

اصول مدل سازی مکانی فرسایش خندقی با استفاده از مدل های هوش مصنوعی

نویسندگان:

امید رحمتی

استادیار، بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کردستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، سنندج، ایران

سید مسعود سلیمان پور

دانشیار، بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران

صمد شادفر

دانشیار، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران



سرشناسه: رحمتی، امید، ۱۳۶۸

عنوان و نام پدیدآور: اصول مدل‌سازی مکانی فرسایش خندقی با استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی، نویسندگان: امید رحمتی، سید مسعود سلیمان‌پور، صمد شادفر؛ ویراستار ادبی: سعید نبی‌پی لشکریان
مشخصات نشر: تهران، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، ۱۴۰۳.

مشخصات ظاهری: [۸]، ۱۵۵ ص.: جدول، نمودار.

شابک: ۳۰۰۰۰۰۰ ریال ۷-۴۰-۶۰۵۴-۶۰۰-۹۷۸

وضعیت فهرست نویسی: فیپا

موضوع: خاک - فرسایش - داده‌پردازی

موضوع: Soil - Erosion - Data Processing

موضوع: هوش مصنوعی -- کاربردهای ژئوفیزیکی

موضوع: Artificial intelligence - Geophysical applications

موضوع: خاک - فرسایش -- جنبه‌های زیست‌محیطی

موضوع: Soil - Erosion - Environmental aspects

موضوع: خاک - فرسایش -- اندازه‌گیری

موضوع: Soil - Erosion - Data Processing

موضوع: خاک - فرسایش -- اندازه‌گیری

موضوع: Soil – Erosion – Measurement

موضوع: خندق‌ها

موضوع: Gullies

شناسه افزوده: سلیمان‌پور، سید مسعود، ۱۳۶۰

شناسه افزوده: شادفر، صمد، ۱۳۴۵

شناسه افزوده: سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، پژوهشکده

حفاظت خاک و آب‌خیزداری

رده‌بندی کنگره: S ۶۲۳

رده‌بندی دیویی: ۶۳۱/۴۵

شماره کتاب‌شناسی ملی: ۹۸۰۵۶۱۱

اطلاعات رکورد کتاب‌شناسی: فیپا

وزارت جهاد کشاورزی

سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی

پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری

عنوان: اصول مدل‌سازی مکانی فرسایش خندقی با استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی

تألیف: امید رحمتی، سید مسعود سلیمان‌پور، صمد شادفر

ویراستار ادبی: سعید نبی‌پی لشکریان

صفحه‌آرایی و طراحی جلد: عباس صدیق

ناشر: پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری

شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۶۰۵۴-۴۰-۷

شمارگان: ۱۰۰ نسخه

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳

نوبت چاپ: اول

قیمت: ۳۰۰۰۰۰۰ ریال

این اثر در مورخه ۱۴۰۳/۰۸/۱۲ با شماره ۳۱۴۰۳۶۰ در مرکز اطلاعات و مدارک علمی کشاورزی به ثبت رسیده است. حق چاپ محفوظ است. نقل مطالب، تصاویر، جدول‌ها، منحنی‌ها و نمودارها با ذکر مأخذ بلامانع است.



پیشگفتار

کمیاب منابع علمی تخصصی و کاربردی در زمینه مدل‌سازی مکانی و پیش‌بینی استعداد وقوع فرسایش خندقی، یکی از محدودیت‌ها و موانع در مدیریت و کنترل فرسایش خاک در کشور است. اگر چه اقدام‌های عملیاتی و مدیریتی مختلفی به‌منظور حفاظت خاک در سطح کشور با صرف زمان و هزینه زیاد انجام می‌شود؛ اما اجرای آنها براساس اولویت‌بندی استعداد شکل‌گیری فرسایش خندقی صورت نمی‌گیرد. اختصاص یافتن منابع اعتباری و برنامه‌های مدیریتی به بخش‌های بحرانی و مستعد وقوع فرسایش خندقی موجب ارتقاء کارایی برنامه‌های حفاظت خاک و پایداری سرزمین می‌شود.

این کتاب، با هدف رفع موانع علمی پیش‌روی پژوهشگران، کارشناسان و متخصصان در زمینه پیش‌بینی استعداد رخداد فرسایش خندقی و انتقال تجارب، به رشته تحریر در آمده است. در نگارش این کتاب، ارائه هدفمند مطالب به‌صورت مصور و مرحله‌ای، با کاربرد نرم‌افزارهای مختلف، به‌منظور شناخت فرایندهای شکل‌گیری فرسایش خندقی و پیش‌بینی استعداد رخداد فرسایش خندقی با استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی صورت گرفته است.

کتاب حاضر در شش فصل تدوین شده است. فصل اول به بیان فرایند فرسایش خاک، شکل‌گیری خندق و اهمیت پهنه‌بندی استعداد فرسایش خندقی پرداخته است. در فصل دوم، مدل و انواع روش‌های مدل‌سازی توضیح داده شده است. فصل سوم به عوامل محیطی مؤثر بر رخداد فرسایش خندقی و شیوه ساخت لایه‌های رقومی آنها در سامانه اطلاعات جغرافیایی پرداخته است. در فصل چهارم، روش‌ها و مراحل پیش‌پردازش فنی و آماری داده‌ها برای اجرای مدل‌سازی ارائه شده است. در فصل پنجم، شیوه نصب بسته‌های تخصصی مورد نیاز برای فراخوانی داده، پردازش اطلاعات و استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی در محیط برنامه‌نویسی R به‌همراه روش‌های ارزیابی دقت پیش‌بینی به‌صورت گام‌به‌گام بیان شده است. در فصل ششم، مدل‌سازی

استعداد وقوع خندق با استفاده از مدل بیشینه بی‌نظمی توضیح داده شده است که علاوه بر معرفی نرم‌افزار تخصصی، ورود اطلاعات، پردازش داده، پیش‌بینی استعداد وقوع فرسایش خندقی، اعتبارسنجی نتایج مدل، تحلیل میزان مشارکت عوامل محیطی در رخداد فرسایش خندقی، تکرار و استقامت مدل و همچنین قابلیت برون‌فکنی مدل به صورت مصور و کاربردی ارائه شده است. در پایان، مراتب سپاس خود را از زحمات ارزشمند همکاران و داوران محترمی که در ارتقاء کیفیت علمی این اثر، نویسندگان را یاری کردند، اعلام می‌داریم.

امید رحمتی

سید مسعود سلیمان‌پور

صمد شادفر

۱۴۰۳

فهرست مطالب

فصل اول: فرسایش خاک و شکل‌گیری خندق	۱
۱-۱- تخریب سرزمین در اثر فرسایش خاک	۲
۲-۱- تعریف فرسایش خاک	۴
۳-۱- پیامدهای فرسایش خاک	۵
۴-۱- فرسایش خندقی	۹
۵-۱- اهمیت پهنه‌بندی استعداد فرسایش خندقی	۲۱
فصل دوم: مدل‌سازی و انواع مدل	۲۴
۱-۲- تعریف مدل	۲۵
۲-۲- شبیه‌سازی	۲۵
۳-۲- اندازه‌گیری و شبیه‌سازی فرسایش خاک	۲۵
(ب) روش‌های هیدرولیکی	۲۶
(ج) روش‌های هیدرولوژیکی (دلیومتریک)	۲۶
(د) روش‌های حجمی	۲۶
(ه) روش‌های پوشش گیاهی	۲۷
۴-۲- طبقه‌بندی مدل‌ها	۲۸
۱-۴-۲- طبقه‌بندی براساس مبنای طراحی	۲۸
۲-۴-۲- طبقه‌بندی براساس درجه وضوح در پردازش داده	۲۹
۳-۴-۲- طبقه‌بندی براساس عدم قطعیت	۳۰
۴-۴-۲- طبقه‌بندی براساس توزیع مکانی متغیرها	۳۲
۵-۴-۲- طبقه‌بندی براساس تغییرات زمانی	۳۴
۵-۲- مدل‌های هوش مصنوعی	۳۵
۶-۲- کاربردها و قابلیت‌های مدل‌های هوش مصنوعی	۳۶
۷-۲- نرم‌افزارهای موردنیاز برای مدل‌سازی مکانی استعداد فرسایش خندقی	۳۷
فصل سوم: متغیرهای مستقل و وابسته در مدل‌سازی رخداد فرسایش خندقی	۳۹
۱-۳- انواع متغیرها	۴۰
۲-۳- متغیر وابسته در مدل‌سازی رخداد فرسایش خندقی	۴۰
۳-۳- متغیرهای مستقل در مدل‌سازی رخداد فرسایش خندقی	۴۳

۴۴	 ارتفاع ۱-۳-۳
۴۴	 شیب ۲-۳-۳
۴۵	 جهت شیب ۳-۳-۳
۴۶	 انحنای زمین ۴-۳-۳
۴۷	 شاخص رطوبت توپوگرافی ۵-۳-۳
۴۹	 شاخص توان جریان ۶-۳-۳
۵۰	 فاصله از آبراهه ۷-۳-۳
۵۱	 فاصله از جاده ۸-۳-۳
۵۳	 خاک شناسی ۹-۳-۳
۵۴	 سنگ شناسی ۱۰-۳-۳
۵۵	 کاربری اراضی ۱۱-۳-۳
۵۶	 تراکم زهکشی ۱۲-۳-۳
۵۷	 میانگین بارش سالانه ۱۳-۳-۳
۵۸	 تراکم پوشش گیاهی ۱۴-۳-۳
۵۹	 شاخص ناهمواری توپوگرافی ۱۵-۳-۳
۶۰	 موقعیت شیب نسبی ۱۶-۳-۳
۶۰	 طول دامنه ۱۷-۳-۳
۶۱	 اندازه زبری برداری ۱۸-۳-۳
۶۵	 فصل چهارم: روش های پیش پردازش داده ها
۶۶	 اهمیت پیش پردازش داده ها ۱-۴
۶۶	 بازدید میدانی و اعتبارسنجی داده ها ۲-۴
۶۷	 اندازه پیکسل متغیرهای محیطی ۳-۴
۶۸	 تعیین متغیرها ۴-۴
۶۸	 تبدیل فرمت داده های ورودی مدل ۵-۴
۶۹	 تقسیم داده های متغیر وابسته ۶-۴
۷۱	 تنظیم و انتقال سیستم های مختصات ۷-۴
۷۲	 یکپارچه سازی و هماهنگ سازی داده ها ۸-۴
۷۲	 بررسی تصویری داده ها ۹-۴
۷۳	 پاکسازی داده ها ۱۰-۴

۷۳	۴-۱۱- سازماندهی داده‌ها.....
۷۴	۴-۱۲- رفع خطای مدل رقومی ارتفاعی.....
۷۵	۴-۱۳- روش‌های آماری پیش‌پردازش.....
۷۶	۴-۱۳-۱- حذف متغیرهای دارای همبستگی زیاد.....
۷۷	۴-۱۳-۲- استفاده از روش‌های کاهش ابعاد.....
۷۷	۴-۱۳-۳- استفاده از رگرسیون تیغه‌ای.....
۷۹	فصل پنجم: ماشین بردار پشتیبان، جنگل تصادفی و درخت رگرسیونی پیشرفته.....
۸۰	۵-۱- مقدمه.....
۸۰	۵-۲- نصب نرم‌افزارهای R و RSTUDIO.....
۸۱	۵-۳- نصب بسته‌های تخصصی موردنیاز.....
۸۲	۵-۳-۱- بسته RASTER.....
۸۲	۵-۳-۲- بسته SDM.....
۸۲	۵-۳-۳- بسته RGDAL.....
۸۳	۵-۳-۴- بسته MAPTOOLS.....
۸۳	۵-۳-۵- بسته MODELMAP.....
۸۳	۵-۳-۶- بسته SP.....
۸۴	۵-۳-۷- بسته DISMO.....
۸۴	۵-۳-۸- بسته GBM.....
۸۴	۵-۳-۹- بسته RANDOMFOREST.....
۸۵	۵-۳-۱۰- بسته BIOMOD2.....
۸۵	۵-۴- تعیین مسیرکاری.....
۸۵	۵-۵- فراخوانی بسته‌های موردنیاز.....
۸۶	۵-۶- ورود اطلاعات مکانی فرسایش‌های خندقی به محیط نرم‌افزار R.....
۸۶	۵-۷- ورود لایه‌های محیطی به محیط نرم‌افزار R.....
۸۷	۵-۸- اتصال لایه‌های محیطی و ایجاد بسته اطلاعاتی.....
۸۷	۵-۹- نمایش لایه‌های محیطی و موقعیت فرسایش‌های خندقی در نرم‌افزار R.....
۸۸	۵-۱۰- تعیین متغیرهای وابسته و مستقل.....
۸۸	۵-۱۱- ایجاد پایگاه داده (دیتابیس) در محیط R به‌منظور دسته‌بندی داده‌ها.....
۸۹	۵-۱۲- مدل ماشین بردار پشتیبان.....

۱۹	۵-۱۲-۱- خصوصیات و ساختار مدل.....
۹۲	۵-۱۲-۲- شیوه اجرای مدل.....
۹۴	۵-۱۳-۱- مدل جنگل تصادفی.....
۹۴	۵-۱۳-۱- خصوصیات و ساختار مدل.....
۱۰۰	۵-۱۳-۲- شیوه اجرای مدل.....
۱۰۰	۵-۱۴-۱- مدل درخت رگرسیونی پیشرفته.....
۱۰۰	۵-۱۴-۱- خصوصیات و ساختار مدل.....
۱۰۳	۵-۱۴-۲- شیوه اجرای مدل.....
۱۰۴	۵-۱۵-۱- ارزیابی دقت مدل‌سازی در مرحله اعتبارسنجی.....
۱۰۴	۵-۱۵-۱- انواع معیارهای ارزیابی مدل.....
۱۰۵	۵-۱۵-۱-۱- معیارهای وابسته به آستانه.....
۱۰۷	۵-۱۵-۱-۲- معیارهای مستقل از آستانه.....
۱۰۸	۵-۱۵-۲- محاسبه معیارهای ارزیابی مدل در نرم‌افزار RSTUDIO.....
۱۰۹	۵-۱۶- تهیه منحنی مشخصه عملکرد گیرنده.....
۱۱۱	۵-۱۷- تهیه نقشه استعداد وقوع فرسایش خندقی.....
۱۱۱	۵-۱۸- تهیه نقشه پهنه‌بندی فرسایش خندقی.....
۱۱۲	فصل ششم: مدل بیشینه بی‌نظمی.....
۱۱۳	۶-۱- خصوصیات و ساختار مدل بیشینه بی‌نظمی.....
۱۱۶	۶-۲- شیوه اجرای مدل.....
۱۱۸	۶-۳- آماده‌سازی لایه‌های پیش‌بینی‌کننده.....
۱۱۹	۶-۴- آماده‌سازی داده‌های موقعیت مکانی خندق‌ها.....
۱۱۹	۶-۵- معرفی اطلاعات و لایه‌های رقومی به مدل.....
۱۲۰	۶-۶- تنظیم پارامترها و اجرای مدل.....
۱۲۳	۶-۷- تهیه نقشه استعداد وقوع فرسایش خندقی.....
۱۲۵	۶-۸- اعتبارسنجی نتایج مدل.....
۱۲۷	۶-۹- تکرار مدل‌سازی و استقامت مدل.....
۱۲۸	۶-۱۰- منحنی‌های پاسخ.....
۱۲۹	۶-۱۱- تعیین میزان مشارکت عوامل محیطی.....
۱۳۰	۶-۱۲- برون‌فکنی مدل.....

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱- فرسایش خندقی در حوزه آبخیز ۱۰
- ماهورمیلاتی استان فارس (سلیمان‌پور و همکاران، ۱۴۰۳) ۱۰
- شکل ۲-۱- فرسایش خندقی در حوزه آبخیز ۱۱
- تلوار استان کردستان (رحمتی و همکاران، ۱۴۰۲) ۱۱
- شکل ۳-۱- فرسایش خندقی در حوزه آبخیز ۱۲
- ماهورمیلاتی استان فارس (سلیمان‌پور و همکاران، ۱۴۰۳) ۱۲
- شکل ۴-۱- هدررفت خاک در اثر فرسایش ۱۸
- خندقی در استان لرستان (رحمتی، ۱۳۹۷) ۱۸
- شکل ۱-۲- ساختار مدل‌های توزیعی، نیمه‌توزیعی و یکپارچه ۳۳
- شکل ۲-۲- ساختار مدل توزیعی در مقیاس حوزه آبخیز ۳۴
- شکل ۳-۲- ارتباط علم داده، مدل‌های هوش مصنوعی و یادگیری ماشینی ۳۵
- شکل ۱-۳- ثبت پیشانی خندق در ۴۱
- بازدیدهای میدانی (رحمتی، ۱۴۰۲) ۴۱
- شکل ۲-۳- شناسایی و ثبت خندق‌ها در سامانه ۴۲
- گوگل‌ارث در زیرحوضه کلوچه استان کردستان ۴۲
- شکل ۳-۳- نقشه موقعیت مکانی پیشانی ۴۲
- خندق‌ها در حوزه آبخیز تلوار استان کردستان ۴۲
- شکل ۴-۳- حالت‌های مختلف انحنای ۴۷
- سطح و مقطع (فیض‌نیا و همکاران، ۱۳۹۷) ۴۷
- شکل ۵-۳- اهمیت عامل جاده در رخداد فرسایش خندقی (Rahmati و همکاران، ۲۰۲۲) ۵۲
- شکل ۳-۶- شکل‌گیری فرسایش خندقی در ۵۶

- اثر تغییر کاربری اراضی (رحمتی و همکاران، ۱۴۰۲)..... ۵۶
- شکل ۳-۷- عوامل محیطی مؤثر بر رخداد فرسایش خندقی (رحمتی و همکاران، ۱۳۹۷)..... ۶۲
- شکل ۵-۱- ساختار مدل ماشین بردار..... ۹۱
- پشتیبان (Rahmati و همکاران، ۲۰۱۷)..... ۹۱
- شکل ۵-۲- ساختار مدل درخت تصمیم‌گیری..... ۹۴
- شکل ۵-۳- ساختار مدل جنگل تصادفی..... ۹۶
- شکل ۵-۴- نمونه‌ای از منحنی ROC برای ارزیابی دقت مدل ماشین بردار پشتیبان..... ۱۱۰
- شکل ۶-۱- فایل‌ها و ساختار مورد نیاز برای اجرای مدل پیشینه بی‌نظمی..... ۱۱۸
- شکل ۶-۲- تنظیمات پایه در مدل پیشینه بی‌نظمی..... ۱۲۱
- شکل ۶-۳- تنظیمات پیشرفته در مدل پیشینه بی‌نظمی..... ۱۲۲
- شکل ۶-۴- تنظیمات آزمایشی مدل پیشینه بی‌نظمی..... ۱۲۳
- شکل ۶-۵- نقشه استعداد رخداد فرسایش خندقی حوزه آبخیز تلوار..... ۱۲۴
- با استفاده از مدل پیشینه بی‌نظمی (رحمتی و همکاران، ۱۴۰۱)..... ۱۲۴
- شکل ۶-۶- نقشه طبقه‌بندی استعداد رخداد فرسایش خندقی..... ۱۲۵
- حوزه آبخیز تلوار (رحمتی و همکاران، ۱۴۰۱)..... ۱۲۵
- شکل ۶-۷- نمودار مشخصه عملکرد مدل در..... ۱۲۷
- مراحل آموزش و اعتبارسنجی در حوزه آبخیز تلوار..... ۱۲۷
- شکل ۶-۸- نمودار مشخصه عملکرد مدل..... ۱۲۸
- در تکرارهای مختلف در حوزه آبخیز تلوار..... ۱۲۸
- شکل ۶-۹- منحنی‌های پاسخ به‌دست آمده از مدل پیشینه بی‌نظمی در حوزه آبخیز تلوار... ۱۲۹

فهرست جدول‌ها

جدول ۱-۴- گروه‌بندی فرسایش‌های خندقی در تحلیل استقامت مدل (رحمتی و همکاران، ۲۰۱۷).....	۷۰
جدول ۱-۵- نمونه‌ای از ماتریس درهم‌ریختگی برای ارزیابی مدل (Rahmati و همکاران، ۲۰۱۹).....	۱۰۴
جدول ۲-۵- معیارهای ارزیابی وابسته به آستانه (Rahmati و همکاران، ۲۰۱۹).....	۱۰۷
جدول ۳-۵- طبقات عملکرد مدل براساس AUC (Rahmati و همکاران، ۲۰۲۳).....	۱۱۰
جدول ۱-۶- مساحت طبقات استعداد رخداد فرسایش خندقی براساس مدل پیشینه بی‌نظمی (رحمتی و همکاران، ۱۴۰۱).....	۱۲۵
جدول ۲-۶- درصد مشارکت عوامل محیطی در حوزه آبخیز تلوار.....	۱۳۰

فصل اول

فرسایش خاک و شکل‌گیری خندق

۱-۱- تخریب سرزمین در اثر فرسایش خاک

امروزه تخریب اراضی در حدود یک‌سوم از سطح خشکی‌های کره زمین را تحت‌تأثیر قرار داده است و بالغ بر ۲۵۰ میلیون نفر از جمعیت جهان به‌طور مستقیم تحت‌تأثیر این پدیده و بیش از یک میلیارد نفر در ۱۰۰ کشور جهان در معرض خطر تخریب اراضی قرار دارند (Adger و همکاران، ۲۰۰۱). تخریب اراضی علاوه بر مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌تواند در سایر مناطق و به‌ویژه کشورهای در حال توسعه نیز رخ بدهد (حزب‌بوی و صادقی، ۲۰۱۷). تخریب اراضی هجوم ماسه‌های روان، افت کیفی و کمی آب‌های زیرزمینی، کاهش بهره‌وری خاک، افزایش آسیب‌پذیری خاک، نشست زمین و شور شدن اراضی را به‌همراه دارد (Schwilch و همکاران، ۲۰۱۱؛ صادقی و همکاران، ۱۳۹۶). تخریب اراضی می‌تواند در زمان کوتاهی اتفاق بیفتد، در حالی‌که احیای یک خاک تخریب‌یافته و اسقرار مجدد پوشش گیاهی در آن فرآیندی طولانی و زمان‌بر است (پوررضا و همکاران، ۱۳۹۳). به این سبب، فرسایش خاک، به‌عنوان مهم‌ترین عامل تخریب خاک در جهان تشخیص داده شده است (Liniger و همکاران، ۲۰۰۷؛ Valentin و همکاران، ۲۰۰۵).

براساس مطالعات پیش‌بینی می‌شود که هر ساله پنج تا ده میلیون هکتار از اراضی تخریب می‌شوند (یغمائیان مهابادی و همکاران، ۱۳۹۳). Liu و Gao در سال ۲۰۱۰ پیش‌بینی کرده بودند با همین روند تخریبی در سال ۲۰۲۰ از کل اراضی کشاورزی، مراتع و جنگل‌ها حدود ۱/۴ تا ۲/۸ درصد دچار تخریب اراضی خواهد شد. طبق بررسی انجام شده توسط Dudal (۱۹۸۱)، نشان داد که سالانه حدود شش میلیون هکتار از حاصلخیزی اراضی زراعی جهان بر اثر فرسایش خاک کاهش می‌یابد. سازمان ملل برآورد کرده است که سالانه در کل جهان حاصلخیزی و بازدهی حدود ۲۰ میلیون هکتار اراضی زراعی به نزدیک صفر می‌رسد، از سوی دیگر هم‌زمان با شروع فعالیت‌های کشاورزی تاکنون حدود ۴۳ میلیون هکتار از اراضی مستعد در اثر فرسایش قابلیت خود را از دست داده‌اند (Kovda، ۱۹۸۳). همچنین Oldeman (۱۹۹۲) معتقد

--- اصول مدل‌سازی مکانی فرسایش خندقی با استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی ۳/

است که فعالیت‌های تخریبی انسان حدود ۲۴ درصد اراضی قابل استفاده زمین را در بر می‌گیرد؛ به‌طوری‌که این میزان به تفکیک در آمریکای شمالی ۱۲ درصد، آمریکای جنوبی ۱۸ درصد، اقیانوسیه ۱۹ درصد، اروپا ۲۶ درصد، آفریقا ۲۷ درصد و در آسیا ۳۱ درصد بوده است. هر ساله حدود چهار هزار هکتار از اراضی شش کلان‌شهر کشور در حال تخریب است و ۵۰ درصد خاک‌های کشورمان کمبود عنصر غذایی دارند. برآورد جهانی فرسایش خاک بسته به مقیاس، دوره مطالعه و روش استفاده شده به‌طور شایان‌توجهی متفاوت است (García-Ruiz و همکاران، ۲۰۱۵).

با عنایت به موارد فوق می‌توان بیان داشت که فرسایش خاک، به‌دلیل تخریب منابع زیست‌محیطی، یکی از مسائل مهم و بازدارنده در تحقق توسعه‌ی اقتصادی، اجتماعی و دستیابی به امنیت غذایی کشور است. این پدیده به سرمایه‌های طبیعی (انواع منابع طبیعی فیزیکی و بیولوژیکی)، اجتماعی (روابط، نهادها، باورهای مشترک فرهنگی و سنت‌ها)، و تولیدی (ساختمان‌ها، جاده‌ها، و سایر دارایی‌های ثابت تولید انسان) آسیب وارد می‌کند.

طبق برآورد سازمان خواربار و کشاورزی جهانی (FAO)، در سال ۱۹۸۰ میلادی، بیش از ۵۶ میلیون هکتار از اراضی ایران در معرض خسارت ناشی از فرسایش آبی بالاتر از ۱۰ تن در هکتار در سال بوده است (دفتر حفاظت خاک و آبخیزداری، ۱۳۶۴). مصفایی و طالبی (۱۳۹۳)، بیان کردند که متوسط میزان فرسایش در کشور بین هفت و بیشینه ۱۶ تن در هکتار در سال است، که با توجه به مساحت ایران، فرسایش سالانه کشور معادل ۱/۱۵ و ۲/۶۴ میلیارد تن خواهد بود. در همین راستا عرب‌خدری و همکاران (۱۳۹۷) با به‌کارگیری مدل EPM برآورد کردند که این میزان به ۹۷۶ میلیون تن در سال بوده است. همچنین کمینه و بیشینه مقدار رسوبدهی سالانه مشاهده‌ای، به ترتیب چهار و ۵۵۹۱، رسوبدهی سالانه برآوردی با مدل به ترتیب ۳۱ و ۲۹۴۶ تن در کیلومتر مربع بوده است. به‌علاوه، خسارت ناشی از فرسایش خاک و هدررفت منابع

غذایی در کشور سالانه بالغ بر ۷/۲ میلیارد دلار برآورد شده است (اسداللهی و همکاران، ۱۳۹۴).

در بین علل تخریب سرزمین، فرسایش آبی، سهمی بیش از ۵۰ درصد را به‌خود اختصاص می‌دهد در حالی که بقیه عوامل تخریب نظیر فرسایش بادی، تخریب فیزیکی و شیمیایی، تخریب پوشش گیاهی و تخریب آب سهمی کمتر از ۵۰ درصد را به‌خود تخصیص داده‌اند (Liniger و Critchley، ۲۰۰۷). بنابراین فرسایش خاک توسط آب، یکی از مهم‌ترین فرآیندهای تخریب سرزمین در کل دنیا و به‌ویژه در ایران است که به‌عنوان یکی از تهدیدهای جدی برای کشاورزی، منابع طبیعی و محیط زیست به حساب می‌آید، به‌گونه‌ای که در اقلیم‌های مختلف دارای پیامدهای متفاوتی است و منجر به کاهش بهره‌وری خاک و آلودگی منابع آب شده و خسارت‌های مالی و جانی زیادی را به‌همراه دارد (سلیمان‌پور و همکاران، ۱۳۹۷). به‌طوری‌که براساس گزارش مرکز اطلاعات بین‌المللی سازمان ملل متحد، عوامل فرساینده (فرسایش آبی و بادی)، ۱۰۰ میلیون هکتار از تقریباً ۱۶۵ میلیون هکتار از اراضی ایران را ناپایدار کرده است (رفاهی، ۱۳۹۴).

۱-۲- تعریف فرسایش خاک

زاخار اظهار می‌دارد که اصطلاح فرسایش برای اولین بار توسط پنک در سال ۱۸۹۴، در زمین‌شناسی و برای توضیح فرایند شکل‌گیری دره‌ها، به‌کار رفته است. در همان زمان فرآیندهای ناشی از آب‌شستگی سطحی را ابلیشن (از دسترس خارج شدن) می‌نامیدند. اما به‌تدریج در اوایل قرن بیستم اصطلاح فرسایش خاک توسط دانشمندانی نظیر بنت (آمریکا)، کوزمنکو (روسیه)، شولتز (آلمان) و بولیگ (فرانسه) به کار رفت (رفاهی، ۱۳۹۴).

فرسایش عبارت از جابجایی مواد از نقطه‌ای به نقطه دیگر، پس از تخریب سنگ و یا خاک، که مواد حاصل به علت از دست‌دادن چسبندگی و تراکم از بستر اصلی خود

--- اصول مدل‌سازی مکانی فرسایش خندقی با استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی ۵/

جدا شده و به کمک یک عامل انتقال‌دهنده به مکانی دیگر حمل می‌شوند. به وسیله عوامل گوناگون مانند آب، باد و برف، حمل و بسته به میزان قدرت عامل حمل، انتقال و رسوبگذاری می‌کند. در صورتی که عامل جداکننده ذرات از بستر و انتقال آنها آب باشد به آن فرسایش آبی گفته می‌شود. اگر عامل جدا کردن ذرات و انتقال آنها باد باشد فرسایش بادی و اگر یخچال باشد، فرسایش یخچالی نامیده می‌شود (رفاهی، ۱۳۹۴). فرآیندهای فرسایش آبی و بادی معمولاً به صورت دو فرآیند جداگانه مورد ارزیابی و بررسی قرار می‌گیرد. به طور کلی فرسایش خاک فرآیندی سه مرحله‌ای؛ برداشت^۱، حمل^۲ و ترسیب^۳ است (احمدی، ۱۳۹۱). فرسایش آبی در مقیاس جهانی به شکل‌های مختلف فرسایش پاشمانی، سطحی^۴، بین‌شیاری، شیاری^۵، خندقی^۶ و کناره‌ای^۷ دیده می‌شود (Lal و Blanco، ۲۰۰۸).

۱-۳- پیامدهای فرسایش خاک

پدیده فرسایش خاک و آثار سوء آن شاید در کوتاه‌مدت چندان چشم‌گیر و محسوس نباشد؛ ولی به منظور جلوگیری از آثار سوء آن، باید از زمین‌طوری استفاده کرد که در آن فرسایش به وجود نیاید. به هر حال، فرسایش پدیده‌ای دائمی است و همیشه وجود خواهد داشت؛ ولی در صورتی که میزان آن کمتر از میزان خاک تشکیل شده باشد، بحرانی نیست. هنگامی میزان فرسایش کمتر از میزان تشکیل خاک یا برابر آن است که ویژگی‌های خاک مانند بافت، عمق و حاصلخیزی آن در طول زمان ثابت بماند. طبق نظر Bennett، در یک خاک معمولاً در شرایط دست‌نخورده حدود ۳۰۰ سال طول می‌کشد تا ۲۵ میلی‌متر خاک سطحی تشکیل شود. این مقدار خاک تشکیل

1 Detachment

2 Transport

3 Deposit

4 Sheet

5 Rill

6 Gully

7 Bank, Side, Bank Side

شده به مراتب کمتر از مقدار خاک فرسایش یافته است. در یک زمین تحت کشت و بدون رعایت همه جانبه اصول خاکداری برای تشکیل همین ۲۵ میلی‌متر خاک حدود ۱۰۰ سال وقت لازم است. به این ترتیب در چنین شرایطی در هر سال حدود چهار تن خاک در هکتار ایجاد می‌شود در حالی که میزان فرسایش در این خاک‌ها معمولاً بیشتر از این رقم است. در شرایط بهینه و با به‌کار بردن روش‌های مناسب کاشت، داشت و برداشت هر ۳۰ سال در حدود ۲۵ میلی‌متر خاک می‌تواند تشکیل شود که این مقدار خاک تشکیل شده برابر ۱۲/۵ تن خاک در هکتار در سال است که تقریباً حد میزان فرسایش قابل قبول است. این رقم ۱۲/۵ تن خاک از بین رفته در هکتار در سال، به‌عنوان حد فرسایش مجاز در مورد خاک‌های عمیق حاصلخیز است و بدیهی است که میزان آن در مورد خاک‌های کم‌عمق چند سانتی‌متری با حاصلخیزی کم خیلی کمتر خواهد بود. مقدار کمینه فرسایش مجاز در کشورهای مختلف متفاوت است. مثلاً در ایالات متحد آمریکا رقم ۲/۵ تن در هکتار در سال به‌عنوان کمینه فرسایش مجاز پذیرفته شده است. در چک و اسلواکی برای خاک‌های کمتر از ۳۰ سانتی‌متر عمق حد مجاز یک تن در هکتار در سال است (رفاهی، ۱۳۹۴).

برخی از مشکلات مرتبط با فرسایش خاک شامل از دست رفتن حاصلخیزی خاک سطحی برای کشاورزی، تشکیل لجن و لای در آبراهه‌ها و دریاچه‌ها، مردابی شدن سطح آب و از دست رفتن تنوع زیستی آبزیان می‌شود (Onyndo و همکاران، ۲۰۰۵). به این سبب باید در نظر داشت که فرسایش، نه تنها خاک را از بین می‌برد بلکه حاصلخیزی آن را کاهش می‌دهد و با ایجاد رسوب مواد در آبراهه‌ها سبب انسداد آن‌ها می‌شود. همچنین با پر شدن مخازن سدها ظرفیت ذخیره آن‌ها کاهش می‌یابد و در نتیجه عمر آن‌ها کم می‌شود. فرسایش به این ترتیب، به برنامه توسعه کشاورزی منطقه که بر پایه این تأسیسات بنا شده است لطمه وارد می‌سازد. اصلاح این نوع رسوبگذاری اگر چه غیرممکن نیست، اما کاری مشکل است. برای نمونه در حال حاضر اگر سدی از رسوب ناشی از فرسایش پر شود تنها راه حل، رهاکردن آن سد و جستجوی مکانی

--- اصول مدل‌سازی مکانی فرسایش خندقی با استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی ۷/

دیگر برای سدسازی است. به‌همین دلیل، سرمایه‌گذاری‌ها باید بیش از آن‌که صرف احیای منابع از دست‌رفته شود، برای پیشگیری از فرسایش به‌کار رود (رفاهی، ۱۳۹۴). فرسایش خاک هر محل از یک سو، تحت‌تأثیر ویژگی‌های طبیعی قرار دارد و از سوی دیگر از فعالیت‌های انسان تأثیر می‌پذیرد. نظام بارشی مدیترانه‌ای و فرساینده‌ی زیاد آب، وسعت زیاد خاک‌ها و سازندهای حساس به فرسایش، پوشش گیاهی طبیعی تنک در بسیاری از مناطق کشور و شرایط ناهمواری‌ها شماری از عوامل طبیعی مهم مؤثر بر فرسایش خاک در ایران هستند (عرب‌خدری، ۱۳۹۳ الف). بنابراین فرسایش خاک یکی از مهم‌ترین معضلات کشور در بخش منابع طبیعی (آب و خاک) است و آگاهی از مقادیر فرسایش در شرایط مختلف، می‌تواند به شناخت بهتر وضعیت و برنامه‌ریزی در امر حفاظت خاک کمک کند (کیانی و همکاران، ۱۳۹۷).

خسارت‌های فرسایش خاک بسیار زیاد و متنوع است که بخشی از آن خسارت برجا نامیده می‌شود. مهم‌ترین خسارت برجای فرسایش، کاهش کیفیت و توان تولید خاک است (به‌دلیل هدررفت مواد آلی و عناصر تغذیه‌ای خاک، تخریب فیزیکی و کاهش ظرفیت رطوبتی خاک) که به نوبه‌خود موجب کاهش تولیدات کشاورزی و منابع طبیعی و کاهش کیفیت محصولات نیز می‌شود (رفاهی، ۱۳۹۴؛ عرب‌خدری، ۱۳۹۳ ب). خسارت‌های اقتصادی و جانی مربوط به انواع فرسایش عمیق خاک از قبیل خندقی، کنار رودخانه‌ای و رانش زمین نیز نباید فراموش شود. خسارت فرسایش محدود به محل وقوع نیست. رسوبات معلق علاوه بر گل‌آلود کردن منابع آب و یا غبارآلود کردن هوا، در انتقال مواد آلاینده نقشی اساسی دارند. فرسایش خاک در ایران یک پدیده زیست‌محیطی جدی بوده است که در صورت بی‌توجهی به آن، پیامدهای زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی فراوانی در پی خواهد داشت. این پدیده افزون بر اثرهای منفی بر اکوسیستم طبیعی، کشاورزی، جنگل و مرتع (Burgess و Pimentel، ۲۰۱۳)، پیامدهای اقتصادی و اجتماعی فراوان دارد (Adamu و همکاران، ۲۰۱۴).

فرسایش خاک با تخریب ساختار خاک به کاهش حاصلخیزی خاک و کاهش ظرفیت نگهداری آب می‌انجامد که در نهایت، با کاهش بهره‌وری زمین موجب کاهش درآمد کشاورزان می‌شود (Telles و همکاران، ۲۰۱۳). گسترش فرسایش خاک در یک منطقه، خاک سطحی به‌طور مستمر را از دسترس خارج می‌کند. بنابراین با هدررفت مواد غذایی (نیتروژن، فسفر، پتاسیم و سایر عناصر کمیاب)، حاصلخیزی خاک و تولیدات گیاهی کاهش می‌یابد؛ پس تولید محصول رابطه منفی با شدت فرسایش دارد (عاقلی کهنه‌شهری و صادقی، ۱۳۸۴).

پیامدهای فرسایش خاک محدود به بخش کشاورزی نیست و در صورت عدم کنترل آن از بزرگ‌ترین موانع رسیدن به توسعه پایدار بوده که می‌تواند اقتصاد ملی را با تهدید جدی روبه‌رو سازد (Ananda و Herath، ۲۰۰۳) و در بلندمدت منجر به مهاجرت‌های گسترده، از مناطق روستایی به شهری و تهدید امنیت غذایی (Adamu و همکاران، ۲۰۱۴) و معیشت خانوارهای کشاورزان خرده‌پا در بیشتر کشورهای در حال توسعه شود که نتیجه آن ایجاد چالش‌های گسترده اقتصادی و اجتماعی برای کشور است. فرسایش باعث کاهش جریان آب پایین‌دست و کاهش تنوع گیاهان و آبزیان می‌شود. همچنین فرسایش خاک، یکی از شاخص‌های مهم تغییر کیفیت محیط زیست و از مهم‌ترین مشکلات اقتصادی و زیست محیطی بسیاری از کشورهای در حال توسعه است (عبدالله‌زاده و همکاران، ۱۳۹۷).

رسوبگذاری در پشت سدها، کاهش تولید زراعت آبی، افزایش خطرات بهداشتی، کاهش تولید برق و مانند آن در رده اثرات غیرمستقیم فرسایش قرار دارد. اثرات غیرمستقیمی که از عملیات رسوبگذاری یا وزش باد به‌وجود می‌آیند ظرفیت رودخانه‌ها و مسیرهای زهکشی را کاهش، خطر طغیان رودخانه‌ها را افزایش، کانال‌های آبیاری را مسدود می‌کنند و عمر مفید مخازن را کاهش می‌دهند. کاهش ارزش زیبایی چشم‌اندازها، افزایش جریان سطحی در زمره اثرات مستقیم است (عاقلی کهنه‌شهری و صادقی، ۱۳۸۴). رسوبگذاری در کانال‌ها و سایر تأسیسات آبیاری به هزینه‌های سنگین لایروبی

--- اصول مدل‌سازی مکانی فرسایش خندقی با استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی ۹/

منجر می‌شود. افزایش میزان رسوب یکی از پارامترهای مؤثری است که همواره توسعه پایدار کشاورزی را تحت الشعاع قرار می‌دهد. به علت تجمع گل و لای در مخازن سدها، هر ساله، از حجم مفید سدهای بزرگ در کشور کاسته شده است که می‌تواند منابع آب شایان توجهی را برای تولید کشاورزی فراهم آورد. در حالی که بهره‌وری تولیدات را با کاهش مواجه می‌سازد. رسوب‌دهی حوزه‌های آبخیز، به دلیل تشدید فرسایش خاک و افزایش سیل‌خیزی، روندی صعودی داشته است.

۱-۴- فرسایش خندقی

در کشورهای مختلف نام‌های متفاوتی برای این شکل از فرسایش انتخاب شده است. در ایران، این نوع فرسایش به اسامی متفاوتی توسط متخصصان منابع طبیعی، علوم مهندسی و مردم محلی نامیده شده است. به عنوان مثال، صوفی (۱۳۸۳) این نوع فرسایش را با نام آب‌کند معرفی می‌کند. همچنین متخصصان مختلف از آن به نام‌های فرسایش خندقی (فرهنگ تخصصی فرسایش و رسوب، ۱۳۸۲) نام برده‌اند؛ و یا در بین مردم بومی مناطق جنوبی ایران (هرمزگان و بوشهر) به نام "کندر" و در منطقه ترکمن صحرای استان گلستان به نام "قرب" شناخته می‌شود. در انگلستان و آمریکا آن را گالی^۱، در مصر به نام وادی^۲، در آفریقای جنوبی به نام دونگا^۳، در سرزمین‌های فرانسوی زبان به نام راوین^۴، در هند به نام نولا^۵ و در آمریکای جنوبی، کارکاوا^۶ یا آرویا^۷، و در چین، گوو^۸ نامیده می‌شود (احمدی، ۱۳۹۱).

در بین شکل‌های مختلف فرسایش آبی، فرسایش خندقی یک نوع بسیار آشکار و شاخص از فرسایش خاک است و از مهم‌ترین چالش‌های تهدیدکننده تهیه غذا، سلامت

¹ Gully

² Wadi

³ Donga

⁴ Ravine

⁵ Nulla

⁶ Caracava

⁷ Arroya

⁸ Govo

انسان‌ها و زیست‌بوم است و این تأثیر در مناطقی که تغییرات کاربری اراضی و اقلیم وجود دارد مشهودتر است (Svoray و Markovitch، ۲۰۰۹)؛ به همین سبب، این نوع فرسایش به‌عنوان یکی از مهم‌ترین و مخرب‌ترین شکل تخریب زمین، و هدررفت خاک در سراسر جهان شناخته شده است (Hein، ۲۰۰۷؛ Igwe و همکاران، ۲۰۱۸). خندق‌ها به مسیرهای حمل و نقل، و سازه‌ها آسیب جدی وارد می‌کنند و می‌توانند موجب ایجاد رسوب در آبراهه‌ها، جاده‌ها، کانال‌ها، سدها و آبنگورها شوند. شکل ۱-۱، فرسایش خندقی در حوزه آبخیز ماهورمیلاتی استان فارس را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۱- فرسایش خندقی در حوزه آبخیز

ماهورمیلاتی استان فارس (سلیمان‌پور و همکاران، ۱۴۰۳)

در مورد خندق تعاریف گوناگون وجود دارد که بعضی محققان صرفاً با در نظر گرفتن ابعاد هندسی به بیان و معرفی آن می‌پردازند و بعضی نحوه تشکیل، مکانیسم و ایجاد آن را و برخی نیز با در نظر گرفتن مجموعه‌ای از خصوصیات، به تشریح و تعریف این پدیده اکتفا می‌کنند (سلیمان‌پور، ۱۳۹۱).

Hauge (۱۹۷۷) در تعریف خندق، از اندازه مقطع هندسی خندق استفاده کرد، ایشان کانال‌های با سطح مقطع بزرگ‌تر از یک فوت مربع (حدود ۰/۱ مترمربع) را خندق می‌نامد. به عبارت دیگر ایشان معتقد است که در صورت افزایش عمق و عرض

--- اصول مدلسازی مکانی فرسایش خندقی با استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی ۱۱/

کانال فرسایشی به بزرگ‌تر از ۳۰ سانتی‌متر، می‌توان به آن خندق گفت. Schuster (۱۹۹۵) نیز معتقد است که کشاورزان با تعریف فوق موافق هستند؛ زیرا که کانال‌های بزرگ‌تر از اندازه ذکر شده سبب ایجاد مشکلات حمل و نقل در مزارع می‌شوند. Hudson (۱۹۸۵) خندق‌ها را آبراهه‌هایی توصیف کرده است که دارای دیواره‌های جانبی و شیب طولی زیاد هستند که در اثر جریان‌های شدید و متمرکز سیلاب‌های ناشی از رگبارهای با شدت زیاد به‌وجود می‌آیند؛ اما معتقدند که خندق‌ها بر اثر ناپایداری اراضی و در اثر اقدامات و فعالیت‌های انسان به‌ویژه بهره‌برداری غیراصولی از اراضی حاصل می‌شوند. به‌طوری که فرسایش خندقی در اکثر موارد به اقدامات عامل انسان در بهره‌برداری از زمین بستگی داشته و عوامل محیطی در درجه دوم از اهمیت قرار دارند.

احمدی (۱۳۹۱) در تعریف خندق مکان به‌وجود آمدن آن را مدنظر می‌گیرد و بر این عقیده است که این نوع فرسایش در روی شیب‌های بیشینه تا ۱۵ درصد و در دشت‌ها و دشت‌سرها و کمتر در روی دامنه‌ها ایجاد می‌شود. شکل ۱-۲، نمونه‌ای از ایجاد و گسترش فرسایش خندقی در حوزه آبخیز تلوار استان کردستان را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۲- فرسایش خندقی در حوزه آبخیز

تلوار استان کردستان (رحمتی و همکاران، ۱۴۰۲)

Ehiorobo و Izinyon (۲۰۱۳) اعلام کردند فرسایش خندقی زمانی اتفاق می‌افتد که رواناب سطحی بیش از حد با سرعت و نیروی زیاد حرکت کرده و ذرات خاک را در جهت شیب حمل کند. همچنین این حالت ممکن است زمانی اتفاق بیفتد که حجم رواناب زیادی از زمین‌های ناهموار عبور کند و یا سرعت جریان زیاد شود و از گودال‌های عمیق در مسیر عبور کند. شکل ۱-۳، نمونه‌ای از ایجاد و گسترش فرسایش خندقی در حوزه آبخیز ماهورمیلاتی استان فارس را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۳- فرسایش خندقی در حوزه آبخیز
ماهورمیلاتی استان فارس (سلیمان‌پور و همکاران، ۱۴۰۳)

همان‌طور که از مطالب فوق و تعاریف محققان مختلف مشاهده می‌شود، در مورد خندق تعاریف گوناگون و متنوعی وجود دارد و همگی آن‌ها حاکی از این واقعیت است که خندق یک پدیده فرسایشی است و از نظر موقعیت مکانی اغلب در اراضی کم‌شیب و مسطح ایجاد می‌شوند. خندق‌ها با مشخصه ژئومورفولوژیکی پیشانی با ارتفاع رأس بالاکنند خندق مشخص می‌شوند. از نظر جنس سازندی که خندق‌ها در آن به‌وقوع می‌پیوندند باید عنوان کرد که خندق‌ها در اراضی حساس (عمدتاً به فرسایش انحلالی) که دارای مقداری نمک و سایر املاح می‌باشند، پدیده می‌آیند. بنابراین از مشخصات عمده در توصیف و تشریح خندق‌ها، وجود پدیده انحلال است و از نظر

--- اصول مدل‌سازی مکانی فرسایش خندقی با استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی ۱۳/

اقلیمی اکثراً در مناطقی که میزان بارش ۲۴ ساعته بیش از ۱۰ میلی‌متر دارا باشد (مناطق خشک و نیمه‌خشک تا حتی مرطوب) به وجود می‌آیند (سلیمان‌پور، ۱۳۹۱). به عبارت دیگر، در به وجود آمدن خندق‌ها، آب از مهم‌ترین عامل مؤثر است (نیروی مکانیکی، هیدرولیکی آب و عمل انحلال در به وجود آمدن خندق سهم به‌سزایی دارند). همچنین از نظر مورفومتریکی عمق آن‌ها بیش از ۳۰ سانتی‌متر و تعداد آن‌ها در واحد سطح کم، ولی عرض و عمق آن‌ها زیاد است (صوفی، ۱۳۹۰). به عبارتی، هنگامی که آبراهه فرسایش‌یافته در سطح زمین به اندازه‌ای بزرگ شود که امکان عبور و مرور وسایل کشاورزی ممکن نباشد آن را فرسایش خندقی می‌گویند که بیشتر در اراضی مارنی، لسی و قابل انحلال با توپوگرافی کم‌شیب و تقریباً مسطح مشاهده می‌شود و یکی از مهم‌ترین پدیده‌های مؤثر در نابودی خاک، تغییر منظر زمین و منابع آب و پس‌رفت اراضی است؛ به گونه‌ای که تا حد زیادی در پیکر تراشی سطح زمین در دهه گذشته مشارکت داشته است (Shit و همکاران، ۲۰۱۴).

این نوع فرسایش از یک طرف با تخریب افق‌های سطحی و زیرین خاک، باعث تولید حجم زیاد رسوب و نابودی بستر تولید می‌شود و از طرف دیگر با کاهش ارتباط بین بالادست و پایین‌دست، باعث تشدید در تخلیه رواناب‌های سطحی و کاهش حجم جریان آب‌های زیرزمینی می‌شود (نظری‌سامانی و همکاران، ۱۳۸۸). این نوع فرسایش، عموماً در نهشته‌های سست و منفصل دیده می‌شود. به‌طور کلی وقتی آبراهه‌های فرسایشی موجود در سطح زمین، به اندازه‌ای بزرگ باشند که وسایل کشت و زرع نتوانند به‌طور عمودی از آن‌ها عبور کنند و نتوان آن را توسط عملیات کشت و زرع معمولی تسطیح کرد؛ خندق نامیده می‌شود (رفاهی، ۱۳۹۴).

تشکیل خندق ممکن است با به تکامل رسیدن فرسایش شیاری و آبراهه‌ای صورت گیرد که در این حالت که بیشتر در شیب‌های بالاتر از ۱۰ درصد است. به‌طوری‌که با توسعه آبراهه‌های ایجاد شده بر روی دامنه و در مناطقی که از نظر ساختار زمین‌شناسی نیز مساعد باشند، دیواره‌ها حالت عمودی پیدا کرده و خندق تشکیل می‌شود. علاوه بر

این، تشکیل خندق ممکن است با ریزش سقف فرسایش لانه‌روباهی و در شیب‌های کمتر از ۱۰ درصد ایجاد شود.

خندق‌ها را می‌توان براساس نحوه گسترش (احمدی، ۱۳۹۱)، پروفیل عرضی (فیض‌نیا و همکاران، ۱۳۸۶)، پیوستگی و تکامل، چگونگی محل شکل‌گیری خندق‌ها، مورفومتری کانال، مساحت حوزه آبخیز، عمق خندق، طول خندق، تراکم و تعداد خندق، پلان سر خندق، موقعیت خندق در چشم‌انداز، کرانه‌های خندق، نسبت عرض به عمق خندق و غیره به انواع مختلف طبقه‌بندی کرد.

در مورد اندازه و ابعاد خندق نظرات متفاوتی وجود دارد. رفاهی (۱۳۹۴) خندق را کانالی با سطح مقطع بیشتر از ۹۰۰ سانتی‌متر (عرض و عمق بیش از ۳۰ سانتی‌متر) تعریف کرده است. انجمن علوم خاک آمریکا (۲۰۰۱) خندق را کانالی با عمق ۰/۵ تا ۳۰ متر در اراضی زراعی تعریف کرده است. خندق‌ها زمانی تشکیل می‌شوند که عمق شیارها بیش از ۳۰ سانتی‌متر شود. Poesen (۲۰۰۳) خندق را کانالی با کناره‌های دارای یک شیب تند و یک پیشانی فرسایشی پرشیب و فعال می‌داند که توسط فرسایش ناشی از جریان سطحی متناوب و معمولاً در طی یا پس از وقوع باران‌های شدید ایجاد شده است.

فرسایش خندقی ممکن است به‌طور ناگهانی به‌وجود آید و آن هنگامی است که یک طغیان شدید، زمین را به‌طور عمیق بکند و به‌صورت گودال در آورد. علاوه بر این، فرسایش خندقی ممکن است در اثر جریان آب سطحی در هرگونه فرورفتگی سطح زمین مانند فرورفتگی‌های طبیعی، جاده‌های مال‌رو و یا مسیر ماشین‌های کشاورزی و نیز در اثر فروریختن تونل‌های زیرزمینی به‌وجود آیند. فرسایش خندقی غالباً در مناطق با خاک‌های فقیر غیرمستعد برای کشاورزی و با پوشش گیاهی پراکنده و همچنین در تشکیلات مارنی و شیل مشاهده می‌شوند (رفاهی، ۱۳۹۴).

نقش فرسایش خندقی در تولید رسوب بیشتر از فرسایش‌های سطحی و شیاری است. در این راستا نقش فرسایش خندقی در تولید رسوب حوزه‌های آبخیز بسته به

--- اصول مدل‌سازی مکانی فرسایش خندقی با استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی / ۱۵

شدت عوامل مؤثر بر آن متغیر است (Poesen, ۲۰۰۳). اثرات فرسایش خندقی در کاهش شدید حاصلخیزی خاک، مشکلات کشت‌وکار، کاهش ارزش زمین، گسترش آبراهه‌ها و شیارها در فواصل خندق‌ها، کاهش رطوبت خاک و کاهش عملکرد قابل ملاحظه محصول در کرت‌های نزدیک دیواره خندق است (Nyssen و همکاران، ۲۰۰۴)؛ به‌طوری‌که می‌توان آن را یکی از مشخص‌ترین انواع فرسایش در تلفات خاک و به‌عنوان شاخصی برای بیابان‌زایی به شمار آورد (Kukul و Matharu, ۲۰۰۲). علاوه بر این، فرسایش خندقی موجب اتصال بالادست به پایین‌دست آبخیز شده که در تخلیه سریع رواناب و رسوب مؤثر است و این مورد به نوبه‌خود در رسوبگذاری منابع آب نظیر سدها و کاهش کیفیت آب‌های سطحی تأثیر به‌سزایی دارد (Poesen, ۲۰۰۳) از طرفی، هزینه کنترل فرسایش خندقی زیاد است و مستلزم زمان طولانی است (Watson و همکاران، ۲۰۰۲).

به‌طورکلی فرسایش خندقی از دو نظر دارای اهمیت بیشتری نسبت به دیگر فرسایش‌ها است. اول این‌که این نوع فرسایش سهم بیشتری نسبت به دیگر فرسایش‌ها در تولید رسوب دارد. دوم این‌که تحقیقات کمتری نسبت به سایر فرسایش‌ها درباره آن صورت گرفته است و کمبود داده‌ها درباره آن احساس می‌شود (سلیمان‌پور، ۱۳۹۱) و بنابراین نیاز است پژوهش‌ها با تأکید بر تکنیک‌های جدید و نوظهور در این مورد انجام شود.

در پژوهش‌های مختلف، بسته به عوامل مکانی، زمانی، نوع خاک، کاربری اراضی، آب‌وهوا، پوشش گیاهی و غیره در تحقیقات مختلف سهم فرسایش خندقی بین ۱۰ تا ۹۴ درصد متغیر است (Poesen و همکاران، ۲۰۰۳). عوامل متعددی در تغییر سهم آن دخالت دارند که عبارتند از: عوامل مکانی، زمانی، کنش‌های محیطی، نوع خاک، کاربری اراضی، توپوگرافی، آب‌وهوا (Rahmati و همکاران، ۲۰۲۲). این رسوب تولیدی برای مخازن سدهای احداثی، هدررفت خاک حاصلخیز و رسوبگذاری رودخانه‌ها بسیار حائز اهمیت است.

در این خصوص، پژوهش‌های Nyssen و همکاران (۲۰۰۸) و Tebebu و همکاران (۲۰۱۰) نشان داد ۲۸ تا ۹۷ درصد کل هدررفت خاک در کشور اتیوپی ناشی از فرسایش خندقی است. Belay و Bewket (۲۰۱۲) نیز با اندازه‌گیری ۲۶ خندق فعال در شمال‌غربی اتیوپی اعلام کردند که در اثر ایجاد فرسایش خندقی در این مناطق، در مجموع ۸۲/۶۹۲ تن خاک از بین رفته است و ۴/۷ هکتار زمین‌ها نابود شده است. Lee و همکاران (۲۰۱۷) نیز در پژوهشی در فلات لسی چین حجم خاک از دست‌رفته ناشی از فرسایش خندقی در این منطقه را ۱۰/۳۲ متر مکعب در سال برآورد کردند. همچنین Mukai (۲۰۱۷) در اتیوپی، میزان هدررفت خاک ناشی از فرسایش‌های خندقی را ۱۶/۲ تن در هکتار در سال برآورد کرد. این آمار در حالی بیان شده است که Zhang و همکاران (۲۰۱۸) سهم فرسایش خندقی در تولید کل رسوب در یک حوزه آبخیز کوچک واقع در جنوب‌غربی چین را ۲۵ درصد اعلام می‌کنند سلیمان‌پور و همکاران (۱۳۹۸الف) نیز در پژوهشی حجم متوسط خاک از دست‌رفته ناشی از فرسایش خندقی در حوزه آبخیز قاضیان خرم‌بید واقع در شمال استان فارس را ۲۶۳/۴۳ تن در هکتار در سال اعلام کردند. همچنین سلیمان‌پور و همکاران (۱۳۹۹) در مطالعه دیگری در همین حوزه آبخیز، میزان پیشروی خندق‌ها را ۲/۱ متر در سال برآورد کردند. سلیمان‌پور و همکاران (۱۴۰۱الف) در پژوهش دیگری، اقدام به برآورد هدررفت خاک ناشی از ۷۰ خندق موجود در حوزه آبخیز ماهورمیلاتی ماهورمیلاتی واقع در جنوب‌غربی استان فارس در دوره یک ساله (۱۳۹۹-۱۴۰۰) کردند. یافته‌های این پژوهش نشان داد در طی یک‌سال، خندق‌های مورد مطالعه، مجموعاً ۴۳۲۹/۶۱۸ متر مکعب هدررفت خاک داشته‌اند که وزنی معادل ۵۶۲۸/۵۰ تن است. Wang و همکاران (۲۰۲۲) نیز اقدام به ارزیابی کمی فرسایش خندقی در شمال‌شرق چین کردند. یافته‌های ایشان نشان داد، ۴۹ درصد از فرسایش سالانه منطقه مربوط به فرسایش خندقی است. همچنین رحمتی و همکاران (۱۴۰۱) در حوزه آبخیز کلوجه استان کردستان اقدام به محاسبه هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی کردند. یافته‌های ایشان نشان داد در طی یک‌سال، ۳۷

--- اصول مدل‌سازی مکانی فرسایش خندقی با استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی ۱۷/

خندق مورد مطالعه مجموعاً ۹۲۹۱۴ متر مکعب هدررفت خاک داشته‌اند که وزنی معادل ۱۲۰۷۸۸ تن است. سلیمان‌پور و همکاران (۱۴۰۱پ) نیز با استفاده از روش انگشت‌نگاری رسوبات، بیشترین سهم تولید رسوب در حوزه آبخیز نی‌ریز استان فارس را ناشی از فرسایش خندقی اعلام کردند و میزان سهم این نوع از فرسایش را ۴۵/۲۱ درصد کل فرسایش‌های اتفاق افتاده برآورد کردند. این موارد نشان‌دهنده آن است که پدیده فرسایش خندقی در صورت فراهم شدن شرایط گسترش و عدم کنترل آن، قادر است رسوب بسیار زیادی تولید کند و مناطق پایین‌دست را تحت‌تأثیر قرار دهد. بنابراین ضروری است تا نسبت به برآورد دقیقی از میزان هدررفت خاک توسط این نوع فرسایش اقدام شود.

این نوع فرسایش در مناطق مختلف ایران، مشکلات فراوانی را در زیر بخش‌های مختلف کشاورزی، منابع طبیعی، و مسکونی ایجاد کرده است (سلیمان‌پور، ۱۳۹۱). به همین دلیل، ضرورت شناخت دقیق عوامل مؤثر بر گسترش این نوع فرسایش به شدت احساس می‌شود. از سوی دیگر، مدیریت و مهار فرسایش خندقی نیازمند شناخت دقیق عوامل مؤثر بر گسترش آنها است. به این منظور، لازم است ضمن بررسی این عوامل و تعیین اثرگذارترین آنها نسبت به پیشنهاد و معرفی عملیات مدیریت و کنترل فرسایش خندقی براساس عوامل مؤثر، به‌منظور اجرای موفقیت‌آمیزتر پروژه‌های حفاظت آب و خاک و حفظ این منابع ارزشمند اقدام کرد (سلیمان‌پور و همکاران، ۱۳۹۷). شکل ۱-۴، هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی در یکی از حوزه‌های آبخیز کشور (کشکان-پل دختر استان لرستان را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۰- هدررفت خاک در اثر فرسایش

خندقی در استان لرستان (رحمتی، ۱۳۹۷)

پژوهش‌های مختلفی در خصوص تعیین عوامل مؤثر در ایجاد و گسترش فرسایش خندقی در دنیا انجام شده است و اهمیت این پژوهش‌ها به این سبب است که پس از تعیین عوامل مؤثر، اقدامات کنترلی و مدیریتی، با شناخت دقیق‌تر و اطمینان بیشتری انجام می‌شود. علاوه بر این، در مباحث مدل‌سازی، عوامل مؤثر به‌عنوان نقشه‌ها و داده‌های پایه مورد استفاده قرار می‌گیرند. به‌عنوان مثال، سلیمان‌پور و همکاران (۱۳۸۶) در پژوهشی در حوزه آبخیز گوراسپید استان فارس به این نتیجه رسیدند که رسوب تولیدی ناشی از گسترش خندق‌ها تابع پنج متغیر درصد شیب، مساحت حوزه آبخیز واقع در بالادست خندق‌ها، درصد شن، هدایت الکتریکی عصاره اشباع و پوشش گیاهی است. احمدی و همکاران (۱۳۸۷) نیز به در پژوهش خود، عوامل مؤثر در رشد طولی خندق‌ها در حوزه آبخیز حبله‌رود را مساحت حوزه آبخیز بالادست خندق، درصد رس و سیلت و شن و نمک‌های محلول اعلام کردند. همچنین ثروتی و همکاران (۱۳۸۷) به بررسی عوامل مؤثر در شکل‌گیری و گسترش فرسایش خندقی در اراضی لسی استان گلستان پرداختند. ایشان عوامل شیب اراضی، نوع سازند، عمق خاک، میزان املاح محلول، نسبت جذب سدیمی، هدایت الکتریکی و میزان سدیم قابل تبادل در خاک را از مهم‌ترین عوامل مؤثر در شکل‌گیری و گسترش فرسایش خندقی در این منطقه دانستند. عرب‌قشقایی و همکاران (۱۳۸۹) نیز در بررسی عوامل مؤثر بر وقوع فرسایش

خندقی در حوزه آبخیز طرود، عوامل طبقه شیب، جهت شیب، نوع واحد سنگی، کاربری اراضی، پوشش گیاهی و شخم در جهت شیب در اراضی کشاورزی را از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر وقوع فرسایش خندقی در این منطقه اعلام کردند. همچنین خزایی و همکاران (۱۳۹۱) با بررسی عوامل مؤثر بر توسعه فرسایش خندقی در حوزه آبخیز مارون به این نتیجه رسیدند که شرایط فیزیکی و شیمیایی خاک، پوشش گیاهی و بارندگی در پیشروی خندق‌ها، چه از نظر طولی و چه از نظر عرضی مؤثر بوده است. شادفر و همکاران (۱۳۹۱) نیز در پژوهشی در حوزه آبخیز رباط ترک به این نتیجه رسیدند که میزان نسبت جذبی سدیم، و کاتیون سدیم، سبب پخشیدگی ذرات خاک و تشدید فرسایش خندقی شده است. زمان‌زاده و احمدی (۱۳۹۲) با بررسی تأثیر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در گسترش خندق در منطقه دشت کهور لامرد فارس به این نتیجه دست یافته‌اند که رسوب تولیدی ناشی از گسترش خندق‌ها تابع متغیرهای مساحت آبخیز، درصد سیلت و ماسه در آبخیز بالای پیشانی خندق‌ها بوده است. در این خصوص، یمانی و همکاران (۱۳۹۲) نیز مهم‌ترین عوامل مؤثر در شکل‌گیری و گسترش خندق‌های منطقه دشت کهور را سنگ‌شناسی، شیب، تغییر کاربری اراضی، جاده‌سازی، و احداث پل بیان کرده‌اند. پژوهش میرزایی و همکاران (۱۳۹۳) که در آن اقدام به ارزیابی مهم‌ترین فاکتورهای مؤثر بر فرسایش خندقی در مناطق خشک و نیمه-خشک استان ایلام کرده بودند نشان داد که دو عامل شیب و ارتفاع از سطح دریا بر فرسایش خندقی تأثیر معنی‌داری داشته به‌طوری که بیشترین فرسایش در طبقه ۱۰ تا ۱۵ درصد و در ارتفاعات پایین است؛ همچنین عوامل شن سطحی، عمق خندق و مساحت حوزه آبخیز بالادست خندق، از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر گسترش فرسایش خندقی هستند. همچنین نظری‌سامانی و همکاران (۱۳۹۳) نسبت به تعیین عوامل مؤثر بر رشد طولی فرسایش خندقی در حوزه آبخیز دره‌کره اقدام کردند. نتایج نشان داد مساحت حوزه آبخیز بالادست خندق، فاصله پیشانی خندق تا مرز حوزه آبخیز و نسبت جذبی سدیم، مهم‌ترین عوامل مؤثر بر رشد طولی خندق‌ها بوده‌اند.

رستمی‌زاد و همکاران (۱۳۹۴) نیز به بررسی تعیین عوامل مؤثر بر رشد طولی خندق‌ها و پیش‌بینی گسترش آن در شهرستان دره‌شهر واقع در شرق استان ایلام اقدام کردند. نتایج نشان داد گسترش طولی خندق‌ها تابع طول خندق، نسبت جذبی سدیم، درصد شن و میزان انحنای دامنه بوده و گسترش حجمی خندق تابعی از سطح مقطع خندق، درصد آهک و ضریب کشیدگی حوزه آبخیز بالادست خندق است. نتایج ویسی-سرطایره و اسفندیاری‌درآبادی (۱۳۹۴) در این خصوص نیز مبین این بود که شکل-گیری و گسترش فرسایش خندقی در شهرستان ثلاث باباجانی، تابعی از عوامل مختلف از جمله: شیب، ارتفاع متوسط بارندگی، نحوه استفاده از اراضی، نوع و تیپ گیاهی، شیب و جهت اراضی است. شادفر (۱۳۹۵) نیز در پژوهشی اعلام کرد عوامل شیب، فاصله از آبراهه، سنگ‌شناسی و کاربری مرتع، بیشترین تأثیر را در رخداد فرسایش خندقی در حوزه آبخیز طرود شهرستان فیروزکوه دارد. همچنین جهان‌تیغ و تابع (۱۳۹۶) در پژوهشی عوامل شوری، رس، ظرفیت تبادل کاتیونی، سدیم قابل جذب، و درصد سدیم قابل تبادل را از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در ایجاد و گسترش خندق‌ها در مناطق حسین‌زهی و نالینت شهرستان چابهار اعلام کردند. آصف و همکاران (۲۰۱۶) در مطالعات خود در اتیوپی اعلام داشتند سطح آب زیرزمینی، بیشترین نقش را در توسعه خندق‌ها ایفا می‌کند و خصوصیات فیزیکی خاک، تأثیر ناچیزی در این امر دارند. نتایج پژوهش Pourghasemi و همکاران (۲۰۱۷) در منطقه آقامام استان گلستان نشان داد فاصله از رودخانه، تراکم زهکشی، و تناسب اراضی بیشترین تأثیر را در وقوع فرسایش خندق داشته است. Rahmati و همکاران (۲۰۱۷) با برقراری ارتباط بین خندق و عوامل محیطی در حوزه آبخیز کشکان پل‌دختر، عواملی مانند بافت خاک، تراکم زهکشی و سنگ‌شناسی را از مهم‌ترین عوامل در ایجاد فرسایش خندقی معرفی کردند. Nwankwo و Nwankwoala (۲۰۱۸) نیز به بررسی وضعیت فرسایش خندقی در ایالت آبیآ نیجریه پرداختند. ایشان علل اصلی ایجاد فرسایش خندقی در این منطقه را

--- اصول مدل سازی مکانی فرسایش خندقی با استفاده از مدل های هوش مصنوعی ۲۱/

وجود معدن شن، فعالیت های کشاورزی نادرست، سیستم های زهکشی ضعیف و نامناسب و جاده سازی و ساخت وسازهای غیر اصولی اعلام کردند.

بررسی و مطالعه پژوهش های محققان مختلف در خصوص ابعاد مختلف فرسایش خندقی حکایت از این موضوع دارد که در مناطق خشک و نیمه خشک جهان، مانند ایران، اهمیت فرسایش خندقی به دلیل تولید رسوب زیاد و تخریب خاک، از سایر فرسایش های آبی بیشتر است. به علاوه نظرات متفاوتی درباره شکل گیری، گسترش، و کنترل آن ها بر حسب خصوصیات مناطق مختلف ارائه شده است که در برخی موارد نیز در تضاد با یکدیگر هستند؛ ولی با جمع بندی نتایج حاصل از پژوهش های انجام شده می توان استنباط کرد که در بسیاری از نقاط کره زمین ممکن است عوامل مؤثر در رخداد فرسایش خندقی تا حدودی مشابه باشد؛ اما رشد و گسترش فرسایش خندقی از ناحیه ای به ناحیه دیگر متفاوت بوده و تابع عوامل یکسان و مشترک ناست. همچنین سازوکار پیچیده و اثرگذاری عوامل و پارامترهای مختلف بر شکل گیری و توسعه این نوع فرسایش، شناخت دقیق عوامل مؤثر را با چالش روبرو کرده است. به همین دلیل، نیاز به مطالعه دقیق به منظور تعیین عوامل مهم تر و تأثیرگذارتر، بسیار ضروری به نظر می رسد و فرآیند مدل سازی در این خصوص می تواند کمک شایانی کند.

۱-۵- اهمیت پهنه بندی استعداد فرسایش خندقی

پهنه بندی عبارت است از تعیین وضعیت اراضی براساس یک مفهوم مشخص است. تکنیک های پهنه بندی در موضوعات مختلفی امروزه مورد استفاده قرار می گیرد. با در نظر گرفتن گسترش مکانی اراضی در حوزه های آبخیز، پهنه بندی مورد توجه پژوهشگران و کارشناسان قرار گرفته است. با توجه به این که فرسایش خندقی یکی از مهم ترین فرآیندهای ژئومورفولوژیکی است و می توان براساس روش های مختلفی به پیش بینی وقوع آن پرداخت؛ پهنه بندی مناطق مستعد فرسایش خندقی یکی از پایه ای ترین مراحل مدیریت سرزمین به منظور جلوگیری از وقوع فرسایش خندقی است

-

(شادفر، ۱۳۸۹). در عملیات پهنه‌بندی اراضی براساس استعداد وقوع فرسایش خندقی، یک منطقه یا آبخیز، به کلاس‌های مختلفی طبقه‌بندی می‌شود که هر کلاس پتانسیل رخداد فرسایش خندقی را نشان می‌دهد. به‌طور معمول، یک منطقه از نظر استعداد فرسایش خندقی به پنج کلاس استعداد خیلی کم، استعداد کم، استعداد متوسط، استعداد زیاد و استعداد خیلی زیاد تقسیم می‌شود. به‌طورمثال، در کلاس استعداد فرسایش خندقی خیلی کم نشان می‌دهد که اراضی قرار گرفته در این پهنه از نظر خصوصیات محیطی شرایط شکل‌گیری فرسایش خندقی را ندارند. فرسایش خندقی تحت یک فرآیند پیچیده ژئومورفولوژیکی به‌وجود آمده که عوامل محیطی متعددی از جمله خاک‌شناسی، پوشش گیاهی، زمین‌شناسی، ارتفاع، شیب، جهت جغرافیایی، شاخص رطوبت توپوگرافی، شاخص توان جریان، فاصله از آبراهه و فاصله از جاده و غیره نقش به‌سزایی در وقوع آن دارند. این موضوع بیان‌گر این امر است که شناسایی مناطق مستعد فرسایش خندقی در بازدیدهای میدانی و در نظر گرفتن یک یا چند عامل محیطی امکان‌پذیر نیست و روش‌های پهنه‌بندی در سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی به بررسی سطح وسیعی پرداخته و اطلاعات فضایی مختلفی مورد پردازش قرار می‌گیرد.

نقشه‌های پهنه‌بندی فرسایش خندقی اطلاعات مفیدی در اختیار کارشناسان و مدیران قرار می‌دهد که ارتقاء مدیریت سرزمین را به‌دنبال خواهند داشت. کارشناسان و مدیران منابع طبیعی تلاش می‌کنند که اولویت‌بندی صحیحی برای اجرای پروژه‌های عملیاتی پیش‌گیری، کنترل و مهار فرسایش خندقی ارائه دهند (قربانی و همکاران، ۱۳۹۶). هنگامی که برنامه‌ریزی عملیات‌های اجرایی معطوف پهنه‌های استعداد زیاد و خیلی‌زیاد می‌شود، مدیریت سرزمین با منابع اعتباری محدود عقلانی‌تر خواهد بود. کارایی مالی پروژه‌های دستگاه‌های اجرایی نیز با به‌کار بستن نقشه‌های پهنه‌بندی بهبود می‌یابد. بنابراین، اجرای عملیات حفاظت خاک و آب‌خیزداری مبتنی بر نقشه‌های پهنه‌بندی مناطق مستعد فرسایش خندقی، از کارایی بهتر و صرفه اقتصادی بالاتری برخوردار است.

--- اصول مدل‌سازی مکانی فرسایش خندقی با استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی / ۲۳

در مطالعات گذشته، عموماً شناسایی مناطق مستعد رخداد فرسایش خندقی براساس تجزیه و تحلیل مکانی آستانه‌های محیطی انجام شده است. رایج‌ترین معیار برای شناسایی مناطق مستعد رخداد فرسایش خندقی، آستانه توپوگرافی بوده است (کمالی مسکونی و همکاران، ۱۳۹۵؛ بالنده و همکاران، ۱۳۹۲؛ مددی و همکاران، ۱۴۰۱). در برخی مطالعات، آستانه توپوگرافی رخداد فرسایش خندقی به‌ازای کلاس‌های کاربری اراضی مختلف تعیین شده و مناطق مستعد رخداد فرسایش خندقی شناسایی شده‌اند (شهبازی و همکاران، ۱۳۹۸). در برخی از مطالعات فرسایش خندقی، از رابطه شیب زمین و مساحت برای شناسایی مناطق مستعد فرسایش خندقی استفاده شده است (Nazari Samani و همکاران، ۲۰۰۹). در مطالعاتی که بیش از یک متغیر برای شناسایی مناطق مستعد رخداد فرسایش خندقی در نظر گرفته می‌شد، روش تحلیل سلسله مراتبی برای تعیین وزن عوامل محیطی استفاده شده است (شادفر، ۱۳۹۰؛ انتظاری و همکاران، ۱۳۹۲). اگرچه روش تحلیل سلسله مراتبی^۱ فرایندی ساده و منطقی برای تعیین وزن عوامل محیطی و پیش‌بینی استعداد رخداد فرسایش خندقی است، با عنایت به این‌که نظرات کارشناسی در تکمیل پرسشنامه‌ها نقش مهمی در محاسبه وزن عوامل محیطی دارند، عدم قطعیت نتایج معمولاً زیاد است. در کتاب حاضر سعی شده است که مدل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی برای شناسایی مناطق مستعد فرسایش خندقی به‌صورت کاربردی معرفی شود.

^۱ Analytic hierarchy process

فصل دوم

مدل سازی و انواع مدل

۲-۱- تعریف مدل

براساس تعریف ارائه شده توسط محققان، مدل‌ها صورت ساده شده‌ای از واقعیت‌های طبیعی هستند (Pereira و همکاران، ۲۰۲۳). در واقع مدل‌ها توصیف قاعده‌مندی از عناصر اساسی یک مساله هستند و ما را در فهم و توصیف بهتر فرایندها و پدیده‌های طبیعی یاری می‌دهند و می‌توانند به‌عنوان ابزاری برای پیش‌بینی یک پدیده طبیعی مورد استفاده قرار گیرند.

اتخاذ تصمیم درخصوص میزان ساده‌سازی و تعیین سطح پیچیدگی مدل، وابسته به هدف کار و نوع پدیده طبیعی است (Höge و همکاران، ۲۰۱۸). انجام مدل‌سازی مستلزم مشخص کردن هدف است که مراحل مختلف ساخت و اجرای مدل را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به عبارت دیگر ابتدا عوامل دخیل در رخداد یک فرآیند یا پدیده مشخص شده و سپس اقدام به بررسی روابط علت-معلولی آن‌ها با پدیده موردنظر و ارائه قوانین مختلف فیزیکی یا ریاضی می‌شود. این روش منجر به تدوین مدل مفهومی می‌شود که درنهایت با استفاده از رایانه در قالب نرم‌افزارهای گوناگون اجرا می‌شود.

۲-۲- شبیه‌سازی

شبیه‌سازی^۱ فرآیندی است که طی آن از یک مدل به‌عنوان ابزاری برای الگوبرداری از رفتار یک سامانه، استفاده می‌شود. به عبارت دیگر، شبیه‌سازی اولین کارکرد مدل است. در این فرایند مهم طبیعت در مقیاس کوچک شده ارائه شده و تغییرات زمانی و مکانی طبیعت نیز ارائه می‌شود (Baggio و همکاران، ۲۰۲۱).

۲-۳- اندازه‌گیری و شبیه‌سازی فرسایش خاک

به‌منظور تدوین برنامه‌های حفاظت خاک، تعیین رسوب خروجی از یک حوزه آبخیز و همچنین طراحی دقیق سازه‌های پایین‌دست، اندازه‌گیری یا برآورد میزان کل

¹ Simulation

فرسایش خاک و در نتیجه حجم کل میزان تولید رسوب سالانه در یک حوزه آبخیز ضروری است. به طور کلی فرسایش و رسوب را می توان از طریق دو روش مستقیم و غیرمستقیم انجام داد. در روش اندازه گیری مستقیم، با استفاده از ابزارآلات و وسایل مختلف می توان به طور مستقیم میزان هدررفت خاک را در مراحل مختلف فرسایش در عرصه اندازه گیری و پایش کرد. روش های اندازه گیری مستقیم فرسایش خاک عبارتند از:

الف) روش های ترازیابی (ژئوتیک)

روش های ترازیابی به اندازه گیری تغییرات عمودی سطح خاک معطوف شده اند. این میزان تغییرات در تراز سطح خاک بسته به شرایط ممکن است به وسیله روش های ترازیابی ثابت و یا متحرک تعیین شود.

ب) روش های هیدرولیکی

در مواقعی که هدف تعیین شدت فرسایش خاک در یک حوزه آبخیز باشد، روش های هیدرولیکی بسیار مفید هستند. در روش هیدرولیکی بیشتر اثر کلی باران و فرسایش رودخانه ای توأماً ارزیابی می شود.

ج) روش های هیدرولوژیکی (دلیومتریکی)

در این روش شناسایی مناطق فرسایش یافته و تولیدکننده رسوب، تعیین میزان هرزآب و همچنین مساحت محدوده فرسایش یافته ضروری است. در این روش ممکن است شدت فرسایش خاک و همچنین فاکتورهای موثر در فرسایش، دقیقاً مورد مطالعه قرار گیرد. به طور کلی روش های هیدرولوژیکی به بررسی میزان گل آلودگی آب ها و تعیین دبی رسوب می پردازند.

د) روش های حجمی

به منظور تعیین حجم خاک فرسایش یافته و یا حجم رسوبگذاری شده، از روش های حجمی استفاده می شود. در این روش از محل های معین، اندازه گیری های ثابت و

--- اصول مدل سازی مکانی فرسایش خندقی با استفاده از مدل های هوش مصنوعی / ۲۷

طولانی مدت با یک روش ثابت، تغییرات حجم خاک فرسایش یافته مورد سنجش قرار می گیرد.

ه) روش های پوشش گیاهی

در روش پوشش گیاهی معمولاً شدت فرسایش خاک و یا تجمع رسوب مورد بررسی قرار می گیرد. در این رویکرد، نهال ها و یا بوته ها خاک را به اندازه کافی محافظت کرده و بدین ترتیب با استفاده از مقایسه نسبی تغییرات سطح خاک در محل گیاه و محیط اطراف، میزان فرسایش خاک تعیین می شود.

و) روش های تاریخی

گزارش های مختلف، اطلاعات محیطی، نقشه ها و سایر مدارکی که نشان دهنده تغییرات به وجود آمده در ناهمواری سطحی و یا جابجایی خاک در نتیجه فرسایش باشند، منابع مهمی برای کمی سازی و تعیین فرسایش خاک هستند. استفاده از رادیوایزوتوپ ها (مانند سزیم ۱۳۷) در مطالعات فرسایش سنجی که مبتنی بر مفهوم نیمه عمر هستند، در این گروه قرار می گیرند.

ز) روش استفاده از عکس های هوایی (فتوگرامتریک)

در این روش به کمک عکس های هوایی تهیه شده از سطح زمین، پدیده فرسایش خاک مورد بررسی قرار می گیرد. تکرار عکس برداری در زمان های مختلف و ایجاد منابع اطلاعاتی سری زمانی، امکان مطالعه تغییرات ایجاد شده در اشکال فرسایش را فراهم می سازد.

روش های مستقیم اندازه گیری فرسایش خاک و تولید رسوب دشوار، وقت گیر، هزینه بر هستند. از طرف دیگر به علت عدم وجود و یا کمبود آمار و اطلاعات در زمینه فرسایش خاک و تولید رسوب و همچنین نبود ایستگاه های هیدرومتری در بیشتر حوزه های آبخیز کشور، استفاده از مدل های برآورد فرسایش و رسوب را الزامی ساخته است. مدل های مختلفی برای برآورد میزان فرسایش خاک و رسوب وجود دارد که هر کدام تحت شرایط محیطی خاصی از نظر اقلیمی، سنگ شناسی، توپوگرافی و پوشش

گیاهی پدیده آمده‌اند. بیشتر مدل‌هایی که در ایران برای برآورد میزان فرسایش و رسوب استفاده می‌شوند، وارداتی بوده و برای شرایط خاص کشورهای مبدأ توسعه یافته‌اند. باید در نظر داشت مدل‌هایی که در کشورهای دیگر طراحی شده‌اند، بدون آزمون و اعتبارسنجی نمی‌توانند مورد استفاده قرار گیرد. توسعه مدل‌های بومی براساس شرایط مناطق مختلف ایران الزامی است. علاوه بر مدل‌های برآورد میزان فرسایش خاک، برخی از مدل‌ها به پیش‌بینی مناطق مستعد فرسایش خندقی می‌پردازند که موضوع اصلی کتاب حاضر است. به‌طورکلی مدل‌های فرسایش و رسوب شکل ساده‌ای از طبیعت را شبیه‌سازی کرده و میزان هدررفت خاک و رسوب را تخمین می‌زنند.

۲-۴- طبقه‌بندی مدل‌ها

مدل‌ها از دیدگاه‌های مختلف قابل طبقه‌بندی هستند و در منابع مختلف به گروه‌های مختلفی تقسیم شده‌اند.

۲-۴-۱- طبقه‌بندی براساس مبنای طراحی

از نظر کارکردی و مبنای طراحی مدل، مدل‌ها به گروه‌های فیزیکی، آماری، تجربی و مبتنی بر هوش مصنوعی تقسیم می‌شوند.

الف) مدل‌های با مبنای فیزیکی

در این مدل‌ها توصیف فرآیندهای پدیده موردنظر براساس معادلات ریاضی انجام شده و بر قوانین بقای انرژی و جرم استوار هستند.

ب) مدل‌های آماری

در این مدل‌ها از داده‌های اندازه‌گیری شده یا مشاهده‌ای برای تجزیه و تحلیل آماری استفاده می‌شود.

ج) مدل‌های تجربی

مدل‌های تجربی عمدتاً براساس مشاهده و اندازه‌گیری طولانی مدت پایه‌گذاری شده‌اند. این مدل‌ها، متکی به منطق قیاسی بوده و معمولاً برای شرایطی قابل اجرا هستند

که براساس آن شرایط، پارامترها واسنجی و مدل تعریف شده است. به‌عنوان مثال، هنگامی که یک مدل برای یک منطقه کوهستانی و با پوشش گیاهی جنگلی طراحی و توسعه می‌یابد، استفاده آن مدل در کشورهای دیگر تنها در شرایط مشابه قابلیت کاربرد دارد و گاهی نیاز به واسنجی و اصلاح نیز خواهد داشت. برای توسعه مدل نیاز به ایجاد یک سری داده‌های موضوعی مختلف و با دوره زمانی نسبتاً طولانی است. این مدل‌ها بیشتر برای پیش‌بینی متوسط فرسایش به کار می‌روند، اگرچه برخی از آن‌ها قابلیت برآورد رسوب را هم دارند. کار با مدل‌های تجربی آسان بوده و عموماً براساس جداول استاندارد وزن متغیرهای محیطی مشخص شده و میزان فرسایش و رسوب پیش‌بینی می‌شود. از انواع این مدل‌ها می‌توان به مدل‌های EPM، PSIAC، MPSIAC، USLE، RUSLE و MUSLE اشاره کرد.

۲-۴-۲- طبقه‌بندی براساس درجه وضوح در پردازش داده

مدل‌ها از نظر درجه وضوح در فرایند پردازش و پیش‌بینی به سه دسته جعبه سیاه^۱، جعبه خاکستری^۲ و جعبه سفید^۳ تقسیم می‌شوند.

الف) جعبه سیاه

در مدل‌های جعبه سیاه فرآیندهای داخلی سیستم شناسایی نمی‌شوند و فقط با استفاده از یک سری داده‌های ورودی، سعی بر تفسیر شرایط سیستم و تعیین خروجی دارند. در مطالعات فرسایش و رسوب، مدل‌های جعبه سیاه از آمار دبی رسوب برای اندازه‌گیری میزان رسوب حوزه استفاده کرده و با دخالت دادن ضریب نسبت تحویل رسوب^۴، میزان فرسایش خاک حوزه آبخیز بالادست را پیش‌بینی می‌کنند. با توجه به این که در این روش اطلاعات مربوط

¹ Black box

² Grey box

³ White box

⁴ Sediment delivery ratio (SDR)

به فرایند رخداد فرسایش خاک و عوامل مختلف مؤثر بر آن از سطح حوضه جمع آوری نمی شود، به آن روش جعبه سیاه می گویند.

ب) جعبه خاکستری

فرآیندهای داخل سیستم (مانند عوامل اصلی مؤثر بر فرسایش خاک) تا حدودی مدنظر قرار می گیرند. در مدل های جعبه خاکستری، یک سری اطلاعات از عوامل محیطی مؤثر بر فرسایش و رسوب از سطح حوضه جمع آوری شده و براساس روابط توسعه یافته، میزان فرسایش یا رسوب حوزه آبخیز تعیین می شود. بسیاری از این مدل ها براساس رابطه رگرسیونی بین مقدار تولید رسوب به عنوان متغیر وابسته، و خصوصیات مختلف حوزه آبخیز به عنوان متغیرهای مستقل، طراحی شده اند. مدل های USLE، PSIAC، EPM و غیره در این گروه قرار دارند.

ج) جعبه سفید

تمام فرآیندهای داخل سیستم درنظر گرفته می شوند. در این مدل ها سعی بر این است که بر خلاف روش اول، و بعضی از روش های دوم، که میزان فرسایش خاک از طریق ضریب نسبت تحویل رسوب محاسبه می شدند، میزان هدررفت خاک مستقیماً در عرصه اندازه گیری شود. طراحی و اجرای این مدل ها معمولاً نیازمند داده های کافی و طولانی مدت بوده و نیازمند هزینه و زمان بیشتری هستند. مدل هایی که از باران ساز یا رادیوایزوتوپ سزیم ۱۳۷ برای پیش بینی فرسایش و رسوب استفاده می کنند، در این گروه قرار دارند.

۲-۴-۳- طبقه بندی براساس عدم قطعیت

مدل ها از نظر عدم قطعیت به دو گروه مدل های قطعی^۱ و تصادفی^۲ دسته بندی می شوند. مدل های ریاضی می توانند برای شبیه سازی و تجزیه و تحلیل سیستم ها و

^۱ Deterministic

^۲ Stochastic

پدیده‌های پیچیده در طبیعت استفاده می‌شوند. مدل قطعی مدلی است که فرض می‌کند نتیجه یک سیستم یا فرآیند کاملاً با شرایط و پارامترهای اولیه آن تعیین می‌شود. به عبارت دیگر، یک مدل قطعی شامل هیچ‌گونه تصادفی یا عدم قطعیت نیست و همیشه همان نتیجه را برای ورودی یکسان ایجاد می‌کند. مدل‌های قطعی به سه گروه تجربی^۱، فرایندی^۲ و فیزیکی^۳ تقسیم می‌شوند. مدل تصادفی مدلی است که برخی از عناصر تصادفی یا عدم قطعیت را در سیستم یا فرآیند ترکیب می‌کند. به عبارت دیگر، یک مدل تصادفی فرض نمی‌کند که نتیجه یک سیستم یا فرآیند به طور کامل توسط شرایط و پارامترهای اولیه آن تعیین می‌شود، بلکه می‌تواند براساس توزیع احتمال یا تابع متفاوت باشد. مدل‌های تصادفی به دو گروه احتمالاتی^۴ و سری زمانی^۵ تقسیم می‌شوند. هر دو مدل قطعی و تصادفی بسته به زمینه و هدف مدل‌سازی، مزایا و معایب خاص خود را دارند. برخی از مزایای مدل‌های قطعی این است که ساخت، تجزیه و تحلیل و تفسیر آسان‌تر هستند، می‌توانند راه‌حل‌های دقیق و منسجمی ارائه دهند و ویژگی‌ها و رفتارهای اساسی سیستم یا فرآیند را به تصویر می‌کشند. برخی از معایب مدل‌های قطعی این است که می‌توانند غیرواقعی، بیش از حد ساده‌سازی شده و صلب باشند، که می‌توانند اثرات ناهمگونی داده‌ها، خطاها و اختلالات را نادیده بگیرند و نمی‌توانند عدم قطعیت و تغییرپذیری سیستم یا فرآیند را در نظر بگیرند. برخی از مزایای مدل‌های تصادفی این است که می‌توانند واقعیت، پیچیدگی و انعطاف‌پذیری سیستم یا فرآیند را منعکس کنند، این مدل‌ها می‌توانند اثرات ناهمگنی داده‌ها، خطاها و اختلالات را در خود جای دهند، و می‌توانند عدم قطعیت و تغییرپذیری سیستم را به تصویر بکشند. سیستم یا فرآیند برخی از معایب مدل‌های تصادفی این است که ساخت، تجزیه و تحلیل و تفسیر آن‌ها سخت‌تر است، می‌توانند راه‌حل‌های تقریبی و متناقض ارائه کنند و به

¹ Empirical

² Process

³ Physical

⁴ Probabilistic

⁵ Time-series

داده‌ها، محاسبات و واسنجی بیشتری نیاز دارند. هیچ پاسخ قطعی برای این که کدام مدل برای یک مسئله معین بهتر یا مناسب‌تر است وجود ندارد، زیرا به عوامل زیادی مانند ماهیت و دامنه مسئله، در دسترس بودن و کیفیت داده‌ها، اهداف و معیارهای مدل‌سازی بستگی دارد. به عنوان مثال، در مطالعه Sidorchuk (۲۰۰۵) رویکرد مدل‌سازی تصادفی در مدل‌سازی فرسایش خندقی، مناسب تر بود زیرا عدم قطعیت زیادی در دانش ما از نظر توزیع مکانی و زمانی عوامل اصلی فرسایش وجود دارد. فرسایش خاک‌های منسجم نتیجه برهم‌نهی پیچیده نیروهای محرکه وارد بر سطح خاک و نیروهای مقاوم در برابر فرسایش است. شار رسوب متغیری است که هم در فضا و هم در زمان تغییر می‌کند. محاسبه مسیر هر ذره خاک ممکن نیست، زیرا پیش‌بینی قطعی دقیق سرعت‌های واقعی (برای هر زمان و نقطه) در جریان آشفته و نیروهای واقعی الکتروشیمیایی و ژئومکانیکی در خاک به‌طور کلی غیرممکن است. فقط مشخصات آماری جریان و ساختار خاک (مانند توابع چگالی احتمال با گشتاورهای آن‌ها) را می‌توان برای مقداری حجم محدود سیال و خاک در طول دوره زمانی محدودی در یک پنجره (یک واحد سطح بستر جریان) تخمین زد. برای هر یک از پنجره‌ها، توصیف سستی فرسایش خاک براساس مقادیر میانگین (یا معمولی) نیروهای درگیر باید با استفاده از توصیف زمانی/مکانی آماری این نیروها، محاسبه تنوع، چولگی و سایر ویژگی‌ها بهبود یابد. گشتاورهای آماری توزیع احتمال (شامل مقادیر میانگین) را می‌توان به عنوان پیوستار مکانی/زمانی متغیرهای جریان و خاک در نظر گرفت.

۲-۴-۴- طبقه‌بندی براساس توزیع مکانی متغیرها

در یک طبقه‌بندی دیگر، مدل‌ها از نظر توزیع مکانی داده‌های ورودی مدل به سه دسته مدل‌های یکپارچه^۱، توزیعی^۲ و نیمه‌توزیعی^۳ تقسیم می‌شوند (شکل ۲-۱). در مدل‌های

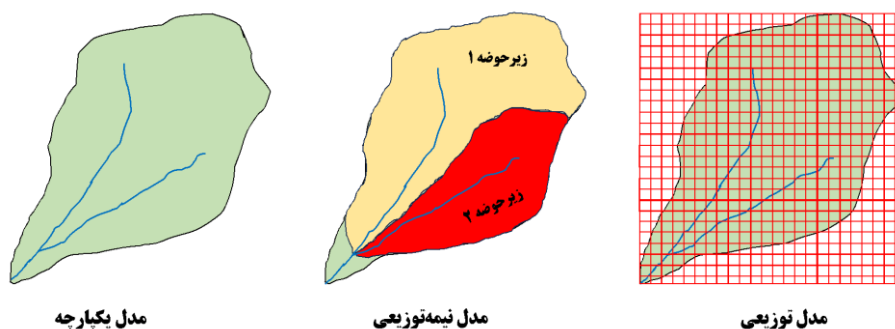
^۱ Lumped

^۲ Distributed

^۳ Semi-distributed

--- اصول مدل سازی مکانی فرسایش خندقی با استفاده از مدل های هوش مصنوعی / ۳۳

یکپارچه، داده های ورودی مدل از نظر فضایی متوسط گیری می شود. به بیانی دیگر، در مدل های یکپارچه برای هر متغیر تنها یک مقدار به عنوان میانگین حوزه آبخیز به مدل معرفی می شود. یعنی در این مدل ها، توزیع مکانی در متغیرهای ورودی و مشخصات پارامترهای عمل کننده در فرآیندهای فیزیکی در داده های ورودی، در نظر گرفته نمی شود. به عنوان مثال، در یک مدل فرسایش خاک، هر یک از پارامترهای مورد استفاده در مدل، به طور یکسان برای تمام سطح حوزه آبخیز در نظر گرفته می شود. مدل یکپارچه از نظر پیچیدگی ساده هستند؛ زیرا حوزه آبخیز را به صورت یک واحد در نظر گرفته و از تغییرات مکانی متغیرهای مؤثر بر پدیده مورد مطالعه (فرسایش خاک، رواناب، انتقال رسوب و غیره) صرف نظر می شود.



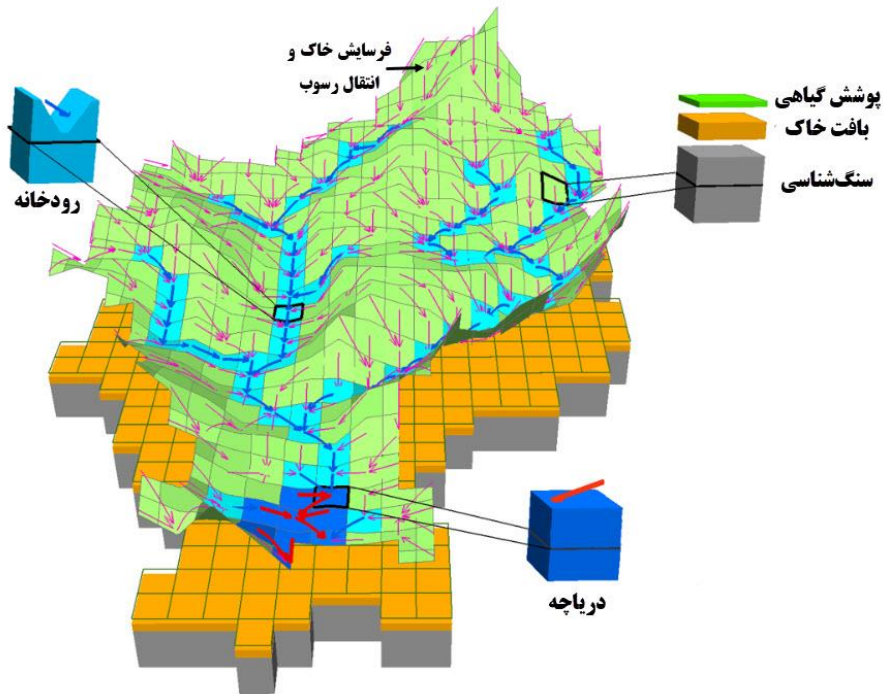
شکل ۲-۰- ساختار مدل های توزیعی، نیمه توزیعی و یکپارچه

این درحالی است که مدل های توزیعی قابلیت در نظر گرفتن تغییرات مکانی متغیرهای ورودی را دارند. به عبارت دیگر، لایه های رقومی مربوط به متغیرهای ورودی مدل به صورت شبکه بندی^۱ تهیه شده و برای هر سلول^۲ اطلاعات متمایز در اختیار مدل قرار می گیرد (شکل ۲-۲). از سویی دیگر، در مدل های نیمه توزیعی حوزه آبخیز به واحدهای مختلف (مانند زیرحوضه ها) تقسیم شده و برای هر متغیر به تعداد

^۱ Raster

^۲ Pixel

زیرحوضه ها اطلاعات در اختیار مدل قرار می گیرد. بنابراین، مدل های توزیعی نسبت به مدل های یکپارچه و نیمه توزیعی از پیچیدگی بیشتری برخوردار است.



شکل ۲-۵- ساختار مدل توزیعی در مقیاس حوزه آبخیز

۲-۴-۵- طبقه بندی براساس تغییرات زمانی

از نظر قابلیت در نظر گرفتن تغییرات در بازه زمانی، مدل ها به دو گروه تک رخداد^۱ و پیوسته^۲ تقسیم می شوند. مدل های تک رخداد تنها یک واقعه منفرد را در نظر می گیرند. به طور مثال، مدل هایی که قابلیت پیش بینی میزان فرسایش خاک را برای یک رگبار منفرد دارند، به عنوان مدل تک رخداد شناخته می شوند. این درحالی است که مدل های پیوسته می توانند دوره های زمانی طولانی (مثلاً یک یا چند سال) را در نظر بگیرند و هریک از

^۱ Event-based

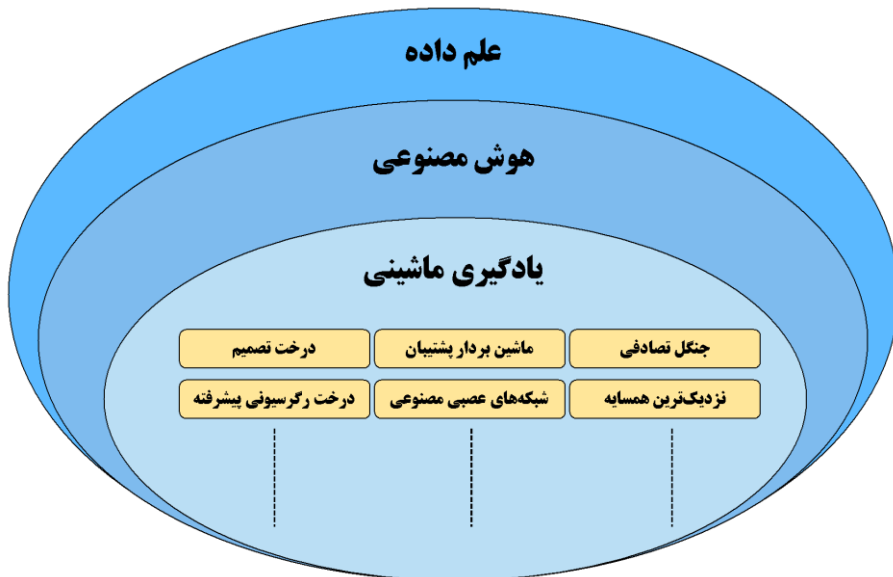
^۲ Continuous

--- اصول مدل‌سازی مکانی فرسایش خندقی با استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی / ۳۵

متغیرها یک سری زمانی برای ورود به مدل ارائه می‌دهند. مدل‌های پیوسته براساس تغییرات زمانی متغیرهای مختلف، پدیده موردنظر را در بازه زمانی موردنظر پیش‌بینی می‌کنند.

۲-۵- مدل‌های هوش مصنوعی

مدل‌های هوش مصنوعی با الهام گرفتن از سیستم عصبی انسان به وجود آمده‌اند. این مدل‌ها قابلیت بالایی در پردازش اطلاعات حجیم دارند. فرآیندهایی که در طبیعت به وقوع می‌پیوندند غالباً تحت تأثیر متغیرهای محیطی متعددی بوده و به سادگی قابل تجزیه و تحلیل و پیش‌بینی نیستند. مدل‌های هوش مصنوعی بخشی از علم داده را به خود اختصاص داده‌اند. مدل‌های هوش مصنوعی نیز بخش‌های متنوعی را دربر گرفته است که مهم‌ترین موضوع آن، مدل‌های یادگیری ماشینی است (شکل ۲-۳).



شکل ۲-۳- ارتباط علم داده، مدل‌های هوش مصنوعی و یادگیری ماشینی

مدل های یادگیری ماشینی ابزارهای توانمندی هستند که با بهره گیری از مفاهیم هوش مصنوعی قادر به پردازش اطلاعات و پیش بینی پدیده ها هستند. همان گونه که در مطالب پیشین اشاره شد، فرسایش خندقی یکی از پدیده های پیچیده ژئومورفولوژیکی است و مدل های هوش مصنوعی می توانند نقش مفیدی در پردازش داده های حجمی آن داشته باشند که این مورد، یکی از مهم ترین مزایای استفاده از مدل های هوش مصنوعی در مباحث مدل سازی به شمار می رود. از این رو مدل های هوش مصنوعی بستر مناسبی برای شناخت روابط میان متغیرهای محیطی فراهم کرده و پیش بینی مناطق مستعد وقوع فرسایش خندقی امکان پذیر شده است. شایان ذکر است که پهنه بندی فرسایش خندقی در برخی مطالعات در گذشته با استفاده از روش های تصمیم گیری چندمعیاره انجام شده است. از آنجایی که در روش های تصمیم گیری چندمعیاره از پرسشنامه استفاده می شود، نتایج روش های تصمیم گیری چند معیاره غالباً دارای عدم قطعیت بوده که موجب محدود شدن استفاده از آن ها شده است. به عنوان دومین مزیت مدل های هوش مصنوعی، پردازش داده و پیش بینی بدون دخالت نظرات کارشناسی بوده و نتایج پهنه بندی به واقعیت نزدیک تر است. سومین مزیت بکارگیری مدل های هوش مصنوعی مربوط به عدم نیاز به رعایت فرضیات آماری است. داده های عوامل محیطی عموماً نرمال نبوده و امکان استفاده از مدل های آماری از جمله مدل رگرسیون لجستیک برای پهنه بندی فرسایش خندقی محدود می شود.

۲-۶- کاربردها و قابلیت های مدل های هوش مصنوعی

کاربردهای مدل های هوش مصنوعی به زمینه های استدلال^۱، کشف معنا^۲، تعمیم^۳ و یادگیری از تجربیات گذشته^۴ معطوف شده و امروزه در علوم مختلف بسیار مورد توجه قرار گرفته اند.

^۱ Ability to reason

^۲ Discover meaning

^۳ Generalize

^۴ Learn from past experience

--- اصول مدل‌سازی مکانی فرسایش خندقی با استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی ۳۷/

در زمینه تحلیل وقایع، کاربردهای مدل‌های هوش مصنوعی به تجزیه و تحلیل توصیفی^۱، تجزیه و تحلیل تشخیصی^۲، تجزیه و تحلیل پیش‌بینی‌کننده^۳ و تجزیه و تحلیل تجویزی^۴ معطوف شده است (Sarker, ۲۰۲۲). تجزیه و تحلیل توصیفی به دنبال این است که چه اتفاقاتی در گذشته رخ داده است. تجزیه و تحلیل تشخیصی نیز به دنبال دلایل و علل رخدادها می‌باشد. تجزیه و تحلیل پیش‌بینی‌کننده نیز در پی کشف رخدادها می‌باشد. تجزیه و تحلیل تجویزی به تدوین برنامه‌های ضروری در آینده می‌پردازد.

از مهم‌ترین کارکردهای مدل‌های هوش مصنوعی می‌توان به تعیین استعداد وقوع فرسایش خندقی و همچنین ارزیابی اثرگذاری عوامل محیطی در وقوع فرسایش خندقی اشاره کرد. مدل‌های هوش مصنوعی براساس رخداد فرسایش‌های خندقی در گذشته، ابتدا آموزش دیده و روابط میان عوامل محیطی را استخراج می‌کنند. بنابراین، شالوده یک مدل هوش مصنوعی براساس تاریخچه و آمار و ارقام رخدادها می‌باشد. فرسایش خندقی پایه‌گذاری می‌شود. شایان ذکر است که در رویکرد مدل‌های هوش مصنوعی، ضروری است که داده‌های رخداد فرسایش خندقی به صورت تصادفی به دو گروه آموزش و اعتبارسنجی تقسیم شود. داده‌های گروه اعتبارسنجی به منظور اطمینان از توان پیش‌بینی مدل نگهداری شده و در پایان مدل‌سازی صحت نتایج به وسیله داده‌های گروه اعتبارسنجی بررسی می‌شود. ساختار مدل‌های هوش مصنوعی خیلی متنوع بوده و معماری و استراتژی آن‌ها تأثیر بسیار زیادی بر دقت پیش‌بینی مدل دارند.

۲-۷- نرم‌افزارهای مورد نیاز برای مدل‌سازی مکانی استعداد فرسایش خندقی

نرم‌افزارهای مختلفی برای مدل‌سازی مکانی استعداد فرسایش خندقی مورد نیاز است. به منظور آماده‌سازی بسیاری از داده‌های ورودی مدل‌ها، عموماً نرم‌افزارهای

¹ Descriptive Analytics

² Diagnostic Analytics

³ Predictive Analytics

⁴ Prescriptive Analytics

مربوط به سامانه اطلاعات جغرافیایی مانند ArcGIS و QGIS استفاده می شود. نرم افزار ArcGIS یک ابزار بسیار قوی برای پردازش اطلاعات مکانی است که نیازمند خریداری از شرکت سازنده است. این درحالی است که نرم افزار QGIS یک نرم افزار مفید دیگر در این زمینه است و از مهم ترین مزیت های آن می توان به دسترسی آزاد و رایگان بودن آن است. نرم افزار SAGA-GIS نیز یکی از ابزارهای مفید بوده که علاوه بر پردازش اطلاعات مکانی، امکان تهیه بسیاری از شاخص های زمین ریخت سنجی^۱ (مانند شاخص رطوبت توپوگرافی^۲، شاخص موقعیت شیب نسبی^۳ و غیره) در آن فراهم شده است. به منظور اجرای مدل های مختلف، نرم افزارهای متعددی توسعه یافته اند. زبان برنامه نویسی R یکی از رایج ترین بسترهای اجرای مدل بوده و نرم افزار R به دلیل دسترسی آزاد و رایگان بودن آن، یکی از محبوب ترین و کاربردی ترین نرم افزارها در جهان به شمار می رود. بسته های آماده بسیاری به زبان برنامه نویسی R توسط شرکت سازنده و محققان تهیه شده که امکان انجام هرگونه پردازش مکانی و آماری در محیط نرم افزار R فراهم شده است. قابلیت بصری این نرم افزار جهت نمایش نقشه ها (با فرمت های مختلف مکانی)، نمودارها و پلات ها برتری آن را نسبت به دیگر نرم افزارهای برنامه نویسی مانند متلب دوچندان کرده است. نرم افزارهای دیگری برای اجرای مدل نیز به صورت محدود ساخته شده اند که امکان اجرای یک یا چند مدل محدود را دارند. به عنوان مثال، نرم افزار MaxEnt یکی از مواردی است که امکان فراخوانی داده های مکانی و اجرای مدل بیشینه بی نظمی را دارد. این نرم افزار نیز به صورت دسترسی آزاد و رایگان در اختیار محققان علوم محیطی قرار گرفته است.

¹ Geomorphometry

² Topographic wetness index

³ Relative slope position

فصل سوم

متغیرهای مستقل و وابسته در مدل سازی رخداد

فرسایش خندقی

۳-۱- انواع متغیرها

در هر رویکرد مدل‌سازی، دو نوع متغیر وابسته و مستقل تعریف می‌شود. در مبحث مدل‌سازی رخدادهای فرسایش خندقی، احتمال یا استعداد رخداد فرسایش خندقی به‌عنوان متغیر وابسته (متغیر هدف) مطرح می‌شود و عوامل محیطی مؤثر بر شکل‌گیری و رخداد فرسایش خندقی به‌عنوان متغیرهای مستقل (متغیرهای پیش‌بینی‌کننده) مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۳-۲- متغیر وابسته در مدل‌سازی رخدادهای فرسایش خندقی

موقعیت پیشانی رخدادهای فرسایش‌های خندقی اطلاعات مفیدی را درخصوص تحلیل شرایط وقوع و تأثیر عوامل محیطی بر شکل‌گیری فرسایش خندقی در اختیار مدل قرار می‌دهد. براساس رویکرد مدل‌سازی استعداد فرسایش خندقی مبتنی بر هوش مصنوعی ارائه شده توسط رحمتی و همکاران (۱۳۹۷)، اطلاعات موقعیت مکانی رخدادهای فرسایش خندقی برای تحلیل‌های مکانی ضروری است. مطالعه Dewitte و همکاران (۲۰۱۵)، پایگاه داده موقعیت رخدادهای فرسایش خندقی نه تنها برای مدل‌سازی استعداد و پتانسیل‌یابی فرسایش خندقی بلکه برای تحلیل‌های ژئومورفولوژیکی و آماری آستانه‌های مساحت- شیب فرسایش‌های خندقی ضروری است. در برخی از مطالعات مبتنی بر روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، با استفاده از پرسشنامه و جمع‌آوری نظرات کارشناسان درخصوص اهمیت عوامل محیطی، بدون ثبت و در نظر گرفتن موقعیت مکانی رخدادهای فرسایش خندقی، اقدام به پیش‌بینی استعداد فرسایش خندقی کرده‌اند. به‌عنوان مثال، در مطالعه Arabameri و همکاران (۲۰۱۸) و Mokarram و Zarei (۲۰۲۱)، نقشه استعداد فرسایش خندقی با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی^۱ (AHP) و بدون در نظر گرفتن موقعیت مکانی خندق‌ها تهیه شده است. در شرایطی که داده‌های موقعیت رخدادهای فرسایش خندقی وجود ندارد، استفاده از روش‌های

^۱ Analytic hierarchy process

----- اصول مدل سازی مکانی فرسایش خندقی با استفاده از مدل های هوش مصنوعی/ ۴۱

تصمیم گیری چندمعیاره در صورت در نظر گرفتن نظرات کارشناسان خبره و آشنا به موضوع فرسایش خندقی، می تواند مفید باشد. به هر حال، عموماً روش های تصمیم گیری چندمعیاره دارای عدم قطعیت بوده و استفاده از داده های موقعیت فرسایش خندقی در تحلیل ها و پیش بینی ها تأکید می شود. موقعیت پیشانی^۱ خندق ها در بازدید های میدانی با استفاده از دستگاه سامانه موقعیت سنجی جهانی^۲ ثبت می شود. موقعیت پیشانی خندق ها نیز می توان با استفاده از تصاویر گوگل ارث ثبت کرد. در مطالعه رحمتی و همکاران (۱۴۰۲) علاوه بر تولید نقشه استعداد رخداد فرسایش خندقی حوزه آبخیز تلوار استان کردستان، بلکه قابلیت تصمیم مدل به حوزه آبخیز بابا عرب استان فارس نیز بررسی شد. همان گونه که در شکل ۳-۱ قابل مشاهده است، موقعیت پیشانی خندق ها توسط دستگاه GPS ثبت می شود.



شکل ۳-۱- ثبت پیشانی خندق در

بازدید های میدانی (رحمتی، ۱۴۰۲)

در شرایطی که امکانات لازم برای بازدید میدانی و ثبت تمامی فرسایش های خندقی برای پژوهشگران میسر نباشد، به شرطی که اندازه عارضه های فرسایش خندقی بزرگ باشد، استفاده از سامانه گوگل ارث و تصاویر ماهواره ای می تواند در شناسایی و ثبت موقعیت مکانی فرسایش های خندقی مفید باشد. کاربرد سامانه گوگل ارث در ثبت موقعیت مکانی فرسایش های خندقی در شکل ۳-۲ نشان داده شده است.

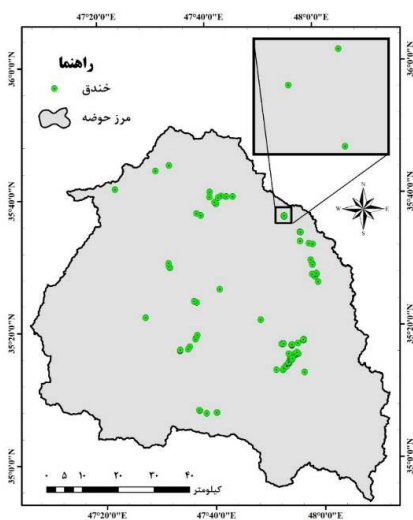
¹ Headcut

² Global positioning system



شکل ۳-۰- شناسایی و ثبت خندق‌ها در سامانه
گوگل ارث در زیرحوضه کلوجه استان کردستان

پس از انجام تبدیل فرمت اطلاعات مکانی خندق‌ها، لایه موقعیت مکانی خندق‌ها در نرم‌افزارهای سامانه اطلاعات جغرافیایی مانند ArcGIS، QGIS و Global Mapper قابل استفاده است. شکل ۳-۳ نقشه موقعیت مکانی فرسایش‌های خندقی حوزه آبخیز تلوار استان کردستان را نشان می‌دهد. این نقشه اطلاعات مفیدی در خصوص تعداد و نحوه توزیع مکانی فرسایش‌های خندقی در این حوزه آبخیز را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۰- نقشه موقعیت مکانی پیشانی
خندق‌ها در حوزه آبخیز تلوار استان کردستان

۳-۳- متغیرهای مستقل در مدل سازی رخداد فرسایش خندقی

فرسایش خندقی یک پدیده ژئومورفولوژیکی پیچیده بوده و عوامل محیطی مختلفی در شکل گیری آن مؤثر هستند (شادفر، ۱۳۹۵). از این عوامل می توان به عوامل ارتفاع، شیب، جهت شیب، انحناى سطح، شاخص رطوبت توپوگرافی، شاخص توان جریان، فاصله از آبراهه، فاصله از جاده، خاک شناسی، سنگ شناسی و کاربری اراضی اشاره کرد. در مطالعات مختلف، بسته به شرایط محیطی و موجودیت داده و اطلاعات، عوامل محیطی مختلفی برای پتانسیل یابی فرسایش خندقی مورداستفاده قرار گرفته اند. به عنوان مثال، در مطالعه عرب قشقایی و همکاران (۱۳۹۰) شیب، جهت شیب، سنگ شناسی، کاربری اراضی، فاصله از شبکه راه های ارتباطی، مدیریت اراضی و تاج پوشش به عنوان عوامل مؤثر در وقوع فرسایش خندقی انتخاب شدند.

در مطالعه ای دیگر، امیری و همکاران (۱۳۹۸) از عوامل درصد شیب، جهت شیب، انحناى سطح، طبقات ارتفاعی، شاخص رطوبت توپوگرافی، متوسط بارندگی سالانه، شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال شده، کاربری اراضی، واحدهای سنگ شناسی، فاصله از آبراهه، فاصله از جاده، تراکم زهکشی و مشخصات خاک به عنوان عوامل مؤثر بر وقوع خندق ها در مدل سازی و پیش بینی استعداد فرسایش خندقی استفاده شدند. سلیمان پور و همکاران (۱۴۰۳) نیز در پژوهشی در چهار حوزه آبخیز کشور، عوامل محیطی مختلفی را به عنوان متغیرهای مستقل (پیش بینی کننده) برای مدل سازی انتخاب کردند. این عوامل محیطی عبارت بود از: ارتفاع، درجه شیب، جهت شیب، سنگ-شناسی، فاصله از آبراهه، شاخص رطوبت توپوگرافی، کاربری اراضی، انحناى سطح، انحناى مقطع، بارندگی سالانه، فراوانی بارش های با مقدار بیشتر از ۵ میلی متر، شاخص موقعیت شیب نسبی، فاصله از جاده، تراکم زهکشی، شاخص تراکم پوشش گیاهی و بافت خاک. نحوه تأثیر هر یک از این عوامل بر رخداد فرسایش خندقی و همچنین مراحل محاسبه و ساخت لایه رقومى آنها در ادامه تشریح شده است.

۳-۳-۱- ارتفاع

ارتفاع، یکی از عوامل مهم در شکل‌گیری فرسایش‌های خندقی محسوب می‌شود و در مطالعات پیش‌بینی استعداد فرسایش خندقی به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است (Zabihi و همکاران، ۲۰۱۸). فرسایش‌های خندقی عموماً در ارتفاعات پایین مشاهده می‌شوند که دلیل این امر احتمالاً به تجمع جریان در ارتفاعات پایین یک حوزه آبخیز مربوط می‌شود. لایه رستری ارتفاع با استفاده از لایه مدل رقومی ارتفاعی (DEM) تهیه می‌شود. اطلاعات مدل رقومی‌های مختلفی به‌صورت جهانی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای تهیه شده است که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به مدل رقومی SRTM^۱ با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر و مدل رقومی ASTER^۲ با قدرت تفکیک مکانی ۹۰ متر اشاره کرد. براساس فناوری‌های نوین در پردازش تصاویر ماهواره‌ای، امکان تهیه مدل رقومی ارتفاعی ۱۲/۵ متر از سنتینل ۱ وجود دارد (Soni و همکاران، ۲۰۲۱). در مواردی که اندازه خندق‌ها کوچک هستند، استخراج مدل رقومی ارتفاعی از فناوری پهپاد با قدرت تفکیک مکانی بالا پیشنهاد می‌شود.

سیستم مختصات مدل‌های رقومی جهانی غالباً WGS1984 بوده و برحسب درجه و دقیقه ارائه می‌شوند. بنابراین، سیستم مختصات آن‌ها نیاز است که با استفاده از ابزار Project raster در نرم‌افزارهای سامانه اطلاعات جغرافیایی به نوع متریک^۳ تغییر یابد. این ابزار در جعبه‌ابزار Data management وجود دارد و همچنین از طریق قسمت جستجوی نرم‌افزارهای سامانه اطلاعات جغرافیایی مانند ArcGIS قابل دستیابی است.

۳-۳-۲- شیب

براساس مطالعات مختلف، شیب یکی از اصلی‌ترین عوامل محیطی در فرآیند شکل‌گیری فرسایش خندقی است (Conoscenti و همکاران، ۲۰۱۴؛ رحمتی و

^۱ Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)

^۲ ASTER Global Elevation Data

^۳ Universal Transverse Mercator (UTM)

همکاران، ۱۳۹۶؛ Rahmati و همکاران، ۲۰۱۷). بسیاری از مطالعات خندق در گذشته به بررسی آستانه‌های شیب-مساحت بالادست خندق پرداخته‌اند که این مسئله بیان‌گر اهمیت این دو متغیر در شکل‌گیری فرسایش خندقی است (Nazari Samani و همکاران، ۲۰۰۹؛ Torri و Poesen، ۲۰۱۴؛ Katz و همکاران، ۲۰۱۴). در این راستا، مطالعه Xu و همکاران (۲۰۲۱) نشان داد که عامل شیب تأثیر زیادی در خصوصیات هیدرولیک جریان داشته و به تبع آن، میزان کنش خاک تغییر می‌یابد و فرسایش خندقی اتفاق می‌افتد. براساس مطالعه شادفر (۱۳۹۵)، بیشترین نسبت فراوانی فرسایش‌های خندقی در حوزه آبخیز طرود در کلاس شیب کمتر از ۵ درصد اتفاق افتاده است. نقشه شیب با استفاده از لایه ارتفاع ساخته می‌شود. به‌منظور تهیه نقشه شیب از ابزار Slope استفاده شده که در جعبه ابزار Spatial analysis tools در قسمت Surface قابل‌دستیابی است. لایه شیب برحسب درصد و درجه نیز قابل محاسبه است که این مورد در ابزار Slope توسط کاربر انتخاب می‌شود.

۳-۳-۳- جهت شیب

جهت شیب، نقش زیادی در میزان دریافت تابش خورشید داشته و به تبع آن میزان رطوبت خاک، تحول خاک و استقرار پوشش گیاهی تحت‌تأثیر قرار می‌گیرد. به-عنوان مثال، دامنه‌هایی که جهت شیب آن‌ها رو به شمال (جهت شمالی) است، عموماً از خاک عمیق‌تر و تحول یافته‌تر برخوردار بوده و به‌دلیل رطوبت بیشتر خاک، پوشش-گیاهی بیشتری استقرار می‌یابند. دامنه‌های جنوبی عموماً شرایط متفاوتی نسبت به دامنه‌های شمالی داشته و به‌دلیل ضخامت کمتر خاک، دریافت تابش بیشتر، رطوبت کمتر خاک، پوشش گیاهی کمتری استقرار می‌یابد. دامنه‌های غربی نیز نسبت به دامنه‌های شرقی از شرایط مناسب‌تری برای استقرار پوشش گیاهی برخوردار هستند. بنابراین، براساس مطالعه Fang و Guo (۲۰۱۵) جهت شیب، نقش به‌سزایی در نرخ

فرسایش خاک و تحولات زمین‌ریخت‌شناسی^۱ سطح زمین دارد. بنابراین، عامل جهت شیب نیز در پیش‌بینی استعداد رخداد فرسایش خندقی نقش مهمی داشته و در پژوهش‌های گذشته مورد استفاده قرار گرفته است (Conforti و همکاران، ۲۰۱۱؛ Conoscenti و همکاران، ۲۰۱۳؛ Razavi-Termeh و همکاران، ۲۰۲۰). لایه جهت شیب با استفاده از ابزار Aspect در نرم‌افزارهای سیستم اطلاعات جغرافیایی تولید می‌شود. توجه به این نکته ضروری است که لایه مدل رقومی ارتفاعی، پیش‌نیاز ساخت لایه جهت شیب است. ابزار Aspect در جعبه ابزار Spatial analysis tools و در قسمت Surface تعبیه شده است. نقشه جهت شیب دارای نه کلاس (تخت، شمالی، شمال‌شرقی، شرقی، جنوب‌شرقی، جنوبی، جنوب‌غربی، غربی و شمال‌غربی) است.

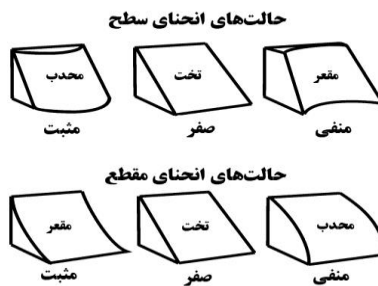
۳-۳-۴- انحناى زمین

انحنای زمین در علم زمین‌ریخت‌شناسی کمی، یکی از مؤلفه‌های مهم توصیف شکل زمین بوده که براساس متغیرهای مختلفی محاسبه و طبقه‌بندی می‌شود (Evans، ۲۰۱۲؛ Minár و همکاران، ۲۰۲۰). برای هر دامنه دو نوع انحنای زمین اصلی قابل محاسبه است که عبارتند از انحنای مقطع^۲ و انحنای سطح^۳. هر یک از این متغیرها اطلاعات متمایزی از وضعیت همگرایی عمودی و افقی دامنه‌ها ارائه می‌دهند و تأثیر زیادی بر شرایط هیدرولیک جریان سطحی و زیرسطحی و در نهایت نرخ فرسایش خاک دارند (Hurst و همکاران، ۲۰۱۲). لایه‌های انحنای سطح با استفاده از لایه مدل رقومی ارتفاعی تهیه می‌شوند. انواع حالات انحناهای سطح در شکل ۳-۴ نشان داده شده است. هر یک از متغیرهای انحنای سطح دارای سه حالت مختلف مقعر، محدب و تخت هستند.

^۱ Geomorphologic

^۲ Profile curvature

^۳ Plan curvature



شکل ۳-۰- حالت‌های مختلف انحناهای

سطح و مقطع (فیض‌نیا و همکاران، ۱۳۹۷)

عوامل انحنای مقطع و انحنای سطح در مطالعات پیش‌بینی استعداد فرسایش خندقی مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Garosi و همکاران، ۲۰۱۸؛ Roy و همکاران، ۲۰۲۰). در این راستا، نتایج مدل‌سازی هوش مصنوعی و پردازش اطلاعات خندق‌ها و شرایط محیطی در مطالعه Huang و همکاران (۲۰۲۳) نشان دادند که انحنای مقطع به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین عوامل محیطی در پیش‌بینی استعداد فرسایش خندقی نقش مهمی را ایفا می‌کند. لایه‌های انحنای سطح و انحنای مقطع در نرم‌افزارهای مختلف سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی قابل تولید هستند. به‌عنوان مثال در نرم‌افزار ArcGIS در جعبه ابزار Spatial analyst tools در قسمت Surface می‌توان تابع Curvature را یافت که هر دو نوع لایه انحنای سطح را می‌سازد. این تابع لایه‌های انحنای زمین را به‌صورت رستری برای منطقه موردنظر تهیه می‌کند. در برخی از مطالعات نیز ممکن است لایه‌های انحنای سطح به‌صورت طبقه‌بندی (مقعر، محدب و تخت) یا کمی (مقدار عددی) مورد استفاده قرار گیرند.

۳-۳-۵- شاخص رطوبت توپوگرافی

شاخص رطوبت توپوگرافی^۱ یکی از فاکتورهای مهم در ارزیابی وضعیت رطوبت زمین و جمع‌آوری رواناب است که در مطالعات مختلف زمین‌ریخت‌شناسی،

^۱ Topographic wetness index

آب‌شناسی، فرسایش و رسوب مورد استفاده قرار گرفته است (رحمتی و همکاران، ۱۴۰۳). از آنجایی که شاخص رطوبت توپوگرافی، مساحت بالادست هر نقطه را در نظر می‌گیرد، پتانسیل تولید رواناب و جریان را به صورت غیرمستقیم نشان می‌دهد. مساحت بالادست پیکسل در این شاخص نقش مهمی در فرآیند شکل‌گیری فرسایش خندقی دارد زیرا نتایج مطالعه سلیمان‌پور و همکاران (۱۳۸۹) در منطقه نی‌ریز استان فارس مشخص کردند که گستره بالادست پیشانی خندق، نقش مهمی در شکل‌گیری و توسعه فرسایش خندقی داشته است. براساس مطالعه Jancewicz و همکاران (۲۰۱۹)، شاخص رطوبت توپوگرافی می‌تواند به تنهایی بسیاری از فرآیندهای سطحی و زیرسطحی را در مقیاس چشم‌انداز^۱ تفسیر کند. همان‌طور که قبلاً نیز گفته شد، مساحت بالادست سلول، یکی از معیارهای اصلی در مطالعه رخداد و رشد فرسایش خندقی به خصوص در روش آستانه شیب-مساحت است. مطالعه سلیمان‌پور و همکاران (۱۳۹۸) نیز براساس تحلیل داده‌های سیزده ساله رشد خندق‌های حوزه آبخیز قاضیان استان فارس نشان داد که مساحت بالادست پیکسل یکی از مؤلفه‌های مهم در شکل‌گیری و پیشروی فرسایش خندقی است. شاخص رطوبت توپوگرافی قابلیت استفاده در مطالعات پیش‌بینی استعداد فرسایش خندقی در مدل‌های داده‌کاوی، آماری و هوش مصنوعی را دارد (Dewitte و همکاران، ۲۰۱۵؛ شیرانی، ۱۳۹۹؛ Gayen و همکاران، ۲۰۱۹؛ Igwe و همکاران، ۲۰۲۰). پژوهش صالح و همکاران (۱۴۰۲) در حوضه آبگندی نیز نشان داد که این شاخص کاربرد وسیعی در مدل‌سازی استعداد رخداد فرسایش خندقی دارد. شاخص رطوبت توپوگرافی در نرم‌افزار SAGA-GIS محاسبه شده و نقشه آن تهیه می‌شود. از آنجایی که تعیین رطوبت خاک در مناطق وسیع دشوار است، ارزیابی وضعیت کلی رطوبت زمین در حوزه‌های آبخیز بزرگ با این شاخص انجام می‌شود. از سویی دیگر، این شاخص نشان می‌دهد که جریان‌های سطحی در چه قسمت‌هایی از یک حوزه آبخیز فرصت

¹ Landscape

----- اصول مدل سازی مکانی فرسایش خندقی با استفاده از مدل های هوش مصنوعی/ ۴۹

بیشتری برای نفوذ دارند. این شاخص براساس معادله (۱) با استفاده از دو مؤلفه مساحت بالادست پیکسل و شیب زمین به دست می آید:

$$TWI = Ln\left(\frac{A_s}{\tan\beta}\right) \quad (1)$$

که در آن، عامل A_s : مساحت بالادست پیکسل و $\tan\beta$: نشان دهنده شیب زمین است. نقشه شاخص رطوبت توپوگرافی در نرم افزار SAGA-GIS، پس از ورود لایه مدل رقومی ارتفاعی به نرم افزار، با استفاده از جعبه ابزار Terrain Analysis- Hydrology و با استفاده از تابع SAGA Wetness Index ساخته می شود.

۳-۳-۶- شاخص توان جریان

شاخص توان جریان نیز نشان دهنده میزان انرژی جریان بوده و در مطالعات مختلف فرسایش و سیل مورد استفاده قرار گرفته است (Liuzzo و همکاران، ۲۰۱۹؛ Malik و همکاران، ۲۰۲۰). انرژی جریان نقش مهمی در شروع فرآیند فرسایش خندقی دارد (Shi و همکاران، ۲۰۲۰). از اینرو شاخص توان جریان در مطالعات پیش بینی استعداد فرسایش خندقی کاربرد فراوانی داشته است (Dube و همکاران، ۲۰۱۴؛ Zakerinejad و Maerker، ۲۰۱۵؛ Conoscenti و Rotigliano، ۲۰۲۰). براساس مطالعه Shit و همکاران (۲۰۲۰) مدل وزن شواهد نشان داد که ارتباط معنی داری بین شاخص توان جریان و رخداد فرسایش خندقی وجود دارد. تأثیر مستقیم این فاکتور در کنش سطح زمین و شکل گیری فرسایش خندقی نیز در نتایج پژوهش Meliho و همکاران (۲۰۱۸) گزارش شده است. این شاخص نیز با استفاده از مساحت بالادست پیکسل و میزان شیب و براساس معادله (۲) محاسبه می شود. نقشه شاخص توان جریان در قسمت Standard Terrain Analysis نرم افزار SAGA-GIS تهیه می شود.

$$SPI = Ln(A_s \times \tan\beta) \quad (2)$$

۳-۳-۷- فاصله از آبراهه

از نظر زمین‌ریخت‌شناسی، آبراهه‌ها در بخش‌های همگرای حوزه آبخیز قرار گرفته‌اند و جریان و تجمع آب‌های سطحی از اراضی اطراف به سمت آبراهه‌ها از پدیده‌های غالب آب‌شناسی در مقیاس حوزه آبخیز است. بنابراین، اطراف آبراهه‌ها و رودخانه‌ها عموماً شرایط مناسبی برای شکل‌گیری فرسایش خندقی دارند (Mararakanye و Sumner، ۲۰۱۷). بنابراین، فاصله از جریان به‌عنوان یکی از متغیرهای محیطی در پیش‌بینی و تحلیل مکانی استعداد فرسایش خندقی به‌کار گرفته شده است (Conoscenti و همکاران، ۲۰۱۴؛ Rahmati و همکاران، ۲۰۱۶؛ الف؛ Hitouri و همکاران، ۲۰۲۲). براساس نتایج حاصل از پژوهش امیری و همکاران (۱۳۹۸) در حوزه آبخیز مهارلو، هرچه میزان فاصله از آبراهه کمتر باشد، احتمال شکل‌گیری فرسایش خندقی بیشتر شده است.

نقشه فاصله از آبراهه در نرم‌افزارهای مختلف تهیه می‌شود. به‌منظور تهیه نقشه فاصله از آبراهه، نقشه وکتوری (شپ‌فایل) الگوی زهکشی منطقه موردنیاز است. نقشه فاصله از آبراهه با استفاده از ابزار فاصله اقلیدسی^۱ در نرم‌افزار ArcGIS ساخته می‌شود. فاصله اقلیدسی، مناسب‌ترین روش برای تعیین فاصله هر پیکسل از نزدیک‌ترین آبراهه است. شایان‌ذکر است که تفاوت زیادی بین خروجی دو ابزار فاصله اقلیدسی و بافر^۲ وجود دارد. هنگامی که از ابزار بافر استفاده شود، براساس مقادیر پیشنهادی کاربر، اندازه بافر تعیین شده و پهنه‌هایی به‌عنوان بافر در اطراف شبکه زهکشی ساخته شده و خروجی آن به‌عنوان یک لایه برداری به‌دست می‌آید. این درحالی است که در ابزار فاصله اقلیدسی، نیازی به معرفی اندازه بافر نبوده و فاصله هر نقطه از حوزه آبخیز تا نزدیک‌ترین آبراهه محاسبه و در نهایت یک لایه سلولی به‌دست می‌آید.

شایان‌ذکر است که خروجی ابزار فاصله اقلیدسی با خروجی ابزارهای بافر بسیار متفاوت است. ابزار فاصله اقلیدسی یک نقشه رستری پیوسته را تولید کرده، درحالی‌که

^۱ Euclidean distance

^۲ Buffer

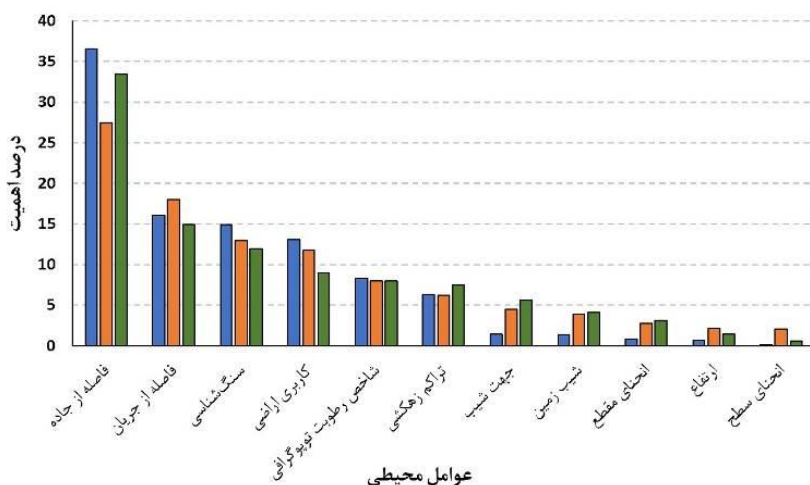
ابزار بافر یک نقشه پلی‌گونی تولید کرده که هر پلی‌گون نشان‌دهنده یک فاصله ثابت از پدیده موردنظر است. به عنوان مثال، در بافر صدمتری، تمام محدوده‌ای که فاصله آنها از آبراهه کمتر از صد متر است، در یک پلی‌گون مشترک قرار می‌گیرند. این درحالی است که نقشه فاصله از آبراهه یک نقشه رستری پیوسته بوده که مقدار هر پیکسل آن مختص به همان موقعیت مکانی است.

۳-۳-۸- فاصله از جاده

جریان‌های سطحی تجمع‌یافته در حاشیه جاده‌ها عموماً شرایط لازم برای کنش سطح زمین و شروع فرسایش خندقی را ایجاد می‌نمایند. مطالعه Nyssen و همکاران (۲۰۰۲) بیان‌گر این مسأله است که در جاده‌های فاقد زهکش مناسب، احتمال وقوع فرسایش خندقی و تهدید زیرساخت جاده وجود دارد. همچنین، براساس نتایج حاصل از پژوهش انتظاری و همکاران (۱۳۹۴) در حوزه آبخیز دیره، عامل فاصله از جاده مشارکت بسیار زیادی در پدیده خندق‌زایی داشته است. با عنایت به این‌که نتایج مزبور براساس مشاهدات میدانی و تحلیل‌های مکانی به‌دست آمده است؛ Rahmati و همکاران (۲۰۲۲) در یک سه مدل مختلف هوش مصنوعی به بررسی میزان اثرگذاری عوامل محیطی در رخداد فرسایش خندقی پرداختند و نتایج اثبات کرد که در هر سه روش، عامل فاصله از جاده نقش بسیار مهمی را ایفا کرده است. از این‌رو عامل فاصله از جاده در پیش‌بینی احتمال رخداد فرسایش خندقی و تهیه نقشه مناطق مستعد خندق‌زایی به-عنوان یک متغیر مفید مورد استفاده وسیع قرار گرفته است (Wang و همکاران، ۲۰۲۲؛ Liu و همکاران، ۲۰۲۳؛ Hitouri و همکاران، ۲۰۲۳). به‌منظور تهیه نقشه فاصله از جاده، ابتدا نقشه موقعیت جاده‌ها تهیه می‌شود. ساده‌ترین راه برای تهیه نقشه جاده‌ها، استفاده از سامانه گوگل ارث است. نقشه حاصل از سامانه گوگل ارث به فرمت برداری تبدیل می‌شود. در نهایت، مشابه نقشه فاصله از آبراهه، با استفاده از ابزار فاصله

اقلیدسی^۱، نقشه فاصله از جاده با فرمت رستری تهیه می‌شود. در این نقشه هر پیکسل دارای مقدار عددی خاصی است که فاصله عمودی آن پیکسل را از نزدیک‌ترین جاده نشان می‌دهد.

همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، تفاوت زیادی بین خروجی دو ابزار فاصله اقلیدسی و بافر وجود دارد. هنگامی که از ابزار بافر استفاده شود، براساس مقادیر پیشنهادی کاربر، اندازه بافر تعیین شده و پهنه‌هایی به‌عنوان بافر در اطراف جاده ساخته شده و خروجی آن به‌عنوان یک لایه برداری ساخته می‌شود. این درحالی است که در ابزار فاصله اقلیدسی، نیازی به معرفی اندازه بافر نبوده و فاصله هر نقطه از حوزه آبخیز تا نزدیک‌ترین جاده محاسبه و در نهایت به‌صورت لایه سلولی تهیه می‌شود. براساس مطالعه Rahmati و همکاران (۲۰۲۲)، نتایج سه مدل مختلف جنگل تصادفی، بیشینه بی‌نظمی و درخت رگ‌سیونی تقویت‌شده نشان داد که عامل جاده مهم‌ترین نقش را در شکل‌گیری فرسایش‌های خندقی حوزه آبخیز بیرم استان فارس ایفا کرده است (شکل ۳-۵).



شکل ۳-۵- اهمیت عامل جاده در رخداد فرسایش خندقی (Rahmati و همکاران، ۲۰۲۲)

¹ Euclidean distance

۳-۳-۹- خاک‌شناسی

خاک، بستر شکل‌گیری فرسایش خندقی است؛ بنابراین طبیعی است که بیشترین نقش را در رخداد فرسایش خندقی ایفا کند. مارن‌ها نقش مهمی در فرسایش خندقی حوضه دارند که مطالعه آن‌ها و تعیین گسترش مکانی آن‌ها در نقشه خاک‌شناسی بسیار حائز اهمیت است (سلیمان‌پور و همکاران، ۱۴۰۰ الف، ب). هریک از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک می‌توانند تأثیر به‌سزایی در فرآیندهای زمین‌ریخت‌شناسی از جمله فرسایش خندقی داشته باشند (مددی و همکاران، ۱۴۰۲). به‌عنوان مثال، محمدابراهیمی (۱۳۹۶) پس از بررسی خصوصیات خاک‌شناسی در داخل و خارج از خندق‌ها در دو عمق مختلف سطحی و زیرسطحی در در حوضه آبخیز آق‌امام استان گلستان، نتایج نشان داد که میزان درصد سیلت (در دو عمق مختلف داخل خندق)، درصد رطوبت اشباع (در دو عمق مختلف داخل خندق)، هدایت الکتریکی (عمق زیرسطحی در مناطق خندقی)، مواد خثی شونده (در هر دو عمق در خارج از مناطق خندقی)، درصد کاتیون تبدالی (عمق زیر سطحی در مناطق خندقی)، نسبت جذبی سدیم (عمق زیر-سطحی در مناطق خندقی)، درصد سدیم تبدالی (عمق زیر سطحی در مناطق خندقی)، اختلاف معنی‌دار آماری داشته و تغییرپذیری افقی و عمودی در خصوصیات خاک‌شناسی نقش مؤثری در ایجاد فرسایش خندقی داشته است.

متأسفانه به‌دلیل هزینه‌بر بودن نمونه‌برداری خاک و آزمایش‌های مختلف آن، اطلاعات مکانی بسیار محدودی از متغیرهای خاک‌شناسی در سراسر جهان وجود دارد. تغییرپذیری مکانی خصوصیات خاک نیز مشکل را دوچندان دشوار کرده است. با این وجود، راهکاری غیر از استفاده از اطلاعات و نقشه‌های خاک‌شناسی موجود در تحلیل‌های مکانی مطالعات فرسایش خندقی وجود ندارد. متغیرهای خاک‌شناسی، مخصوصاً بافت خاک و یا رده خاک در زمینه پیش‌بینی استعداد فرسایش خندقی به‌طور رایج مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Kariminejad و همکاران، ۲۰۲۳؛ Conoscenti و Sheshukov، ۲۰۲۳). در یک مطالعه گسترده، De Geeter و همکاران (۲۰۲۳) استعداد

رخداد فرسایش خندقی را برای کل قاره آفریقا براساس عوامل محیطی مختلف از جمله خصوصیات خاک‌شناسی پیش‌بینی کردند. در آخرین پژوهش‌ها، Shirani و همکاران (۲۰۲۳) با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک به بررسی اثرگذاری عوامل محیطی در رخداد فرسایش خندقی پرداختند و نتایج حاکی از آن است که نوع خاک مهم‌ترین نقش را در شکل‌گیری فرسایش خندقی داشته است.

در بسیاری از مطالعات زمین‌ریخت‌شناسی، فرسایش و رسوب، نقشه بافت خاک یا رده خاک برای نشان‌دادن خصوصیات کلی خاک در مقیاس حوزه آبخیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. این نقشه در گذشته با فرمت برداری تهیه شده و برای استان‌های کشور قابل دسترس است. در صورت نبود نقشه خاک‌شناسی دقیق، با استفاده از بازدیدهای میدانی و نمونه‌برداری از خاک‌های مختلف منطقه، نقشه بافت خاک قابل تولید است.

۳-۳-۱۰- سنگ‌شناسی

سنگ‌شناسی، به‌عنوان یکی از پایه‌ای‌ترین عوامل مؤثر در فرآیندهای ژئومورفولوژیکی و هیدرولوژیکی در مطالعات مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد (رحمتی و همکاران، ۱۳۹۴). مواد مادری تأثیر زیادی بر ویژگی‌های ژئوشیمیایی خاک و تحول آن دارد (نائل و همکاران، ۱۳۹۸). برخی از سازندهای زمین‌شناسی پتانسیل بالایی در رسوب‌زایی دارند که در تحلیل‌هایی فرسایش و رسوب باید به‌صورت جدی مورد توجه قرار گیرد (Mousazadeh و Salleh، ۲۰۱۴). بنابراین، نقشه سنگ‌شناسی در مطالعات پیش‌بینی حساسیت اراضی به رخداد فرسایش خندقی بسیار مورد استفاده قرار گرفته است (Sidorchuk و همکاران، ۲۰۰۳؛ Conforti و همکاران، ۲۰۱۱؛ Soleimanpour و همکاران، ۲۰۲۱). در مطالعه Rahmati و همکاران (۲۰۱۷) در شهرستان پل‌دختر استان لرستان، بررسی اثرگذاری عوامل محیطی در رخداد فرسایش خندقی نشان داد که سنگ‌شناسی جزء سه متغیر اصلی شناخته شد. همچنین، براساس

مطالعه قربانی و همکاران (۱۳۹۶)، نتایج مدل آنترپی شانون^۱ در منطقه سیمره استان لرستان مشخص کرد که عامل سنگ‌شناسی، مهم‌ترین متغیر محیطی در رخداد فرسایش خندقی است. شایان‌ذکر است معمولاً برای تهیه نقشه رقومی سنگ‌شناسی از نقشه‌های زمین‌شناسی استفاده شده و با فرآیند رقومی‌سازی^۲ واحدهای سنگ‌شناسی مختلف ثبت و به‌صورت پلی‌گون‌های مشخص در کنار یکدیگر قرار داده می‌شوند.

۳-۳-۱۱- کاربری اراضی

نحوه استفاده از زمین، تأثیر مستقیمی بر فرآیندهای فرسایش و رسوب دارد (Bakker و همکاران، ۲۰۰۸). به‌عنوان نمونه، در یک اندازه‌گیری میدانی در منطقه‌ای در غرب زنجان (واعظی و همکاران، ۱۳۹۸)، اثر کاربری اراضی بر میزان فرسایش خاک موردبررسی قرار گرفته و نتایج نشان داد که فرسایش خاک در کاربری کشاورزی چند برابر بیشتر از کاربری مرتع بوده و دلیل آن را ناپایداری خاکدانه‌ها در کاربری کشاورزی ذکر کردند. در میان کاربری‌هایی که انسان اراضی را مورد بهره‌برداری قرار می‌دهد، کاربری کشاورزی دیم بیشترین آسیب‌پذیری و پتانسیل فرسایش خاک را دارد (خزایی و همکاران، ۱۴۰۰). در یک مطالعه دیگر در مجارستان، Gábris و همکاران (۲۰۰۳) چگونگی شکل‌گیری فرسایش خندقی در اثر تغییر کاربری زمین را تشریح کردند. بنابراین، کاربری اراضی، به‌عنوان یک متغیر مهم در مدل‌سازی مکانی استعداد رخداد فرسایش خندقی به‌طور وسیعی مورد استفاده قرار گرفته است (Gholami و همکاران، ۲۰۲۳؛ Mahamba و همکاران، ۲۰۲۳؛ Davudirad و همکاران، ۲۰۲۴).

رحمتی و همکاران (۱۳۹۷) نیز به‌منظور پیش‌بینی استعداد وقوع فرسایش خندقی حوزه آبخیز کشکان-پل دختر به‌وسیله مدل بیشینه آنترپی نشان دادند که کاربری اراضی نقش به‌سزایی در شکل‌گیری فرسایش خندقی داشت. یافته‌های شیرانی (۱۳۹۹)

^۱ Shannon entropy

^۲ Digitizing

در حوزه آبخیز سمیرم استان اصفهان نیز نشان داد که کاربری اراضی مهم‌ترین عامل در رخداد فرسایش خندقی است.

نقشه کاربری اراضی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و بازدیدهای میدانی (ثبت نقاط کنترلی) تهیه می‌شود. در این فرآیند، نمونه‌های تعلیمی از هر کاربری بر روی تصاویر ماهواره‌ای (مانند تصاویر سنجنده لندست ۸) در نرم‌افزارهای سنجش از دوری ثبت شده و با استفاده از روش‌های طبقه‌بندی تصاویر، نقشه کاربری اراضی تولید می‌شود. هر واحد کاربری، نشان‌دهنده نوع استفاده از زمین است که تأثیر به‌سزایی در وقوع و گسترش فرسایش‌های خندقی دارد. بنابراین تغییر کاربری اراضی یکی از مهم‌ترین علل شکل‌گیری و تسریع گسترش فرسایش خندقی است. شکل ۳-۶ شکل‌گیری یک فرسایش خندقی در مطالعه رحمتی و همکاران (۱۴۰۲) در اثر تغییر کاربری اراضی از مرتع به کشاورزی دیم در حوزه آبخیز کلوچه بیجار را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۶- شکل‌گیری فرسایش خندقی در
اثر تغییر کاربری اراضی (رحمتی و همکاران، ۱۴۰۲)

۳-۳-۱۲- تراکم زهکشی

الگوی شبکه زهکشی یک حوزه آبخیز تحت تأثیر زمین‌شناسی و شیب آن بوده و یکی از راه‌های توصیف وضعیت شبکه زهکشی در حوزه آبخیز، محاسبه تراکم زهکشی است. تراکم زهکشی به مجموع طول جریان در واحد سطح گفته شده و در

----- اصول مدل سازی مکانی فرسایش خندقی با استفاده از مدل های هوش مصنوعی / ۵۷

برخی منابع نیز به عنوان نسبت مجموع طول جریان های موجود در یک حوزه آبخیز به مساحت آن حوزه آبخیز تعریف شده است. تراکم زهکشی، یکی از معیارهای مهم توصیف رفتار و پاسخ هیدرولوژیکی حوزه آبخیز است. هرچه میزان تراکم زهکشی در حوزه آبخیز بالاتر باشد، پتانسیل تخلیه جریان از آن آبخیز سریع تر خواهد شد.

پژوهش Gideon و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از تحلیل های مبتنی بر تصمیم گیری چندمعیاره نشان داد که قسمت هایی از حوزه آبخیز که تراکم زهکشی بالاتری دارند، احتمال فرسایش خندقی و تولید رسوب بالاتری دارند. براساس نتایج مطالعه Rahmati و همکاران (۲۰۱۶الف)،

تراکم زهکشی موجب تجمع بیشتر جریان در یک محدوده از حوزه آبخیز شده که به نوبه خود افزایش احتمال شکل گیری فرسایش خندقی در این محدوده ها را به دنبال داشته است. در مطالعات دیگری که از روش های آماری و مدل های هوش مصنوعی برای شناسایی مناطق مستعد فرسایش خندقی استفاده کرده اند، تراکم زهکشی نیز همواره به عنوان یک متغیر مهم مورد استفاده قرار گرفته است (Kariminejad و همکاران، ۲۰۱۹؛ Soleimanpour و همکاران، ۲۰۲۱؛ Setargie و همکاران، ۲۰۲۳؛ Were و همکاران، ۲۰۲۳).

۳-۳-۱۳- میانگین بارش سالانه

بارندگی عموماً ارتباط پیچیده ای با پدیده فرسایش خاک دارد؛ به گونه ای که در مناطق دارای بارندگی زیاد، پوشش گیاهی زیادی مستقر شده و پتانسیل فرسایش خاک به طور چشمگیری کاهش می یابد. این در حالی است که در مناطقی که مقدار بارش سالانه کم است، اگرچه پوشش گیاهی کمی مستقر می شوند، مقدار بارش به حدی نیست که فرسایش خاک قابل توجهی رخ دهد. در مناطق نیمه خشک که مقدار بارش متوسط است، مقدار بارش برای استقرار پوشش گیاهی زیاد مناسب نبوده، ولی از نظر رخداد فرسایش خاک پتانسیل لازم را دارد. از این رو، مناطق نیمه خشک شرایط

شکندنده‌ای داشته و بیشترین میزان فرسایش در این نواحی ملاحظه می‌شود. بنابراین از آنجایی که بارندگی عامل شروع‌کننده و محرک فرسایش خاک است، در نظر گرفتن عامل بارندگی در مطالعات فرسایش خاک الزامی است (خالدیان و شاهویی، ۱۳۸۹). در خصوص پتانسیل‌یابی فرسایش خندقی نیز، عامل بارندگی به‌عنوان یکی از متغیرهای مهم پیش‌بینی‌کننده مورد استفاده قرار گرفته است (Lei و همکاران، ۲۰۲۰؛ Nhu و همکاران، ۲۰۲۰؛ Saha و همکاران، ۲۰۲۰؛ Lana و همکاران، ۲۰۲۲). به‌عنوان مثال، Rahmati و همکاران (۲۰۲۳) در حوزه آبخیز تلوار استان کردستان به بررسی مناطق مستعد فرسایش خندقی با استفاده از مدل‌های یادگیری عمیق پرداختند و از عامل بارندگی نیز به‌عنوان یکی از متغیرهای پیش‌بینی‌کننده مهم در مدل‌سازی مکانی فرسایش خندقی استفاده کردند. شایان‌ذکر است نقشه میانگین بارندگی سالانه حوزه آبخیز، با استفاده از داده‌های هواشناسی ایستگاه‌های داخل و خارج از حوزه آبخیز و روش‌های درون‌یابی مانند کریجینگ و وزن‌دهی فاصله معکوس (IDW) تهیه می‌شود.

۳-۳-۱۴- تراکم پوشش گیاهی

پوشش گیاهی همواره یک نقش محافظتی در مقابل بارندگی و جریان‌های سطحی داشته و موجب کاهش فرسایش خاک می‌شود. نقشه تراکم پوشش گیاهی، اطلاعات مفیدی در خصوص آسیب‌پذیری و حساسیت اراضی نسبت به فرسایش خاک ارائه می‌دهد. براساس نتایج زنگی‌آبادی و همکاران (۱۳۸۹)، عامل تراکم پوشش گیاهی، به‌عنوان مهم‌ترین متغیر در نرخ فرسایش خاک در مراتع کلات استان خراسان رضوی شناسایی شد.

در خصوص نقش مهم پوشش گیاهی، مطالعه Bastola و همکاران (۲۰۱۸) نشان داد که پوشش گیاهی نه تنها موجب کاهش احتمال رخداد فرسایش خندقی شده، بلکه بعد از تشکیل خندق نیز می‌تواند در کاهش رشد آن مؤثر باشد. چرای بی‌رویه دام در مراتع

----- اصول مدل‌سازی مکانی فرسایش خندقی با استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی/ ۵۹

موجب کاهش تراکم پوشش گیاهی شده و فرسایش خاک را تشدید می‌کند (Wilkinson و همکاران، ۲۰۱۸).

یکی از شاخص‌های رایج برای محاسبه تراکم پوشش گیاهی، شاخص نرمال‌شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI) است که در مطالعات مدل‌سازی و پیش‌بینی فرسایش خندقی مورد استفاده قرار گرفته است (Azedou و همکاران، ۲۰۲۱؛ Wei و همکاران، ۲۰۲۲؛ Wang و همکاران، ۲۰۲۲). شاخص نرمال‌شده تفاوت پوشش گیاهی با استفاده از تصاویر سنجنده‌های مختلف قابل محاسبه است. این شاخص بین ۱- و ۱+ متغیر است. مقادیر کمتر و مساوی صفر فاقد پوشش گیاهی هستند، در حالی که مقادیر بیشتر از صفر از پوشش گیاهی برخوردارند. هرچه میزان این شاخص بیشتر باشد، تراکم پوشش گیاهی نیز بیشتر است.

۳-۳-۱۵- شاخص ناهمواری توپوگرافی

شاخص ناهمواری توپوگرافی^۱ (TRI)، یکی از متغیرهای رایج در زمین‌ریخت‌شناسی کمی است که وضعیت ناهمواری سطح زمین را نشان می‌دهد. این شاخص اطلاعات بسیار مفیدی در خصوص تغییرات مکانی ناهمواری در سطوح وسیع فراهم می‌سازد. به این سبب، این شاخص به عنوان یکی از متغیرهای مهم محیطی در پیش‌بینی استعداد فرسایش خندقی مورد استفاده محققان و کارشناسان قرار گرفته است (Mokarram و Zarei؛ ۲۰۲۱؛ Ghosh و Kundu، ۲۰۲۲).

Rahmati و همکاران (۲۰۲۳) نیز به منظور پیش‌بینی احتمال فرسایش خندقی در حوزه آبخیز تلوار استان کردستان از شاخص ناهمواری توپوگرافی استفاده کردند. در پژوهشی دیگر، Shirani و همکاران (۲۰۲۳) نیز از این شاخص برای مدل‌سازی مکانی در غرب کشور استفاده و مفید بودن آن را تأیید کردند. این شاخص، به آسانی براساس لایه مدل رقومی ارتفاعی در نرم‌افزار SAGA-GIS قابل ساخت است.

¹ Topographic ruggedness index

۳-۳-۱۶- موقعیت شیب نسبی

موقعیت شیب نسبی، به‌عنوان یکی از متغیرهای زمین‌ریخت‌شناسی کمی در مطالعات مربوط به فرآیندهای سطحی زمین مورد استفاده وسیع قرار گرفته است. سطح زمین براساس این متغیر از قسمت فوقانی دامنه به سمت قعر دامنه به شش کلاس مختلف قابل تقسیم‌بندی است: تاج (قله)، شیب فوقانی، شیب میانی، شیب تحتانی، پای شیب و رکود. ارتباط معنی‌داری بین کلاس‌های موقعیت شیب نسبی و پتانسیل تولید رواناب و همچنین زهکش زیرسطحی برقرار است. کلاس‌های تاج، شیب فوقانی، شیب میانی، شیب تحتانی، پای شیب و رکود، به‌ترتیب دارای پتانسیل تولید رواناب سریع، خوب، نسبتاً خوب، متوسط، کم و ضعیف هستند (رحمتی و همکاران، ۱۴۰۲). این متغیر در مطالعات پیش‌بینی استعداد فرسایش خندقی نیز مورد استفاده قرار گرفته است (Javidan و همکاران، ۲۰۲۰؛ Arabameri و همکاران، ۲۰۲۰؛ Saha و همکاران، ۲۰۲۱؛ Rahmati و همکاران، ۲۰۲۳). این شاخص نیز در نرم‌افزار SAGA-GIS قابل تهیه است. مقدار این شاخص، از صفر تا یک متغیر است.

۳-۳-۱۷- طول دامنه

طول دامنه تأثیر زیادی بر فرآیند تشکیل رواناب، فرسایش خاک دامنه و تولید رسوب دارد (نور و عرب‌خدری، ۱۳۹۹). براساس نتایج گلکاریان و همکاران (۱۳۹۳)، حجم جریان سطحی و سرعت جریان رابطه مستقیمی با طول دامنه دارند؛ به‌گونه‌ای که با افزایش طول دامنه، حجم و سرعت جریان، فرسایش خاک و در نهایت غلظت رسوب افزایش می‌یابد. اهمیت این عامل به‌قدری است که به‌عنوان یکی از فاکتورهای مهم در معادله جهانی فرسایش خاک در نظر گرفته شده است (Kinnell, ۲۰۰۱).

از آنجایی که شکل‌گیری فرسایش خندقی وابستگی زیادی به شرایط بالادست دارد؛ هنگامی که طول دامنه زیاد باشد، پتانسیل رخداد فرسایش خندقی به واسطه تجمع جریان‌های سطحی، افزایش می‌یابد. از این‌رو، عامل طول دامنه در برخی از مطالعات

----- اصول مدل سازی مکانی فرسایش خندقی با استفاده از مدل های هوش مصنوعی/ ۶۱

پیش بینی استعداد فرسایش خاک به عنوان متغیر پیش بینی کننده مورد استفاده قرار گرفته است (Conforti و همکاران، ۲۰۱۱؛ Conoscenti و همکاران، ۲۰۱۴؛ Hembram و همکاران، ۲۰۱۹).

۳-۳-۱۸- اندازه زبری برداری

اندازه زبری برداری^۱، یکی از متغیرهای مهم زمین ریخت سنجی است که در توصیف زمینه^۲ کاربرد زیادی دارد (Rotnicka و همکاران، ۲۰۲۰). این متغیر قابلیت انعکاس اثر خصوصیات سطح زمین بر فرآیندهای زمین ریخت شناسی را داشته و در مطالعات مختلف مورد استفاده قرار گرفته است (Rahmati رحمتی و همکاران، ۲۰۱۹؛ Skaugen و Melvold، ۲۰۱۹؛ Ferrer و همکاران، ۲۰۲۳).

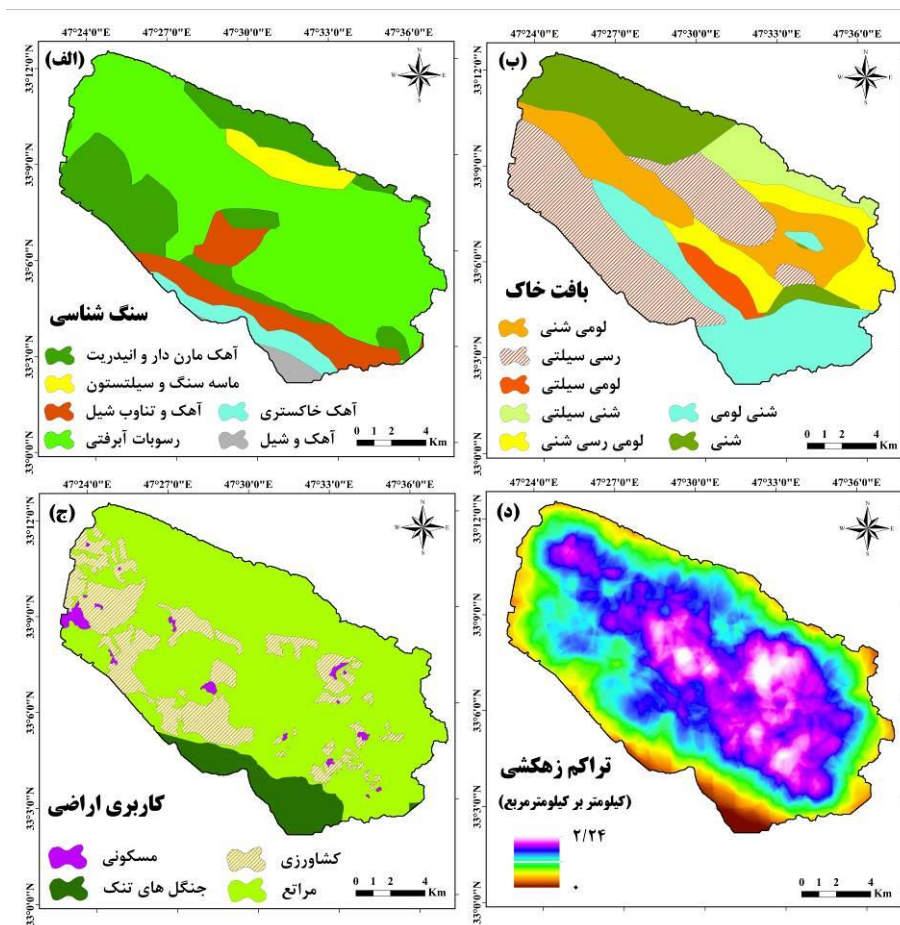
در پژوهش Bosino و همکاران (۲۰۲۰) از شاخص اندازه زبری برداری به عنوان یکی از عوامل اثرگذار بر فرسایش خاک نام برده شده است و در قالب یکی از متغیرهای پیش بینی کننده در مدل سازی استعداد فرسایش خاک با استفاده از مدل بیشینه بی نظمی مورد استفاده قرار گرفته است. یافته های ایشان نشان داد که به ازای افزایش شاخص اندازه زبری برداری، پتانسیل فرسایش خاک افزایش یافته است.

شکل ۳-۷ نقشه عوامل محیطی اثرگذار بر رخداد فرسایش خندقی در مطالعه رحمتی و همکاران (۱۳۹۷) در حوزه آبخیز کشکان-پل دختر استان لرستان را نشان می دهد. عوامل محیطی در نظر گرفته شده عبارتند از سنگ شناسی، بافت خاک، کاربری اراضی، تراکم زهکشی، فاصله از جریان های سطحی، شاخص رطوبت توپوگرافی، ارتفاع، شیب زمین، جهت شیب، انحنای سطح و فاصله از جاده. نقشه سنگ شناسی این حوزه آبخیز براساس نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ تهیه شده و دارای شش واحد سنگ شناسی مختلف است. نقشه بافت خاک نیز با استفاده از نمونه برداری خاک و

¹ Vector roughness measure

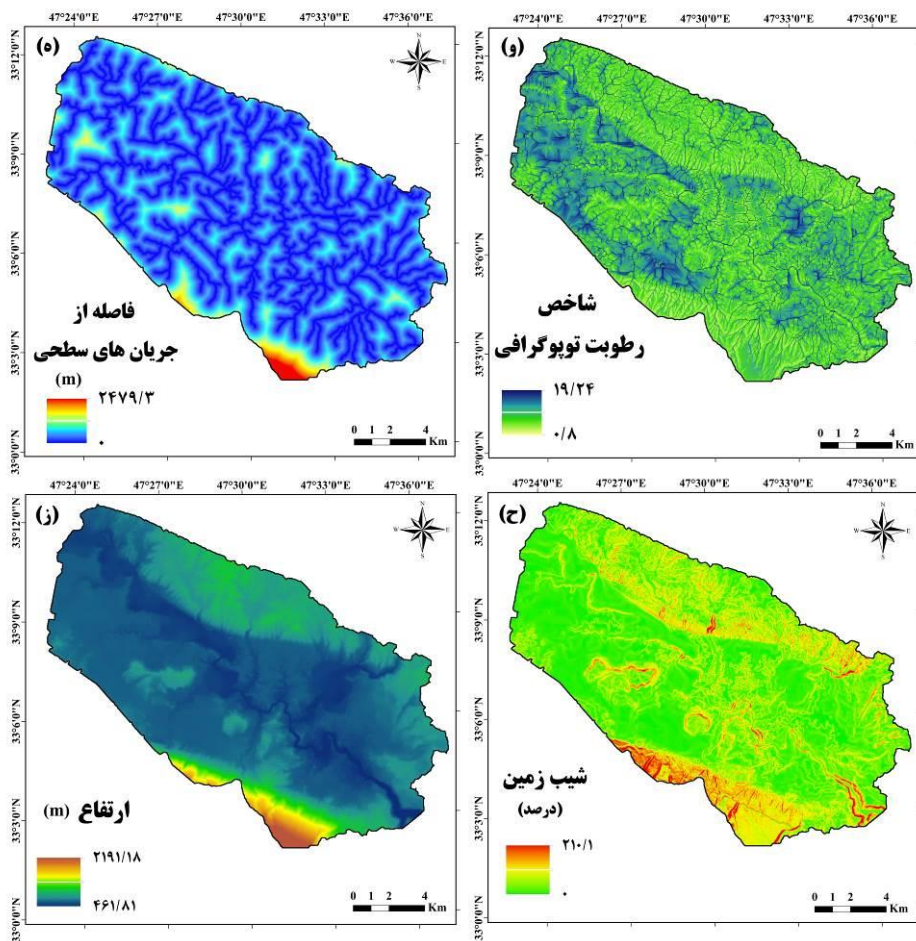
² Terrain

تعیین کلاس بافت خاک در آزمایشگاه تولید شد. هفت کلاس بافت خاک در این حوزه آبخیز شناسایی شد.

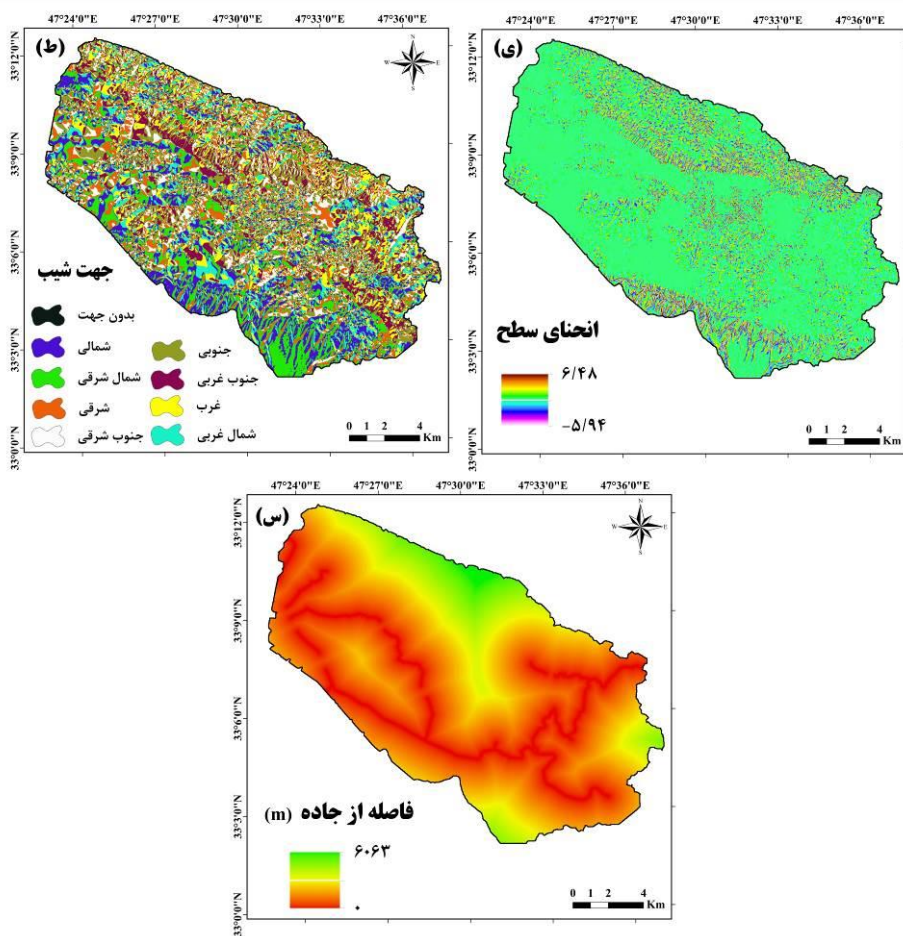


شکل ۳-۰- عوامل محیطی مؤثر بر رخداد فرسایش خندقی (رحمتی و همکاران، ۱۳۹۷)

----- اصول مدل سازی مکانی فرسایش خندقی با استفاده از مدل های هوش مصنوعی / ۶۳



شکل ۳-۷- (ادامه)



شکل ۳-۷- (ادامه)

فصل چهارم

روش های پیش پردازش داده ها

۴-۱- اهمیت پیش‌پردازش داده‌ها

پیش‌پردازش داده به انواع بررسی‌های فنی و آماری که بر روی داده‌های خام انجام می‌شود تا برای ورود به مدل آماده شوند، اطلاق می‌شود. بنابراین، پیش‌پردازش یک مرحله مقدماتی مهم برای فرآیند داده‌کاوی و مدل‌سازی مکانی است. بخشی از فرآیند پیش‌پردازش به آماده‌سازی فرمت و ساختار داده‌ها به‌منظور ورود به مدل (از نظر اجرایی) پرداخته و بخش دیگر آن به بررسی آماری داده‌های ورودی ارتباط دارد. هر مدل و محیط مدل‌سازی نیازمند فرمت و ساختار خاصی از داده‌ها بوده که در صورت عدم توجه به این موضوع، اجرای مدل امکان‌پذیر نیست. همان‌گونه که پیشتر گفته شد، مدل‌های هوش مصنوعی در محیط‌های مختلفی از جمله نرم‌افزارهای R، Matlab، MaxEnt، Modeco، OpenNN و غیره قابل اجرا هستند که هرکدام نیازمند فرمت خاصی از داده‌ها بوده و توجه به این موضوع ضروری است.

۴-۲- بازدید میدانی و اعتبارسنجی داده‌ها

هر داده‌ای که از منابع مختلف (آمارهای رسمی، تصاویر ماهواره‌ای، پایگاه داده دستگاه‌های اجرایی، رسانه و فضای مجازی و غیره) تهیه می‌شود، قبل از استفاده در مدل‌سازی باید در بازدیدهای میدانی و مستقیم مورد ارزیابی قرار گیرد که این مرحله به نام اعتبارسنجی داده^۱ در منابع علمی معرفی شده است. این داده‌ها می‌تواند شامل موقعیت رخداد فرسایش‌های خندقی در یک حوزه آبخیز یا نقشه‌های کاربری اراضی، سنگ‌شناسی، خاک‌شناسی، پوشش گیاهی و غیره باشد.

اهمیت این موضوع زمانی مشخص می‌شود که این موضوع درک شود که خطای ناشی از ثبت داده‌ها به‌صورت مستقیم به داخل مدل وارد شده و در نهایت در خروجی مدل در سطح وسیع‌تری ظاهر می‌شود. در برخی مواقع که محققان بدون انجام این مرحله، مستقیماً وارد مدل‌سازی می‌شوند، دقت پیش‌بینی نامطلوب مدل را تنها ناشی از

¹ Validating the data

----- اصول مدل‌سازی مکانی فرسایش خندقی با استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی/۶۷

ساختار و عملکرد مدل می‌دانند که این امر کاملاً اشتباه است. هنگامی که بتوان علاوه بر بازدید میدانی و بررسی واقعیت پدیده‌ها به بررسی و اعتبارسنجی کمی مبتنی بر داده‌های مشاهداتی^۱ پرداخت، اطمینان بیشتری از داده‌های ورودی مدل حاصل می‌شود. به عنوان مثال، اگر یک لایه رقومی مربوط به کاربری اراضی یک حوزه آبخیز از یک دستگاه اجرایی دریافت می‌شود، با استفاده از داده‌های میدانی (تعدادی نمونه واقعی از موقعیت جغرافیایی کاربری‌های مختلف که در بازدید میدانی ثبت شده‌اند) می‌توان فرآیند اعتبارسنجی متقابل^۲ را انجام داد و دقت لایه موردنظر را محاسبه کرد (Bates و همکاران، ۲۰۲۴).

۴-۳- اندازه پیکسل متغیرهای محیطی

مدل‌سازی مکانی با استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی نیازمند متغیرهایی است که از نظر اندازه پیکسل، سامانه مختصات جغرافیایی و تعداد پیکسل‌ها (گسترش مکانی) یکسان باشند. عموماً اندازه پیکسل متغیرهای محیطی براساس اندازه پیکسل لایه مدل رقومی ارتفاعی^۳ تعیین می‌شود. زیرا بسیاری از متغیرهای محیطی با استفاده از آن به دست می‌آیند.

هنگامی که از مدل رقومی ارتفاعی با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر استفاده شود (تهیه شده توسط سنجنده SRTM)؛ اندازه پیکسل لایه متغیرهای محیطی نیز ۳۰ متر در نظر گرفته می‌شود. به عنوان مثال، Rahmati و همکاران (۲۰۱۷ و ۲۰۱۹ ب) اندازه پیکسل تمامی متغیرهای محیطی را در مطالعه پیش‌بینی استعداد فرسایش خندقی، ۳۰ متر در نظر گرفتند. همچنین ذاکری‌نژاد و الوندی (۱۴۰۲) نیز از اندازه پیکسل ۱۲ متر در مدل‌سازی استعداد رخداد فرسایش خندقی در حوزه آبخیز خسویه استان فارس استفاده کردند.

¹ Ground truth

² Cross-validation

³ Digital elevation model

۴-۴- تعیین متغیرها

داده‌های ورودی مدل به دو دسته تقسیم می‌شوند. دسته اول مربوط به موقعیت مکانی پیشانی فرسایش‌های خندقی است که در بازدهی‌های میدانی و استفاده از منابع اطلاعاتی دیگر مانند گوگل‌ارث و عکس‌های هوایی ثبت می‌شوند. نقاط رخداد فرسایش خندقی در مدل‌سازی به‌عنوان متغیر وابسته^۱ (یا در برخی منابع متغیر هدف^۲) به مدل معرفی می‌شوند. دسته دوم مربوط به متغیرهای محیطی است که در مدل به‌عنوان متغیر مستقل^۳ (یا در برخی منابع متغیر پیش‌بینی‌کننده^۴) مورد استفاده قرار می‌گیرند. آماده‌سازی هریک از متغیرهای وابسته و مستقل در ادامه تشریح می‌شود.

۴-۵- تبدیل فرمت داده‌های ورودی مدل

پس از ثبت موقعیت مکانی پیشانی فرسایش‌های خندقی، داده‌های آن به داخل محیط نرم‌افزارهای اکسل و ArcGIS انتقال می‌یابد. اگر مدل‌سازی در محیط برنامه‌نویسی R انجام گیرد؛ داده‌های موقعیت رخداد فرسایش خندقی باید به‌صورت فایل شکلی (Shp) باشند. این درحالی است که نرم‌افزارهای دیگر نیازمند نوع دیگری از فرمت ساختاری هستند. به‌عنوان مثال، برای اجرای مدل پیشینه بی‌نظمی در نرم‌افزار، داده‌های موقعیت رخداد فرسایش خندقی باید به فرمت CSV تبدیل شوند.

متغیرهای محیطی نیز بسته به ماهیت موضوعی آن‌ها در فرمت‌های برداری^۵ و سلولی^۶ تهیه می‌شوند. به‌عنوان مثال، غالباً نقشه‌های خاک‌شناسی، سنگ‌شناسی و کاربری اراضی در فرمت برداری ارائه شده در حالی که نقشه‌های ارتفاع، شیب، انحنای زمین و غیره دارای فرمت رستری هستند. به‌منظور معرفی لایه‌های متغیرهای محیطی (متغیرهای مستقل)، ابتدا فرمت لایه‌های برداری به نوع رستری (مثلاً Grid یا Tiff)

^۱ Dependent

^۲ Target

^۳ Independent

^۴ Predictor

^۵ Vector

^۶ Raster

----- اصول مدل سازی مکانی فرسایش خندقی با استفاده از مدل های هوش مصنوعی/ ۶۹

تبدیل می شود. سپس فرمت تمام لایه های رستری با استفاده از ابزارهای جعبه Conversion tools به نوع اسکی^۱ تبدیل می شود.

۴-۶- تقسیم داده های متغیر وابسته

از آنجایی که بخشی از داده های وابسته باید برای مرحله اعتبارسنجی و ارزیابی دقت پیش بینی مدل های هوش مصنوعی نگه داشته شود، داده های موقعیت رخداد فرسایش خندقی به صورت کاملاً تصادفی به دو گروه آموزش و اعتبارسنجی تقسیم می شوند. گروه آموزش که برای ساخت مدل و آموزش دیدن مدل مورداستفاده قرار می گیرد، معمولاً ۷۰ درصد داده های موقعیت فرسایش خندقی را شامل می شود (Pourghasemi و همکاران، ۲۰۱۷). میزان برازش مدل براساس داده های گروه آموزش در مرحله آموزش قابل بررسی بوده و آزمون اصطلاحاً نیکویی برازش^۲ گفته می شود. به هر حال، بررسی دقت مدل براساس داده های گروه آموزش فاقد اعتبار علمی است. گروه اعتبارسنجی نیز تنها ۳۰ درصد از داده های موقعیت فرسایش های خندقی را داراست و مدل به هیچ وجه از آن ها برای آموزش و شناخت پدیده فرسایش خندقی استفاده نمی کند. در واقع، پس از اتمام مدل سازی مکانی و تهیه نقشه استعداد فرسایش خندقی، از داده های گروه اعتبارسنجی برای بررسی دقت پیش بینی مدل براساس معیارهای آماری استفاده می شود. توان پیش بینی^۳ مدل تنها براساس داده های گروه اعتبارسنجی ارزیابی می شود و مقایسه عملکرد مدل های مختلف در پیش بینی استعداد فرسایش خندقی براساس میزان توان پیش بینی مدل ها امکان پذیر است. در برخی از مطالعات ممکن است به دلیل کمبود تعداد داده های ثبت شده موقعیت فرسایش های خندقی و فراهم نبودن آموزش کامل مدل، حجم داده های گروه آموزش به ۲۵ درصد و یا حتی ۲۰ درصد کاهش یابد (Hemram و همکاران، ۲۰۲۱).

^۱ Ascii

^۲ Goodness-of-fit

^۳ Prediction power

در صورتی که علاوه بر میزان عملکرد مدل، تغییرات عملکرد مدل در شرایط مختلف گروه‌بندی داده‌های موقعیت فرسایش خندقی مدنظر باشد؛ تحلیل استقامت^۱ مدل انجام می‌شود. در تحلیل استقامت مدل، داده‌های فرسایش خندقی در دفعات متعدد گروه‌بندی شده و چند مجموعه مختلف آموزش - اعتبارسنجی ساخته می‌شود. به‌عنوان مثال، اگر گروه‌بندی داده‌های فرسایش خندقی پنج بار به‌صورت تصادفی انجام شود، پنج مجموعه مختلف آموزش - اعتبارسنجی به‌دست آمده و امکان پنج بار مدل‌سازی و اعتبارسنجی وجود دارد (جدول ۴-۱).

از آنجایی که داده‌های موقعیت فرسایش خندقی به‌صورت تصادفی به عضویت گروه‌های آموزش و اعتبارسنجی درآمده‌اند، معمولاً نحوه آموزش مدل، توان پیش‌بینی مدل و دقت نقشه استعداد رخداد فرسایش خندقی تحت تأثیر قرار می‌گیرد (Garosi و همکاران، ۲۰۱۸). در صورتی که تغییرات کمی بین دقت پیش‌بینی مدل در دفعات مختلف گروه‌بندی (S1, S2, S3, S4 و S5) مشاهده شود، مدل از استقامت بالایی برخوردار است.

جدول ۴-۱ - گروه‌بندی فرسایش‌های خندقی در تحلیل استقامت مدل (رحمتی و همکاران، ۲۰۱۷)

شماره گروه‌بندی تصادفی	شماره مجموعه داده	اندازه گروه آموزش	اندازه گروه اعتبارسنجی
اول	S1	۷۰ درصد	۳۰ درصد
دوم	S2	۷۰ درصد	۳۰ درصد
سوم	S3	۷۰ درصد	۳۰ درصد
چهارم	S4	۷۰ درصد	۳۰ درصد
پنجم	S5	۷۰ درصد	۳۰ درصد

در واقع، استقامت مدل، یک آزمون فراتر از ارزیابی دقت پیش‌بینی مدل است و مدلی به‌عنوان برتر انتخاب می‌شود که علاوه بر عملکرد بالا (پیش‌بینی دقیق)، از استقامت بالایی نیز برخوردار باشد. به‌عنوان مثال، در مطالعه Rahmati و همکاران

¹ Robustness

----- اصول مدل‌سازی مکانی فرسایش خندقی با استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی/ ۷۱

(۲۰۱۷) به منظور بررسی عملکرد و استقامت مدل‌های یادگیری ماشینی مختلف، سه گروه مجموعه داده فرسایش خندقی در تقسیم تصادفی تهیه کردند و پس از آموزش هر مدل با گروه آموزشی هر مجموعه، دقت پیش‌بینی آن‌ها با استفاده از گروه اعتبارسنجی همان مجموعه مورد ارزیابی کمی قرار دادند. نتایج ایشان نشان داد که مدل جنگل تصادفی و مدل ماشین‌بردار پشتیبان (با کرنل تابع پایه شعاعی)، نتایج بهتری در ارزیابی دقت مدل‌ها و آزمون استقامت نشان داده است.

۴-۷- تنظیم و انتقال سیستم‌های مختصات

یکی از شرایط مهم در اجرای مدل، یکسان بودن سیستم مختصات داده‌های ورودی است. از آنجایی که داده‌ها از منابع مختلف جمع‌آوری می‌شوند؛ این احتمال وجود دارد که سیستم مختصات آن‌ها متفاوت باشد. بنابراین، قبل از استفاده مستقیم داده‌ها در مدل، بررسی دقیق این موضوع ضروری است. در صورت مغایرت سیستم مختصات لایه‌های اطلاعاتی، فرآیند انتقال مختصات^۱ بر روی لایه موردنظر صورت می‌پذیرد. در صورتی که حوزه آبخیز مورد مطالعه وسعتی کمتر از یک زون در سیستم متریک (معادل ۶ درجه جغرافیایی) داشته باشد؛ استفاده از سیستم متریک پیشنهاد می‌شود. کشور ایران از غرب به شرق در چهار زون ۳۸، ۳۹، ۴۰ و ۴۱ قرار گرفته است. در مواردی که منطقه مورد مطالعه گستردگی بسیار زیادی داشته باشد (مانند چند استان بزرگ یا یک کشور)، سیستم مختصات جغرافیایی مناسب‌تر است.

۴-۸- یکپارچه‌سازی و هماهنگ‌سازی داده‌ها

در مواردی که سطح منطقه مورد مطالعه نسبتاً قابل ملاحظه است، این امکان وجود دارد که اطلاعات دریافت شده از پایگاه‌های داده و دستگاه‌های اجرایی در پروژه‌های مختلف تهیه شده باشند و در نهایت به صورت یک لایه اطلاعاتی واحد در اختیار

¹ Coordinate transformation

محقق یا کارشناس قرار گرفته باشد. بخش زیادی از چالش‌های این قسمت، به عدم پیوستگی مکانی^۱ در بین اجزای تشکیل‌دهنده لایه، یکسان نبودن مقیاس^۲ در بین اجزای تشکیل‌دهنده لایه یا در میان لایه‌های متغیرهای محیطی مختلف، عدم یکنواختی در اطلاعات توصیفی^۳ اجزای تشکیل‌دهنده لایه و عدم انطباق زمانی^۴ در اجزای تشکیل‌دهنده لایه، یا حتی در میان لایه‌های متغیرهای محیطی مختلف ارتباط دارد. رفع هر یک از مشکلات مزبور در یک یا چند لایه اطلاعاتی نیازمند زمان نسبتاً زیاد برای ویرایش و اصلاح خصوصیات مکانی، توصیفی، هندسی و زمانی است. در صورتی که موارد فوق اصلاح نشود، اجرای مدل‌های هوش مصنوعی با خطا مواجه خواهد شد.

۴-۹- بررسی تصویری داده‌ها

بررسی تصویری^۵ داده‌های مکانی و تجزیه و تحلیل الگوهای فضایی، یکی از مراحل مهم پیش‌پردازش داده‌ها محسوب می‌شود. در این مرحله، خصوصیات بصری و پویایی داده‌ها در بازه زمانی موردنظر و همچنین روابط بین متغیرهای محیطی مختلف مورد مشاهده دقیق قرار می‌گیرد. در برخی موارد، مراحل یکسان‌سازی خصوصیات مکانی و زمانی بر روی لایه‌های اطلاعاتی اعمال شده، اما در هنگام نمایش داده‌ها مشکلاتی به وجود می‌آید. به عنوان مثال، لایه‌های اطلاعاتی مختلف بر روی هم قرار نمی‌گیرند یا در یک لایه کاربری اراضی، پس از بررسی دقیق جزئیات آن، مشاهده می‌شود که فضای خالی بین دو پلی‌گون وجود دارد. این مورد، داده ازدست‌رفته^۶ نام دارد. قابلیت‌های جدید نرم‌افزارهای سامانه اطلاعات جغرافیایی این مرحله از پیش‌پردازش داده‌ها را آسان کرده است.

¹ Spatial mismatch

² Scale mismatch

³ Attribute mismatch

⁴ Temporal mismatch

⁵ Visualization analysis

⁶ Missing values

۴-۱۰- پاک سازی داده ها

پس از انجام بررسی های فنی و بصری داده ها و همچنین برقراری ارتباط میان متغیرها، در برخی موارد مشاهده می شود که داده اشتباه وجود دارد. استفاده از داده های اشتباه، موجب کاهش دقت پیش بینی مدل خواهد شد. در برخی مواقع این داده ها به عنوان داده پرت نیز شناخته می شوند. به عنوان مثال، هنگام بررسی داده های موقعیت فرسایش خندقی و ارتباط آن ها با دیگر عوامل محیطی، مشخص می شود که یک پدیده فرسایش خندقی در قسمت فوقانی یک کوه که حالت صخره ای دارد، ثبت شده است. در این حالت، به دلیل نبود خاک در دامنه صخره ای، امکان شکل گیری فرسایش خندقی وجود نداشته و داده مورد نظر یک داده پرت و اشتباه است. شناسایی داده های اشتباه و حذف آنها از مجموعه داده ها، پاک سازی داده^۱ نام دارد.

۴-۱۱- سازمان دهی داده ها

مدل های یادگیری ماشینی و الگوریتم های مختلف، تنها قابلیت کار با اعداد را دارند و امکان فراخوانی و تحلیل اطلاعات توصیفی (حتی اگر با حروف انگلیسی نوشته شوند) را ندارند. از آنجایی که برخی از متغیرهای مستقل از نوع کیفی هستند (مانند کاربری اراضی، سنگ شناسی، خاک شناسی و غیره)، این موضوع از اهمیت بالایی برخوردار خواهد بود. به عنوان مثال، بافت خاک یکی از متغیرهای اثرگذار بر رخداد فرسایش خندقی است که اطلاعات آن به صورت کیفی و اسمی ارائه می شود. در این موارد، برای هر یک از اجزای اطلاعاتی لایه مورد نظر یک کد تعریف می شود. در مورد مثال فوق، برای هر کلاس بافت خاک در نقشه، یک کد عددی (مثلاً ۱، ۲، ۳ و غیره) در نظر گرفته می شود. در هنگام معرفی متغیرهای ورودی مدل به مدل های هوش مصنوعی، نوع متغیر (کمی یا کیفی) نیز به مدل آموزش داده می شود. بنابراین مدل متوجه می شود که هنگام برخورد با کدهای عددی، مقیاس بزرگتری و کوچکتری بین

¹ Data cleaning

آن‌ها برقرار نکند. به عبارت دیگر، در سیستم کددهی، عدد ۴ (بافت خاک لومی) از عدد ۲ (بافت خاک رسی) بزرگتر نیست و هر دو، نمادهایی از کلاس‌های یک متغیر کیفی اسمی هستند. در این صورت، مدل، اعداد داخل لایه اطلاعاتی یک لایه کیفی را به عنوان کد مدنظر قرار می‌دهد. اقدامات فوق، سازمان‌دهی داده‌ها^۱ نامیده می‌شود و نقش مهمی در معرفی و پردازش اطلاعات دارد.

۴-۱۲- رفع خطای مدل رقومی ارتفاعی

مدل رقومی ارتفاعی (DEM)، به عنوان یکی از منابع اصلی ساخت نقشه‌های توپوگرافی (مانند درصد شیب و جهت شیب) و زمین‌ریخت‌سنجی (مانند انحنای سطح، انحنای مقطع، شاخص رطوبت توپوگرافی، شاخص توان جریان و غیره) مورد استفاده وسیع قرار می‌گیرد. از آنجایی که مدل رقومی ارتفاعی و متغیرهای موضوعی مشتق آن، همواره در مدل‌های هیدرولوژیکی و ژئومورفولوژیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ خطاهای موجود در لایه مدل رقومی ارتفاعی گاه‌ها موجب بروز اختلال در شبیه‌سازی رواناب و رسوب حوزه‌های آبخیز می‌شود.

مدل رقومی ارتفاعی از روش‌های مختلف نقشه‌برداری زمینی، فناوری پهپاد و محصولات و تصاویر ماهواره‌ای تولید می‌شود که هر کدام از مزایا و معایب خاصی برخوردارند. بنابراین، بررسی خطاهای احتمالی مدل رقومی ارتفاعی، با توجه ویژه به منبع تهیه آن، از اهمیت زیادی برخوردار است. به عنوان مثال، مدل رقومی ارتفاعی حاصل از سنجنده SRTM که کاربرد وسیعی در کشورهای مختلف جهان دارد، در مناطق کوهستانی با پوشش گیاهی متراکم، دارای خطا بوده و نیازمند اصلاح است (Su و همکاران، ۲۰۱۵). اثرات جذب و بازتاب برگ، شاخه و تنه درختان دلیل اصلی خطای مدل رقومی ارتفاعی در مناطق کوهستانی با پوشش گیاهی متراکم هستند (Farr و همکاران، ۲۰۰۷). به عنوان نمونه، Zhao و همکاران (۲۰۱۸) در یک مطالعه گسترده،

^۱ Arranging data

لایه‌های مدل رقومی مناطقی از جهان که پوشش گیاهی متراکمی دارند را اصلاح کردند. تاکنون روش‌های مختلفی برای رفع خطاهای احتمالی آن مطرح شده است. پژوهش متکان و همکاران (۱۳۸۶) نشان داد که از میان سه روش رفع خطای مدل رقومی ارتفاعی شامل DE, D8 و ترکیب D8 و DE، روش DE به دلیل تطابق شبکه زهکشی با نقشه‌های کاغذی و نیز رفع گودال‌های رقومی با در نظر گرفتن جهات صحیح زهکشی از بیشترین دقت برخوردار بود. در نهایت، علی‌رغم اهمیت این موضوع، فرسایش‌های خندقی عموماً در شرایط پوشش گیاهی فقیر ایجاد شده و رفع خطای مدل رقومی ارتفاعی در صورت استفاده از داده‌های سنجنده SRTM، الزامی نیست.

۴-۱۳- روش‌های آماری پیش‌پردازش

برای مدل‌سازی استعداد رخداد فرسایش خندقی از متغیرهای محیطی مختلفی می‌توان استفاده کرد. اگرچه فرسایش خندقی یک پدیده پیچیده است که از تأثیر همزمان چندین عامل محیطی به وجود می‌آید؛ اما برخی از متغیرهای محیطی از نظر مفهومی یا محاسباتی مشابه همدیگر هستند. بسته به شرایط محیطی یک حوزه آبخیز، امکان همبستگی متغیرهای محیطی وجود دارد. بنابراین، بررسی مشابهت متغیرهای محیطی از نظر آماری پیش از اجرای مدل ضروری است.

هم‌خطی چندگانه^۱، یکی از موارد مهم در مدل‌سازی است که بررسی آن توسط محققان توصیه شده است (Alin, ۲۰۱۰). هم‌خطی چندگانه، زمانی اتفاق می‌افتد که دو یا بیش از دو متغیر مستقل (پیش‌بینی‌کننده) در مدل‌سازی نسبت به یکدیگر از همبستگی بالایی برخوردار باشند (Graham, ۲۰۰۳). هم‌خطی چندگانه، تأثیرات نامطلوبی بر نتایج مدل‌سازی دارد (Lavery و همکاران، ۲۰۱۹). موضوع هم‌خطی چندگانه در مطالعات پیش‌بینی استعداد فرسایش خندقی نیز مورد توجه قرار گرفته است (Ghorbanzadeh و همکاران، ۲۰۲۰؛ Pal و همکاران، ۲۰۲۰؛ Lana و همکاران،

¹ Multi-collinearity

۲۰۲۲). در این پژوهش‌ها معمولاً از دو معیار آماری برای بررسی همخطی چندگانه شامل عامل تورم واریانس^۱ (VIF) و تحمل^۲ (TOL) استفاده می‌شود (Arabameri و همکاران، ۲۰۲۰؛ Javidan و همکاران، ۲۰۲۰؛ Conoscenti و Rotigliano، ۲۰۲۰؛ Huang و همکاران، ۲۰۲۳؛ Setargie و همکاران، ۲۰۲۳). آماره‌های عامل تورم واریانس و تحمل با استفاده از رابطه‌های (۳) و (۴) محاسبه می‌شوند که در این روابط، R^2 : ضریب تبیین است.

$$VIF = \frac{1}{(1-R^2)} \quad (3)$$

$$TOL = 1 - R^2 \quad (4)$$

هنگامی که معیار عامل تورم واریانس کمتر از ۵ باشد (در برخی از منابع آستانه ۱۰ مطرح شده است)، همخطی چندگانه بین متغیرهای مستقل وجود ندارد. همچنین، در مطالعاتی که مقدار آماره تحمل بزرگ‌تر از ۰/۱ باشد، همخطی چندگانه بین متغیرهای مستقل مشاهده نمی‌شود (Hasanuzzaman و همکاران، ۲۰۲۳). در صورتی که مشکل همخطی چندگانه بین دو یا چند متغیر وجود داشته باشد، راه‌هایی برای مدیریت و رفع مشکل همخطی چندگانه پیشنهاد شده که در ذیل به آنها اشاره شده است.

۴-۱۳-۱- حذف متغیرهای دارای همبستگی زیاد

در این روش، یک یا چند متغیر که دارای همخطی چندگانه هستند، از فهرست متغیرهای مستقل حذف می‌شوند. حذف این متغیرها می‌تواند موجب کاهش خطای استاندارد مجموعه متغیرهای مستقل شده و در نهایت پایداری مدل را افزایش دهد. بزرگ‌ترین نقطه ضعف این رویکرد آن است که هر زمان که متغیرهای مستقل (پیش‌بینی‌کننده‌ها) کنار گذاشته شوند، برخی از اطلاعات از بین می‌رود. با این حال، اگر متغیرهای مستقل حذف‌شده دارای هم‌پوشانی بالایی باشند، تأثیرات منفی این روش کنترل می‌شود.

¹ Variance inflation factor

² Tolerance

۴-۱۳-۲- استفاده از روش های کاهش ابعاد

تحلیل مؤلفه های اصلی^۱ (PCA)، یکی از معروف ترین روش های آماری در زمینه کاهش ابعاد^۲ متغیرها (یا به عبارتی کاهش ویژگی ها) است که در راستای رفع مشکل هم خطی چندگانه می تواند مورد استفاده قرار گیرد (Lafi و Kaneene، ۱۹۹۲). استفاده از PCA یا یک تکنیک کاهش ابعاد مشابه، برای یک مجموعه داده که چند خطی بودن را نشان می دهد، از دست دادن اطلاعات را محدود می کند و می تواند مدل مناسب تری نسبت به روش حذف ساده متغیرهای همبسته، ایجاد کند. با این حال، ترکیب متغیرها به این روش، تمایز بین تأثیرات انفرادی متغیرها را غیر ممکن می کند. این روش در برخی از مطالعات مدل سازی مکانی زمین ریخت شناسی مورد استفاده قرار گرفته است (Chen و همکاران، ۲۰۲۳؛ Kab و همکاران، ۲۰۲۳؛ Li و همکاران، ۲۰۲۳).

۴-۱۳-۳- استفاده از رگرسیون تیغه ای

در زمانی که تعداد متغیرهای مستقل در مجموعه بیشتر از تعداد مشاهدات باشد، یا زمانی که یک مجموعه داده دارای هم خطی چندگانه باشد، رگرسیون تیغه ای^۳ مورد استفاده قرار می گیرد (جعفری و دین پژوه، ۱۳۹۴). هنگامی که مسأله هم خطی چندگانه رخ می دهد، کمینه مربعات بی طرف بوده و واریانس ها بزرگ هستند. این موضوع باعث می شود که مقادیر پیش بینی شده از مقادیر واقعی بسیار دور باشند. در رگرسیون تیغه ای، اولین قدم استاندارد سازی متغیرها (اعم از وابسته و مستقل) بوده که از طریق تفریق میانگین آنها و تقسیم بر انحراف معیار آنها حاصل می شود (Lee و همکاران، ۲۰۱۸). تا آنجا که به استاندارد سازی مربوط می شود، تمام محاسبات رگرسیون تیغه ای بر اساس متغیرهای استاندارد شده است. هنگامی که ضرایب رگرسیون نهایی نمایش داده می شود، آنها به مقیاس اصلی خود باز می گردند. فرضیات آماری

¹ Principal component analysis

² Dimensionality reduction

³ Ridge regression

رگرسیون تیغه‌ای مانند رگرسیون خطی است: خطی بودن، واریانس ثابت و استقلال. با این حال، از آنجایی که رگرسیون تیغه‌ای محدودیت‌های اطمینان را ندارد، فرض توزیع خطاهای عادی در نظر گرفته نمی‌شود (Mohammadi, ۲۰۲۲). توضیحات کامل و روابط مربوط به رگرسیون تیغه‌ای در مطالعه Assaf و همکاران (۲۰۱۹) ارائه شده است.

فصل پنجم

ماشین بردار پشتیبان، جنگل تصادفی و درخت رگرسیون پیشرفته

۵-۱- مقدمه

همان‌گونه که پیشتر گفته شد، یک گروهی مهم از مدل‌های هوش مصنوعی به نام مدل‌های یادگیری ماشینی شناخته می‌شوند. در این فصل، به معرفی مدل‌های ماشین-بردار پشتیبان، جنگل تصادفی و درخت رگرسیونی پیشرفته پرداخته شده است. این مدل‌ها در محیط‌های برنامه‌نویسی و نرم‌افزارهای مختلفی قابل اجرا هستند. در این کتاب به منظور اجرای آنها از نرم‌افزار R استفاده خواهد. مراحل نصب نرم‌افزار و استفاده از کدهای زبان برنامه‌نویسی R در ادامه تشریح شده است.

۵-۲- نصب نرم‌افزارهای R و Rstudio

نرم‌افزار R، یکی از به‌روزترین و قدرتمندترین بسترهای تجزیه و تحلیل داده و مدل-سازی است. این نرم‌افزار که مبتنی بر زبان برنامه‌نویسی R است، قابلیت‌های بسیار زیادی برای تحلیل اطلاعات و داده‌های مکانی دارد. این نرم‌افزار آماری، از بسته‌های آماده^۱ نیز استفاده می‌کند. این نرم‌افزار رایگان و متن‌باز، تحت اجازه‌نامه عمومی همگانی گنو توسط شرکت R Core Team عرضه و به‌صورت رایگان در دسترس عموم قرار داده شده است. نرم‌افزار R، بیشتر زمینه‌های آمار کاربردی مانند تحلیل سری‌های زمانی، رگرسیون خطی و غیرخطی، آزمون فرض‌های کلاسیک، کدگذاری، خوشه‌بندی و همچنین انواع مدل‌سازی‌ها را پوشش داده و همچنین نرم‌افزار قدرتمندی برای ایجاد شکل‌ها و تصاویر گرافیکی و نمودارها است. یکی از مزیت‌های اصلی این نرم‌افزار، قابلیت بالای آن در پردازش داده‌های حجیم است. امکان توسعه این نرم‌افزار با افزودن بسته‌های ایجاد شده توسط کاربران خبره، یکی از جذابیت‌های آن به‌شمار می‌رود. از مهم‌ترین مزایای استفاده از زبان برنامه‌نویسی R در مدل‌سازی مکانی، قابلیت آن در پردازش داده‌های مکانی با فرمت‌های مختلف است که علاوه بر در نظر گرفتن سامانه مختصات جغرافیایی داده‌ها، امکان فراخوانی، پردازش و ذخیره داده‌های مکانی

^۱ Package

----- اصول مدل‌سازی مکانی فرسایش خندقی با استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی/۸۱

در این زبان برنامه‌نویسی فراهم شده است. به منظور نصب نرم‌افزار R، همان‌گونه که گفته شد، این نرم‌افزار به صورت رایگان از سایت Cran (<https://cran.r-project.org>) قابل دانلود و نصب است.

از آنجایی که محیط نرم‌افزار R ساده است، برنامه‌نویسی و اجرای کدها ممکن است برای کاربران مبتدی جذابیت کمتری داشته باشد. بنابراین، نرم‌افزار Rstudio برای افزایش سهولت کار با نرم‌افزار R ساخته شده است. به منظور نصب نرم‌افزار Rstudio، می‌توان جدیدترین نسخه را از سایت Rstudio (<https://www.rstudio.com>) به صورت رایگان دریافت کرد. هنگامی که این نرم‌افزار نصب می‌شود، دیگر نیازی به بازکردن نرم‌افزار R نیست و تمامی کدها در نرم‌افزار Rstudio اجرا می‌شوند. شایان ذکر است محیط نرم‌افزار Rstudio، دارای چهار بخش اصلی است که برای نوشتن کدها (فرمان‌ها)، اجرای کدها، ثبت متغیرها و داده‌ها و نمایش شکل‌ها و گرافیک‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۵-۳- نصب بسته‌های تخصصی مورد نیاز

به منظور انجام پردازش‌ها و تحلیل‌ها، بسته‌های (پکیج‌های) مورد نیاز آن‌ها باید بر روی نرم‌افزار R نصب شود. بسته‌های نرم‌افزار R، به دو نوع پایه و تخصصی تقسیم می‌شوند. بسته‌های پایه به طور خودکار بر روی نرم‌افزار R موجود هستند و برای انجام عملیات‌های آماری و ریاضی پایه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. بسته‌های تخصصی بر اساس نیاز باید بر روی نرم‌افزار نصب شوند. نصب بسته‌ها با دو روش برخط (Online) و غیربرخط (Offline) قابل انجام است. نصب بسته‌ها از منوی Tools در نرم‌افزار Rstudio و گزینه Install packages صورت می‌پذیرد. به منظور انجام مدل‌سازی استعداد وقوع فرسایش خندقی در محیط نرم‌افزار Rstudio، بسته‌های تخصصی زیر باید به ترتیب نصب شوند.

۵-۳-۱- بسته raster

بسته raster، یکی از بسته‌های مهم در پهنه‌بندی استعداد وقوع فرسایش خندقی است که پردازش لایه‌های رستری را فراهم می‌سازد. این بسته قادر است عملگرهای مختلفی که در نرم‌افزارهای سیستم اطلاعات جغرافیایی وجود دارند را در محیط نرم‌افزار rstudio اجرا کند. هنگامی که حجم لایه‌های رستری زیاد باشد و حافظه رایانه کم باشد؛ این بسته برای تجزیه و تحلیل داده‌ها و پردازش‌ها بسیار مفید است. پردازش قطعه‌ای لایه‌های رستری، یکی دیگر از ویژگی‌های مهم این بسته است که قابلیت مناسبی برای فراخوانی و پردازش لایه‌های رستری حجیم ایجاد می‌کند.

۵-۳-۲- بسته sdm

بسته sdm به منظور انجام مدل‌سازی مکانی طراحی شده و با استفاده از آن می‌توان فرآیند مدل‌سازی یادگیری ماشینی برای شناخت روابط بین وقوع فرسایش‌های خندقی و عوامل محیطی استفاده کرد. در این بسته، مدل‌های یادگیری مختلفی تعبیه شده است که برای ارزیابی استعداد وقوع فرسایش‌های خندقی بستر مناسبی را فراهم کرده است. اجرای مدل‌های یادگیری ماشینی در این کتاب براساس بسته sdm انجام شده که به وسیله Naimi و Araújo (۲۰۱۶) توسعه یافته است.

۵-۳-۳- بسته rgdal

این بسته به عنوان کتابخانه ابزارهای زمین‌مکانی (Geospatial) شناخته شده است که فراخوانی و کار با لایه‌های رقومی تهیه شده در سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی را فراهم می‌سازد. به عنوان مثال، سیستم مختصات لایه‌های برداری و سلولی با استفاده از این بسته شناسایی و تنظیم می‌شود. این بسته نمایش اطلاعات زمین‌مکانی مختلف را به عهده دارد.

۵-۳-۴- بسته maptools

این بسته دارای ابزارهای مختلفی است که پردازش و تغییر فرمت لایه های مختلف را انجام می دهد. به عنوان مثال می توان داده هایی را که با فرمت kml از سامانه گوگل ارث استخراج شده اند را به فرمت برداری تبدیل کرد. شناسایی و اصلاح فضای خالی بین پلی گون های یک لایه برداری، از جمله کارهایی است که می توان با عملگرهای این بسته انجام داد. همچنین با این بسته، می توان اطلاعات موجود در جدول توصیفی لایه های رقومی را فراخوانی و اصلاح کرد.

۵-۳-۵- بسته ModelMap

عملگرهای موجود در این بسته شرایط را برای اجرای آموزش و اعتبارسنجی در فرآیند مدل سازی را فراهم می سازد. تقسیم تصادفی خندق ها به دو کلاس آموزش و اعتبارسنجی نیز به وسیله ابزارهای این بسته صورت می پذیرد. تولید نمودارها و جدول ها حاصل از مراحل مدل سازی، از جمله کارکردهای بسته Modelmap است. ایجاد و فراخوانی لایه های با فرمت img با استفاده از این بسته انجام می شود. اجرای مدل هایی از جمله جنگل تصادفی، جنگل رگرسیونی چارک و جنگل های شرطی با استفاده از این بسته امکان پذیر است.

۵-۳-۶- بسته sp

بسته sp، برای پردازش داده های دو بعدی و سه بعدی اطلاعات جغرافیایی استفاده می شود. ترسیم نقشه ها، یکی دیگر از قابلیت های این بسته است. استخراج اطلاعات آماری از لایه های رقومی توسط عملگرهای این بسته انجام می گیرد. تبدیل سیستم های مختصات لایه های رقومی نیز در این بسته تعریف شده است. پایگاه داده^۱ برای اجرای مدل سازی استعداد وقوع فرسایش خندقی با ابزارهای این بسته قابل انجام است.

^۱- Data frame

۵-۳-۷- بسته dismo

این بسته به منظور مدل سازی مکانی پدیده های زیست محیطی طراحی شده است. اجرای مدل های پایه از جمله بیشینه بی نظمی (بیشینه آنتروپی) و مدل خطی تعمیم یافته، در این بسته در نظر گرفته شده است. اعتبارسنجی مدل ها با استفاده از معیار مساحت زیرمنحنی مشخصه عملکرد انجام می شود. چسبیدن لایه های پیش بینی کننده (عوامل محیطی) مدل سازی استعداد فرسایش خندقی و ایجاد پایگاه داده، از جمله عملکرد ابزارهای این بسته است.

۵-۳-۸- بسته gbm

مدل رگرسیونی پیشرفته تعمیم یافته^۱، یکی از مدل های پرکاربرد در زمینه مدل سازی مکانی پدیده های طبیعی است که با استفاده از این بسته اجرا می شود. این بسته قادر است تا مدل رگرسیون لجستیک را اجرا کند. تعیین برهم کنش عوامل محیطی و وقوع فرسایش های خندقی، یکی از مهم ترین کاربردهای این بسته است.

۵-۳-۹- بسته RandomForest

این بسته به صورت کاملاً تخصصی برای اجرای مدل جنگل تصادفی ساخته شده است. شناسایی رابطه میان عوامل محیطی و رخداد های فرسایش خندقی در مرحله آموزش و همچنین تعیین دقت پیش بینی مدل جنگل تصادفی با استفاده از این بسته انجام می شود. از آنجایی که مدل جنگل تصادفی به عنوان یکی از پیچیده ترین مدل های مبتنی بر درخت تصمیم گیری شناخته شده است؛ تنظیم پارامترهای مدل مانند تعداد درختان تصمیم گیری و نسبت داده های آموزش و اعتبارسنجی در این بسته تعبیه شده است.

¹- Generalized Boosted Regression

۵-۳-۱۰- بسته biomod2

در این بسته، بستری فراهم شده است که بتوان به ترکیب^۱ مدل‌ها پرداخت. این بسته اجازه می‌دهد تا ده مدل با یکدیگر ترکیب شوند. تعیین متغیرهای مستقل و وابسته و ساخت چارچوب معنایی مدل با ابزارهای این بسته انجام می‌شود. یکی از کاربردهای این بسته، مدل‌سازی براساس داده‌های سناریوی آینده^۲ است. به عنوان مثال، باتوجه به تغییر کاربری که در حال حاضر وجود دارد و کاربری چند سال آینده با وضعیت کنونی متفاوت خواهد بود؛ استعداد وقوع خندق‌ها در شرایط آینده می‌تواند پیش‌بینی شود.

۵-۴- تعیین مسیرکاری

یک پوشه در رایانه، به عنوان محیط ذخیره لایه‌های ورودی و نتایج مدل‌ها در نظر گرفته می‌شود. مسیر این پوشه باید برای نرم‌افزار مشخص باشد که به عنوان مسیرکاری^۳ شناخته می‌شود. این اقدام نیز موجب تسریع فراخوانی لایه‌ها و انجام راحت‌تر پردازش‌ها می‌شود. کد setwd، مسیر کاری را تعریف می‌کند. در مثال زیر، یک مسیر کاری تعریف شده و پوشه‌ای فرضی، به نام model به عنوان محل ذخیره لایه-های ورودی و خروجی در نظر گرفته شده است.

```
setwd('d:/model')
```

۵-۵- فراخوانی بسته‌های موردنیاز

پس از نصب بسته‌های موردنیاز در مراحل قبل، بسته‌ها باید فراخوانی شوند تا بتوان از آن‌ها برای پردازش‌ها و تحلیل‌ها استفاده کرد. به منظور فراخوانی بسته‌های نصب شده، از کد library استفاده می‌شود. بنابراین، برای فراخوانی بسته‌های مورد نیاز پهنه‌بندی استعداد وقوع فرسایش خندقی، کدهای زیر در محیط rstudio اجرا می‌شود:

```
library('raster')  
library('rgdal')
```

^۱- ensemble

^۲- future projection

^۳- Work-directory

```
library('maptools')
library('ModelMap')
library('sp')
library('dismo')
library('gbm')
library('randomForest')
library('biomod2')
```

۵-۶- ورود اطلاعات مکانی فرسایش‌های خندقی به محیط نرم‌افزار R

اصلی‌ترین اطلاعات رقومی در پهنه‌بندی استعداد وقوع فرسایش خندقی، لایه برداری موقعیت خندق‌ها است. لایه برداری مناطق فاقد خندق نیز با فرمت برداری تهیه شده و با لایه موقعیت خندق‌ها ترکیب می‌شود. در جدول توصیفی لایه ترکیبی به وجود آمده، اعداد صفر و یک، به ترتیب برای نقاط بدون خندق و نقاط پیشانی خندق‌ها وارد می‌شوند. به منظور ورود لایه برداری ترکیبی به محیط نرم‌افزار `rstudio`، از تابع `readShapeSpatial` استفاده می‌شود. با فرض این که نام لایه برداری ترکیبی `points01` باشد؛ از طریق فرمان زیر می‌توان آن را به محیط نرم‌افزار وارد کرد. در این فرمان، لایه ورودی به طور فرضی، به نام `Gu` (مخفف `Gully`) نام‌گذاری شده است

```
Gu <- readShapeSpatial('points01/points01.shp')
```

به منظور نمایش داده‌های ترکیبی (وقوع و عدم وقوع خندق) در محیط گرافیکی نرم‌افزار `rstudio`، از فرمان زیر استفاده می‌شود:

```
plot(Gu)
```

۵-۷- ورود لایه‌های محیطی به محیط نرم‌افزار R

همان‌گونه که در مراحل قبلی تشریح شد، فرمت لایه‌های عوامل پیش‌بینی‌کننده باید از نوع اسکی باشد. لایه‌های اسکی با تابع `list.files` می‌توانند به محیط نرم‌افزار وارد شوند. تابع مذکور دارای تعدادی عضو یا نماد مشخص است که باید توسط کاربران مشخص شوند:

```
lst <- list.files(pattern='asc$', path='ascii/', full.name=T)
```

----- اصول مدل سازی مکانی فرسایش خندقی با استفاده از مدل های هوش مصنوعی / ۸۷

در فرمان فوق، نماد path نشان دهنده مسیر پوشه ای است که لایه های اطلاعات ورودی با فرمت اسکی در آن ذخیره شده اند. همچنین، نماد full.name نشان می دهد که نام لایه ها در مدل سازی مهم است و باید هر یک از متغیرها با نام خاص خود وارد مدل سازی شوند. متغیر تعریف شده در فرمان فوق، با نام فرضی lst ذخیره شده است.

۵-۸- اتصال لایه های محیطی و ایجاد بسته اطلاعاتی

به منظور تسهیل در معرفی لایه های محیطی به مدل به عنوان مجموعه متغیرهای مستقل، انجام فرآیند چسباندن لایه های محیطی به یکدیگر ضروری است. تابع stack می تواند لایه های محیطی را به یک فایل مستقل (پایگاه داده عوامل محیطی) تبدیل کند تا به راحتی برای مدل سازی استفاده شود. در فرمان زیر، می توان مشاهده کرد که یک متغیر مشخص به نام preds با اتصال لایه های محیطی تعریف می شود. متغیر preds به عنوان متغیر مستقل (متغیر پیش بینی کننده) در مراحل بعدی وارد مدل سازی می شود.

```
preds <- stack(lst)
```

۵-۹- نمایش لایه های محیطی و موقعیت فرسایش های خندقی در نرم افزار R

به منظور نمایش لایه های محیطی و اطمینان از اتصال آنها، از تابع plot استفاده می شود. هنگامی که فرمان زیر اجرا شود؛ مجموعه لایه های محیطی در قسمت گرافیکی نرم افزار نشان داده می شود.

```
plot(preds)
```

به منظور اطمینان از سیستم مختصات های یکسان لایه های موقعیت خندق ها و لایه های عوامل محیطی، لایه خندق و یکی از لایه های عوامل محیطی، با فرمان زیر، روی هم گذاری می شود.

```
plot(preds[[1]])  
plot(Gu, add=T)
```

۵-۱۰- تعیین متغیرهای وابسته و مستقل

یکی از پایه‌ای‌ترین مراحل مدل‌سازی، معرفی متغیرهای مستقل و وابسته است. با استفاده از فرمان زیر، رابطه میان متغیرهای مستقل و وابسته تعریف می‌شود. در فرمان زیر که از تابع `sdmData` استفاده می‌کند، نشان می‌دهد که سرستون `Id` در جدول توصیفی فایل `Gu` (لایه موقعیت نقاط دارای خندق و فاقد خندق)، به عنوان متغیر وابسته معرفی شده و تمام عوامل دیگر به عنوان متغیر مستقل در نظر گرفته شده‌اند. متغیر `d` در فرمان زیر در مراحل بعدی برای معرفی رابطه میان اجزای مدل‌سازی (متغیرهای مستقل و وابسته) مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

```
d <- sdmData(formula=Id~., train=Gu,predictors=preds)
```

در فرمان فوق، علامت `~` بیان‌گر تابعیت متغیر وابسته از متغیرهای مستقل است. هنگامی که بعد از علامت `~` نقطه گذاشته شود، این بدان معناست که متغیر وابسته تابعی از همه متغیرهای مستقل است. درخصوص مدل‌سازی استعداد وقوع فرسایش خندقی، عوامل محیطی مختلف به عنوان متغیر مستقل و وقوع خندق، به عنوان متغیر وابسته تعریف می‌شود.

۵-۱۱- ایجاد پایگاه داده (دیتافرم) در محیط R به منظور دسته‌بندی داده‌ها

هنگام اجرای تابع `sdmData` یک پایگاه داده برای انجام مدل‌سازی ایجاد می‌شود. این تابع لایه نقاط (لایه `Gu` تشریح شده در زیربخش قبلی) را با لایه‌های عوامل محیطی روی هم‌گذاری کرده و تمامی ارزش پیکسل‌های لایه‌های عوامل محیطی که دارای نقاط خندقی و فاقد خندق هستند را استخراج می‌کند. بنابراین، یک پایگاه داده تشکیل می‌شود که در ستون اول، متغیر وابسته بوده و اعداد صفر و یک در ردیف‌های مختلف ارائه شده‌اند و در سایر ستون‌ها متغیرهای مستقل قرار دارند و اعداد متناظر با نقاط دارای خندق و فاقد خندق ارائه می‌شوند.

۵-۱۲- مدل ماشین بردار پشتیبان

۵-۱۲-۱- خصوصیات و ساختار مدل

مدل ماشین بردار پشتیبان^۱، یکی از مشهورترین مدل های یادگیری ماشینی است که عملکرد بسیار خوبی در رویکرد مدل سازی رگرسیونی^۲ و طبقه بندی^۳ دارد (Ahmad و همکاران، ۲۰۱۴). در مدل سازی رگرسیون، متغیر وابسته از نوع کمی پیوسته بوده و هر مقدار و بازه عددی را شامل می شود. این درحالی است که در مدل سازی طبقه بندی، متغیر وابسته از نوع کمی دو حالتی بوده و تنها دو حالت رخداد و عدم رخداد را در نظر می گیرد.

در مدل سازی استعداد وقوع فرسایش خندقی، از مدل سازی طبقه بندی استفاده می شود. اگر در یک مطالعه، رشد خندق ها براساس سری زمانی متغیرهای محیطی شبیه سازی شود؛ مدل سازی رگرسیونی، مورد نیاز خواهد بود. طبقه بندی در مدل ماشین بردار پشتیبان براساس تفکیک داده ها در فضا به دو گروه با توجه به صفحه جداکننده^۴ و حاشیه طبقات^۵ است. در این مدل، صفحه تفکیک کننده داده ها باید به گونه ای قرار گیرد که بیشترین فضا در بین داده های دو گروه به وجود بیاید.

این مدل دارای چند کرنل^۶ مختلفی است که از مهم ترین آن ها می توان به خطی^۷ (L)، تابع پایه شعاعی^۸ (RBF)، سیگموئیدی^۹ (S) و چندجمله ای^{۱۰} (P) اشاره کرد. در حقیقت، سه کرنل تابع پایه شعاعی، سیگموئیدی و چندجمله ای از نوع غیرخطی

¹ Support vector machine

² Regression

³ Classification

⁴ Hyperplane

⁵ Margin

⁶ Kernel

⁷ Linear

⁸ Radial basis function

⁹ Sigmoid

¹⁰ Polynomial

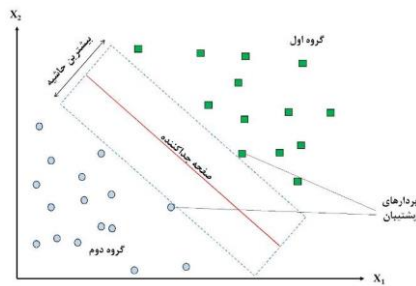
هستند. عموماً داده‌های مربوط به پدیده‌های طبیعی مانند رخداد فرسایش خندقی که تحت تأثیر عوامل محیطی متعددی است، براساس کرنل خطی قابل پردازش نیستند. انتخاب نوع کرنل، یک تصمیم بزرگ در مدل‌سازی با مدل ماشین‌بردار پشتیبان است و بسته به ماهیت داده‌ها عملکرد کرنل‌ها متفاوت خواهد بود (Maji و همکاران، ۲۰۱۲). براساس پژوهش Rahmati و همکاران (۲۰۱۷)، کرنل‌های مدل ماشین‌بردار پشتیبان در زمینه پیش‌بینی استعداد وقوع خندق در حوزه آبخیز کشکان- پل‌دختر عملکردهای مختلفی از خود نشان دادند و بالاترین دقت پیش‌بینی، به کرنل تابع پایه شعاعی اختصاص یافت.

همان‌گونه که در شکل ۵-۱ نشان داده شده است، مدل ماشین‌بردار پشتیبان، داده‌ها را به دو گروه تقسیم می‌کند. قطعاً با در نظر گرفتن یک صفحه جداکننده، حالت‌های مختلفی برای تفکیک داده‌ها به دو گروه وجود دارد. در مدل ماشین‌بردار پشتیبان، با در نظر گرفتن صفحه جداکننده، حالتی مدنظر قرار می‌گیرد که بیشترین حاشیه بین دو گروه داده ایجاد شود. به عبارت دیگر، بیشترین حاشیه، مطلوب‌ترین وضعیت در پردازش داده در مدل ماشین‌بردار پشتیبان قلمداد می‌شود. در حالتی که بیشترین حاشیه به دست آید؛ صفحه جداکننده نیز به نام صفحه جداکننده بهینه^۱ شناخته می‌شود. همچنین، در ساختار مدل ماشین‌بردار پشتیبان، داده‌هایی که کمترین فاصله را از صفحه جداکننده دارند، بردار پشتیبان^۲ نام دارند.

^۱ Optimal hyperplane

^۲ Support vector

----- اصول مدل سازی مکانی فرسایش خندقی با استفاده از مدل های هوش مصنوعی ۹۱



شکل ۵-۰- ساختار مدل ماشین بردار

پشتیبان (Rahmati و همکاران، ۲۰۱۷)

مزیت های مدل ماشین بردار پشتیبان عبارتند از (Wang و Shi، ۲۰۱۳؛ Tang و Tian، ۲۰۱۷):

- در شرایطی که ابعاد داده وسیع بوده و خصوصیات مختلفی برای طبقه بندی داده ها مدنظر باشد، کارایی مدل ماشین بردار پشتیبان بهتر است.
 - این مدل با داشتن کرنل های مختلف، قابلیت پردازش داده های با ماهیت مختلف را دارد.
 - امکان استفاده از الگوریتم های جانبی (مانند kernel trick) که میزان شباهت در فضای انتقال داده ها را محاسبه کرده و پردازش و طبقه بندی داده های مربوط به پدیده های پیچیده را تسهیل می کند.
 - مدل ماشین بردار پشتیبان به داده های پرت^۱، حساس نیست.
 - این مدل از قابلیت بالایی برای تعمیم^۲ نتایج، برخوردار است.
 - علاوه بر مدل سازی، در زمینه های وسیع دیگری مانند پردازش تصاویر ماهواره ای کاربرد دارد.
- با این حال، از مهم ترین محدودیت های مدل ماشین بردار پشتیبان می توان به موارد زیر اشاره کرد (Cervantes و همکاران، ۲۰۲۰):

¹ Outliers

² Generalization

- در برخی موارد، انتخاب کرنل مناسب، تصمیم آسانی نیست.
- در صورتی که حجم داده‌ها بسیار زیاد باشد، کارایی مدل ماشین‌بردار پشتیبان کمتر خواهد شد.
- به دلیل پیچیدگی زیاد این مدل، پردازش و مدل‌سازی در هنگام کار با داده‌های حجیم، نیازمند زمان زیاد است.
- عملکرد این مدل در شرایطی که داده‌های رخداد و عدم رخداد نامتعادل^۱ باشند، کاهش می‌یابد.
- در شرایطی که متغیر وابسته چندحالتی (مانند کلاس‌های مختلف شدت فرسایش) باشد؛ مدل ماشین‌بردار پشتیبان کارایی کمتری دارد. این نوع مدل-سازی، کاملاً متفاوت با مدل‌سازی استعداد رخداد فرسایش خندقی است.
- دو پارامتر مهم در مدل ماشین‌بردار پشتیبان، عبارتند از: ضریب هزینه (C) و گاما (γ)، که تنظیم دقیق آن‌ها دشوار بوده و تجسم آن‌ها در ساختار مدل، راحت نیست.

۵-۱۲-۲- شیوه اجرای مدل

مدل ماشین‌بردار پشتیبان در محیط‌های مختلف برنامه‌نویسی از جمله متلب، پایتون و R قابل اجرا است و حتی اخیراً نرم‌افزارهای دیگری که نیاز به مهارت برنامه‌نویسی ندارند، امکان اجرای این مدل را فراهم کرده‌اند. به عنوان مثال، نرم‌افزار ModEco که توسط دانشگاه کالیفرنیا طراحی و توسعه داده شده است، بدون نیاز به مهارت برنامه‌نویسی، امکان اجرای مدل ماشین‌بردار پشتیبان را برای مدل‌سازی مکانی فراهم کرده است. شایان‌ذکر است که این مدل در برخی از نرم‌افزارهای آماری و تحلیل داده (مانند Statistica) نیز تعبیه شده است؛ اما باید توجه داشت که در صورت نیاز به

¹ Unbalanced

----- اصول مدل سازی مکانی فرسایش خندقی با استفاده از مدل های هوش مصنوعی ۹۳

اجرای مدل سازی مکانی که داده های ورودی آن نقشه است، حتماً باید از نرم افزارهای برنامه نویسی فوق و یا مدل ModEco استفاده کرد.

با عنایت به قابلیت های مهم زبان برنامه نویسی R، در این کتاب از محیط نرم افزار R برای اجرای مدل ماشین بردار پشتیبان و مدل سازی استعداد رخداد فرسایش خندقی استفاده می شود. پس از ورود داده ها و معرفی متغیرها که در قسمت های پیشین تشریح شد؛ به منظور اجرای مدل ماشین بردار پشتیبان از فرمان زیر استفاده می شود:

```
m <- sdm(Id~,data=d,methods='svm',test.percent=30,n=1,replicate='subsampling')
```

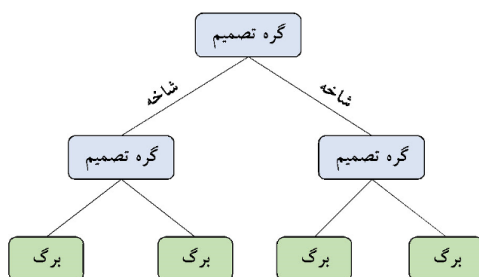
بسته sdm شرایط را برای اجرای مدل ماشین بردار پشتیبان فراهم می کند. رابطه میان متغیرهای وابسته و مستقل در عضو (المان یا نماد) اول (Id~.) تابع sdm تعریف شده است. در عضو (المان یا نماد) دوم این تابع، داده هایی که برای مدل سازی آماده شده اند، معرفی می شود (data=d). در حقیقت پایگاه داده ساخته شده (d) به عنوان داده به تابع معرفی می شود. در عضو (المان یا نماد) سوم نیز نوع مدل تعیین شده است (methods='svm').

برای مدل سازی استعداد وقوع فرسایش خندقی، داده ها باید به دو گروه آموزش و اعتبارسنجی تبدیل شوند. معمولاً داده های گروه آموزش ۷۰ درصد داده ها را شامل شده و سی درصد باقی مانده به گروه اعتبارسنجی تعلق می گیرد. در این فرمان نیز در قسمت test.percent ۳۰ درصد در نظر گرفته شده است. پارامتر n در این فرمان، تعیین کننده تعداد دفعات تکرار مدل سازی است. هرگاه بخواهیم در دفعات مختلف تقسیم تصادفی داده ها به دو گروه آموزش و اعتبارسنجی را انجام دهیم، می توانیم پارامتر n را افزایش دهیم. در عضو (المان یا نماد) آخر این تابع، روش مورد نظر برای تشکیل گروه های آموزش و اعتبارسنجی قابل انتخاب است. در فرمان فوق روش subsampling انتخاب شده است. باید توجه شود که متغیر مدل سازی m تعریف شده است تا در مراحل بعدی بتوان از آموخته های مدل برای تعمیم نتایج مدل سازی به بقیه سلول های منطقه استفاده کرد.

۵-۱۳- مدل جنگل تصادفی

۵-۱۳-۱- خصوصیات و ساختار مدل

قبل از بیان مدل جنگل تصادفی^۱، معرفی مدل درخت تصمیم‌گیری^۲ (DT) به صورت خلاصه کمک شایانی به درک خصوصیات و ساختار مدل جنگل تصادفی خواهد کرد. درخت تصمیم‌گیری، مدل ساده‌ای است که براساس تقسیم و تفکیک داده‌ها، ساختاری مشابه یک درخت واژگون را ترسیم می‌کند و به همین دلیل به نام درخت تصمیم‌گیری شهرت یافته است. این مدل به عنوان یک الگوریتم رایج یادگیری نظارت شده نیز در زمینه‌های مختلف، به ویژه پردازش تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده قرار گرفته است (قاسمی اسفهلان و همکاران، ۱۳۹۴). هنگام پردازش داده‌ها و انجام گروه‌بندی آن‌ها، کافی است که چند سؤال ساده درباره خصوصیات داده‌ها مطرح شود. در این صورت امکان تقسیم داده‌ها به دو گروه در هر مرحله (به ازای هر سؤال) فراهم می‌شود. ساختار کلی مدل درخت تصمیم‌گیری در شکل ۵-۲ نشان داده شده است.



شکل ۵-۲- ساختار مدل درخت تصمیم‌گیری

همان‌طور که در این شکل مشخص است یک مدل درخت تصمیم‌گیری از بخش‌های مختلفی مانند گره تصمیم^۳، شاخه^۴ و برگ^۵ ساخته شده است. گره‌های

^۱ Random Forest

^۲ Decision tree

^۳ Decision node

^۴ Branch

----- اصول مدل سازی مکانی فرسایش خندقی با استفاده از مدل های هوش مصنوعی / ۹۵

تصمیم، محل تعیین آستانه ها هستند. به عنوان مثال، در خصوص داده های فرسایش خندقی، سؤال های زیر مطرح می شود: (۱) فرسایش های خندقی در چه درصد شیبی اتفاق می افتند؟ در صورتی که یک آستانه درصد شیب (مثلاً ۵ درصد) انتخاب شود، داده های فرسایش خندقی به راحتی به دو گروه بزرگ تر از آستانه و کمتر از آستانه تقسیم بندی می شوند. (۲) فرسایش های خندقی در چه ارتفاعی شکل می گیرند؟ در این مرحله نیز، با در نظر گرفتن یک آستانه ارتفاعی (مثلاً ۱۵۰۰ متر)، داده های فرسایش خندقی به راحتی به دو گروه بزرگ تر از آستانه و کوچک تر از آستانه تقسیم می شوند. مدل درخت تصمیم گیری تلاش می کند که بهترین مقادیر آستانه را برای تقسیم داده ها بیابد. اعمال مقادیر آستانه در ساختار مدل درخت تصمیم گیری به نام شرط گذاری نیز شناخته می شود. معیارهایی مانند ناخالصی جینی^۱، کسب اطلاعات^۲، یا میانگین مربعات خطا^۳ (MSE)، می توانند برای ارزیابی کیفیت تقسیم داده ها استفاده شوند.

مدل جنگل تصادفی، یکی از مدل های هوش مصنوعی قدرتمند است که قابلیت پردازش حجم زیادی از داده را دارد. الگوریتم جنگل تصادفی توسعه ای از رویکرد بسته بندی^۴ است، زیرا از هر دو بسته بندی و تصادفی بودن ویژگی^۵ برای ایجاد یک جنگل از درختان تصمیم استفاده می کند (ابراهیمی، ۱۳۹۹). در روش بسته بندی، یک نمونه تصادفی از داده ها در یک مجموعه آموزشی با روش جایگزینی^۶ انتخاب می شود که بدان معنی است که هر داده فردی را می توان بیش از یک بار انتخاب کرد. تصادفی بودن ویژگی، همچنین به عنوان بسته بندی ویژگی^۷ یا روش زیرفضای تصادفی^۸

⁵ Leaf

¹ Gini impurity

² Information gain

³ Mean square error

⁴ Bagging

⁵ Feature randomness

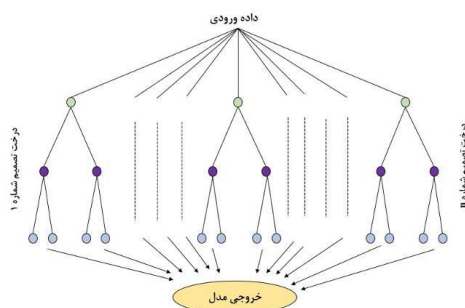
⁶ Replacement

⁷ Feature bagging

⁸ Random subspace method

شناخته می‌شود و این رویکرد زیرمجموعه‌ای تصادفی از ویژگی‌ها را ایجاد می‌کند که همبستگی کم بین درختان تصمیم را تضمین می‌کند و این موضوع، یک تفاوت کلیدی بین مدل درخت تصمیم‌گیری و مدل جنگل تصادفی است.

مدل جنگل تصادفی، هم برای مدل‌سازی طبقه‌بندی (مانند استعداد وقوع فرسایش خندقی) و هم برای مدل‌سازی رگرسیون (مانند مدل‌سازی رشد خندق) به کار برده می‌شود. ساختار مدل جنگل تصادفی به گونه‌ای است که از تعداد بی‌شماری از درخت‌های تصمیم‌گیری منفرد تشکیل شده است (شکل ۵-۳). در حالی که درخت‌های تصمیم می‌توانند مستعد مشکلاتی مانند تعصب و برازش بیش از حد باشند. با این حال، زمانی که درخت‌های تصمیم‌گیری چندانگانه، یک مجموعه را در الگوریتم جنگل تصادفی تشکیل می‌دهند، نتایج دقیق‌تری را پیش‌بینی می‌کنند؛ به‌ویژه زمانی که درخت‌های منفرد با یکدیگر همبستگی ندارند. مدل جنگل تصادفی دارای سه پارامتر اصلی اندازه گره^۱، تعداد درختان^۲ و تعداد ویژگی‌های نمونه‌برداری^۳ است که باید قبل از آموزش مدل تنظیم شوند.



شکل ۵-۳- ساختار مدل جنگل تصادفی

^۱ Node size

^۲ Number of trees

^۳ Number of features sampled

الگوریتم جنگل تصادفی از مجموعه‌ای از درختان تصمیم تشکیل شده است و هر درخت در مجموعه شامل یک نمونه داده است که از یک مجموعه آموزشی با جایگزینی، به نام نمونه بوت‌استرپ^۱ گرفته شده است. از آن مجموعه نمونه آموزشی، یک سوم آن به عنوان داده‌های آزمایشی کنار گذاشته می‌شود که اصطلاحاً به نمونه‌های خارج از کیسه^۲ (OOB) معروف است. نمونه‌های دیگر، از طریق رویکرد بسته‌بندی ویژگی به مدل وارد می‌شوند که این فرآیند تنوع مجموعه داده‌ها را افزایش می‌دهد و در نهایت همبستگی بین درخت‌های تصمیم را کاهش می‌دهد (خاموشی و همکاران، ۱۳۹۷).

شیوه کار مدل جنگل تصادفی برای اهداف مدل‌سازی طبقه‌بندی و مدل‌سازی رگرسیون مقداری متفاوت است. در خصوص مدل‌سازی رگرسیون در مدل جنگل تصادفی، میانگین خروجی تک‌درخت‌های تصمیم‌گیری، برای تعیین نتیجه نهایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در حالی که در مدل‌سازی طبقه‌بندی، بیشترین آرای^۳ حاصل از تک‌درخت‌های تصمیم‌گیری برای تعیین نتیجه نهایی ملاک خواهد بود. در نهایت، نمونه خارج از کیسه (OOB)، برای اعتبارسنجی متقابل^۴ استفاده شده و پس از تأیید، پیش‌بینی به صورت نهایی ارائه می‌شود (Belgiu و Drăguț، ۲۰۱۶). مدل جنگل تصادفی در مطالعات مختلفی برای پیش‌بینی استعداد فرسایش خندقی استفاده شده و نتایج بسیار خوبی ارائه داده است که به عنوان نمونه می‌توان به پژوهش‌های موحدی‌نسب و همکاران (۱۳۹۸) و سلیمان‌پور و همکاران (۱۴۰۳) اشاره کرد. مدل جنگل تصادفی مزایای زیادی در مدل‌سازی دارد که مهم‌ترین آنها عبارتند از (Boulesteix و همکاران، ۲۰۱۲؛ Langsetmo و همکاران، ۲۰۲۳):

^۱ Bootstrap

^۲ Out-of-bag

^۳ Majority vote

^۴ Cross-validation

- مدل جنگل تصادفی یک مدل انعطاف‌پذیر است که هر دو نوع مدل‌سازی رگرسیون و طبقه‌بندی را پوشش می‌دهد. انواع داده‌های دوحالتی^۱، پیوسته^۲، طبقه‌بندی‌شده^۳ و کیفی اسمی^۴ را می‌تواند به‌عنوان داده ورودی در پردازش‌ها قبول کند. از آنجایی که مدل جنگل تصادفی می‌تواند وظایف رگرسیون و طبقه‌بندی را با درجه بالایی از دقت انجام دهد به‌عنوان مدلی محبوب در میان دانشمندان علوم محیطی و داده‌کاوی شناخته می‌شود.
- در مدل جنگل تصادفی، مشکل برازش بیش‌ازحد^۵، بسیار پایین است. درخت‌های تصمیم‌گیری خطر برازش بیش‌ازحد را دارند؛ زیرا تمایل دارند تمام نمونه‌ها را در داده‌های آموزشی قرار دهند. این درحالی است که در مدل جنگل تصادفی با وجود تعداد درختان تصمیم خیلی زیاد با مشکل برازش بیش از حد روبرو نیست. دلیل این امر این است که میانگین‌گیری (در مدل‌سازی رگرسیون) و بیشترین رأی (در مدل‌سازی طبقه‌بندی) درختان تصمیم فاقد همبستگی در ساختار مدل جنگل تصادفی، واریانس کلی و خطای پیش‌بینی را کاهش می‌دهد.
- بسته‌بندی ویژگی^۶، طبقه‌بندی‌کننده مدل جنگل تصادفی را به ابزاری مؤثر برای تخمین مقادیر گم‌شده^۷ تبدیل کرده و در مواقعی که بخشی از داده‌ها از دست‌رفته است، دقت مدل افت نمی‌کند.
- امکان تعیین اهمیت ویژگی‌ها (مشارکت متغیرهای مستقل) در این مدل وجود دارد. اهمیت جینی^۸ و کاهش میانگین ناخالصی^۹ (MDI) معمولاً برای

¹ Binary

² Continuous

³ Categorical

⁴ Nominal

⁵ Overfitting

⁶ Feature bagging

⁷ Missing values

⁸ Gini importance

⁹ Mean decrease in impurity

اندازه گیری میزان کاهش دقت مدل در زمانی که یک متغیر مشخص از فهرست متغیرهای مستقل حذف شود، استفاده می شود. با این حال، اهمیت جایگشت^۱ یکی دیگر از معیارهای اهمیت است که به عنوان دقت کاهش میانگین^۲ (MDA) نیز شناخته شده است. در روش دقت کاهش میانگین (MDA)، میانگین کاهش دقت را با تغییر تصادفی مقادیر ویژگی در نمونه های خارج از کیسه (OOB) شناسایی می شوند.

- مدل جنگل تصادفی به داده های پرت حساس نیست. در بسیاری از مدل ها، یک یا چند داده پرت موجب تغییر ساختار مدل و تغییر رویه پیش بینی و در نهایت کاهش کارایی مدل می شوند.
- مدل جنگل تصادفی به فرضیات آماری وابستگی ندارد. محدود نبودن به فرضیات آماری موجب مقبولیت و کاربرد وسیع آن در علوم مختلف، از جمله علوم محیطی شده است.
- از آنجایی که تمام ویژگی ها و داده ها در یک درخت تصمیم وارد نمی شوند، فضای مورد نیاز تحلیل بر روی رایانه مشکلی ایجاد نمی کند.
- در مدل جنگل تصادفی، هیچ وقت تمام داده های مشاهداتی در اختیار پردازنده برای آموزش قرار نمی گیرد و بخشی از داده های مشاهداتی که با نام نمونه های خارج از کیسه (OOB)، که پیشتر معرفی شدند، برای اعتبارسنجی و ارزیابی کارایی ساختار معماری مدل برای پیش بینی پدیده مورد نظر نگه داشته می شوند. بنابراین، هنگام کار با مدل جنگل تصادفی اگر داده متمایزی برای اعتبارسنجی خارجی مدل موجود نباشد یا کم باشد؛ اطمینان بیشتری از نتیجه مدل جنگل تصادفی نسبت به سایر مدل های هوش مصنوعی می توان انتظار داشت.

¹ Permutation importance

² Mean decrease accuracy

علی‌رغم مزایای مدل جنگل تصادفی، این مدل از محدودیت‌های نیز برخوردار است که می‌توان به موارد زیر اشاره کرد (Ziegler و König، ۲۰۱۴؛ Parmar و همکاران، ۲۰۱۹):

- در صورتی که داده‌ها حجیم باشند، اجرای مدل جنگل تصادفی نیازمند زمان بیشتری نسبت به سایر مدل‌ها است.
- تفسیر نتیجه یک درخت تصمیم بسیار آسان‌تر از تفسیر میلیون‌ها درخت تصمیم در ساختار مدل جنگل تصادفی است.

۵-۱۳-۲- شیوه اجرای مدل

مدل جنگل تصادفی در نرم‌افزارهای برنامه‌نویسی و هوش مصنوعی مختلفی قابل اجرا است. در این کتاب، اجرای مدل جنگل تصادفی در نرم‌افزار R ارائه می‌شود. در نرم‌افزار تخصصی R، یک بسته به صورت خاص برای این مدل طراحی و ساخته شده است که با نام RandomForest قابل دستیابی است. اگر از بسته sdm نیز استفاده شود، امکان اجرای مدل جنگل تصادفی وجود دارد. کد اجرای مدل جنگل تصادفی با استفاده از بسته sdm، در زیر، ارائه شده است. تنظیمات مربوط به اعضای (المان‌های) این کد، همانند مدل ماشین بردار پشتیبان است.

```
m <- sdm(Id~,data=d,methods='rf',test.percent=30,n=1,replicate='subsampling')
```

۵-۱۴-۱- مدل درخت رگرسیونی پیشرفته

۵-۱۴-۱- خصوصیات و ساختار مدل

مدل درخت رگرسیونی پیشرفته یکی از مدل‌های قدرتمند است که در علوم محیطی مورد استفاده قرار گرفته است. این مدل، براساس ترکیب رویکردهای درخت تصمیم‌گیری^۱ و تقویتی^۲ طراحی شده است که توالی لایه‌های پردازش اطلاعات را به

^۱ Decision Tree

^۲ Boosting

----- اصول مدل سازی مکانی فرسایش خندقی با استفاده از مدل های هوش مصنوعی/ ۱۰۱

همراه دارد. تکنیک تقویتی، یک روش پیش رونده و مرحله ای است که بهبود مدل پیش بینی کننده را به دنبال دارد. روش تقویتی، با تغییر دادن وزن به دست آمده برای لایه ها، تأثیر زیادی بر مقادیر پیش بینی مدل درخت تصمیم گیری می گذارد (Elith و همکاران، ۲۰۰۸).

سه مؤلفه اصلی برای تنظیم ساختار مدل عبارتند از تعداد درخت (nt)، نرخ یادگیری (lr) و پیچیدگی درختان (tc)، که مقادیر آنها در برخی مواقع نیازمند بهینه سازی است. همچنین توجه به این نکته ضروری است که تعداد گره ها در هر درخت تصمیم گیری، نشان دهنده پیچیدگی آن است.

از مهم ترین مزیت های این مدل، تعیین میزان مشارکت عوامل محیطی در وقوع فرسایش خندقی است. به عنوان مثال، در پژوهش Rahmati و همکاران (۲۰۲۲)، میزان اثرگذاری عوامل محیطی مختلف بر وقوع فرسایش خندقی با استفاده از مدل درخت رگرسیونی تقویت شده مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج ایشان نیز نشان داد که این مدل، قابلیت بالایی در پیش بینی مناطق مستعد وقوع فرسایش خندقی دارد. در مطالعات دیگری نیز مدل درخت رگرسیونی پیشرفته برای پیش بینی استعداد رخداد فرسایش خندقی با موفقیت مورد استفاده قرار گرفته است (Garosi و همکاران، ۲۰۱۸؛ Arabameri و همکاران، ۲۰۱۹؛ Zabihi و همکاران، ۲۰۱۹). از دیگر مزایای مدل درخت رگرسیونی پیشرفته می توان به موارد زیر اشاره کرد (Suleiman و همکاران، ۲۰۱۶):

- مدل درخت رگرسیونی پیشرفته یک مدل توانمند است که امکان اجرای هر دو نوع رویکرد مدل سازی رگرسیون و طبقه بندی را فراهم کرده است. انواع داده های دوحالتی^۱، پیوسته^۲، طبقه بندی شده^۳ و کیفی اسمی^۴، می توانند به عنوان داده ورودی در این مدل وارد شوند.

¹ Binary

² Continuous

³ Categorical

- داده‌های از دست رفته^۱، تأثیر زیادی بر عملکرد این مدل ندارند.
- این مدل نیازی به تبدیل و پردازش پیچیده داده‌های ورودی ندارد. به عنوان مثال، داده‌های ورودی بدون نیاز به فرآیند استانداردسازی، به مدل معرفی می‌شوند.
- این مدل به داده‌های پرت حساس نیست و داده‌های پرت تأثیری بر پیش‌بینی مدل ندارند. از آنجایی که این مدل نیز همانند مدل جنگل تصادفی از درختان تصمیم‌گیری متعددی ساخته شده است؛ داده‌های پرتی که در یک یا چند درخت تصمیم‌گیری قرار می‌گیرند، در میان انبوه درختان در ساختار معماری مدل، تأثیر زیادی ندارند.
- استفاده از درختان تصمیم متعدد در کنار ساختار تقویتی، موجب غلبه این مدل بر نقاط ضعف مدل‌های مبتنی بر درخت تصمیم شده است. به طوری که یکی از قابلیت‌های مفید این مدل برای کاربران، ارائه نمودار تعداد بهینه درختان است که نشان می‌دهد. هرگاه تعداد درختان تعبیه شده در ساختار مدل درخت رگرسیونی پیشرفته بیشتر از تعداد بهینه باشد، علی‌رغم اشغال فضای حافظه رایانه (به دلیل افزایش حجم پردازش‌ها)، دقت پیش‌بینی مدل کاهش چندانی نخواهد داشت.
- مدل درخت رگرسیونی پیشرفته قادر است که میزان مشارکت هر یک از عوامل محیطی را به صورت کمی مشخص کند. اولویت‌بندی اثرگذاری عوامل محیطی بر رخداد فرسایش خندقی، از نتایج بسیار مهم و کاربردی این مدل محسوب می‌شود.

⁴ Nominal

¹ Missing values

----- اصول مدل‌سازی مکانی فرسایش خندقی با استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی/۱۰۳

- این مدل می‌تواند منحنی پاسخ هر یک از متغیرهای محیطی را ارائه کند که ارتباط میان تغییرات هریک از متغیرها و متغیر وابسته (استعداد فرسایش خندقی) را نشان می‌دهد. این منحنی جزئیات بسیار کاربردی درباره رابطه میان متغیرهای محیطی و استعداد فرسایش خندقی، در اختیار پژوهشگران و کارشناسان قرار می‌دهد. در مواردی که پشتیبانی علمی کافی برای تحلیل اثرگذاری یک عامل محیطی بر متغیر وابسته (استعداد فرسایش خندقی) وجود ندارد؛ منحنی پاسخ متغیر مستقل موردنظر کمک شایانی به حل این مشکل می‌کند.
 - با استفاده از این مدل، تفسیر نتایج شامل: نقشه استعداد فرسایش خندقی، جدول اهمیت متغیرها و منحنی‌های پاسخ مربوط به متغیرهای محیطی، به-آسانی امکان‌پذیر است.
- از محدودیت‌های این مدل، می‌توان به مورد زیر اشاره کرد (Zhang و همکاران، ۲۰۱۶):
- با عنایت به این نکته که معماری مدل درخت رگرسیونی پیشرفته تحت‌تأثیر تعداد و خصوصیات درونی درختان تصمیم‌گیری است؛ انتخاب مقادیر مناسب برای پارامترهای آن نیازمند بررسی‌های متعدد است و این مورد زمان‌بر است. از سویی دیگر، مدل درخت رگرسیونی پیشرفته، امکانات خودکار برای تنظیم پارامترهای مدل در بهینه‌ترین حالت را ندارد.

۵-۱۴-۲- شیوه اجرای مدل

بسته‌های تخصصی gbm و dismo امکان اجرای مدل درخت رگرسیونی پیشرفته را در نرم‌افزار R فراهم ساخته‌اند. نمونه‌ای از کد اجرای این مدل با استفاده از دو بسته ذکر شده، در زیر ارائه شده است.

```
m <- gbm.step(data=gully, gbm.x = 3:13, gbm.y = 2, tree.complexity = 5, learning.rate = 0.01, bag.fraction = 0.5)
```

ترسیم منحنی‌های پاسخ^۱ از طریق کد زیر امکان‌پذیر است. منحنی‌های پاسخ، نشان‌دهنده ارتباط میان استعداد وقوع فرسایش خندقی و عوامل محیطی است.

```
gbm.plot(angaus.tc5.lr005, n.plots=11, plot.layout=c(4, 3), write.title = FALSE)
```

این مدل، همچنین از طریق بسته تخصصی `sdm` نیز می‌تواند اجرا شود. عضوهای این کد، مشابه کد مدل ماشین‌بردار پشتیبان است که قبلاً به‌طور کامل توضیح داده شد.

```
m <- sdm(ld~,data=d,methods='brt',test.percent=30,n=1,replicate='subsampling')
```

۵-۱۵- ارزیابی دقت مدل‌سازی در مرحله اعتبارسنجی

۵-۱۵-۱- انواع معیارهای ارزیابی مدل

معیارهای ارزیابی مدل، براساس ماتریس درهم‌ریختگی^۲ محاسبه می‌شوند. همان‌گونه که در جدول ۵-۱ نشان داده شده است؛ این ماتریس به مقایسه دوبه‌دو مؤلفه‌های رخداد و عدم رخداد در واقعیت و پیش‌بینی می‌پردازد. جدول ۵-۱، نمونه‌ای از ماتریس درهم‌ریختگی است که در پژوهش Rahmati و همکاران (۲۰۱۷) به‌منظور ارزیابی دقت مدل‌های هوش مصنوعی در پیش‌بینی استعداد رخداد فرسایش خندقی مورد استفاده قرار گرفته است.

جدول ۵-۰- نمونه‌ای از ماتریس درهم‌ریختگی برای ارزیابی مدل (Rahmati و همکاران، ۲۰۱۹)

پیش‌بینی شده		مشاهداتی
عدم رخداد (-)	رخداد (+)	
FN	TP	رخداد (+)
TN	FP	عدم رخداد (-)

مؤلفه‌های ماتریس درهم‌ریختگی، عبارتند از:

- مثبت واقعی^۳ (TP): این مؤلفه تعداد خندق‌هایی که مدل به‌صورت صحیح پیش‌بینی کرده را نشان می‌دهد. درحقیقت، تعدادی از خندق‌های مشاهداتی

^۱ Response curve

^۲ Confusion matrix

^۳ True positive

که مدل استعداد رخداد زیاد را برای پیکسل های متناظر آن ها پیش بینی کرده است.

- مثبت کاذب^۱ (FP): این مؤلفه بیان گر تعداد پیکسل هایی است که مدل مقدار استعداد رخداد فرسایش خندقی زیادی را برای آن ها پیش بینی کرده ولی آن پیکسل ها در واقعیت خندق نیستند. این مؤلفه به عنوان خطای نوع یک نیز شناخته می شود.
- منفی واقعی^۲ (TN): این مؤلفه بیان گر تعداد پیکسل هایی است که مدل به درستی مقدار استعداد رخداد فرسایش خندقی اندکی را پیش بینی کرده و در واقعیت نیز پتانسیل رخداد فرسایش خندقی بسیار کم است.
- منفی کاذب^۳ (FN): این مؤلفه نشان دهنده تعداد پیکسل هایی است که مدل به اشتباه مقدار استعداد رخداد فرسایش خندقی اندکی را به آن ها اختصاص داده است؛ در حالی که آن پیکسل ها در واقعیت دارای فرسایش خندقی هستند. این مؤلفه به عنوان خطای نوع دو، معرفی می شود. معیارهای ارزیابی به دو دسته وابسته به آستانه^۴ و مستقل از آستانه^۵، گروه بندی می شوند. در ادامه هر یک از این رویکردها به تفکیک تشریح می شود.

۵-۱-۱-۱۵-۱- معیارهای وابسته به آستانه

معیارهای وابسته به آستانه به گونه ای عمل می کنند که نقشه خروجی مدل براساس یک آستانه به دو کلاس تقسیم می شوند. از آنجایی که دامنه مقادیر عددی یک نقشه استعداد فرسایش خندقی بین صفر تا یک متغیر است؛ مقدار آستانه معمولاً ۰/۵ یا ۰/۶ در نظر گرفته می شود. در این صورت، کلاس کمتر از آستانه به عنوان کلاس غیرمستعد

¹ False positive

² True negative

³ False negative

⁴ Threshold-dependent

⁵ Threshold-independent

فرسایش خندقی و کلاس بیشتر از آستانه به عنوان کلاس مستعد فرسایش خندقی شناخته می شوند.

پس از کلاس بندی نقشه خروجی مدل به دو کلاس مذکور، داده های موقعیت فرسایش خندقی بر روی این نقشه روی هم گذاری می شوند. نقاط فرسایش خندقی که در کلاس غیرمستعد قرار گرفته اند، نشان دهنده خطای منفی کاذب (FN) هستند. تعداد نقاط فرسایش خندقی که در کلاس مستعد قرار می گیرند، نشان دهنده مؤلفه مثبت واقعی (TP) هستند. در مرحله بعد، نقاط عدم رخداد خندق نیز که در بازدید میدانی و تحلیل های مکانی ثبت شده اند، بر روی نقشه دو کلاسه مذکور روی هم اندازی می شوند. تعداد نقاط غیرخندقی که در کلاس مستعد فرسایش قرار گرفته اند، نشان دهنده اشتباه مدل در پیش بینی استعداد فرسایش خندقی هستند و به عنوان مؤلفه مثبت کاذب (FP) ثبت می شوند. تعداد نقاط غیرخندقی که در کلاس غیرمستعد فرسایش خندقی قرار گرفته اند، بیان گر مؤلفه منفی واقعی (TN) است.

از مهم ترین معیارهای وابسته به آستانه می توان به نرخ مثبت واقعی^۱ (TPR) یا حساسیت، نرخ مثبت کاذب^۲ (FPR)، نرخ منفی واقعی^۳ (TNR)، نرخ منفی کاذب^۴ (FNR)، کارایی^۵ (E)، نرخ کلاس بندی اشتباه^۶ (MR)، ارزش اخباری مثبت^۷ (PPV)، ارزش اخباری منفی^۸ (NPV)، نرخ کشف نادرست^۹ (FDR)، نرخ حذف کاذب^{۱۰} (FOR)، امتیاز F (F-score)، آماره مهارت واقعی^{۱۱} (TSS) و امتیاز تهدید^{۱۲} (TS) اشاره کرد (جدول ۵-۲).

¹ True positive rate

² False positive rate

³ True negative rate

⁴ False negative rate

⁵ Efficiency

⁶ Misclassification rate

⁷ Positive predictive value

⁸ Negative predictive value

⁹ False discovery rate

¹⁰ False omission rate

¹¹ True skill statistic

جدول ۵-۰- معیارهای ارزیابی وابسته به آستانه (Rahmati و همکاران، ۲۰۱۹)

ردیف	معیار ارزیابی	معادله
۱	نرخ مثبت واقعی (TPR)	$TPR = \frac{TP}{TP + FN}$
۲	نرخ مثبت کاذب (FPR)	$FPR = \frac{FP}{FP + TN}$
۳	نرخ منفی واقعی (TNR)	$TNR = \frac{TN}{TN + FP}$
۴	نرخ منفی کاذب (FNR)	$FNR = \frac{FN}{FN + TP}$
۵	کارایی (E)	$E = \frac{TP}{TP + TN + FP + FN}$
۶	نرخ کلاس بندی اشتباه (MR)	$MR = \frac{FP + FN}{TP + TN + FP + FN}$
۷	ارزش اخباری مثبت (PPV)	$PPV = \frac{TP}{TP + FP}$
۸	نرخ کشف نادرست (FDR)	$FDR = \frac{FP}{FP + TP}$
۹	نرخ حذف کاذب (FOR)	$FOR = \frac{FN}{FN + TN}$
۱۰	امتیاز F (F-score)	$F_{score} = \frac{2TP + FP + FN}{TP + FP + FN}$
۱۱	آماره مهارت واقعی (TSS)	$TSS = \frac{TP}{TP + FN} - \frac{FP}{FP + TN}$
۱۲	امتیاز تهدید (TS)	$TS = \frac{TP}{TP + FN + FP}$

۵-۱-۲- معیارهای مستقل از آستانه

معیارهای مستقل از آستانه تنها به یک آستانه برای تقسیم نقشه خروجی مدل به دو گروه بسنده نمی کنند. در رویکرد مستقل از آستانه، تعداد زیادی آستانه برای تقسیم بندی نقشه خروجی مدل استفاده می شود. به عنوان مثال، بر خلاف رویکرد وابسته به آستانه که مقدار آستانه ۰/۵ در نظر گرفته می شود. در رویکرد مستقل از آستانه ده مقدار مختلف از ۰/۱ تا ۰/۹ برای تقسیم بندی نقشه خروجی مدل به کار گرفته می شود.

بنابراین، در رویکرد مستقل از آستانه، ده مرتبه نقشه خروجی مدل گروه‌بندی شده و در هر مرحله مؤلفه‌های ماتریس درهم‌ریختگی محاسبه می‌شود.

منحنی مشخصه عملکرد گیرنده^۱ (ROC)، یکی از معتبرترین روش‌های مستقل از آستانه است. مساحت زیر این منحنی (AUC)، معیاری کمی برای ارزیابی دقت پیش‌بینی است که بین صفر تا صد درصد متغیر است. براساس پژوهش Rahmati و همکاران (۲۰۱۹ الف) که به ارزیابی مدل‌های هوش مصنوعی مختلف در پنج کشور مختلف جهان پرداخت، مساحت زیر منحنی مشخصه عملکرد گیرنده، معتبرترین معیار برای اعتبارسنجی کمی مدل است و مقایسه عملکرد مدل‌های مختلف تنها براساس این معیار قابل اعتماد است. این معیار، به‌عنوان رایج‌ترین روش در مطالعات پیش‌بینی استعداد رخداد فرسایش خندقی مورد استفاده قرار گرفته است (Conoscenti و همکاران، ۲۰۱۴؛ Zabihi و همکاران، ۲۰۱۸؛ رحمتی و همکاران، ۱۳۹۷؛ شیرانی و همکاران، ۱۳۹۹).

۵-۱۵-۲- محاسبه معیارهای ارزیابی مدل در نرم‌افزار Rstudio

ارزیابی دقت پیش‌بینی مدل‌ها در بسیاری از نرم‌افزارهای آماری امکان‌پذیر است. در این کتاب، از نرم‌افزار Rstudio برای بررسی دقت پیش‌بینی مدل‌ها استفاده می‌شود. به این منظور، پس از اتمام مدل‌سازی و اجرای مدل ماشین‌بردار پشتیبان، کافی است نام متغیر هدف مدل‌سازی (m) اجرا شود. راه دیگر آن، اجرای فرمان زیر است:

`print(m)`

پس از اجرای فرمان فوق، نتایج دقت مدل در مرحله اعتبارسنجی با استفاده از سه معیار ارزیابی TSS، COR و Deviance نشان داده می‌شود. مقدار سه معیار ارزیابی بین صفر تا یک متغیر است و هر چه بیشتر باشد، دقت پیش‌بینی مدل بالاتر است.

¹ Receiver operating characteristic

۵-۱۶- تهیه منحنی مشخصه عملکرد گیرنده

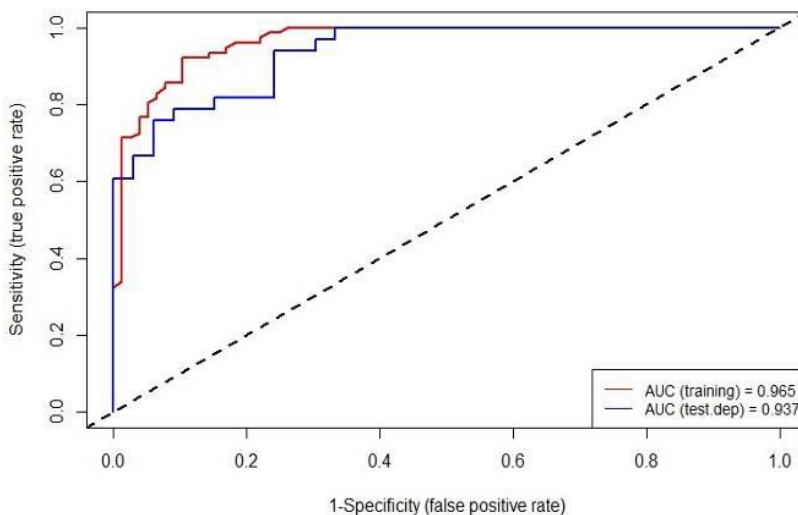
منحنی مشخصه عملکرد گیرنده^۱ (ROC)، به منظور ارزیابی دقت پیش بینی مدل مورد استفاده قرار می گیرد. به منظور ترسیم منحنی مشخصه عملکرد گیرنده، در مراحل آموزش و اعتبارسنجی، از فرمان زیر استفاده می شود. متغیر m در مراحل قبلی تشریح شده است که مدل سازی ماشین بردار پشتیبان به نام m تعریف شد.

$roc(m)$

پس از اجرای فرمان فوق، منحنی مشخصه عملکرد گیرنده برای مدل ترسیم می شود. شایان ذکر است که معیار AUC به عنوان معتبرترین شاخص ارزیابی شناخته شده است و دیگر معیارها برای اطمینان بیشتر مورد محاسبه قرار می گیرد.

شکل ۴-۵ نمونه ای از منحنی مشخصه عملکرد به منظور ارزیابی کارایی مدل ماشین بردار پشتیبان است. مقادیر دقت های پیش بینی مدل در مرحله آموزش با رنگ قرمز و در مرحله اعتبارسنجی با رنگ آبی نشان داده شده است. مساحت زیر منحنی مشخصه عملکرد که در مرحله قبلی با AUC نشان داده شد، براساس این دو منحنی محاسبه می شود. در نمونه زیر، دقت مدل ماشین بردار پشتیبان در مرحله آموزش ۰/۹۶۵ و در مرحله اعتبارسنجی ۰/۹۳۷ به دست آمده است. مقدار معیار AUC طبقه بندی شده است و می توان براساس آن کارایی مدل را تعیین کرد. مقدار معیار AUC بالاتر از ۷۰ درصد، نشان دهنده دقت قابل قبول است. هنگامی که مقدار AUC بین ۷۰ تا ۸۰ درصد باشد، دقت پیش بینی مدل خوب است.

¹ Receiver operating characteristic



شکل ۵-۰- نمونه‌ای از منحنی ROC برای ارزیابی دقت مدل ماشین بردار پشتیبان

مساحت زیر منحنی مشخصه عملکرد گیرنده (AUC) به عنوان بهترین معیار کمی در ارزیابی و مقایسه دقت پیش‌بینی مدل‌ها در مطالعات محیطی مختلف مورد استفاده قرار گرفته است (رحمتی و همکاران، ۲۰۱۹ ب). طبقه‌بندی عملکرد مدل براساس مقادیر معیار مساحت زیر منحنی مشخصه عملکرد گیرنده در جدول ۵-۳ ارائه شده است.

جدول ۵-۰- طبقات عملکرد مدل براساس AUC (Rahmati و همکاران، ۲۰۲۳)

ردیف	مساحت زیر منحنی مشخصه عملکرد گیرنده	عملکرد مدل
۱	کمتر از ۶۰ درصد	ضعیف یا غیرقابل اعتماد
۲	بیشتر از ۶۰ درصد و کمتر از ۷۰ درصد	متوسط
۳	بیشتر از ۷۰ درصد و کمتر از ۸۰ درصد	خوب
۴	بیشتر از ۸۰ درصد و کمتر از ۹۰ درصد	خیلی خوب
۵	بیشتر از ۹۰ درصد و کمتر از ۱۰۰ درصد	عالی

۵-۱۷- تهیه نقشه استعداد وقوع فرسایش خندقی

آموزش کسب شده از مدل ماشین بردار پشتیبان باید به کل منطقه مورد مطالعه تعمیم یابد. فرمان زیر، با استفاده از تابع predict، اجازه پیش بینی استعداد وقوع فرسایش خندقی تمامی پیکسل های منطقه را می دهد. تابع predict دارای عضوهای متعددی است که از آن جمله می توان به مؤلفه مدل آموزش یافته (متغیر m در مراحل قبلی)، داده های عوامل محیطی (newdata=preds) و نام فایل نقشه استعداد وقوع فرسایش خندقی برای ذخیره (filename='gully.img') اشاره کرد. شایان ذکر است که در این فرمان، نقشه استعداد وقوع فرسایش خندقی با فرمت رستری img ذخیره می شود.

```
p <- predict(m,newdata=preds,filename='gully.img')
```

۵-۱۸- تهیه نقشه پهنه بندی فرسایش خندقی

نقشه استعداد وقوع خندق می تواند به کلاس های مختلف تقسیم شود تا مدیریت بهتری برای هر یک از قسمت های منطقه ارائه شود. به منظور کلاس بندی نقشه استعداد وقوع فرسایش خندقی، در نرم افزار ArcGIS، از ابزار Reclassify استفاده می شود. معمولاً پنج کلاس استعداد خیلی کم (۰-۰/۲)، کم (۰/۲-۲/۴)، متوسط (۲/۴-۴/۶)، زیاد (۴/۶-۰/۸) و خیلی زیاد (۰/۸-۱)، برای نقشه پهنه بندی فرسایش خندقی در نظر گرفته می شود.

فصل ششم

مدل پیشینه بی‌نظمی

۶-۱- خصوصیات و ساختار مدل پیشینه بی‌نظمی

مدل پیشینه بی‌نظمی، یکی از مدل‌های هوش مصنوعی است که قابلیت بالایی در تجزیه و تحلیل داده‌های حجیم دارد. این مدل، بر پایه تئوری بی‌نظمی^۱ و توزیع‌های آماری توسعه یافته است. تئوری اطلاعات^۲، یک معیار سازنده برای تنظیم توزیع‌های احتمال براساس دانش جزئی^۳ ارائه می‌کند و منجر به نوعی استنتاج آماری^۴ می‌شود که تخمین پیشینه بی‌نظمی (در برخی منابع آنتروپی پیشینه) نامیده می‌شود. اصل تئوری بی‌نظمی بیان می‌کند که مناسب‌ترین توزیع برای مدل‌سازی مجموعه‌ای از داده‌ها، توزیعی است که بالاترین بی‌نظمی را دارد.

همان‌گونه که Baldwin (۲۰۰۹) تشریح کرده است، مدل پیشینه بی‌نظمی مبتنی بر پاسخ یادگیری ماشینی است که برای پیش‌بینی یک متغیر هدف براساس داده‌های ناقص طراحی شده است. ایشان همچنین بیان کرده است که در رویکرد مدل‌سازی پیشینه بی‌نظمی، یکنواخت‌ترین توزیع نقاط نمونه‌برداری را در مقایسه با مکان‌های پس‌زمینه^۵ با توجه به محدودیت‌های حاصل از داده‌ها تخمین می‌زند.

مدل پیشینه بی‌نظمی معادلات متعدد و پیچیده‌ای دارد که برای حل هرکدام نیاز به روش‌های مختلف از جمله روش لاگرانژ^۶ است. ایده نرم‌افزار Maxent برای اولین بار در مرکز تنوع زیستی و حفاظت در موزه تاریخ طبیعی آمریکا^۷ (AMNH) شکل گرفت. همانند مدل‌های تشریح‌شده در فصل قبل، مدل پیشینه بی‌نظمی نیز قابلیت پردازش متغیرهای پیوسته کمی و کیفی طبقه‌بندی شده را دارد. از این‌رو، این مدل می‌تواند عوامل مختلف مؤثر بر رخداد فرسایش خندقی را در نظر بگیرد. به‌منظور جلوگیری از

¹ Entropy

² Information theory

³ Partial knowledge

⁴ Statistical inference

⁵ Background

⁶ Lagrange

⁷ American Museum of Natural History

برازش بیش از حد در این مدل، یک مؤلفه آرام‌سازی^۱، به نام منظم‌سازی^۲، به نرم‌افزار Maxent اضافه شده است تا توزیع تخمینی را محدود کند و در نتیجه به میانگین مقدار هر متغیر نمونه‌برداری شده اجازه می‌دهد تا میانگین تجربی آن را تقریب کند اما با آن برابر نباشد (Phillips و Dudík، ۲۰۰۸).

با توجه به خصوصیات ساختاری مدل بیشینه بی‌نظمی، این مدل در زمینه‌های مختلف ژئومورفولوژی و هیدرولوژی به عنوان یکی از مدل‌های رایج مورد استفاده قرار گرفته است (Park، ۲۰۱۵؛ Rahmati و همکاران، ۲۰۱۶؛ بابلی مؤخر و همکاران، ۱۳۹۷؛ رجب‌زاده و همکاران، ۱۳۹۷؛ تیموری و اسدی‌نلیوان، ۱۳۹۸). مدل بیشینه بی‌نظمی در زمینه مطالعات فرسایش خاک توسط محققان مختلف به کار گرفته شده است. به عنوان مثال، در زمینه فرسایش شیاری، پورنادر و همکاران (۱۳۹۸) در حوزه آبخیز گل‌گل استان ایلام با استفاده از مدل بیشینه بی‌نظمی توانستند نقشه استعداد رخداد فرسایش شیاری را تهیه و در نهایت با استفاده از داده‌های مشاهداتی و روش‌های آماری، دقت پیش‌بینی و استقامت مدل را تأیید کنند. براساس مطالعه Azareh و همکاران (۲۰۱۹) که با استفاده از مدل بیشینه بی‌نظمی در منطقه چوار استان ایلام به پیش‌بینی استعداد رخداد فرسایش خندقی پرداختند؛ مدل بیشینه بی‌نظمی قابلیت بالایی در تهیه نقشه استعداد شکل‌گیری فرسایش خندقی در مناطق وسیع دارد و نتایج خروجی آن می‌تواند به عنوان نقشه‌راه در زمینه حفاظت خاک و مدیریت سرزمین به منظور پیشگیری و مهار فرسایش خندقی مورد استفاده قرار گیرد. همچنین پژوهش رحمتی و همکاران (۱۳۹۷) نیز در حوزه آبخیز کشکان- پل‌دختر نشان داد که مدل بیشینه بی‌نظمی از دقت بالایی در پیش‌بینی استعداد وقوع فرسایش خندقی برخوردار بوده و تعیین میزان اهمیت متغیرهای محیطی در رخداد این پدیده، یکی از قابلیت‌های مفید این مدل ذکر شده است.

¹ Relaxation component

² Regularization

----- اصول مدل‌سازی مکانی فرسایش خندقی با استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی/۱۱۵

از مزیت‌های مدل بیشینه بی‌نظمی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد (Merow و همکاران، ۲۰۱۳؛ پورنادر و همکاران، ۱۳۹۸):

- به‌منظور مدل‌سازی استعداد وقوع فرسایش خندقی با استفاده از این مدل، نیازی به نقاط عدم وقوع پدیده نیست و تنها براساس نقاط وقوع، می‌توان به مدل‌سازی اقدام کرد.
- امکان اجرای مدل در دفعات متعدد فراهم است و در هر مرتبه، اعتبارسنجی متقابل انجام می‌شود. بنابراین، این مدل علاوه بر کارایی پیش‌بینی، از نظر استقامت^۱ نیز به‌آسانی قابل ارزیابی است.
- دقت پیش‌بینی این مدل بالا است و در زمان اندک، نتایج مطلوبی ارائه می‌دهد.
- این مدل می‌تواند ارتباط میان عوامل محیطی و وقایع را به‌صورت نمودارهای مختلف نشان دهد.
- نرم‌افزار طراحی شده برای این مدل کاربردوست بوده و محققان و کارشناسان به‌راحتی داده‌ها را معرفی و پردازش اطلاعات و مدل‌سازی مکانی را انجام می‌دهند.

از محدودیت‌های این مدل نیز می‌توان موارد زیر را بیان کرد (Peterson و همکاران، ۲۰۰۷؛ Baldwin، ۲۰۰۹):

- مدل بیشینه بی‌نظمی، مستعد برازش بیش از حد^۲ است. در نتیجه توزیع‌های پیش‌بینی شده‌ای به‌دست می‌آید که در اطراف نقاط وقوع پدیده تجمع بیشتری می‌یابند. این موضوع عموماً زمانی بیشتر مشاهده می‌شود که تعداد نمونه‌های فرسایش خندقی در منطقه مورد مطالعه محدود باشد. بنابراین، بازدیدهای میدانی دقیق و استفاده از روش‌های سنجش از دوری مختلف، برای شناسایی و ثبت فرسایش‌های خندقی در سراسر منطقه حائز اهمیت است.

^۱ Robustness

^۲ Overfitting

- در صورتی که داده‌های مشاهداتی رخداد فرسایش خندقی فقط معطوف به یک قسمت از منطقه مورد مطالعه باشند؛ انتقال‌پذیری^۱ آموزش‌های مدل از محدوده‌های دارای نقاط مشاهداتی به محدوده‌های فاقد داده مشاهداتی به صورت مطلوبی انجام نمی‌شود. به عبارت دیگر، دقت پیش‌بینی مدل به طور معنی‌داری تحت تأثیر توزیع مکانی نمونه‌های ثبت شده است. بنابراین، در هنگام استفاده از این مدل باید توجه داشت که توزیع مکانی نمونه‌های مشاهداتی مناسب باشد و در صورت امکان، از بیشتر قسمت‌های منطقه مورد مطالعه نمونه ثبت شود. در این صورت، انتقال و تعمیم‌پذیری^۲ مدل به کل منطقه مورد مطالعه به آسانی انجام می‌شود.

۶-۲- شیوه اجرای مدل

نرم‌افزار Maxent، به منظور اجرای مدل بیشینه بی‌نظمی ساخته شده است. این نرم‌افزار، از طریق تارنمای زیر، به صورت رایگان قابل دریافت است.

https://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/

این نرم‌افزار با استفاده از زبان جاوا ساخته شده است و در مطالعات مدل‌سازی مکانی پدیده‌های زیست‌محیطی به طور وسیع مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین این نرم‌افزار به منظور مدل‌سازی مکانی استعداد وقوع فرسایش خندقی در پژوهش‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. نرم‌افزار دانلود شده به نام maxent.jar است و نیازی به نصب ندارد. البته قبل از نصب این برنامه، باید زبان برنامه‌نویسی جاوا بر روی رایانه نصب شده باشد.

به منظور باز شدن نرم‌افزار باید فایل maxent.jar اجرا شود. پس از باز شدن نرم‌افزار، می‌توان ملاحظه کرد که دو قسمت اصلی در نرم‌افزار تعبیه شده است که می‌توان لایه موقعیت پیشانی خندق‌ها و لایه‌های عوامل محیطی را به نرم‌افزار وارد کرد. در قسمت

¹ Transferability

² Generalizability

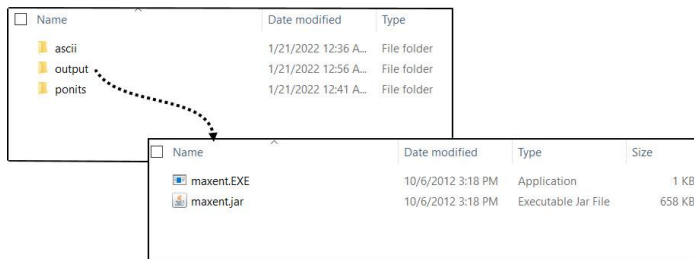
سمت چپ نرم‌افزار، محیط Samples برای وارد کردن لایه رقومی موقعیت خندق‌ها و محیط Environmental layers در قسمت راست نرم‌افزار، برای وارد کردن لایه‌های پیش‌بینی‌کننده در نظر گرفته شده است. همچنین قبل از اجرای مدل در نرم‌افزار Maxent، امکان انتخاب شیوه نمایش نتایج به صورت داده‌های خام^۱، تجمعی^۲ و لجستیک^۳ وجود دارد (Baldwin، ۲۰۰۹).

شیوه نمایش نتایج خروجی مذکور در شکل ۶-۱ در قسمت Output format قابل ملاحظه است. مقادیر خام در حقیقت خروجی اصلی نرم‌افزار هستند. با این حال، این مقادیر خام قابلیت نمایش بصری مناسبی ندارند و از آنجایی که باید مجموع مقادیر آن‌ها یک باشد، غالباً برای هر نقطه از منطقه مورد مطالعه یک داده بسیار کوچک بوده و در نتیجه به سختی تفسیر قابل تفسیر هستند. نتایج تجمعی، مستقل از مقیاس است و امتیازهایی به منظور تخمین پتانسیل رخداد پدیده مورد نظر برای هر قسمت از منطقه مورد مطالعه ارائه می‌دهد. بنابراین، زمانی که نتایج تجمعی به یک سیستم اطلاعات جغرافیایی وارد می‌شود، نتایج آسان‌تر تفسیر می‌شود؛ اما لازم است به این نکته اشاره شود که این پیش‌بینی‌ها لزوماً نشان‌دهنده احتمال رخداد فرسایش خندقی نیستند. نتایج لجستیک با توجه به این که تخمین‌هایی از احتمال رخداد پدیده را براساس متغیرهای محیطی مؤثر بر پدیده ارائه می‌دهد، کاربردی‌تر بوده و در حال حاضر بیشتر توصیه می‌شود (Phillips و Dudík، ۲۰۰۸). شایان ذکر است نتایج لجستیک در بازه عددی صفر تا یک ارائه می‌شوند. بنابراین، اگر چه داده‌های خروجی خام، تجمعی و لجستیک با یکدیگر مرتبط هستند؛ نتایج لجستیک امکان تفسیر آسان‌تر و کاربردی‌تری را نسبت به سایر خروجی‌ها فراهم می‌کند.

¹ Raw

² Cumulative

³ Logistic



شکل ۶-۰- فایل‌ها و ساختار مورد نیاز برای اجرای مدل بیشینه بی‌نظمی

با توجه به شکل فوق، به‌منظور اجرای مدل بیشینه بی‌نظمی، لازم است سه پوشه ساخته شود. یک پوشه برای ذخیره لایه‌های پیش‌بینی‌کننده که در این شکل، با نام `ascii` نام‌گذاری شده است، یک پوشه به‌منظور ذخیره نتایج مدل‌سازی (`output`) و یک پوشه برای ذخیره لایه موقعیت مکانی خندق‌ها (`points`) مورد نیاز است. نرم‌افزار اجرای مدل بیشینه بی‌نظمی نیز باید در پوشه `output` قرار داده شود. همان‌طور که پیشتر نیز گفته شد اجرای مدل بیشینه بی‌نظمی، نیازمند نصب زبان برنامه‌نویسی جاوا است. بنابراین، پس از نصب این برنامه، می‌توان مدل بیشینه بی‌نظمی را به‌منظور مدل‌سازی پتانسیل وقوع فرسایش خندقی اجرا کرد.

۶-۳- آماده‌سازی لایه‌های پیش‌بینی‌کننده

پس از انتخاب عوامل محیطی مختلف به‌عنوان متغیرهای پیش‌بینی‌کننده و مؤثر در شکل‌گیری فرسایش خندقی، ابتدا تمامی لایه‌ها با فرمت‌های رستری تهیه می‌شود. سپس لایه‌های رستری مربوط به عوامل محیطی در محیط ArcGIS 10.3 یا دیگر نرم‌افزارهای سیستم اطلاعات جغرافیایی، به فرمت ASCII تبدیل می‌شوند. لازم به ذکر است که این فرآیند برای هر یک از لایه‌های محیطی، به‌صورت انفرادی انجام می‌شود. ابزار تبدیل فرمت لایه‌های رستری به فرمت ASCII، در محیط ArcToolbox در قسمت ابزارهای تبدیل^۱، قرار دارد.

^۱- Conversion tool

۴-۶- آماده سازی داده های موقعیت مکانی خندق ها

هر مدل نیازمند یک ساختار اطلاعات مشخص است که توجه به این امر، در فرآیند مدل سازی ضروری است. در مدل بشینه بی نظمی، به منظور معرفی صحیح داده های فرسایش خندقی، اطلاعات موقعیت جغرافیایی پیشانی خندق ها در سه ستون، شامل: نام پدیده (فرسایش خندقی)، طول جغرافیایی و عرض جغرافیایی ارائه می شود. توجه به این نکته ضروری است که سیستم مختصات لایه های محیطی (متغیرهای پیش بینی کننده) و داده های موقعیت فرسایش خندقی (متغیر وابسته) یکسان باشد. براساس نیازمندی های مدل بشینه بی نظمی، داده های موقعیت مکانی فرسایش خندقی از فرمت اکسلی باید به فرمت CSV تبدیل شود. توجه به این نکته نیز ضروری است که چند نوع فرمت CSV در پایگاه های داده وجود دارند که نوع comma delimited به منظور اجرای مدل بشینه بی نظمی، مورد نیاز است.

۵-۶- معرفی اطلاعات و لایه های رقومی به مدل

داده های موقعیت مکانی فرسایش های خندقی در محدوده سمت چپ نرم افزار معرفی می شوند. همچنین لایه اطلاعاتی موقعیت خندق ها در فرمت CSV به نرم افزار معرفی می شوند. از سویی دیگر، محدوده سمت راست نرم افزار، برای معرفی لایه های محیطی (عوامل پیش بینی کننده) تعبیه شده است. در این مرحله، فایل خاصی به مدل معرفی نمی شود؛ بلکه تنها پوشه حاوی لایه های محیطی معرفی می شود. توجه به این نکته ضروری است که فرمت لایه های محیطی باید به صورت ASCII تهیه شده باشد.

لایه های محیطی رستری در دو دسته پیوسته^۱ و گسسته^۲ قابل تقسیم بندی هستند. لایه های پیوسته قادر هستند تا هر عددی را شامل شوند و غالباً یک محدوده از اعداد و ارزش ها را شامل می شوند. این درحالی است که در لایه های رستری گسسته، فقط اعداد صحیح وجود دارند و هر عدد به عنوان یک کد شناخته می شود. به عنوان مثال در

^۱- continuous

^۲- category

نقشه رستری بافت خاک، هر عدد به‌عنوان یک کد باید در نظر گرفته شود که نشان‌دهنده یک نوع بافت خاک مشخص است. لایه‌های محیطی کاربری اراضی، جهت شیب و سنگ‌شناسی نیز از نوع لایه‌های رستری گسسته هستند. در مقابل، هر عامل محیطی یک کشو تعبیه شده است تا ساختار (نوع) لایه رستری تعیین شود.

در مدل‌سازی استعداد رخداد فرسایش خندقی، لایه‌های جهت شیب، کاربری اراضی، بافت خاک و سنگ‌شناسی از جمله لایه‌های رستری گسسته هستند و الزاماً نوع Category باید برای هر یک از آن‌ها انتخاب شود. لازم به ذکر است که تمامی لایه‌های مربوط به عوامل محیطی، باید اندازه پیکسل و سیستم مختصات یکسان داشته باشند تا مدل بدون مواجهه با خطا، اجرا شود.

۶-۶- تنظیم پارامترها و اجرای مدل

به‌منظور اجرای مدل بیشینه بی‌نظمی، در قسمت تنظیمات نرم‌افزار (Setting)، سه منو قرار داده شده است. همان‌گونه که در شکل ۶-۲ نشان داده شده است، تنظیمات پایه (basic) به‌منظور تعیین برخی از پارامترها و شرایط مدل‌سازی در اختیار کاربر قرار دارد. از جمله تنظیمات مهم در منوی تنظیمات پایه می‌توان به تعیین درصد داده‌های اعتبارسنجی در قسمت Random test percentage اشاره کرد. در مدل‌سازی پتانسیل وقوع فرسایش خندقی، غالباً حجم داده‌های آموزش ۷۰ درصد و حجم گروه اعتبارسنجی ۳۰ درصد در نظر گرفته می‌شود.

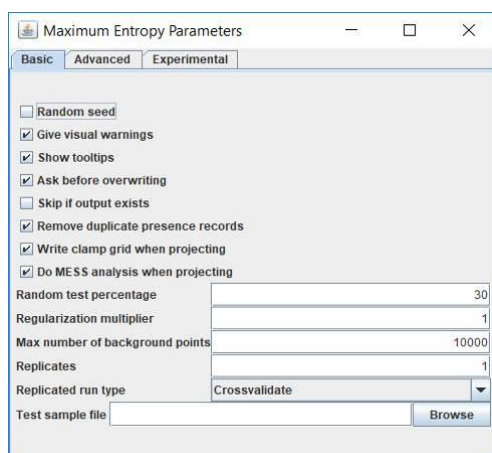
پارامتر منظم‌سازی که در قسمت Regularization multiplier تعبیه شده است، تأثیر زیادی بر میزان متمرکز بودن یا نزدیک بودن^۱ توزیع خروجی دارد. مقدار پیش‌فرض این پارامتر یک است و در صورتی که مقدار آن کاهش یابد، خروجی مدل محلی^۲ شده و مناطق مستعد فرسایش خندقی بیشتر به مناطق اطراف نقاط رخداد آموزشی ثبت‌شده محدود می‌شود. البته شایان‌ذکر است که در صورت کاهش دادن مقدار پارامتر

^۱ Closely-fitted

^۲ Localized

----- اصول مدل‌سازی مکانی فرسایش خندقی با استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی/۱۲۱

منظم‌سازی، احتمال بروز برازش بیش‌ازحد^۱ مدل افزایش می‌یابد که به نوبه‌خود تأثیر نامطلوبی بر خروجی مدل خواهد داشت. مقادیر بیشتر از یک، موجب پراکندگی و عدم تمرکز مدل بر نقاط محلی محدود می‌شود. در صورتی که کاربر قصد داشته باشد داده‌های گروه اعتبارسنجی خاصی که مدنظر قرار دارد به مدل معرفی کند، می‌تواند در قسمت انتهایی تنظیمات پایه (test sample file)، لایه داده‌های موقعیت خندق‌های گروه اعتبارسنجی را به مدل معرفی کند.



شکل ۶-۰- تنظیمات پایه در مدل بیشینه بی‌نظمی

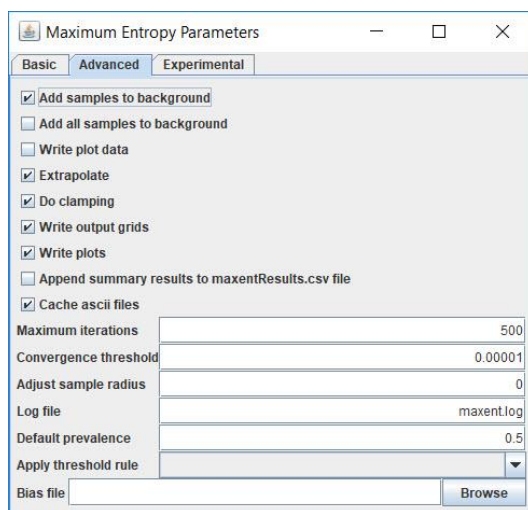
در بخش تنظیمات پیشرفته (Advanced)، برخی دیگر از قابلیت‌های تنظیمی ساختار و شیوه مدل‌سازی در مدل بیشینه بی‌نظمی ارائه شده‌اند (شکل ۶-۳). در صورتی که کاربر نیاز به ذخیره‌کردن اطلاعات جانبی مدل‌سازی باشد، در این قسمت می‌تواند انتخاب کند. تعداد بیشینه تکرار^۲ مدل به‌منظور آموزش و شناخت روابط میان متغیرهای مستقل و وابسته نیز می‌تواند در این تنظیمات مشخص شود. آستانه همگرایی^۳ نیز یکی از پارامترهای مؤثر در طراحی معماری مدل است. پارامترهای

^۱ Overfitting

^۲ Maximum iterations

^۳ Convergence threshold

بیشینه تکرار و آستانه همگرایی مؤلفه‌های محافظه‌کارانه‌ای^۱ هستند که ساختار الگوریتم را به سمت همگرایی بیشتر یا کمتر سوق می‌دهند. در صورتی که یک لایه رستری حاوی خطای ناشی از نمونه‌برداری و غیره باشد، می‌تواند در این تنظیمات در قسمت bias file به مدل معرفی شود.



شکل ۶-۰- تنظیمات پیشرفته در مدل بیشینه بی‌نظمی

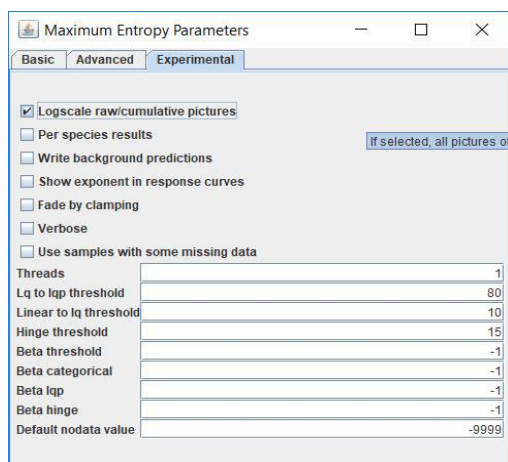
در بخش تنظیمات آزمایشی (Experimental)، نیز پارامترهای مختلفی تعبیه شده است. برخی از پارامترها مربوط به تعیین آستانه فاکتورهای مدل‌سازی است (شکل ۴-۶). برخی از تنظیمات این قسمت مربوط به شیوه نمایش نتایج و نمودارهای حاصل از مدل است. در قسمت تنظیمات، نحوه تعیین آستانه^۲ پارامترهای مدل تعبیه شده است. انتخاب یک سطح آستانه مناسب، موضوع مهم در ساخت مدل و پیش‌بینی مکانی استعداد رخداد پدیده‌های طبیعی است. در این قسمت از تنظیمات نرم‌افزار، آستانه‌های مختلفی از جمله کمینه مقدار پیش‌بینی شده در محل حضور، حساسیت و ویژگی برابر

^۱ Conservative

^۲ Threshold

----- اصول مدل‌سازی مکانی فرسایش خندقی با استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی/۱۳۳

در داده‌های آموزشی و مقادیر دلخواه با حذف مشخص شده توسط کاربر^۱، به‌منظور بهینه‌سازی مدل و ارتقاء عملکرد آن در نظر گرفته شده است.



شکل ۴-۶- تنظیمات آزمایشی مدل بیشینه بی‌نظمی

۶-۷- تهیه نقشه استعداد وقوع فرسایش خندقی

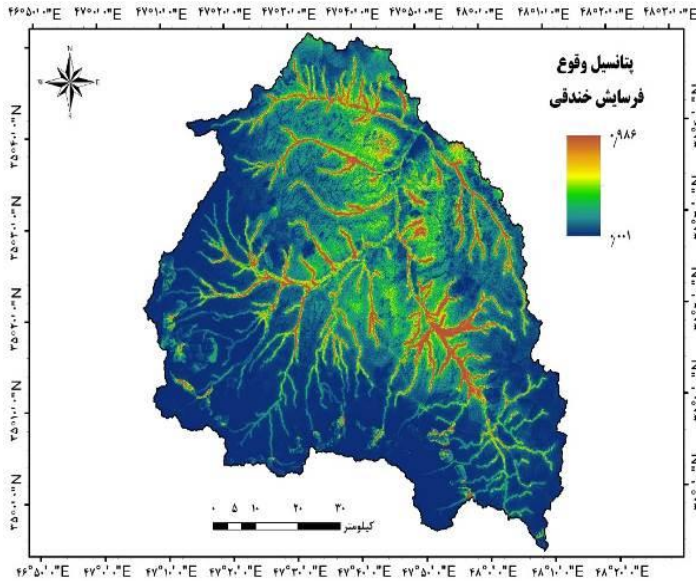
نقشه استعداد وقوع فرسایش خندقی، به‌عنوان خروجی اصلی مدل بیشینه بی‌نظمی در پوشه خروجی^۲ ذخیره می‌شود. پس از اتمام مدل‌سازی، مدل بیشینه بی‌نظمی نقشه استعداد وقوع فرسایش خندقی را با فرمت ASCII تولید می‌کند. نقشه استعداد وقوع فرسایش خندقی میزان احتمال وقوع رخداد فرسایش خندقی را در هر پیکسل از منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد و ارزش پیکسل‌های نقشه بین صفر تا یک متغیر است. هرچه ارزش پیکسل‌ها بالاتر باشد، استعداد وقوع فرسایش خندقی در آن بیشتر است.

شکل ۶-۵ نقشه پتانسیل وقوع فرسایش خندقی حوزه آبخیز تلوار استان کردستان را نشان می‌دهد که با استفاده از مدل بیشینه بی‌نظمی تولید شده است. براساس یافته‌های به‌دست آمده از این نقشه، قسمت‌های میانی و شمالی حوزه آبخیز تلوار دارای استعداد

¹ User-specified omission

² Output

وقوع فرسایش خندقی بالایی هستند و اقدامات حفاظت خاک و مدیریتی جدی در این بخش‌ها باید انجام شود.

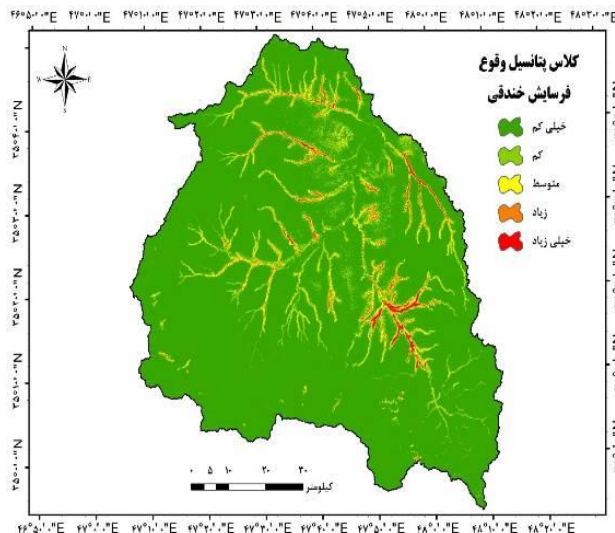


شکل ۶-۰- نقشه استعداد رخداد فرسایش خندقی حوزه آبخیز تلوار

با استفاده از مدل بیشینه بی‌نظمی (رحمتی و همکاران، ۱۴۰۱)

به‌منظور تفکیک وضعیت استعداد رخداد فرسایش خندقی، معمولاً نقشه به‌دست آمده به پنج کلاس مختلف شامل استعداد رخداد خیلی کم (۰ تا ۰/۲)، استعداد رخداد کم (۰/۲ تا ۰/۴)، استعداد رخداد متوسط (۰/۴ تا ۰/۶)، استعداد رخداد زیاد (۰/۶ تا ۰/۸) و استعداد رخداد خیلی زیاد (۰/۸ تا ۱) طبقه‌بندی می‌شود. بنابراین، براساس نقشه طبقه‌بندی پتانسیل فرسایش خندقی، سطح منطقه کلاس‌بندی شده و امکان برنامه‌ریزی دقیق‌تر به‌منظور اجرای اقدامات اجرایی بیشتر فراهم می‌شود. نقشه ارائه شده در شکل ۶-۶ نمونه‌ای از نقشه طبقه‌بندی پتانسیل فرسایش خندقی در حوزه آبخیز تلوار استان کردستان است. مساحت هر یک از طبقات استعداد فرسایش خندقی این حوزه آبخیز نیز در جدول ۶-۱ ارائه شده است.

----- اصول مدل سازی مکانی فرسایش خندقی با استفاده از مدل های هوش مصنوعی/ ۱۲۵



شکل ۶-۰- نقشه طبقه بندی استعداد رخداد فرسایش خندقی
حوزه آبخیز تلوار (رحمتی و همکاران، ۱۴۰۱)

جدول ۶-۰- مساحت طبقات استعداد رخداد فرسایش خندقی براساس مدل پیشینه بی نظمی
(رحمتی و همکاران، ۱۴۰۱)

طبقات پتانسیل	مساحت (هکتار)	مساحت (درصد)
خیلی کم (۰ تا ۰/۲)	۵۶۲۶۰۱/۶۱	۸۶/۹۸
کم (۰/۲ تا ۰/۴)	۵۱۴۲۶/۹۹	۷/۹۵
متوسط (۰/۴ تا ۰/۶)	۲۰۰۴۳/۱۸	۳/۱
زیاد (۰/۶ تا ۰/۸)	۸۶۰۲/۵۶	۱/۳۳
خیلی زیاد (۰/۸ تا ۱)	۴۱۵۲/۶۹	۰/۶۴

۸-۶- اعتبارسنجی نتایج مدل

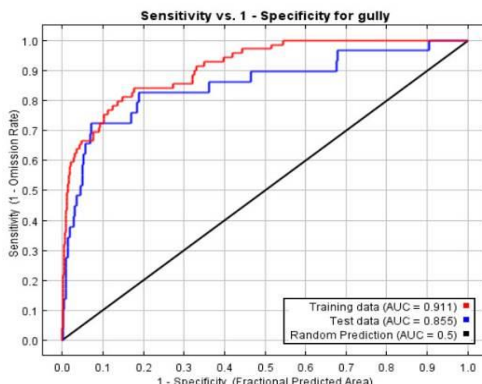
دقت مدل در مرحله آموزش یکی از مواردی است که باید موردبررسی قرار گیرد. در صورتی که مدل در مرحله آموزش دارای دقت قابل قبولی باشد، مدل می تواند به پیش بینی وضعیت استعداد فرسایش خندقی کل منطقه بپردازد. همان گونه که قبلاً توضیح داده شد، داده های موقعیت مکانی فرسایش خندقی به صورت تصادفی به دو

گروه آموزش و اعتبارسنجی تقسیم می‌شوند. در مرحله آموزش، مدل با استفاده از داده‌های گروه آموزش به شناخت روابط بین عوامل محیطی و فرسایش‌های خندقی می‌پردازد. پس از شناسایی روابط میان متغیرها، مدل قادر است تا پتانسیل فرسایش خندقی را پیش‌بینی کند. در مرحله اعتبارسنجی، کارایی مدل در پیش‌بینی پتانسیل فرسایش خندقی با استفاده از داده‌های گروه اعتبارسنجی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. منحنی مشخصه عملکرد گیرنده^۱ (ROC)، به عنوان قابل اعتمادترین معیار ارزیابی دقت مدل در مراحل آموزش و اعتبارسنجی است. مساحت زیر منحنی مشخصه عملکرد گیرنده (AUC)، به عنوان شاخص کمی محاسبه دقت مدل مورد استفاده قرار می‌گیرد.

به عنوان یک مطالعه موردی در حوزه آبخیز تلوار استان کردستان که توسط رحمتی و همکاران (۱۴۰۱) انجام شد، دقت مدل بیشینه بی‌نظمی براساس معیار AUC در دو مرحله آموزش و اعتبارسنجی به ترتیب ۹۱/۱ و ۸۵/۵ درصد به دست آمده است (شکل ۶-۷). دقت پیش‌بینی مدل را براساس معیار AUC می‌توان به چهار کلاس مختلف تقسیم کرد که عبارتند از دقت ضعیف ($AUC < 0.70$)، دقت خوب ($0.70 < AUC < 0.80$)، دقت خیلی خوب ($0.80 < AUC < 0.90$)، دقت عالی ($AUC > 0.90$). بنابراین، در مطالعه موردی مدل‌سازی فرسایش خندقی حوزه آبخیز تلوار، مدل بیشینه بی‌نظمی در مرحله آموزش دارای دقت عالی و در مرحله اعتبارسنجی دارای دقت خیلی خوب بوده است.

¹ Receiver operating characteristic

----- اصول مدل سازی مکانی فرسایش خندقی با استفاده از مدل های هوش مصنوعی / ۱۲۷



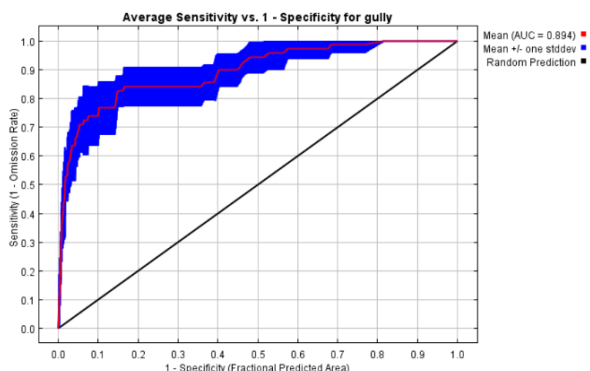
شکل ۶-۰- نمودار مشخصه عملکرد مدل در
مراحل آموزش و اعتبارسنجی در حوزه آبخیز تلوار

۶-۹- تکرار مدل سازی و استقامت مدل

یکی از موارد مهم در مدل سازی، بررسی استقامت^۱ مدل است. همان طور که پیش تر در فصل سوم گفته شد، استقامت مدل به بررسی پایداری دقت پیش بینی مدل در شرایطی می پردازد که تقسیم تصادفی داده های متغیر وابسته در دفعات متعدد انجام گیرد. در نرم افزار MaxEnt این ویژگی مهم مدنظر قرار گرفته و در قسمت تنظیمات آن، گزینه Repeatability برای تعیین تعداد تکرار مدل در حالت های مختلف تقسیم تصادفی داده های موقعیت مکانی رخداد فرسایش خندقی قابل استفاده است.

در پژوهش رحمتی و همکاران (۱۴۰۲)، استقامت مدل بیشینه بی نظمی در پیش بینی استعداد فرسایش خندقی در حوزه آبخیز تلوار ارزیابی شده که نتیجه آن در شکل ۶-۸ ارائه شده است. در این مطالعه، پنج تکرار مدل بیشینه بی نظمی در نظر گرفته شد. دامنه تغییرات کارایی مدل (براساس معیار مساحت زیر منحنی عملکرد گیرنده) و میانگین دقت پیش بینی این مدل در پنج تکرار مختلف، ۰/۸۹۴ (۸۹/۴ درصد) به دست آمده است. بنابراین هر چه در نمودار زیر، محدوده تغییرات کمتر باشد؛ استقامت و پایداری مدل نسبت به تقسیم تصادفی داده های متغیر وابسته بیشتر است.

¹ Robustness



شکل ۶-۰- نمودار مشخصه عملکرد مدل

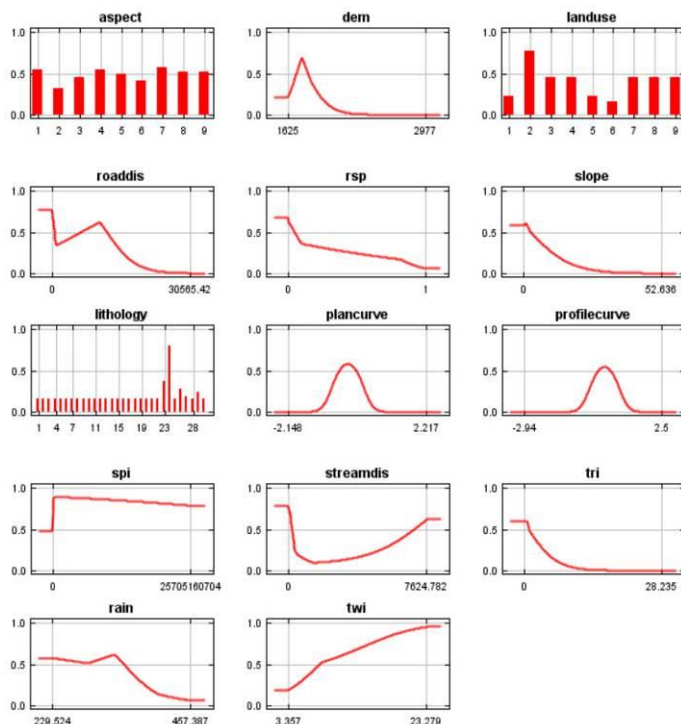
در تکرارهای مختلف در حوزه آبخیز تلوار

۶-۱۰- منحنی‌های پاسخ

یکی از مزیت‌ها و قابلیت‌های مدل پیشینه بی‌نظمی، تولید منحنی‌های پاسخ است که امکان شناسایی ارتباط فضایی میان هر عامل محیطی (متغیر پیش‌بینی‌کننده) و رخداد فرسایش خندقی (متغیر وابسته) را فراهم می‌کند. به این سبب، منحنی‌های پاسخ مدل پیشینه بی‌نظمی، اطلاعات ارزشمندی در راستای توسعه دانش مربوط به شکل‌گیری فرسایش خندقی در اختیار کاربران قرار می‌دهند.

شکل ۶-۹ نمونه‌ای از منحنی‌های پاسخ در مطالعه موردی فرسایش خندقی حوزه آبخیز تلوار که توسط رحمتی و همکاران (۱۴۰۱) انجام شده است را نمایش می‌دهد. به‌عنوان مثال، منحنی مربوط به شاخص ناهمواری (TRI) نشان می‌دهد که هر چه مقدار شاخص ناهمواری بیشتر شود، احتمال وقوع فرسایش خندقی کمتر خواهد شد. همچنین در مورد عامل شیب زمین، منحنی پاسخ نشان می‌دهد که افزایش شیب زمین موجب کاهش شدید احتمال وقوع فرسایش خندقی می‌شود. در مورد عامل کاربری اراضی نیز به‌عنوان یکی از متغیرهای گسسته، کلاس اراضی بایر (کلاس شماره ۲) دارای بیش‌ترین احتمال وقوع فرسایش خندقی است.

----- اصول مدل سازی مکانی فرسایش خندقی با استفاده از مدل های هوش مصنوعی/ ۱۲۹



شکل ۶-۱۰- منحنی های پاسخ به دست آمده از مدل بیشینه بی نظمی در حوزه آبخیز تلوار

۶-۱۱- تعیین میزان مشارکت عوامل محیطی

یکی از نتایج مهمی که براساس مدل بیشینه بی نظمی قابل برآورد است، تخمین میزان مشارکت عوامل محیطی در فرآیند رخداد فرسایش خندقی است. از آنجایی که وقوع فرسایش خندقی در شرایط پیچیده محیطی و در اثر آستانه های مختلف هیدرولوژیکی، توپوگرافی، ژئومورفولوژیکی، خاک و پوشش گیاهی به وجود می آید؛ تعیین میزان مشارکت عوامل محیطی در هر حوزه آبخیز امری دشوار است. مدل های یادگیری ماشینی براساس پردازش داده ها در مرحله آموزش، میزان اهمیت فاکتورهای پیش بینی کننده را می توانند تعیین کنند.

در مطالعه موردی فرسایش خندقی در حوزه آبخیز تلوار استان کردستان (رحمتی و همکاران، ۱۴۰۱)، مدل بیشینه بی نظمی درصد مشارکت عوامل محیطی را در رخداد

فرسایش خندقی تعیین کرد (جدول ۶-۲). اگر چه تمام عوامل محیطی در شکل‌گیری و وقوع فرسایش خندقی در حوزه آبخیز تلوار نقش داشته‌اند؛ اما عوامل فاصله از جریان، سنگ‌شناسی، بارندگی، ارتفاع و کاربری اراضی، بیش‌ترین نقش را در این خصوص ایفا کرده‌اند.

جدول ۶-۲- درصد مشارکت عوامل محیطی در حوزه آبخیز تلوار

عامل محیطی	درصد مشارکت	عامل محیطی	درصد مشارکت
فاصله از جریان	۴۳/۶	موقعیت شیب نسبی	۱/۱
سنگ‌شناسی	۲۰	شاخص رطوبت توپوگرافی	۰/۹
بارندگی	۱۷/۶	شاخص ناهمواری	۰/۸
ارتفاع	۸	مقدار شیب	۰/۴
کاربری اراضی	۳/۶	شاخص توان جریان	۰/۱
فاصله از جاده	۲/۱	انحنای سطح افقی	۰/۱
جهت شیب	۱/۷	انحنای سطح عمودی	۰/۱

۶-۱۲- برون‌فکنی مدل

یکی از قابلیت‌های مهم مدل بیشینه بی‌نظمی، قابلیت برون‌فکنی^۱ آن است که کاربرد این مدل را در مطالعات محیطی و مدیریت سرزمین را دوچندان می‌کند (Ngarega و همکاران، ۲۰۲۱). هنگامی که مدل بر روی داده‌های یک مجموعه آموزش می‌بیند، امکان تعمیم آموزش‌ها به یک مجموعه داده دیگر، برون‌فکنی نامیده می‌شود. به‌عنوان مثال، برای بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر احتمال رخداد پدیده موردنظر (فرسایش خندقی) می‌توان از این قابلیت مدل بیشینه بی‌نظمی استفاده کرد (Cai و Laurent، ۲۰۰۷).

در این حالت، ابتدا مدل‌سازی استعداد رخداد فرسایش خندقی براساس مجموعه داده‌های کنونی انجام می‌شود و بعد از شناخت روابط بین متغیرهای محیطی و داده‌های

¹ Projection

----- اصول مدل سازی مکانی فرسایش خندقی با استفاده از مدل های هوش مصنوعی/ ۱۳۱

مشاهداتی رخداد فرسایش محیطی، شرایط اقلیمی آینده به عنوان متغیرهای مجموعه دوم به مدل معرفی و نقشه استعداد فرسایش خندقی در شرایط اقلیمی آینده تولید می شود.

به منظور اجرای این روش، مجموعه داده دوم باید در قسمت Projection نرم افزار معرفی شود. به عنوان مثال، در مطالعه Kim و همکاران (۲۰۱۵) به منظور بررسی اثر دو سناریوی اقلیمی مختلف بر احتمال رخداد زمین لغزش در منطقه گانگوندو کره جنوبی از قسمت برون فکنی مدل پیشینه بی نظمی استفاده کردند.

منابع

منابع

- ابراهیمی، ل. ۱۳۹۹. تهیه نقشه مدیریت مخاطرات سیلاب با استفاده از الگوریتم نوین جنگل تصادفی (مطالعه موردی: حوزه آبخیز لواسانات). مجله مدیریت مخاطرات محیطی، ۷(۲): ۱۹۶-۱۸۱.
- احمدی، ح. ۱۳۹۱. ژئومرفولوژی کاربردی (فرسایش آبی). چاپ هشتم. انتشارات دانشگاه تهران. ۶۸۸ ص.
- احمدی، ح.، محمدی، ع.ا.، قدوسی، ج. و سلاجقه، ع. ۱۳۸۷. بررسی عوامل مؤثر و ارائه مدل جهت تعیین پتانسیل رشد طولی خندق‌ها (مطالعه موردی: حوزه آبخیز حبله‌رود). فصلنامه جغرافیایی سرزمین، ۱۸(۲): ۱-۱۲.
- اسداللهی، ز.، سلمان‌ماهینی، ع.ا.، میرکریمی، س.ح. و عظیمی، م. ۱۳۹۴. مدل‌سازی خدمات اکوسیستمی نگهداشت خاک با نرم‌افزار InVEST (مطالعه موردی: بخش شرقی حوزه آبخیز گرگانرود). مجله پژوهش‌های فرسایش محیطی. ۳(۱۹): ۷۵-۶۱.
- امیری، م.، پورقاسمی، ح.ر.، قنبریان، غ.ع. و افضلی، س.ف. ۱۳۹۸. مدل‌سازی مکانی فرسایش خندقی حوزه آبخیز مهارلو با استفاده از سناریوهای مختلف و الگوریتم وزن واقع. نشریه مهندسی و مدیریت آبخیز. ۱۱(۴): ۱۰۳۲-۱۰۱۶.
- انتظاری، م.، ملکی، ا.، مرادی، خ. و الفتی، س. ۱۳۹۴. بررسی فرسایش خندقی حوزه آبریز دیره با استفاده از روش تلفیق وزنی و شاخص توان آبراهه‌ای. فصلنامه تحقیقات جغرافیایی. ۳۰(۱۱۸): ۳۱۲-۲۹۷.
- انتظاری، م.، ملکی، ا.، مرادی، خ. و الفتی، س. ۱۳۹۲. پهنه‌بندی فرسایش خندقی در حوضه آبریز دیره با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP). برنامه‌ریزی و آمایش فضا. ۱۷(۴): ۸۶-۶۳.
- بابلی مؤخر، ح.، شیرانی، ک. و تقیان، ع. ۱۳۹۷. کارایی تئوری بی‌نظمی سامانه‌های طبیعی در پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش (مطالعه موردی: حوزه آبخیز رودخانه فهلیان). نشریه علوم زمین. ۲۸(۱۰۹): ۲۰۰-۱۸۷.
- بالنده، ن.، احمدی، ع.، سکوتی، ر. و دربندی، ص. ۱۳۹۲. تعیین شرایط آستانه توپوگرافی گسترش فرسایش خندقی با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی

- (مطالعه موردی: حوزه آبخیز ریحانلو-آذربایجان غربی). تحقیقات کاربردی خاک. (۲): ۱-۱۵.
- پوررضا، م.، زهتابیان، غ.ر.، خسروی، ح. و راهداری، م.ر. ۱۳۹۳. تأثیر تغییر کاربری اراضی بر روی تخریب زمین و بیابان‌زایی در حوزه آبخیز روانسر. فصلنامه مطالعات جغرافیایی مناطق خشک. ۴(۱۶): ۷۳-۸۵.
 - پورنادر، م.، فیض‌نیا، س.، احمدی، ح.، کریمی، ح. و پیروان، ح.ر. ۱۳۹۸. ارزیابی پایداری برآوردهای مدل بیشینه آنتروپی برای مدل‌سازی فرسایش شیاری. نشریه حفاظت منابع آب و خاک. ۹(۲): ۱۲۳-۱۳۹.
 - تیموری، م. و اسدی‌نلیوان، ا. ۱۳۹۸. پهنه‌بندی حساسیت و اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش با استفاده از مدل بیشینه آنتروپی (مطالعه موردی: استان لرستان). نشریه هیدروژئومورفولوژی. ۶(۲۱): ۱۷۹-۱۵۵.
 - ثروتی، م.ر.، قدوسی، ج. و دادخواه، م. ۱۳۸۷. عوامل مؤثر در شکل‌گیری و گسترش فرسایش خندقی در لس‌ها. نشریه پژوهش و سازندگی. ۲۱(۱): ۲۰-۳۳.
 - جعفری، م. و دین‌پژوه، ی. ۱۳۹۴. ارزیابی کاربرد مدل رگرسیون چندمتغیره تیغه‌ای در برآورد تبخیر از تشت. فصلنامه علوم و مهندسی آبیاری. ۴۰(۱): ۸۳-۹۷.
 - جهان‌تیغ، م. و تابع، م. ۱۳۹۶. مقایسه خصوصیات فیزیکی شیمیایی خاک و مورفولوژی خندق‌های دوزنقه‌ای و ۷ شکل با کاربری‌های متفاوت در مناطق خشک (مطالعه موردی: مناطق حسین‌زهی و نالینت شهرستان چابهار). نشریه مهندسی و مدیریت آبخیز. ۹(۳): ۳۱۷-۳۰۸.
 - خالدیان، ح. و شاهویی، ص. ۱۳۸۹. اندازه‌گیری فرسایش پاشمانی و رابطه آن با شدت بارندگی در استان کردستان. مجله پژوهش آب ایران. ۴(۶): ۱۹-۲۴.
 - خاموشی، س.، سرمیدیان، ف. و کشاورزی، ع. ۱۳۹۷. تهیه نقشه رقومی خاک با استفاده از مدل جنگل‌های تصادفی در منطقه آبیک، استان قزوین. نشریه پژوهش‌های خاک (علوم خاک و آب). ۳۲(۳): ۴۰۳-۳۹۳.

----- اصول مدل‌سازی مکانی فرسایش خندقی با استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی/۱۳۵

- خزایی، م.، بیات، ر. و صالح، ا. ۱۴۰۰. بررسی اثرات مؤلفه‌های شیب و شدت بارندگی بر هدررفت خاک و رواناب در اراضی دیم (مطالعه موردی: اراضی دیم شهرستان گچساران). پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز. ۱۲(۲۴): ۱۹۲-۱۸۲.
- خزایی، م.، شفیعی، ا. و ملایی، ع. ۱۳۹۱. بررسی تأثیر عوامل مؤثر بر توسعه فرسایش آبکندی در حوزه آبخیز مارون. نشریه علوم خاک و آب. ۲۶(۲): ۱۶۴-۱۵۳.
- دفتر حفاظت خاک و آبخیزداری. ۱۳۶۴. نگرشی بر حفاظت خاک و آبخیزداری در ایران: گذشته، حال و آینده. ۱۰۸ ص.
- ذاکری، ر. و الوندی، پ. ۱۴۰۲. پیش‌بینی فرسایش خندقی با استفاده از داده‌های TanDEM-X و مدل بیشینه آنتروپی (مطالعه موردی: حوزه آبخیز خسویه). مجله پژوهش‌های فرسایش محیطی. ۱۳(۱): ۹۶-۱۱۳.
- رحمتی، ا.، سلیمان‌پور، س.م.، شادفر، ص. و زاهدی، ص. ۱۴۰۱. اندازه‌گیری رشد پارامترهای ابعادی خندق‌ها و محاسبه حجم هدررفت خاک سالانه ناشی از فرسایش خندقی در حوزه آبخیز کلوچه استان کردستان. مجموعه مقالات هفدهمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، جیرفت. ۶ ص.
- رحمتی، ا.، سلیمان‌پور، س.م.، شادفر، ص. و زاهدی، ص. ۱۴۰۲. الف. مدل‌سازی استعداد وقوع خندق در حوزه آبخیز تلوار استان کردستان و ارزیابی قابلیت تعمیم آن به حوزه آبخیز باباعرب استان فارس. گزارش نهایی پروژه تحقیقاتی. پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری. ۸۶ ص.
- رحمتی، ا.، سلیمان‌پور، عرب‌خدری، م.، مهرجو، س.، استفانو، ک.، کاوالی، م. و بهمنی، ع. ۱۴۰۲. ارزیابی تأثیر اقدامات آبخیزداری بر پیوستگی رسوب در حوزه آبخیز خامسان استان کردستان. گزارش نهایی پروژه تحقیقاتی. پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری. ۱۰۹ ص.
- رحمتی، ا.، طهماسبی‌پور، ن.، حق‌زاده، ع.، پورقاسمی، ح.ر. و فیضی‌زاده، ب. ۱۳۹۷. ارزیابی کارایی مدل بیشینه آنتروپی در پیش‌بینی استعداد وقوع فرسایش

- آبکندی حوزه آبخیز کشکان- پلدختر. مجله مهندسی و مدیریت آبخیز. ۱۰(۴): ۷۲۷-۷۳۸.
- رحمتی، ا.، نظری سامانی، ع.ا. و مهدوی، م. ۱۳۹۴. ارزیابی متغیرهای مؤثر بر پتانسیل آب زیرزمینی براساس تحلیل حساسیت (بررسی موردی: دشت قروه-دهگلان). نشریه مدیریت بیابان. ۳(۵): ۱۳-۱.
- رحمتی، ا.، نظری سامانی، ع.ا.، محمودی، ن. و چوبین، ب. ۱۳۹۶. ارزیابی کاربرد تکنیک شبکه‌بندی و روش AHP به منظور پهنه‌بندی پتانسیل تغذیه مصنوعی (مطالعه موردی: حوزه آبخیز چم‌شور استان کردستان). مجله مرتع و آبخیزداری. ۷۰(۳): ۶۸۱-۶۹۳.
- رحمتی، ا.، کرنازادی، آ.، چوبین، ب.، جعفری، ا. و امینی، ع. ۱۴۰۳. ارزیابی تأثیر عامل‌های محیطی در استعداد سیل‌گیری آبخیز سیروان براساس رخدادهای تاریخی سیل. پژوهش‌های آبخیزداری. ۳۷(۱): ۹۷-۸۰.
- رجب‌زاده، ف.، غیائی، س. و رحمتی، ا. ۱۳۹۷. کارائی الگوریتم پیشینه آنتروپی و سامانه اطلاعات جغرافیایی در ارزیابی حساسیت‌پذیری زمین‌لغزش‌های کم‌عمق. نشریه حفاظت منابع آب و خاک. ۸(۲): ۷۳-۵۷.
- رستمی‌زاد، ق.، سلاجقه، ع.، نظری سامانی، ع.ا. و قدوسی، ج. ۱۳۹۴. بررسی تعیین عوامل مؤثر بر رشد طولی خندق‌ها و پیش‌بینی گسترش آن (مطالعه موردی: شهرستان دره‌شهر). نشریه پژوهش‌های ژئومرفولوژی کمی. ۴(۱): ۵۸-۴۶.
- رفاهی، ح. ۱۳۹۴. فرسایش آبی و کنترل آن. چاپ هفتم. انتشارات دانشگاه تهران. ۶۷۴ ص.
- زمان‌زاده، س.م. و احمدی، م. ۱۳۹۲. تأثیر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در شکل‌گیری و گسترش فرسایش خندقی (مطالعه موردی: فارس، منطقه‌ی دشت کهور لامرد). نشریه پژوهش‌های ژئومرفولوژی کمی. ۲(۲): ۱۵۶-۱۳۵.
- زنگی‌آبادی، م.، رنگ‌آور، ع.، رفاهی، ح.، شرفا، م. و بی‌همتا، م. ۱۳۸۹. بررسی مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر فرآیند فرسایش خاک در مراتع نیمه‌خشک کلات. مجله آب و خاک. ۲۴(۴): ۷۴۴-۷۳۷.

- سلیمان پور، س.م. ۱۳۹۱. بررسی و مقایسه آستانه های کنترل کننده فرسایش خندقی در اقلیم های مختلف استان فارس. رساله دوره دکتری تخصصی علوم و مهندسی آبخیزداری. دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران. دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی. گروه آبخیزداری. ۵۹۴ ص.
- سلیمان پور، س.م.، پیروان، ح.ر.، قهاری، غ.ر.، حاتمی، ا. و حسینی مرندي، ح. ۱۴۰۰ الف. معرفی گیاهان مناسب و تعیین نقش حفاظتی آنها در اراضی مارنی غرب حوزه آبخیز مهارلو. مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. ۱۵ (۵۳): ۳۳-۴۵.
- سلیمان پور، س.م.، حاتمی، ا.، قهاری، غ.ر.، حسینی مرندي، ح. و کشاورزی، ح. ۱۴۰۰ ب. شناسایی و اولویت بندی گیاهان به منظور حفاظت و تثبیت مارن ها (مطالعه موردی: حوزه آبخیز تنگ سرخ استان فارس). نشریه مدل سازی و مدیریت آب و خاک. ۱ (۴): ۱-۱۳.
- سلیمان پور، س.م.، رحمتی، ا.، چوبین، ب.، صالح، ا.، شادفر، ص.، عنایتی، ک.، خزایی، م.، زاهدی، ص. و نجفی ایگدیر، ا. ۱۴۰۳. تخمین هدررفت خاک ناشی از فرسایش خندقی با استفاده از مدل های یادگیری ماشینی و معرفی مناسب ترین مدل. گزارش نهایی پروژه تحقیقاتی ملی. پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری. ۱۸۹ ص.
- سلیمان پور، س.م.، رحمتی، ا.، شادفر، ص. و عنایتی، م. ۱۴۰۱ الف. برآورد فرسایش خاک ناشی از ایجاد و گسترش خندق ها در حوزه آبخیز ماهورمیلانی استان فارس. مجموعه مقالات هفدهمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری، جیرفت. ۷ ص.
- سلیمان پور، س.م.، رحمتی، ا.، شادفر، ص. و عنایتی، م. ۱۴۰۱ ب. محاسبه هدررفت سالانه خاک ناشی از فرسایش خندقی در حوزه آبخیز ماهورمیلانی استان فارس. مجموعه مقالات پنجمین کنفرانس ملی حفاظت خاک و آبخیزداری. تهران. ۷ ص.
- سلیمان پور، س.م.، رحمتی، ا.، شادفر، ص. و غلامی، ح. ۱۴۰۱ پ. بررسی سهم منابع تولید کننده رسوب ناشی از فرسایش های ورقه ای، شیاری، خندقی و آبراهه ای با

- استفاده از روش انگشت‌نگاری رسوب در حوزه آبخیز نی‌ریز استان فارس. گزارش نهایی پروژه تحقیقاتی. پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری. ۹۶ ص.
- سلیمان‌پور، س.م.، صوفی، م. و احمدی، ح. ۱۳۸۶. بررسی عوامل مؤثر بر فرسایش خندقی تولید رسوب و هدررفت خاک در منطقه گوراسپید استان فارس. مجموعه مقالات پنجمین کنفرانس زمین‌شناسی مهندسی و محیط زیست. تهران. ۹ ص.
- سلیمان‌پور، س.م.، صوفی، م.، روستا، م.ج. و شادفر، ص. ۱۳۹۸ الف. محاسبه حجم خاک از دست‌رفته ناشی از فرسایش خندقی و برآورد هزینه اقتصادی آن (مطالعه موردی: حوزه آبخیز قاضیان استان فارس). مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. ۱۳(۴۶): ۱۲۰-۱۱۲.
- سلیمان‌پور، س.م.، صوفی، م.، روستا، م.ج.، شادفر، ص.، جوکار، ل. و کشاورزی، ح. ۱۳۹۹. بررسی روند پیشروی خندق‌های دائمی در حوزه آبخیز خرم‌بید استان فارس. نشریه مهندسی و مدیریت آبخیز. ۱۲(۱): ۳۲۹-۳۱۸.
- سلیمان‌پور، س.م.، صوفی، م.، روستا، م.ج.، شادفر، ص.، جوکار، ل. و کشاورزی، ح. ۱۳۹۸ ب. تعیین عوامل مؤثر بر گسترش طول آبکندها در حوزه آبخیز قاضیان استان فارس. پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز. ۱۰(۲۰): ۸۲-۷۲.
- سلیمان‌پور، س.م.، صوفی، م.، روستا، م.ج.، شادفر، ص.، جوکار، ل. و کشاورزی، ح. ۱۳۹۷. بررسی میزان تأثیر عوامل مؤثر بر گسترش فرسایش آب‌کندی. گزارش نهایی پروژه تحقیقاتی، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری. ۵۹ ص.
- سلیمان‌پور، س.م.، صوفی، م. و احمدی، ح. ۱۳۸۹. بررسی آستانه توپوگرافی و عوامل مؤثر بر رسوب‌زایی و گسترش خندق‌ها در منطقه نی‌ریز استان فارس. نشریه مرتع و آبخیزداری. ۶۳(۱): ۵۲-۴۱.
- شادفر، ص. ۱۳۹۰. بررسی فرسایش خندقی با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی در شهرستان رودبار استان گیلان. مجله پژوهش‌های فرسایش محیطی. ۱(۳): ۳۰-۱۶.

- شادفر، ص. ۱۳۹۵. تعیین پتانسیل فرسایش خندقی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی (مطالعه موردی: حوزه آبخیز طرود). نشریه مهندسی و مدیریت آبخیز. ۸(۳): ۲۶۳-۲۵۶.
- شادفر، ص. ۱۳۸۹. مقدمه ای بر فرسایش خندقی. نشر انتخاب. ۱۴۲ ص.
- شادفر، ص.، داودی راد، ع.ا. و پیروان، ح.ر. ۱۳۹۱. بررسی و مقایسه ویژگی های فرسایش خندقی در کاربری های کشاورزی و مرتعی (مطالعه موردی: حوزه آبخیز رباط ترک). نشریه مهندسی و مدیریت آبخیز. ۴(۴): ۲۲۲-۲۱۷.
- شهبازی، خ.، سلاجقه، ع.، جعفری، م. و خسروشاهی، م. ۱۳۹۸. مقایسه ی آستانه ی توپوگرافی فرسایش خندقی در کاربری های کشاورزی، مرتع متوسط و مرتع فقیر در منطقه قصر شیرین. نشریه مرتع و آبخیزداری. ۷۲(۱): ۱۳۸-۱۲۳.
- شیرانی، ک. ۱۳۹۹. پهنه بندی و ارزیابی نقشه حساسیت فرسایش خندقی با استفاده از روش های آماری و احتمالاتی. نشریه علوم آب و خاک. ۲۵(۲): ۱۷۴-۱۵۱.
- صادقی، س.ح.ر. داودی راد، ع.ا. سعدالدین، ا. و پایمزد، ش. ۱۳۹۶. روند تغییرات شاخص تخریب زمین در حوزه آبخیز شازند استان مرکزی. نشریه مهندسی و مدیریت آبخیز. ۹(۴): ۳۹۷-۳۸۳.
- صالح، ا.، رحمتی، ا.، سلیمان پور، س.م. و شادفر، ص. ۱۴۰۲. ارزیابی کارایی مدل GARP در پیش بینی احتمال وقوع فرسایش خندقی در آبخیز آبگندی استان کهگیلویه و بویراحمد. مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. ۱۷(۶۰): ۴۰-۳۱.
- صوفی، م. ۱۳۸۳. بررسی ویژگی های مورفوکلیماتیک آبکندهای استان فارس. گزارش نهایی طرح تحقیقاتی. پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری. تهران. ۱۳۰ ص.
- عاقلی کهنه شهری، ل. و صادقی، ح. ۱۳۸۴. برآورد آثار اقتصادی فرسایش خاک در ایران. فصلنامه پژوهش های اقتصادی. ۵(۱۵): ۱۰۰-۸۷.
- عبدالله زاده، غ.ح.، جهانگیر، ل. و شریف زاده، م.ش. ۱۳۹۷. بررسی آگاهی از پیامدهای فرسایش خاک و راهبردهای حفاظتی در نواحی روستایی حوزه آبخیز چهل چای گلستان، مجله جغرافیا و برنامه ریزی محیطی. ۲۹(۱): ۲۰-۱.

- عرب‌خدری، م. ۱۳۹۳ الف. مروری بر عوامل مؤثر بر فرسایش آبی خاک در ایران. نشریه مدیریت اراضی. ۲(۱): ۱۷-۲۶.
- عرب‌خدری، م. ۱۳۹۳ ب. مروری بر نرخ فرسایش آبی و تولید رسوب در ایران. نشریه ترویج و توسعه آبخیزداری. ۲(۴): ۲۳-۳۰.
- عرب‌قشقایی، ز.، نیک‌کامی، د. و شادفر، ص. ۱۳۸۹. بررسی عوامل مؤثر بر وقوع فرسایش خندقی حوزه آبخیز طرود. مجموعه مقالات ششمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری و چهارمین همایش ملی فرسایش و رسوب، نور. ۷ ص.
- عرب‌قشقایی، ز.، نیک‌کامی، د.، شادفر، ص. و معینی، ا. ۱۳۹۵. پهنه‌بندی فرسایش خندقی در حوزه آبخیز طرود فیروزکوه. فصلنامه جغرافیایی سرزمین. ۸(۳۱): ۱۱۹-۱۰۷.
- فرهنگ تخصصی فرسایش و رسوب. ۱۳۸۲. انتشارات کمیسیون ملی یونسکو. ۴۰۰ ص.
- فیض‌نیا، س.، تیموریان، ت. و رحمتی، ا. ۱۳۹۷. مدل‌سازی مخاطرات طبیعی (مفاهیم و کاربرد تکنیک‌های داده‌کاوی). انتشارات دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان. ۲۷۸ ص.
- فیض‌نیا، س.، حشمتی، م.، احمدی، ح. و قدوسی، ج. ۱۳۸۶. بررسی فرسایش آب‌کندی سازند مارنی آغاجاری در منطقه قصر شیرین. نشریه پژوهش و سازندگی. ۷۴(۴): ۳۲-۴۰.
- قاسمی‌اسفهلان، ا.، محسنی‌زنوزی، ی. و جعفری، م. ۱۳۹۴. طبقه‌بندی شی‌گرای مناطق شهری با تلفیق تصاویر ابرطیفی و لایدار و الگوریتم جنگل تصادفی. مجموعه مقالات بیست و دومین همایش ملی ژئوماتیک، تهران. ۱۱ ص.
- قربانی، س.، رحمتی، ا. و نورمحمدی، ف. ۱۳۹۶. مدل‌سازی پتانسیل رخداد فرسایش‌های آب‌کندی در منطقه سیمره با استفاده از مدل‌های آتروپی شانون و شاخص آماری. مجله پژوهش‌های فرسایش محیطی. ۷(۱): ۸۹-۶۹.

----- اصول مدل سازی مکانی فرسایش خندقی با استفاده از مدل های هوش مصنوعی/۱۴۱

- کیانی، م.، سعیدی، پ. و صادقی، س.ح.ر. ۱۳۹۷. تحلیل حلقه های سنجه رسوبی فرسایش بین شیباری در رگبارهای پیاپی تحت شرایط آزمایشگاهی. مجله تحقیقات آب و خاک ایران. ۴۹(۲): ۳۰۲-۲۹۳.
- کمالی مسکونی، ا.، عادلپور، ع. و پیرنیا، ع. ۱۳۹۵. بررسی تأثیر درجه شیب زمین بر آستانه فرسایش (خندقی) در پروژه های پخش سیلاب. پژوهش های آبخیزداری. ۲۹(۴): ۲۹-۲۰.
- گلکاریان، ع.، احمدی، ح.، سلاجقه، ع.، جعفری، م. و شهبازی، ع. ۱۳۹۳. بررسی روند تغییرات مکانی غلظت رسوب در طول دامنه. نشریه مرتع و آبخیزداری. ۶۷(۴): ۵۸۷-۶۰۱.
- متکان، ع.ا.، شکبیا، ع.ر. و عاشورلو، د. ۱۳۸۶. مقایسه تطبیقی روش های حذف خطاهای مدل ارتفاعی رقومی (DEM) حوزه های آبخیز. فصلنامه علوم محیطی. ۴۹-۵۹: (۳)۴.
- محمدابراهیمی، م. ۱۳۹۶. شناسایی علل وقوع فرسایش خندقی با تأکید بر خصوصیات خاک (مطالعه موردی: حوزه آبخیز آق امام). نشریه حفاظت منابع آب و خاک. ۷(۲): ۱-۱۴.
- مددی، ع.، اصغری، ص.، نگهبان، س. و مرحمت، م. ۱۴۰۲. ارزیابی تأثیر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک در شکل گیری و گسترش فرسایش خندقی (منطقه مورد مطالعه: حوزه آبخیز رودخانه شور). مجله پژوهش های فرسایش محیطی. ۱۳(۱): ۱۳۵-۱۵۴.
- مددی، ع.، اصغری سراسکانرود، ص. و مرحمت، م. ۱۴۰۱. نقش خصوصیات خاک و آستانه توپوگرافی بر فرسایش خندقی در حوضه آبخیز رودخانه شور (شهرستان مهر). پژوهش های ژئومورفولوژی کمی. ۱۰(۴): ۷۵-۹۵.
- مصفايي، ج. و طالبی، ع. ۱۳۹۳. نگاهی آماری به وضعیت فرسایش آبی در ایران. نشریه ترویج و توسعه آبخیزداری. ۲(۵): ۱۷-۹.

- موحدی نسب، س.، فتح آبادی، ا.، سیدیان، س. و حشمت‌پور، ع. ۱۳۹۸. ارزیابی روش‌های آماری و داده‌کاوی مکانی در پهنه‌بندی خطر فرسایش خندقی در اراضی لسی استان گلستان. نشریه مرتع و آبخیزداری. ۷۲(۱): ۲۶۱-۲۴۱.
- میرزایی، ج.، نورمحمدی، ف. و یوسفی، ع. ۱۳۹۳. ارزیابی مهم‌ترین فاکتورهای مؤثر بر فرسایش آب‌کندی در مناطق خشک و نیمه‌خشک استان ایلام. مجله پژوهش‌های فرسایش محیطی. ۴(۱): ۱۷-۲۸.
- نائل، م.، جلالیان، ا.، خادمی، ح.، کلباسی، م.، ستوهیان، ف. و شولین، ر. ۱۳۸۹. تأثیر مواد مادری و تحول خاک بر ویژگی‌های ژئوشیمیایی خاک‌های جنگلی منطقه فومن- ماسوله. نشریه علوم آب و خاک. ۱۴(۵۴): ۱۵۱-۱۳۵.
- نظری‌سامانی، ع.ا.، احمدی، ح.، جعفری، م. و قدوسی، ج. ۱۳۸۸. بررسی عوامل مؤثر در تولید رسوب حاصل از فرسایش خندقی در حوزه‌های آبخیز کوچک (مطالعه موردی: حوزه آبخیز دره‌کره بوشهر). نشریه پژوهش‌های جغرافیای طبیعی. ۴۱(۶۹): ۳۴-۱۹.
- نظری‌سامانی، ع.ا.، توکلی، ف.، احمدی، ح. و راهی، غ.ر. ۱۳۹۳. تعیین عوامل مؤثر بر رشد طولی فرسایش خندقی (مطالعه موردی: حوزه آبخیز دره‌کره). نشریه مرتع و آبخیزداری. ۶۷(۱): ۱۱۷-۱۲۶.
- نور، ح. و عرب‌خدری، م. ۱۳۹۹. تأثیرپذیری رواناب و هدررفت خاک اندازه‌گیری شده از تغییر طول و جهت دامنه تحت بارش‌های طبیعی در یک منطقه خشک. پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز. ۱۱(۲۲): ۲۶۲-۲۵۴.
- واعظی، ع.ر.، کریمی، ش. و فرومدی، م. ۱۳۹۸. اثرات کاربری زمین بر فرآیندهای فرسایش بارانی در یک خاک مارنی تحت باران شبیه‌سازی شده در غرب زنجان. نشریه علوم آب و خاک. ۲۳(۴): ۲۴۱-۲۲۷.
- ویسی‌سرطایره، چ. و اسفندیاری‌درآبادی، ف. ۱۳۹۴. بررسی نقش شیب در شکل‌گیری و گسترش فرسایش خندقی (مطالعه موردی: شهرستان ثلاث باباجانی). مجموعه مقالات نخستین کنفرانس ملی دستاوردهای نوین در علوم زیستی و کشاورزی، تهران. ۷ ص.

— یغماییان مهابادی، ن.، اسدی، ح. و رضایی، ص. ۱۳۹۶. پهنه‌بندی و ارزیابی خطر تخریب اراضی با استفاده از روش مدالوس در حوزه آبخیز سیاه‌پوش استان اردبیل. نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. ۲۴(۱): ۱۸۷-۱۷۳.

— یمانی، م.، زمان‌زاده، س.م. و احمدی، م. ۱۳۹۲. تحلیل عوامل مؤثر بر شکل‌گیری و توسعه فرسایش خندقی (مطالعه موردی: حوضه دشت کهور در استان فارس). نشریه کاوش‌های جغرافیایی مناطق بیابانی. ۱(۱): ۸۴-۵۳.

- Adamu, G.K., Maharaz, A.Y. and Mohammed A. 2014. Soil degradation in drylands. Academic Research International. 5(1): 78-91.
- Adger, W.N., Benjaminsen, T.A., Brown, K. and Svarstad, H. 2001. Advancing a political ecology of global environmental discourses. Development and change. 32(4): 681-715.
- Ahmad, A.S., Hassan, M.Y., Abdullah, M.P., Rahman, H.A., Hussin, F., Abdullah, H. and Saidu, R. 2014. A review on applications of ANN and SVM for building electrical energy consumption forecasting. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 33: 102-109.
- Alin, A. 2010. Multicollinearity. Wiley interdisciplinary reviews: computational statistics. 2(3): 370-374.
- Ananda, J. and Herath, G. 2003. Soil erosion in developing countries: A socio-economic appraisal. Journal of Environmental Management. 68(4): 343-353.
- Arabameri, A., Asadi Nalivan, O., Chandra Pal, S., Chakraborty, R., Saha, A., Lee, S., Pradhan, B. and Tien Bui, D. 2020. Novel machine learning approaches for modelling the gully erosion susceptibility. Remote Sensing. 12(17): p. 2833.
- Arabameri, A., Pradhan, B. and Lombardo, L. 2019. Comparative assessment using boosted regression trees, binary logistic regression, frequency ratio and numerical risk factor for gully erosion susceptibility modelling. Catena. 183: p. 104223.
- Arabameri, A., Rezaei, K., Pourghasemi, H.R., Lee, S. and Yamani, M. 2018. GIS-based gully erosion susceptibility mapping: a comparison among three data-driven models and AHP knowledge-based technique. Environmental Earth Sciences. 77: 1-22.
- Assaf, A.G., Tsionas, M. and Tasiopoulos, A. 2019. Diagnosing and correcting the effects of multicollinearity: Bayesian implications of ridge regression. Tourism Management. 71: 1-8.
- Assefa, D., Eddy, J., Cathelijne, R., Stoof, A., Tilahun, C., Dagnaw, A., Zimale, D., Guzman, B. and Tammo, S. 2016. Morphological dynamics of gully systems in the sub-humid Ethiopian Highlands: The Debre Mawi Watershed. Journal of Soil Discuss. 12: 2016-2025.
- Azareh, A., Rahmati, O., Rafiei-Sardooi, E., Sankey, J.B., Lee, S., Shahabi, H. and 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: 684-696.
- Azedou, A., Lahssini, S., Khattabi, A., Meliho, M. and Rifai, N. 2021. A methodological comparison of three models for gully erosion susceptibility mapping in the rural municipality of El Faid (Morocco). *Sustainability*. 13(2): p.682.
 - Baggio, T., Mergili, M. and D'Agostino, V. 2021. Advances in the simulation of debris flow erosion: The case study of the Rio Gere (Italy) event of the 4th August 2017. *Geomorphology*. 381: p.107664.
 - Bakker, M.M., Govers, G., Van Doorn, A., Quetier, F., Chouvardas, D. and Rounsevell, M. 2008. The response of soil erosion and sediment export to land-use change in four areas of Europe: The importance of landscape pattern. *Geomorphology*. 98(3-4): 213-226.
 - Baldwin, R.A. 2009. Use of maximum entropy modeling in wildlife research. *Entropy*. 11(4): 854-866.
 - Bastola, S., Dialynas, Y.G., Bras, R.L., Noto, L.V. and Istanbuloglu, E. 2018. The role of vegetation on gully erosion stabilization at a severely degraded landscape: A case study from Calhoun Experimental Critical Zone Observatory. *Geomorphology*. 308: 25-39.
 - Bates, S., Hastie, T. and R. Tibshirani. 2024. Cross-validation: what does it estimate and how well does it do it?. *Journal of the American Statistical Association*. 119(546): 1-12.
 - Belay, M. and Bewket, W. 2012. Assessment of gully erosion and practices for its control in north-western highlands of Ethiopia. *International Journal of Environmental Studies*. 69(5): 714-728.
 - Belgiu, M. and Drăguț, L. 2016. Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*. 114: 24-31.
 - Blanco H. and R. Lal. 2008. *Principle of soil conservation and management*. Springer Netherlands. p. 617.
 - Boulesteix, A.L., Janitza, S., Kruppa, J. and König, I.R. 2012. Overview of random forest methodology and practical guidance with emphasis on computational biology and bioinformatics. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery*. 2(6): 493-507.
 - Cervantes, J., Garcia-Lamont, F., Rodríguez-Mazahua, L. and Lopez, A. 2020. A comprehensive survey on support vector machine classification: Applications, challenges and trends. *Neurocomputing*. 408: 189-215.
 - Chen, Z., Guo, M., Wang, W., Wang, W. and Feng, L. 2023. Response of soil erodibility of permanent gully heads to revegetation along a vegetation zone gradient in the loess-table and gully region of the Chinese Loess Plateau. *Science of The Total Environment*. 892: p.164833.
 - Conforti, M., Auceili, P.P., Robustelli, G. and 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.
- Conoscenti, C. and Rotigliano, E. 2020. Predicting gully occurrence at watershed scale: Comparing topographic indices and multivariate statistical models. *Geomorphology*. 359: p.107123.
 - Conoscenti, C. and Sheshukov, A.Y. 2023. Regional variability of terrain index and machine learning model applications for prediction of ephemeral gullies. *Geomorphology*. 442: p.108915.
 - Conoscenti, C., Agnesi, V., Angileri, S., Cappadonia, C., Rotigliano, E. and Märker, M. 2013. A GIS-based approach for gully erosion susceptibility modelling: a test in Sicily, Italy. *Environmental earth sciences*. 70: 1179-1195.
 - Conoscenti, C., Angileri, S., Cappadonia, C., Rotigliano, E., Agnesi, V. and Märker, M. 2014. Gully erosion susceptibility assessment by means of GIS-based logistic regression: A case of Sicily (Italy). *Geomorphology*. 204: 399-411.
 - De Geeter, S., Verstraeten, G., Poesen, J., Campforts, B. and Vanmaercke, M. 2023. A data driven gully head susceptibility map of Africa at 30 m resolution. *Environmental Research*. 224: p.115573.
 - Dewitte, O., Daoudi, M., Bosco, C. and Van Den Eeckhaut, M. 2015. Predicting the susceptibility to gully initiation in data-poor regions. *Geomorphology*. 228: 101-115.
 - Dube, F., Nhapi, I., Murwira, A., Gumindoga, W., Goldin, J. and 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: 145-152.
 - Dudal, R. 1981. Evaluation of conservation needs. In *Soil conservation problems and prospects: [proceedings of Conservation 80, the International Conference on Soil Conservation, held at the National College of Agricultural Engineering, Silsoe, Bedford, UK. 21st-25th July, 1980]/edited by RPC Morgan. Chichester [England]. Wiley. c1981. 3-12.*
 - Ehiorobo, J.O. and Izinyon, O.C. 2013. Monitoring of soil loss from erosion using geoinformatics and geotechnical engineering methods. *Journal of Civil Engineering and Architecture*, 7(1), p.78.
 - Elith, J., Leathwick, J.R. and Hastie, T. 2008. A working guide to boosted regression trees. *Journal of animal ecology*. 77(4): 802-813.
 - Evans, I.S. 2012. Geomorphometry and landform mapping: What is a landform? *Geomorphology*. 137(1): 94-106.
 - Fang, H.Y. and Guo, M. 2015. Aspect-induced differences in soil erosion intensity in a gullied hilly region on the Chinese Loess Plateau. *Environmental Earth Sciences*. 74: 5677-5685.
 - Farr, T.G., Rosen, P.A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L. and Seal, D. 2007. The shuttle radar topography mission. *Reviews of Geophysics*. 45(2): p. 33.

- Ferrer, N., Santana, K., Martín, J., Valdazo, J. and Bergasa, O. 2023. Holocene Erosional Processes in a Highly Exposed Intertidal Sandstone Reef Inferred from Remote Sensing Data. *Remote Sensing*. 15(12): p. 2968.
- Gábris, G., Kertész, Á. and Zámbo, L. 2003. Land use change and gully formation over the last 200 years in a hilly catchment. *Catena*. 50(2-4): 151-164.
- Gao, J. and Liu, Y. 2010. Determination of land degradation causes in Tongyu County, Northeast China via land cover change detection. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 12(1): 9-16.
- García-Ruiz, J.M., Beguería, S., Nadal-Romero, E., González-Hidalgo, J.C., Lana-Renault, N. and Sanjuán, Y. 2015. A meta-analysis of soil erosion rates across the world. *Geomorphology*. 239: 160-173.
- Garosi, Y., Sheklabadi, M., Pourghasemi, H.R., Besalatpour, A.A., Conoscenti, C. and Van Oost, K. 2018. Comparison of differences in resolution and sources of controlling factors for gully erosion susceptibility mapping. *Geoderma*. 330: 65-78.
- Gayen, A., Pourghasemi, H.R., Saha, S., Keesstra, S. and Bai, S. 2019. Gully erosion susceptibility assessment and management of hazard-prone areas in India using different machine learning algorithms. *Science of the total environment*. 668: 124-138.
- Gholami, H., Mohammadifar, A., Golzari, S., Song, Y. and Pradhan, B. 2023. Interpretability of simple RNN and GRU deep learning models used to map land susceptibility to gully erosion. *Science of the Total Environment*. 904: p.166960.
- Ghorbanzadeh, O., Shahabi, H., Mirchooli, F., Valizadeh Kamran, K., Lim, S., Aryal, J., Jarihani, B. and Blaschke, T. 2020. Gully erosion susceptibility mapping (GESM) using machine learning methods optimized by the multi-collinearity analysis and K-fold cross-validation. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. 11(1): 1653-1678.
- Ghosh, S. and Kundu, S. 2022. Morphometric characterization and erosion assessment of gullies in the lateritic badlands of Eastern India using ALOS AW3D30 DEM and topographic indices. *Geocarto International*. 37(25): 10096-10129.
- Gideon, D., Mustafa, F.B. and Victor, I. 2021. The application of an expert knowledge-driven approach for assessing gully erosion susceptibility in the subtropical Nigerian savannah. *Singapore Journal of Tropical Geography*. 42(1): 107-131.
- Graham, M.H. 2003. Confronting multicollinearity in ecological multiple regression. *Ecology*. 84(11): 2809-2815.
- Hasanuzzaman, M., Adhikary, P.P. and Shit, P.K. 2023. Gully Erosion Susceptibility Mapping and Prioritization of Gully-Dominant Sub-Watersheds using Machine Learning Algorithms: Evidence from the

- Silabati River (tropical river, India). *Advances in Space Research*. 73(3): 1653-1666.
- Hazbavi Z. and Sadeghi, S.H.R. 2017. Watershed health characterization using reliability-resilience-vulnerability conceptual framework based on hydrological responses. *Land Degradation and Development*. 28: 1528-1537.
 - Hein, L. 2007. Assessing the costs of land degradation: a case study for the Puente catchment, southeast Spain. *Land Degradation & Development*. 18(6): 631-642.
 - Hembram, T.K., Paul, G.C. and Saha, S. 2019. Spatial prediction of susceptibility to gully erosion in Jainti River basin, Eastern India: a comparison of information value and logistic regression models. *Modeling Earth Systems and Environment*. 5: 689-708.
 - Hembram, T.K., Saha, S., Pradhan, B., Abdul Maulud, K.N. and Alamri, A.M. 2021. Robustness analysis of machine learning classifiers in predicting spatial gully erosion susceptibility with altered training samples. *Geomatics. Natural Hazards and Risk*. 12(1): 794-828.
 - Hitouri, S., Meriamé, M., Ajim, A.S., Pacheco, Q.R., Nguyen-Huy, T., Bao, P.Q., ElKhrachy, I. and Varasano, A. 2023. Gully erosion mapping susceptibility in a Mediterranean environment: A hybrid decision-making model. *International Soil and Water Conservation Research*. 12(2): 279-297.
 - Hitouri, S., Varasano, A., Mohajane, M., Ijlil, S., Essahlaoui, N., Ali, S.A., Essahlaoui, A., Pham, Q.B., Waleed, M., Palateerdham, S.K. and Teodoro, A.C. 2022. Hybrid machine learning approach for gully erosion mapping susceptibility at a watershed scale. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 11(7): p.401.
 - Höge, M., Wöhling, T. and Nowak, W. 2018. A primer for model selection: The decisive role of model complexity. *Water Resources Research*. 54(3): 1688-1715.
 - Huang, D., Su, L., Zhou, L., Tian, Y. and Fan, H. 2023. Assessment of gully erosion susceptibility using different DEM-derived topographic factors in the black soil region of Northeast China. *International Soil and Water Conservation Research*. 11(1): 97-111.
 - Igwe, O., John, U.I., Solomon, O. and Obinna, O. 2020. GIS-based gully erosion susceptibility modeling, adapting bivariate statistical method and AHP approach in Gombe town and environs Northeast Nigeria. *Geoenvironmental Disasters*. 7: 1-16.
 - Igwe, P.U., Chinedu, O.C., Nlem, E.U., Nwezi, C.C. and Ezekwu, J.C. 2018. A Review of Landscape Design as a Means of Controlling Gully Erosion. *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology*. 3(1): 103-111.
 - Jancewicz, K., Migoń, P. and Kasprzak, M. 2019. Connectivity patterns in contrasting types of tableland sandstone relief revealed by Topographic Wetness Index. *Science of the Total Environment*. 656: 1046-1062.

- Javidan, N., Kavian, A., Pourghasemi, H.R., Conoscenti, C. and Jafarian, Z. 2020. Data mining technique (maximum entropy model) for mapping gully erosion susceptibility in the gorganrood watershed, Iran. *Gully Erosion Studies from India and Surrounding Regions*. 427-448.
- Kab, A., Djerbal, L. and Bahar, R. 2023. Implementation of PCA multicollinearity method to landslide susceptibility assessment: the study case of Kabylia region. *Arabian Journal of Geosciences*. 16(4): p. 291.
- Kariminejad, N., Hosseinalizadeh, M., Pourghasemi, H.R., Bernatek-Jakiel, A. and Alinejad, M. 2019. GIS-based susceptibility assessment of the occurrence of gully headcuts and pipe collapses in a semi-arid environment: Golestan Province, NE Iran. *Land Degradation & Development*. 30(18): 2211-2225.
- Kariminejad, N., Pourghasemi, H.R., Hosseinalizadeh, M., Rossi, M. and Mondini, A. 2023. Evaluating land degradation by gully erosion through soil erosion indices and rainfall thresholds. *Natural Hazards*. 117: 3353-3369.
- Katz, H.A., Daniels, J.M. and Ryan, S. 2014. Slope-area thresholds of road-induced gully erosion and consequent hillslope-channel interactions. *Earth surface processes and landforms*. 39(3): 285-295.
- Kim, H.G., Lee, D.K., Park, C., Kil, S., Son, Y. and Park, J.H. 2015. Evaluating landslide hazards using RCP 4.5 and 8.5 scenarios. *Environmental Earth Sciences*. 73: 1385-1400.
- Kovda, V.A. 1983. Loss of productive land due to salinization. *Ambio*.
- Kukal, S.S. and G.S. Matharu. 2002. Behavior of gully erosion in relation to catchment characteristics in foothills of lower shivaliks. 17th WCSS. 628.
- Lafi, S.Q. and Kaneene, J.B. 1992. An explanation of the use of principal-components analysis to detect and correct for multicollinearity. *Preventive Veterinary Medicine*. 13(4): 261-275.
- Lana, J.C., Castro, P.D.T.A. and Lana, C.E. 2022. Assessing gully erosion susceptibility and its conditioning factors in southeastern Brazil using machine learning algorithms and bivariate statistical methods: A regional approach. *Geomorphology*. 402: p.108159.
- Langsetmo, L., Schousboe, J.T., Taylor, B.C., Cauley, J.A., Fink, H.A., Cawthon, P.M., Kado, D.M., Ensrud, K.E. 2023. Advantages and disadvantages of random forest models for prediction of hip fracture risk versus mortality risk in the oldest old. *JBMR plus*. 7(8): 1-11.
- Laurent, R. and X. Cai. 2007. A maximum entropy method for combining AOGCMs for regional intra-year climate change assessment. *Climatic change*. 82(3-4): 411-435.
- Lavery, M.R., Acharya, P., Sivo, S.A. and Xu, L. 2019. Number of predictors and multicollinearity: What are their effects on error and bias in regression? *Communications in Statistics-Simulation and Computation*. 48(1): 27-38.

- Lee, J.H., Sameen, M.I., Pradhan, B. and Park, H.J. 2018. Modeling landslide susceptibility in data-scarce environments using optimized data mining and statistical methods. *Geomorphology*. 303: 284-298.
- Lee, Zh., Zhang, Y., Zhu, Q., Yang, S., Li, H. and Ma, H. 2017. A gully erosion assessment model for the Chinese Loess Plateau based on changes in gully length and area. *Catena*. 148(2): 195-203.
- Lei, X., Chen, W., Avand, M., Janizadeh, S., Kariminejad, N., Shahabi, H., Costache, R., Shahabi, H., Shirzadi, A. and Mosavi, A. 2020. GIS-based machine learning algorithms for gully erosion susceptibility mapping in a semi-arid region of Iran. *Remote Sensing*. 12(15): p. 2478.
- Li, J., Wang, H., Chen, Y., Chen, Y., Jiao, J., Chen, T., Cao, X., Zhao, W. and Zhao, C. 2023. Can CATPCA be utilized for spatial modeling? a case of the generation susceptibility of gully head in a watershed. *Catena*. 232: p. 107456.
- Liniger, H. and Critchley, W. 2007. Where the land is greener. CTA, FAO, CDE and UNEP. P. 364.
- Liu, G., Arabameri, A., Santosh, M. and Nalivan, O.A. 2023. Optimizing machine learning algorithms for spatial prediction of gully erosion susceptibility with four training scenarios. *Environmental Science and Pollution Research*. 30(16): 46979-46996.
- Liuzzo, L., Sammartano, V. and Freni, G. 2019. Comparison between different distributed methods for flood susceptibility mapping. *Water Resources Management*. 33: 3155-3173.
- Mahamba, J.A., Kayitoghera, G.M., Musubao, M.K., Chuma, G.B. and Sahani, W.M. 2023. Evolution of gully erosion and susceptibility factors in the urban watershed of the Kimemi (Butembo/DR Congo). *Geography and Sustainability*. 4(3): 268-279.
- Maji, S., Berg, A.C. and Malik, J. 2012. Efficient classification for additive kernel SVMs. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*. 35(1): 66-77.
- Malik, S., Pal, S.C., Chowdhuri, I., Chakraborty, R., Roy, P. and Das, B. 2020. Prediction of highly flood prone areas by GIS based heuristic and statistical model in a monsoon dominated region of Bengal Basin. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 19: p. 100343.
- Mararakanye, N. and Sumner, P.D. 2017. Gully erosion: A comparison of contributing factors in two catchments in South Africa. *Geomorphology*. 288: 99-110.
- Meliho, M., Khattabi, A. and Mhammdi, N. 2018. A GIS-based approach for gully erosion susceptibility modelling using bivariate statistics methods in the Ourika watershed, Morocco. *Environmental Earth Sciences*. 77: 1-14.
- Merow, C., Smith, M.J. and Silander, Jr.J.A. 2013. A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: what it does, and why inputs and settings matter. *Ecography*. 36(10): 1058-1069.
- Minár, J., Evans, I.S. and Jenčo, M. 2020. A comprehensive system of definitions of land surface (topographic) curvatures, with implications for

- their application in geoscience modelling and prediction. *Earth-Science Reviews*. 211: p. 103414.
- Mohammadi, S. 2022. A test of harmful multicollinearity: A generalized ridge regression approach. *Communications in Statistics-Theory and Methods*. 51(3): 724-743.
 - Mohammady, M. and Davudirad, A. 2024. Gully Erosion Susceptibility Assessment Using Different Machine Learning Algorithms: A Case Study of Shazand Watershed in Iran. *Environmental Modeling & Assessment*. 29(2): 249-261.
 - Mokarram, M. and Zarei, A.R. 2021. Determining prone areas to gully erosion and the impact of land use change on it by using multiple-criteria decision-making algorithm in arid and semi-arid regions. *Geoderma*. 403, p. 115379.
 - Mousazadeh, F. and Salleh, K.O. 2014. The influence of lithology and soil on the occurrence and expansion of gully erosion. *Toroud Basin-Iran. Procedia-Social and Behavioral Sciences*. 120: 749-756.
 - Mukai, S. 2017. Gully erosion rates and analysis of determining factors: a case study from the semi-arid main Ethiopian rift valley. *Land degradation & development*. 28(2): 602-615.
 - Naimi, B. and Araújo, M.B. 2016. sdm: a reproducible and extensible R platform for species distribution modelling. *Ecography*. 39(4): 368-375.
 - Nazari Samani, A.A, Ahmadi, H., Jafari, M., Boggs, G., Ghoddousi, J. and Malekian, A. 2009. Geomorphic threshold conditions for gully erosion in Southwestern Iran (Boushehr-Samal watershed). *Journal of Asian Earth Sciences*. 35(2): 180-189.
 - Ngarega, B.K., Masocha, V.F. and Schneider, H. 2021. Forecasting the effects of bioclimatic characteristics and climate change on the potential distribution of *Colophospermum mopane* in southern Africa using Maximum Entropy (Maxent). *Ecological Informatics*. 65: p. 101419.
 - Nhu, V.H., Janizadeh, S., Avand, M., Chen, W., Farzin, M., Omidvar, E., Shirzadi, A., Shahabi, H., J. Clague, J., Jaafari, A. and Mansoorypoor, F. 2020. GIS-based gully erosion susceptibility mapping: a comparison of computational ensemble data mining models. *Applied Sciences*. 10(6): p. 2039.
 - Nwankwo, C. and Nwankwoala, H.O. 2018. Gully Erosion Susceptibility Mapping in Ikwuano Local Government Area of Abia State. *Nigeria Using GIS Techniques. Earth Sciences Malaysia*. 2(1): 8-15.
 - Nyssen, J., Poesen, J., Moeyersons, J., Haile, M. and Deckers, J. 2008. Dynamics of soil erosion rates and controlling factors in the northern Ethiopian highlands-towards a sediment budget. *Earth Surface Processes and Landforms*. 33: 695-711.
 - Nyssen, J., Poesen, J., Moeyersons, J., Haile, M., Deckers, J. and Luyten, E. 2004. Gullies in the Northern Ethiopian Highlands: new insights on causes and control measures, *International Symposium on Gully Erosion under Global Change*. p. 102.

- Nyssen, J., Poesen, J., Moeyersons, J., Luyten, E., Veyret-Picot, M., Deckers, J., Haile, M. and Govers, G. 2002. Impact of road building on gully erosion risk: a case study from the northern Ethiopian highlands. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*. 27(12): 1267-1283.
- Oldeman, L.R. 1992. Global extent of soil degradation. In *Bi-Annual Report 1991-1992/ISRIC* (pp. 19-36). ISRIC
- Onyando, J.O., Kisoyan, P. and Chemelil, M.C. 2005. Estimation of potential soil erosion for river perkerra catchment in Kenya. *Water Resources Management*. 19(2): 133-143.
- Pal, S.C., Arabameri, A., Blaschke, T., Chowdhuri, I., Saha, A., Chakraborty, R., Lee, S. and Band, S.S. 2020. Ensemble of machine-learning methods for predicting gully erosion susceptibility. *Remote Sensing*. 12(22): p. 3675.
- Park, N.W. 2015. Using maximum entropy modeling for landslide susceptibility mapping with multiple geoenvironmental data sets. *Environmental Earth Sciences*. 73: 937-949.
- Parmar, A., Katariya, R. and Patel, V. 2019. A Review on Random Forest: An Ensemble Classifier. In: Hemanth, J., Fernando, X., Lafata, P., Baig, Z. (eds) *International Conference on Intelligent Data Communication Technologies and Internet of Things (ICICI) 2018*. ICICI 2018. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies. Springer International Publishing, 26: 758-763.
- Pereira, F.C., Charters, S., Smith, C.M., Maxwell, T.M. and Gregorini, P. 2023. A geospatial modelling approach to assess the capability of high-country stations in delivering ecosystem services. *Land*. 12(6): p. 1243.
- Peterson, A.T., Papeş, M. and Eaton, M. 2007. Transferability and model evaluation in ecological niche modeling: A comparison of GARP and Maxent. *Ecography*. 30: 550-560.
- Phillips, S.J. and Dudík, M. 2008. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*. 31(2): 161-175.
- Pimentel, D. and Burgess, M. 2013. Soil erosion threatens food production. *Agriculture*. 3(3): 443-463.
- Poesen, J., Nachtergaele, J., Verstraeten, G. and Valentin, C. 2003. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. *Catena*. 50(2-4): 91-133.
- Pourghasemi, H.R., Yousefi, S., Kornejady, A. and Cerdà, A. 2017. Performance assessment of individual and ensemble data-mining techniques for gully erosion modeling. *Science of the Total Environment*. 609: 764-775.
- Rahmati, O., Haghizadeh, A., Pourghasemi, H.R. and Noormohamadi, F. 2016a. Gully erosion susceptibility mapping: the role of GIS-based bivariate statistical models and their comparison. *Natural Hazards*. 82: 1231-1258.

- Rahmati, O., Kalantari, Z., Ferreira, C.S., Chen, W., Soleimanpour, S.M., Kapović-Solomun, M., Seifollahi-Aghmiuni, S., Ghajarnia, N. and Kazemi Kazemabady, N. 2022. Contribution of physical and anthropogenic factors to gully erosion initiation. *Catena*. 210(105925): 1-11.
- Rahmati, O., Kornejady, A., Samadi, M., Deo, R.C., Conoscenti, C., Lombardo, L., Dayal, K., Taghizadeh-Mehrjardi, R., Pourghasemi, H.R., Kumar, S. and Bui, D.T. 2019a. PMT: New analytical framework for automated evaluation of geo-environmental modelling approaches. *Science of the total environment*. 664: 296-311.
- Rahmati, O., Pourghasemi, H.R. and Melesse, A.M. 2016b. Application of GIS-based data driven random forest and maximum entropy models for groundwater potential mapping: a case study at Mehran Region, Iran. *Catena*. 137: 360-372.
- Rahmati, O., Soleimanpour, S.M., Shadfar, S. and Zahedi, S. 2023. Scrutinizing gully erosion hotspots using hybridized deep-learning analysis to avoid land degradation. *Land Degradation & Development* 34(13): 3850-3866.
- Rahmati, O., Tahmasebipour, N., Haghizadeh, A., Pourghasemi, H.R. and Feizizadeh, B. 2017. Evaluating the influence of geo-environmental factors on gully erosion in a semi-arid region of Iran: An integrated framework. *Science of the Total Environment*. 579: 913-927.
- Rahmati, O., Tahmasebipour, N., Haghizadeh, A., Pourghasemi, H.R. and Feizizadeh, B. 2017. Evaluation of different machine learning models for predicting and mapping the susceptibility of gully erosion. *Geomorphology*. 298: 118-137.
- Rahmati, O., Yousefi, S., Kalantari, Z., Uuemaa, E., Teimurian, T., Keesstra, S., Pham, T.D. and Tien Bui, D. 2019b. Multi-hazard exposure mapping using machine learning techniques: A case study from Iran. *Remote Sensing*. 11(16): p. 1943.
- Razavi-Termeh, S.V., Sadeghi-Niaraki, A. and Choi, S.M. 2020. Gully erosion susceptibility mapping using artificial intelligence and statistical models. *Geomatics. Natural Hazards and Risk*. 11(1): 821-844.
- Rotnicka, J., Dłużewski, M., Dąbski, M., Rodzewicz, M., Włodarski, W. and Zmarz, A. 2020. Accuracy of the UAV-based DEM of beach–foredune topography in relation to selected morphometric variables, land cover, and multitemporal sediment budget. *Estuaries and Coasts*. 43: 1939-1955.
- Roy, P., Chakraborty, R., Chowdhuri, I., Malik, S., Das, B. and Pal, S.C. 2020. Development of Different Machine Learning Ensemble Classifier for Gully Erosion Susceptibility in Gandheswari Watershed of West Bengal, India. In: Rout, J., Rout, M., Das, H. (eds) *Machine Learning for Intelligent Decision Science. Algorithms for Intelligent Systems*. Springer, Singapore. 1-26.
- Saha, S., Roy, J., Arabameri, A., Blaschke, T. and Tien Bui, D. 2020. Machine learning-based gully erosion susceptibility mapping: A case study of Eastern India. *Sensors*. 20(5): p. 1313.

- Saha, S., Sarkar, R., Thapa, G. and Roy, J. 2021. Modeling gully erosion susceptibility in Phuentsholing, Bhutan using deep learning and basic machine learning algorithms. *Environmental Earth Sciences*. 80 :1-21.
- Schwilch, G., Bestelmeyer, B., Bunning, S., Critchley, W., Herrick, J., Kellner, K. and Winslow, M. 2011. Experiences in monitoring and assessment of sustainable land management. *Land Degradation & Development*. 22(2): 214-225.
- Sarker, I.H. 2022. AI-based modeling: techniques, applications and research issues towards automation, intelligent and smart systems. *SN Computer Science*. 3(2): p. 158.
- Setargie, T.A., Tsunekawa, A., Haregeweyn, N., Tsubo, M., Fenta, A.A., Berihun, M.L., Sultan, D., Yibeltal, M., Ebabu, K., Nzioki, B. and Meshesha, T.M. 2023. Random Forest-based gully erosion susceptibility assessment across different agro-ecologies of the Upper Blue Nile basin, Ethiopia. *Geomorphology*. 431: p. 108671.
- Shi, Q., Wang, W., Guo, M., Chen, Z., Feng, L., Zhao, M. and Xiao, H. 2020. The impact of flow discharge on the hydraulic characteristics of headcut erosion processes in the gully region of the Loess Plateau. *Hydrological Processes*. 34(3): 718-729.
- Shirani, K., Peyrowan, H.R., Shadfar, S. and Asgari, S. 2023. Gully erosion mapping based on hydro-geomorphometric factors and geographic information system. *Environmental Monitoring and Assessment*. 195(6): 1-25.
- Shit, P.K., Bhunia, G.S. and Maiti, R. 2014. Morphology and development of selected Badlands in South Bengal (India). *Indian Journal of Geography and Environment*. 13: 161-171.
- Shit, P.K., Bhunia, G.S. and H.R. Pourghasemi. 2020. Gully Erosion Susceptibility Mapping Based on Bayesian Weight of Evidence. In: Shit, P., Pourghasemi, H., Bhunia, G. (eds) *Gully Erosion Studies from India and Surrounding Regions*. *Advances in Science, Technology & Innovation*. Springer, Cham. 133-146.
- Sidorchuk, A., Märker, M., Moretti, S. and Rodolfi, G. 2003. Gully erosion modelling and landscape response in the Mbuluzi River catchment of Swaziland. *Catena*. 50(2-4): 507-525.
- Sidorchuk, A., 2005. Stochastic components in the gully erosion modelling. *Catena*. 63(2-3): 299-317.
- Skaugen, T. and Melvold, K. 2019. Modeling the snow depth variability with a high-resolution lidar data set and nonlinear terrain dependency. *Water Resources Research*. 55(11): 9689-9704.
- Soleimanpour, S.M., Pourghasemi, H.R. and Zare, M. 2021. A comparative assessment of gully erosion spatial predictive modeling using statistical and machine learning models. *Catena*. 207: p. 105679.
- Soni, C., Chaudhary, A., Sharma, U. and Sharma, C. 2021. Satellite radar interferometry for DEM generation using Sentinel-1A imagery. In

- Innovations in Computational Intelligence and Computer Vision: Proceedings of ICICV 2020. Springer Singapore. 26-33.
- Su, Y., Guo, Q., Ma, Q. and Li, W. 2015. SRTM DEM correction in vegetated mountain areas through the integration of spaceborne LiDAR, airborne LiDAR, and optical imagery. *Remote Sensing*. 7(9): 11202-11225.
 - Suleiman, A., Tight, M.R. and A.D. Quinn. 2016. Hybrid neural networks and boosted regression tree models for predicting roadside particulate matter. *Environmental Modeling & Assessment*. 21: 731-750.
 - Svoray, T. and Markovitch, H. 2009. Catchment scale analysis of the effect of topography, tillage direction and unpaved roads on ephemeral gully incision. *Earth Surface Processes and Landforms*. 34: 1970-1984.
 - Tang, J. and Tian, Y. 2017. A multi-kernel framework with nonparallel support vector machine. *Neurocomputing*. 266: 226-238.
 - Tebebu, T., Abiy, A., Dahlke, H., Easton, Z., Tilahun, S., Collick, A., Kidnau, S., Moges, S. and Dadgari, F. 2010. Surface and subsurface flow effect on permanent gully formation and upland erosion near Lake Tana in the northern highlands of Ethiopia. *Hydrology and Earth System Sciences*. 14(11): 2207-2217.
 - Telles, T.S., Dechen, S.C.F., Souza, L.G.A. and Guimaraes, M.F. 2013. Valuation and assessment of soil erosion costs. *Scientia Agricola*. 70(3): 209-216.
 - Torri, D. and Poesen, J. 2014. A review of topographic threshold conditions for gully head development in different environments. *Earth-Science Reviews*. 130: 73-85.
 - U.S.A., Department of Agriculture Soil Conservation Service Engineering Division. 2001. Evaluation of plants for gully stabilization in the Florida panhandle final report. 1-7.
 - Valentin, C., Poesen, J., Yong, Li. 2005. Gully erosion: Impacts, factors and control. *Catena*. 63: 132-153.
 - Wang, J. and Shi, Q. 2013. Short-term traffic speed forecasting hybrid model based on chaos-wavelet analysis-support vector machine theory. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 27: 219-232.
 - Wang, R., Sun, H., Yang, J., Zhang, S., Fu, H., Wang, N. and Liu, Q. 2022. Quantitative Evaluation of Gully Erosion Using Multitemporal UAV Data in the Southern Black Soil Region of Northeast China: A Case Study. *Remote Sensing*. 14(1479): 1-23.
 - Wang, Z., Zhang, G., Wang, C. and Xing, S. 2022. Assessment of the gully erosion susceptibility using three hybrid models in one small watershed on the Loess Plateau. *Soil and Tillage Research*. 223 p.105481.
 - Wei, Y., Liu, Z., Zhang, Y., Cui, T., Guo, Z., Cai, C. and Li, Z. 2022. Analysis of gully erosion susceptibility and spatial modelling using a GIS-based approach. *Geoderma*. 420: p. 115869.
 - Were, K., Kebeney, S., Churu, H., Mutio, J.M., Njoroge, R., Mugaa, D., Alkamoi, B., Ng'etich, W. and Singh, B.R. 2023. Spatial Prediction and

- Mapping of Gully Erosion Susceptibility Using Machine Learning Techniques in a Degraded Semi-Arid Region of Kenya. *Land*. 12(4): p.890.
- Wilkinson, S.N., Kinsey-Henderson, A.E., Hawdon, A.A., Hairsine, P.B., Bartley, R. and Baker, B. 2018. Grazing impacts on gully dynamics indicate approaches for gully erosion control in northeast Australia. *Earth Surface Processes and Landforms*. 43(8): 1711-1725.
 - Xu, X., Zheng, F. and G.V. Wilson. 2021. Flow hydraulics in an ephemeral gully system under different slope gradients, rainfall intensities and inflow conditions. *Catena*. 203: p. 105359.
 - Zabihi, M., Mirchooli, F., Motevalli, A., Darvishan, A.K., Pourghasemi, H.R., Zakeri, M.A. and Sadighi, F. 2018. Spatial modelling of gully erosion in Mazandaran Province, northern Iran. *Catena*. 161: 1-13.
 - Zakerinejad, R. and Maerker, M. 2015. An integrated assessment of soil erosion dynamics with special emphasis on gully erosion in the Mazayjan basin, southwestern Iran. *Natural Hazards*. 79(1): 25-50.
 - Zhang, W., Du, Z., Zhang, D., Yu, S. and Hao, Y. 2016. Boosted regression tree model-based assessment of the impacts of meteorological drivers of hand, foot and mouth disease in Guangdong, China. *Science of the Total Environment*. 553: 366-371.
 - Zhang, X., Fan, J., Liu, Q. and Xiong, D. 2018. The contribution of gully erosion to total sediment production in a small watershed in Southwest China. *Physical Geography*. 39(3): 246-263.
 - Zhao, X., Su, Y., Hu, T., Chen, L., Gao, S., Wang, R., Jin, S. and Guo, Q. 2018. A global corrected SRTM DEM product for vegetated areas. *Remote Sensing Letters*. 9(4): 393-402.
 - Ziegler, A. and König, I.R. 2014. Mining data with random forests: current options for real-world applications. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery*. 4(1): 55-63.

Ministry of Agriculture-Jahad
Agricultural Research, Education and Extention Organization
Soil Conservation and Watershed Management Research Institute

Title: Principles of spatial modeling of gully erosion using artificial intelligence models

Authors: Omid Rahmati, Seyed Masoud Soleimanpour, Samad Shadfar

Editor: Saeed Nabipay Lashkarian

Page Layeout: Abbas Seddigh

Publisher: Soil Conservation and Watershed Management Institute

ISBN: 978-600-6054-40-7

Tirage: 100 Copies

Date of Publication: 2024

Price: 3000000 Rial

This scientific work has been registered with the series number of **3140360** at the date of **2024-11-02** in the Agriculture Information and Scientific Documents Center. All rights reserved. No part of this publication may reproduced or translated without the original reference.

Principles of spatial modeling of gully erosion using artificial intelligence models

By:

Omid Rahmati

Assistant professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Kurdistan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Sanandaj, Iran

Seyed Masoud Soleimanpour

Associate professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Shiraz, Iran

Samad Shadfar

Associate professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research and Education Organization (AREEO), Tehran, Iran