

پهنه بندی حساسیت اراضی حوضه مراغه به فرسایش خندقی با استفاده از روش تصمیم گیری چند شاخصی فازی

سهیلا روشن ضمیر* - عضو هیات علمی دانشگاه پیام نور.

پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۱۱/۱۹ تأیید نهایی: ۱۳۹۸/۰۶/۱۷

چکیده

حوضه مراغه یکی از زیر حوضه‌های رودخانه مزلقان می‌باشد که بخش‌هایی از آن به شدت تحت تاثیر فرسایش خندقی قرار دارد. این پژوهش با هدف پهنه‌بندی حساسیت اراضی به فرسایش خندقی در حوضه مراغه با استفاده از روش تصمیم‌گیری چند شاخصی فازی انجام شده است. در این تحقیق با استفاده از عکس‌های هوایی دارای مقیاس ۱:۴۰۰۰۰ و عملیات میدانی، مناطق تحت تاثیر فرسایش خندقی شناسایی و با استفاده از عوامل سنگ‌شناسی، شیب، جهت شیب، ارتفاع، فاصله از جاده، فاصله از آبراهه، کاربری اراضی، خاک، بارش و قابلیت اراضی اقدام به پهنه‌بندی حساسیت اراضی به فرسایش خندقی حوضه مراغه گردید. به این منظور عوامل موثر در نرم افزارهای ILWIS و ArcGIS رومی و برای تحلیل‌های مبتنی بر تئوری مجموعه‌های فازی مورد استفاده قرار گرفتند. تحلیل‌های فازی با استفاده از نرم افزار Matlab7.1 در دو مرحله شامل تعیین توابع عضویت پیوسته فازی برای هر یک از طبقات عوامل موثر و همچنین عوامل موثر در وقوع فرسایش خندقی انجام شدند. نتایج اعتبارسنجی مدل نشان داد که حدود ۸۷ درصد از خندق‌های گروه ارزیابی در طبقات با حساسیت زیاد و خیلی زیاد قرار می‌گیرند و رسوبات آبرفتی Qt1، اجزاء واحد اراضی ۱، ۴، ۳ شامل فلات‌ها و تراس‌های فوقانی، خاک‌های T.H.X و کاربری مراتع ضعیف به عنوان عوامل اصلی و سپس به ترتیب طبقه شیب ۳۰٪-۱۵، حداکثر بارش روزانه ۲۶/۴-۲۳/۷ میلی‌متر با دوره بازگشت دو سال، فاصله ۲۰۰ متر از آبراهه و جهت‌های غرب و جنوب بیشترین تاثیر را در ایجاد فرسایش خندقی حوضه مراغه داشته‌اند.

واژگان کلیدی: فرسایش خندقی، روش فازی، توابع عضویت فازی، حوضه مراغه.

مقدمه

فرسایش خندقی به عنوان فرایند فرسایشی مشخص می‌شود که از طریق آن آب جاری در دوره‌هایی کوتاه در کانال‌های باریک جمع می‌شود و خاک را از این ناحیه باریک به اعماق قابل ملاحظه انتقال می‌دهد (پازن و همکاران^۱، ۲۰۰۳: ۹۲). حوضه مراغه یکی از زیر حوضه‌های رودخانه مزلقان در استان مرکزی می‌باشد که به علت وجود رسوبات آبرفتی سست، پوشش گیاهی ضعیف و شرایط توپوگرافی بشدت تحت تاثیر فرسایش خندقی قرار دارد. این پدیده نه تنها موجب از بین رفتن خاک و تخریب اراضی کشاورزی و مرتعی شده بلکه با انتقال رواناب و رسوب از ارتفاعات به کف دره‌ها و آبراهه‌های دائمی اثرات فرسایش جانبی آب یعنی سیلاب و آلودگی را نیز در حوضه مراغه تشدید می‌کند و از آنجا که فرسایش خندقی مهمترین عامل افزایش رسوب منطقه مورد مطالعه می‌باشد تهدیدی برای کاهش ظرفیت مخزن سد پایین دست خود (سد الغدير) نیز محسوب می‌شود (شکل ۱).

فرسایش خندقی با برگزاری شش کنفرانس بین‌المللی طی سال‌های ۲۰۰۰ تا سال‌های ۲۰۱۳، توجه زیادی را در سال‌های اخیر به خود جلب کرده است. محققین عوامل متعددی را در رابطه با فرسایش خندقی مورد بررسی قرار دادند. گابریس و همکاران^۲ (۲۰۰۳) با مقایسه نقشه‌های خندق و کاربری سال‌های ۱۷۸۴، ۱۸۶۰، ۱۹۲۰ و ۱۹۹۴، ارتباطات بین تشکیل و رشد خندق را با تغییر کاربری و شیب دامنه در مجارستان مورد مطالعه قرار دادند. نتایج تحقیقات نشان دادند تا سال ۱۸۶۰ که بیش از ۵۰٪ از مساحت حوضه را جنگل فرا گرفته بود نرخ متوسط رشد خندق ۵ متر در سال در کیلومتر مربع بود و در سال ۱۹۹۴ که پوشش جنگلی به حدود ۲۵٪ کاهش یافت و کشاورزی به شیب‌های بیشتر از ۲۵٪ گسترش پیدا کرد، نرخ متوسط رشد خندق به ۱۰ متر در سال در کیلومتر مربع رسید. پازن و همکاران (۲۰۰۳) در مطالعاتی نشان دادند که آستانه بارندگی برای رشد خندق در نواحی دارای پوشش جنگلی به طور قابل توجهی از آستانه بارندگی برای رشد خندق‌های موقتی در نواحی مزروعی بالاتر است و سطوح دارای پوشش طبیعی در محیط مرطوب در مقابل فرسایش جریان‌های سطحی متمرکز بسیار مقاوم هستند و فقط زمانی به فرسایش خندقی حساس هستند که بارش‌های حداکثر و یا تغییر اقلیمی در مقیاس زمانی ۱۰۰۰ سال و یا بالاتر را تجربه کرده باشد. والتین و همکاران^۳ (۲۰۰۵) در تحقیقات خود نشان دادند که خندق‌ها فقط محدود به نواحی مارنی نیستند بلکه از نظر جهانی بیشتر در خاک‌هایی که در معرض سله بستن هستند مانند لس‌ها و خاک‌های ماسه‌ای و یا در خاک‌هایی که مستعد به فرسایش تونلی^۴ هستند مانند خاک‌های وارفته^۵ نیز روی می‌دهند. بر اساس این تحقیق فرسایش خندقی در بیشتر اوقات بوسیله کاربری نامناسب و وقوع بارش‌های حداکثر ایجاد و یا تشدید می‌شود و بعد از توقف علل ایجاد کننده تا زمان طولانی می‌توانند به تولید رسوب ادامه دهند. زوکا و همکاران^۴ (۲۰۰۶) اثرات کاربری و چشم‌انداز را بر روی توزیع فضایی و اشکال ژئومورفولوژیکی خندق‌های ناحیه کشاورزی - دامپروری ایتالیا مطالعه کردند. آنها در یک روش شناسی تلفیقی با استفاده از عکس‌های هوایی و بررسی‌های میدانی، روابط بین پارامترهای مورفولوژیکی خندق‌های متفاوت را محاسبه و سپس ارتباط بین اشکال مورفولوژیکی خندق و ویژگی‌های محیطی را اعم از لایه‌های زمین‌شناسی، شیب، قابلیت اراضی و کاربری تعیین کردند. بوچنک و همکاران^۷ (۲۰۰۹) با مطالعه ۸ حوضه مستعد به فرسایش آبی در تونس، حجم رسوبات ایجاد شده توسط پیشانی

^۱ Poesen et al.

^۲ Gabris et al.

^۳ Valentin et al.

^۴ piping

^۵ dispersive

^۴ Zucca et al

^۵ Bouchnak et al

عمودی و دیوارها - کف خندق ها را توسط پردازش ۵ دوره از عکس های هوایی مربوط به سال های ۲۰۰۰-۱۹۵۲ محاسبه کردند. نتایج این تحقیق نشان می دهد در هر دوره، دو فرایند اصلی فرسایش خندقی (فرسایش پیشانی عمودی و دیوارها - کف) بطور قابل ملاحظه ای با شیب دامنه افزایش می یابد. فرسایش دیوارها - کف بیشتر از فرسایش پیشانی عمودی (هدکت) به کل بار رسوب خندقی کمک می کند و کل فرسایش خندقی در دامنه های ملایم به طور متوسط ۱/۶۶ متر مکعب در هکتار در سال و در دامنه های پر شیب به طور متوسط ۵/۶۰۳ متر مکعب در هکتار در سال محاسبه شده است.

ونوالگم و همکاران^۱ (۲۰۰۷) در قالب مطالعات اشکال ژئومورفولوژی قدیمی، ۴۳ خندق دائمی را در ناحیه جنگل میردال^۲ در بلژیک مرکزی بررسی کردند. این محققین با استفاده از مدل رگرسیون منطقی و متغیرهای انسانی و طبیعی شامل نوع خاک، شیب دامنه، جهت شیب، ارتفاع از سطح دریا، فاصله از جاده، سطح زهکشی، شاخص قدرت جریان، فاصله از مکان های باستان شناسی و فاصله از سازه های انسانی به تحلیل عوامل کنترل کننده خندق های قدیمی ناحیه مورد مطالعه پرداختند. نتایج این مطالعه نشان می دهد که هر دو عامل انسانی و فیزیکی در توزیع خندق ها مهم هستند. و مدل رگرسیون منطقی در پیش بینی وقوع خندق از اهمیت بالایی برخوردار است. لوکا و همکاران^۳ (۲۰۱۱) روش های آماری را با استفاده از GIS در برآورد حساسیت به فرسایش خندقی در حوضه توربلو^۴ ایتالیا مورد استفاده قرار دادند. کارایی مدل ها با استفاده از منحنی های میزان پیش بینی و با مقایسه نسبت هر طبقه حساسیت با توزیع خندق ها مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج تحقیق نشان داد اگرچه همه مدل ها کارایی نسبتا خوبی دارند اما مدل رگرسیون منطقی چند متغیره به عنوان بهترین مدل در پیش بینی حساسیت به فرسایش خندقی منطقه مورد مطالعه شناخته شد. نظری و همکاران (۲۰۰۹) با جمع آوری اطلاعات میدانی، آزمایشگاهی و آنالیزهای مدل رقمی ارتفاع^۵ (DEM) به مطالعه فرایند های خندقی شدن و شرایط آستانه خندق دائمی در حوضه آبخیز دره کره بوشهر پرداختند. مطالعات این محققین نشان می دهد، رابطه S-A (شیب - مساحت) به منظور پیش بینی مکان های مستعد به فرسایش خندقی از یک سطح قابل قبول دقت برخوردار است. معیاد دیگر عوامل محیطی نیز باید با روابط S-A در شناسایی دقیق مکان خندق های دائمی در مناطق خشک تلفیق شود. عیسایی و همکاران (۱۳۸۴)، با پژوهشی که در خصوص ارتباط بین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک های لسی با اشکال فرسایشی در حوضه های اترک و گرگان رود انجام دادند، نشان دادند که طول خندق با میزان شن و نسبت جذب سدیم، هم بستگی مستقیم و با میزان گچ و آهک هم بستگی معکوس دارد. داودی راد و همکاران (۱۳۸۸) با استفاده از عوامل سنگ شناسی، درصد شیب زمین، نوع خاک، متوسط بارندگی سالیانه، نوع استفاده از زمین و درصد حفاظ روی خاک، نقشه پهنه بندی خطر فرسایش خندقی حوضه رباط ترک را با استفاده از مدل شاخص همپوشانی و عملگرهای جمع جبری فازی، ضرب جبری فازی و گامای فازی در محیط GIS تهیه کردند. نتایج تحقیق نشان می دهد که مدل گامای فازی ۰/۸ مناسب ترین روش پهنه بندی فرسایش خندقی در حوضه آبخیز مورد مطالعه است. نتایج تحقیقات شادفر و همکاران (۱۳۹۰) نیز در حوضه های انتخابی واقع در استان های مرکزی، گیلان، بوشهر، کهگیلویه و بویراحمد و قم نشان داد که مدل گامای فازی ۰/۸ مناسب ترین روش پهنه بندی فرسایش خندقی است. قابل ذکر است در تهیه نقشه پهنه بندی حساسیت اراضی به فرسایش خندقی با استفاده از مدل فازی در تحقیقات داودی راد و همکاران (۱۳۸۸) و شادفر و همکاران

^۱ Vanwalleghem et al.

^۲ Meerdaal

^۳ Lucà et al.

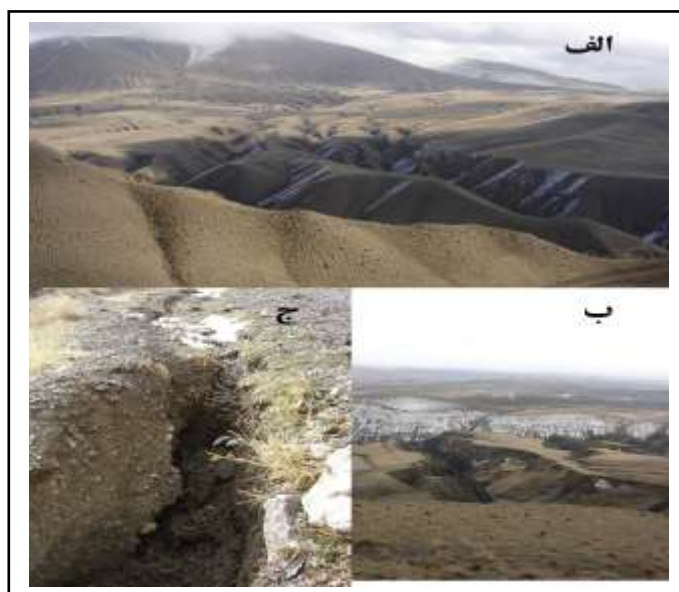
^۴ Turbolo

^۵ Digital Elevation Model

(۱۳۹۰) برای وزن دادن به کلاس‌های عوامل موثر از روش نسبت فراوانی^۱ و نرمال سازی که یک تابع خطی است استفاده شده است. شادفر (۱۳۹۰) با استفاده از عوامل سنگ شناسی، شیب، منابع و قابلیت اراضی، جهت شیب و کاربری اراضی و به کارگیری روش تحلیل سلسله مراتبی^۲ (AHP) اقدام به تهیه نقشه پهنه بندی حساسیت اراضی به فرسایش خندقی در حوضه علی آباد (شهرستان رودبار) کرد. نتایج تحقیقات وی نشان داد که روش تحلیل سلسله مراتبی مدل مناسبی جهت پهنه بندی حساسیت اراضی به فرسایش خندقی به شمار می رود.

از روش فازی در تهیه نقشه پهنه بندی خطر زمین لغزش بیشتر استفاده شده است از آن جمله می توان از تحقیقات مهدویفر (۱۳۷۶)، فاطمی عقدا و همکاران (۱۳۸۴)، ناجی (۱۳۸۵)، پورقاسمی (۱۳۸۶)، پورقاسمی و همکاران (۱۳۸۸، ۱۳۹۰)، و صفاری و همکار (۱۳۹۱) نام برد.

هدف از این پژوهش بررسی عوامل موثر بر رخداد فرسایش خندقی و تهیه نقشه پهنه بندی حساسیت اراضی به آن با استفاده از روش تصمیم گیری چند شاخصه‌ی فازی از طریق ترکیب ماکزیمم-مینیمم در حوضه آبخیز مراغه است.



شکل ۱: اراضی تحت تاثیر فرسایش خندقی در رسوبات آبرفتی مجاور روستای مراغه - (الف) چشم اندازی از خندق‌های دامنه‌ای، (ب) رشد خندق عمیق و عریض تا جاده، (ج) ایجاد خندق کوچک و جدید در کنار آبراهه و یا خندق قدیمی تر

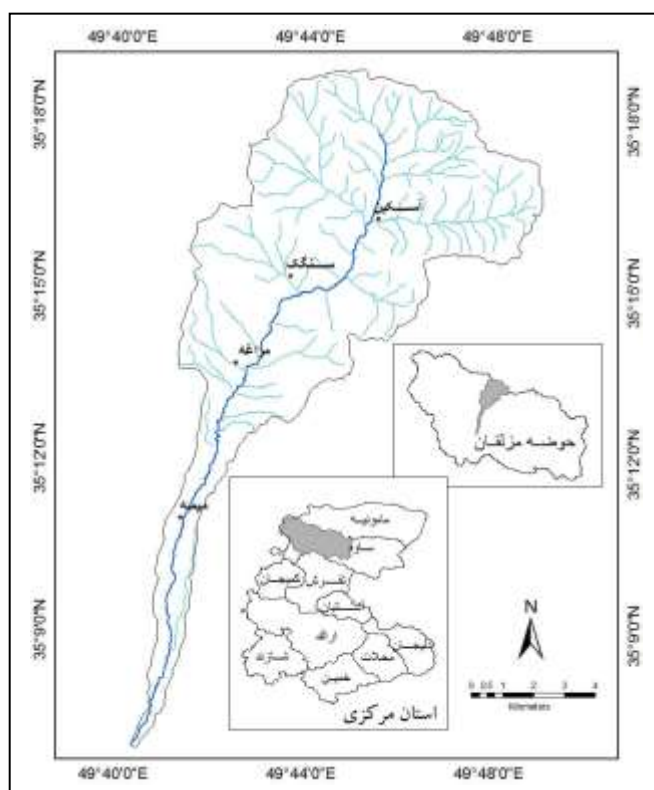
منطقه مورد مطالعه

حوضه مراغه یکی از زیر حوضه‌های آبخیز مزلقان با مساحت ۸۸۹۰/۷ هکتار در استان مرکزی (غرب شهرستان ساوه) در حد فاصل طول‌های ۴۹° ۴۱' تا ۴۹° ۴۹' شرقی و در عرض‌های ۳۵° ۰۰' تا ۳۵° ۱۹' شمالی قرار دارد (شکل ۲). حداکثر ارتفاع آن ۲۹۸۷ متر از سطح دریا در کوه اینچی قاره در ارتفاعات شمالی حوضه و حداقل ارتفاع ۱۶۰۸ متر در محل خروجی رودخانه مراغه قرار دارد. رودخانه مراغه از ارتفاعات شمالی حوضه سرچشمه گرفته و پس از طی حدود ۲۰ کیلومتر در جهت جنوب در روستای قلعتین به رودخانه مزلقان می پیوندد. بخش کوهستانی مجموعه‌ای از سنگ‌های دگرگونی ژوراسیک، سنگ‌های آتشفشانی ائوسن و طبقات مارنی آهکی الیگوسن را در بر می‌گیرد و زمین‌های کم شیب‌تر و تپه

⁶ Frequency Ratio

⁷ Analytical Hierarchy Process

ماهوری شامل کنگلومرای پلیوسن و نهشته‌های کواترنری می باشد. متوسط درجه حرارت سالانه ناحیه مورد مطالعه C^{۱۰} است و متوسط بارش سالانه از ۲۸۶ mm در جنوب تا ۵۲۶ mm در شمال تغییر می کند. اقلیم منطقه نیمه خشک سرد است که در تراز ۲۵۰۰ متری به اقلیم مرطوب سرد تبدیل می شود. ۷۵ درصد از خاک‌های ناحیه مورد مطالعه در رده خاک‌های انتی سول^۱ و فاقد تکامل پروفیلی هستند و بخش عمده پوشش گیاهی نیز شامل مراتع متوسط و ضعیف می باشد (روشن ضمیر، ۱۳۸۸: ۱۹).



شکل ۲: موقعیت منطقه مورد مطالعه

داده ها و روش ها

در این پژوهش به منظور تهیه نقشه پهنه بندی حساسیت اراضی به فرسایش خندقی، عوامل سنگ شناسی، شیب، جهت شیب، ارتفاع، فاصله از جاده، فاصله از آبراهه، کاربری اراضی، خاک، بارش و قابلیت اراضی مورد مطالعه قرار گرفتند. از نقشه های توپوگرافی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه برداری کشور بعنوان نقشه های پایه برای تهیه نقشه سطوح ارتفاعی، شیب، جهت شیب، فاصله از جاده، فاصله از شبکه زهکشی، از نقشه زمین شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ برای تهیه نقشه سنگ شناسی، از تصاویر ماهواره ای IRS مربوط به سال ۲۰۰۴ برای تهیه نقشه کاربری اراضی و از داده های اقلیمی ایستگاههای پیرامونی منطقه مورد مطالعه برای تهیه نقشه حداکثر بارش روزانه با دوره بازگشت دو سال استفاده گردید. نقشه خاک بر اساس تشریح پروفیل های خاک در واحدهای همگن ژئومورفولوژی و بررسی نتایج آزمایشگاهی از نمونه های خاک شامل تعیین درصد رس، سیلت، ماسه، آهک، کربن آلی، میزان اسیدیته، درصد اشباع، نسبت جذب سدیم، هدایت

الکتریکی، ظرفیت تبادل کاتیونی و نقشه قابلیت اراضی با استفاده از عکس‌های هوایی ۱:۴۰۰۰۰، نقشه زمین‌شناسی، شیب، ارتفاع و خاک منطقه مورد مطالعه تولید شدند.

تئوری فازی، شامل تمام تئوری‌هایی است که از مفاهیم اساسی مجموعه‌های فازی و توابع عضویت استفاده می‌کنند. مفهوم تابع عضویت^۱ از اهمیت ویژه‌ای در تئوری مجموعه‌های فازی برخوردار است زیرا تمام اطلاعات مربوط به یک مجموعه فازی به وسیله تابع عضویت آن توصیف می‌شود. تابع عضویت مقدار فازی بودن یک مجموعه فازی را مشخص می‌کند و در واقع به تابعی که میزان درجه عضویت المان‌های^۲ مختلف را به یک مجموعه نشان دهد، تابع عضویت می‌گویند. درجه عضویت، عددی بین صفر و یک می‌باشد (کوره پزان دزفولی، ۱۳۸۷: ۴ و ۵). فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) نیز یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره می‌باشد که به کمک آن می‌توان درخت سلسله‌مراتبی، مقایسه زوجی معیارهای مختلف، نرمال‌سازی و تلفیق کلی نتایج را انجام داد (شمسی پور و همکاران، ۱۳۸۹: ۵۵ به نقل از احمدی و همکاران).

به منظور بررسی عوامل موثر در فرسایش خندقی و تهیه نقشه پهنه بندی حساسیت اراضی به آن با استفاده از روش تصمیم‌گیری چند شاخصه ی فازی از طریق ترکیب ماکزیمم-مینیمم، ابتدا با استفاده از تفسیر عکسهای هوایی، پیمایش میدانی و ثبت موقعیت خندق‌ها با استفاده از دستگاه GPS^۳، نقشه پراکنش خندق‌ها تهیه گردید. سپس هر کدام از عوامل سنگ‌شناسی، شیب، جهت شیب، ارتفاع، فاصله از جاده، فاصله از آبراهه، کاربری اراضی، خاک، بارش و قابلیت اراضی به طبقه‌هایی تقسیم شدند. در این روش هر طبقه از این عوامل دارای تاثیری در وقوع خندق است که نرخ (R_i) آن طبقه نامیده می‌شود و هر یک از عوامل دارای درجه اهمیتی نسبت به عوامل دیگر می‌باشند که وزن (W_i) آن پارامتر نامیده می‌شود و با استفاده از رابطه ۱ درجه حساسیت یا نرخ کلی پتانسیل وقوع فرسایش خندقی (R) برای هر پلیگون محاسبه می‌شود (مهدوی فر و فاطمی عقدا، ۱۳۷۶، ۲۰۰۲):

$$R = \sum(R_i \times W_i) / \sum(W_i) \quad (1)$$

برای مشخص کردن تاثیر هر یک از طبقه‌های عوامل در وقوع خندق (R_i) از روش نسبت فراوانی، یعنی تقسیم نسبت درصد مساحت خندق در یک طبقه به درصد مساحت آن طبقه استفاده شده است. وزن‌های بدست آمده در روش نسبت فراوانی پس از نرمال شدن به عنوان بستری برای معرفی توابع عضویت طبقات عوامل مختلف به کار گرفته شده‌اند. وزن (اهمیت نسبی) هر یک از عوامل موثر (W_i) از طریق فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) به دست آمد. مدل AHP شامل یک ماتریس وزن دهی بر مبنای مقایسه‌های زوجی بین عوامل بوده و میزان مشارکت هر یک از عوامل را در ایجاد خندق مشخص می‌کند. این ماتریس در نهایت به نرم افزار Expert Choice وارد و در آنجا وزن نهایی برای هر عامل محاسبه شد. وزن‌های بدست آمده در مدل AHP نیز پس از نرمال شدن برای تعیین توابع عضویت عوامل تاثیرگذار در وقوع فرسایش خندقی به کار گرفته شدند. از تلفیق ۱۰ عامل سنگ‌شناسی، درصد شیب، جهت شیب، ارتفاع، فاصله از جاده، فاصله از آبراهه، کاربری، خاک، حداکثر بارش روزانه و منابع و قابلیت اراضی در محیط ArcGIS ۲۴۹۵۸۴ پلیگون بدست آمد. لذا ماتریس ورودی به نرم افزار Matlab 7.1 دارای ۲۴۹۵۸۴ سطر و ۱۰ ستون خواهد بود. بدینگونه تهیه نقشه

^۱ Membership Function

^۲ Elements

^۳ Global Positioning System

پهنه بندی حساسیت به فرسایش خندقی با استفاده از روش تصمیم گیری چند شاخصه ی فازی را می توان در این پژوهش به شرح زیر خلاصه کرد :

_ فازی نمودن وزن های پیشنهادی برای تمام عوامل موثر در فرسایش خندقی و طبقات گوناگون ۱۰ پارامتر در ۲۴۹۵۸۴ پلیگون

_ مشخص نمودن کلاس هریک از پارامترهای اندازه گیری شده بر اساس توابع عضویت
_ برآورد میزان حساسیت با استفاده از مجموعه های فازی

_ غیر فازی نمودن مقادیر حساسیت بدست آمده برای ۲۴۹۵۸۴ پلیگون

برای انجام مراحل فوق با استفاده از نرم افزار Matlab7.1 یک برنامه اصلی به همراه دو زیر برنامه طراحی شد (مهدوی فر، ۲۰۰۲، ۱۳۷۹). بخش اصلی برنامه در واقع هدایت و کنترل اجرای برنامه را به عهده دارد و دو برنامه دیگر مربوط به تعریف برنامه فازی برای تمام زیر گروههای مربوطه و تجزیه و تحلیل داده و محاسبه ی حساسیت می باشند. خروجی برنامه به صورت یک فایل با ۱۱ ستون و ۲۴۹۵۸۴ سطر خواهد بود که در ستون آخر مقدار حساسیت محاسبه شده ارائه می گردد. سپس خروجی این نرم افزار که درجه حساسیت محاسبه شده برای هر پلیگون در محدوده ی نقشه مورد مطالعه می باشد، به محیط نرم افزار ILWIS منتقل تا نقشه پهنه بندی حساسیت به فرسایش خندقی تهیه گردد. جهت پهنه بندی فرسایش خندقی در منطقه مورد مطالعه از توابع عضویت مثلثی و گوسی استفاده شد.

برای ارزیابی نقشه حساسیت اراضی، پهنه های خندقی به صورت تصادفی توسط ابزار Hawth's Tools در نرم افزار ArcGIS 9.3 به دو گروه تقسیم شدند. ۷۰٪ (۹۹ پهنه خندقی) برای تهیه نقشه حساسیت به فرسایش خندقی و ۳۰٪ (۴۳ پهنه خندقی) برای ارزیابی آن مورد استفاده قرار گرفتند (لوکا و همکاران، ۲۰۱۱: ۳۰۰، کانفرتی^۱ و همکاران، ۲۰۱۱: ۸۹۱). نقشه پهنه بندی های حساسیت به فرسایش خندقی که کلاس های مختلف حساسیت را در منطقه نشان می دهد با نقشه پراکنش خندق ها (۴۳ پهنه خندقی) مقایسه شدند. با توجه به این که در بحث پهنه بندی خطر زمین لغزش از عامل مساحت لغزش و برای ارزیابی مدل های آن از نسبت تراکمی^۲ (D_r) و شاخص جمع کیفی^۳ (QS) استفاده می شود، در این پژوهش نیز به دلیل استفاده از مساحت پهنه های خندقی، برای ارزیابی مدل از نسبت تراکمی و شاخص جمع کیفی استفاده شده است. (شادفر و همکاران، ۱۳۹۰: ۱).

نتایج و بحث

بررسی نتایج حاصل از ارتباط بین عوامل موثر بر وقوع خندق و خندق های ایجاد شده در منطقه مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه گردیده است. بررسی نتایج سنگ شناسی نشان می دهد که بیشترین خندق ها در واحد سنگ شناسی Qt1 واقع شدند که این امر نقش رسوبات سست آبرفتی کواترنر را در ایجاد و رشد خندق نشان میدهد که با نتایج پژوهش زوکا و همکاران (۲۰۰۶)، پازن و همکاران (۲۰۰۳)، داودی راد و همکاران (۱۳۸۸)، شادفر و همکاران (۱۳۸۹) و شادفر (۱۳۹۰) انطباق دارد.

بررسی طبقات خاک نشان می دهد که ۶۷ درصد از خندق های منطقه در خاکهای T.H.X^۴ قرار دارند. در این پژوهش یک خندق معرف در کاربری مرتعی در غرب روستای مراغه انتخاب شد و در قسمت های راس، وسط و دهانه خروجی تعداد نه پروفیل حفر شد. بر اساس نتایج آزمایش از خاک های خندق معرف، میزان ماده آلی بین ۰/۱۷ تا ۰/۷۹

^۱ Conforti et al

^۲ Density Ratio

^۳ Quality Sum

^۴ Typic Haploxerepts

درصد است. بنابر این میزان ماده آلی که موجب تشدید پایداری خاک می شود (دلپا و همکاران^۱، ۲۰۱۱: ۱۵۹) بسیار پایین است (کاپرا و همکاران^۲، ۲۰۰۹: ۷۹، کمپانی زارع و همکاران، ۲۰۱۱: ۱۵۸). نسبت جذب سدیم (SAR) که نقش موثر سدیم را در پراکندگی ذرات خاک نشان می دهد (شهریور و همکاران، ۲۰۱۲: ۱) از ۰/۳۷ تا ۰/۶۵ تغییر می کند. این عامل زمانی مشکلات فیزیکی خاک را بطور جدی افزایش می دهد، که مقدار آن بالاتر از ۱۲-۱۵ باشد (مانشائر^۳، ۱۹۹۴)، لذا خاک از نظر نسبت جذب سدیم فاقد محدودیت می باشد. درصد اشباع خاک (SP) بین ۲۲/۷ تا ۳۳/۹ متغیر است، در نتیجه، ظرفیت نگهداری آب در این خاک نسبتاً پایین تا متوسط می باشد و چنانچه بالاترین بارش روزانه از ظرفیت نگهداری آب بیشتر شود می تواند باعث ایجاد جریان سطحی شود (استرانک^۴، ۲۰۰۳: ۱۹۰). هدایت الکتریکی (EC) که میزان شوری خاک را نشان می دهد بین ۰/۲۱ تا ۰/۴۲ ds/m می باشد و زمانی خاک شور محسوب می شود که مقدار هدایت الکتریکی از ۴ ds/m بیشتر باشد (شهریور و همکاران، ۲۰۱۲: ۳)، لذا خاک از نظر هدایت الکتریکی فاقد محدودیت می باشد. میزان اسیدیته (PH) بین ۷/۵ تا ۷/۷ و به میزان کمی قلیایی است. بافت خاک لومی شنی و یا لومی رسی شنی می باشد که در طبقه بندی جدید جزء خاکهای سبک و میان بافت قرار می گیرد و در مقابل فرسایش دارای مقاومت کم تا متوسط است (شادفر، ۱۳۸۹: ۴۱). ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) که ظرفیت خاک را برای نگهداشتن یون های مثبت نشان می دهد بین ۸/۱ تا ۱۷ m.e./100gr است. مقدار ظرفیت تبادل کاتیونی برای خاک های سبک با حاصلخیزی کم، ۱۲-۴ و برای خاک های میان بافت و با حاصلخیزی متوسط، ۲۵-۱۳ است (حاجب، ۲۰۰۷).

مطالعه نتایج قابلیت اراضی نشان می دهد بیشترین خندق ها (۶۷/۵ درصد) در واحد اراضی ۳،۴،۱ یعنی فلاتها تراس های فوقانی که برای عملیات کشاورزی مناسب کمتری دارند، واقع شدند که با نتایج پژوهش زوکا و همکاران (۲۰۰۶) مطابقت دارد.

بررسی نتایج اطلاعات کاربری نشان می دهد ۸۲ درصد خندق های منطقه در کاربری مراتع ضعیف قرار دارند که با نتایج پژوهش زوکا و همکاران (۲۰۰۶)، والتین و همکاران (۲۰۰۵)، عثمان صالح و همکار (۲۰۱۱)، شادفر و همکاران (۱۳۹۰)، شادفر (۱۳۹۰) و داودی راد و همکاران (۱۳۸۸) مطابقت دارد. این مراتع دارای شاخص اختلاف پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI) ۰/۵- تا ۰ می باشد. این شاخص که در محدوده ۱- تا ۱ تغییر می کند و بیشترین حساسیت را به تغییرات پوشش گیاهی دارد (باعقیده و همکاران، ۱۳۹۰: ۵) نقش پوشش گیاهی فقیر و پراکنده این مراتع را در ایجاد جریان متمرکز و فرسایش خندقی منطقه مورد مطالعه نشان می دهد (ونوالگم و همکاران، ۲۰۰۵: ۸۴).

بررسی طبقات شیب نشان می دهد که طبقه شیب ۳۰٪- ۱۵ (۴۸/۱ درصد) و بعد از آن طبقه شیب ۱۵٪- ۰ (۳۳/۷ درصد) بیشترین خندق ها را به خود اختصاص داده و به ترتیب دارای بیشترین وزن هستند که با نتایج پژوهش زوکا و همکاران (۲۰۰۶) مطابقت دارد. از طبقه سوم (شیب ۳۰-۴۵ درصد) پهنه های خندقی کاهش می یابند که این می تواند به علت خاک کم عمق تر و کاهش طول دامنه باشد (زوکا، ۲۰۰۶: ۹۳) که عموماً دامنه های پرشیب تر این ناحیه را مشخص می کند.

نتایج بررسی جهت شیب نشان می دهد که بیشترین خندق ها در جهت های غرب (۳۴/۲ درصد) و جنوب (۳۳/۸ درصد) قرار دارند. علت وقوع خندق ها در جهت غرب احتمالاً قرار گرفتن خاک ها و لیتولوژی های مستعد به فرسایش خندقی در جهت غرب می باشد که با نتایج پژوهش ونوالگم و همکاران (۲۰۰۷) مطابقت دارد. علت وقوع خندق در جهت

^۱ Dlapa et al.

^۲ Capra et al

^۳ Munshower

^۴ Strunk

^۵Normalized Difference Vegetation Index

جنوب را می توان تاثیر جهت کلی شیب روی تاخیر در ذوب برف ناشی از تفاوت حرارتی، رطوبت خاک، پوشش گیاهی و نوع فرسایش دانست. در نیمکره شمالی در دامنه های جنوب، ذوب برف سریع تر از دامنه های شمالی انجام می گیرد و فرسایش بیشتر به صورت خندقی و شیاری است (شادفر، ۱۳۸۹: ۳۶ به نقل از امیدوار).

مطالعه نتایج بارش حداکثر روزانه با دوره بازگشت دو سال نشان می دهد بیشترین خندق ها (۸۱ درصد) در طبقه بارش ۲۶/۴۲-۲۳/۷۰ میلیمتر واقع شده است. مطالعات نشان می دهد که آستانه بارندگی برای ایجاد و رشد خندق در خاک های با بافت سبک و درصد پوشش گیاهی پایین بسیار کمتر از آستانه بارندگی در خاک های با بافت سنگین و پوشش گیاهی متراکم می باشد (پازن و همکاران، ۲۰۰۳: ۱۰۷) و چنانچه درصد اشباع خاک پایین باشد، وقوع بارش های شدید می تواند موجب جریان سطحی و فرسایش خندقی شود (استرانک، ۲۰۰۳: ۱۹۰).

بررسی طبقات ارتفاعی نشان می دهد بیشترین گسترش خندق ها (۶۱/۴ درصد) در ارتفاع ۲۴۰۰ - ۲۰۰۰ متر است که با نتایج پژوهش عثمان صالح و همکار (۲۰۱۱) مطابقت دارد. و در ارتفاع بالاتر وقوع خندق کاهش می یابد بطوریکه در ارتفاع ۳۰۰۰-۲۶۰۰ هیچ خندقی مشاهده نشده است.

بررسی نتایج فاصله از جاده نشان می دهد که بیشترین خندق ها در فاصله بیشتر از ۵۰۰ متر از جاده واقع شدند و فقط ۱۲/۸ درصد از خندق ها در فاصله ۱۰۰-۰ متر از جاده قرار دارند. لذا جاده تاثیر کمی در ایجاد خندق در منطقه مورد مطالعه دارد و با نتایج پژوهش نیسن و همکاران (۲۰۰۲) مطابقت ندارد.

بررسی نتایج فاصله از آبراهه نشان می دهد که ۳۸ درصد خندق ها در فاصله ۱۰۰-۰ متر و ۷۶ درصد از خندق ها در فاصله ۲۰۰-۰ متری از آبراهه قرار دارند و این امر نشان دهنده تاثیر آبراهه در تشکیل خندق است.

نتایج کاربرد فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (جدول ۳) نشان می دهد که عوامل سنگ شناسی، منابع و قابلیت اراضی، خاک و کاربری نقش مهمتری نسبت به سایر عوامل در وقوع پدیده فرسایش خندقی در حوضه مورد مطالعه دارند که با نتایج تحقیقات گنجعلی (۱۳۸۸)، شادفر (۱۳۸۹، ۱۳۹۰) مطابقت دارد.

نتایج تعریف تابع عضویت فازی مثلثی و گوسی برای هریک از عوامل تاثیرگذار در پهنه بندی حساسیت به فرسایش خندقی با استفاده از منطق فازی در شکل های ۳ و ۴ ارائه گردیده است. شکل ها نشان می دهند که هر یک از طبقات عوامل موثر در پهنه بندی حساسیت به فرسایش خندقی که به سمت راست گرایش دارد وزن بیشتری را در بین طبقات دیگر به خود اختصاص داده است. همچنین تابع عضویت فازی مثلثی و گوسی عوامل تاثیرگذار در پهنه بندی حساسیت به فرسایش خندقی بر اساس وزن بدست آمده در مدل AHP در شکل ۵ نشان داده شده است. بیشترین وزن به عامل سنگ شناسی و کمترین به عامل ارتفاع از سطح دریا تعلق دارد.

نقشه های پهنه بندی حساسیت به فرسایش خندقی با استفاده از منطق فازی و توابع عضویت مثلثی و گوسی در شکل ۶ ارائه شده است. میزان حساسیت به فرسایش خندقی در این نقشه ها در چهار رده کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد نشان داده شده است. نتایج حاصل از ارزیابی نقشه های پهنه بندی حساسیت به فرسایش خندقی با استفاده از مدل چند شاخصه فازی و توابع عضویت مثلثی و گوسی بر مبنای ۳۰٪ پهنه های خندقی شاهد در جدول های ۴ و ۵ ارائه شده است. نتایج پهنه بندی با استفاده از روش تصمیم گیری چند شاخصه فازی و تابع عضویت مثلثی نشان می دهد که به ترتیب ۸/۳، ۱۴/۱۴، ۲۸/۲ و ۴۹/۳۵ درصد و با تابع عضویت گوسی به ترتیب ۸/۸۷، ۱۴/۵۷، ۲۶/۷۱ و ۴۹/۸۶ درصد از مساحت منطقه مورد مطالعه دارای حساسیت خیلی زیاد، زیاد، متوسط و کم به فرسایش خندقی می باشد. طبقات دارای حساسیت خیلی زیاد به فرسایش خندقی به ترتیب بر رسوبات آبرفتی سست (Qt1)، اجزاء واحد اراضی ۱،۴،۳ (فلات ها و تراس های فوقانی)، خاک های T.H.X، کاربری مراتع ضعیف، طبقه شیب ۳۰٪-۱۵، حداکثر بارش روزانه ۲۶/۴-۲۳/۷ میلیمتر با دوره بازگشت دو سال، فاصله ۲۰۰ متر از آبراهه و جهت های غرب و جنوب منطبق می باشند. برای شناسایی نقشه پهنه بندی حساسیت به فرسایش خندقی صحیح تر و با دقت بالاتر از شاخص جمع کیفی (QS) استفاده شده است. شاخص جمع

کیفی بالاتر نمایانگر جدایش بهتر بین رده های مختلف حساسیت می باشد. نقشه تهیه شده با استفاده از توابع عضویت مثلثی دارای شاخص جمع کیفی (QS)، ۴/۳۶ و نقشه تهیه شده با استفاده از توابع عضویت گوسی دارای شاخص جمع کیفی (QS)، ۴/۲۲ می باشد. بالا بودن و نزدیک بودن مقادیر شاخص جمع کیفی در این دو نقشه پهنه بندی نشان می دهد که هر دو تابع گوسی و مثلثی دارای قابلیت بالایی در تفکیک اراضی حساس به فرسایش خندقی می باشند و نوع تابع فازی سازی تاثیر زیادی در نتایج ندارد. نتایج روش اعتبارسنجی، قدرت پیش بینی مدل را رضایت بخش نشان میدهد زیرا حدود ۸۷ تا ۸۸ درصد از پهنه های خندقی مربوط به داده های ارزیابی مدل (۴۳ پهنه خندقی)، دقیقاً در طبقات با حساسیت زیاد و خیلی زیاد قرار می گیرند (کانفرتی و همکاران، ۲۰۱۱: ۸۹۴). با توجه به اینکه درجه حساسیت یا نرخ کلی پتانسیل وقوع فرسایش خندقی (مطلوبیت فازی) در روش تصمیم گیری چند شاخصه فازی در دو مرحله صورت می گیرد، در مرحله اول برای هر یک از طبقات عوامل تابع عضویت فازی تعریف می شود و در مرحله دوم ارجحیت هر یک از عوامل از طریق مدل AHP محاسبه و بر اساس آن برای عوامل تاثیرگذار تابع عضویت فازی تعیین می شود (کوره پزان دزفولی، ۱۳۸۷: ۲۰۳). این مدل نسبت به روش هایی که برای وزن دادن به طبقات عوامل موثر از روش نسبت فراوانی و نرمال سازی (قدوسی، ۱۳۸۲، داودی راد و همکاران، ۱۳۸۸، شادفر و همکاران، ۱۳۹۰) و یا برای فازی کردن نقشه های رستری عوامل از توابع عضویت فازی در نرم افزار ArcGIS 10 (صفاری، ۱۳۹۱) استفاده شده است، دقت بسیار بالاتری در تهیه نقشه های پهنه بندی دارد. زیرا در این روش ها فازی سازی در یک مرحله انجام می شود، لذا وزن عوامل موثر در وقوع فرسایش خندقی و یا زمین لغزش محاسبه نمی شود و برای تعیین مقادیر عضویت فازی طبقات عوامل موثر نیز فقط از یک تابع عضویت استفاده می شود. به عبارت دیگر برای تمام پیکسل های موجود در هر طبقه از عوامل موثر فقط از یک وزن تک شاخصه (بر اساس طبقات عوامل) استفاده می شود. اما در روش تصمیم گیری چند شاخصه فازی برای هر ۲۴۹۵۸۴ پلیگون محدوده مورد مطالعه، وزن جداگانه چند شاخصه (بر اساس طبقات عوامل و عوامل تاثیر گذار) در بازه بین صفر و یک محاسبه می شود. در استفاده از عملگر ماکزیمم-مینیمم بایستی متذکر شد، از آنجا که در عملگر ماکزیمم ارزش پیکسل ها به سمت یک میل می کند، در نتیجه تعداد بیشتری پیکسل در کلاس حساسیت بالا و خیلی بالا به فرسایش خندقی قرار می گیرند و به همین دلیل این عملگر حساسیت خیلی کمی در پهنه بندی دارد و در عملگر مینیمم ارزش پیکسل ها به سمت صفر میل می کند و در نتیجه تعداد پیکسل های کمتری در کلاس حساسیت بالا و خیلی بالا به فرسایش خندقی قرار می گیرند و حساسیت زیادی در پهنه بندی دارد (پورقاسمی، ۱۳۸۶: ۱۰۲). در اینجا به منظور تعدیل حساسیت خیلی بالای عملگر مینیمم و دقت خیلی کم عملگر ماکزیمم از ترکیب ماکزیمم-مینیمم استفاده شده است (کوره پزان دزفولی، ۱۳۸۷: ۵۱).

جدول ۱: مقادیر عضویت فازی مربوط به کلاس های عوامل موثر در فرسایش خندقی

| عامل سنگ شناسی | | | | | | |
|----------------|--------------------|------------|---------------------|--------------|-------------|-------------------|
| طبقه | مساحت طبقه (هکتار) | درصد طبقات | مساحت خندقی (هکتار) | خندقی (درصد) | نسبت تراکمی | مقادیر عضویت فازی |
| E5 | ۲۷۸۳/۶۷ | ۳۱/۳۱ | ۹/۶۴ | ۸/۶۲ | ۰/۲۷۵ | ۰/۱۴۱ |
| Ehb6 | ۲۵۵/۲۲ | ۲/۵۳ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰/۱ |
| Eig6 | ۲۰۸۵/۸۸ | ۲۳/۴۶ | ۱/۲۳ | ۱/۱۰ | ۰/۰۴۷ | ۰/۱۰۷ |
| Etb6 | ۳۹۵/۹۶ | ۴/۴۵ | ۱/۹۹ | ۱/۷۷ | ۰/۴۰ | ۰/۱۷۴ |
| EV4 | ۲۸۱/۵۹ | ۳/۱۷ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰/۱ |
| EV6 | ۵۹/۴۹ | ۰/۶۷ | ۰/۲۸ | ۰/۲۵ | ۰/۳۷۴ | ۰/۱۵۶ |
| gd | ۱۵/۴۷ | ۰/۱۷ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰/۱ |
| Js | ۸۷۱/۹۳ | ۹/۸۱ | ۱۷/۲۵ | ۱۵/۴۲ | ۱/۵۷۲ | ۰/۳۳۴ |
| Ki1 | ۲۰/۰۶ | ۰/۲۳ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰/۱ |
| OM12 | ۱۱۲/۴۴ | ۱/۲۷ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰/۱ |

| | | | | | | |
|---|-------------|-------------|---------------------|------------|--------------------|-----------|
| ۰/۱۱۸ | ۰/۱۲۳ | ۰/۳۳ | ۰/۳۷ | ۲/۶۷ | ۲۳۷/۳۴ | OMim |
| ۰/۱ | ۰ | ۰ | ۰ | ۲/۷۱ | ۲۴۱/۲۸ | PI-QC |
| ۰/۱ | ۰ | ۰ | ۰ | ۲/۷۶ | ۲۴۵/۷۱ | Qai |
| ۰/۹ | ۵/۳۷۳ | ۷۲/۴۸ | ۸۱/۱ | ۱۳/۴۹ | ۱۱۹۹/۵۳ | Qt1 |
| ۰/۱۰۴ | ۰/۰۲۹ | ۰/۰۴ | ۰/۰۴ | ۱/۳۱ | ۱۱۶/۱۷ | Qt2 |
| E5: تناوب کنگلومرا، ماسه سنگ، شیل و مارن، توف اسیدی و آهک Ehb6: سنگ های آتشفشانی حد واسط Ehb6: ایگمبریت (توف یا خاکستر آتشفشانی) Etb6: تناوب توف و گدازه با ترکیب اسیدی تا حد وسط EV4: تناوب توف، گدازه حد واسط و آهک EV6: سنگ های آتشفشانی بازیگ تا اسیدی gd: گرانودیوریت و مونودیوریت Js: شیل و سیلتستون کمی دگرگون شده Ki1: سنگ آهک کراتاسه OM12: سنگ آهک فسیل دار OMim: آهک و مارن PI-QC: کنگلومرا Qai: آبرفت جوان Qt1: پادگانه ها و مخروط افکنه های قدیمی Qt2: پادگانه ها و مخروط افکنه های جوان | | | | | | |
| عامل شیب | | | | | | |
| مقادیر عضویت فاز | نسبت تراکمی | خندق (درصد) | مساحت خندقی (هکتار) | درصد طبقات | مساحت طبقه (هکتار) | طبقه |
| ۰/۶۷۳ | ۱/۵۰۹ | ۲۳/۶۵ | ۲۶/۴۶ | ۱۵/۶۸ | ۱۳۹۳/۷۴ | ۰-۱۵ |
| ۰/۹ | ۲/۰۷۶ | ۴۸/۰۶ | ۵۳/۷۸ | ۲۳/۱۵ | ۲۰۵۸/۳۳ | ۱۵-۳۰ |
| ۰/۳۷۷ | ۰/۷۷۰ | ۲۰/۳۳ | ۲۲/۷۴ | ۲۶/۴۱ | ۲۳۴۸/۱۱ | ۳۰-۴۵ |
| ۰/۱۹۹ | ۰/۳۲۸ | ۶/۸۳ | ۷/۶۵ | ۲۰/۸۷ | ۱۸۵۵/۴۰ | ۴۵-۶۰ |
| ۰/۱ | ۰/۰۸۱ | ۱/۱۳ | ۱/۲۶ | ۱۳/۹ | ۱۲۳۶/۱۳ | > ۶۰ |
| عامل جهت شیب | | | | | | |
| مقادیر عضویت فاز | نسبت تراکمی | خندق (درصد) | مساحت خندقی (هکتار) | درصد طبقات | مساحت طبقه (هکتار) | طبقه |
| ۰/۲۴ | ۰/۸۰۹ | ۰/۹۸ | ۱/۱ | ۱/۲۱ | ۱۰۷/۴۷ | هموار |
| ۰/۲۵۷ | ۰/۸۲۹ | ۱۵/۸۷ | ۱۷/۷۸ | ۱۹/۱۵ | ۱۷۰۳/۶۴ | شمال |
| ۰/۱ | ۰/۶۴۵ | ۱۵/۱۵ | ۱۶/۹۸ | ۲۳/۵۱ | ۲۹۰۱/۱۲ | شرق |
| ۰/۳۸۵ | ۰/۹۷۹ | ۳۳/۸۲ | ۳۷/۷۹ | ۳۴/۵۴ | ۳۰۷۱/۹۳ | جنوب |
| ۰/۹ | ۱/۵۸۳ | ۳۴/۱۸ | ۳۸/۲۹ | ۲۱/۵۹ | ۱۹۲۰/۸۱ | غرب |
| عامل ارتفاع | | | | | | |
| مقادیر عضویت فاز | نسبت تراکمی | خندق (درصد) | مساحت خندقی (هکتار) | درصد طبقات | مساحت طبقه (هکتار) | طبقه |
| ۰/۲۴۶ | ۰/۸۷۷ | ۵/۰۲ | ۵/۶۲ | ۵/۷۲ | ۵۰۸/۵۶ | ۱۶۰۰-۱۸۰۰ |
| ۰/۳۱۳ | ۱/۲۷۷ | ۱۱/۵۱ | ۱۲/۸۸ | ۹/۰۲ | ۸۰۱/۶۹ | ۱۸۰۰-۲۰۰۰ |
| ۰/۹ | ۴/۷۹۴ | ۶۱/۲۸ | ۶۸/۵۸ | ۱۲/۷۸ | ۱۱۳۶/۵۰ | ۲۰۰۰-۲۲۰۰ |
| ۰/۲۰۸ | ۰/۶۴۸ | ۱۹/۷۶ | ۲۲/۱۱ | ۳۰/۵۰ | ۲۷۱۱/۶۶ | ۲۲۰۰-۲۴۰۰ |
| ۰/۱۱۴ | ۰/۰۸۱ | ۲/۴۴ | ۲/۷۲ | ۳۰/۲۳ | ۲۶۸۷/۹۹ | ۲۴۰۰-۲۶۰۰ |
| ۰/۱ | ۰ | ۰ | ۰ | ۱۱/۷۶ | ۱۰۴۵/۳۳ | ۲۶۰۰-۳۰۰۰ |
| عامل فاصله از جاده | | | | | | |
| مقادیر عضویت فاز | نسبت تراکمی | خندق (درصد) | مساحت خندقی (هکتار) | درصد طبقات | مساحت طبقه (هکتار) | طبقه |
| ۰/۳۲۳ | ۰/۸۶۹ | ۱۲/۸۳ | ۱۶/۶۰ | ۱۷/۰۸ | ۱۵۱۸/۳۹ | ۰-۱۰۰ |
| ۰/۶۱۹ | ۱/۰۶۸ | ۱۴/۶۷ | ۱۶/۴۲ | ۱۳/۷۴ | ۱۲۲۱/۹۲ | ۱۰۰-۲۰۰ |
| ۰/۶۰۷ | ۱/۰۶۰ | ۱۱/۹۷ | ۱۳/۴۰ | ۱۱/۲۹ | ۱۰۰۳/۹۲ | ۲۰۰-۳۰۰ |
| ۰/۹ | ۱/۲۵۷ | ۱۱/۴۴ | ۱۲/۷۹ | ۹/۱ | ۸۰۸/۹۴ | ۳۰۰-۴۰۰ |
| ۰/۱ | ۰/۷۱۹ | ۵/۶۱ | ۶/۲۸ | ۷/۸۰ | ۶۹۳/۳۳ | ۴۰۰-۵۰۰ |
| ۰/۵۳۶ | ۱/۰۱۲ | ۴۱/۴۹ | ۴۶/۴۲ | ۴۰/۹۸ | ۳۶۴۵/۳ | > ۵۰۰ |

| فاصله از آبراهه | | | | | | |
|--|-------------|-------------|---------------------|------------|--------------------|--------------|
| مقادیر عضویت فاز | نسبت تراکمی | خندق (درصد) | مساحت خندقی (هکتار) | درصد طبقات | مساحت طبقه (هکتار) | طبقه |
| ۰/۴۰۰ | ۰/۹۶۲ | ۳۸/۰۶ | ۴۲/۵۹ | ۳۹/۵۶ | ۳۵۱۷/۷۲ | ۰-۱۰۰ |
| ۰/۹ | ۱/۲۶۴ | ۳۷/۹۷ | ۴۲/۴۸ | ۳۰/۰۴ | ۲۶۷۱/۱۴ | ۱۰۰-۲۰۰ |
| ۰/۱ | ۰/۷۸۱ | ۱۳/۵۵ | ۱۵/۱۶ | ۱۷/۳۶ | ۱۵۴۳/۵۴ | ۲۰۰-۳۰۰ |
| ۰/۱۳۱ | ۰/۸۰۰ | ۱۰/۴۳ | ۱۱/۶۷ | ۱۳/۰۴ | ۱۱۵۹/۳۲ | > ۳۰۰ |
| عامل کاربری | | | | | | |
| مقادیر عضویت فاز | نسبت تراکمی | خندق (درصد) | مساحت خندقی (هکتار) | درصد طبقات | مساحت طبقه (هکتار) | طبقه |
| ۰/۲۴۹ | ۰/۸۴۶ | ۵/۰۲ | ۵/۶۲ | ۵/۹۴ | ۵۲۷/۷۶ | کشاورزی دیمی |
| ۰/۱۱۱ | ۰/۰۶۰ | ۰/۳۵ | ۰/۴۰ | ۵/۸۸ | ۵۲۳/۱۵ | باغ |
| ۰/۱ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰/۵۹ | ۵۲/۶۴ | کشاورزی آبی |
| ۰/۱۳۰ | ۰/۱۷۰ | ۱۱/۷۵ | ۱۳/۱۵ | ۶۹/۰۹ | ۶۱۴۲/۹۹ | مراتع متوسط |
| ۰/۱۰۴ | ۰/۰۲۵ | ۰/۰۱ | ۰/۰۱ | ۰/۲۴ | ۲۱/۳۴ | مسکونی |
| ۰/۹ | ۴/۵۳۸ | ۸۲/۸۸ | ۹۲/۷۳ | ۱۸/۲۶ | ۱۶۳۳/۸۲ | مراتع ضعیف |
| عامل خاک | | | | | | |
| مقادیر عضویت فاز | نسبت تراکمی | خندق (درصد) | مساحت خندقی (هکتار) | درصد طبقات | مساحت طبقه (هکتار) | طبقه |
| ۰/۱۹۹ | ۰/۹۹۳ | ۵/۰۲ | ۵/۶۲ | ۵/۰۶ | ۴۴۹/۷۰ | C.H.X |
| ۰/۲۵۷ | ۱/۵۷۲ | ۱۵/۴۲ | ۱۷/۲۵ | ۹/۸۱ | ۸۷۱/۹۳ | D.X.O |
| ۰/۱۰۳ | ۰/۰۲۹ | ۰/۰۴ | ۰/۰۴ | ۱/۳۱ | ۱۱۶/۱۷ | F.H.X |
| ۰/۱ | ۰ | ۰ | ۰ | ۲/۷۱ | ۲۴۱/۲۶ | L.H.X |
| ۰/۱ | ۰ | ۰ | ۰ | ۲/۵۳ | ۲۲۵/۲۲ | L.X.O |
| ۰/۹ | ۷/۹۹۹ | ۶۷/۴۶ | ۷۵/۴۸ | ۸/۴۳ | ۷۴۹/۸۱ | T.H.X |
| ۰/۱ | ۰ | ۰ | ۰ | ۲/۷۶ | ۲۴۵/۷۴ | T.X.F |
| ۰/۱۱۸ | ۰/۱۷۹ | ۱۲/۰۷ | ۱۳/۵ | ۶۷/۳۹ | ۵۹۹۱/۹۱ | T.X.O |
| C.H.X : Calcic Haploxerepts D.X.O : Dystric Xerorthents F.H.X : Fluventic Haploxerepts L.H.X : Lithic Haploxerepts L.X.O : Xerorthents Lithic T.H.X : Typic Haploxerepts T.X.F : Xerofluents Typic T.X.O : Xerorthents Typic | | | | | | |
| عامل حداکثر بارش روزانه | | | | | | |
| مقادیر عضویت فاز | نسبت تراکمی | خندق (درصد) | مساحت خندقی (هکتار) | درصد طبقات | مساحت طبقه (هکتار) | طبقه |
| ۰/۳۱۱ | ۰/۷۶۱ | ۹/۵۹ | ۱۰/۷۴ | ۱۲/۶۰ | ۱۱۲۰/۵۱ | ۲۰/۹۸-۲۳/۷۰ |
| ۰/۹ | ۲/۸۸۷ | ۸۱/۰۸ | ۹۰/۷۳ | ۲۸/۰۹ | ۲۴۹۸/۰۵ | ۲۳/۷۰-۲۶/۴۲ |
| ۰/۱۵۱ | ۰/۱۸۴ | ۹/۳۲ | ۱۰/۴۳ | ۵۰/۷۱ | ۴۵۰۹/۲۶ | ۲۶/۴۲-۲۹/۱۴ |
| ۰/۱ | ۰ | ۰ | ۰ | ۸/۵۹ | ۷۶۳/۸۴ | ۲۹/۱۴-۳۱/۸۶ |
| عامل منابع و قابلیت اراضی | | | | | | |
| مقادیر عضویت فاز | نسبت تراکمی | خندق (درصد) | مساحت خندقی (هکتار) | درصد طبقات | مساحت طبقه (هکتار) | طبقه |
| ۰/۱۲۱ | ۰/۲۰۹ | ۷/۲۸ | ۸/۱۴ | ۳۴/۸۱ | ۳۰۹۴/۹۰ | ۱,۲,۲ |
| ۰/۱۱۵ | ۰/۱۴۷ | ۴/۷۹ | ۵/۳۶ | ۳۲/۵۸ | ۲۸۹۶/۱ | ۱,۲,۳ |
| ۰/۱ | ۰ | ۰ | ۰ | ۲/۵۳ | ۲۲۵/۲۲ | ۱,۲,۵ |
| ۰/۲۵۷ | ۱/۵۷۲ | ۱۵/۴۲ | ۱۷/۲۵ | ۹/۸۱ | ۸۷۱/۹۳ | ۱,۲,۷ |
| ۰/۱ | ۰ | ۰ | ۰ | ۲/۷۱ | ۲۴۱/۲۸ | ۲,۲,۳ |

| | | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|------|--------|-------|
| ۰/۱ | ۰/۰۳۹ | ۰/۰۴ | ۰/۰۴ | ۱/۳۱ | ۱۱۶/۱۷ | ۳,۲,۱ |
| ۰/۱۹۹ | ۰/۹۹۳ | ۵/۰۲ | ۵/۶۲ | ۵/۰۶ | ۴۴۹/۷۱ | ۳,۳,۱ |
| ۰/۹ | ۷/۹۹۹ | ۶۷/۴۶ | ۷۵/۴۸ | ۸/۴۳ | ۷۴۹/۸۱ | ۳,۴,۱ |
| ۰/۱ | ۰ | ۰ | ۰ | ۲/۷۶ | ۳۴۵/۷۱ | ۵,۱,۱ |

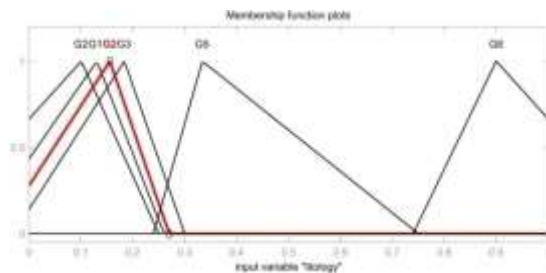
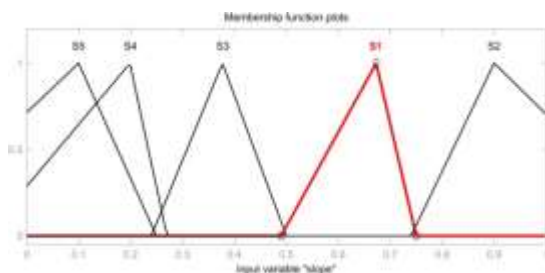
(اجزای واحد اراضی ۱,۲,۳ و ۱,۲,۵ و ۱,۲,۵ : تیپ کوه) (اجزای واحد اراضی ۲,۳,۳ : تیپ تپه) (اجزای واحد اراضی ۳,۲,۱ و ۳,۳,۱ و ۳,۴,۱ : تیپ فلات ها و تراس های فوقانی) (اجزای واحد اراضی ۵,۱,۱ : آبرفت بستر رودخانه)

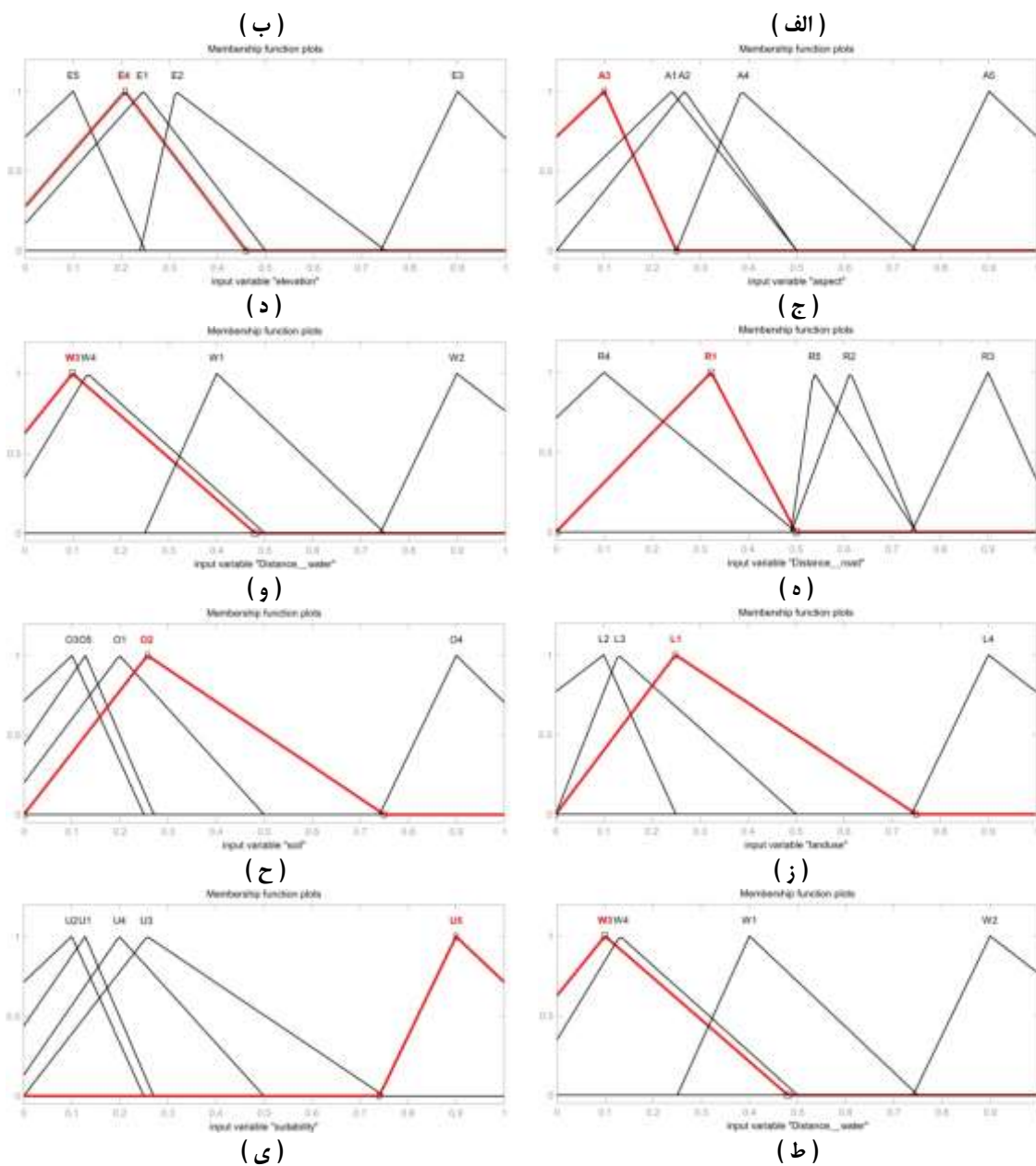
جدول ۲: ماتریس مقایسه زوجی عوامل

| Lithology | Suitability | Soil | Landuse | Slope | Rain | Water | Aspect | Road | Elevation | Feature | Pairwise comparison matrix |
|-----------|-------------|-------|---------|-------|------|-------|--------|-------|-----------|-------------|----------------------------|
| 0.143 | 0.167 | 0.167 | 0.143 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.25 | 0.333 | 1 | Elevation | 1 |
| 0.143 | 0.143 | 0.167 | 0.167 | 0.2 | 0.25 | 0.25 | 0.333 | 1 | 3 | Road | 2 |
| 0.167 | 0.167 | 0.167 | 0.2 | 0.25 | 0.3 | 0.333 | 1 | 3 | 4 | Aspect | 3 |
| 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.25 | 0.5 | 0.5 | 1 | 3 | 4 | 5 | Water | 4 |
| 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.25 | 0.5 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Rain | 5 |
| 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.333 | 1 | 2 | 2 | 4 | 5 | 6 | Slope | 6 |
| 0.5 | 0.5 | 0.5 | 1 | 3 | 4 | 4 | 5 | 6 | 7 | Landuse | 7 |
| 1 | 1 | 1 | 2 | 4 | 5 | 5 | 6 | 6 | 6 | Soil | 8 |
| 1 | 1 | 1 | 2 | 4 | 5 | 5 | 6 | 7 | 6 | Suitability | 9 |
| 1 | 1 | 1 | 2 | 4 | 5 | 5 | 6 | 7 | 7 | Lithology | 10 |

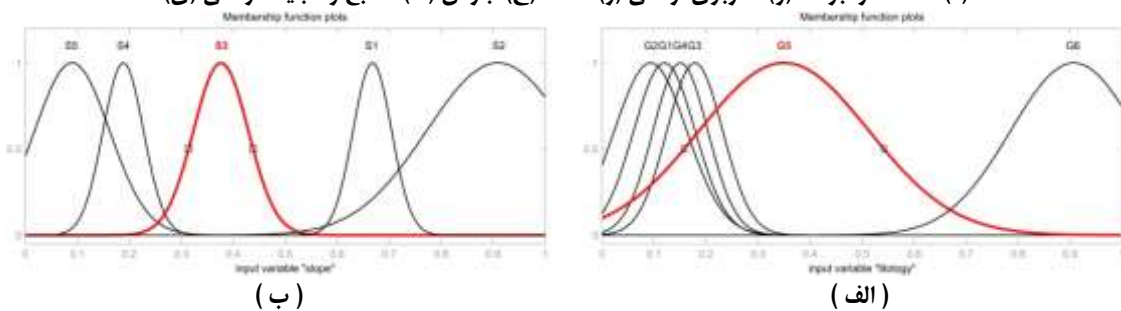
جدول ۳: وزن نسبی عوامل در روش AHP و مقادیر عضویت فازی

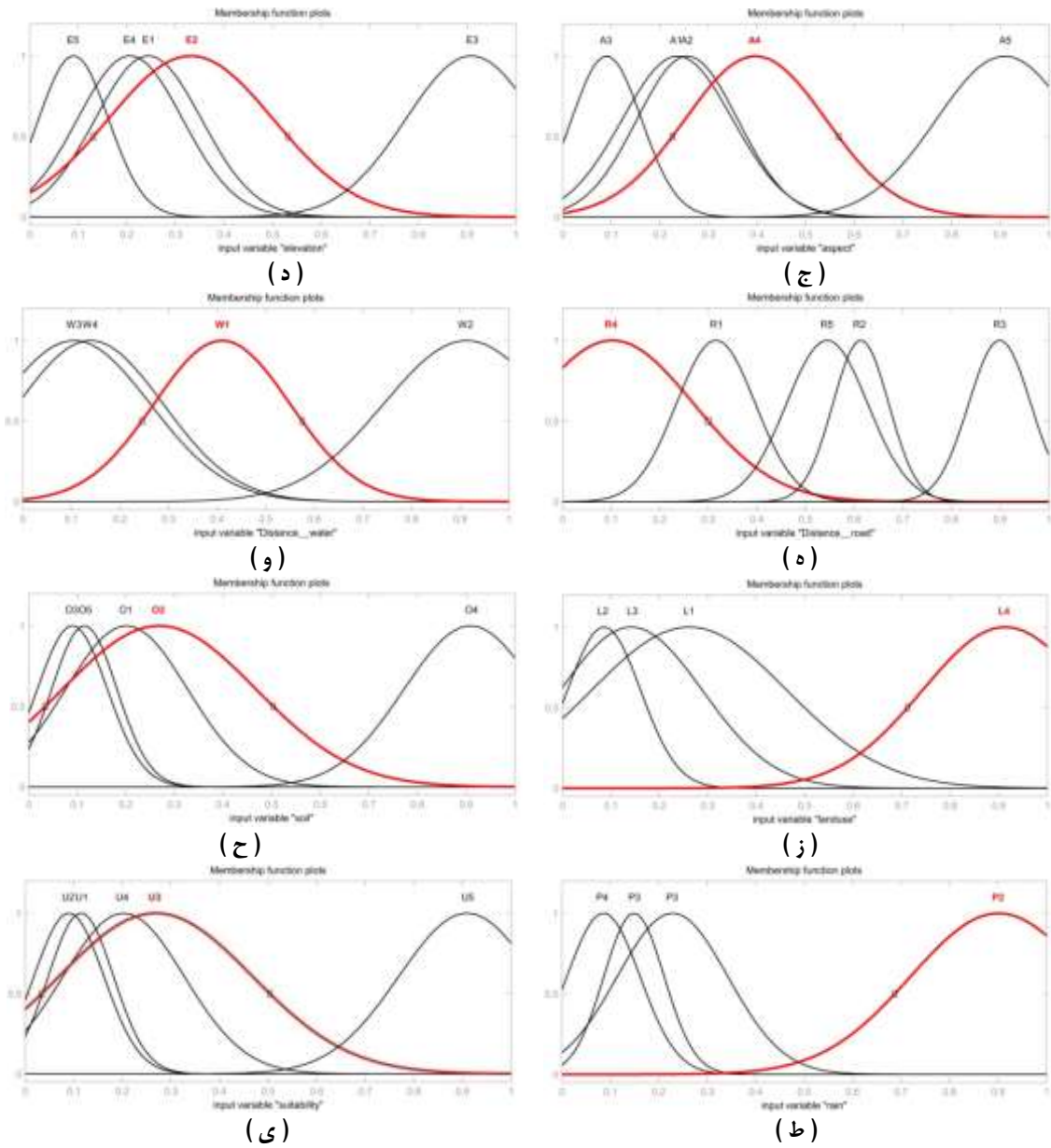
| Fuzzy Membership Values | Weight | Feature | Results - Relative weights in weight order |
|-------------------------|--------|-------------|--|
| 0.9 | 0.201 | Lithology | 10 |
| 0.891 | 0.199 | Suitability | 9 |
| 0.881 | 0.196 | Soil | 8 |
| 0.621 | 0.137 | Landuse | 7 |
| 0.361 | 0.078 | Slope | 6 |
| 0.28 | 0.059 | Rain | 5 |
| 0.252 | 0.053 | Water | 4 |
| 0.175 | 0.035 | Aspect | 3 |
| 0.127 | 0.024 | Road | 2 |
| 0.1 | 0.018 | Elevation | 1 |



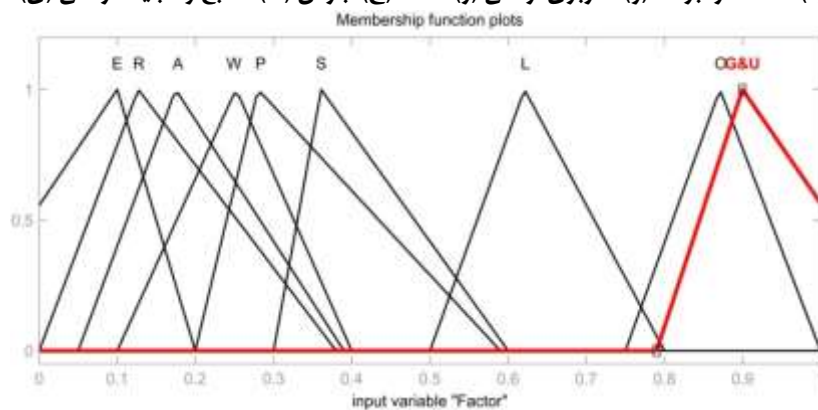


شکل ۳: توابع عضویت فازی مثلثی طبقات عوامل سنگ‌شناسی (الف)، شیب (ب)، جهت شیب (ج)، ارتفاع (د)، فاصله از جاده (ه)، فاصله از آبراهه (و)، کاربری اراضی (ز)، خاک (ح)، بارش (ط)، منابع و قابلیت اراضی (ی)

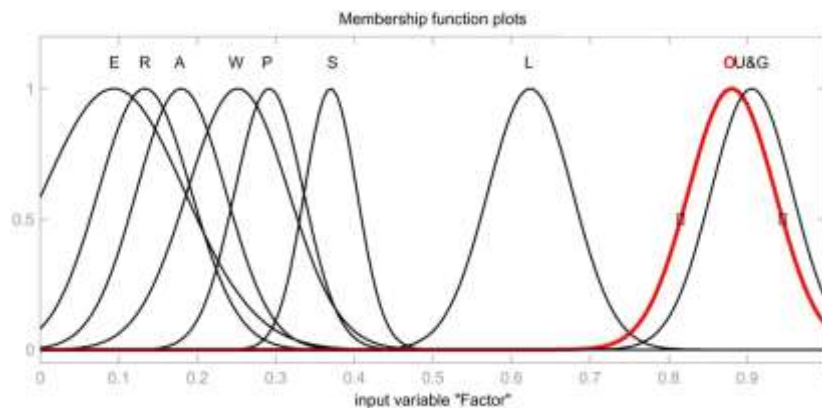




شکل ۴: توابع عضویت فازی گوسی طبقات عوامل سنگ شناسی (الف)، شیب (ب)، جهت شیب (ج)، ارتفاع (د)، فاصله از جاده (ه)، فاصله از آبراهه (و)، کاربری اراضی (ز)، خاک (ح)، بارش (ط)، منابع و قابلیت اراضی (ی)



از چپ به راست E: ارتفاع R: فاصله از جاده A: جهت W: فاصله از آبراهه P: بارش S: شیب L: کاربری O: خاک G&U سنگ شناسی و قابلیت اراضی
(الف)



از چپ به راست E: ارتفاع R: فاصله از جاده A: جهت W: فاصله از آبراهه P: بارش S: شیب L: کاربری O: خاک G&U سنگ شناسی و قابلیت اراضی
(ب)

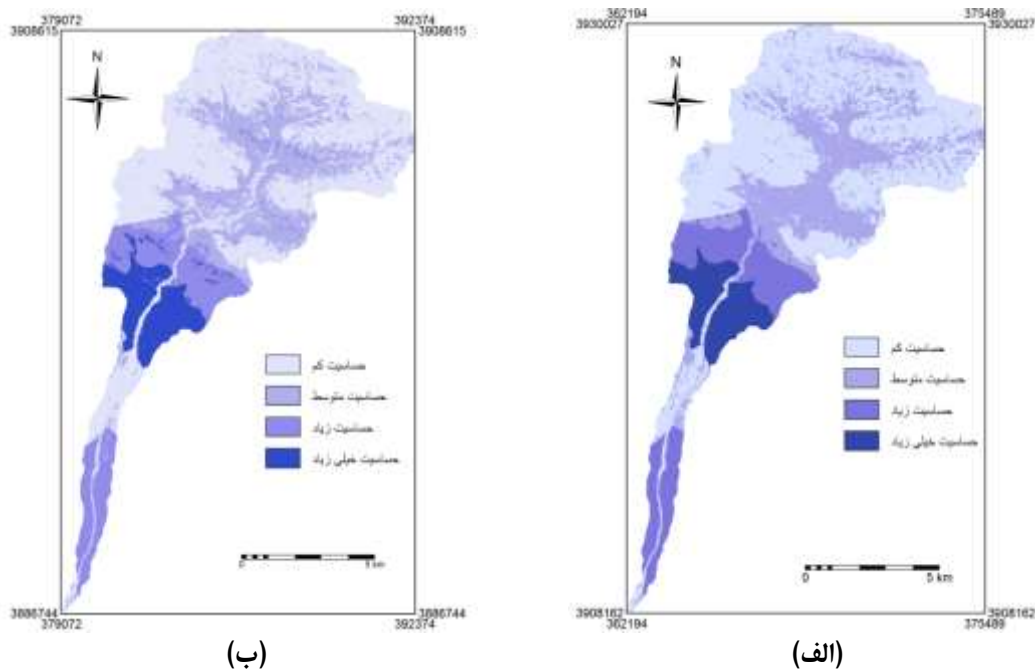
شکل ۵: تابع عضویت فازی مثلثی (الف) و گوسی (ب) عوامل تاثیر گذار

جدول ۴: ارزیابی نقشه حساسیت به فرسایش خندقی با استفاده تابع عضویت فازی مثلثی

| طبقه حساسیت | مساحت منطقه(درصد) | درصد خندق | DR | QS |
|-------------|-------------------|-----------|-------|-------|
| کم | ۴۹/۳۵ | ۴/۰۵ | ۰/۰۸۳ | ۰/۴۱۳ |
| متوسط | ۲۸/۲۰ | ۹/۰۷۵ | ۰/۳۲۲ | ۰/۱۳۰ |
| زیاد | ۱۴/۱۴ | ۲۲/۱۹۴ | ۱/۵۵۸ | ۰/۰۴۴ |
| خیلی زیاد | ۸/۳۰ | ۶۴/۶۸۴ | ۷/۷۰۲ | ۳/۷۷۳ |

جدول ۵: ارزیابی نقشه حساسیت به فرسایش خندقی با استفاده تابع عضویت فازی گوسی

| طبقه حساسیت | مساحت منطقه(درصد) | درصد خندق | DR | QS |
|-------------|-------------------|-----------|-------|-------|
| کم | ۴۹/۸۶ | ۲/۱۵۹ | ۰/۰۴۳ | ۰/۴۵۷ |
| متوسط | ۲۶/۷۱ | ۹/۴۶۷ | ۰/۳۵۵ | ۰/۱۱۱ |
| زیاد | ۱۴/۵۷ | ۲۳/۱۱۱ | ۱/۵۸۲ | ۰/۰۴۹ |
| خیلی زیاد | ۸/۸۷ | ۶۵/۲۶۳ | ۷/۳۶۳ | ۳/۶۰۳ |



شکل ۶: نقشه حساسیت به فرسایش خندقی با استفاده از تابع عضویت فازی مثلثی (الف) و با استفاده از تابع عضویت فازی گوسی (ب)

نتیجه گیری

نتایج پهنه بندی با استفاده از روش تصمیم‌گیری چند شاخصی فازی و تابع عضویت مثلثی نشان می‌دهد که به ترتیب ۸/۳، ۱۴/۱۴، ۲۸/۲ و ۴۹/۳۵ درصد و با تابع عضویت گوسی به ترتیب ۸/۸۷، ۱۴/۵۷، ۲۶/۷۱ و ۴۹/۸۶ درصد از مساحت منطقه مورد مطالعه دارای حساسیت خیلی زیاد، زیاد، متوسط و کم به فرسایش خندقی می‌باشد. بر اساس نتایج فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (جدول ۳) عامل سنگ شناسی با ضریب ۰/۲۰۱ دارای بیشترین تاثیر و عامل ارتفاع با ضریب ۰/۱۸ دارای کمترین تاثیر در ایجاد فرسایش خندقی حوضه مراغه می‌باشد. طبقات دارای حساسیت خیلی زیاد به فرسایش خندقی به ترتیب بر رسوبات آبرفتی سست (Q1)، اجزاء واحد اراضی ۱،۴،۳ شامل فلات‌ها و تراس‌های فوقانی، خاک‌های T.H.X، کاربری مراتع ضعیف، طبقه شیب ۳۰٪-۱۵، حداکثر بارش روزانه ۲۶/۴-۲۳/۷ میلیمتر با دوره بازگشت دو سال، فاصله ۲۰۰ متر از آبراهه و جهت‌های غرب و جنوب منطبق می‌باشند. برای شناسایی نقشه پهنه بندی حساسیت به فرسایش خندقی صحیح تر و با دقت بالاتر از شاخص جمع کیفی (QS) استفاده شده است. شاخص جمع کیفی بالاتر نمایانگر جدایش بهتر بین رده‌های مختلف حساسیت می‌باشد. نقشه تهیه شده با استفاده از توابع عضویت مثلثی دارای شاخص جمع کیفی (QS)، ۴/۳۶ و نقشه تهیه شده با استفاده از توابع عضویت گوسی دارای شاخص جمع کیفی (QS)، ۴/۲۲ می‌باشد. بالا بودن و نزدیک بودن مقادیر شاخص جمع کیفی در این دو نقشه پهنه بندی نشان می‌دهد که هر دو تابع گوسی و مثلثی دارای قابلیت بالایی در تفکیک اراضی حساس به فرسایش خندقی می‌باشند. نتایج روش اعتبارسنجی، قدرت پیش‌بینی مدل را رضایت‌بخش نشان می‌دهد زیرا حدود ۸۷ تا ۸۸ درصد از پهنه‌های خندقی مربوط به داده‌های ارزیابی مدل (۴۳ پهنه خندقی)، در طبقات با حساسیت زیاد و خیلی زیاد قرار می‌گیرند. با توجه به اینکه درجه حساسیت یا نرخ کلی پتانسیل وقوع فرسایش خندقی (مطلوبیت فازی) در روش تصمیم‌گیری چند شاخصی فازی در دو مرحله صورت می‌گیرد، در مرحله اول برای هر یک از طبقات عوامل، تابع عضویت فازی تعریف می‌شود و در مرحله دوم ارجحیت هر یک از عوامل از طریق مدل AHP محاسبه و بر اساس آن برای عوامل تاثیرگذار تابع عضویت فازی تعیین می‌شود، این مدل نسبت به روش‌هایی که در آن فازی سازی در یک مرحله صورت می‌گیرد، دقت بسیار بالاتری در تهیه نقشه‌های پهنه

بندی دارد. در این پژوهش برای تعدیل حساسیت خیلی بالای عملگر مینیمم و دقت خیلی کم عملگر ماکزیمم از ترکیب ماکزیمم-مینیمم استفاده شده است.

منابع

- باعقیده، م.، علیجانی، ب. و ضیائی‌ان، پ (۱۳۹۰). بررسی امکان استفاده از شاخص پوشش گیاهی *NDVI* در تحلیل خشکسالی های استان
- اصفهان، مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، سال اول، شماره چهارم، تابستان ۱۳۹۰، صص ۱۶-۱
- پورقاسمی، ح. ر.، مرادی، ح. ر.، فاطمی عقدا، م.، مهدوی فر، م. ر. و محمدی، م (۱۳۹۰). ارزیابی عوامل ژئومورفولوژیکی و زمین شناسی در تهیه نقشه خطر با استفاده از منطق فازی و روش سلسه مراتبی (مطالعه موردی: بخشی از حوضه آبخیز هراز)، مجله پژوهش های حفاظت آب و خاک، جلد هجدهم، شماره چهارم، صص ۲۰-۱
- پورقاسمی، ح. ر.، مرادی، ح. ر.، فاطمی عقدا، م.، مهدوی فر، م. ر. و محمدی، م (۱۳۸۸). ارزیابی خطر زمین لغزش با استفاده از روش تصمیم گیری چند معیاره‌ی فازی، مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، سال سوم، شماره ۸، صص ۶۲-۵۱
- پورقاسمی، ح. ر. (۱۳۸۶). ارزیابی خطر زمین لغزش با استفاده از منطق فازی (مطالعه موردی: بخشی از حوضه آبخیز هراز). پایان نامه کارشناسی ارشد آبخیزداری تربیت مدرس، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی
- داودی راد، ع. ا.، شادفر، ص.، ابراهیمی، ن.، زاهدی پور، ج.، پور متین، ا.، آقا رضی، ج. و قدیبلگو، ج. (۱۳۸۸). گزارش نهایی طرح تحقیقاتی: واسنجی، اعتبار یابی و تکمیل مدل پیش بینی حساسیت اراضی به فرسایش خندقی در حوزه های آبخیز خشک و نیمه خشک (استان مرکزی)، وزارت جهاد کشاورزی، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری
- روشن ضمیر، س. (۱۳۸۸). پهنه‌بندی خطر زمین لغزش با استفاده از روش ارزش اطلاعاتی (مطالعه موردی: حوضه‌ی مراغه)، گزارش طرح تحقیقاتی، دانشگاه پیام نور
- شادفر، ص.، پیروان، ح. ر.، خلخالی، ع.، جعفری اردکانی، ع.، غیائی، ن.، طباطبایی، م. ر.، عرب خدری، م.، شریفی، ا.، سر رشته داری، ا. و سینجی، ع. (۱۳۹۰). گزارش نهایی طرح تحقیقاتی: واسنجی، اعتبار یابی و تکمیل مدل پیش بینی حساسیت اراضی به فرسایش خندقی در حوزه های آبخیز خشک و نیمه خشک (طرح ملی)، وزارت جهاد کشاورزی، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، ۱۰۵ ص
- شادفر، ص. (۱۳۹۰). بررسی فرسایش خندقی با استفاده از روش تحلیل سلسه مراتبی در شهرستان رودبار استان گیلان، فصلنامه پژوهش های محیطی، سال اول، شماره سوم، دانشگاه هرمزگان، صص ۳۰-۱۶
- شادفر، ص. (۱۳۸۹). مقدمه ای بر فرسایش خندقی، چاپ اول، نشر انتخاب، ۱۴۱ ص
- شمسی پور، ع. ا. و شیخی، م. (۱۳۸۹). پهنه بندی مناطق حساس و آسیب پذیری محیطی در ناحیه غرب فارس، با روش طبقه بندی فازی و
- فرآیند تحلیل سلسه مراتبی، پژوهش های جغرافیای طبیعی، شماره ۷۳، صص ۶۸-۵۳
- صفاری، ا. و احذر، آ. (۱۳۹۱) مقایسه مدل نسبت فراوانی و توابع عضویت فازی در پهنه بندی خطر زمین لغزش مطالعه موردی: جاده مریوان-
- سندیج، جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره ۴، صص ۹۶-۷۹
- عیسائی، حسین، امیر حسین چرخایی و حسین اعتراف، ۱۳۸۴، بررسی ارتباط خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک های لسی با اشکال
- فرسایشی در حوضه های اترک و گرگانرود در استان گلستان، سومین همایش ملی فرسایش و رسوب، صص ۶۳۹-۶۳۷
- فاطمی عقدا، س. م.، غیومیان، ج.، تشنه لب، م. و اشقلی فراهانی، ج. (۱۳۸۴). بررسی خطر زمین لغزش با استفاده از منطق فازی- مطالعه

- موردی: منطقه رودبار، مجله علوم دانشگاه تهران، شماره ۳۱، صص ۴۳-۶۴
- قدوسی، ج، (۱۳۸۲). مدل سازی مرفولوژی فرسایش خندقی و پهنه بندی خطر آن (مطالعه موردی در آبخیز زنجان رود) پایان نامه دکتری آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران
- کوره پزان دزفولی، ا. (۱۳۸۷). اصول تئوری مجموعه های فازی و کاربردهای آن در مدل سازی مسائل مهندسی آب، چاپ دوم، انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر، ۲۶۱ ص
- گنجعلی، ن. (۱۳۸۸). بررسی عوامل موثر بر فرسایش خندقی و پهنه بندی آن در منطقه نیزار قم، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه زابل
- مهدوی فر، م. ر. (۱۳۷۶). پهنه بندی خطر زمین لغزش منطقه خوش رستم (جنوب غربی شهرستان خلخال)، پایان نامه کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۵۴ ص
- مهدوی فر، م. ر. (۱۳۷۹). برنامه های محاسبه پهنه بندی خطر زمین لغزش با استفاده از مجموعه های فازی، چاپ نشده
- مهدوی فر، م. ر. و فاطمی عقدا، م. (۱۳۷۶). کاربرد تحلیل مجموعه های فازی در پهنه بندی خطر زمین لغزش و شرح سیستم کامپیوتری تهیه شده، مجموعه مقالات دومین سمینار زمین لغزه و کاهش خسارت آن. موسسه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله صص ۱۳۷-۱۴۵
- ناجی، س. (۱۳۸۵). پهنه بندی خطر زمین لغزش در محور ساری- کیاسر، پایان نامه کارشناسی ارشد زمین شناسی زیست محیطی. دانشگاه صنعتی شاهرود، ۸۵ ص

- Bouchnak, H., Sfar Felfoul, M., Boussema, M.R., Snane, M.H., (2009). Slope and rainfall effects on the volume of sediment yield by gully erosion in the Souar lithologic formation (Tunisia). *Catena* 78, 170-177
- Capra, A., Porto, P., Scicolone, B., (2001). Relationships between rainfall characteristics and ephemeral gully erosion in a cultivated catchment in Sicily (Italy). *Soil & Tillage Research* 105 (2009) 77-87
- Chaplot, V., Giboire, G., Marchand, P., Valentin, C., 2005. Dynamic modelling for linear erosion initiation and development under climate and land-use changes in northern Laos. *Catena* 63, 318-328.
- Conforti, M., Aucelli, P.P.C., Robustelli, G., Scarciglia, F. (2011). Geomorphology and GIS analysis for mapping gully erosion susceptibility in the Turbolo Stream catchment (Northern Calabria, Italy). *Natural Hazards* 56, 881-898.
- Dlapa, P., Chrenková, K., Mataix-Solera, J., Šimkovic, I. (2011). Soil profile improvement as a by-product of gully stabilization measures. *Catena* 92 (2012) 155-161
- Gabris, Gy., Kertesz, A., Zambo, L., (2003). Land use change and gully formation over the last 200 years in a hilly catchment. *Catena* 50, 151-164
- Hajeb, A., (2007). Cation Exchange Capacity. *Hajeb. Blogfa.com*
- Kompani-Zare, M., Soufi, M., Hamzehzarghani, H., Deghani, M., (2011). The effect of some watershed, soil characteristics and morphometric factors on the relationship between the gully volume and length in Fars Province, Iran. *Catena* 86, 150-159
- Lucà, F., Conforti, M., Robustelli, G., (2011). Comparison of GIS-based gully susceptibility mapping using bivariate and multivariate statistics: Northern Calabria, South Italy. *Geomorphology* 134, 297-308
- MahdaviFar, M.R., and Fatemi Aghda, S.M. (2002). Application fuzzy sets analysis in landslide hazard zonation and description provided computer system, *Proceeding 2st landslide and its increase*
- Munshower F.F. (1994). *Practical handbook of disturbed land revegetation* Lewis, Boca Raton [etc.].

- *disasters, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), pp: 137- 145*
- *Nazari Samani, A., Ahmadi, H., Jafari, M., Boggs, G., Ghoddousi, J., Malekian, A., (2009). Geomorphic*
- *threshold conditions for gully erosion in Southwestern Iran (Boushehr-Samal watershed). Journal of*
- *Asian Earth Sciences 35, 180–189*
- *Nearing, M.A., 2001. Potential changes in rainfall erosivity in the US with climate change during the 21(st) century. Journal of Soil and Water Conservation 56 (3), 220–232.*
- *Nyssen, J., Poesen, J., Moeyersons, J., Luyten, E., Veyret Picot, M., Deckers, J., Mitiku, H., Govers, G.,*
- *(2002). Impact of road building on gully erosion risk, a case study from the northern Ethiopian highlands.*
- *Earth. Surface Processes and Landforms 27 (12), 1267– 1283.*
- *Osman Salleh, K., F Mousazadeh, F., (2011). Gully erosion in semiarid regions. Procedia Social and*
- *Behavioral Sciences 19, 651–661*
- *Poesen, J., Nachtergale, J., Vertstraeten, G., Valentin, C., (2003). Gully erosion and. Importance and*
- *research needs. Catena 50 (2–4), 91– 134.*
- *Shahrivar, A., Sung, C.T., Jusop, S., Rahm, A.A., Soufi, M. (2012). Roles of SAR and EC in Gully Erosion Development (A Case Study of Kohgiluyeh va Boyer-Ahmad Province, Iran). Journal of Research in Agricultural Science Vol. 8, No. 1, Pages: 1- 12*
- *Strunk, H., (2003). Soil degradation and overland flow as causes of gully erosion on mountain pastures and in forests. Catena 50, 185– 198*
- *Vanacker, V., Vanderschaeghe, M., Govers, G., Willems, E., Poesen, J., Deckers, J., De Bievre, B., 2003. Linking hydrological, infinite slope stability and land-use change models through GIS for assessing the impact of deforestation on slope stability in high Andean watersheds. Geomorphology 52, 299–315*
- *Valentin, C., Poesen, J., Li, Y., (2005). Gully erosion: impacts, factors and control. Catena 63, 132–153.*
- *Van Oost, K., Govers, G., Desmet, P., 2000. Evaluating the effects of changes in landscape structure on soil erosion by water and tillage. Landscape Ecology 15, 577–589.*
- *Vanwallegem, T., Poesen, J., Nachtergaele, J., Verstraeten, G., (2005). Characteristics, controlling under*
- *factors and importance of deep gullies cropland on loess-derived soils. Geomorphology 69, 76– 91*
- *Vanwallegem, T., Van Den Eeckhaut, M., Poesen, J., Govers, G., Deckers, J., (2007). Spatial analysis of factors controlling the presence of closed depressions and gullies under forest: Application of rare event logistic regression. Geomorphology 95, 504–517*
- *Zucca, C., Canu, A., Della Peruta, R., (2006). Effects of land use and landscape on spatial distribution and*
- *morphological features of gullies in an agro-pastoral area in Sardinia (Italy). Catena 88, 87–95.*