

پهنه‌بندی فرسایش خندقی در حوضه آبریز دیره با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)

مزگان انتظاری^{۱*}، امجد ملکی^۲، خدیجه مرادی^۳، سعید الفتی^۴

۱- استادیار جغرافیا، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

۲- دانشیار جغرافیا، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد ژئومورفولوژی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

۴- کارشناس ارشد اقلیم‌شناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

دریافت: ۹۱/۸/۲۹ پذیرش: ۹۲/۵/۵

چکیده

فرسایش خندقی یکی از شکل‌های پیشرفته و بحرانی فرسایش آبی است که باعث نابودی حجم بزرگی از خاک زمین‌ها می‌شود. شناسایی عوامل مؤثر بر وقوع این نوع فرسایش و پهنه‌بندی آن یکی از ابزارهای مهم کنترل این پدیده است. این پژوهش با هدف شناسایی عوامل مؤثر بر ایجاد فرسایش خندقی و شبیه‌سازی احتمال وقوع آن در حوضه آبریز دیره انجام شده است. پس از انتخاب مهم‌ترین عوامل مؤثر بر وقوع فرسایش خندقی مانند شیب، جهت شیب، انحنای افقی و عمودی شیب، لیتولوژی، فاصله از آبراهه، فاصله از جاده و کاربری اراضی، این لایه‌ها در سیستم اطلاعات جغرافیایی تولید شدند؛ سپس به منظور مقایسه زوجی در جدول ماتریس براساس میزان ارجحیت سلسله‌مراتب در وقوع فرسایش خندقی رده‌بندی شدند. در نهایت، با کمک نرم‌افزار Arc GIS عملیات وزن‌دهی و هم‌پوشانی از لایه‌های برگزیده انجام شد و با توجه به ضرایب به‌دست آمده، نقشه پهنه‌بندی خطر در شش طبقه بدون خطر، خطر بسیار کم، خطر کم، خطر متوسط، خطر زیاد، خطر خیلی زیاد به‌دست آمد. مقدار عددی ضریب نهایی از جمع اعداد حاصل از ضرب وزن هر معیار در شاخص آن در هر نقطه بین صفر تا ۱۰۰ تعریف شد که در آن هرچه ضریب به‌دست آمده به ۱۰۰ نزدیک‌تر باشد، پرخطر بودن وقوع زمین‌لغزش را نشان می‌دهد و هرچه این ضریب به صفر نزدیک‌تر باشد، خطر کمتر و در نهایت بی‌خطر بودن وقوع آن را نمودار می‌کند. برپایه نتایج تحقیق، ۳۶ درصد از حوضه دیره در پهنه با خطر زیاد و خیلی زیاد قرار دارد که باعث جابه‌جایی حجم زیادی از خاک می‌شود.

واژه‌های کلیدی: فرسایش خندقی، تحلیل سلسله‌مراتبی، سیستم اطلاعات جغرافیایی، حوضه آبریز دیره.

Email: entezary54@yahoo.com

* نویسنده مسئول مقاله:



۱- مقدمه

خندق آبراهه‌ای به نسبت دائمی است که جریان‌های موقت آب هنگام بارندگی از آن می‌گذرد و مقدار بسیار زیادی رسوب را تخلیه می‌کنند (رفاهی، ۱۳۷۵: ۱). فرسایش خندقی حالت تکامل یافته فرسایش شیاری رواناب‌هاست (علیزاده، ۱۳۶۸: ۴۳). شکل‌گیری خندق‌ها همواره با فرسایش و تغییر شکل ظاهری زمین همراه است و سبب تولید میزان زیادی رسوب، تخریب اراضی، جاده‌ها، شبکه‌های آبیاری و پر شدن سدها می‌شود (جعفری گرزین، ۱۳۸۶؛ Burkard & Kostaschuk, 1997). خندق‌ها که در بیشتر موارد شاخصه‌های اصلی تغییرات محیطی در نظر گرفته می‌شوند، به دلیل رشد سریعشان از شکل‌های عادی فرسایش به‌شمار نمی‌آیند (بیاتی خطیبی، ۱۳۸۳؛ Heathwait Et al., 2001; Nachtergaele Et al., 1990). فرسایش خندقی به دلیل انتقال افق‌های حاصل‌خیز خاک و کاهش ظرفیت نگه‌داشت آب بسیار خطرناک است و یکی از عوامل ناپایداری و فرسایش خاک و ایجاد مسئله برای کارکرد ماشین‌های کشاورزی است. در کوهستان‌های نیمه‌خشک، توزیع ناهمگن پوشش گیاهی، آشفته شدن سطح دامنه‌ها و مدیریت غیراصولی انسان روی زمین و نیز تأثیر عوامل زمین‌شناسی، پدولوژیکی و اقلیمی سرعت تغییرات مکانی را افزایش داده و ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولوژیکی دامنه‌ها را به‌طور چشمگیری دگرگون کرده است (بیاتی خطیبی، ۱۳۸۳). این نوع فرسایش که بار رسوبی رودخانه‌ها را افزایش و کیفیت آب‌های سطحی را کاهش می‌دهد، در دهه‌های اخیر بر اثر کشت غیراصولی و تغییرات کاربری روند سریعی در پیش گرفته است. از سوی دیگر، تغییرات آب‌وهوایی و به‌دنبال آن، تغییرات در بیلان آب زمینه را برای زایش خندق مساعد کرده است (بیاتی خطیبی، ۱۳۸۳؛ Renschler & Valentine Et al., 2005: 133; Harbor, 2002: 189; Dotterweich, 2005: 194).

این موضوع در کشور ما از این نظر اهمیت دارد که حدود ۹۰ درصد سطح کشور دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک است و بارندگی در این مناطق پراکنش زمانی مناسبی ندارد. در چنین شرایطی نبود یا کمبود پوشش گیاهی همراه با افزایش رواناب موجب ازبین رفتن بیش از ۲/۵ میلیارد تن خاک در سال می‌شود (احمدی، ۱۳۸۸). برای مثال،

افزایش ۴۵۰ درصدی میزان فرسایش خاک در کشور طی سال‌های ۱۳۳۰ تا ۱۳۸۸ بحرانی بودن وضعیت فرسایش و لزوم کنترل آن در ایران را نشان می‌دهد (همان). این وضعیت در منطقه مورد مطالعه (حوضه رودخانه دیره) نیز به وضوح دیده می‌شود و هرساله میزان زیادی خاک بر اثر این نوع فرسایش جابه‌جا می‌شود. از آنجا که این دشت به علت منابع آب و خاک حاصل‌خیز، یکی از مناطق مهم کشاورزی استان است، فرسایش خندقی خسارت‌های جبران‌ناپذیری را به خاک‌های منطقه وارد می‌کند.

در اینجا به شماری از پژوهش‌هایی که در حوزه فرسایش خندقی انجام شده است، اشاره می‌کنیم. بتز و دروس^۱ (۱۹۹۹) از مدل رقومی ارتفاع (DEM) همراه با ترکیبی از عکس‌های هوایی برای اندازه‌گیری فرسایش خندقی در محیط‌های ناپایدار ژئومورفولوژی در نیوزیلند استفاده کردند. آن‌ها تغییرات رخ داده را طی دو دوره زمانی ۱۴ و ۳۳ سال مطالعه کردند. ویجنس^۲ و همکارانش (۲۰۰۱) در پژوهش‌های خود نشان دادند سنگ‌شناسی نقش مهمی در فعالیت هدکت خندق دارد؛ به طوری که در یک کاربری معین، هدکت خندق‌ها در اراضی مارنی و لومی فعال‌تر از اراضی گراولی و کنگلومرایی است. کولیسون^۳ (۲۰۰۱) بر اهمیت ترک‌های کششی به عنوان عامل مهم ناپایداری و توسعه خندق تأکید دارد. سوفی^۴ و همکارانش (۲۰۰۲) با بررسی کروئولوژی تشکیل خندق در یک محیط جنگلی در جنوب شرق استرالیا نشان دادند که قطع درختان و بارندگی شدید علت اصلی فرسایش خندقی بوده است. نچترگیلی^۵ و همکاران (۲۰۰۲) در تحقیق خود در کمر بند لسی بلژیک دریافتند معادله‌های مربوط به آستانه پستی و بلندی برای انواع خندق‌ها متفاوت است. کاکمبو^۶ و همکاران (۲۰۰۳) روابط بین پدیده خندق‌زایی و متغیرهای توپوگرافی را با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی جست‌وجو کردند. آن‌ها مقایسه بین نواحی با قابلیت خندق‌زایی زیاد و نواحی واقعی موجود با توان معمولی خندق‌زایی را با استفاده از شاخص توان آبراهه‌ای که جانشینی برای تنش برشی جریان آب است،

1. Betts & Derose
2. Wijdenes
3. Collison
4. Soufi
5. Nachtergaele
6. Kakembo



انجام دادند و دریافتند که ۷۵ درصد نواحی خندقی در نواحی رهاشده و دارای سطوح مقعر ایجاد شده است. پژوهش کارهایازچی (۲۰۰۰)، مورگان (۲۰۰۳) و سیدروچوک و همکاران (۲۰۰۳) نیز از دیگر تحقیقات در این حوزه است.

رامشت و همکاران (۱۳۸۸) روش‌های ریاضی ارزیابی گالی‌ها را معرفی و پیشنهاد کردند که برحسب ویژگی‌های اقلیمی، زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی و غیره مدل مناسب برای ارزیابی میزان فرسایش خندقی در هر منطقه مشخص شود. میلادی (۱۳۹۰) با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی به شبیه‌سازی فرسایش خندقی در حوضه‌های رازآور و مرگ پرداخت و نقاط مستعد فرسایش خندقی را به کمک نرم‌افزار GIS مشخص کرد. عرب‌قشقاوی و همکاران (۱۳۹۰) با روش Multi Class Maps به پهنه‌بندی فرسایش خندقی در حوضه آبخیز طرود فیروزکوه پرداختند. براساس نتایج تحقیق آن‌ها، ۸۸ درصد از محدوده خندقی در پهنه‌های با ریسک‌پذیری زیاد و خیلی زیاد قرار دارد. در پژوهش حاضر، با مشخص کردن مناطقی از حوضه مورد مطالعه که از لحاظ فرسایش خندقی در معرض خطر قرار دارند و پهنه‌بندی آن، می‌کوشیم در جهت برنامه‌ریزی‌های صحیح جهت پیشگیری از این فرسایش در این حوضه گامی برداریم.

۲- منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز دیره با مساحت ۱۱۳/۴۱ کیلومتر مربع در غرب ایران محدوده سیاسی استان کرمانشاه، شهرستان گیلانغرب قرار دارد. از نظر موقعیت جغرافیایی، این حوضه بین مدارهای ۳۴/۱۴ تا ۳۴/۲۹ درجه از شمال خط استوا و بین نصف‌النهارهای ۴۵/۳۹ درجه تا ۴۵/۵۶ درجه طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ واقع شده است. حوضه دیره منطقه‌ای نسبتاً کوهستانی است که ۳۸ درصد زمین‌هایش را کوه‌ها و تپه‌ها تشکیل می‌دهد. ارتفاع متوسط حوضه از سطح آب‌های آزاد ۱۴۵۰ متر است. شیب عمومی زمین‌ها حدود ۴/۱ درصد و جهت آن شمال غربی است. مرتفع‌ترین قله با ارتفاع ۲۳۲۰ متر از سطح دریا در مرز شرقی و در ارتفاعات کوه بازی‌دراز قرار دارد. بررسی خاک‌شناسی حوضه حاکی از این است که عمق خاک در حوضه دیره از کم‌عمق تا نیمه‌عمیق و عمیق متغیر است. در مناطق کوهستانی شمال و جنوب حوضه، شیب عمومی اراضی بیش از ۲۵ درصد و دارای خاکی با عمق کم است. در ارتفاعات پایین‌تر و شیب بین ۸ تا ۲۵ درصد تپ تپه‌ها

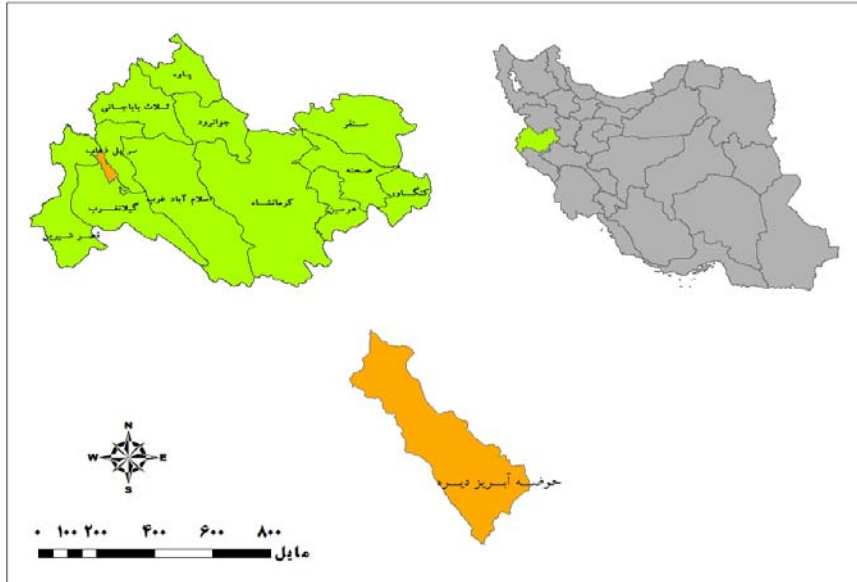
قرار دارد. این واحد دارای خاک‌های کم‌عمق تا نیمه‌عمیق سنگ‌ریزه‌دار با بافت سبک تا متوسط است. در مناطق دارای شیب ۱ تا ۸ درصد فلات‌ها و تراس‌های فوقانی و دشت‌های دامنه‌ای قرار دارد. این بخش دارای خاک عمیق با بافت سنگین تا خیلی سنگین است که مواد آهکی در لایه‌های آن جمع شده است. تیپ اراضی واریزه‌های بادبزی‌شکل و دشت رسوبی رودخانه‌ای دارای خاک عمیق با بافت سنگین تا خیلی سنگین است که در دشت‌های رسوبی با شکاف‌های عمیق همراه است (دفتر مطالعات منابع طبیعی گیلانغرب، ۱۳۸۵: ۸۶). از نظر کاربری اراضی، حوضه دیره به پنج کاربری تقسیم شده است: اراضی دیم، اراضی مرتعی، اراضی جنگلی، اراضی آبی، اراضی مرتع - جنگل با غلبه جنگل.

علاوه بر عوامل طبیعی، عوامل انسانی نیز باعث افزایش این نوع فرسایش در حوضه مورد مطالعه می‌شود؛ از جمله کشت خطی، چرای خیلی زیاد، ساخت جاده از کمرکش کوهستان‌ها، فشرده شدن خاک بر اثر عبور وسایل نقلیه کشاورزی، عبور مداوم دام از یک مسیر و... (شکل ۱).

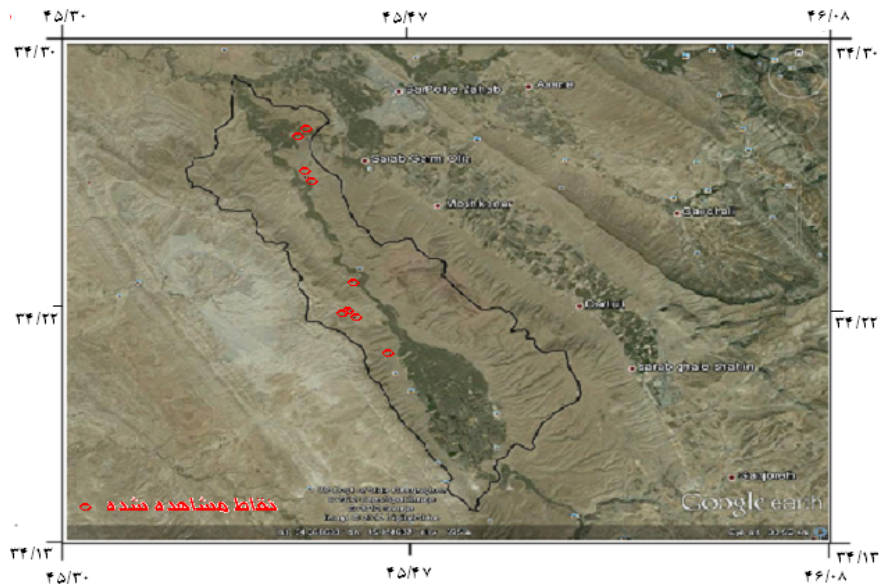
ازلحاظ محدودیت کاربری اراضی، می‌توان این موارد را نام برد: ۱- محدودیت‌های مربوط به خاک: بافت سطحی، نفوذپذیری خاک تحتانی، میزان سنگ‌ریزه در خاک تحتانی، عمق خاک و سرعت نفوذ آب؛ ۲- محدودیت‌های مربوط به توپوگرافی و فرسایش: شیب، پستی و بلندی، فرسایش آبی و بادی و رسوبات بادی و آبی؛ ۳- محدودیت زهکشی: سطح آب زیرزمینی، محدودیت مربوط به ماندابی شدن اراضی و سیل‌گیری اراضی.



شکل ۱ فرسایش خندقی در منطقه مورد مطالعه



شکل ۲ نقشهٔ محدودهٔ مورد مطالعه



شکل ۳ نقشهٔ تعدادی از خندق‌های موجود در حوضهٔ آبریز دیره

جدول ۱ موقعیت و مشخصات خندق‌های ثبت‌شده در حوضه آبریز دیره

شمار خندق‌ها	عرض جغرافیایی به UTM	طول جغرافیایی به UTM	میانگین عرض خندق به متر	میانگین عمق خندق به متر	طول خندق به متر	حجم خاک برداشت شده به متر مکعب
۱	۳۸۰۸۸۴۷	۳۸۵۷۶۰۳۰	۳/۹	۲/۵	۱۵/۴	۱۵۰/۱۵
۲	۳۸۰۰۰۷۵	۳۸۵۷۹۶۱۲	۳/۵	۲/۸	۱۶/۶۸	۱۶۳/۴۶
۳	۳۸۱۱۳۵۰	۳۸۵۷۵۵۶۵	۴/۳۸	۳/۲۶	۲۴/۵	۳۴۹/۸۳
۴	۳۸۰۸۸۸۳	۳۸۵۷۵۸۹۴	۵/۲۹	۳/۴۹	۲۱/۹	۴۰۴/۳۲
۵	۳۸۱۱۳۶۳	۳۸۵۷۵۰۸۶	۵/۱۲	۳/۹۳	۳۸/۵۷	۷۷۶/۰۹
۶	۳۸۰۳۸۱۱	۳۸۵۷۸۱۴۴	۶/۳۲	۴/۱۷	۳۰/۲۵	۷۹۷/۲۳
۷	۳۸۰۲۵۵۲	۳۸۵۷۸۱۷۸	۴/۷	۴/۷۴	۲۳/۶۳	۵۲۶/۴۳
۸	۳۸۰۸۴۳۵	۳۸۵۷۵۹۴۱	۲/۸۳	۲/۵	۶۷/۲۱	۴۷۵/۵۱
۹	۳۸۰۲۰۲۷	۳۸۵۷۸۳۳۴	۵/۷	۵/۳۲	۱۲۴/۴	۳۷۷/۳۱
۱۰	۳۸۰۰۱۴۸	۳۸۵۷۹۶۲۳	۱/۶۵	۳/۱۱	۲۸/۴۲	۱۴۵/۸۶

در نهایت، با استفاده از روش AHP پهنه‌بندی مناطق مستعد فرسایش خندقی انجام شد.

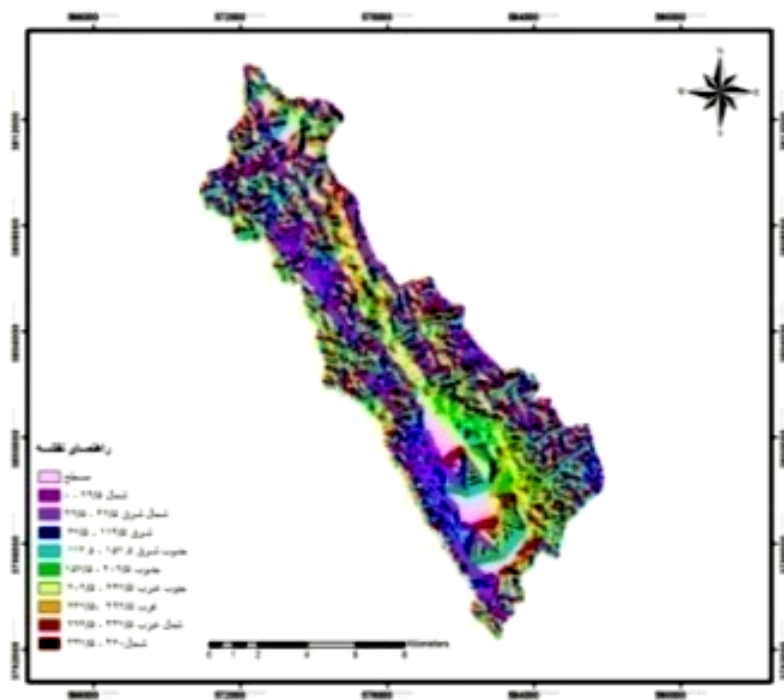
۳- روش تحقیق

این پژوهش از نظر هدف، در شمار تحقیقات توسعه‌ای و کاربردی و از نظر ماهیت و روش، در شمار تحقیقات توصیفی-تحلیلی و پیمایشی است. برپایه آنچه در موضوع تحقیق آمده است، روش مورد استفاده در این پژوهش، تحلیل سلسله‌مراتبی AHP از متغیرهاست. اساس این روش مقایسه زوجی متغیرها در جدول ماتریس است. ارزش عددی حاصل از مقایسه کیفی آن‌ها نسبت به همدیگر از راه قضاوت کارشناسی تعیین می‌شود (الفتی و همکاران، ۱۳۹۱: ۳۶). بنابراین، مقایسه دوجه‌دوی متغیرهای مؤثر بر وقوع فرسایش خندقی در منطقه مورد مطالعه ورودی این سیستم در نظر گرفته می‌شود و وزن‌های نسبی به‌دست‌آمده نیز خروجی سیستم خواهد بود (علائی طالقانی و رحیم‌زاده، ۱۳۹۰: ۵۷). شرایط محیطی منطقه در وقوع این فرسایش نقش اساسی دارد و اصولاً برپایه موقعیت خندق‌های منطقه استوار است. به این منظور، ابتدا ده خندق شاخص در سطح حوضه شناسایی شد و موقعیت آن‌ها به کمک دستگاه GPS و متر اندازه‌گیری و سپس با انتقال آن‌ها به نقشه توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰۰ پایه، نقشه

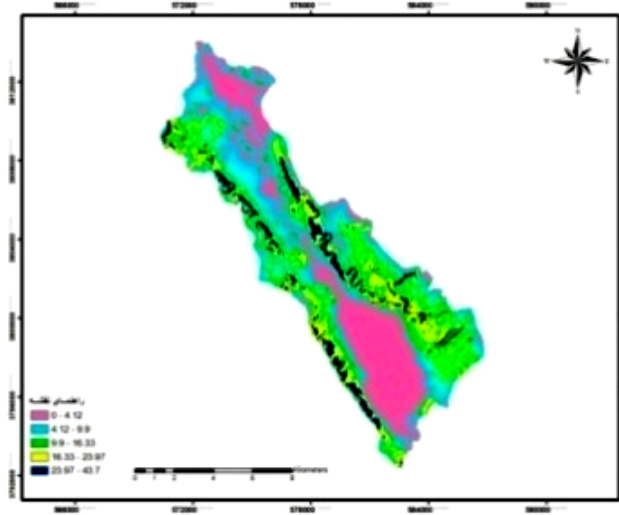
پراکنش خندق‌های حوضه دیره تهیه شد. در واقع، امکان شناسایی این تعداد از خندق‌ها برای نگارندگان وجود داشته است (شکل ۳ و جدول ۱).

۴- بحث و نتایج

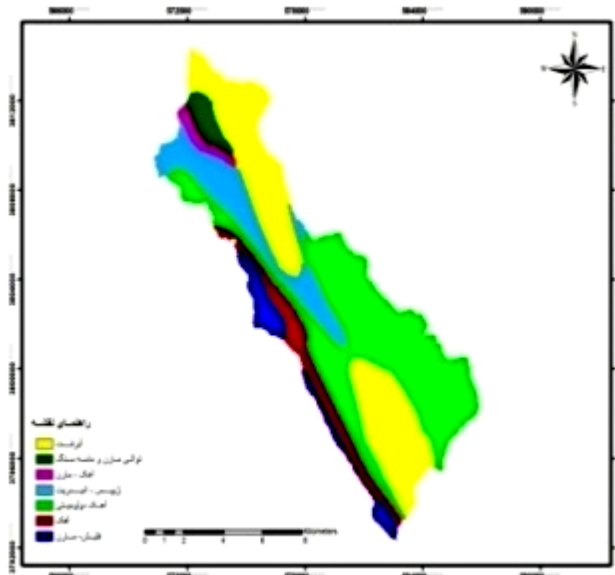
برای پهنه‌بندی مناطق مستعد فرسایش خندقی لازم است لایه‌های اطلاعاتی از متغیرهای مورد نظر استخراج شود. به این منظور، لایه‌های اطلاعاتی متغیرها که در آن‌ها باید هر متغیر به صورت یک لایه نقشه در GIS نشان داده شود، تهیه شد. این لایه‌ها عبارت‌اند از: شیب، جهت شیب، انحنای افقی و عمودی شیب، لیتولوژی، فاصله از آبراهه، فاصله از جاده و کاربری اراضی (شکل‌های ۴-۱۱).



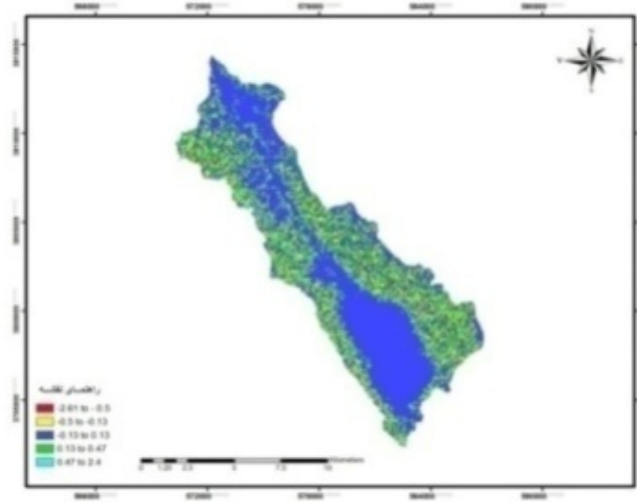
شکل ۴ نقشه جهت شیب حوضه دیره



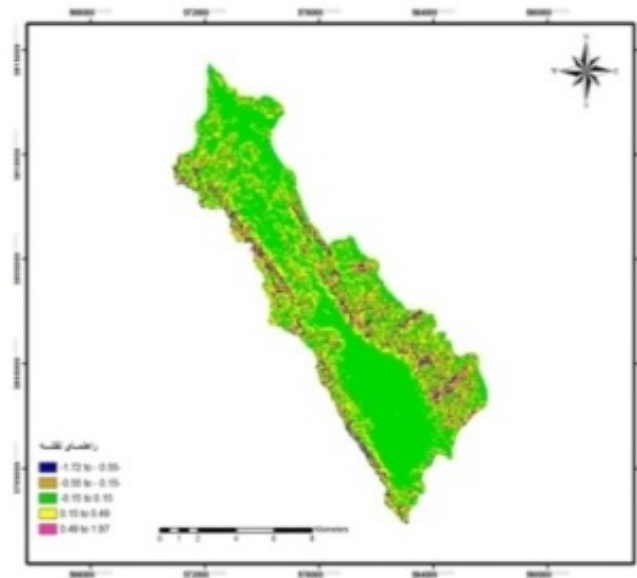
شکل ۵ نقشه شیب حوضه دیره



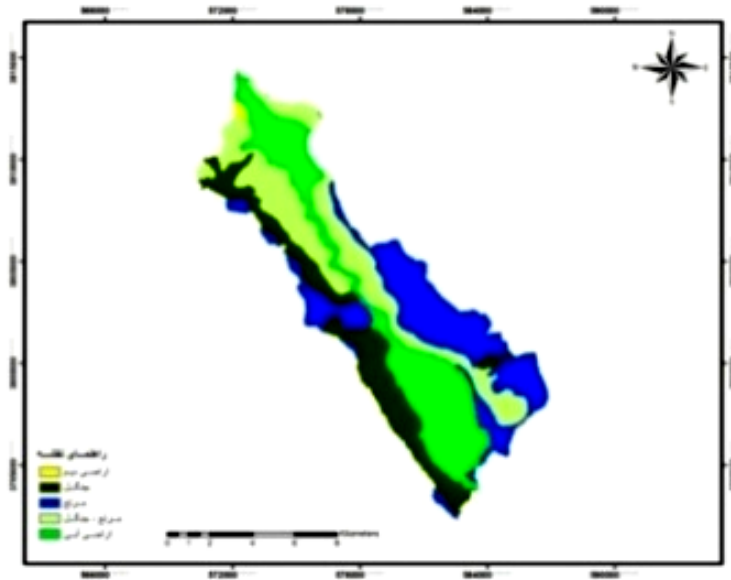
شکل ۶ نقشه لیتولوژی حوضه دیره



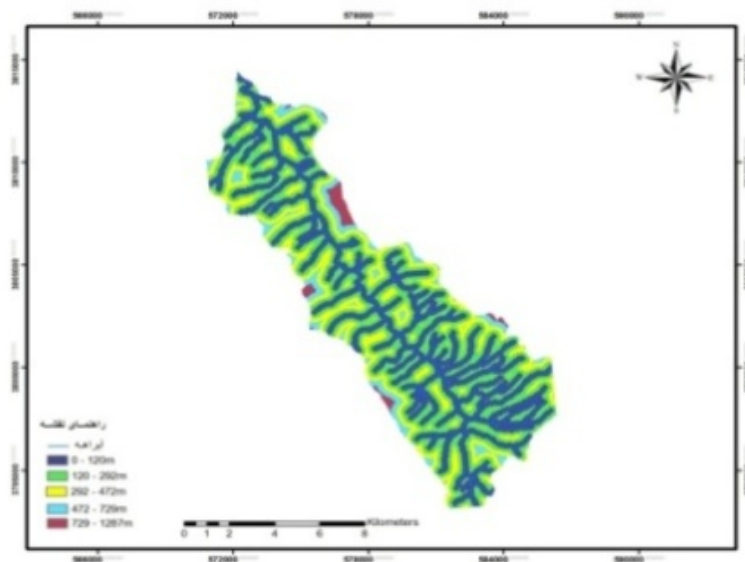
شکل ۷ نقشه کاربری اراضی



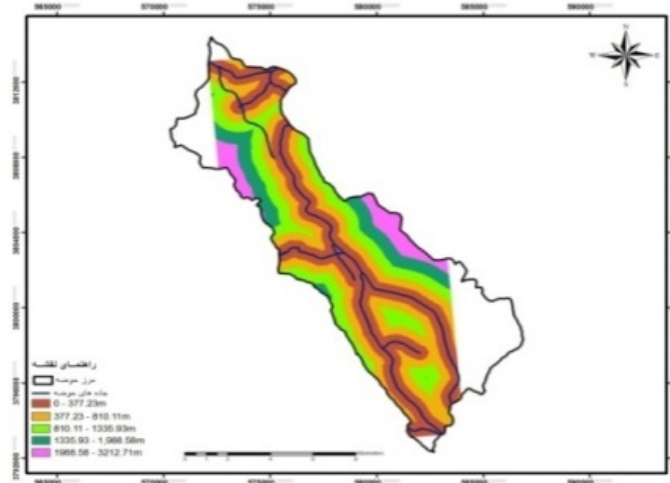
شکل ۸ نقشه انحنای شیب افقی



شکل ۹ نقشه انحنای شیب عمودی



شکل ۱۰ نقشه فاصله از آبراهه‌های حوضه دیره



شکل ۱۱ نقشه فاصله از راه‌های حوضه دیره

- لایه جهت شیب: این لایه به منظور بررسی تأثیر جهت‌های مختلف شیب منطقه مورد مطالعه در ایجاد مناطق مستعد خندق‌زایی تهیه شد و به کار رفت. هریک از این نقشه‌ها به ده کلاس تقسیم، و جهت شیب مسطح هم به عنوان یک جهت از این نقشه‌ها معرفی شد (شکل ۴).

- لایه شیب: این لایه به منظور بررسی تأثیر طبقات مختلف شیب منطقه مورد مطالعه در پیدایش نقاط مستعد خندق‌زایی (SPI) استفاده شد. برای انجام این کار نقشه شیب حوضه مورد مطالعه به پنج کلاس تقسیم شد (شکل ۵).

- لایه لیتولوژی: به لحاظ لیتولوژیکی، حوضه دیره از هفت نوع جنس آهک دولومیتی، مارن و ماسه‌سنگ، مواد آبرفتی، فلیش و مارن، آهک، آهک و مارن، ژپس و انیدریت تشکیل شده است. هدف از آوردن این نقشه‌ها، بررسی تأثیر جنس سنگ‌های موجود در منطقه مورد مطالعه در ایجاد خندق‌های این منطقه است (شکل ۶).

- لایه کاربری راضی: حوضه دیره به پنج کاربری: اراضی دیم، اراضی مرتعی، اراضی جنگلی، اراضی آبی، اراضی مرتع- جنگل با غلبه جنگل تقسیم شد (شکل ۷).

- لایه انحنای افقی شیب: این لایه‌ها نیز مانند لایه‌های انحنای شیب عمودی به پنج کلاس تقسیم شد. سیر اعداد در کلاس‌های آن نیز از منفی به مثبت است و از کلاس ۲/۶۱- تا ۲/۴ کلاس بندی شده است. این نقشه‌ها تحذب و تقعر زمین را به صورت موازی با منحنی میزان‌ها نشان می‌دهد (شکل ۸).

- لایه انحنای عمودی شیب: این لایه برای حوضه دیره نیز دارای پنج کلاس است و این کلاس‌ها از ۱/۷۲- تا ۱/۹۷ کلاس بندی شدند. در این کلاس‌ها با سیر اعداد از منفی به مثبت، در جهت عمود بر منحنی میزان‌ها از تقعر زمین کاسته و بر تحذب آن افزوده می‌شود (شکل ۹).
- لایه فاصله از آبراهه‌ها: پس از انجام تصحیحات بر لایه آبراهه‌ها، براساس فاصله اقلیدسی، فاصله از آبراهه‌ها برای حوضه دیره از صفر تا ۱۲۸۷ متر، در ۵ کلاس طبقه بندی و نقشه آن ترسیم شد. این نقشه نیز برای بررسی ارتباط میان فاصله از آبراهه‌ها و تشکیل خندق بررسی شد (شکل ۱۰).

- لایه فاصله از جاده‌ها: برای بررسی ارتباط بین تشکیل خندق و میزان فاصله از جاده‌ها، در محیط ARCMAP برای جاده‌ها، فاصله اقلیدسی Eanucleid Distance ترسیم شد. در این نقشه، فاصله اقلیدسی برای هریک از راه‌های داخل حوضه تعریف شد و در نهایت، این لایه در ۵ کلاس، از ۰ تا ۳۲۱۲/۷۱ در حوضه دیره به متر تهیه شد. هدف از ترسیم این نقشه، بررسی ارتباط میان فاصله از جاده و تشکیل خندق است (شکل ۱۱).

لزوم مقایسه زوجی متغیرها در جدول ماتریس، رده بندی آن‌ها براساس میزان ارجحیت در وقوع پدیده مورد مطالعه است. بنابراین، پس از انتخاب لایه‌های اطلاعاتی و تقسیم بندی آن‌ها به طبقات و کلاس‌ها، ساختار سلسله مراتبی آن‌ها ایجاد شد. مؤثرترین متغیر در وقوع فرسایش خندقی شیب و کم‌نقش‌ترین آن نیز لایه فاصله از آبراهه در نظر گرفته شد. این ارزیابی براساس تراکم فرسایش خندقی در هریک از لایه‌های اطلاعاتی و مشاهدات میدانی متعدد صورت گرفته است. درباره هریک از زیرلایه‌ها نیز به همین شکل عمل شد.

محاسبه بردارهای اولویت متغیرهای مورد نظر: پس از طراحی گزینه‌های مورد استفاده از نظر سلسله مراتب، ماتریس زوجی از متغیرها تشکیل شد. تشکیل این ماتریس‌ها با هدف تعیین وزن متغیرها بوده است که از طریق مقایسه زوجی تک تک عناصر با عناصر مربوط به خود در سطح بالاتر صورت می‌گیرد. مقادیر کمی هریک از متغیرهای مورد نظر نیز از جدول



شماره دو استخراج شد که در آن میزان اولویت کیفی هر متغیر نسبت به متغیر دیگر به صورت عددی نشان داده شده است.

جدول ۲ مقیاس مقایسه دوه‌دو در مدل سلسله‌مراتبی

مقدار عددی	ترجیحات (قضاوت شفاهی)
۹	کاملاً مرجح یا مطلوب‌ترین
۷	ترجیح یا مطلوب خیلی قوی
۵	ترجیح یا مطلوب قوی
۳	کمی مرجح یا کمی مطلوب‌تر
۱	ترجیح یا مطلوبیت کمتر یا کمی مهم‌تر
۸، ۶، ۴، ۲	ترجیحات بین فواصل یادشده

(منبع: شیرانی و همکاران، ۱۳۸۵)

در ادامه، با کمک نرم‌افزار GISArc عملیات وزن‌دهی و هم‌پوشانی نهایی لایه‌های مورد استفاده انجام شد و براساس آن، پهنه‌بندی خطر فرسایش خندقی حوضه دیره در شش پهنه بدون خطر، خطر بسیار کم، خطر کم، خطر متوسط، خطر زیاد و خطر خیلی زیاد به دست آمد.

جدول ۳ وزن محاسبه‌شده لایه شیب

میانگین	۲۳/۹-۴۳	۹/۹-۲۳/۹	۹/۹-۱۶/۳	۴/۱-۹/۹	۰-۴/۱	لایه شیب
۰/۴۱۶	۰/۳۳	۰/۳۸	۰/۴۴	۰/۴۸	۰/۴۵	۰-۴/۱
۰/۲۵۸	۰/۲۶	۰/۲۸	۰/۲۹	۰/۲۴	۰/۲۲	۴/۱-۹/۹
۰/۱۶	۰/۲	۰/۱۹	۰/۱۴	۰/۱۲	۰/۱۵	۹/۹-۱۶/۳
۰/۰۹۶	۰/۱۳	۰/۰۹	۰/۰۷	۰/۰۸	۰/۱۱	۹/۹-۲۳/۹
۰/۰۵۸	۰/۰۶	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۰۹	۲۳/۹-۴۳

جدول ۴ وزن محاسبه شده لایه جهت شیب

میانگین	شمال غرب	جنوب شرق	جنوب	جنوب غرب	غرب	شمال	شمال شرق	شرق	مسطح	لایه جهت شیب
۰/۰۳۳	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۲	۰/۰۸	مسطح
۰/۱۷۶	۰/۱	۰/۲۱	۰/۲	۰/۲	۰/۱۲	۰/۱۸	۰/۲۵	۰/۲۱	۰/۱۲	شمال
۰/۱۸۶	۰/۰۶	۰/۲۷	۰/۲۵	۰/۲	۰/۱۶	۰/۲۲	۰/۱۳	۰/۳۱	۰/۰۸	شمال شرق
۰/۱۲۴	۰/۱	۰/۱۳	۰/۱۵	۰/۱۶	۰/۱	۰/۲۲	۰/۰۴	۰/۱	۰/۱۲	شرق
۰/۰۶۱	۰/۱۳	۰/۰۶	۰/۱	۰/۰۱	۰/۱۲	۰/۰۶	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۸	جنوب شرق
۰/۰۷۱	۰/۱۳	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۱۲	۰/۱۶	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۶	جنوب
۰/۰۶۲	۰/۱۶	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۲	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۵	جنوب غرب
۰/۰۴۸	۰/۱	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۱۲	غرب
۰/۲۲۴	۰/۱	۰/۲۱	۰/۲	۰/۲	۰/۱	۰/۳۷	۰/۳۸	۰/۲۱	۰/۲۵	شمال غرب

جدول ۵ وزن محاسبه شده لایه انحنای افقی شیب

میانگین	۰/۴۷-۲/۴	۰/۱۳-۰/۴۷	-۰/۱۳-۰/۱۳	-۰/۵-۰/۱۳	-۲/۶۱-۰/۵	انحنای افقی شیب
۰/۲۰۴	۰/۲۷	۰/۴	۰/۱۲	۰/۰۳	۰/۲	-۲/۶۱-۰/۵
۰/۲۶۲	۰/۲۷	۰/۲	۰/۵۸	۰/۱۶	۰/۱	-۰/۵-۰/۱۳
۰/۳۵۴	۰/۲	۰/۲۸	۰/۲۳	۰/۶۶	۰/۴	-۰/۱۳-۰/۱۳
۰/۱۰۶	۰/۲	۰/۱	۰/۰۳	۰/۰۸	۰/۱۲	۰/۱۳-۰/۴۷
۰/۰۸۸	۰/۱	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۲	۰/۴۷-۲/۴

جدول ۶ وزن محاسبه شده لایه انحنای شیب عمودی

میانگین	۰/۴۹-۱/۹۷	۰/۱۵-۰/۴۹	۰/۱۵-۰/۱۵	-۰/۵۵-۰/۱۵	-۱/۷۲-۰/۵۵	انحنای شیب عمودی
۰/۲۰۴	۰/۲۷	۰/۴	۰/۱۲	۰/۰۳	۰/۲	-۱/۷۲-۰/۵۵
۰/۲۶۲	۰/۲۷	۰/۲	۰/۵۸	۰/۱۶	۰/۱	-۰/۵۵-۰/۱۵
۰/۳۵۴	۰/۲	۰/۲۸	۰/۲۳	۰/۶۶	۰/۴	۰/۱۵-۰/۱۵
۰/۱۰۶	۰/۲	۰/۱	۰/۰۳	۰/۰۸	۰/۱۲	۰/۱۵-۰/۴۹
۰/۰۸۸	۰/۱	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۲	۰/۴۹-۱/۹۷

جدول ۷ وزن محاسبه‌شده لایه کاربری اراضی

کاربری اراضی	اراضی دیم	جنگل	مرتع	مرتع - جنگل	اراضی آبی	میانگین
اراضی دیم	۰/۲۲	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۶	۰/۰۷۶
جنگل	۰/۰۱	۰/۱۴	۰/۰۴	۰/۲۱	۰/۳۳	۰/۲۳۶
مرتع	۰/۱۴	۰/۰۵	۰/۱۲	۰/۲۱	۰/۰۲	۰/۱۴۴
مرتع - جنگل	۰/۱۱	۰/۰۷	۰/۰۶	۰/۱۱	۰/۲۶	۰/۱۲۲
اراضی آبی	۰/۴۳	۰/۰۷	۰/۰۴	۰/۴۳	۰/۱۳	۰/۴۲

جدول ۸ وزن محاسبه‌شده لایه فاصله از آبراهه

فاصله از آبراهه	۱-۱۲۰	۱۲۰-۲۹۲/۸۵	۲۹۲-۴۲۷	۴۲۷-۷۲۹	۷۲۹-۱۲۸۷	میانگین
۱-۱۲۰	۰/۴۳	۰/۶۳	۰/۴۴	۰/۴۴	۰/۱۶	۰/۴۲
۱۲۰-۲۹۲/۸۵	۰/۱۱	۰/۱۶	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۲۵	۰/۲۰۴
۲۹۲-۴۲۷	۰/۱۴	۰/۰۷	۰/۱۴	۰/۲۷	۰/۱۶	۰/۱۵۶
۴۲۷-۷۲۹	۰/۰۱	۰/۰۷	۰/۰۵	۰/۰۹	۰/۳۳	۰/۱۲۸
۷۲۹-۱۲۸۷	۰/۲۲	۰/۰۵	۰/۰۷	۰/۰۲	۰/۰۸	۰/۰۸۸

جدول ۹ وزن محاسبه‌شده لایه فاصله از جاده

فاصله از جاده	۰-۳۳۷/۲۳	۳۳۷/۲۳-۸۱۰/۱۱	۸۱۰/۱۱-۱۳۳۴/۹۳	۱۳۳۵/۹۳-۱۹۹۸/۵۸	۱۹۹۸/۵۸-۳۳۱۲/۷۱	میانگین
۰-۳۳۷/۲۳	۰/۴۳	۰/۰۷	۰/۵۱	۰/۰۲	۰/۲۷	۰/۴۲۲
۳۳۷/۲۳-۸۱۰/۱۱	۰/۰۹	۰/۱۴	۰/۲۵	۰/۰۴	۰/۲۷	۰/۲۳
۸۱۰/۱۱-۱۳۳۴/۹۳	۰/۱۱	۰/۰۷	۰/۱۳	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۱۶۲
۱۳۳۵/۹۳-۱۹۹۸/۵۸	۰/۲۲	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۱۱۸
۱۹۹۸/۵۸-۳۳۱۲/۷۱	۰/۱۴	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۰۱	۰/۰۸

جدول ۱۰ وزن محاسبه شده لایه لیتولوژی

لیتولوژی	آبرفت	توالی مارن و ماسه سنگ	فلش - مارن	ژیپس - انیدرید	آهک - مارن	آهک	آهک دولومیتی	میانگین
آبرفت	۰/۳۳	۰/۴۵	۰/۳۵	۰/۴۱	۰/۳۱	۰/۲۸	۰/۲۵	۰/۳۴
توالی مارن و ماسه سنگ	۰/۱۴	۰/۲۲	۰/۲۶	۰/۲۷	۰/۲۵	۰/۲۳	۰/۲۱	۰/۲۲۵
ژیپس - انیدرید	۰/۱	۰/۱۱	۰/۲	۰/۱۴	۰/۱۹	۰/۱۸	۰/۱۸	۰/۱۵۷
فلش - مارن	۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۱	۰/۰۷	۰/۱۲	۰/۱۴	۰/۱۴	۰/۱۰۱
آهک - مارن	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۰۹	۰/۱۱	۰/۰۶۴
آهک	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۷	۰/۰۴
آهک دولومیتی	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۲۷

جدول ۱۱ محاسبه وزن دهی به لایه های مؤثر بر فرسایش خندقی حوضه دیره

عامل	شیب	کاربری اراضی	فاصله از جاده	انحنای شیب افقی	لیتولوژی	جهت شیب	انحنای شیب عمودی	فاصله از آبراهه	میانگین
شیب	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۴/۵
کاربری اراضی	۱/۲	۱	۲	۴	۶	۷	۷	۸	۴/۴
فاصله از جاده	۱/۳	۱/۲	۱	۲	۲	۵	۶	۷	۲/۹
انحنای شیب افقی	۱/۴	۱/۴	۱/۲	۱	۲	۲	۴	۶	۲
لیتولوژی	۱/۵	۱/۶	۱/۲	۱/۲	۱	۶	۷	۸	۲/۹۲
جهت شیب	۱/۶	۱/۷	۱/۵	۱/۲	۱/۶	۱	۲	۳	۰/۱۸۹
انحنای شیب عمودی	۱/۷	۱/۷	۱/۶	۱/۴	۱/۷	۱/۲	۱	۲	۰/۹۳
فاصله از آبراهه	۱/۸	۱/۸	۱/۷	۱/۶	۱/۸	۱/۳	۱/۲	۱	۰/۳
مجموع	۲/۷	۴/۳	۷/۵	۱۲/۴۱	۱۶/۴۲	۲۷/۸۳	۳۴/۵	۴۳	



جدول ۱۲ وزن محاسبه‌شده لایه‌های مؤثر بر فرسایش خندقی حوضه دیره

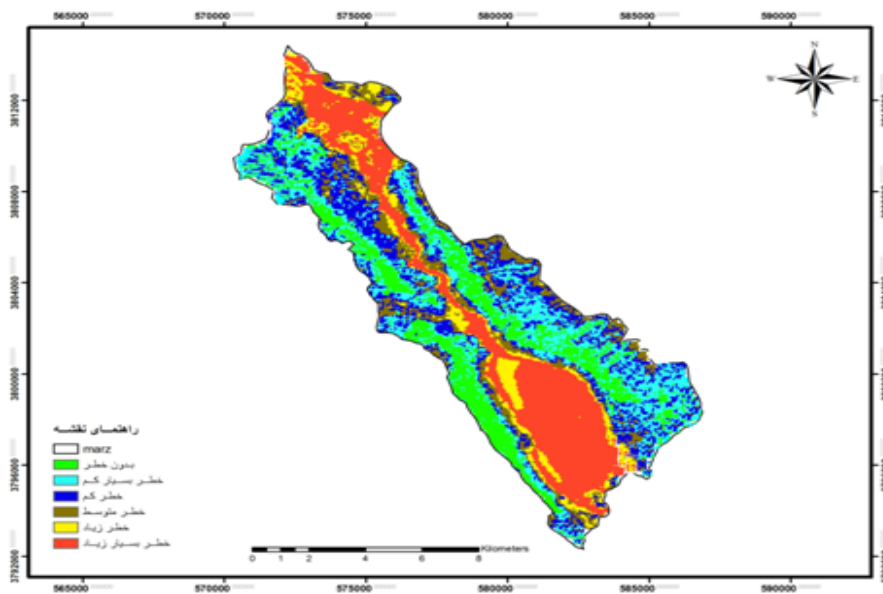
عامل	شیب	کاربری اراضی	فاصله از جاده	انحنای شیب افقی	لیتولوژی	جهت شیب	انحنای شیب عمودی	فاصله از آبراهه	میانگین
شیب	۰/۳۷	۰/۴۶	۰/۴	۰/۳۲	۰/۳	۰/۲۱	۰/۲	۰/۱۸	۰/۳۰۲
کاربری اراضی	۰/۲	۰/۲۳	۰/۲۸	۰/۳۲	۰/۳۶	۰/۲۵	۰/۲	۰/۱۸	۰/۲۵۲
فاصله از جاده	۰/۱	۰/۱۱	۰/۱۳	۰/۱۶	۰/۱۲	۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۱۶	۰/۱۴۳
انحنای شیب افقی	۰/۱	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۸	۰/۱۲	۰/۰۷	۰/۱۱	۰/۱۳	۰/۰۹۱
لیتولوژی	۰/۰۷	۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۲۱	۰/۲	۰/۱۸	۰/۱۰۷
جهت شیب	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۰۳۶
انحنای شیب عمودی	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۲۶
فاصله از آبراهه	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۱۷

نتایج به‌دست‌آمده از ماتریس و ضریب وزن هریک از متغیرهای هشت‌گانه مؤثر بر وقوع فرسایش خندقی در جدول شماره یازده و دوازده بیان شده است. برای محاسبه ضریب وزن از روش میانگین حسابی استفاده شده است. در جدول ماتریس، اعداد هر ستون با یکدیگر جمع، سپس مقدار حاصل از ماتریس به جمع ستون‌های همان عدد تقسیم و در نهایت متوسط اعداد در جدول ماتریس محاسبه شده است. در پایان، هر متغیر از طریق وزن متوسط به هر طبقه یا طبقات متغیر مورد نظر حاصل شده است. امتیاز به‌دست‌آمده برای هریک از طبقات متغیر مورد استفاده در جدول شماره دوازده آمده است. در روش تحلیل سلسله‌مراتبی که در این پژوهش به‌کار برده‌ایم، مجموع حاصل ضرب ضریب وزن هر متغیر میزان خطر وقوع فرسایش خندقی را به‌دست می‌دهد. ارزش کمی هریک از متغیرها نیز براساس نسبت بین سطح تحت اشغال فرسایش خندقی رخ داده در آن طبقه به مساحت کل منطقه مورد مطالعه به‌صورت درصد بین صفر تا ۱۰۰ مشخص و تعیین می‌شود. بدیهی است برای طبقه دارای حداکثر سطح فرسایش خندقی امتیاز ۱۰۰ و برای طبقه فاقد فرسایش خندقی امتیاز صفر منظور می‌شود. بنابراین اگر جمع امتیاز به‌دست‌آمده به ۱۰۰ نزدیک باشد، به‌معنای حساسیت بیشتر یا پتانسیل زیاد از نظر فرسایش خندقی خواهد بود و برعکس چنانچه جمع امتیاز نهایی صفر باشد، بدان معناست که پهنه مورد نظر حساسیت کم یا منطقه از لحاظ وقوع فرسایش خندقی، کم‌خطر است. حال با

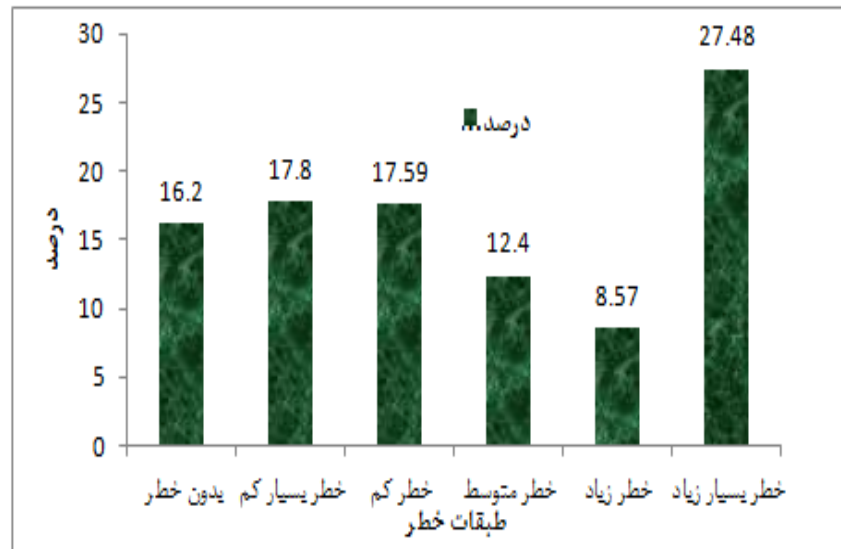
توجه به این توضیحات و با نظر به داده‌های جدول شماره یازده، پتانسیل رخداد فرسایش خندقی در حوضه دیره به شرح رابطه زیر است:

$$Y = x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n$$

در این رابطه، Y میزان خطر وقوع فرسایش خندقی و x_1 ، x_2 و... عوامل مؤثر بر رخداد آن هستند. با استفاده از این رابطه، پتانسیل میزان خطر رخداد فرسایش خندقی در حوضه مورد مطالعه در شش طبقه محاسبه شده و نتایج آن در شکل‌های شماره دوازده و سیزده آمده است. طبق این نمودار، بیش از ۳۶ درصد مساحت حوضه دیره از نظر وقوع فرسایش خندقی، در معرض خطر زیاد و خیلی زیاد قرار دارند که اگر خطر متوسط را نیز به آن بیفزاییم، حدود نیمی از مساحت حوضه در معرض فرسایش است.



شکل ۱۲ نتیجه پهنه‌بندی خطر فرسایش خندقی در حوضه دیره با روش تحلیل سلسله‌مراتبی



شکل ۱۳ پهنه‌بندی خطر فرسایش خندقی در حوضه آبریز دیره

۵- نتیجه‌گیری

براساس یافته‌های پهنه‌بندی، بیشترین میزان فرسایش خندقی در لایه شیب با ۳۰/۲ درصد تأثیر قرار دارد که این اثرگذاری در طبقات شیب ۰-۴/۱ و ۴/۱-۹/۹ به ترتیب ۴۱/۶ و ۲۵/۸ درصد بیشتر از بقیه طبقات است؛ زیرا در شیب‌های پایین فرصت نفوذ آب داخل خاک و ایجاد حفره برای تشکیل خندق‌ها بیشتر است. در پهنه‌بندی حساسیت اراضی حوضه آبریز دیره شهرستان گیلانغرب به فرسایش خندقی، طبقه شیب ۰-۴/۱ درصد، جهت شمال غرب و شمال شرق به ترتیب با ۲۲/۴ و ۱۸/۶ درصد، لایه انحنای شیب افقی و عمودی به ترتیب لایه‌های ۰/۱۳-۰/۱۳ و ۰/۱۵-۰/۱۵ با ۳۵/۴ درصد دارای بیشترین وزن هستند. همچنین، لایه کاربری اراضی با ۲۵/۲ درصد بعد از شیب بیشترین میزان تأثیر در فرسایش خندقی در حوضه آبریز دیره را دارد. در این لایه، اراضی آبی با ۴۲ درصد بالاترین وزن را در مقایسه با بقیه کاربری‌ها در اثرگذاری بر خندق‌زایی دارد. با مدیریت درست اراضی، حفظ ظرفیت نفوذپذیری خاک، پوشش گیاهی و ساختمان خاک و جلوگیری از تمرکز بیش از حد رواناب می‌توان از تشکیل خندق‌ها جلوگیری کرد. در لایه فاصله از آبراه‌ها، لایه‌های ۰-۱۲۰ و ۱۲۰-۲۹۲/۸۵ به ترتیب با ۴۲ و

۲۰/۴ درصد، فاصله از جاده‌ها با ۱۴/۳ درصد در مناطقی که فاصله از جاده در آن‌ها بین ۳۳۷/۲۳-۰ و ۸۱۰/۱۱-۳۳۷/۲۳ به ترتیب ۴۲/۲ و ۲۳ درصد بیشترین وزن را دارند. برای کاهش این خطر باید از جاده‌سازی غیراصولی در مناطق حساس جلوگیری کرد. در لایه لیتولوژی لایه آبرفت با ۳۴ درصد و لایه توالی مارن و ماسه با ۲۲/۵ درصد در مقایسه با بقیه لایه‌ها مؤثرتر تشخیص داده شد و بیشترین وزن را دارند که علتش، رسوبات نرم و به‌شدت حساس این واحدهاست. در نهایت، با پهنه‌بندی خطر فرسایش خندقی در حوضه مورد مطالعه بیش از ۳۶ درصد مساحت حوضه دیره از نظر وقوع فرسایش خندقی، در معرض خطر زیاد و خیلی زیاد قرار دارد که با در نظر گرفتن خطر متوسط، این خطر نیمی از این حوضه را که یکی از دشت‌های حاصل‌خیز شهرستان و حتی استان است، تهدید می‌کند.

نتایج این تحقیق به مسئولان در برنامه‌ریزی‌های صحیح برای جلوگیری و مهار هرچه سریع‌تر این نوع فرسایش در حوضه مورد مطالعه کمک شایانی می‌کند. در پایان، به‌منظور پیشگیری از رشد فرسایش خندقی پیشنهادهایی بیان می‌شود:

۱. به‌وسیله حفاظت و ایجاد پوشش گیاهی منطبق با شرایط طبیعی منطقه، خندق‌ها احیا و کنترل شود.

۲. کنترل خندق به‌وسیله انواع بندها، شامل الف- بندهای موقتی: با کند کردن سرعت جریان آب و در نتیجه تشدید عمل رسوب‌گذاری مانع از این فرسایش می‌شود. ب- بندهای چوبی: با قرار دادن دو ردیف تیر چوبی در عرض خندق و قرار دادن چوب‌های ضخیم افقی بین آن‌ها و فروکردن در کف آبراهه ایجاد سد می‌کند. ج- بندهای سنگی: از روی هم قرار گرفتن قطعه‌سنگ‌های غیرمتصل ساخته می‌شود و باعث عمل رسوب‌گذاری و همچنین تغذیه آب‌های زیرزمینی می‌شود. د- بندهای خاکی: در خندق‌هایی ساخته می‌شود که حجم جریان آن‌ها کم است. بندهای گابیونی، دائمی و... نیز در کنترل فرسایش بسیار مؤثرند.

۳. مأموران سازمان حفاظت محیط زیست منطقه در زمینه نوع و اصول کشت صحیح و جلوگیری از شخم زدن در جهت شیب دامنه‌ها به کشاورزان آگاهی دهند.

۴. براساس توان طبیعی و محدودیت‌های مربوط به خصوصیات فیزیوگرافی، ژئومورفولوژی، خاک و... در منطقه، کاربری اراضی را اصلاح کنند.



۶- منابع

- احمدی، حسن، ژئومورفولوژی کاربردی، ج ۱: فرسایش آبی، تهران: انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۸۸.
- الفتی، سعید، فرشاد صفرپور و مهدی محمودآبادی، «زمین‌لغزش و انواع روش‌های مطالعه»، مجله رشد آموزش جغرافیا، د ۲۶، ش ۴، صص ۳۱-۳۸، ۱۳۹۱.
- بیاتی خطیبی، مریم، «ویژگی‌های خندق‌ها و عوامل کنترل‌کننده فرایندهای خندق‌زایی مطالعه موردی محدوده بین اهر-مشکین‌شهر»، مجله جغرافیا و توسعه، ش ۷، صص ۱۱۵-۱۳۶، ۱۳۸۵.
- «تحلیل و بررسی نقش عوامل توپوگرافی و مورفونز در خندق‌زایی مطالعه موردی دامنه‌های شمالی قوشه‌داغ»، مجله پژوهش‌های جغرافیایی، ش ۴۹، صص ۵۳-۷۰، ۱۳۸۳.
- جعفری گرزین، بهنوش، رضاعلی دومهری، مهرداد صفایی و سیدحسن احمدیان، «معرفی مدل‌هایی برای پیش‌بینی رشد حجم خندق مطالعه موردی: حوضه آبخیز سرخ‌آباد مازندران»، مجله پژوهش و سازندگی، ش ۷۵، صص ۱۰۸-۱۱۷، ۱۳۸۶.
- رامشت، محمدحسین، لیلا گرجی و مژگان انتظاری، «روش‌های ریاضی ارزیابی گالی»، مجله سپهر، س ۱۸، ش ۷۰، صص ۱۶-۲۰، ۱۳۸۸.
- رفاهی، حسینقلی، فرسایش آبی و کنترل آن، تهران: انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۷۵.
- شیرانی، کوروش، ستار چاووشی و جعفر غیومیان، «بررسی و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در پادنا‌ی علیای سمیرم»، مجله پژوهشی دانشگاه اصفهان، ش ۲۳، صص ۳۱-۴۶، ۱۳۸۵.
- عرب‌قشقاوی، زهرا، داوود نیک‌کامی، صمد شادفر و ابوالفضل معینی، «پهنه‌بندی فرسایش خندقی در حوضه آبخیز طرود فیروزکوه»، فصلنامه سرزمین، س ۸، ش ۳۱، صص ۱۰۷-۱۱۹، ۱۳۹۰.
- علائی طالقانی، محمود و زهرا رحیم‌زاده، «شبیه‌سازی احتمال وقوع زمین‌لغزش در حوضه آبخیز جوانرود با مدل تحلیل سلسله‌مراتبی با تأکید بر ویژگی‌های مورفولوژی»، مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ش ۴۴، صص ۵۳-۷۲، ۱۳۹۰.

- علیزاده، امین، فرسایش و حفاظت خاک، مشهد: انتشارات آستان قدس رضوی، ۱۳۶۸.
- قدوسی، جمال، مدل‌سازی فرسایش خندقی و پهنه‌بندی خطر آن مطالعه موردی حوضه آبخیز زنجانرود، رساله دکتری، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران، ۱۳۸۲.
- میلادی، بهزاد، شبیه‌سازی مناطق مستعد فرسایش خندقی در حوضه‌های آبریز مرگ و رازآور، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه رازی کرمانشاه، ۱۳۹۰.
- Betts, H.D. & R.C. Derose, "Digital Elevation as Tool for Monitoring and Measuring Gully Erosion", *Jag, Vol.-Issue 2*, Pp. 91- 101, 1999.
- Burkard, M.B. & Kostaschuk, "Patterns and Control of Gully Growth Along the Shoreline of Lake Huron", *Earth Surface Processes and Landforms*, 22, Pp. 901- 911, 1997.
- Collison, A.J., "The Sycle of Instability: Stress Releas and Fissure Flow as Controls on Gully Head Retreat", *Hydrological Processes*, 15(1), Pp. 3-12, 2001.
- Dotterweich, M., "High Resolution Reconstruction of a 1300 Year Old Gullysystem in Northern Bavarian", *The Holocene*, 15, 7, Pp. 997- 1005, 2005.
- Ezechi, J.I., The Influnce of Runoff, Lithology and Water Table on the Dimensions and Rate of Gullyng Processes in Eastern, Nigeria, Elsevier, Catena Verlag. Cremlingen (Web-Site), 2000.
- Heathwaite, A.L., T.P. Burt & S.T. Trudgill, "Land-use Controls on Sediment Production in a Lowland Catchment, Soth-west England", *Soil Erosion on Agricultural Land*, John Wiley and Son's LTD, Pp. 69- 86, 1990.
- Kakembo, V., W.W. Xanga & K. Rowntree, "Topographic Thresholds in Gully Development on the Hill Slopes of Communal Areas in Ngqushwa Local Municipality, Eastern Cape, South Africa", *Department of*

Gepsciences, NelsonMandela Metropolitan University, Port Elizabeth, South Africa, 2003.

- Nachtergaele, J., J. Poesen, A. Sidorchuk & D. Torri, "Prediction of Concentrated Flowwidth in Ephemeral Gully Channels", *Hydrological Processes, 16, 10*, Pp. 1935- 1953, 2002.
- Poesen, J., J. Nachtergaele & G. Verstrac, "Gully Erosion and Environmental Change: Importance and Research Needs", *Catena, 50*, Pp. 91- 133, 2003.
- Renschler, C.S. & J. Harbor, "Soil Erosion Assessment Tools from Point to Regionalscales-the Role of Geomorphologists in Land Management Research and Implementation", *Geomorphology, 47*, Pp. 189- 209, 2002.
- Soufi, M., "Characteristics and Causes of Gully Erosion in Iran", *Proc, 12th ISCO Conference*, Beijing, Pp. 589- 593, 2002.
- Valentin, J.P. & Y. Li, "Gully Erosion Impacts, Factors and Control", *Catena, 63*, Pp. 132- 153, 2005.
- Wijdenes, O.D.J., J. Poesen, L. Vandekerckhove & M. Ghesquiere, "Spatial Distribution of Gully Head Activity and Sediment Supply Along an Ephemeral Channel in a Mediterranean Environment", *Catena, 39*, Pp. 147- 167, 2000.