهستان‌های کارستی جین فو^۸ در چین را مورد ارزیابی قرار دادند و نتایج نشان داد که در محیط‌های کارستی فرسایش از پیچیدگی زیادی برخوردار است. با این وجود اندازه‌گیری‌های مربوط به مسائل حفاظتی خاک و آشفستگی‌های مربوط به کشت و کار، نقش‌های اصلی را در از دست رفتن خاک سطحی در این منطقه بازی می‌کنند و کاهش پوشش زمین همراه با آشفستگی در کشت و کار منجر به فرسایش بیشتر خاک می‌شود. یو-کیونگ و همکاران^۹ (۲۰۰۹) به بررسی فرسایش خاک در حوضه کارستی رودخانه ماوتیاو^{۱۱} چین پرداختند. پوشش زمین و کاربری اراضی را مورد بررسی قرار دادند و نتایج آنها را به‌همراه ارزیابی فعالیت‌های مدیریتی برای تعیین اثراتشان بر میانگین هدرفت سالانه خاک ارزیابی کردند. در کل نتایج پژوهش آنها، نشان دهنده نقش مهم فعالیت‌های انسانی در فرسایش خاک بود. هوانگ و همکاران^{۱۲} (۲۰۱۶) با استفاده از مدل شاخص ریسک فرسایش به پهنه‌بندی خطر فرسایش خاک در مناطق کارستی چاه‌تون^{۱۳} چین پرداخت. در این مدل از فاکتورهای شیب، بارندگی، پوشش گیاهی، کاربری اراضی و تیپ خاک استفاده شده است. نتایج حاصل از پهنه‌بندی نشان داد که ۴۲٪ محدوده مورد مطالعه دارای فرسایش شدید بوده است. درو^۴ (۱۹۸۳) به بررسی

1 Qiu_Hao & Yun_Long.

2 Yuan, 1997.

3 Fou et al.

4 - Drew.

5 Jian et al.

6 - Yang et al.

7 - Huang et al.

8- Khair et al.

9 - Jinfo.

10 - Yue-qing et al.

11 - Maotiao.

12 - Huang et al.

13 -Chah town.



تشدید فرسایش خاک در منطقه کارستی بوررن^۱ در ایرلند پرداخت. او با تحقیق بر روی خاک‌های مدفون شده و اشکال کارنی که روی ساختمان‌های قدیمی و باستانی قرار داشتند به این نتیجه رسید که با حذف پوشش جنگلی، پوشش وسیعی از خاک‌های نازک منطقه به شدت دچار فرسایش شده‌اند. یو-کیونگ و همکاران (۲۰۰۹) اقدام به مدلسازی خطر فرسایش در کوهستان‌های کارستی گویچو در چین کردند و نتایج بیانگر ارتباط بیشتر فرسایش با پارامترهای شیب و کاربری اراضی است. خیر و همکاران (۲۰۰۸) فرسایش خاک در کوهستان‌های کارستی لبنان را با کمک مدلی که خصوصیات و ویژگی‌های کارستی را مد نظر قرار می‌دهد، مورد ارزیابی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که اضافه کردن پارامتر کارست باعث نتایج مطمئن‌تر در ارزیابی فرسایش خاک در نواحی کارستی می‌گردد. کارستیفیکیشن و عامل نفوذ دوفاکتور مهم در این مدل می‌باشند. فیلس و همکاران^۲ (۲۰۰۹) در پژوهشی به ارزیابی شاخصی برای بررسی فرسایش خاک در مناطق کارستی در هاوانای^۳ کوبا پرداخته و نتایج نشان دهنده‌ی تأثیرات بهره‌برداری شدید دهه ۱۹۸۰ بر فرسایش شدید خاک این منطقه است. حوضه الوند یک حوضه شاخص کارستی است و مشکل فرسایش خاک در این حوضه از دیرباز وجود داشته و تأثیرات مخربی بر محیط اعمال کرده است. بیم آن می‌رود با ادامه روند کنونی و تشدید آن به علت فعالیت‌های انسانی و از بین رفتن جنگل‌های بلوط، این حوضه علاوه بر بیابانزائی سنگی با اختلال در منابع آب کارست روبرو شده و سازه‌های هیدرولیکی حوضه با مشکلات ناشی از رسوب مواجه شوند. همچنین تاکنون مطالعه‌ای در سطح این حوضه برای ارزیابی فرسایش خاک صورت نگرفته است، لذا انجام این پژوهش ضروری به نظر می‌رسد. بنابراین هدف پژوهش حاضر ارزیابی و پهنه‌بندی فرسایش خاک حوضه الوند با در نظر گرفتن شرایط ژئومورفولوژی کارست حوضه است.

موقعیت حوضه مورد مطالعه

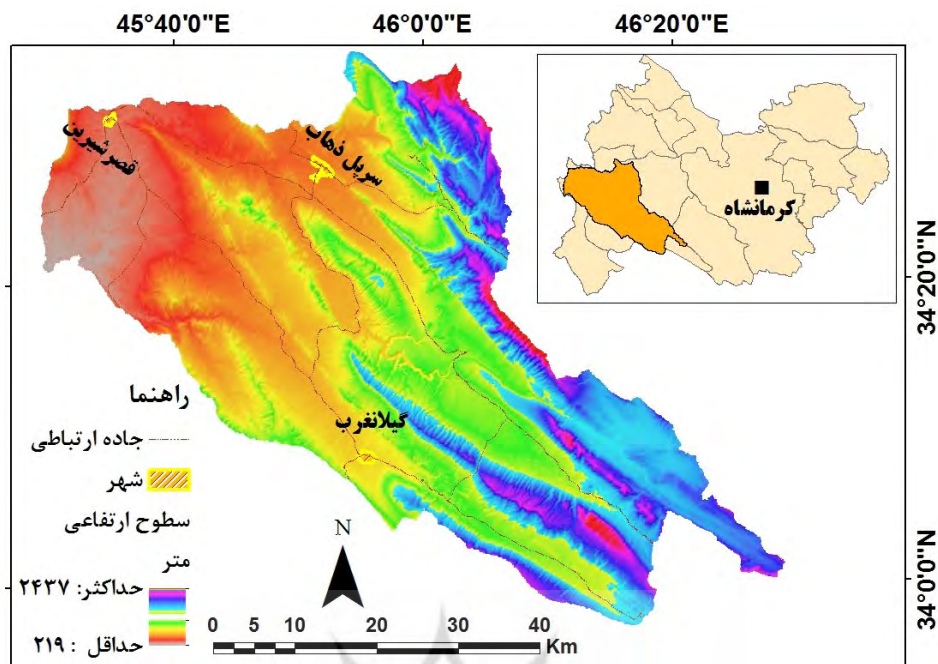
حوضه رودخانه الوند در جنوب غرب استان کرمانشاه بین عرض‌های جغرافیایی ۳۳°۵۷' تا ۳۴°۳۳' و طول‌های جغرافیایی ۴۵°۳۲' تا ۴۶°۲۸' واقع شده است. مساحت این حوضه ۲۸۱۰ کیلومتر مربع و حداکثر ارتفاع آن ۲۴۳۷ متر در ارتفاعات دالاهو و حداقل ارتفاع آن ۲۱۹ متر در خروجی حوضه در مرز ایران و عراق می‌باشد (شکل ۱). رودخانه الوند زهکش اصلی حوضه بوده که به رودخانه دیاله در اقلیم کردستان عراق می‌ریزد.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

1 - Burren.

2 - Febles et al.

3 - Havana



شکل (۱). نقشه موقعیت حوضه الوند در غرب استان کرمانشاه

مواد و روش‌ها

در پژوهش حاضر از روش‌های کتابخانه‌ای، توصیفی-تحلیلی، میدانی و مدل SMLRK استفاده شده است. پهنه‌بندی فرسایش خاک بر اساس مدل SMLRK در دو حالت، با دخالت پارامتر نفوذ و بدون آن اجرا شده است. برای صحت‌سنجی نقشه‌های نهایی فرسایش خاک، با دخالت پارامتر نفوذ و بدون دخالت پارامتر نفوذ، ماتریس خطا ایجاد شده است و درصد مشابهت نقشه‌های نهایی فرسایش محاسبه گردیده است. برای تهیه ماتریس خطا در ردیف جدول، پهنه‌های فرسایشی نقشه با دخالت پارامتر نفوذ و در ستون نیز پهنه‌های فرسایشی نقشه بدون دخالت پارامتر نفوذ قرار می‌گیرند. سپس در محیط نرم افزار GIS تعداد پیکسل‌های مشترک هر پهنه در هر دو نقشه محاسبه می‌شوند. نهایتاً حاصل جمع قطر نقشه بر مجموع کل جدول تقسیم شده و درجه مشابهت نقشه محاسبه می‌شود. درجه مشابهت بیانگر تغییرات نقشه‌ها نسبت به یکدیگر است. داده‌های پژوهش شامل تصاویر ماهواره‌ی لندست (جدول ۱)، DEM ده متر، نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ قصر شیرین، نقشه‌های خاک‌شناسی و پوشش گیاهی ۱:۲۵۰۰۰۰ استان کرمانشاه و داده‌های بارش ایستگاه‌های هواشناسی حوضه مورد مطالعه (۱۳۷۶-۱۳۹۶) می‌باشد. نرم‌افزارهای ArcGIS10.3 و ENVI5.3 ابزار اصلی پژوهش می‌باشند.

جدول (۱). اندکس زمانی تصاویر مورد استفاده برای تهیه لایه‌های خطواره و کاربری اراضی

Row	Path	تاریخ برداشت	سنجنده	ماهواره
36	168	1-5-2018	OLI	لندست ۸

مدل SMLRK شامل پارامترهای تاثیرگذار درونی و بیرونی بوده و هر یک از پارامترها و زیرپارامترهای آن به ۵ کلاس تقسیم می‌شوند.

پارامترهای درونی شامل پارامترهای نفوذ و زیرپارامترهای آن، فرسایش پذیری خاک و مورفولوژی می‌باشد.

پارامتر نفوذ: نفوذ آب در زمین، باعث کاهش رواناب و کاهش فرسایش خاک می‌گردد. در مناطق کارستی، رخنمون‌های کارستی - سنگی سطح زمین در صورت مهیا بودن شرایط، دارای نفوذپذیری بالایی بوده و رواناب سطح زمین را تحت تاثیر قرار می‌دهند (خیر و



همکاران؛ ۲۰۰۸). پارامتر نفوذ از چهار زیر پارامتر سنگ شناسی، تراکم خطواره، کارستیفیکیشن^۱ و تراکم زهکشی تشکیل شده است. زیرپارامتر سنگ‌شناسی در نفوذ رواناب نقش داشته و بر اساس میزان نفوذپذیری سازندها (جدول ۲) به آن امتیاز اختصاص داده می‌شود.

جدول (۲). واحدهای سنگ شناسی عمده در منطقه مورد مطالعه و ظرفیت نفوذ آنها (منبع: خیر و همکاران؛ ۲۰۰۸)

ظرفیت نفوذ	نوع سازند	عوامل موثر در نفوذ
خیلی زیاد	سازندهای آهکی و دولومیتی (سازند آسماری و آسماری - شهپازان)	تخلخل ثانویه بالا (ترک ها و شکاف‌ها)
زیاد	سازندهای آهکی - ماری و آهکی - دولومیتی (سازند ایلام)	تخلخل ثانویه کمتر، درزه و شکاف نسبتا زیاد، وجود مارن
متوسط	سازند آهک ماری، ماسه سنگ، گنگومرا (گنگومرا بختیاری)	وجود خاک رس و درزه و شکاف متوسط
نسبتا کم	سازندهای آهکی با بین لایه های ضخیم ماری (تله زنگ)	وجود ذرات رس قابل توجه و درزه و شکاف کم
کم	سازندهای ماری، شیلی و آبرفت (نهشته کواترنری، گچساران، آغاچاری، پابده و گورپی)	وجود مارن، رس، سیلت و ...

واژه خطواره معمولا در مطالعات زمین‌شناسی - سنجش‌ازدوری در ارتباط با درزه یا تحلیل تکتونیک به کار می‌رود (شبان^۲ و همکاران؛ ۲۰۰۴، ۱). خطواره‌ها معمولا میزان نفوذ رواناب را به خصوص در نواحی کارستی بالا برده و در نتیجه میزان فرسایش خاک کاهش می‌یابد. در این پژوهش پس از تصحیح هندسی، رادیومتری و اتمسفری تصویر سنجنده OLI ماهواره لندست، با اعمال فیلترهای جهتی مناسب و فیلتر جهتی سوبل^۳ در چهار جهت اصلی و فیلتر آشکارساز لبه، لایه خطواره‌های حوضه مورد مطالعه استخراج گردید. پارامتر شبکه زهکشی یک نشانه مهم از میزان نفوذ آب بوده و در بعضی از مناطق که تراکم آبراهه بالا است، میزان نفوذ کمتر می‌گردد (کریشنامورتی^۴ و همکاران؛ ۲۵۴، ۱۹۹۶). در میان ویژگی‌های مورفومتری سیستم زهکشی، تراکم آبراهه ارتباطی قوی با مقدار نفوذ دارد (عبدالله^۵ و همکاران؛ ۲۰۰۲). در این پژوهش شبکه زهکشی حوضه الوند از DEM ده متر منطقه استخراج شده و سپس لایه-ی تراکم آبراهه ایجاد شده و به طبقات پنج گانه‌ی آن امتیاز اختصاص داده شده است (جدول ۳).

جدول (۳). تراکم خطواره و تراکم آبراهه و ظرفیت نفوذ آنها (منبع: خیر و همکاران؛ ۲۰۰۸)

ظرفیت نفوذ	خیلی زیاد	زیاد	متوسط	نسبتا کم	کم
تراکم خطواره	۴۰ <	۳۵-۴۰	۳۰-۳۵	۲۵-۳۰	< ۲۵
تراکم آبراهه	۷۵ <	۶۰-۷۵	۴۰-۶۰	۳۰-۴۰	< ۳۰

ژئومورفولوژی کارست تأثیر زیادی بر میزان نفوذ آب داشته و به طور قابل توجهی باعث کاهش فرسایش خاک می‌گردد. لایه توسعه یافتگی ژئومورفولوژی کارست بر اساس نوع لندفرم‌ها و میزان توسعه‌یافتگی به ۵ طبقه تقسیم می‌گردد (جدول ۴). نقشه توسعه یافتگی ژئومورفولوژی کارست حوضه مورد مطالعه بر اساس روش منطق فازی و باز دیده‌های میدانی تهیه گردید.

¹ - karstification.

² - Shaban et al.

³ - Soble.

⁴ - Krishnamurthy et al.

⁵ - Abdollah et al.

⁶ - برگرفته از رساله "بررسی فرسایش خاک و ارزیابی عوامل موثر بر آن در حوضه های کارستی: مطالعه موردی حوضه کارستی الوند (جنوب غرب استان کرمانشاه)"

جدول (۴). مناطق کارستی و ظرفیت نفوذ آنها (منبع: خیر و همکاران: ۲۰۰۸)

ظرفیت نفوذ	لندفرم کارست	معیارهای عمده مربوط به نفوذ
خیلی زیاد	لاپیه‌های متراکم	کارست بسیار توسعه یافته (سیستم های شکافی متمرکز لاپیه های موازی)
زیاد	سینک هول های مجزا	کارست توسعه یافته (ترک های محلی و شکاف های بین سینک هول)
نسبتا زیاد	کارست توسعه یافته	کارست با توسعه متوسط (انواع سیستم های شکستگی)
متوسط	کارست ظاهری	کارست با توسعه کم (شکاف های محلی و کم و بیش پوشیده شده با خاک)
فاقد کارست	فاقد کارست	فاقد کارست (بدون ویژگی های ظاهری)

برای محاسبه وزن زیر پارامترهای چهارگانه، مجموع امتیاز هر پارامتر بر میزان کل وزن پارامترهای چهارگانه تقسیم شده و میزان تاثیر هر پارامتر در لایه نهایی پارامتر نفوذ بر اساس درصد مشخص گردید (جدول ۵). وزن کل هر چهار لایه ۳۰۰ بوده و وزن پارامترهای سنگ شناسی (L)، خطواره (LD)، تراکم زهکشی (Dd) و کارست (K) به ترتیب ۱۲۰، ۱۰۵، ۴۵ و ۳۰ بوده است که هریک بر ۳۰۰ تقسیم و در عدد ۱۰۰ ضرب گردیده و وزن هر یک از آنها در پارامتر نهایی نفوذ (RI) به ترتیب ۴۰٪، ۳۵٪، ۱۵٪ و ۱۰٪ می‌باشد. پارامتر نفوذ بر اساس معادله (۱) و در محیط تحلیل گر raster calculator محاسبه گردید.

$$RI = (L * 40\%) + (LD * 35\%) + (Dd * 15\%) + (K * 10\%) \quad \text{معادله ۱}$$

جدول (۵). ارزیابی وزن زیر پارامترهای تاثیر گذار بر پارامتر نفوذ پذیری (منبع: خیر و همکاران: ۲۰۰۸)

پارامتر	دامنه اثر	سطح توصیفی	امتیاز	وزن	رتبه بندی وزنی	جمع کل
سنگ شناسی	<۵٪	کم	۱	۸	۸	۱۲۰
	۵-۱۰٪	نسبتا متوسط	۲	-	۱۶	
	۱۰-۲۰٪	متوسط	۳	-	۲۴	
	۲۸-۳۵٪	زیاد	۴	-	۳۲	
	۴۰-۵۰٪	خیلی زیاد	۵	-	۴۰	
تراکم خطواره	<۲۵ خطواره/کیلومتر مربع	کم	۱	۷	۷	۱۰۵
	۲۵-۳۰ خطواره/کیلومتر مربع	نسبتا متوسط	۲	-	۱۴	
	۳۰-۳۵ خطواره/کیلومتر مربع	متوسط	۳	-	۲۱	
	۳۵-۴۰ خطواره/کیلومتر مربع	زیاد	۴	-	۲۸	
	>۴۰ خطواره/کیلومتر مربع	خیلی زیاد	۵	-	۳۵	
کارستیفیکیشن	فاقد کارست	فاقد کارست	۱	۳	۳	۴۵
	کارست پوشیده	متوسط	۲	-	۶	
	کارست توسعه یافته	نسبتا زیاد	۳	-	۹	
	نواحی سینک هولی	زیاد	۴	-	۱۲	
	محدوده های لاپیه ای	خیلی زیاد	۵	-	۱۵	
تراکم زهکشی	<۳۰ قطعه/کیلومتر مربع	کم	۱	۲	۲	۳۰
	۳۰-۴۰ قطعه/کیلومتر مربع	نسبتا متوسط	۲	-	۴	
	۴۰-۶۰ قطعه/کیلومتر مربع	متوسط	۳	-	۶	
	۶۰-۷۵ قطعه/کیلومتر مربع	زیاد	۴	-	۸	
	>۷۵ قطعه/کیلومتر مربع	خیلی زیاد	۵	-	۱۰	

فرسایش پذیری خاک: این پارامتر ویژگی‌های خاک شناسی را در فرسایش خاک دخیل کرده و دارای سه زیر پارامتر بافت، عمق و مواد آلی می‌باشد. در این پژوهش لایه‌ی فرسایش پذیری خاک بر اساس گزارش‌های تفصیلی حوضه‌های سد گیلانغرب (وزارت نیرو؛ ۱۳۷۶) و



سدزاگرس (شرکت زمار؛ ۱۳۸۴) و نقشه خاک جهاد کشاورزی استان کرمانشاه تهیه گردید. پارامتر فرسایش (SE) خاک بر اساس معادله (۲) و تلفیق زیرپارامترهای بافت خاک (ST)، عمق خاک (SD) و موادالی خاک (OM) به دست می‌آید (خیر و همکاران؛ ۲۰۰۸، ۲۴۷).

$$SE = (ST * 40\%) + (OM * 40\%) + (SD * 20\%) \quad \text{معادله ۲}$$

مورفولوژی: این پارامتر به بررسی نقش ویژگی‌های سطح زمین در فرسایش خاک پرداخته و شامل سه زیرپارامتر شیب، جهت شیب و انحنا دامنه بوده که با تاثیرگذاری بر میزان نفوذ رواناب، میزان فرسایش خاک را کنترل می‌کنند. این لایه‌ها در نرم‌افزار ArcGIS و از DEM ده متر منطقه استخراج شده و بر اساس جدول (۶) امتیازدهی شده‌اند. پارامتر مورفولوژی (MEI) خاک بر اساس معادله (۳) و تلفیق زیرپارامترهای شیب (SG)، جهت شیب خاک (SA) و انحنا دامنه (SC) به دست می‌آید (خیر و همکاران؛ ۲۰۰۸، ۲۴۷).

$$MEI = (SG * 33\%) + (SA * 33\%) + (SC * 33\%) \quad \text{معادله ۳}$$

جدول (۶). ارزیابی وزن زیر پارامترهای تاثیر گذار بر پارامتر مورفولوژی (منبع: خیر و همکاران؛ ۲۰۰۸)

پارامتر	دامنه اثر	سطح توصیفی	میزان
شیب	< ۵٪	کم	۱
	۵-۱۰	نسبتاً متوسط	۲
	۱۰-۲۰	متوسط	۳
	۲۰-۲۵	زیاد	۴
	> ۲۵	خیلی زیاد	۵
جهت شیب	شرقی - شمال شرقی - مسطح	کم	۱
	شمال، جنوب شرقی	نسبتاً متوسط	۲
	جنوبی، شمال غربی	متوسط	۳
	جنوب غربی	زیاد	۴
	غرب	خیلی زیاد	۵
انحنای شیب	مسطح	کم	۱
	تحدب	نسبتاً متوسط	۲
	مقعر کم	متوسط	۳
	مقعر متوسط	زیاد	۴
	مقعر زیاد	خیلی زیاد	۵

پارامترهای بیرونی شامل پارامترهای کاربری اراضی و فرسایش باران است.

کاربری اراضی: نقشه کاربری اراضی حوضه الوند در سال ۲۰۱۸ با استفاده از تصویر سنجنده OLI بر اساس روش طبقه‌بندی نظارت شده حداکثر احتمال و انتخاب ۸۰ نمونه تعلیمی و میدانی استخراج گردید. بر اساس جدول (۷) پارامتر کاربری اراضی امتیازدهی گردید.

فرسایش بارش: برای محاسبه این پارامتر ابتدا معادله گرادیان بارش (معادله ۴) حوضه با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های اقلیمی داخل حوضه الوند و مجاور آن محاسبه گردید و بر اساس آن نقشه بارش سالانه حوضه مورد مطالعه تهیه گردید. امتیازدهی پارامتر فرسایش بارش بر اساس میزان بارش سالانه است (جدول ۷).

$$y = 0.224x + 271.2 \quad R^2 = 0.80 \quad \text{معادله ۴}$$

جدول (۷). ارزش تعیین شده برای پارامترهای کاربری اراضی و فرساینده‌گی بارش (منبع: خیر و همکاران ۲۰۰۸)

میزان	ظرفیت نفوذ	میزان بارش	میزان	ظرفیت نفوذ	کاربری اراضی
۱	کم	<۳۰۰	۱	کم	جنگل و مرتع متراکم
۲	نسبتاً متوسط	۳۰۰-۶۰۰	۲	نسبتاً متوسط	جنگل و مرتع تنک
۳	متوسط	۶۰۰-۹۰۰	۳	متوسط	زمین کشاورزی
۴	زیاد	۹۰۰-۱۲۰۰	۴	زیاد	زمین‌های بایر
۵	خیلی زیاد	>۱۲۰۰	۵	خیلی زیاد	رخمون بدون پوشش

پهنه‌بندی فرسایش حوضه الوند بر اساس مدل SMLRK :

نقشه‌ی پهنه‌بندی نهایی فرسایش خاک حوضه الوند بدون دخالت پارامتر نفوذ (معادله ۵) و با دخالت پارامتر نفوذ (معادله ۶) در محیط نرم‌افزار GIS Arc تهیه گردید. در این معادلات SEZ پهنه‌بندی فرسایش خاک، SE فرسایش‌پذیری خاک، RI نفوذپذیری، MEI مورفولوژی، LCU کاربری اراضی و RE فرساینده‌گی بارش است (خیر و همکاران؛ ۲۰۰۸، ۲۴۷).

$$\text{SEZ} = (\text{SE} * 30\%) + (\text{MEI} * 20\%) + (\text{LCU} * 40\%) + (\text{RC} + 10\%) \quad \text{معادله ۵}$$

$$\text{SEZ} = (\text{RI} * 20\%) + (\text{SE} * 20\%) + (\text{MEI} * 10\%) + (\text{LCU} * 40\%) + (\text{RC} + 10\%) \quad \text{معادله ۶}$$

بحث و نتایج

پارامترهای درونی:

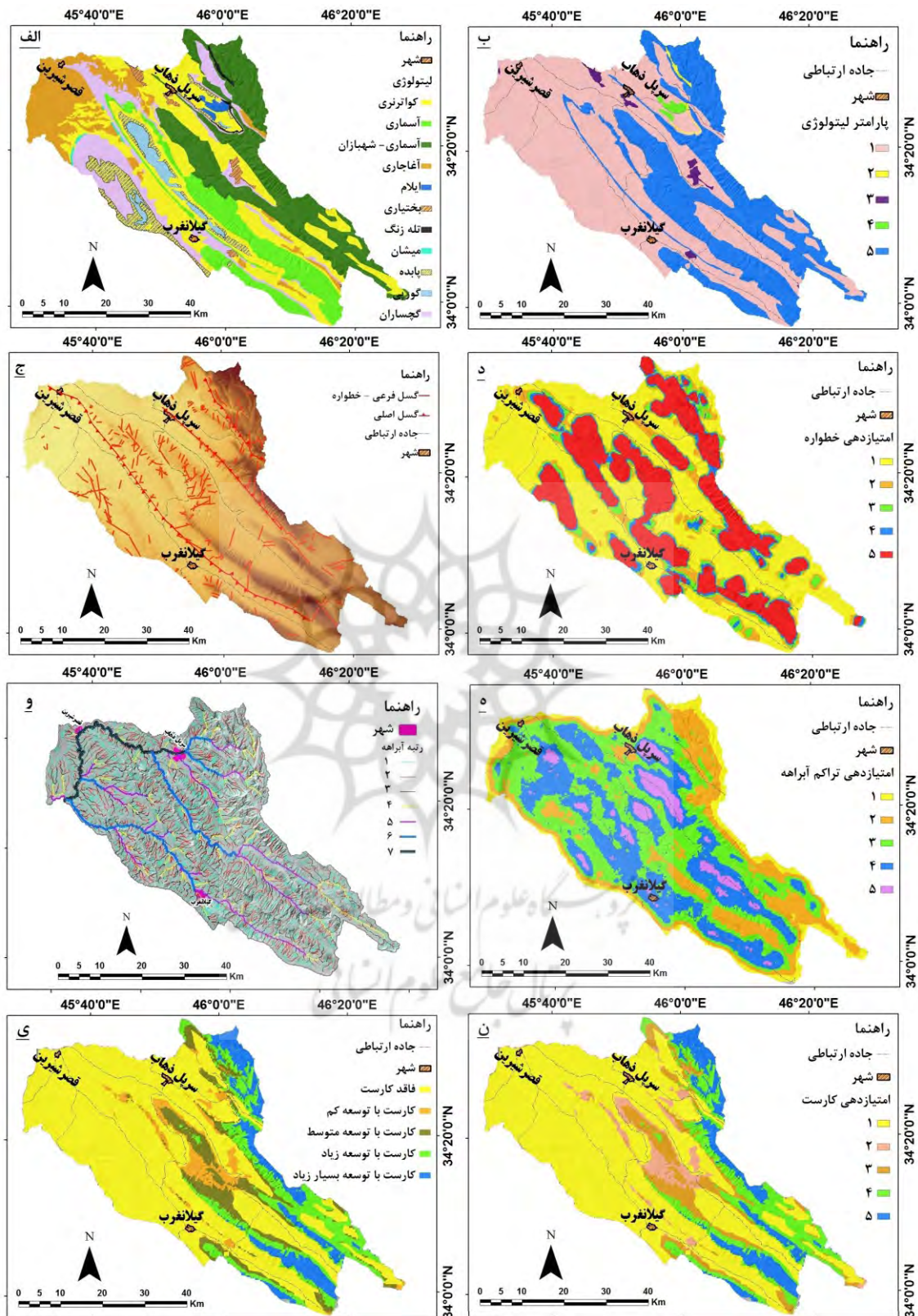
پارامتر نفوذ: رواناب عامل ایجاد فرسایش خاک بوده و نفوذ مقادیر قابل توجهی از آن باعث کاهش فرسایش خاک می‌گردد. حوضه الوند از نظر زمین‌شناسی در زون زاگرس چین خورده واقع شده و سازندهایی با سن کرتاسه فوقانی تا عهد حاضر در آن رخمون دارند. سازندهای ایلام، آسماری، آسماری-شهبازان و تله زنگ آهکی بوده و عمدتاً تاقدیس‌های حوضه را شکل داده‌اند. سازندهای مارنی-شیلی، گورپی و پابده در هسته تاقدیس‌های فرسایش یافته و سازندهای مارنی-ماسه‌سنگی گچساران و آغاچاری در حواشی تاقدیس‌ها و مناطق غربی حوضه رخمون دارند. نهشته‌های کواترنری نیز در سطح دشت‌های حوضه برونزد دارند (شکل ۲ الف). بر اساس میزان نفوذپذیری سازندهای کربناته آسماری و آسماری-شهبازان بیشترین امتیاز و سازندهای مارنی-ماسه‌سنگی، آغاچاری و گچساران و سازندهای مارنی-شیلی، پابده و گورپی کمترین امتیاز را به خود اختصاص داده‌اند (شکل ۲ ب). خطواره از دیگر پارامترهای مهم در میزان نفوذ می‌باشد. حوضه الوند از نظر زمین‌ساختی تکتونیزه بوده و به علت وجود سازندهای سخت آهکی، میزان تراکم خطواره در نواحی کوهستانی بالا است (شکل ۲ ج). میزان تراکم خطواره حوضه الوند بر اساس جدول (۳) به پنج طبقه تقسیم شده است. مناطق با تراکم کم خطواره، دارای ظرفیت نفوذ کم و مناطق کوهستانی و تکتونیزه شرق و شمال حوضه دارای تراکم بالای خطواره و نفوذ زیاد بوده و امتیاز ۵ را به خود اختصاص داده‌اند (شکل ۲ د). میزان تراکم زهکشی در حوضه رودخانه الوند با توجه به شرایط لیتولوژیکی، ژئومورفولوژیکی و توپوگرافی متفاوت است. مناطق کارستی به علت نفوذپذیری بالا، دارای تراکم کم آبراهه و نواحی تپه ماهوری با رخمون سازندهای شیلی - مارنی دارای تراکم بالای آبراهه می‌باشند (شکل ۲ و). بنابراین مناطق با تراکم بیشتر آبراهه در سطح دشت‌ها، دارای بیشترین امتیاز و مناطق کوهستانی با تراکم کم آبراهه دارای کمترین امتیاز می‌باشند (شکل ۲ ه). والتهام^۱ و همکاران (۲۰۰۵) معتقدند، کارست از طریق انحلال سنگ بستر و توسعه شبکه زهکشی زیرزمینی ایجاد می‌گردد. در واقع ژئومورفولوژی کارست باعث نفوذ بیشتر آب نسبت به مناطق

1 Waltham et al.

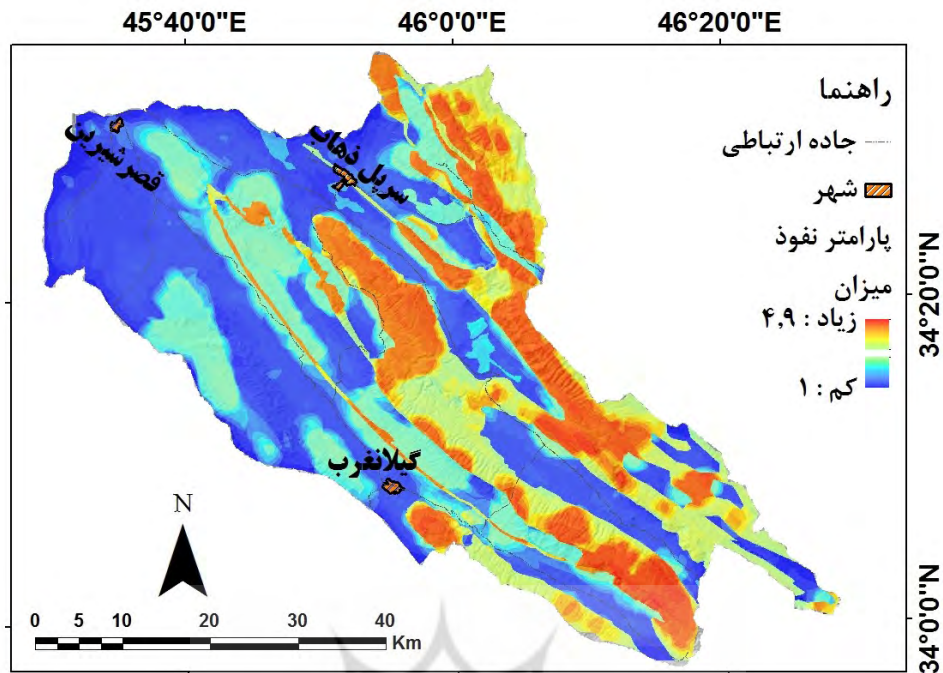


غیرکارستی می‌گردد. این پارامتر بر اساس میزان توسعه‌یافتگی کارست سطحی امتیازدهی شده است (جدول ۵). نقشه پهنه‌بندی توسعه-یافتگی ژئومورفولوژی کارست حوضه الوند حاکی از توسعه ژئومورفولوژی کارست سطحی در سطح تاقدیس‌های منطقه می‌باشد (شکل ۲). پهنه‌های با ژئومورفولوژی کارست توسعه یافته در نواحی کوهستانی مرتفع حوضه که دارای لندفرم‌های دولین، پونور، لاپیه-های توسعه یافته و ... هستند، به علت نفوذ بسیار زیاد رواناب، بیشترین امتیازها و نواحی با کارست توسعه کم و فاقد کارست نیز کمترین امتیاز را به خود اختصاص داده‌اند (شکل ۲ن). نقشه نهایی پارامتر نفوذ نشان می‌دهد (شکل ۳)، که مناطق کوهستانی شرق و شمال حوضه به علت لیتولوژی آهکی، تراکم خطواره بالا و ژئومورفولوژی کارست توسعه یافته، دارای میزان نفوذپذیری زیاد بوده و بیشترین امتیاز را به خود اختصاص داده‌اند. دشت‌های ناودیزی و مناطق فرسایشی و تپه ماهوری نیمه‌ی غربی حوضه الوند، به علت رخنمون سازندهای مارنی-شیلی و نهشته‌های کواترنری، تراکم خطواره‌ای کم و عدم شکل‌گیری ژئومورفولوژی کارست، دارای میزان نفوذپذیری کم بوده و در نتیجه کمترین امتیاز را دارا می‌باشند.





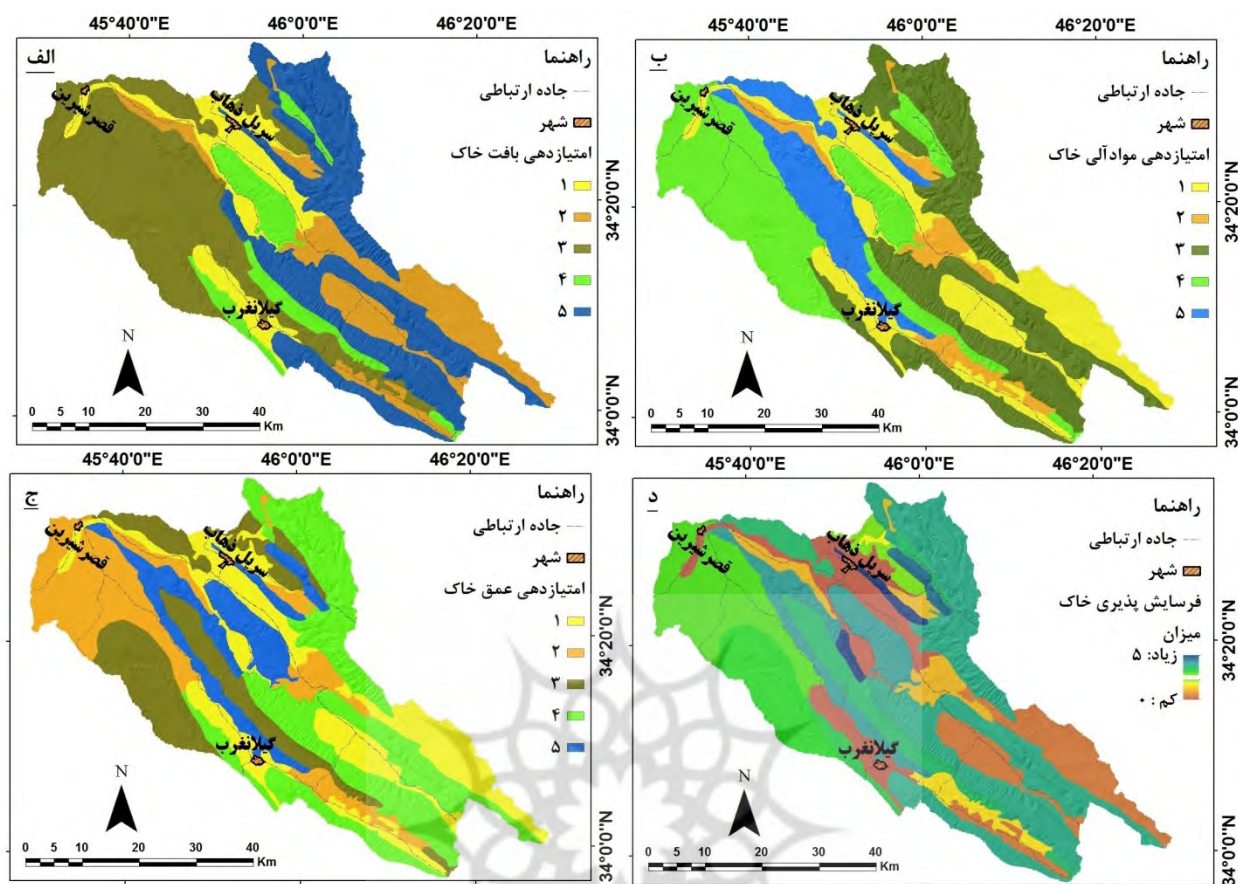
شکل ۲: الف) - نقشه سنگ‌شناسی؛ ب) - نقشه امتیازدهی سنگ‌شناسی؛ ج) - نقشه خطواره؛ د) - نقشه امتیازدهی تراکم خطواره؛ و) - نقشه شبکه زهکشی؛ ه) - نقشه امتیازدهی تراکم زهکشی؛ ی) - نقشه توسعه کارست؛ ن) - نقشه امتیازدهی توسعه کارست



شکل ۳: نقشه امتیازدهی پارامتر نفوذ در حوضه الوند

فرسایش پذیری خاک: سه ویژگی فیزیکی بافت، ماده آلی و عمق خاک، برای تعیین حساسیت خاک به فرسایش استفاده می‌شوند (خیر و همکاران: ۲۰۰۸، ۲۴۷). خاک‌هایی با مقادیر بالای رس و مواد آلی، دارای مقدار زیاد آب خالص (SWR) و نفوذ پایین هستند، در حالی که عمق کم باعث کاهش SWR می‌شود (داروییچ و زیورایک^۱؛ ۱۹۶، ۱۹۹۷). خاک‌های ورتی‌سول سنگین بافت در سطح دشت-های حوضه دارای امتیاز ۱ و ۲، خاک‌های میان بافت مناطق تپه ماهوری و کوهستانی غرب حوضه دارای امتیاز ۳، خاک‌های سبک بافت مناطق کوهستانی شرق و شمال حوضه دارای امتیاز ۴ و ۵ می‌باشند (شکل ۴ الف). مواد آلی شامل میکروارگانیزم‌ها، بقایای آنها و بقایای گیاهی بوده و باعث چسبندگی خاک و جذب آب می‌گردد. خاک‌های با مواد آلی بیشتر در مقابل فرایند فرسایش خاک حساسیت کمتری را دارا می‌باشند. خاک‌های زراعی سطح دشت‌های حوضه به علت مواد آلی زیاد ناشی از بقایای گیاهان زراعی و کودهای دامی در مقابل فرسایش حساسیت کمتری داشته و دارای امتیاز ۱ می‌باشند. خاک‌های مناطق تپه‌ماهوری با پوشش جنگلی - مرتعی، به علت هموس نسبتاً بالا امتیاز ۲ را به خود اختصاص داده‌اند. مناطق کوهستانی حوضه با پوشش جنگلی - مرتعی و مقادیر مناسب مواد آلی دارای امتیاز ۳ هستند. خاک‌های نواحی غربی حوضه که دارای پوشش گیاهی تنک و مواد آلی کم بوده امتیاز ۴ را به خود اختصاص داده‌اند. نواحی صخره‌ای، پرتگاهی و بدلندی با مواد آلی ناچیز دارای بیشترین امتیاز (۵) می‌باشند (شکل ۴ ب). عمق یکی از ویژگی‌های مهم خاک بوده و خاک‌های کم عمق معمولاً در مقابل فرایند فرسایش حساسیت بیشتری دارند. در سطح حوضه الوند، خاک‌های عمیق سطح دشت‌های حوضه و خاک‌های نیمه عمیق مناطق کوهپایه‌ای، دارای امتیاز ۱ و ۲ بوده و خاک‌های کم عمق‌تر مناطق تپه‌ماهوری دارای امتیاز ۳ هستند. خاک‌های کم عمق مناطق کوهستانی و خاک‌های نازک و کم عمق مناطق پرشیب و صخره‌ای دارای امتیاز ۴ و ۵ هستند (شکل ۴ ج).

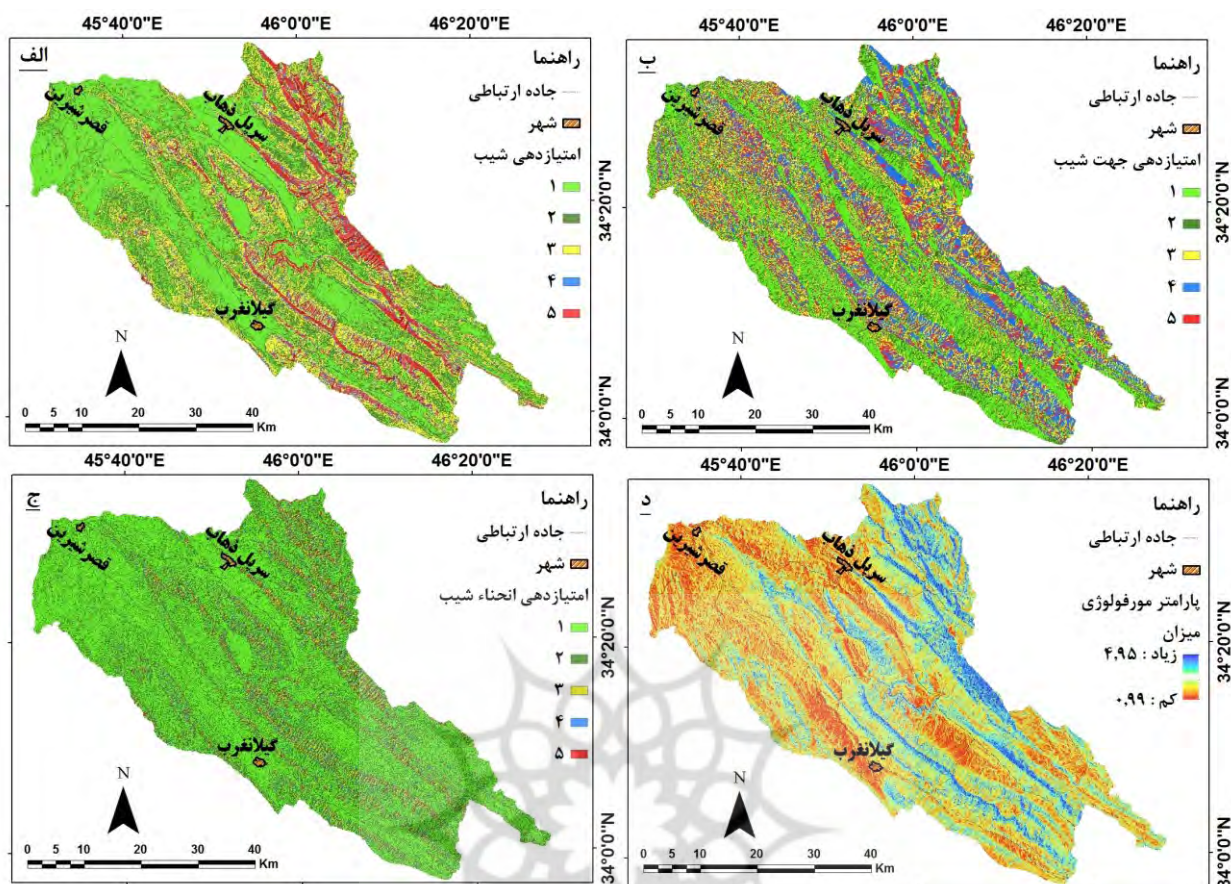
^۱ - Darwich and Zurayk.



شکل ۴: الف) - نقشه امتیازدهی بافت خاک؛ ب) - نقشه امتیازدهی مواد آلی خاک؛ ج) - نقشه امتیازدهی عمق خاک؛ د) - نقشه نهایی پارامتر فرسایش - پذیری خاک

مورفولوژی: این پارامتر شامل سه زیرپارامتر شیب توپوگرافی، جهت شیب و تحدب دامنه است. پارامتر شیب بر اساس جدول (۶) امتیازدهی شده و مناطق کم شیب در دشت‌های حوضه کمترین امتیاز و نواحی کوهستانی و شیب‌دار شرق و شمال حوضه بیشترین امتیاز را دارا هستند (شکل ۵الف). پارامتر جهت شیب دارای میزانی بین ۰ تا ۳۶۰ درجه یا هشت جهت اصلی و جهت مسطح بوده و با تحت تاثیر قرار دادن آفتابگیری و میزان بارش، دما و تبخیر در فرایند فرسایش خاک نقش دارد. پارامتر جهت شیب در حوضه‌ی الوند از ناهمواری - های محلی تبعیت کرده و بر اساس جدول (۶) امتیازدهی شده است. جهات آفتابگیر و باران‌گیر غربی و جنوب غربی به ترتیب دارای امتیاز ۴ و ۵ و جهت شرقی، شمال شرقی و مسطح به علت تاثیرپذیری کم از آفتابگیری و روبه باد بودن کمترین امتیاز (۱) را دریافت می - کند (شکل ۵ب). پارامتر انحنا شیب محدب و مقعر بودن دامنه‌ها را نشان می‌دهد. دامنه‌های مقعر با جمع‌آوری و تمرکز آب توان بالقوه برای ایجاد فرسایش و حمل رسوب دارند. دامنه‌های محدب برعکس عمل نموده و به علت عدم تمرکز آب، فرسایش و حمل رسوب کمتر است (رووس^۱؛ ۱۹۹۹، ۱۶). مناطق مسطح کمترین امتیاز (۱)، دامنه‌های محدب امتیاز ۲ و دامنه‌های مقعر کم، متوسط و زیاد به ترتیب امتیازات ۳، ۴ و ۵ را به خود اختصاص داده‌اند (شکل ۵ج).

^۱ - Roose.



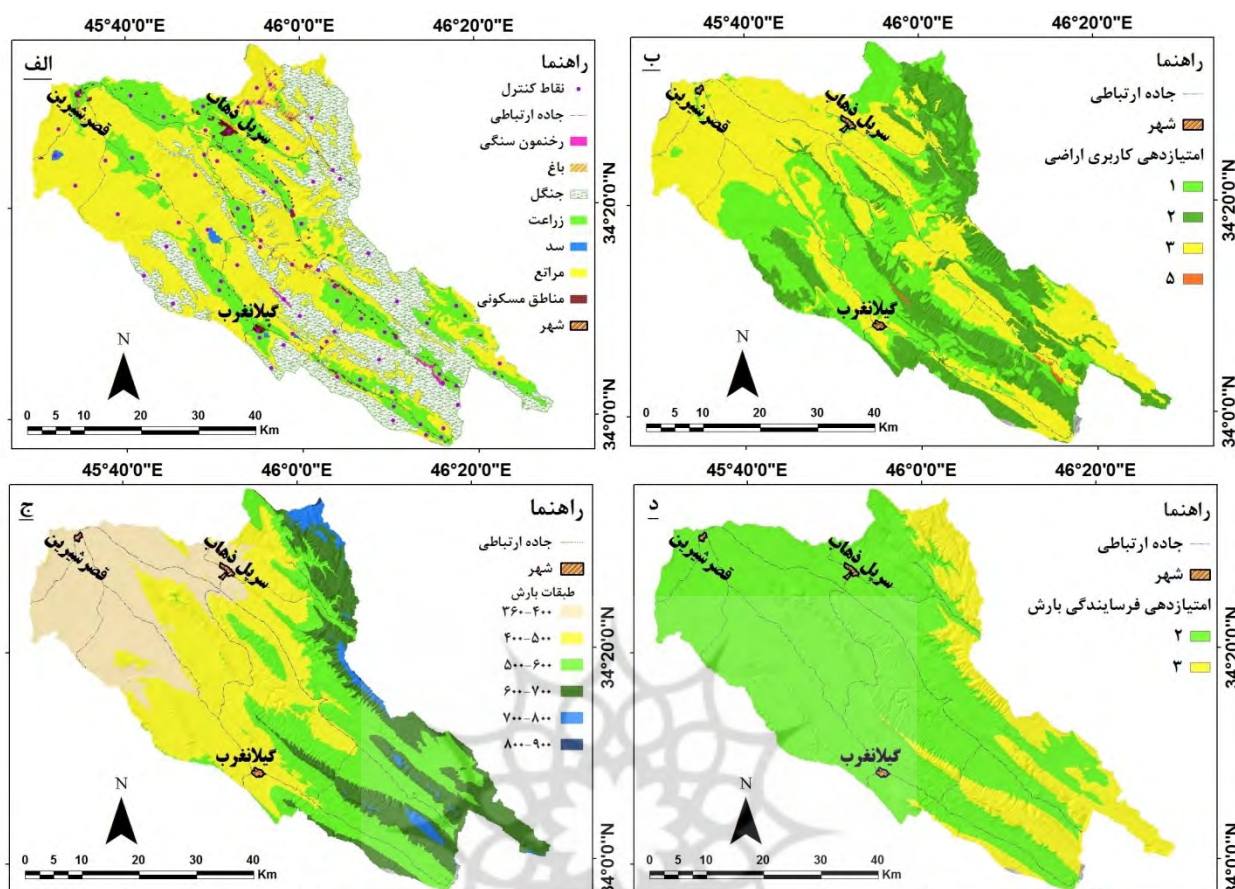
شکل ۵: الف) - نقشه امتیازدهی شیب توپوگرافی؛ ب) - نقشه امتیازدهی جهت شیب؛ ج) - نقشه امتیازدهی تحدب دامنه؛ د) - نقشه نهایی پارامتر مورفولوژی

پارامترهای بیرونی:

کاربری اراضی: کاربری اراضی تفسیر تعامل بین مواد و انرژی بین جامعه بشری و محیط طبیعی بوده که بر توزیع و میزان فرسایش خاک تاثیر می‌گذارد (هانگ^۱ و همکاران؛ ۱۸۷، ۲۰۱۶). کاربری‌های که تشدید کننده فرایند فرسایش خاک بوده بیشترین امتیاز را در مدل مورد استفاده دارا بوده و کاربری‌هایی که پوشش حفاظتی مناسب برای خاک سطحی در مقابل عامل فرساینده و همچنین جابه‌جایی مواد فرسایشی دارند کمترین امتیاز را دارا می‌باشند. بر این اساس پهنه‌های مسکونی، دریاچه‌ی سدها، جنگل‌ها و مراتع متراکم کمترین امتیاز (۱)، جنگل‌ها و مراتع تنک امتیاز ۲، زمین‌های کشاورزی امتیاز ۳ و رخنمون‌های سنگی امتیاز ۵ را به خود اختصاص داده است (شکل ۶ب).

فرساینده‌ی بارش: بارش نیروی محرکه فرایند فرسایش آبی است و بدون وجود باران و رواناب حاصل از آن فرایند فرسایش رخ نمی‌دهد. در نواحی با بارش سالانه زیاد، به علت فروانی وقوع رواناب امکان فرسایش بیشتر می‌باشد. حوضه الوند دارای بارش میانگین سالانه بین ۳۶۰ تا ۹۰۰ میلیمتر در سال است. بر این اساس پارامتر بارش بر اساس جدول (۷) به دو کلاس تقسیم شده و نواحی کوهستانی پر بارش دارای امتیاز ۳ و سطح دشت‌ها و مناطق کم ارتفاع دارای امتیاز ۲ می‌باشند (شکل ۶د).

^۱ - Hanug et al.



شکل ۶: الف) - نقشه کاربری اراضی؛ ب) - نقشه امتیازدهی کاربری اراضی؛ ج) - نقشه بارش سالانه؛ د) - نقشه امتیازدهی بارش سالانه

پهنه‌بندی فرسایش خاک بر اساس مدل SMLRK :

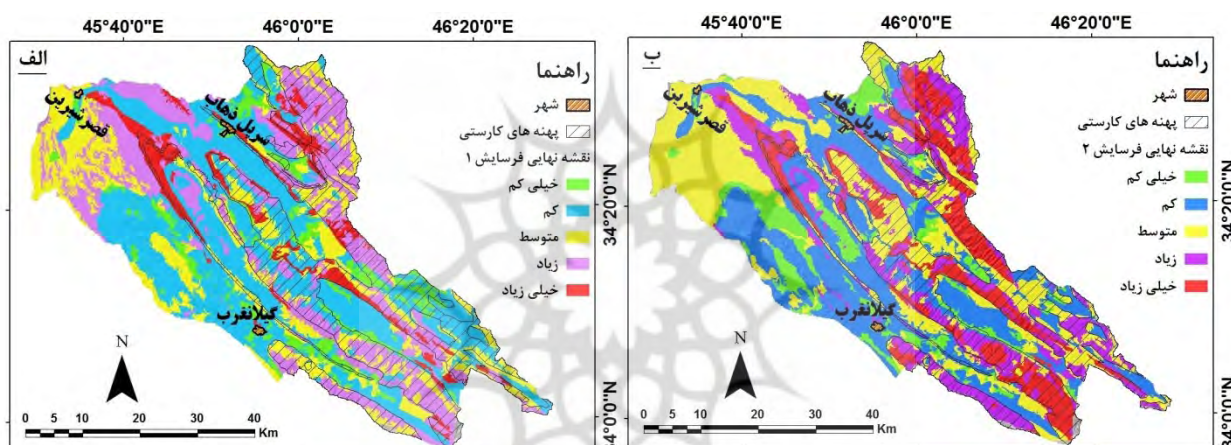
در این پژوهش نقشه نهایی پهنه‌بندی فرسایش خاک بر اساس دو رابطه (۵ و ۶) به دست آمده است. در رابطه (۵) از پارامتر نفوذ که ویژگی‌های کارستی را پوشش می‌دهد، صرف نظر شده است (شکل ۷ الف). میزان فرسایش نهایی خاک بر اساس این معادله $1,098$ تا $4,330$ بدست آمده که به پنج طبقه فرسایشی تقسیم شده است (جدول ۸). طبقات با فرسایش خیلی کم و کم $44,68\%$ مساحت حوضه، طبقه با فرسایش متوسط $21,9\%$ مساحت حوضه و طبقات با فرسایش زیاد و خیلی زیاد $33,4\%$ مساحت حوضه الوند را به خود اختصاص داده‌اند. در مجموع حدود 55% مساحت حوضه الوند در معرض خطر فرسایش خاک متوسط تا زیاد قرار دارد. طبقه فرسایش کم منطبق بر سطح دشت‌ها و نواحی تپه ماهوری حوضه است. این مناطق عموماً دارای کاربری کشاورزی، مراتع و جنگل‌های نیمه انبوه می‌باشند. بافت خاک این نواحی سنگین با مواد آلی زیاد و عمق بالا است. این طبقه کارستی از نظر مورفولوژی دارای شیب کم و جهات پشت به آفتاب بوده و کمتر در محدوده مناطق کارستی قرار دارند. پهنه با فرسایش متوسط منطبق بر دشت‌های فرسایشی غرب حوضه، مناطق تپه ماهوری و دامنه‌های کم ارتفاع کوهستان‌های حوضه می‌باشد. کاربری این مناطق عمدتاً مرتعی - جنگلی بوده و بخش‌هایی از نواحی کارستی حوضه را دربرگرفته است. از نظر مورفولوژی دارای شیب متوسط و بافت خاک میانه با مواد آلی و عمق متوسط می‌باشند. پهنه با فرسایش زیاد هم در مناطق کارستی و هم در مناطق غیرکارستی حوضه قرار دارند. این مناطق عموماً پرشیب بوده و دارای کاربری مراتع و جنگل تنک، با بافت خاک سبک و کم عمق می‌باشند. مناطق کارستی در ارتفاعات سیروان، قلاج، سرکش، ده نوشک، نوکوه و دالاهو قرار دارند. پهنه‌های با فرسایش خیلی زیاد منطبق بر مناطق صخره‌ای و پرشیب با کاربری مرتع تنک، بافت خاک سبک و عمق بسیار کم است (شکل ۷ ب). میزان فرسایش نهایی خاک بر اساس معادله (۶) و با دخیل کردن پارامتر نفوذ، که بازتاب دهنده‌ی ژئومورفولوژی کارستی حوضه است، $1,099$ تا $4,413$ بدست آمده است. پهنه‌های فرسایشی خیلی کم و کم $38,75\%$ ، پهنه‌ی فرسایشی



متوسط ۲۹٫۸۶٪ و پهنه‌های فرسایشی زیاد و خیلی زیاد ۳۱٫۳۷٪ مساحت حوضه الوند را به خود اختصاص داده‌اند (جدول ۸). شرایط کاربری اراضی، مورفولوژی، ژئومورفولوژیکی، بارشی و خاک در هر یک از این پهنه‌ها همانند، پهنه‌های فرسایشی نقشه‌ی قبل است.

جدول (۸). مساحت و درصد پهنه‌های فرسایش بر اساس مدل SMLRK بدون پارامتر نفوذ در حوضه الوند

مدل ۴ فاکتور				مدل ۵ فاکتور			
طبقات فرسایش	مقادیر	مساحت Km ²	درصد	طبقات فرسایش	مقادیر	مساحت Km ²	درصد
خیلی کم	۱,۹۰۸-۱,۰۹۸	۲۰۳,۲۹۲	٪۷,۲۸	خیلی کم	۱,۸۵۲-۱,۰۹۹	۲۸۵,۰۳	٪۹,۳۲
کم	۲,۳۵۰-۱,۹۰۸	۱۰۴۴,۲۳۱	٪۳۷,۴۰	کم	۲,۲۷۳-۱,۸۵۲	۸۱۴,۵۴	٪۲۹,۴۳
متوسط	۲,۷۰۶-۲,۳۵۰	۶۱۱,۶۲۹	٪۲۱,۹۰	متوسط	۲,۶۳۴-۲,۲۷۳	۸۲۶,۵۸	٪۲۹,۸۶
زیاد	۳,۰۳۲-۲,۷۰۶	۷۲۰,۷۹۳	٪۲۵,۸۱	زیاد	۲,۹۸۱-۲,۶۳۴	۴۹۲,۹۶	٪۱۷,۸۱
خیلی زیاد	۴,۳۳۰-۳,۰۳۲	۲۱۱,۸۷۲	٪۷,۵۸	خیلی زیاد	۴,۴۱۳-۲,۹۸۱	۳۷۵,۴۶	٪۱۳,۵۶



شکل ۷: الف) نقشه نهایی پهنه‌بندی فرسایش خاک بدون عامل نفوذ؛ ب) نقشه نهایی پهنه‌بندی فرسایش خاک با عامل نفوذ

ماتریس خطا:

به منظور دقت‌سنجی نقشه‌های نهایی پهنه‌بندی فرسایش خاک به دست آمده بر اساس رابطه‌های (۵) و (۶) ماتریس خطا و درجه مشابهت آنها محاسبه گردید (جدول ۹). بر این اساس دو نقشه و طبقات آنها بر اساس تعداد پیکسل مقایسه شده و جمع کل قطر جدول بر جمع کل جدول تقسیم گردیده، که درجه مشابهت دو نقشه را بیان می‌کند. درجه مشابهت بین دو نقشه ۵۴٫۸۵٪ است، که منعکس‌کننده اثر زیاد پارامتر نفوذ در اصلاح نتیجه یا نقشه پهنه‌بندی نهایی فرسایش خاک است. در واقع مناطق توسعه‌ی یافته‌ی کارستی در ارتفاعات شرق و شمال حوضه با دخالت دادن پارامتر نفوذ در پهنه‌ی فرسایشی خیلی زیاد قرار گرفته‌اند. بنابراین نتایج پهنه‌بندی حاصل از مشارکت پارامتر نفوذ و به طبع آن ژئومورفولوژی کارست از کارایی بهتری برخوردار بوده و نتایج این حالت از مدل بیانگر بیشتر بودن فرسایش خاک در مناطق دارای ژئومورفولوژی کارستی می‌باشد.

جدول ۹: ماتریس خطای دو نقشه پهنه بندی فرسایش خاک در حوضه الوند

جمع کل	خیلی زیاد	زیاد	متوسط	کم	خیلی کم	طبقات فرسایش
۲۹۹۲۰۸	۹	۸۸	۱۴۵۰۸	۱۰۷۷۰۰	۱۷۶۹۰۳	خیلی کم
۱۰۳۷۴۹۹	۲۸۰	۳۰۲۵۵	۲۴۳۷۲۲	۶۴۷۲۸۴	۱۱۵۹۵۸	کم
۷۲۰۹۲۲	۳۰۰۷۱	۱۸۰۹۵۹	۳۸۹۸۷۸	۱۱۹۱۵۷	۸۵۷	متوسط
۷۳۸۷۳۰	۱۹۲۷۲۵	۲۸۳۷۷۳	۲۵۷۸۱۱	۴۳۸۵	۳۶	زیاد
۲۷۳۷۷۱	۱۸۶۳۶۵	۷۹۸۱۸	۷۴۰۲	۱۸۶	۰	خیلی زیاد
۳۰۷۰۱۳۰	۴۰۹۴۵۰	۵۷۴۸۹۳	۹۱۳۳۲۱	۸۷۸۷۱۲	۲۹۳۷۵۴	جمع کل

نتیجه گیری

مدل SMLRK بر خلاف بیشتر مدل‌های مرسوم شرایط ژئومورفولوژی کارست را در زیرپارامترهای خود دخیل کرده است. در نظر گرفتن شرایط ژئومورفولوژی کارست و ویژگی‌های زمین شناسی (سنگ شناسی و تراکم خطواره) در پارامتر نفوذ و دخیل کامل پارامترهای ژئومورفولوژیکی ناهمواری (شیب، جهت شیب، پلان دامنه و تراکم زهکشی) در پارامتر مورفولوژی و در نظر گرفتن پارامترهای حفاظتی و پوششی در یک لایه تحت عنوان کاربری از ویژگی‌های این مدل در کسب نتایج دقیق تر است. در این پژوهش نقشه‌ی نهایی فرسایش حاصل از این مدل به دو صورت مشارکت پارامتر نفوذ و عدم مشارکت آن تهیه گردیده است. در نقشه‌های نهایی فرسایش خاک حاصل از دو روش، پنج پهنه‌ی فرسایشی وجود دارد. تهیه‌ی نقشه فرسایش نهایی خاک حوضه الوند با استفاده از پارامتر نفوذ سبب ایجاد تغییرات در مساحت پهنه‌های فرسایشی و توزیع مکانی آنها گردید. با دخیل کردن پارامتر نفوذ در ارزیابی فرسایش خاک حوضه الوند، مساحت پهنه‌های فرسایشی کم و زیاد در نقشه با پنج فاکتور نسبت به نقشه‌ی فرسایش خاک چهار فاکتور به ترتیب ۷،۹۷٪ و ۸،۶۳٪ کاهش یافته و مساحت پهنه‌ی فرسایشی خیلی کم، متوسط و خیلی زیاد به ترتیب ۲،۰۴٪، ۷،۹۶٪ و ۵،۹۸٪ افزایش یافته است. به منظور دقت‌سنجی نقشه‌های به دست آمده ماتریس خطا و درجه مشابهت آنها محاسبه گردید (جدول ۹). بر این اساس دو نقشه و طبقات آنها بر اساس پیکسل، مقایسه شده و جمع کل قطر جدول بر جمع کل جدول تقسیم گردیده که درجه مشابهت دو نقشه را بیان می‌کند. درجه مشابهت بین دو نقشه ۵۴،۸۵٪ است که منعکس کننده اثر اصلی پارامتر نفوذ در اصلاح نتیجه است. در واقع مناطق توسعه‌ی یافته‌ی کارستی در ارتفاعات شرق و شمال حوضه با دخالت دادن پارامتر نفوذ در پهنه‌ی فرسایشی خیلی زیاد قرار گرفته‌اند. بنابراین نتایج پهنه بندی حاصل از مشارکت پارامتر نفوذ و به طبع آن ژئومورفولوژی کارست از کارایی بهتری برخوردار بوده و نتایج این حالت از مدل بیانگر بیشتر بودن فرسایش خاک در مناطق دارای ژئومورفولوژی کارستی می‌باشد. شیب، بارش زیاد و خاک کم ضخامت مهمترین دلایل فرسایش زیاد خاک در نواحی کارستی حوضه بوده است. مدل SMLRK پهنه‌های فرسایشی خاک در مناطق کارستی را تقریباً منطبق بر پهنه‌های توسعه یافته کارستی نشان می‌دهد. مناطق کارستی عموماً به علت پوشش گیاهی تنک و متغییر، شیب زیاد، بارش فراوان و آبشویی زیاد و خاک رگسول دارای بیشترین میزان فرسایش می‌باشند.



منابع

- شرکت مهندسين مشاور زومار، (۱۳۸۳)، *گزارش فیزیوگرافی منطقه مطالعاتی کلاشک*، مدیریت آبخیزداری.
- وزارت نیرو، سازمان آب منطقه ای غرب، مطالعات زمین شناسی و لرزه زمین شناسی و لرزه خیزی منطقه گیلانغرب؛ مهندسين مشاور آب و نیرو، جلد دوم.
- کردوانی، پرویز؛ (۱۳۷۶)، *حفاظت خاک*، انتشارات دانشگاه تهران.
- باقری سیدشکری، سجاده؛ یمانی، مجتبی؛ جعفریگللو، منصور؛ کریمی، حاجی؛ مقیمی، ابراهیم. (۱۳۹۴). بررسی توسعه‌یافتگی و ویژگی‌های هیدرودینامیکی سامانه‌های کارستی با استفاده از تجزیه و تحلیل منحنی فرود هیدروگراف (مورد مطالعه: آبخوان‌های کارستی حوضه رودخانه الوند)، *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۴۷ (۳)، صص ۳۳۳-۳۴۶.
- باقری سیدشکری، سجاده؛ (۱۳۹۴)، تاثیر ژئومورفولوژی کارست در ویژگی‌های کمی و کیفی آبخوان‌های کارستی حوضه‌های قره سو و الوند در استان کرمانشاه، رساله دکتری ژئومورفولوژی، اساتید راهنما یمانی، مجتبی؛ جعفریگللو، منصور؛ دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران.
- برزو، آرش؛ ممیزی، محمدرضا؛ نیک اندیش، عباسعلی؛ (۱۳۸۷)، مقایسه سه روش PSIAC, MPSIAC, EPM در برآورد میزان فرسایش و رسوب در حوضه چهل چشمه استان فارس، *فصلنامه دانش کشاورزی ایران* شماره ۱، بهار ۱۳۸۷.
- جباری، ایراج؛ طالب پور، داود، (۱۳۸۵)، ارزیابی حساسیت نواحی بالادست سد مهاباد به فرسایش با استفاده از سنجش از دور و GIS، *نشریه علوم زمین*، شماره ۶۲.
- رستمی، فرض‌الله؛ (۱۳۸۷)، اصلاح مدل برآورد رسوب امپسپاک با به کار گیری تکنیک فازی در حوضه سد زاگرس، پایان نامه کارشناسی ارشد رشته ژئومورفولوژی، استاد راهنما، قهرودی، منیژه؛ دانشکده جغرافیا، دانشگاه خوارزمی.
- کریمی، حاجی (۱۳۸۲) رفتار هیدروژئولوژیکی سفره‌های کارستی حوضه الوند کرمانشاه، رساله دکتری دانشکده علوم زمین، دانشگاه شیراز.
- مقصودی، مهران، یمانی، مجتبی،، سالاری، ممد،، (۱۳۸۷)، برآورد فرسایش و رسوب از طریق ارزیابی متغیرهای تاثیرگذار در حوضه‌ی آبخیز وزنه با استفاده از GIS، *فصلنامه جغرافیا و توسعه*، شماره ۱۶، صص ۱۱۹-۱۳۴.
- نیک پور، نورالله؛ فتوحی، صمد؛ نگارش، حسین؛ سیستانی، مسعود. ۱۳۹۶ مورفومتری فرسایش آبکندی و عوامل موثر بر ایجاد و گسترش آن (حوضه‌ی دشت چم فاضل در جنوب غرب استان ایلام)، *تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*، دوره ۴، ۱، ۹۷-۱۱۲.
- نوری، عباسعلی، صفاری، امیر، کریمی، جلال،، (۱۳۹۷)، بررسی تاثیر تغییرات پوشش و کاربری زمین در قابلیت فرسایش خاک حوضه قره سو گرگانرود، *نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*، سال پنجم، شماره ۱، صص ۸۳-۹۶.
- یعقوب نژاد اصل، نازیلا، فتوحی، محمدحسین،، (۱۳۹۴)، ارزیابی خطر فرسایش خاک در دامنه‌های شمال غرب کلان شهر تهران، *اولین کنگره بین‌المللی زمین، فضا، انرژی پاک*،
- نادری، فتح‌الله، کریمی، حاجی،، ناصری، بهروز،، (۱۳۸۹)، پهنه بندی پتانسیل فرسایش خاک در حوزه آبخیز اسمان آباد ایلام به روش شاخص فرسایش، *مجله پژوهش‌های آبخیزداری*، شماره ۴ (۲۳)، صص ۵۱-۴۳.
- Cerdan, O., Le Bissonnais, Y., Couturier, A., & Saby, N. (2002). Modelling interrill erosion in small cultivated catchments. *Hydrological Processes*, 16(16), 3215-3226.
- Darwich, T., Zurayk, R., 1997. Distribution and nature of Red Mediterranean soils in Lebanon along an altitudinal sequence. *Catena* 28, 191-202.
- Drew, D. P. (1983). Accelerated soil erosion in a karst area: the Burren, western Ireland. *Journal of Hydrology*, 61(1-3), 113-124.
- Drzewiecki, W., Wężyk, P., Pierzchalski, M., & Szafrńska, B. (2014). Quantitative and qualitative assessment of soil erosion risk in Małopolska (Poland), supported by an object-based analysis of high-resolution satellite images. *Pure and Applied Geophysics*, 171(6), 867-895.

- Fu, W. L., Zhang, Z. W., Zhang, H., Xia, K. S., Xie, D. T., & Ni, J. P. (2007). Study on characteristics of soil erosion on Karst Hillslope. *J. Soil Water Conserv*, 21, 38-41.
- Gholami, S. H. (2003). The simulation of daily sediment yield by using distributed SWAT model in mountainous catchments (Amameh Catchments), *Journal of Research and Construction*, Vol.16: 28-33
- Huang, W., Ho, H. C., Peng, Y., & Li, L. (2016). Qualitative risk assessment of soil erosion for karst landforms in Chahe town, Southwest China: A hazard index approach. *Catena*, 144, 184-193.
- Kheir, R. B., Abdallah, C., & Khawlie, M. (2008). Assessing soil erosion in Mediterranean karst landscapes of Lebanon using remote sensing and GIS. *Engineering Geology*, 99(3-4), 239-254.
- Krishnamurthy, J., Srinivas, G., Jayaraman, V., Chandrasekhar, M., 1996. Influence of rock types and structures in development of drainage network in typical hard rock terrain. *ITC Journal* 3 (4), 252-259.
- Lim, K. J., Sagong, M., Engel, B. A., Tang, Z., Choi, J., & Kim, K. S. (2005). GIS-based sediment assessment tool. *Catena*, 64(1), 61-80.
- Marques M J, Bienes R, Perez-Rodriguez R, et al. 2008 Soil degradation in Central Spain due to sheet water erosion by low-intensity rainfall events *Earth Surf. Proc. Land* 33 (3) 414-423.
- Oldeman, L. R. (1994). The global extent of soil degradation1 In: Greenland DJ, Szabolcs I, eds1 *Soil resilience and sustainable land use1* Wallingford: CAB International, 99-1181.
- Roose, E., 1999. Evolution historique des stratégies de lutte antiérosive. Vers la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). *Bulletin Réseau Erosion* 19, 11-25.
- Shaban, A. ,and BouKheir, R. ,and Froidefond, J. ,andKhawlie, M. , GirardM-C. ,2004. Characterization of morphometric factors of drainage system interrelated to rock infiltration: the case of the Occidental Lebanon: Caract´erisation des facteurs morphométriques des réseaux hydrographiques correspondant aux capacités d'RP des roches au Liban Occidental. *Zeitschrift Fur Geomorphologie.v. 48. p.1.*
- Sobhani, B. (2002). Comparison of FAO and MPSIAC methods for estimating sediment and erosion using GIS. *Journal of agricultural sciences and natural resources*, 8, 15-28.
- Waltham, T., Bell, F., Culshaw, M., (2005), *Sinkholes and Subsidence, karst and Cavernous rocks in Engineering and Construction* Published by Springer: Nottinghamshire, UK.
- Yang, Q., Xie, Y., Li, W., Jiang, Z., Li, H., & Qin, X. (2014). Assessing soil erosion risk in karst area using fuzzy modeling and method of the analytical hierarchy process. *Environmental earth sciences*, 71(1), 287-292.
- Zhou, H. Y., Pan, X. Y., & Zhou, W. Z. (2017, January). Assessing spatial distribution of soil erosion in a karst region in southwestern China: A case study in Jinfo Mountains. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 52, No. 1, p. 012047). IOP Publishing.
- Zhou, H. Y., Pan, X. Y., & Zhou, W. Z. (2017, January). Assessing spatial distribution of soil erosion in a karst region in southwestern China: A case study in Jinfo Mountains. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 52, No. 1, p. 012047). IOP Publishing.
- Yue-Qing, X., Jian, P., & Xiao-Mei, S. (2009). **RETRACTED ARTICLE:** Assessment of soil erosion using RUSLE and GIS: a case study of the Maotiao River watershed, Guizhou Province, China. *Environmental Geology*, 56(8), 1643-1652.