

تعیین مناطق مستعد فرسایش خندقی با استفاده از تابع عضویت فازی

(مطالعه موردی: شهر مهر در جنوب استان فارس)

کاظم رنگرن - دانشیار گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.
زینب ظاهری عبده وند* - کارشناس ارشد سنجش از دور و GIS، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان.
مرضیه مکرم - دانشیار بخش مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی داراب، دانشگاه شیراز.

پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۴/۱۵ تأیید نهایی: ۱۴۰۰/۱۲/۰۴

چکیده

فرسایش خندقی از انواع فرسایش آبی است که رخداد و گسترش آن موجب تغییرات بارز در منظر زمین و پسرفت اراضی و تخریب محیط زیست می‌شود. این نوع فرسایش با توجه به ابعاد نسبتاً وسیع، توسعه سریع و تولید رسوب، سبب تخریب گسترده اراضی می‌گردد. برای کنترل این پدیده شناخت مکان‌هایی که مستعد ایجاد این نوع فرسایش هستند، بسیار مهم می‌باشد. با توجه به اهمیت موضوع هدف از این مطالعه تعیین مناطق مستعد فرسایش خندقی شهر مهر در جنوب استان فارس با استفاده از توابع عضویت فازی و مدل تحلیل سلسله مراتبی می‌باشد. برای این منظور ابتدا با استفاده از توابع عضویت، نقشه‌های فازی برای هر یک از پارامترها تهیه شد. در ادامه با استفاده از روش AHP وزن هر یک از پارامترها به منظور تهیه نقشه نهایی مناطق مستعد فرسایش خندقی تعیین شد. نتایج حاصل از روش فازی و AHP نشان داد که مناطق واقع در مرکز (حدود ۱۵ درصد) دارای حساسیت بیشتری نسبت به فرسایش خندقی می‌باشند. در انتها برای اعتبار سنجی مدل از منحنی ROC استفاده شد. نتایج نشان داد که در مناطقی که مستعد فرسایش خندقی هستند خندق‌های بزرگی در منطقه دیده شده است. و مقادیر AUC نزدیک به ۸۵ بدست آمد که نشان‌دهنده دقت بالای مدل برای پیش‌بینی نواحی مستعد فرسایش خندقی می‌باشد.

واژگان کلیدی: فرسایش خندقی، روش فازی و AHP جنوب استان فارس.

مقدمه

از میان انواع مختلف اشکال فرسایش آبی، فرسایش خندقی یکی از مهم‌ترین رخداد‌های موثر در نابودی خاک، تغییر مناظر، از بین رفتن منابع آب و پسرفت اراضی می‌باشد (پویسون و همکاران^۱، ۲۰۰۳). که تحت شرایط خاص محیطی به وقوع می‌پیوندد. این نوع فرسایش حالت تکامل یافته‌ای از فرسایش شیاری می‌باشد که در ابتدای کناره دره‌ها و یا روی دامنه‌ها و دشت‌ها و بخش‌های برش یافته (جاده‌ها و کانال‌ها) شکل می‌گیرد (توکر^۲، ۲۰۰۵). این نوع فرسایش در مناطق خشک و نیمه خشک به طور گسترده اتفاق می‌افتد (فرانکل^۳، ۲۰۱۲). به طور کلی فرسایش خندقی در صورت تشدید عوامل آنتروپوژنیک و تغییر در تعادل ژئوسیستمی (چنگ^۴ و همکاران، ۲۰۰۶)، تخریب اراضی، محدودیت در بهره برداری، گسترش بدلندها و اراضی بایر، آسیب به سازه‌های انسانی و افزایش رسوبگذاری در مخازن آب سدها ایجاد می‌شود (بوچانک^۵ و همکاران، ۲۰۰۹). بنابراین فرسایش آبی به ویژه از نوع فرسایش خندقی یکی از مسائل مهم و اصلی بازدارنده در توسعه مسائل اقتصادی و اجتماعی قلمداد می‌شود. در حقیقت یکی از مواردی که باعث کاهش توان تولید خاک و فقیر شدن آن و در نتیجه متروک شدن مزارع می‌گردد، ایجاد خندق در زمین‌های زراعی و غیر زراعی می‌باشد. و از این راه ضمن خسارت مستقیم به بخش تولیدات کشاورزی، خسارات زیادی نیز از طریق رسوب مواد در آبراهه‌ها، مخازن سدها، بنادر و کاهش ظرفیت آبگذری آن‌ها می‌شود. از سوی دیگر چون خندق‌ها حلقه ارتباطی بین بالادست آبخیز به کانال‌های انتقال آب در پائین دست آبخیز هستند، لذا از طریق افزایش پیوستگی و ارتباط بخش‌های مختلف، اثرات زیست محیطی مخربی به جا می‌گذارد. اگر چه در سال‌های اخیر تحقیقات وسیعی بر روی تاثیرات تغییر اقلیم و کاربری اراضی بر نرخ فرسایش آبی صورت گرفته است، اکثر این تحقیقات به فرسایش سطحی (شیاری و بین شیاری) در اراضی زراعی پرداخته و بیشتر در سطح پلات‌ها انجام شده است (پویسون و همکاران، ۲۰۰۳). در حالی که در این مدت تحقیقات بسیار کمی درباره فرسایش خندقی در مقیاس‌های مختلف زمانی و مکانی صورت گرفته است. شناسایی خندق‌ها به لحاظ فنی و معیارهای علمی و براساس چارچوب مشخص در قالب یک شناسنامه ضمن آن که می‌تواند در ایجاد یک بانک اطلاعاتی قوی مورد استفاده قرار گیرد، در جهت طبقه‌بندی آن‌ها نیز موثر واقع می‌گردد. در کشور ما فرسایش خندقی از این جهت حائز اهمیت است که حدود ۹۰ درصد از کشور دارای اقلیم خشک و نیمه خشک بوده و بارندگی در این مناطق از پراکنش زمانی مناسب برخوردار نمی‌باشد. در چنین شرایطی نبود یا کمبود پوشش گیاهی همراه با افزایش رواناب موجب از بین رفتن بیش از ۲/۵ میلیارد تن خاک، در سال می‌شود. (احمدی، ۱۳۹۰). مطالعات مختلفی در زمینه فرسایش خندقی در مناطق مختلف با روش‌های مختلف انجام شده است. مطالعه صمدنژاد (۱۳۸۱)، بر روی خندق‌های استان فارس نشان داد که مهم‌ترین عامل در موفقولوژی خندق‌ها شیب، درصد املاح در افق عمقی و کاربری اراضی می‌باشد. نتایج حاصل از مطالعات استرونک^۶ و همکاران (۲۰۰۳) نشان داد که فرسایش خندقی با افزایش چرای مفرط و لگدکوب شدن چراگاه‌ها افزایش می‌یابد. ریجسدیجک^۷ و همکاران (۲۰۰۶) با مطالعه رواناب و رسوبات حاصل از خندق‌ها در دو ناحیه در جاوه شرقی اندونزی، به این نتیجه رسیدند که به علت تغییر کاربری و شخم نادرست، میزان این فرسایش افزایش یافته است. اسپچمیت^۸ و همکاران (۲۰۰۶) میزان فرسایش خندقی در جنوب شرقی لهستان را با استفاده از رادیوکربن بررسی کردند. نتایج نشان داد

1. Poison et al., 2003

2. Tucker, 2005

3. Frankl, 2012

4. cheng et. al, 2006

5. Bouchnak, 2009

6. Strunk, 2003

7. Rijdsijk, 2006

8. Schmitt, 2006

که بیشترین تأثیر بر اندازه خندق‌ها ناشی از تغییر کاربری اراضی است. لسچن^۱ و همکاران، (۲۰۰۷) با بررسی فرسایش در مناطق نیمه خشک اسپانیا به این نتیجه رسیدند که فرسایش خندقی در اراضی کشاورزی رها شده زیاد است. صوفی (۱۳۸۹)، در تحقیقی تحت عنوان "بررسی ویژگی‌های مورفوکلیماتیک خندق‌های استان فارس" بیان داشته است که اقلیم نیمه‌خشک معتدل دربرگیرنده بخش اعظم خندق‌های استان فارس است، بافت خاک در این مناطق عمدتاً لومی شنی تا لومی گزارش شده است. خندق‌ها عمدتاً جانبی بوده و در اطراف زهکشی‌های طبیعی منطقه تشکیل یافته‌اند، پلان عمومی خندق‌ها پنجه‌ای و پلان راس خندق‌ها پنجه‌ای و پلان راس خندق‌ها از نوع نوکدار و نقطه‌ای می‌باشد، خندق‌ها در کلاس‌های عمقی متوسط قرار داشته و نیمرخ پیشانی آن‌ها عموماً عمودی و شکل مقطع عرضی به صورت U شکل در دشت و V شکل در خط‌القدر تپه‌ها دیده شده است. تخریب پوشش گیاهی، تغییر کاربری، طراحی و ساخت غیراصولی، آبگذر جاده‌ها، آبیاری غیراصولی و تخریب کانال‌های انتقال آب از عمده علل ایجاد خندق‌ها در استان فارس در نظر گرفته شده است. ایماسن^۲ (۲۰۱۱) به این نتیجه رسیدند که خندق‌ها توسط عوامل خاک‌شناختی و هیدرولوژیکی کنترل می‌شوند و احیاء پوشش طبیعی و مدیریت اصولی اراضی زراعی بهترین روش کنترل خندق‌ها می‌باشد. نتایج حاصل از پهنه‌بندی حساسیت اراضی به فرسایش خندقی توسط دبی^۳ و همکاران (۲۰۱۴) نشان داد که نوع خاک، فاصله از آبراهه و کاربری اراضی از عوامل اصلی مؤثر در وقوع فرسایش خندقی می‌باشد. بنابراین اهمیت این فرسایش به دلیل تولید رسوب و تخریب خاک، از سایر فرسایش‌های آبی بیشتر است. همچنین، مکانیسم پیچیده و اثرگذاری عوامل و پارامترهای مختلف بر شکل‌گیری و توسعه این فرسایش، شناخت دقیق عوامل مؤثر را با چالش روبرو کرده است. به همین دلیل نیاز به مطالعه و تعیین عوامل تأثیرگذارتر اجتناب‌ناپذیر و ضروری می‌باشد. این تحقیق با هدف شناسایی عوامل مؤثر بر ایجاد فرسایش خندقی با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی و تعیین مناطق مستعد در منطقه مورد مطالعه انجام شده است. روش‌های متفاوتی برای تعیین مناطق مستعد فرسایش خندقی وجود دارد که از بین آن‌ها روش تصمیم‌گیری چند معیاره^۴ جز روش‌هایی است که اخیراً بیشتر مورد استفاده قرار گرفته است. به عنوان مثال، چوبین و همکاران (۲۰۱۹) از روش فرایند تحلیل شبکه فازی^۵ برای تعیین مناطق مستعد فرسایش خندقی در حوضه پلدختر استفاده نمودند. نتایج نشان داد که تراکم زهکشی، بافت خاک و سنگ‌شناسی مهم‌ترین فاکتورهای فرسایش آبخیز منطقه مورد مطالعه هست داوودی مقدم و همکاران (۱۳۹۹) جهت شناسایی مناطق مستعد فرسایش خندقی و تعیین اهمیت عوامل مؤثر بر وقوع آن در حوضه آبخیز کشکان-پلدختر از مدل درخت رگرسیون تقویت شده در نرم افزار R استفاده نمودند. نتایج نشان داد که تراکم زهکشی، بافت خاک، ارتفاع و سنگ‌شناسی مهم‌ترین فاکتورهای فرسایش خندقی منطقه مورد مطالعه بوده است. بررسی روند پیشروی خندق‌های دائمی در حوضه آبخیز خرم‌بید استان فارس توسط سلیمان‌پور و همکاران (۱۳۹۹) نشان داده است که میزان پیشروی طولی خندق‌های دائمی در این منطقه تابع دو متغیر درصد خاک لخت و هدایت الکتریکی عصاره اشباع می‌باشد. بنابراین، لازم است، راهکارهای مدیریتی افزایش مقاومت خاک در برابر فرسایش، شامل: افزایش پوشش گیاهی سازگار و مقاوم با شرایط طبیعی منطقه و فرق به‌منظور احیاء پوشش گیاهی در اولویت برنامه‌های مدیریتی و اجرایی قرار گیرد و توجه بیشتری به کنترل فرسایش در پیشانی خندق‌ها شود. عرب عامری^۶ و همکاران (۲۰۲۰) از روش تصمیم‌گیری چند معیاره برای تعیین مناطق مستعد فرسایش خندقی در حوضه آبخیز رودخانه دسجرد در غرب استان قم استفاده نمودند. نتایج نشان داد که روش

1. Lesschen, 2007

2. Imasuen, 2011

3. Dube, 2014

4. Multiple-criteria decision-making (MCDM)

5. fuzzy analytical network process (Fuzzy ANP)

6. Arabameri, 2020

یادگیری ماشین^۱ در محیط GIS روش مناسبی برای تعیین مناطق حساس به فرسایش می‌باشد. همبرام و ساهآ^۲ (۲۰۲۰) از روش فازی-تحلیل سلسله مراتبی^۳ و فاکتور ترکیبی^۴ برای تعیین مناطق مستعد فرسایش خندقی در حوضه رودخانه جایتی^۵ در هند استفاده نمودند. نتایج نشان داد که هر دو روش دارای دقت مناسب برای پیش‌بینی فرسایش می‌باشند. یکی از مناطقی که در ایران در چند دهه اخیر دچار تغییرات کاربری اراضی شده، شهر مهر در جنوب استان فارس است. شهر مهر به دلیل همجواری با صنایع بزرگ پارس جنوبی، عسلویه، نزدیکی به دریا و نیز همجواری با استان‌های بوشهر و هرمزگان دارای موقعیت استراتژیک بالایی است. این منطقه بر روی خاک‌های حساس به فرسایش قرار گرفته است که اخیراً منجر به فرسایش‌های خندقی بزرگی در منطقه گردیده است. هدف اصلی از انجام این پژوهش، شناسایی عوامل و مکانیزم‌های موثر بر شکل‌گیری پدیده فرسایش خندقی در محدوده مورد مطالعه و ارائه راهکارهای علمی و عملی جهت کنترل این پدیده می‌باشد. در پژوهش حاضر به منظور افزایش دقت نقشه نهایی پهنه‌بندی فرسایش خندقی، علاوه بر شاخص اولیه مؤثر در رخداد فرسایش خندقی شامل شیب، جهت شیب، ارتفاع، کاربری اراضی، لیتولوژی، فاصله از جاده، فاصله از رودخانه، فاصله از آبراهه، بارندگی، خاک شناسی و شاخص پوشش گیاهی (NDVI)، از شاخص‌های ژئومورفومتریک مؤثر در رخداد فرسایش خندقی شامل شاخص موقعیت توپوگرافیک (TPI)، انحنا سطح، پروفیل طولی، پروفیل عرضی، طول شیب (LS)، شاخص خیزی توپوگرافی (TWI)، شاخص قدرت جریان (SPI)، شاخص ناهمواری زمین (TRI)، چگالی زهکش (Dd) و شاخص همگرایی (CI) استفاده شده است که آن را از مطالعات قبلی متمایز می‌کند. در مرحله بعد با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی شاخص‌های مذکور مورد ارزیابی قرار گرفته و اهمیت هر کدام از آنها شناسایی، براساس توابع عضویت فازی، نقشه‌های فازی مربوط به هر پارامتر تشکیل و در نهایت نقشه مناطق مستعد فرسایش خندقی تهیه شد. درستی نقشه پهنه‌بندی حاصل، با استفاده از منحنی ROC ارزیابی و راهکارهای لازم برای جلوگیری از پیشرفت این فرسایش ارائه شده است.

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در جنوب استان فارس در ۲۷ درجه و ۲۴ دقیقه تا ۲۷ درجه ۳۶ دقیقه شمالی تا ۵۲ درجه و ۴۲ دقیقه تا ۵۳ درجه و ۱ دقیقه شرقی در بخش مرکزی شهرستان مهر قرار دارد (شکل ۱). منطقه مورد مطالعه در بین دو طاق‌دیس با جهت شمال غرب- جنوب شرق بر روی رسوبات دوران چهارم زمین شناسی واقع شده است. مساحت منطقه مورد مطالعه ۲۲۰ کیلومتر مربع می‌باشد کمترین ارتفاعات منطقه در دشت دامنه‌ای در مرکز منطقه که فرسایش زیاد است قرار گرفته است. حداقل ارتفاع در منطقه مورد مطالعه ۴۰۵ و حداکثر ارتفاع ۱۲۶۸ متر می‌باشد. متوسط بارندگی و دمای سالانه منطقه به ترتیب ۲۰۰ میلی متر و ۲۵ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. از دلایل انتخاب این منطقه جهت پژوهش می‌توان به وجود شرایط خاص توپوگرافی و ژئومورفولوژیکی منطقه مورد مطالعه که سبب بوجود آمدن اشکال مختلف فرسایش، و به مقدار نسبت زیادی فرسایش خندقی گردیده است و موقعیت استراتژیک خاص شهر اشاره نمود. کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه، شامل اراضی کشاورزی، اراضی بایر، اراضی جنگلی، اراضی باغی، اراضی مرتعی، اراضی شور و اراضی شهری می‌باشد و اراضی مرتعی با مساحت ۳۰۹/۳۵ کیلومتر بیشترین درصد کاربری را دارا می‌باشند. مناطقی که دارای فرسایش-پذیری زیاد از جمله فرسایش خندقی هستند در اراضی فاقد پوشش گیاهی مانند اراضی بایر قرار گرفته‌اند و در این مطالعه بررسی خواهند شد (شکل ۲).

1. machine learning (ML)

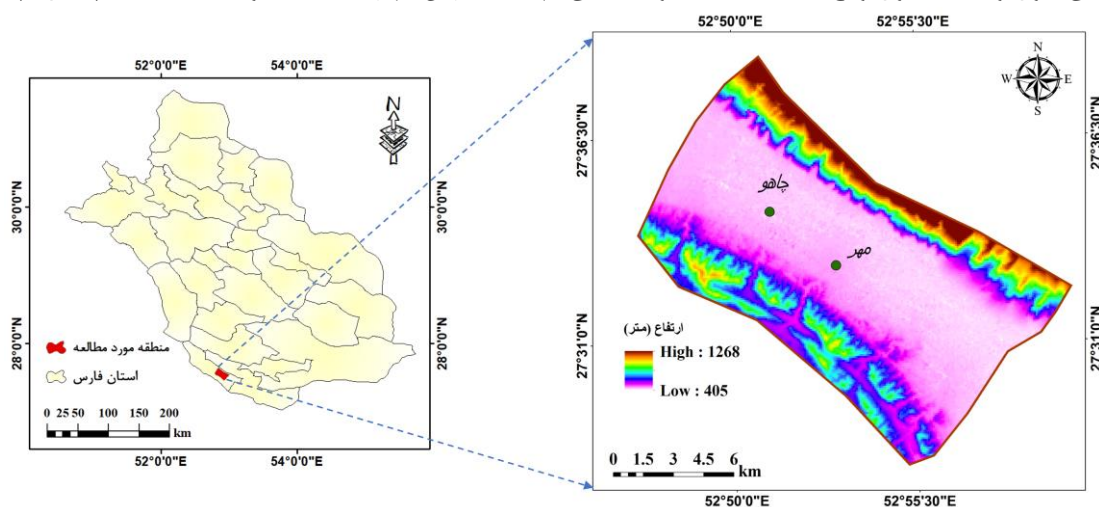
2. Hembram, T.K. and Saha, 2020

3. fuzzy-AHP

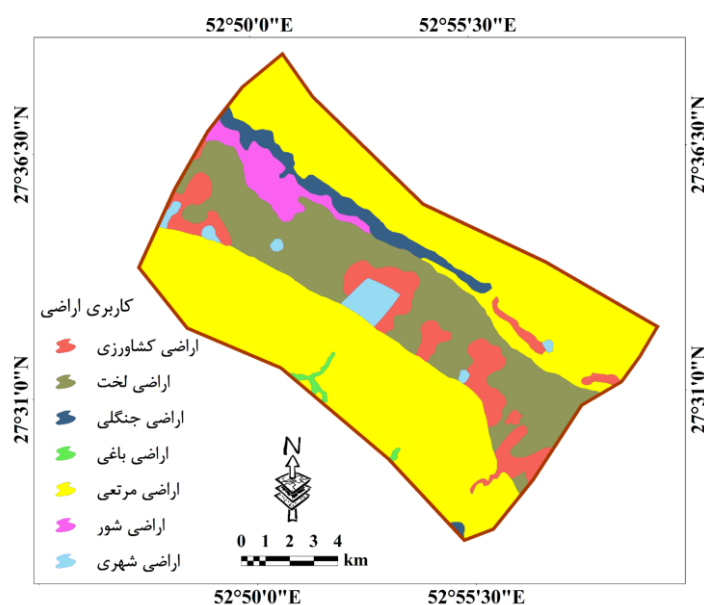
4. compound factor (CF)

5. Jainti River basin

خاک منطقه شامل خاک‌های آنتی سول (مرکز منطقه)، اریدی سول (مرکز منطقه)، بدلند (جنوب منطقه) و اراضی کوهستانی (شمال و بخش کوچکی از جنوب منطقه) می‌باشد. خاک‌های اریدی سول منطقه مورد مطالعه دارای تخلخل زیاد و ظرفیت نگهداری آب بالایی می‌باشند و همچنین دارای چگالی و وزن پایینی هستند. این خاک‌ها در سرایشی‌های کم، به خاطر حاصلخیزی و ظرفیت نگهداری بالای آب دارای ارزش بالایی از لحاظ کشاورزی می‌باشند (غلامی، ۱۳۹۶). بخشی از منطقه شامل اراضی بدلند است که اراضی نامرغوب با بارش کم است. این نواحی برای کشاورزی یا زمین‌های چراگاهی تقریباً فاقد ارزش است. خندق‌های منطقه مورد مطالعه در جهت‌های شمال، شمال غرب و شمال شرق در اراضی بایر و خاک‌های آنتی سول و اریدی سول واقع شده اند که محدودیت‌هایی جهت گسترش شهر در منطقه مورد مطالعه دارند. (شکل ۲)



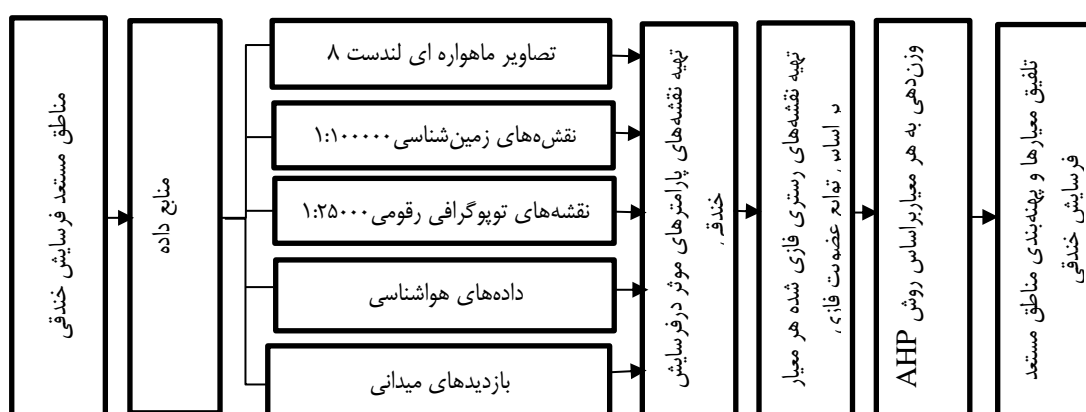
شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه



شکل ۲. نقشه کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه

مواد و روش‌ها

به منظور شناسایی عوامل موثر بر فرسایش خندقی از منابع و اسناد کتابخانه‌ای، مقالات، گزارش نهایی طرح‌های تحقیقاتی، پایان‌نامه‌ها و مشاوره با کارشناسان مراکز دانشگاهی و تحقیقاتی استان فارس استفاده گردید و در نهایت ۱۹ پارامتر موثر بر فرسایش خندقی شناسایی و در این پژوهش بکار گرفته شد، به منظور تهیه نقشه مناطق مستعد فرسایش خندقی از داده‌های شیب، جهت شیب، فاصله از جاده، فاصله از رودخانه، بارندگی، طول شیب^۱، خاک، شاخص پوشش گیاهی^۲، شاخص قدرت جریان^۳، شاخص خیسی^۴، پروفیل عرضی^۵، شاخص ناهمواری زمین^۶، پروفیل طولی^۷، کاربری اراضی، زمین‌شناسی (لیتولوژی)، شاخص موقعیت توپوگرافی^۸، ارتفاع، چگالی زهکش^۹ و شاخص همگرایی^{۱۰} استفاده شده است. مراحل این پژوهش در شکل ۳، ارائه شده است. در ادامه روش تهیه نقشه هر کدام از این پارامترها به تفصیل بیان شده است. نقشه‌های پهنه‌بندی تهیه شده در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل ۳. فلوچارت مراحل تعیین مناطق مستعد فرسایش خندقی

ارتفاع منطقه مورد مطالعه بین ۱/۰۰۵-۱/۵۳۰ متر است که به جز نواحی کوچکی در جنوب و بخش‌های شرقی منطقه مورد مطالعه، مابقی منطقه دارای ارتفاعات کمتر از ۱/۰۰۵ متر می‌باشند. شایان ذکر است که برای تهیه نقشه ارتفاع منطقه مورد مطالعه از مدل رقومی ارتفاع (DEM^{۱۱}) با قدرت تفکیک ۳۰ متر استفاده شده است. نقشه‌های شیب و جهت شیب با استفاده از مدل رقومی ارتفاع تهیه شده است. نواحی دارای شیب کمتر از ۵ درجه مستعد فرسایش خندقی می‌باشند (شکل ۴).

برای تهیه نقشه شاخص همگرایی (CI) از رابطه (۱) استفاده شده است.

1. Length and Slope(LS)
2. Normalized Difference Vegetation Index(NDVI)
3. Stream power index (SPI)
4. Topographic wetness index (TWI)
5. profile curvature
6. Terrain Ruggedness Index(TRI)
7. plan curvature
8. Position Index (TPI)
9. Drainage density(Dd)
10. Convergence index(CI)
11. Digital elevation model(DEM)

$$CI = \left(\frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 \theta_i \right) - 90^\circ \quad \text{رابطه (۱)}$$

θ زاویه بین سلول‌های مجاور و سلول‌های مرکزی می‌باشد.

نقشه شاخص همگرایی (CI) منطقه مورد مطالعه در ۵ کلاس $\langle 39/6, 39/6-11/3, 11/3-9/01, 9/01-38, 38 \rangle$ طبقه بندی شده است، که مناطق مرکزی منطقه مورد مطالعه دارای مقادیر CI کمتر از $39/6 \text{ m} / 100$ می‌باشد.

به منظور محاسبه چگالی زهکش (Dd) با داشتن طول آبراهه‌های منطقه مورد مطالعه و مساحت حوضه آبخیز از رابطه (۲) استفاده شده است. لایه آبراهه‌های محدوده مورد مطالعه از نقشه‌های توپوگرافی رقومی ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری استخراج شده است.

$$\text{Drainage Density} = \frac{\text{total length channels (m)}}{\text{basin area (m}^2\text{)}} \quad \text{رابطه (۲)}$$

نقشه پهنه بندی (Dd) منطقه مورد مطالعه در شکل (۴) نشان داده شده است. مقادیر Dd منطقه مورد مطالعه بین $1/25 - 2/26$ می‌باشد که مناطق مرکزی دارای Dd بین $1/79 - 2/26 \text{ km}^2/\text{km}^2$ می‌باشند.

جهت تهیه نقشه شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) منطقه مورد مطالعه از رابطه (۳) استفاده شده است.

$$TPI_{i=M0-\sum_{n-1}^{Mn}/n} \quad \text{رابطه (۳)}$$

که $M0$ ارتفاع نقاط مدل تحت بررسی، Mn ارتفاع Grid، n تعداد کل نقاط همسایه برای بررسی ارتفاع است. نقشه TPI منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد که نواحی مرکزی دارای TPI بین $2/28 - 2/85$ می‌باشد که در (شکل ۴) نشان داده شده است.

نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه با استفاده از نقشه‌های زمین شناسی ۱:۱۰۰،۰۰۰ سازمان زمین شناسی تهیه گردید که شامل مخروط افکنه‌های دشت‌های پایینی و نهشته‌های تراس‌های دره‌ای سازند کواترنری^۱، سازند گچساران^۲، سازند آسماری - جهرم^۳، سازند میشان^۴ سازند آغاچاری^۵ و سازند بختیاری^۶ می‌باشد. در منطقه مورد مطالعه، سازندهای آسماری - جهرم دارای حساسیت کمتری به فرسایش و سازندهای کواترنری، آغاچاری و میشان دارای حساسیت بالایی به فرسایش می‌باشند (شکل ۴).

کاربری اراضی منطقه شامل باغ، جنگل، اراضی لخت، کشاورزی، شهری، اراضی شور و اراضی مرتعی می‌باشد که بیشترین بخش منطقه مورد مطالعه در طبقه مرتعی و بخش‌هایی از مرکز منطقه در کلاس اراضی لخت واقع شده‌اند و مستعد فرسایش خندقی می‌باشند. به منظور تهیه این نقشه از لایه رقومی کاربری اراضی که در اداره کل منابع طبیعی استان فارس طی مطالعات قبلی با استفاده از قابلیت‌های پردازش تصاویر ماهواره‌ای و طبقه‌بندی نظارت شده تصاویر لندست ۸ تهیه شده، استفاده گردید (شکل ۲).

1. Qft2

2. Mgs

3. Eoas-ja

4. Mmn

5. Muplaj

6. lbk

به منظور تهیه نقشه طول شیب (LS) از رابطه (۴) استفاده شده است (موری و همکاران^۱، ۱۹۸۸).

$$LS = \left(\frac{As}{22.13} \right)^m \left(\frac{\sin(\theta)}{0.0896} \right)^n \quad \text{رابطه (۴)}$$

که در این رابطه As مساحت توزیع شده (متر)، θ شیب بر حسب رادیان و m (۰/۰-۵۶/۴) و n (۱/۱-۳/۲) می‌باشد. نقشه LS منطقه مورد مطالعه نشان داده است که بیشتر منطقه مورد مطالعه دارای مقادیر کمتر از ۱۲/۸ (m/۱۰۰) می‌باشد (شکل ۴).

به منظور تهیه نقشه پروفیل طولی منطقه مورد مطالعه از مدل رقومی ارتفاع منطقه مورد مطالعه با قدرت تفکیک ۳۰ متر استفاده شد. نقشه پروفیل طولی منطقه مورد مطالعه نشان داد که منطقه شامل سه بخش محدب، مقعر و تخت می‌باشد که نواحی مرکزی در طبقه تخت قرار گرفته اند (شکل ۴).

مقادیر شاخص ناهمواری زمین (TRI) منطقه مورد مطالعه بین ۱/۹۷-۲۰/۷۶ می‌باشد و نواحی مرکزی دارای مقادیر نزدیک به ۱/۹۷ می‌باشد (شکل ۴).

نقشه پروفیل عرضی با استفاده از Dem منطقه مورد مطالعه در محیط GIS تهیه گردید. بیشتر مناطق در محدوده ۰/۰۴۳-۰/۲۸ قرار دارند (شکل ۴).

مقادیر بارندگی در منطقه مورد مطالعه بین ۷۵۰-۷۵۹ میلی متر می‌باشد و نواحی پایین دست منطقه مورد مطالعه دارای مقادیر بارندگی بیشتری می‌باشد. داده‌های بارندگی منطقه مورد مطالعه از سازمان هواشناسی استان فارس در یک بازه زمانی ۱۰ ساله تهیه شده است (شکل ۴).

منطقه مورد مطالعه شامل یک آبراهه بزرگ در مرکز منطقه می‌باشد. آبراهه‌ها نقش مهمی در فرسایش خندقی دارند. به طوری که در منطقه مورد مطالعه به علت احداث مناطق مسکونی، اختلال در شبکه‌های زهکشی ایجاد شده که این دستکاری باعث پایداری و رشد خندق‌ها در منطقه مورد مطالعه گردیده است. به همین منظور نقشه فاصله از رودخانه در محیط GIS تهیه گردید (شکل ۴).

با بررسی میدانی انجام گرفته، مشخص گردید که راه‌های ارتباطی از دو جهت بر روی گسترش خندق‌ها نقش دارند. یکی پلهایی که جهت عبور رواناب در مسیر راه‌های اصلی که در نیمه جنوبی شهر واقع شده موجب تمرکز رواناب در پایین دست جاده و در نتیجه گسترش خندق‌ها شده، و دیگری راه‌های فرعی که در حد فاصل خندق‌ها و محدوده شهر قرار دارند غالباً خاکی بوده، تردد وسایل نقلیه در این مسیرها منجر به کاهش چسبندگی خاک و شسته شدن خاک‌ها طی بارندگی شده است که این امر منجر به فرسایش خندقی در منطقه شده است (غلامی و همکاران، ۱۳۹۶). با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری، جاده‌های ارتباطی موجود استخراج و نقشه فاصله از جاده تهیه گردید (شکل ۴).

به منظور تهیه نقشه شاخص خیزی (TWI) از رابطه (۵) استفاده شده است (موری و همکاران^۲، ۱۹۸۸)

$$TWI = \ln(As/\tan(\beta)) \quad \text{رابطه (۵)}$$

که As مساحت و β شیب است.

نقشه تهیه شده دارای مقادیر بین ۱۱/۶۹-۵/۸۴ می‌باشد (شکل ۳).

خاک‌های منطقه مورد مطالعه در ۳ کلاس آنتی سول، بدلند و انسپتی سول طبقه‌بندی می‌شوند، نیمه شرقی شامل خاک-های انسپتی سول، نیمه غربی شامل خاک‌های بدلند و بخش مرکزی شامل خاک‌های آنتی سول می‌باشد که حساسیت

^۱ Moore and Wilson, 1992

^۲ Moore et al., 1998

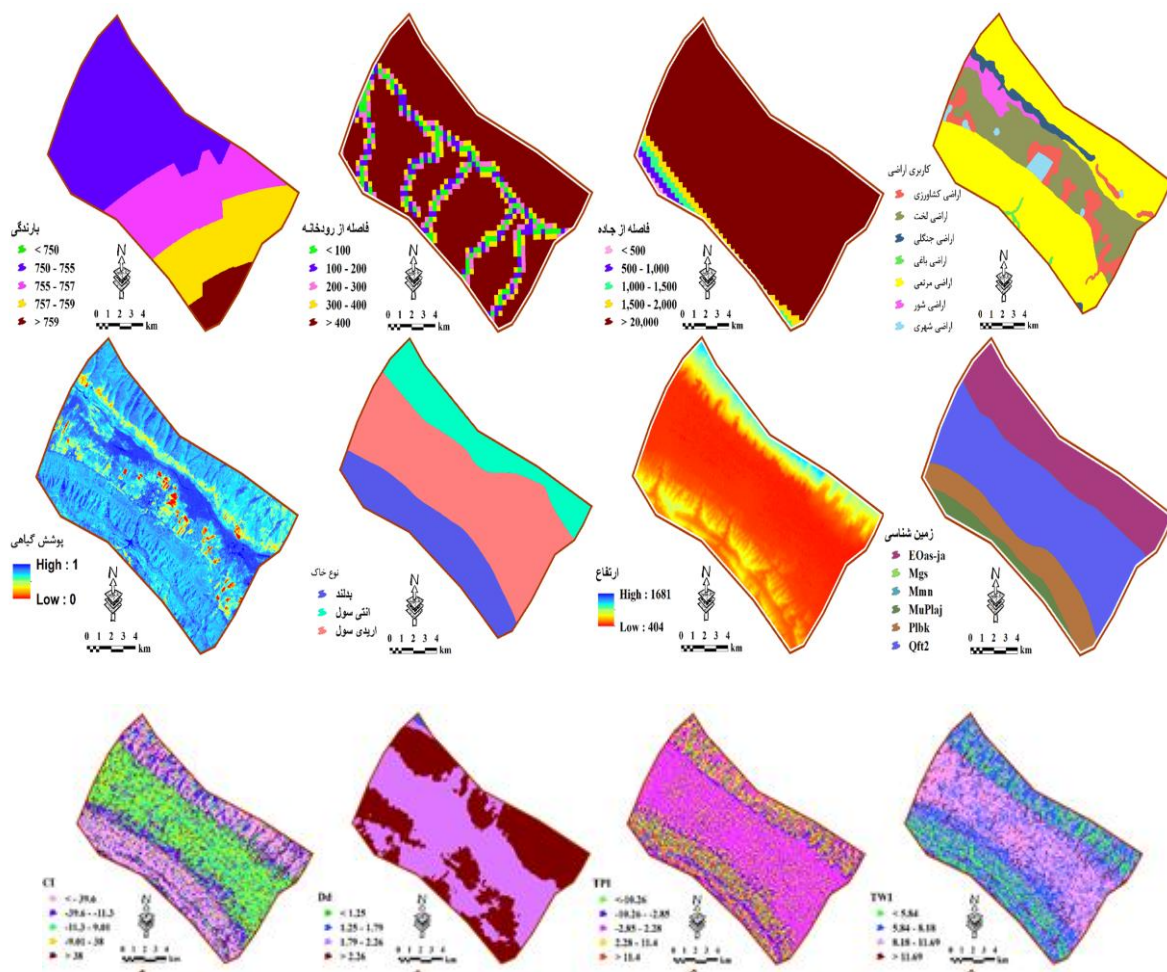
بیشتری نسبت به فرسایش دارند به منظور تهیه نقشه خاک‌شناسی محدوده مورد مطالعه از لایه رقومی نوع خاک استفاده شده است، این لایه از اداره منابع طبیعی استان فارس اخذ شده است. (شکل ۴).
 به منظور تهیه نقشه شاخص قدرت جریان (SPI) منطقه از رابطه (۶) در محیط GIS استفاده شده است (موری و همکاران، ۱۹۸۸).

$$SPI = As \times \tan(\beta) \quad \text{رابطه (۶)}$$

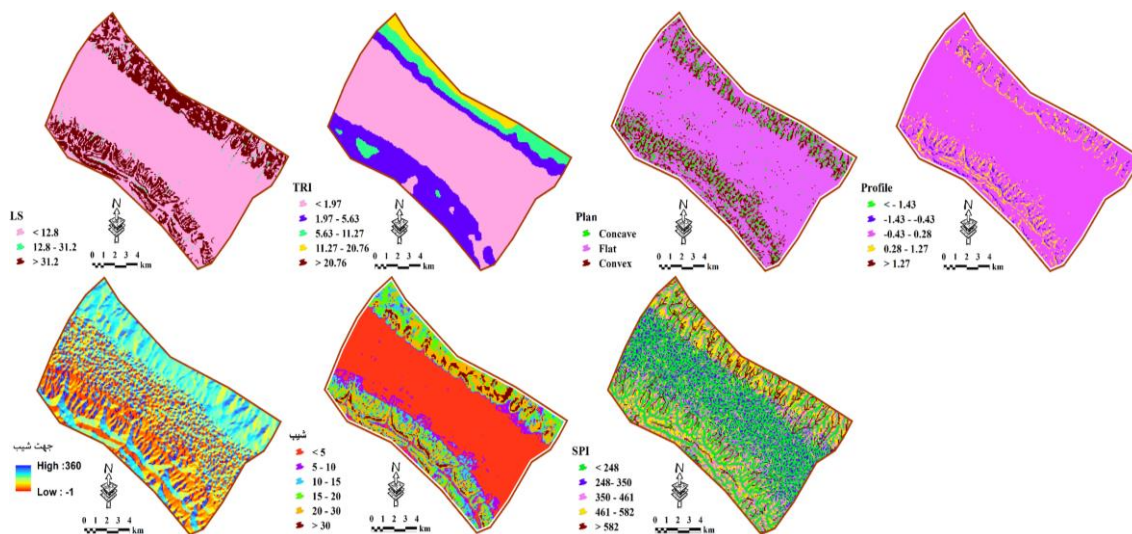
نواحی مرکزی منطقه مورد مطالعه دارای مقادیر کمتری نسبت به سایر بخش‌ها می‌باشد (شکل ۳).
 به منظور تهیه نقشه شاخص پوشش گیاهی (NDVI) از تصاویر ماهواره لندست ۸ و رابطه (۷) استفاده شده است.

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad \text{رابطه (۷)}$$

نقشه NDVI منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد که بخش‌هایی از نواحی مرکزی منطقه مورد مطالعه که شامل اراضی بایر می‌باشد دارای مقادیر کمتر از ۰/۲ و بخش‌های کوچکی از مرکز منطقه، شامل اراضی کشاورزی و مقادیر بیشتر از ۰/۸ می‌باشد. اکثر منطقه شامل اراضی مرتعی و NDVI بین ۰/۲ تا ۰/۴ می‌باشد (شکل ۴).



شکل ۴. داده‌های ورودی منطقه مورد مطالعه



ادامه شکل ۴. داده های ورودی منطقه مورد مطالعه

منطق فازی

در منطق فازی، هر منطقه با توجه به مقداری که معیار مورد نظر را رعایت می کند، مقدار عضویتی می گیرد که بیانگر میزان مطلوبیت آن ناحیه است. بدین معنی که هر ناحیه، با مقدار عضویت بالاتر از مطلوبیت بالاتری برخوردار است. در منطق فازی مسئله قطعیت موجود در منطق بولین وجود ندارد و هر لایه در مقیاسی بین صفر و یک درجه بندی می شود (لین^۱ و همکاران، ۲۰۰۶)، یکی دیگر از عوامل موثر در استاندارد سازی نقشه های فازی تعیین حد آستانه می باشد که به آن ها نقاط کنترل گفته می شود. نکته ای که بایستی در انتخاب تابع به آن توجه داشت نوع کاهشی یا افزایشی بودن معیار مورد نظر است (ولی زاده^۲ و همکاران، ۲۰۱۹). در این مطالعه از توابع عضویت خطی استفاده شد (رابطه ۸ و ۹). در این مطالعه برای تهیه نقشه های فازی شیب، شاخص ناهمواری زمین، خاک، ارتفاع، شاخص خیسبی، کاربری اراضی، شاخص قدرت جریان، طول شیب، جهت شیب از تابع عضویت خطی افزایشی (رابطه ۸) و برای سایر پارامترها، از تابع عضویت خطی کاهشی استفاده شد (رابطه ۹) (عرب عامری و همکاران، ۲۰۲۰).

$$f(x) = \begin{cases} 0 & x \leq b \\ x - b / a - b & b < x < a \\ 1 & x \geq a \end{cases}$$

رابطه (۸):

$$f(x) = \begin{cases} 1 & x \leq b \\ c - x / c - b & b < x < c \\ 0 & x \geq c \end{cases}$$

رابطه (۹)

به منظور تعیین نقاط a و b رابطه های ۸ و ۹ (مقادیر حداکثر و حداقل) از اطلاعات جدول (۱) برای هر یک از پارامترها استفاده شده است.

¹ Lin et. Al, 2006

² Valizadehet.al,2019

جدول ۱. محدوده بحرانی برای تهیه نقشه فازی برای هر پارامتر

پارامتر	محدوده	پارامتر	محدوده
Dd	0.85-1.49	profile	-0.43-0.28
slope	<5	lithology	>7
Rainfall	250-350	Road	>2000
TRI	<3.22	CL	-11.3-9
Soil	Entisols/inceptisols	Stream	<100 , >400
elevation	<1990	aspect	S,W
TWI	<7.27	pc	>0
TPI	-3.3-2.9	SPI	11-12
LU	Agriculture-forest-rangeland	LS	<12.8

روش AHP

روش AHP توسط ساعتی، در دهه ۷۰ میلادی پیشنهاد گردید که امروزه یکی از پرکاربردترین روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است. این روش برای حل مسائل بدون ساختار در زمینه‌های مختلفی به کار رفته است. روش تجزیه و تحلیل سلسله مراتبی برای یافتن وزن (اهمیت نسبی) و رتبه‌بندی هر یک از پارامترها به کار می‌رود. (اولین گام در AHP) ترسیم یک نمایش گرافیکی از مسئله است که در آن هدف، معیارهای مناسب برای دستیابی به هدف و گزینه‌های موردنظر نشان داده می‌شود. در واقع در این مرحله سطوح مختلف تحلیل به صورت سلسله‌مراتبی و گرافیکی به تصویر کشیده می‌شوند. در سطح اول هدف قرار دارد که در پژوهش حاضر تعیین مکان‌های مستعد فرسایش خندقی است. در سطح دوم معیارها یا سنجه‌هایی که می‌توان با آنها به هدف مورد نظر دست یافت. در این نوشتار برای رسیدن به هدف موردنظر از ۱۹ معیار طبیعی استفاده شده است. (گام دوم در AHP) عناصر هر سطح نسبت به یکدیگر به صورت زوجی (دو به دویی) مقایسه شده و وزن‌دهی می‌شوند. مقایسه و وزن‌دهی به عناصر در یک ماتریس $K \times K$ مثبت می‌شود (در این بررسی یک ماتریس 12×12). مقایسه زوجی به صورت ارزش‌گذاری عنصر سطر نسبت به عنصر ستون صورت می‌گیرد و برای ارزش‌گذاری نیز معمولاً از یک مقیاس فاصله‌ای از ۱ تا ۹ استفاده می‌شود. هر چه مقدار ارزش داده شده بیشتر باشد نشان‌دهنده اهمیت و ارجحیت بیشتر عنصر سطری نسبت به عنصر ستونی است. به طوری که ارزش ۹ بیانگر کاملاً مهمتر و ارزش یک بیانگر با ارجحیت و اهمیت یکسان است (جدول ۲).

جدول ۲. مقایسه ۹ کمیتی ساعتی برای مقایسه دو دویی معیارها (برتولینی^۱، ۲۰۰۶)

امتیاز (شدت اهمیت)	تعریف	توضیح
۱	اهمیت مساوی	در تحقق هدف دو معیار اهمیت مساوی دارند.
۳	اهمیت اندکی بیشتر	تحقق هدف اهمیت ۱ بیشتر از ۳ است.
۵	اهمیت بیشتر	تحقق هدف اهمیت ۱ خیلی بیشتر از ۳ است.
۷	اهمیت خیلی بیشتر	تحقق هدف اهمیت ۱ خیلی بیشتر از ۳ است
۹	اهمیت مطلق	تحقق هدف اهمیت خیلی بیشتر ۱ نسبت به ۳ است.
۸ و ۴ و ۲	هنگامی که حالت‌های میانه وجود دارد.

^۱ Bertolini, 2006

به منظور بررسی دقت وزن‌ها از نرخ سازگاری استفاده شد. نرخ سازگاری در روش (AHP) شاخصی است که سازگاری مقایسه‌ها را نشان می‌دهد. این نرخ گویای درجهٔ صحت و دقت ارزش‌گذاری‌ها در مقایسات زوجی است، چنانچه نرخ مذکور برابر و کمتر از ۰/۱ باشد می‌توان ارزش‌گذاری‌ها و مقایسات را خوب و صحیح دانست، در غیر این صورت ارزش‌گذاری و مقایسات زوجی باید دوباره انجام گرفته یا اصلاح شود. نرخ سازگاری از طریق رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود:

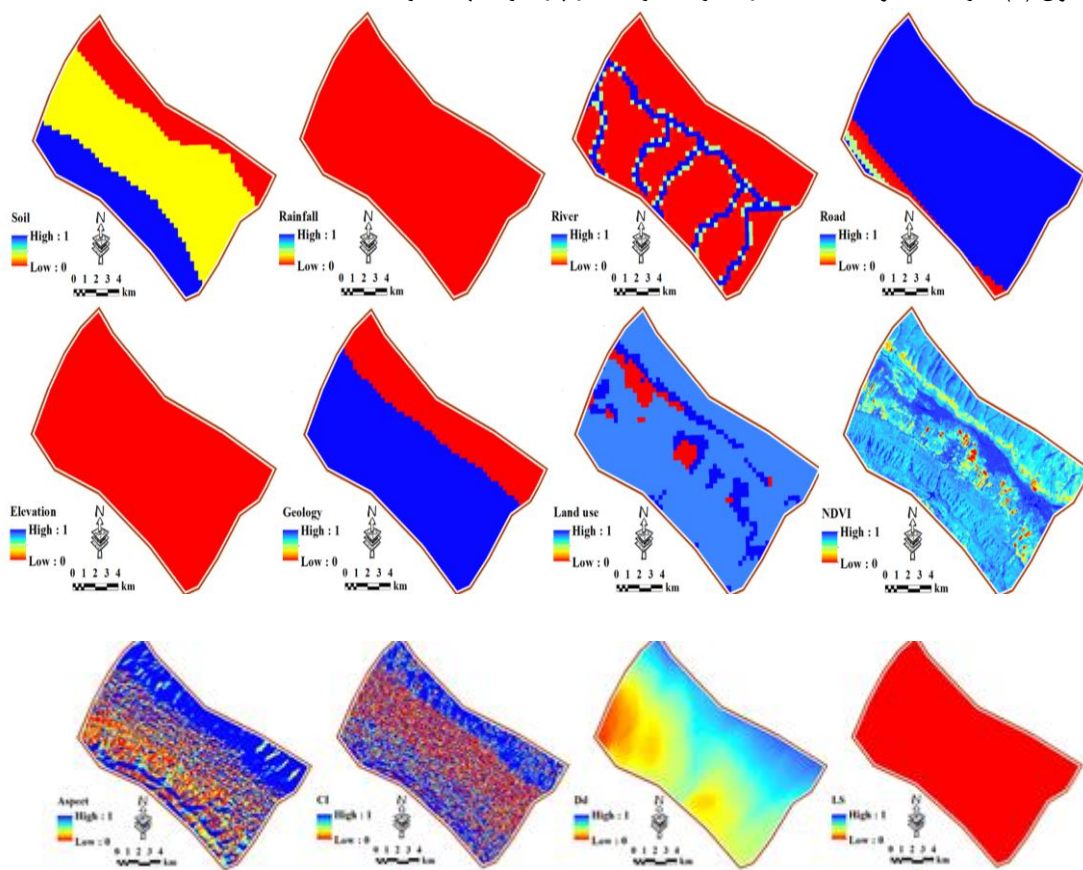
$$CI = \frac{\sum \lambda_{max} - n}{n - 1} \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

در رابطه بالا λ_{max} عنصر بردار ویژه و n تعداد معیارهاست.

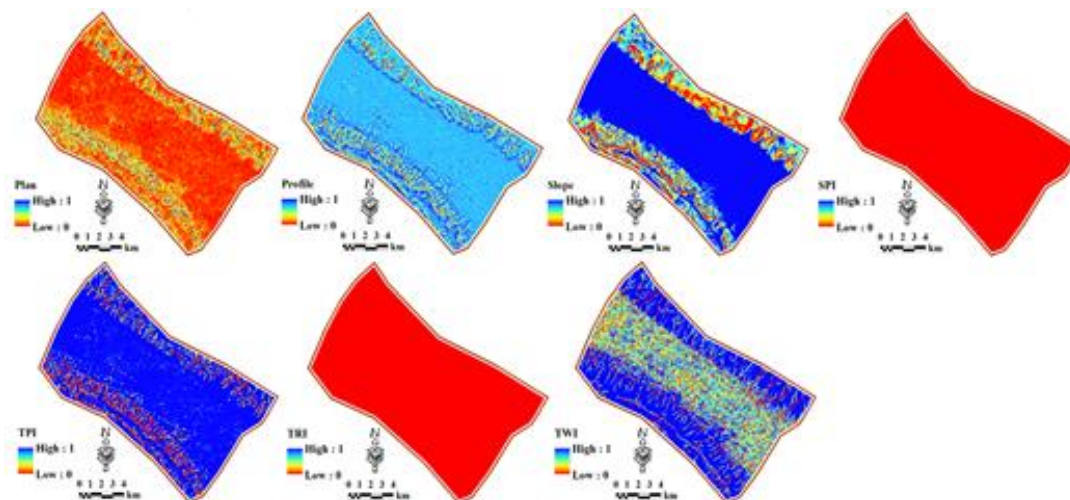
بحث و یافته‌ها

روش فازی و AHP

به منظور تهیه نقشه مناطق مستعد فرسایش خندقی از توابع عضویت فازی برای تهیه نقشه فازی هر یک از پارامترهای موثر استفاده شد. با استفاده از روابط ۸ و ۹ تابع عضویت با در نظر گرفتن حدود بحرانی برای هر یک از پارامترها طبق جدول (۱) تعریف شد و نقشه‌های فازی برای هر یک از پارامترها تهیه گردید.



شکل ۴. نقشه‌های فازی هر یک از پارامترها



ادامه شکل ۴. نقشه‌های فازی هر یک از پارامترها

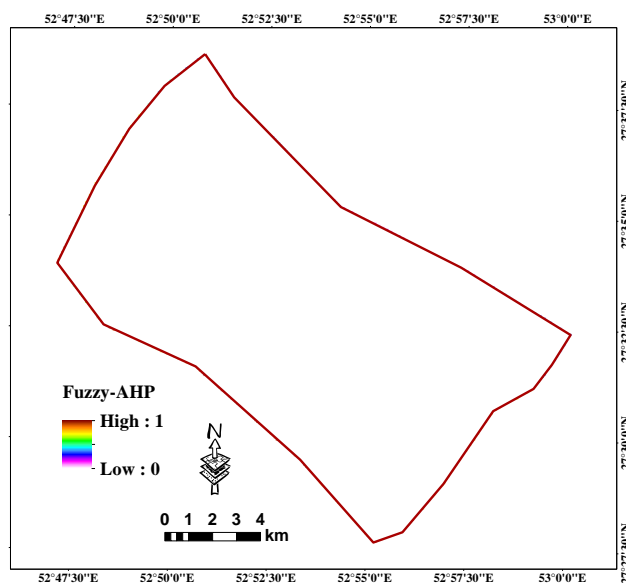
در ادامه به منظور تهیه نقشه نهایی مناطق مستعد فرسایش خندقی، با استفاده از روش AHP مقایسه دو به دو هر یک از پارامترها بر اساس درجه اهمیتی که هر یک از آن‌ها دارند انجام شد. شایان ذکر است که از نظریات ۲۰ کارشناس منابع طبیعی برای تعیین اهمیت هر یک از پارامترها به صورت کیفی استفاده شد و در ادامه با استفاده از نرم افزار Expert choices نتایج کیفی به کمی تبدیل شدند و در نهایت وزن هر یک از پارامترها تعیین شد که نتایج آن در جدول (۳) آمده است. ۹ معیار اصلی (زمین‌شناسی، شاخص پوشش گیاهی، بارندگی، شیب، کاربری اراضی، فاصله از جاده، ارتفاع، خاک و جریان^۱) دو به دو مقایسه شده‌اند و نتایج در جدول آمده است. پارامترهایی مانند ارتفاع، شاخص خیزی، شاخص ناهمواری زمین، شاخص موقعیت توپوگرافی، طول شیب، جهت شیب، شاخص قدرت جریان، شاخص همگرایی، پروفیل عرضی و پروفیل طولی جز زیر معیارهای ارتفاع و فاصله از رودخانه و چگالی زهکش در زیر شاخه جریان قرار گرفتند. طبق جدول (۳)، مشخص می‌شود که زمین‌شناسی دارای بیشترین تاثیر (وزن ۰/۳۳) و فاصله از جاده دارای کمترین تاثیر (وزن ۰/۰۰۱) در تهیه نقشه مناطق مستعد فرسایش خندقی می‌باشد. شایان ذکر است که نرخ سازگاری در این مقایسه زوجی برابر ۰/۰۸ بدست آمد که چون کمتر از ۰/۱ می‌باشد، سازگاری مقایسه‌ها قابل قبول می‌باشد. با توجه به وزن‌های تعیین شده برای هر یک از پارامترها در نهایت نقشه مناطق مستعد فرسایش خندقی تهیه شد که در شکل (۵) نشان داده شده است. نتایج وزن‌دهی به این پارامترها مشابه مطالعات (عرب عامری و همکاران، ۲۰۱۸) می‌باشد. به طوری که جنس سازند به عنوان مهم‌ترین پارامتر در بررسی فرسایش خندقی در یک منطقه محسوب می‌شود.

¹: Stream

جدول ۳. وزن هر یک از پارامترهای موثر در فرسایش خندقی با استفاده از روش AHP

پارامتر	لیتولوژی	پوشش گیاهی	بارندگی	شیب	کاربری اراضی	ارتفاع	جریان	خاک	فاصله از جاده	وزن
لیتولوژی	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۰/۳۳
شاخص پوشش گیاهی	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۰/۲۳
بارندگی	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۰/۱۶
شیب	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۰/۱۱
کاربری اراضی	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۰/۰۶۹
ارتفاع	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۰/۰۵
جریان	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۰/۰۳
خاک	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۰/۰۲
فاصله از جاده	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۰/۰۰۱

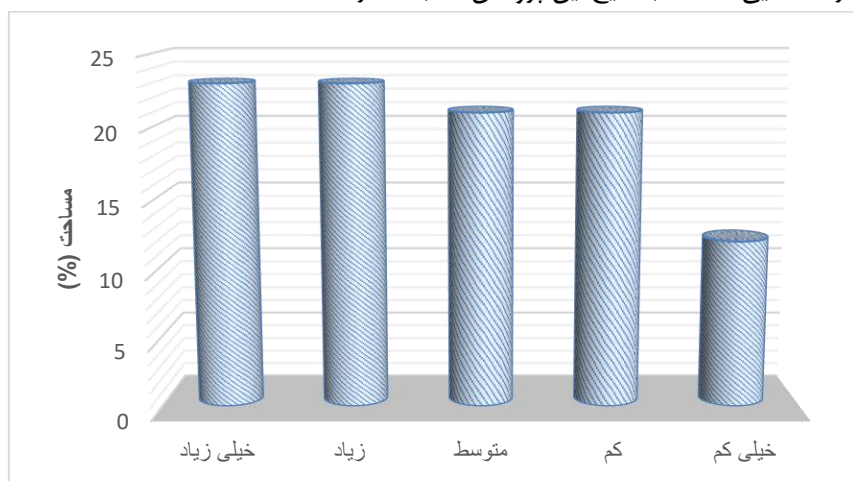
در حدود ۵۰ درصد از منطقه مورد مطالعه در کلاس‌های زیاد و خیلی زیاد قرار دارد که مستعد فرسایش خندقی می‌باشد (شکل ۵). با مطالعات میدانی منطقه مورد مطالعه مشخص شد که خندق‌های حوضه مورد مطالعه در مناطق با حساسیت بسیار زیاد و زیاد رخ داده است و بر روی اراضی کشاورزی و بایر به وقوع پیوسته است.



شکل ۵. نقشه مناطق مستعد گسترش خندق با استفاده از روش Fuzzy-AHP

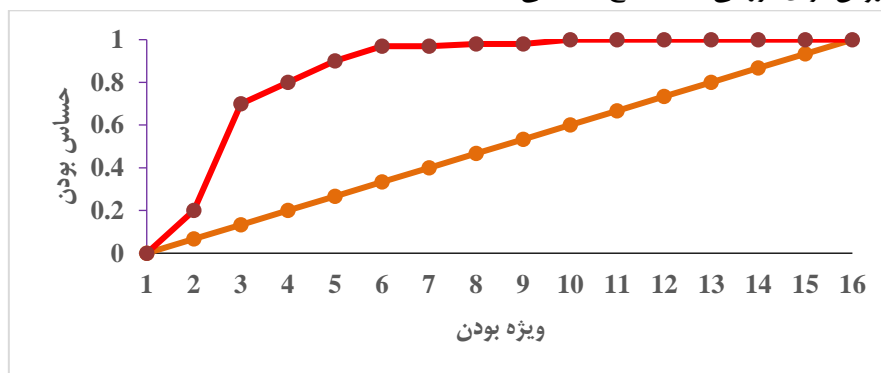
همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، بیشترین مناطق مستعد فرسایش خندقی در بخش‌های شمال، شمال غرب و شمال شرق واقع شده‌اند. با بازدیدهای میدانی مشخص شده است که عمده خندق‌های منطقه مورد پژوهش نیز در همین

بخش‌ها قرار دارند. وندرکروکو^۱ و همکاران (۲۰۰۳)، ساها^۲ و همکاران، ۲۰۱۹، همبرام و ساها^۳، ۲۰۲۰ با مطالعه خندق‌های منطقه به این نتیجه رسیدند که مدل تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و توابع عضویت فازی قادر خواهند بود مناطق متأثر از فرسایش خندقی را شناسایی کند که با نتایج این پژوهش مطابقت دارد.



شکل ۶. مساحت هر یک از کلاس‌های فرسایش خندقی

به منظور بررسی دقت دو نقشه فرسایش تهیه شده توسط تمامی پارامترها و پارامترهای انتخاب شده توسط الگوریتم انتخاب ویژگی از جدول ROC^۴ استفاده شد که نتایج آن در شکل (۷) آمده است. با توجه به شکل مشخص می‌شود که AUC^۵ نزدیک به ۸۸ درصد دارای دقت بالا در پیش‌بینی مناطق مستعد فرسایش خندقی هستند. کانوسنتی و همکاران^۶ (۲۰۱۸) و آزاره و همکاران^۷ (۲۰۱۹) از نمودار ROC برای تعیین دقت نقشه‌های فرسایش خندقی استفاده نمود. نتایج نشان داد که استفاده از این روش برای بررسی دقت نتایج مفید می‌باشد.



شکل ۷. نتایج منحنی ROC جهت تعیین صحت مدل

با توجه به اینکه به علت پیشروی روستا و زمین‌های کشاورزی در منطقه که دارای خاک‌های مستعد فرسایش با سازندهای حساس به فرسایش است، فرسایش خندقی ایجاد شده و خطر جدی برای اراضی روستایی و کشاورزی این منطقه محسوب

1. Vandekrckckove et.al

2. Saha et al

3. Hembram and Saha

4. Receiver operating characteristic

5. Area under curve

6. Conoscenti et.al

7. Azarehe et.al

می‌شود. در حقیقت با دخالت‌هایی که انسان در مناطق حساس به فرسایش می‌کند منجر به پیشروی این فرسایش و از دست رفتن اراضی می‌گردد. که این نتایج با مطالعات، عرب عامری و همکاران (۲۰۱۹) مطابقت دارد، ریجیدیک و همکاران (۲۰۰۶) کاربری اراضی را به عنوان یک متغیر در گسترش فرسایش خندقی بسیار تاثیر گذار دانسته‌اند و در بررسی خندق‌های جاوه در کشور اندونزی به این نتیجه رسیدند که تغییر در کاربری اراضی و شخم ناصحیح علت افزایش خندق در این منطقه بوده است. اسچمیت و همکاران (۲۰۰۶) به این نتیجه رسیدند که میزان فرسایش خندقی در ارتباط با تغییر کاربری در جنوب شرقی لهستان است. مطالعات وندر کروکو و همکاران (۲۰۰۳) در اسپانیا نشان داد که اقدامات ناموفق مدیریت زمین، منجر به افزایش حجم فرسایش خندقی شده است. که این مطالعات با نتایج این تحقیق مطابقت دارد، در منطقه مورد مطالعه نیز مشخص شد که تغییرات کاربری اراضی منجر به تشدید فرسایش خندقی شده است. به طوری که با افزایش اراضی کشاورزی و مسکونی میزان فرسایش خندقی افزایش یافته است و بیشترین تمرکز خندق‌ها در اراضی بایر در مرکز و اراضی مرتعی در شمال و جنوب منطقه مورد مطالعه می‌باشد. بررسی نتایج حاصل از واحدهای لیتولوژیکی نشان داد که بیشترین خندق‌ها در واحد سنگ‌شناسی آبرفتی کواترنری و آغاچاری رخ داده است که این امر نقش رسوبات سست و منفصل در رشد خندق را نشان می‌دهد که با نتایج پژوهش زوکا و همکاران (۲۰۰۶)، پویسن و همکاران (۲۰۰۳) مطابقت دارد.

نتیجه‌گیری

در مطالعات فرسایش خندقی شناسایی عوامل موثر در ایجاد و گسترش فرسایش خندقی یکی از مهم‌ترین عوامل برای کنترل فرسایش خندقی به حساب می‌آید. در این مطالعه مناطق مستعد فرسایش خندقی شهر مهر در جنوب استان فارس با استفاده از الگوریتم تصمیم‌گیری چند معیاره تعیین شد. نتایج نشان داد که مناطق واقع در مرکز منطقه مورد مطالعه نسبت به سایر بخش‌ها مستعد فرسایش خندقی می‌باشند. اثرات عوامل طبیعی در بیشتر موارد خارج از دسترس می‌باشد و به سرشت سازندهای زمین‌شناسی، خصوصیات فیزیکی منطقه (شیب، توپوگرافی)، خصوصیات خاک و عوامل دیگر مربوط می‌شود ولی تاثیر عوامل غیرطبیعی را نیز نمی‌توان نادیده گرفت. تخریب شدید پوشش گیاهی بر اثر چرای مفرط دام مازاد بر ظرفیت مراتع، جاده سازی‌های مکرر با توجه به حساسیت زیاد تشکیلات زمین‌شناسی منطقه خصوصا تشکیلات آغاچاری و کواترنر به فرسایش و عدم رعایت اصول صحیح کشت و تناوب زراعی در اراضی کشاورزی و تغییر کاربری اراضی منطقه که موجبات برهم خوردن بافت و ساختمان خاک می‌شود. عوامل موثر در ایجاد و گسترش خندق در منطقه مورد مطالعه را می‌توان به دو گروه انسانی (استفاده نادرست از زمین، چرای بیش از حد، جاده‌سازی) و عوامل فیزیکی شامل (توزیع بارش، توپوگرافی، خصوصیات خاک و پوشش گیاهی) تقسیم نمود. در صورتی که نوع سازند زمین‌شناسی و رسوبات موجود تعیین‌کننده اندازه و تراکم خندق در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. در این مطالعه مشخص شد که تغییرات کاربری اراضی منجر به تشدید فرسایش در منطقه شده است. به طوری که با افزایش اراضی کشاورزی و مسکونی در منطقه مورد مطالعه میزان فرسایش خندقی افزایش یافته است. بنابراین با توجه به اینکه خاک منطقه مناسب جهت انجام عملیات بیولوژیک و جلوگیری از پیشروی فرسایش خندقی در منطقه نیست، بنابراین از روش‌های مکانیکی برای کنترل آبراهه‌ها به منظور مهار فرسایش باید استفاده نمود. همچنین با بهره‌گیری از طرح‌های مدیریتی اصلاح خاک، در طولانی مدت با کشت گیاهان از بروز سیلاب در منطقه جلوگیری نمود. نتایج این تحقیق دلالت بر تاثیر مثبت ویژگی‌های نظیر توپوگرافی و سازندهای زمین‌شناسی بر گسترش خندق‌ها در تولید رسوب برای مناطق پایین دست دارد. این نتیجه به مدیران و مهندسين حفاظت خاک توصیه می‌کند که در کاهش گسترش خندق‌ها و کم کردن تولید رسوب بایستی به کنترل فرسایش در پیشانی آن‌ها توجه بیشتری داشت. همچنین بیان این نکته ضروری به نظر می‌رسد که بایستی تحقیقات بیشتری بر روی جریان‌های هیدرولوژی دامنه‌های دارای خندق و مکانیسم ایجاد و گسترش آن‌ها از نظر ایجاد، پدیده انحلال و راهکارهای کنترل در

آینده صورت گیرد. بخش عمده اراضی منطقه، شامل اراضی بایر در مرکز و اراضی مرتعی در شمال و جنوب منطقه مورد مطالعه می‌باشد. بیشترین تمرکز خندق‌ها در اراضی بایر، جاده‌های ارتباطی آسفالتی و غیرآسفالتی و اراضی دیم‌زارهای حاصل از تغییر مراتع و فاقد پوشش گیاهی مشاهده می‌شود. لذا بایستی در طراحی و ساخت جاده‌ها اصول ایمنی لازم برای پیشگیری از ایجاد خندق‌ها را به صورت رعایت اصول فنی در زهکشی رواناب تولیدی توسط جاده و حفاظت اراضی پائین دست آبگذرهای جاده‌ای توسط پوشش سنگریزه به منظور استهلاک انرژی رواناب تولیدی و تبدیل دیم‌زارهای کم بازده به مرتع مدنظر مدیران اراضی قرار گیرد. به منظور کاهش گسترش خندق‌ها می‌توان با استقرار پوشش گیاهی به کاهش سطوح لخت و فاقد پوشش و افزایش ضریب زبری پرداخت تا میزان رواناب سطحی را کاهش داد. در مناطقی که جریان سطحی در گسترش خندق نقش دارد، ایجاد تاخیر در جریان و کم کردن دبی آن می‌تواند در تثبیت خندق‌ها کمک نماید. احیای پوشش گیاهی با افزایش زبری سطح و افزایش ماده آلی خاک، در کنترل و کاهش خطر فرسایش خندقی، موثر می‌باشد. اصلاح خاک‌های شور و سدیمی به کمک اصلاح‌کننده‌ها، کمک موثری در کنترل خندق و کاهش خطر فرسایش خندقی می‌نماید.

منابع

- احمدی، ح.، ۱۳۹۰، ژئومورفولوژی کاربردی جلد اول، انتشارات دانشگاه تهران، ص ۲۶۶.
- داوودی مقدم، د.، حقی‌زاده، ع. ۱۳۹۹، شناسایی مناطق مستعد فرسایش خندقی و تعیین مهمترین عوامل موثر بر وقوع آن، هفتمین همایش علمی پژوهشی توسعه و ترویج علوم کشاورزی و منابع طبیعی ایران، تهران، صص ۶۸-۵۳.
- سلیمان‌پور، م.، صوفی، م.، روستا، ج.، شادفر، ص.، جوکار، ل.، کشاورزی، ح. ۱۳۹۹. بررسی روند پیشروی خندق‌های دائمی در حوضه آبخیز خرم بید استان فارس، نشریه علمی-پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز، صفحات ۳۲۹-۳۱۸، جلد ۲۱، شماره ۲.
- صمدنژاد، ع.، ۱۳۸۱، بررسی علل اصلی ایجاد فرسایش آبکندی در استان فارس، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده منابع طبیعی، ۶۸ ص.
- صوفی، م.، ۱۳۸۹، بررسی تاثیر انواع کاربری اراضی بر گسترش آبکندها در برخی مناطق استان فارس، چهارمین همایش ملی فرسایش و رسوب.
- غلامی، م.، احمدی، م.، محمودی، م. ۱۳۹۶. تحلیل محدودیت‌های ژئومورفولوژیکی در گسترش کالبدی شهر با تاکید بر فرسایش خندقی (مطالعه موردی: شهر مهر در جنوب استان فارس)، مجله مخاطرات محیط طبیعی، سال ششم، شماره دوازدهم، ص ۱۲۴-۱۰۵.
- Arabameri, A., Blaschke, T., Pradhan, B., Pourghasemi, H.R., Tiefenbacher, J.P. & Bui, D.T. 2020. Evaluation of recent advanced soft computing techniques for gully erosion susceptibility mapping: A comparative study. *Sensors*, 20(2), p.335.
- Arabameri, A., Chen, W., Loche, M., Zhao, X., Li, Y., Lombardo, L., Cerda, A., Pradhan, B. & Bui, D.T. 2020. Comparison of machine learning models for gully erosion susceptibility mapping. *Geoscience Frontiers*, 11(5), pp.1609-1620.
- Arabameri, A., Pradhan, B. & Rezaei, K. 2019. Gully erosion zonation mapping using integrated geographically weighted regression with certainty factor and random forest models in GIS. *Journal of environmental management*, 232, pp.928-942
- Arabameri, A., Pradhan, B., Rezaei, K., Yamani, M., Pourghasemi, H.R. & Lombardo, L. 2018. Spatial modelling of gully erosion using evidential belief function, logistic regression, and a new ensemble of evidential belief function-logistic regression algorithm. *Land Degradation & Development*, 29(11), pp.4035-4049
- Azareh, A., Rahmati, O., Rafiei-Sardooi, E., Sankey, J.B., Lee, S., Shahabi, H. & Ahmad, B.B., 2019. Modelling gully-erosion susceptibility in a semi-arid region, Iran:

- Investigation of applicability of certainty factor and maximum entropy models. Science of the Total Environment, 655, pp.684-696*
- Bertolini, M, M, Braglia, (2006). *Application of the AHP methodology in making a proposal for a public work contract, 17 January.*
 - -Bouchnak, H., Felfoul, M. S., Rached Boussema, M. & Habib Snane, M. 2009. *Slope and Rainfall Effects on The Volume of Sediment Yield by Gully Erosion in The Souar Lithologic Formation (Tunisia), Catena, v. 78 , p. 170–17*
 - Cheng, H., Wu, Y., Zou, X., Si, H., Zhao, Y., Liu, D. & Yue, X. 2006. *Study of Ephemeral Gully Erosion in a Small Upland Catchment on The InnerMongolian Plateau, Soil & Tillage Research, v. 90. p. 184–19*
 - Choubin, B., Rahmati, O., Tahmasebipour, N., Feizizadeh, B. & Pourghasemi, H.R. 2019. *Application of fuzzy analytical network process model for analyzing the gully erosion susceptibility. In Natural hazards gis-based spatial modeling using data mining techniques (pp. 105-125). Springer, Cham*
 - Conoscenti, C., Agnesi, V., Cama, M., Caraballo-Arias, N.A. and Rotigliano, E., 2018. *Assessment of gully erosion susceptibility using multivariate adaptive regression splines and accounting for terrain connectivity. Land degradation & development, 29(3), pp.724-736*
 - Dube, F., Nhapi, I., Murwira, A., Gumindoga, W., Goldin, J. & Mashauri, D.A. 2014. *Potential of weight of evidence modelling for gully erosion hazard assessment in Mbire District–Zimbabwe. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 67, pp.145-152*
 - Frankl, A., (2012). *Gully development and its spatio-temporal variability since the late 19th century in the northern Ethiopian Highlands,AFRIKA FOCUS, volume 25, No 2,pp 121-131*
 - Hembram, T.K., & Saha, S. 2020. *Prioritization of sub-watersheds for soil erosion based on morphometric attributes using fuzzy AHP and compound factor in Jainti River basin, Jharkhand, Eastern India. Environment, Development and Sustainability, 22(2), pp.1241-1268*
 - Imasuen, O.I., Omali, A.O. & Ibrahim, I. 2011. *Assessment of environmental impacts and remedies for gully erosion in Ankpa Metropolis and environs, Kogi State, Nigeria. Advances in Applied Science Research, 2(5), pp.372-384*
 - Lesschen, J. P., kok, K., Verburg, P. H. & Cammreaa, L. H. 2007. *Identification of vulnerable areas for Gully erosion Under Different Scenarios of land Abandonment in Southeast Spain, Catena, v. 71, p.110-121*
 - Lin, C.T., Chiu, H. & Tseng, Y.H., 2006. *Agility evaluation using fuzzy logic. International Journal of Production Economics, 101(2), pp.353-368*
 - Moore, I.D., Burch, G.J. 1988. *Sediment transport capacity of sheet and rill flow: application of unit stream power theory. Water Resour. Res. 22, 1350–1360.*
 - Poeson, J. et al., (2003). *Gully Erosion and Environment Change, Importance and Research Needs, Catena, 50, pp 91-133*
 - Rijdsdijk, A., Bruijnzeel, L. A. S. & prins, T. M. 2006. *Sediment Yield from Gullies, Riparian Mass Wasting and Bank Erosion in the Upper Konto Catchment, East Java, Indonesia, Geomorphology, v. 87, p. 38-52*
 - Saha, S., Gayen, A., Pourghasemi, H.R. and Tiefenbacher, J.P. 2019. *Identification of soil erosion-susceptible areas using fuzzy logic and analytical hierarchy process modeling in an agricultural watershed of Burdwan district, India. Environmental Earth Sciences, 78(23), p.649*
 - Schmitt, A., & et al., (2006). *Time and scale of gully erosion in the jediczny dol gully system, south-east Poland, geomorphology, No: 101, pp. 192-208.*
 - Strunk, H. 2003. *Soil degradation and overland flow as causes of gully erosion on mountain pastures and in forests. Catena, 50(2-4), pp.185-198*

- Tucker, G.E. (2005). *Implications of bank failures and fluvial erosion for gully development :Field Study and modeling. Journal of Geophysical Research, TOC ,Volume 110, Issue F1 March 2005, pages 1-23*
- Valizadeh-Gh, Z., & Khorram, E. 2015. *Linear fractional multi-objective optimization problems subject to fuzzy relational equations with the max-average composition. Applied and Computational Mathematics, 4(1-2), pp.20-30*
- Vandekrckrckove, L. J., & Poesen, G. 2003. *Medium Term Gully Head Cut Rates in Southeast Spain Determined From Aerial Photographs and Groud Measurements, Catena, v. 50, p. 329- 357.*
- Zucca, C., Canu, A., Della Peruta, R., 2006. *Effects of Land use and Landscape on Spatial distribution and morphological feature of gullies in an agro-pastoral area in Sardinia (Italy). Catena 88, 87-95.*