

واکاوی مکانی رطوبت خاک پس از بارش‌های بیش از حد نرمال سال آبی ۹۷-۹۸ با مدل سازی خطی متغیرهای محیطی و تصاویر ماهواره‌ای

سید حسین میرموسوی^{۱*}، محمد کمانگر^۲ و علیرضا کربلایی^۳

^۱دانشیار، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه زنجان، دانشجوی دکتری، گروه آب و هواشناسی، دانشکده علوم انسانی دانشگاه زنجان، دانشجوی دکتری گروه آب و هواشناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۴/۲۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۱۶

چکیده

درک رفتار پدیده‌ها نیازمند توجه به همه ابعاد آن است و یکی از راه‌های درک پیچیدگی‌های آن‌ها مدل سازی است. رطوبت سطحی خاک، متغیر کلیدی برای توصیف خشکسالی، تبادلات آب و انرژی بین زمین و هوا کره و همچنین، ارزیابی شرایط محصولات کشاورزی است. رطوبت خاک هم از متغیرهای محیطی تأثیر می‌پذیرد و هم بر بسیاری از متغیرهای محیطی از جمله رواناب، فرسایش خاک و تولید محصولات تأثیر می‌گذارد. اما، به دلیل ثابت نبودن شرایط مکانی و زمانی، پارامترهای محیطی به شدت تغییرپذیر است. هدف از این مقاله، واکاوی و استخراج مدل مکانی پراکندگی رطوبت خاک پس از بارش‌های بیش از نرمال سال آبی ۹۷-۹۸ در استان کردستان است. در این راستا، پس از واکاوی نقشه پراکندگی رطوبت خاک در بازه زمانی مورد مطالعه مستخرج از سامانه Google Earth Engine به‌عنوان متغیر وابسته و لایه‌های بارش، آب معادل برف، شاخص پوشش گیاهی مستخرج از سامانه Google Earth Engine و همچنین، شاخص رطوبت توپوگرافی و به‌عنوان متغیرهای مستقل انتخاب شد. سپس، با استفاده از مدل رگرسیون کلی (OLS) و رگرسیون موزون جغرافیایی (GWR) به مدل سازی مکانی اقدام شد. بر اساس معیارهای ارزیابی، نتایج نشان داد مدل GWR با $R^2=0.74$ قدرت تبیین و برآورد بهتری نسبت به مدل رگرسیون کلی با ضریب تعیین ۰/۶۸ دارد. بر اساس رگرسیون کلی، عوامل مکانی بارش و رطوبت توپوگرافی بیشترین اثر مثبت و تبخیر و تعرق اثر منفی بر رطوبت خاک در محدوده مورد مطالعه دارد. بر اساس نتایج مدل GWR، متغیر آب معادل برف در نواحی کوهستانی شمال استان، بیشترین تأثیر و تبخیر و تعرق کمترین اثر را بر رطوبت خاک داشته‌اند. با استفاده از مدل مکانی به دست آمده، می‌توان مناطق کم یا پر رطوبت خاک را در راستای شناسایی پتانسیل‌ها محیطی و بهبود فرایند تصمیم‌گیری، تخصیص و توزیع مکانی ارائه خدمات کشاورزی شناسایی کرد.

واژه‌های کلیدی: رطوبت خاک، خشکسالی، خودهمبستگی، رگرسیون مکانی، کردستان

مقدمه

جوامع انسانی خسارت وارد می‌کند (Yagci و همکاران، ۲۰۱۳ و Saghafian و همکاران، ۲۰۰۳) و انتظار می‌رود به دلیل تغییرات آب و هوایی شدت و فراوانی آن نیز در آینده بیشتر شود (van Loon و

خشکسالی یکی از پیچیده‌ترین، زیان‌آورترین و کم درک‌ترین رویدادهای آب و هوایی است که سالانه به‌طور متوسط حدود شش تا هشت میلیارد دلار به

*مسئول مکاتبات: hossein.mirmousavi@znu.ac.ir

باشد. در همین راستا، Luca و همکاران (۲۰۰۷) ارتباط بین شاخص رطوبت خاک و خصوصیات رطوبت خاک را بررسی کردند که نتایج آن‌ها نشان داد که توپوگرافی سطح، کنترل‌کننده توزیع مکانی رطوبت خاک، پوشش گیاهی، شوری و بافت خاک است. Amani و همکاران (۲۰۱۶)، با استفاده از نوار قرمز و مادون قرمز نزدیک تصویر لندست، شاخص رطوبت خاک مثلثی را معرفی کردند که با مقادیر واقعی همبستگی منطقه مورد مطالعه، ۰/۶۷ را نشان داد. سپس، شاخص تفاضلی نرمال‌شده گیاهی را اضافه کردند که همبستگی ۰/۷۴ را با مقادیر واقعی به دست آوردند. Xu و همکاران (۲۰۱۷)، تحقیقی برای ارزیابی رطوبت خاک انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که کمیت رطوبت خاک در فصل‌های بارانی دارای مقدار ثابتی است، اما طی دوره رشد و با کاهش بارندگی تفاوت نسبی در مقادیر رطوبت مشاهده می‌شود که تراکم ریشه را عامل اصلی این تفاوت دانسته‌اند. تحقیق Yoshioka و همکاران (۲۰۱۷)، نشان داد رطوبت و دمای خاک با یکدیگر ارتباط داشته و متأثر از آب نفوذ یافته باران است. دمای سطحی خاک، میزان بارندگی و دمای هوا از جمله خصوصیات مؤثر و مورد بررسی در روش‌های برآورد رطوبت خاک هستند. برآورد رطوبت خاک نیز با استفاده سنجش از دور در محدوده‌های نوری، مادون قرمز و ماکروویو فعال و غیرفعال و با ترکیب شاخص‌های طیفی انجام می‌گیرد که هرکدام مزایا و معایب خاص خود را دارند. در این راستا، Khanmohammadi و همکاران (۲۰۱۵)، رطوبت خاک را با استفاده از تصاویر مودیس (MODIS) و ترکیب شاخص‌های طیفی در منطقه ورامین برآورد کردند. مدل‌های پیشنهادی آن‌ها ضریب تبیین ۰/۶۶ را نشان داد. Koohbanani (۲۰۱۹)، پهنه‌بندی رطوبت خاک را با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای انجام داد. نتایج کار ایشان، نشان داد که شاخص رطوبت نوار قرمز با ضریب همبستگی ۰/۷۸ و ضریب تبیین مدل رگرسیونی ۰/۶۱، شاخص مناسبی برای پهنه‌بندی رطوبت خاک در مناطق خشک و بیابانی است. در مطالعات انجام‌شده، بیشتر به بررسی تک‌بعدی رطوبت خاک و به‌ویژه تغییرات زمانی آن پرداخته شده است. Tu (۲۰۱۹) در مطالعه‌ای به

همکاران، (۲۰۱۶). ارزیابی و مدل‌سازی میزان رطوبت خاک می‌تواند به‌عنوان یکی از پارامترهای بررسی خشک‌سالی کشاورزی تعریف شود. رطوبت سطحی خاک با وجود سهم اندک آن در چرخه هیدرولوژی (۱۵/۰ درصد) یکی از اجزاء مهم اثرگذار پوسته زمین محسوب می‌شود. زیرا، نقش کنترل‌کننده بین سطح زمین و اتمسفر زمین و نیز گردش آب و انرژی و کربن در طبیعت را ایفا می‌کند (Babaeian و همکاران، ۲۰۱۳). رطوبت خاک به‌شدت بر رشد گیاه و در نتیجه بهره‌وری کشاورزی، به‌ویژه در شرایط کمبود آب و خشک‌سالی، تأثیر می‌گذارد. همچنین، رطوبت خاک نقش کلیدی در چرخه جهانی انرژی دارد و کنترل‌کننده فرایند تبدیل انرژی در دسترس به گرمای نهان و گرمای محسوس است (Vereecken و همکاران، ۲۰۱۴). محققان نشان داده‌اند که بازخورد قوی بین خاک و آب‌وهوای منطقه وجود دارد. در نتیجه، تهیه نقشه‌های رطوبت خاک با دقت بالا، قابلیت درک آن‌ها از آب‌وهوای منطقه بهبود می‌بخشد (Tabatabaenejad و همکاران، ۲۰۰۹). تغییرات مکانی و زمانی رطوبت خاک بسیار متنوع است. در حال حاضر، هیچ شبکه جهانی (in situ) برای نظارت بر رطوبت خاک وجود ندارد. روش‌های میدانی برآورد رطوبت خاک مانند روش وزنی و انعکاس سنجی حوضه زمانی در سطح محلی دقت بالایی دارند. اما، برای یک منطقه بزرگ، بسیار پرهزینه و زمان‌بر هستند. روش‌های معمول اندازه‌گیری رطوبت خاک در مقیاس زمانی و مکانی مناسب نیستند (Mekonnen، ۲۰۰۹). برای کاهش هزینه و وقت و برآوردهای سراسری رطوبت خاک، می‌توان از مدل‌ها و تصاویر سنجش از دور استفاده کرد. تصاویر سنجش از دور به دلیل پوشش وسیع و سراسری و نیز هزینه پایین، می‌توانند شرایط رطوبت سطحی و زیرسطحی خاک را در بازه‌های زمانی مختلف اندازه‌گیری و پایش کنند. رطوبت خاک، متأثر از عوامل متعددی است که در این میان، می‌توان به متغیرهای اقلیمی، توپوگرافی، پوشش گیاهی، ویژگی‌های خاک، نوع کشت، نوع کاربری و دوره رشد گیاه اشاره کرد (Lai و همکاران، ۲۰۱۷). شناخت و مدل‌سازی متغیرهای دخیل در رطوبت خاک می‌تواند گام اساسی برای پیش‌بینی‌ها

رطوبت خاک دارند، بنا بر ضرورت تحلیل مکانی، لازم است تا نقش تمامی ابعاد مکانی متغیرها در تکوین این پدیده آشکار شود. هدف از این مطالعه، شناخت قوانین حاکم بر رفتار رطوبت خاک استان کردستان در سال آبی ۹۸-۹۷ و تأثیر عوامل مختلف مکانی بر آن است. لذا، تلاش می‌شود تا ضمن مدل‌سازی رفتار مکانی با استفاده از دو روش رگرسیون کلی (*OLS*) و رگرسیون موزون جغرافیایی (*GWR*)، دقت مدل‌ها نیز با استفاده از شاخص‌های سنجش اعتبار مدل، مورد ارزیابی قرار گیرند.

مواد و روش‌ها

معرفی محدوده مورد بررسی: استان کردستان با مساحت ۲۸,۲۰۰ کیلومتر مربع معادل ۱/۷ درصد مساحت کل کشور و یکی از استان‌های غربی ایران است که در مجاورت استان‌های آذربایجان غربی، زنجان، همدان و کرمانشاه و هم مرز با کشور عراق با مختصات جغرافیایی بین ۳۴ درجه و ۴۴ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۳۰ دقیقه عرض شمالی و ۴۵ درجه و ۳۱ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۱۶ دقیقه طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ قرار دارد. موقعیت نسبی این استان در شکل ۱ آورده شده است.

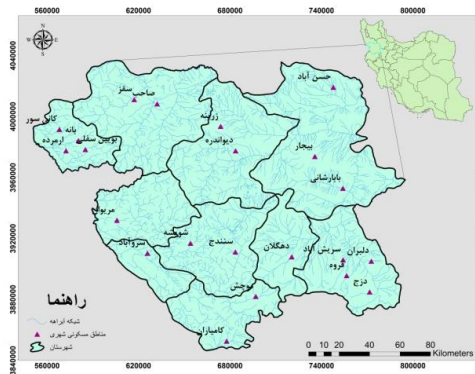
این استان در دامنه‌ها و دشت‌های پراکنده سلسله جبال زاگرس میانی قرار گرفته است و از لحاظ اقلیمی و طبیعی منطقه‌ای کوهستانی است. اختلاف ارتفاع بین بلندترین و پست‌ترین نقاط استان به حدود ۲۴۰۰ متر می‌رسد. موقعیت اقلیمی و اکولوژیک استان کردستان با توجه به میزان متوسط بارندگی و رطوبت نسبی سالیانه به نحوی است که دامنه کوه‌ها و دشت‌های آن عموماً پوشیده از جنگل و مرتع بوده، در پاره‌ای نقاط نیز دارای زمین‌های زراعی اعم از آبی و دیم است. جنگل‌های این استان که بخشی از جنگل‌های غرب کشور را تشکیل می‌دهند، بیشتر اطراف شهرهای بانه و مریوان واقع شده‌اند و بعد از جنگل‌های شمال کشور در رتبه دوم اهمیت قرار دارند. جنس غالب درختان این منطقه نیز بلوط است. در حال حاضر، جنگل‌های استان کردستان به‌صورت درختچه و بوته‌های پراکنده درآمد‌آند. در استان کردستان ۳۱ تیپ مرتعی با وسعت ۱۰۹۳ هزار هکتار مشخص شده است. عمده‌ترین تیپ‌های مرتعی به جامعه گونستان

ریزمقیاس نمایی رطوبت خاک با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای مادیس پرداخته است. ایشان در این مطالعه، از داده‌های سطح سه رطوبت فعال خاک (*SMAP*) با توان تفکیک کیلومتر، مادیس، دمای سطح زمین (*LST*) و شاخص پوشش گیاهی (*NDVI*) بهره گرفته است. نتایج این مطالعه، نشان داد که بر اساس اعتبارسنجی صورت گرفته، روش رگرسیون چند متغیره برای ریزمقیاس نمایی داده‌های سنجش از دور رطوبت خاک با توان تفکیک پایین مناسب هستند. ریزمقیاس نمایی داده‌های رطوبت خاک نشان می‌دهد که این روش، برای تحقیقات مناطق کوچک کاربرد دارد. Lee (۲۰۱۹)، در تحقیق خود به برآورد توزیع مکانی رطوبت خاک با استفاده از مدل رگرسیون چند متغیره و داده‌های ماهواره‌ای *COMS* در کره جنوبی پرداخت. دوره آماری این مطالعه از ژانویه ۲۰۱۳ تا می ۲۰۱۵ بود. نتایج این مطالعه، نشان داد که مقادیر پی ویلیو در تمامی ضرایب رگرسیون زیر ۰/۰۵ بوده و ضریب تعیین از ۱۷ تا ۶۳ است. نتایج رگرسیون رطوبت خاک نشان داد که کل R^2 بالاتر از ۰/۴ و ریشه میانگین مربعات خطا (*RMSE*) در کل، کمتر از پنج درصد بوده است. تجزیه و تحلیل سری زمانی از رطوبت خاک شبیه‌سازی شده نشان داد که داده‌های مشاهده شده رطوبت خاک از صفر تا ۲۰ درصد برای شن و ماسه، ۱۰ تا ۳۰ درصد برای لوم، ۲۰ تا ۴۰ درصد برای خاک رس و ۳۰ تا ۵۰ درصد برای لجن بستگی دارند.

با بررسی تحقیقات گذشته، می‌توان دریافت که رطوبت خاک به عوامل متعددی از جمله خصوصیات اقلیمی، خصوصیات اراضی و میزان رطوبت پیشین بستگی دارد. این خصوصیات در پراکندگی‌های مکانی بسیار متفاوت هستند که با وجود اهمیت تغییرات رطوبت خاک در مکان و ارتباط آن با سایر متغیرها، توجه چندانی به دیگر متغیرها نشده است. با استفاده از مدل‌سازی مکانی، می‌توان از پیچیدگی‌های دنیای واقعی کاسته، به بررسی رفتار پدیده‌ها پرداخت. همچنین، با بررسی روابط مکانی، بین پدیده‌ها و علل پراکندگی آن‌ها می‌توان روابط علت و معلولی بین مکان‌ها را کشف کرد. از آنجا که متغیرهای مکانی اقلیمی و محیطی نقش مؤثری در تغییرات مکانی

در نواحی میروان و بانه قرار دارند و در فصل بهار به‌عنوان تأمین علوفه مورد استفاده قرار می‌گیرند و در تابستان از بین رفته و خشک هستند.

اختصاص دارد که بالغ بر ۸۵ درصد گستره‌های مرتعی منطقه را تشکیل می‌دهد. مراتع این استان بر دو گونه مراتع جنگلی و مراتع کوهستانی و دشت است که مراتع جنگلی بیشتر



شکل ۱- موقعیت استان کردستان در ایران

جریان‌ها از روی استان و برخورد با ارتفاعات زاگرس مقدار زیادی از رطوبت خود را به‌صورت باران و برف از دست داده و عامل عمده ریزش‌های جوی کشور را نیز تشکیل می‌دهند. سال آبی ۹۸-۹۷ با ورود سامانه‌های بارشی متعددی به ایران همراه بود. این سامانه‌ها که عمدتاً بر بستر تقویت امواج بلند و پایین افتادن موج ورتکس قطبی شکل گرفتند، به‌طور ناهنجاری در محدوده غربی خاورمیانه با ایجاد بلاکینگ اتمسفری منجر به هدایت اپیزودهایی از توده‌های مرطوب و گرم دریای سرخ موسوم به سودانی و ادغام آن با توده‌های مرطوب و سرد مدیترانه‌ای درست بر روی ارتفاعات غرب ایران واقع شدند و باعث بارش‌های بیش از حد نرمال شدند. از این‌رو، سال آبی مورد نظر، به‌عنوان دوره آماری برای مطالعه انتخاب شد. مشخصات سال آبی ۹۸-۹۷ که از بارندگی بیش از نرمال گذشته بود، در جدول ۱ آورده شده است.

رژیم رطوبتی و حرارتی خاک منطقه بیشتر زیریک و مزیک است. واحدهای فیزیوگرافی منطقه نیز شامل اراضی پست، دشت‌های دامنه‌ای، فلات، تپه و مرتع و به لحاظ زمین‌شناسی، عمدتاً حاوی آبرفت، مرم، شیست، سنگ‌آهک، مارن و دولومیت است. بر اساس آخرین تقسیمات کشوری، استان کردستان دارای ۱۰ شهرستان، ۲۹ شهر، ۳۱ بخش، ۸۶ دهستان و ۱۶۹۷ آبادی بوده است. بر پایه سرشماری عمومی نفوس و مسکن سال ۱۳۹۵ استان کردستان ۱۶۰۳۰۱۱ نفر جمعیت دارد. در کردستان، دو نوع شرایط آب‌وهوایی متمایز وجود دارد. در مناطق کوهستانی و دشت‌های مرتفع، آب‌وهوای نسبتاً معتدل و خشک با زمستان‌های سرد و در دره‌ها و قسمتی از مناطق غربی استان آب و هوا معتدل است. اقلیم کردستان با متوسط بارش سالانه ۴۱۳ میلی‌متر و متوسط دمای ۱۲/۸ درجه سانتی‌گراد، تحت تأثیر توده‌های گرم و مرطوب مدیترانه‌ای و اقیانوس اطلس قرار دارد که با عبور این

جدول ۱- تغییرات بارندگی استان کردستان ۹۸-۹۷ نسبت به سال‌های گذشته (منبع: شرکت مدیریت منابع آب، دفتر مطالعات پایه آب)

سال آبی جاری (mm)	سال آبی گذشته (mm)	متوسط درازمدت (mm)	درصد اختلاف نسبت به	
			متوسط درازمدت	سال آبی گذشته
۶۵۶/۶	۴۹۵/۸	۴۱۳/۹	۵۸/۶	۳۲/۴

و باد می‌توانند علت افزایش یا کاهش رطوبت خاک باشند. در این تحقیق، برای بررسی و مدل‌سازی مکانی

متغیرهای مورد استفاده در مدل‌سازی: بعضی از عناصر اقلیمی مانند سرما، گرما، رطوبت، اختلاف فشار

وضعیت رطوبت خاک به حساب می‌آید. مطالعه Luca و همکاران (۲۰۰۷) ارتباط مستقیمی بین توزیع مکانی رطوبت خاک و این شاخص نشان داد. این شاخص از مدل رقومی ارتفاع محدوده مورد مطالعه با اندازه پیکسل ۳۰ متر و استفاده از معادله (۱) استخراج شد.

$$TWI = \ln(As / (\tan b)) \quad (1)$$

که در آن، As سطح ویژه حوزه آبخیز برحسب مساحت تجمعی بالادست و b درجه شیب است. در واقع، این شاخص گرایش آب به تجمع در هر نقطه از حوضه و تمایل به انتقال آب به پایین دست را نشان می‌دهد. پایداری رطوبت خاک تحت تأثیر پوشش گیاهی است (Gao و همکاران، ۲۰۱۵). از این رو، برای استخراج پوشش گیاهی از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ که شامل کلیه تصاویر موجود سال آبی ۹۷-۹۸ در پایگاه داده سامانه Google Earth Engine استفاده شد و میانگین شاخص NDVI ایجاد شد. مدل سازی رگرسیونی، امکان شناسایی و کمی کردن رابطه بین متغیر مستقل و متغیرهای وابسته را می‌دهد.

در رگرسیون‌های خطی و غیرخطی معمولی، فرض بر این است که متغیرهای مستقل در سراسر مکان مورد مطالعه یکسان است، اما در واقعیت این طور نیست. در رگرسیون مکانی ضرایب متغیر مستقل در جاهای مختلف، متفاوت محاسبه می‌شود و فرض می‌شود که در مکان‌های نزدیک، عارضه وزن بیشتری داشته باشند. وظیفه رگرسیون چندمتغیره این است که به تبیین واریانس متغیر وابسته کمک کند و این وظیفه را از طریق مشارکت متغیرها در این واریانس انجام می‌دهد (Kerlinger، ۲۰۰۵). در بین مدل‌های رگرسیونی، روش رگرسیون کمینه مربعات معمولی (OLS)، مرسوم‌ترین و ساده‌ترین روش است. زیربنای فکری این روش، این است که ضرایب مدل مقادیری اختیار کنند که برآوردهای مدل رگرسیونی علاوه بر بیش‌ترین نزدیکی به مشاهدات (کمترین خطای برآورد)، دارای بزرگ‌ترین R^2 نیز باشند. در مدل سازی مکانی، به روش OLS، فرض بر این است که ضرایب یا پارامترهای مدل آماری نسبت به مکان (مختصات جغرافیایی) ثابت هستند. بنابراین، مقدار متغیر وابسته که با این مدل تخمین زده می‌شود، برای کل نقاط منطقه، مقداری یکسان را تخمین می‌زند که به‌عنوان

پراکندگی لایه رطوبت خاک، ابتدا نقشه آن به‌عنوان متغیر وابسته از تصاویر ماهواره اسمپ^۱ استخراج شد. این ماهواره در ۳۱ ژانویه ۲۰۱۵ به فضا پرتاب شد و یکی از نخستین ماهواره‌های دیدبانی زمین است که به‌وسیله ناسا در پاسخ به شورای ملی پژوهش ایالات متحده آمریکا توسعه یافته است. ماهواره اسمپ به اندازه‌گیری رطوبت سطحی خاک کره زمین با پوشش دو تا سه روزه می‌پردازد. اندازه‌گیری‌های رطوبتی اسمپ به همراه مدل‌های هیدرولوژیکی برای آگاهی از وضعیت رطوبت خاک مناطق مختلف زمین به‌کار می‌رود. سنجنده‌های فعال و غیرفعال این ماهواره قادر به سنجش رطوبت پنج سانتی‌متر سطحی خاک با استفاده از پوشش گیاهی برای برآورد میزان رطوبت خاک هستند. ترکیب ابزارهای سنجش فعال و غیرفعال باعث شده تا این ماهواره از مزیت وضوح فضایی رادار و دقت سنجش رادیومتر بهره‌مند شود. مشخصات این ماهواره در جدول ۲ آورده شده است.

در بازه مورد مطالعه، ۲۵۶ تصویر از محدوده تحقیق در دسترس بود که مورد بررسی قرار گرفتند. در این مطالعه، با توجه به مطالعات پژوهشگران پیشین و مطالعات جغرافیایی، همچنین، شناختی که از قلمرو مکانی محدوده مورد مطالعه به‌دست آمد، میانگین متغیرهای اقلیمی باران به‌عنوان مهم‌ترین متغیر اقلیمی مؤثر بر رطوبت خاک (Falloon و همکاران، ۲۰۱۵) و آب معادل ذوب برف^۲ به‌دلیل این‌که قسمت عمده محدوده مورد مطالعه کوهستانی است و بعد از ذوب برف‌های کوهستانی و راه افتادن رواناب‌های ناشی از آن می‌تواند منبع خوبی برای تأمین رطوبت خاک باشد، استخراج شد. رطوبت خاک تحت تأثیر متغیرهای زیادی از خاک خارج می‌شود. ولی به‌طور کلی می‌توان گفت به‌وسیله جریانی‌های سطحی و زیرسطحی و همچنین تبخیر و تعرق واقعی از خاک خارج می‌شود. لایه میانگین تبخیر و تعرق واقعی نیز از داده‌های پایگاه داده دانشگاه آیداهو تهیه شد.

متغیر توپوگرافی رطوبت که برای مطالعات کمی حوزه‌های آبخیز به‌کار می‌رود، شاخص مناسبی برای

¹ Soil Moisture Active Passive (SMAP)

² Snow water equivalent

نقطه‌ضعف این روش در مدل‌سازی مکانی محسوب می‌شود.

جدول ۲- مشخصات ماهواره اسمپ

مشخصات	راداری	رادیومتر
فرکانس	۱/۲ GHZ	۱/۴۱ GHZ
پلاریزاسیون	VV, HH, HV	V, H, U
قدرت تفکیک	۱-۳ کیلومتر	۴۰ کیلومتر
قطر آنتن	۶ متر	
پهنای برداشت	۱۰۰۰ کیلومتر	
مدار	خورشید آهنگ	
ارتفاع	۶۸۵ کیلومتر	

به نام تابع وزنی کرنال انجام می‌شود (Lu و همکاران، ۲۰۱۵). برای افزایش دقت مدل در این روش، پهنای نوار برای محاسبه تابع وزن دهی $w_i(u, v)$ با پراکندگی مشاهدات حول نقطه مرجع تطبیق داده می‌شود و رگرسیون موزون جغرافیایی به صورت معادله زیر نوشته می‌شود.

$$Y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_k \beta_k(u_i, v_i)x_{ik} + \varepsilon_i \quad (3)$$

که در آن، u_i, v_i بیانگر مختصات نقاط در مکان هستند. اگر $\hat{\beta}(u, v)$ برآوردی از β و ماتریس $w(u, v)$ اوزان و X ماتریس متغیرهای مستقل باشند، پارامترها از طریق رابطه (۴) برآورد می‌شوند.

$$\hat{\beta}(u, v) = (X^T W(u, v) X)^{-1} X^T W(u, v) y \quad (4)$$

در گام بعد، اگر بین متغیرهای مستقل هم خطی زیادی باشد، باید آن‌ها را از مدل خارج کرد. شاخص VIF برای آگاهی از وجود یا عدم وجود هم خطی به کار می‌رود. به طور کلی، اگر شاخص VIF بیشتر از ۷/۵ بود، بین متغیرها هم خطی وجود دارد. در گام نهایی، مدل را با کمینه مربعات برازش کرده، تا از آن طریق ضرایب مکان (u, v) تخمین زده شود. وزن دهی به گونه‌ای است که داده‌های نزدیک به (u, v) اهمیت و وزن بیشتری نسبت به داده‌های دورتر دریافت می‌کنند. برای ارزیابی میزان اعتبار و کارایی مدل‌های رگرسیونی، شاخص‌های متعددی وجود دارد که به چند مورد که در این پژوهش از آن‌ها بهره گرفته شد، اشاره می‌شود.

الف) ضریب تعیین (R^2): این ضریب، میزان درصد واریانس متغیر وابسته که به وسیله متغیرهای مستقل تبیین می‌شود را بیان می‌کند. اگر میزان ضریب تعیین

مدل آماری OLS و ماتریس تخمین ضرایب مدل، با استفاده از روابطی بیان می‌شود (Erfanian و همکاران، ۲۰۱۳).

$$y = X\beta + \varepsilon \quad (2)$$

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T y \quad (3)$$

که در آن‌ها، T ترانهاده ماتریس، $(X^T X)^{-1}$ معکوس ماتریس واریانس-کواریانس و X ماتریس متغیرهای مستقل است. این مدل تغییرات مکانی پارامترهای مدل را ارائه نمی‌دهد. یکی دیگر از معایب این روش، این است که اگر یکی از متغیرهای مستقل، تابعی خطی از یک یا چند متغیر مستقل دیگر باشد، هم‌راستایی ایجاد می‌شود. وجود این هم‌راستایی سبب پنهان شدن اطلاعات و گمراهی در استنباط آماری و عدم اطمینان به ضرایب برآوردی مدل می‌شود. از آنجا که فرض اساسی در روش‌های رگرسیونی کلی، ثابت بودن روابط در محدوده مورد مطالعه است، این روش برای متغیرهایی که دارای تغییرات مکانی زیادی هستند، مناسب نیست، چرا که باعث حذف عوامل مؤثر محلی می‌شود. تکنیک‌های رگرسیونی محلی متعددی برای محاسبه نایستایی فضایی در روابط داده‌ها وجود دارد که یکی از آن‌ها رگرسیون موزون جغرافیایی است. نایستایی فضایی بیانگر این است که در هر نقطه رابطه‌ای متفاوت بین متغیر وابسته و مستقل وجود دارد. در این روش، برای برآورد پارامترهای مدل در هر نقطه، از مشاهدات اطراف آن نقطه استفاده می‌شود. لذا، مشاهدات نزدیک‌تر، اثرگذاری بیشتری در برآورد محلی پارامترها نسبت به مشاهدات دورتر دارند. این وزن‌دهی به وسیله تابعی

نتایج و بحث

بازه زمانی مورد مطالعه در این تحقیق، سال آبی ۹۸-۹۷ است. از آنجا که متغیر اصلی در رطوبت خاک، بارش است و قسمت بسیار عمده بارش محدوده مورد مطالعه در فصل زمستان و پاییز می‌بارد، همچنین، در فصل تابستان گرم و خشک است، تقریباً هیچ‌گونه بارشی دریافت نمی‌کند. لذا، بازه زمانی تا ابتدای تابستان مورد بررسی قرار گرفت. میانگین تصاویر (شکل ۲) به‌عنوان متغیر وابسته در مدل‌سازی به‌کار برده شد.

ایجاد منحنی رطوبتی خاک، می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های محیطی به‌کار گرفته شود. با تعیین این منحنی، می‌توان وضعیت رطوبتی خاک و میزان آب قابل استفاده خاک برای گیاه را در عمق مورد مطالعه بررسی و تعیین کرد. همان‌گونه که در شکل ۳ آورده شده است، در پاییز، استان کردستان بیشتر رطوبت خاک را داشته است. بررسی بارندگی به‌عنوان مهمترین متغیر اقلیمی مستقل در رطوبت خاک در شکل ۴، به‌صورت نمودار بارندگی، آورده شده است که در محدوده مورد مطالعه نشان‌دهنده بیشترین بارش از اواسط پاییز تا اوایل بهار است و می‌تواند نشان‌دهنده بیشینه فراوانی سامانه‌های بارشی در این محدوده زمانی باشد. شکل ۵ نیز نشان‌دهنده بیشینه بارش مکانی در غرب استان است.

به دلیل کوهستانی بودن قسمت اعظم محدوده مورد مطالعه، آب معادل برف به‌عنوان یکی از متغیرهای مستقل مورد بررسی قرار گرفت که در شکل ۶، پراکندگی مکانی میزان آن آورده شده است. میانگین تبخیر و تعرق نیز به‌عنوان متغیر مستقل، مستخرج از پایگاه داده آیداهو، در شکل ۷ آورده شده است.

با توجه به مطالعات قبلی که ارتباط بین رطوبت خاک و شاخص توپوگرافی را اثبات کرده‌اند، این شاخص از مدل رقومی محدوده مورد مطالعه استخراج شد که در شکل ۸ آورده شده است. شاخص‌های پوشش گیاهی نیز می‌توانند نشان‌دهنده رطوبت خاک باشند که در این تحقیق، میانگین شاخص NDVI در بازه مورد مطالعه مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای

یک شود، یعنی خط رگرسیون دقیقاً توانسته است تغییرات متغیر وابسته را به تغییرات متغیرهای مستقل نسبت دهد. اگر ضریب تعیین برابر صفر باشد، نشان‌دهنده عدم توانایی رگرسیون در برآورد تغییرات متغیر وابسته از روی متغیرهای مستقل است (Asakereh, 2018). ضریب تعیین به‌صورت رابطه (۵) نوشته می‌شود.

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^N (X_{obsi} - \bar{X}_{obs})(X_{sim.i} - \bar{X}_{sim})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_{obsi} - \bar{X}_{obs})^2 (X_{sim.i} - \bar{X}_{sim})^2}} \right)^2 \quad (5)$$

ب) روش معیار آکائیک^۱ (AICc): معیاری برای سنجش میزان کارایی نسبی است و نشان می‌دهد که استفاده از یک مدل آماری به چه میزان باعث از دست رفتن اطلاعات می‌شود. به عبارتی، این معیار تعادلی بین دقت مدل و پیچیدگی آن برقرار می‌کند. مقدار کم این معیار، بیانگر این است که مقدار تخمین زده شده به‌وسیله مدل، به مقدار مشاهده‌ای یا واقعیت زمینی نزدیک‌تر است. اگر n تعداد داده‌ها و $\hat{\sigma}$ انحراف استاندارد برآورد شده مقادیر خطا باشد، معیار تصحیح‌شده آکائیک از رابطه (۶) به دست می‌آید (Wang و همکاران، ۲۰۰۵):

$$AIC_c = 2n \log_e(\hat{\sigma}) + n \log_e(2\pi) + n \left\{ \frac{n + tr(S)}{n - 2 - tr(S)} \right\} \quad (6)$$

ج) ضریب نش‌ساتکلیف^۲ (NSE): یکی دیگر از معیارها برای ارزیابی دقت مدل، معیار ساتکلیف و معیار ریشه میانگین مربعات خطا است که بر اساس روابط (۷) و (۸) به دست می‌آیند.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (X_{simi} - X_{obsi})^2}{\sum_{i=1}^N (X_{obsi} - \bar{X}_{obsi})^2} \quad (7)$$

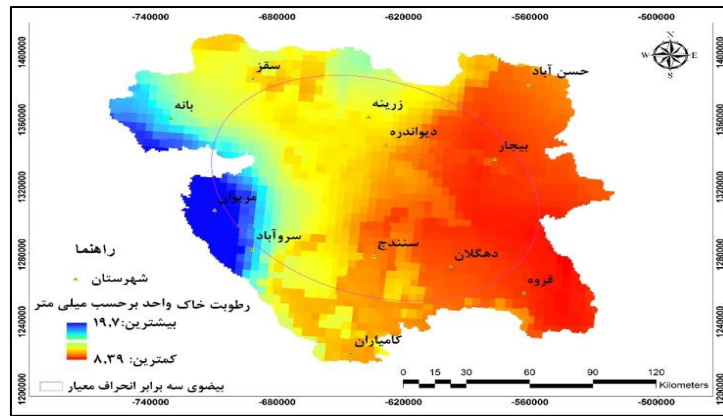
$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{sim.i} - X_{obs.i})^2 \right]^{1/2} \quad (8)$$

که در آن‌ها، X_{obsi} داده‌های مشاهده‌ای، $X_{sim.i}$ داده‌های برآورد شده، \bar{X}_{obsi} میانگین داده‌های مشاهده‌ای است. دامنه ضریب NSE بین یک تا منفی بی‌نهایت است. اگر دامنه این معیار بین صفر و یک باشد، مقدار خطا از واریانس داده‌ها بیشتر نمی‌شود و بهترین حالت زمانی است که ضریب برابر یک باشد.

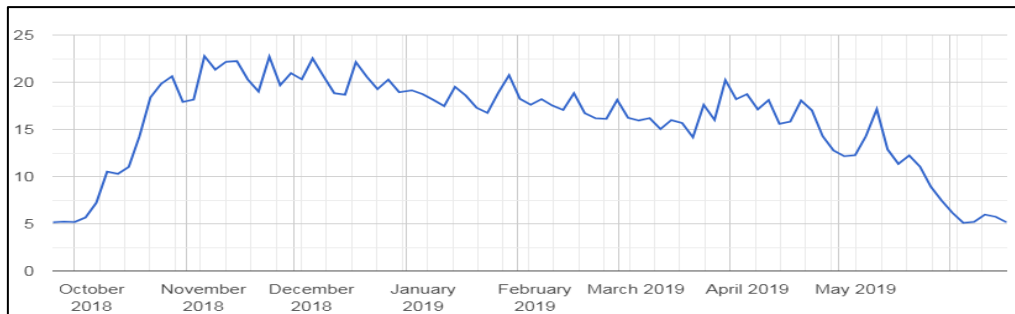
¹ Akaike information criterion

² Nash-Sutcliffe

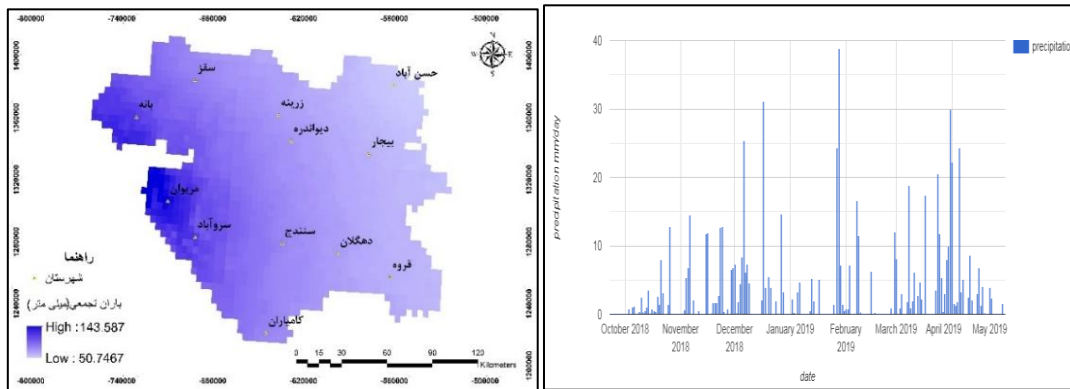
لندست ۸ با استفاده از سامانه Google Earth Engine مطابق شکل ۹ به دست آمد.



شکل ۲- میانگین رطوبت خاک استان کردستان

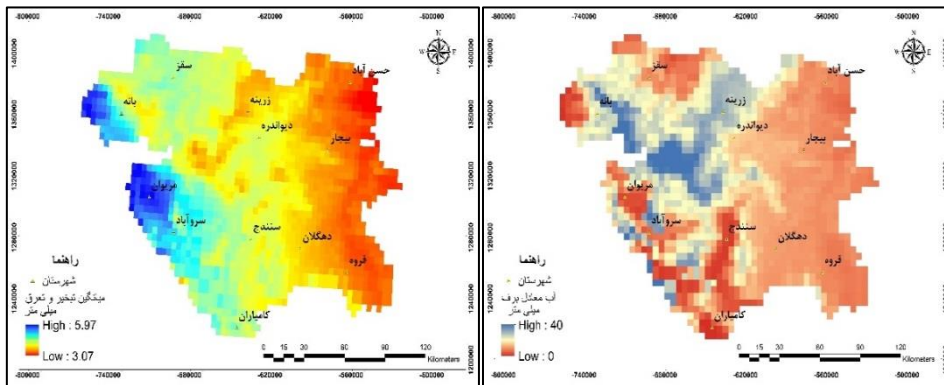


شکل ۳- نمودار میانگین روزانه روند تغییرات رطوبت خاک



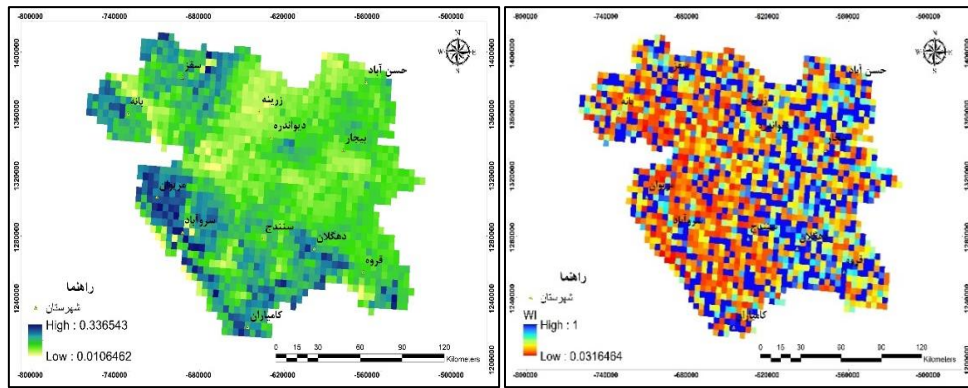
شکل ۵- پراکنندگی بارش

شکل ۴- نمودار زمانی میانگین بارندگی



شکل ۷- میانگین تبخیر و تعرق

شکل ۶- میانگین آب معادل برف



شکل ۹- میانگین شاخص پوشش گیاهی

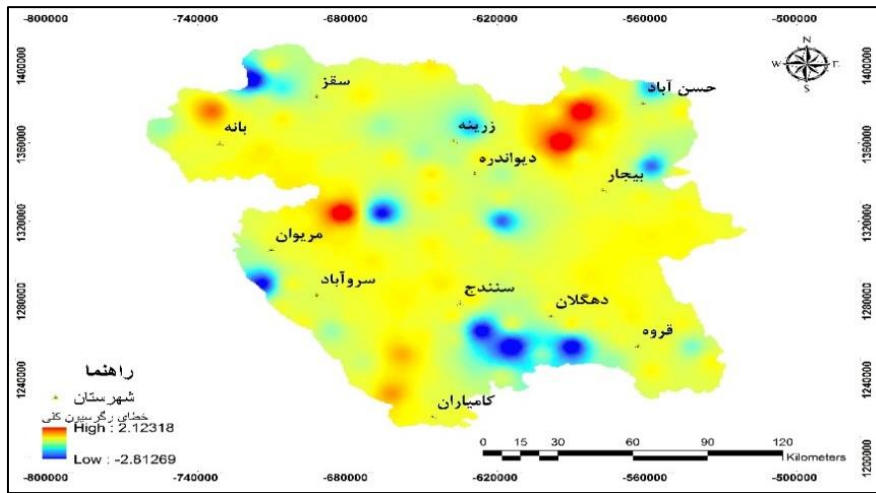
شکل ۸- شاخص رطوبت توپوگرافی

رابطه (۹) گویای یک رابطه خطی بین متغیرهای مستقل و وابسته است که بر اساس آن متغیرهای مستقل توانایی توجیه و تبیین ۸۲/۰۷ درصد از تغییرات بارش را دارند (جدول ۲). همچنین، نقشه پراکندگی خطای مدل، مطابق شکل ۱۰ استخراج شد. پراکندگی خطای رگرسیون کلی گویای این واقعیت است که در مناطقی که خطاها منفی هستند، برآورد رطوبت بیش از مقادیر واقعی بوده و در مناطق با خطاهای مثبت که بیشتر مناطق پربارش را شامل می‌شود، مقادیر برآوردی کمتر از واقعیت بوده که بیشتر در جنوب استان است و در مناطق پراکندگی خطای صفر مدل توانسته است تا نزدیک به واقعیت تخمین بزند. از آنجا که مدل رگرسیون کلی، تنها شمایی کلی از رفتار رطوبت خاک در محدوده مورد مطالعه را ارائه می‌دهد، لذا با بهره‌گیری از رگرسیون موزون جغرافیایی به مدل‌سازی محلی رطوبت خاک پرداخته شد تا بتوان رفتار هر متغیر جداگانه در کل پهنه را شناسایی کرد. چنان‌که در بالا گفته شد، از پنج متغیر مکانی به‌عنوان متغیرهای مستقل استفاده شد. شکل ۱۰، گستره تحت پوشش ضرایب و میزان اهمیت هرکدام از متغیرهای مورد نظر را نشان می‌دهد.

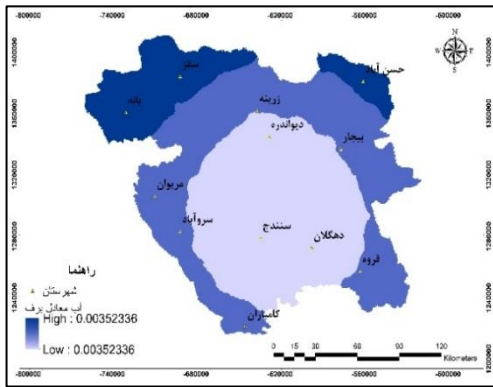
از جمله راه‌های ارزیابی اعتبار مدل، بررسی خودهمبستگی خطاهاست. در اشکال ۱۶ و ۱۷ نتایج خودهمبستگی باقی‌مانده‌های دو مدل ترسیم شده است.

اگر متغیرهای مستقل به‌طور معنی‌دار با یکدیگر همبستگی داشته باشند، برآورد همبستگی‌ها غیرواقعی می‌شود. چون، بخشی از واریانس متغیرها که به‌وسیله یک متغیر توضیح داده می‌شود تا حد فراوانی همان واریانس است که به‌وسیله متغیرهای دیگر تبیین می‌شود. در این حالت، گفته می‌شود که بین متغیرهای مستقل هم‌راستایی چندگانه وجود دارد. لذا، برآورد متغیرها بر مبنای مدل رگرسیونی گمراه‌کننده و استفاده از مدل را با اشکال مواجه می‌کند (Asakereh, ۲۰۱۸). از این‌رو، با آزمون هم‌راستا بودن متغیرهای مستقل، از طریق گرفتن همبستگی بین پنج متغیر مستقل موجود و همچنین بررسی میزان افزایش شاخص تورم واریانس VIF و بررسی میزان تغییر ضرایب رگرسیونی با حذف یا اضافه کردن تک‌تک متغیرهای مستقل در یک مدل رگرسیون چند متغیره، وجود هم‌راستایی محرز شد. از آنجا که هدف، بررسی اثرات بیشتر عوامل مکانی بر روی میزان رطوبت خاک بود، از تبدیلات مشاهده به نمره‌های معیار بهره گرفته شد تا مقیاس مقادیر یکسان شده و همبستگی بین متغیرهای مستقل از بین برود. بدین منظور، با انجام حدود ۱۰ تبدیل روی داده‌ها بهترین تبدیل لگاریتم طبیعی $(\ln(x))$ تشخیص داده، استفاده شد. سپس، برازش رگرسیون کلی کمترین مربعات خطا (OLS) بر روی داده‌ها انجام گرفت.

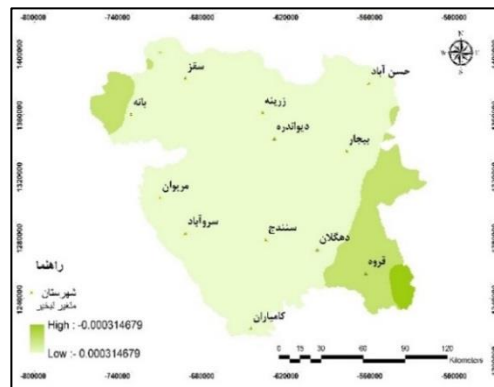
$$P - estimated = 1/359822 + 0.000824SWE + 0.26605PR - 0.0089AET + 0.040865WI + (9) 0.003182NDVI$$



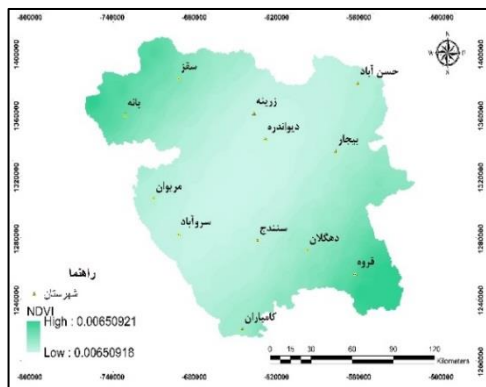
شکل ۱۰- پراکندگی خطای رگرسیون کلی



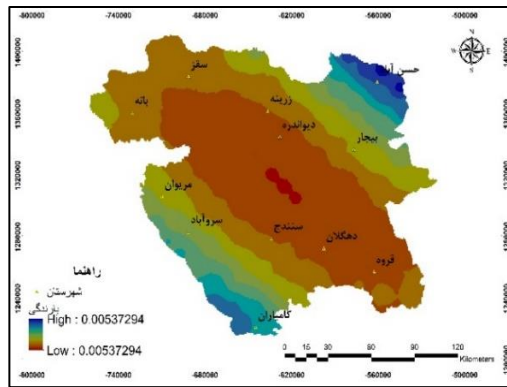
شکل ۱۲- ضرایب برآورد معادل برف



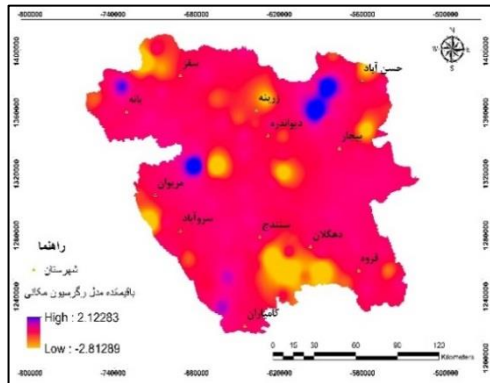
شکل ۱۱- ضرایب برآوردی تبخیر



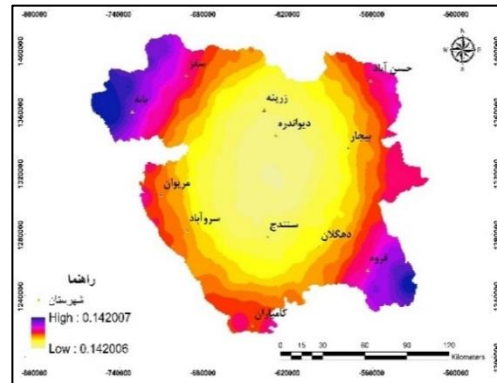
شکل ۱۴- ضرایب برآورد پوشش گیاهی



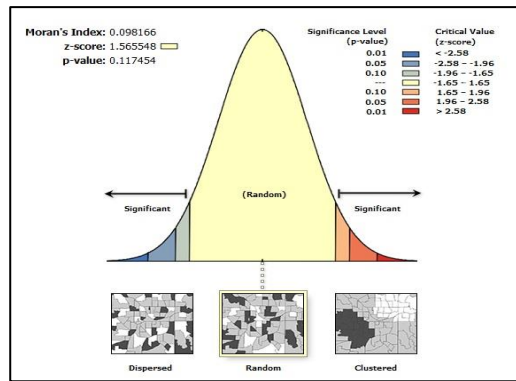
شکل ۱۳- ضرایب برآوردی بارندگی



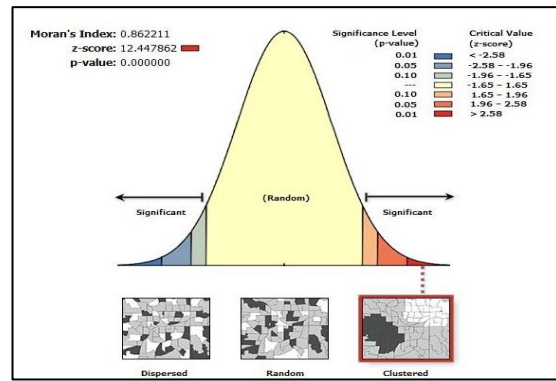
شکل ۱۶- باقی مانده مدل رگرسیون مکانی



شکل ۱۵- ضرایب برآورد شاخص رطوبت توپوگرافی



شکل ۱۸- نتایج خودهمبستگی باقی مانده رگرسیون کلی



شکل ۱۷- نتایج خودهمبستگی باقی مانده رگرسیون وزنی مکانی

جدول ۳- ارزیابی مدل های رگرسیون کلی و رگرسیون مکانی

مدل		شاخص خطا
رگرسیون مکانی	رگرسیون کلی	
۰/۶۲	-۰/۴۹	NSE
۱/۲۱	۱/۵۸	RMSE
۰/۷۴۳۶	۰/۶۸۰۱	R²
۲۷۵۱/۲۱	۳۴۶۱/۵۳	AICc
۰/۱۱۷۴	۰/۰۰	P-value باقی مانده مدل

غربی و مرکزی استان بیشتر خود را نشان داده است. متغیر پوشش گیاهی به دلیل رشد آرام و عکس العمل تأخیری، تأخیر رشد گیاه نسبت به بارندگی کمترین ضریب را در معادله رگرسیون کلی گرفته است. در شکل ۹ نیز نقشه باقی مانده های رگرسیون کلی گویای این واقعیت است که در مناطق دشتی، مدل خطای کمتری دارد. اما، در محدوده های نزدیک به مناطق مسکونی، احتمالاً به خاطر ناهمگنی کاربری ها مدل خطای بیشتری از خود نشان داده است. سپس، رگرسیون مکانی بر داده ها برازش داده شد. برای مدل سازی رگرسیون مکانی از پنج متغیر مکانی به عنوان متغیرهای مستقل استفاده شد که اشکال ۱۰ تا ۱۴ گستره تحت پوشش ضرایب و میزان اهمیت هر کدام از متغیرهای مورد نظر را نشان می دهند. یکی از مهمترین عوامل نفوذ آب در خاک و ایجاد رطوبت در آن، بافت خاک یعنی اجزای تشکیل دهنده آن شامل رس، لوم و شن است و هرچه بافت خاک سنگین تر باشد، شدت نفوذ آب در خاک کمتر و در نتیجه رطوبت سطحی خاک بیشتر خواهد شد. در این تحقیق، سعی شد تا لایه بافت خاک ایجاد شود. ولی به دلیل وسعت محدوده مورد مطالعه و نیاز به

در رابطه (۹) می توان دریافت که از بین پنج متغیر مستقل موجود، متغیر باران بیشترین اثر را بر رطوبت خاک داشته است. به عبارتی، با هر یک میلی متر افزایش بارندگی، ممکن است به طور میانگین، ۰/۲۶۶ میلی متر رطوبت خاک در استان افزایش یابد. دومین متغیر اثرگذار، شاخص رطوبت توپوگرافی استخراج شد که محدوده بین یک تا ۰/۰۳ داشته و با مقایسه این لایه با شیب می توان فهمید که مناطق مرطوب تر خاک، بیشتر در شرق استان از رطوبت بالادست که شیب بیشتری دارند، تغذیه می شوند. در حالی که مناطق با رطوبت کمتر غرب و شمال استان شیب های تندتر داشته، در نتیجه بارش های نزول کرده را به سمت پایین دست هدایت می کنند. یکی از راه های خروج آب از خاک به وسیله مصرف گیاهان تحت عنوان تعرق و مصرف آب به صورت تبخیر از سطح خاک است. متغیر دیگری که در این مدل سازی اثر معکوس بر میزان رطوبت خاک محدوده مورد مطالعه داشت، تبخیر و تعرق بوده که نتایج نشان داد با هر میلی متر افزایش این متغیر، رطوبت خاک ۰/۰۰۸۹ میلی متر کاهش می یابد. متغیر بعدی، آب معادل برف است که تأثیر این متغیر به دلیل برف گیر بودن مناطق

بارش‌های بیش از نرمال سال آبی ۹۸-۹۷ در استان کردستان با استفاده از مدل رگرسیون کلی *OLS* و مدل رگرسیون موزون جغرافیایی *GWR* و ارزیابی آن‌ها بوده است. در تحقیق حاضر، برای شناخت روابط بین عوامل مکانی و پراکندگی رطوبت خاک، با استفاده از اطلاعات تولیدشده یعنی میانگین هر عامل در هر یاخته و با توجه به مشخصه‌های مکانی هر یاخته، با استفاده از تکنیک‌های رگرسیون معمولی (*OLS*) و رگرسیون موزون جغرافیایی (*GWR*) مدل‌سازی شد. ابتدا، برای حذف هم‌راستایی و کاهش شاخص تورم واریانس، تبدیل لگاریتمی بر روی داده‌ها انجام شد، سپس، معادله رگرسیون کلی بر داده‌ها برازش داده شد. در تحقیق حاضر، نتایج مدل رگرسیون موزون جغرافیایی نشان داد که بیشترین رطوبت خاک در نواحی کم ارتفاع غرب دیده می‌شود. بیشترین تاثیر منفی تبخیر و تعرق نیز در شمال غربی و جنوب شرقی به چشم می‌خورد. بر اساس نقشه پراکندگی خطای مدل، رگرسیون مکانی توانست در بیش از ۷۲/۰۴ درصد پهنه، بیش از ۵۰ درصد تغییرات رطوبت خاک را توجیه کند. نقشه‌های مانده‌های مدل نیز حاکی از کاهش دامنه باقی‌مانده‌های مدل *GWR* نسبت به باقی‌مانده‌های مدل *OLS* است. از طرف دیگر، میزان خطاها نیز بسیار کمتر شده است. در شکل ۱۷، دیده می‌شود که باقی‌مانده‌های مدل *GWR* فاقد خودهمبستگی مکانی هستند و رفتار خاصی ندارند. اما، در مورد باقی‌مانده‌های مدل رگرسیون کلی شکل ۱۶ رفتارهای نوسانی منظم و وجود خودهمبستگی مکانی کاملاً مشهود است. همچنین، از طریق شاخص‌های ارائه شده، میزان کارایی دو مدل مورد ارزیابی قرار گرفته است. بر اساس این اشکال و جدول سه مدل *GWR* با R^2 بالاتر، کمترین میزان *AICc*، بالاترین میزان *NSE* و کمترین *RMSE* را نسبت به مدل *OLS* بهترین برازش را داشته است. برتری عمده روش رگرسیون وزن‌دار مکانی در مقابل روش رگرسیون معمولی، توانایی آن در بررسی اثر مکانی متغیرهاست. محققان پیشنهاد می‌کنند تا برای بهتر کردن این‌گونه مدل‌سازی‌ها، همراه با بررسی نوع خاک، به جای لایه بارش، از لایه بارش مؤثر (بخشی از بارندگی که به

نمونه‌های زیاد برای آزمایش، این لایه در نظر گرفته نشد. در مورد لایه پوشش گیاهی، در این تحقیق میانگین بازه مورد مطالعه در نظر گرفته شد. اما، از آنجایی که ممکن است تصاویر برداشت‌شده همزمان با بارندگی اخذ شده باشد و به دلیل این‌که در زمان بارندگی و روزهای بعد از آن به شدت ریشه گیاهان باعث افزایش رطوبت خاک می‌شوند، پیشنهاد می‌شود تا در تحقیقات آتی روزهای خشک مشخص شده و متغیر لایه پوشش گیاهی برای روزهای خشک ایجاد شود. شاخص رطوبت توپوگرافی برخلاف تحقیقات Luca و همکاران (۲۰۰۷) که مهمترین عامل در رطوبت خاک معرفی شده بود، در این تحقیق، دومین عامل مهم شناسایی شد. در این شاخص، دو عامل مهم قدرت تفکیک مدل رقومی ارتفاع و الگوریتم روندیابی جریان مهم است که الگوریتم‌های جهت جریان در مناطق مرتفع کارایی بیشتری دارند. اما این الگوریتم در مناطق مسطح به طور دقیق نمی‌تواند جهت جریان آب را مشخص کند. با توجه به این‌که حدود ۳۰ درصد محدوده مورد مطالعه دارای شیب‌های کمتر از پنج درجه بود، مسطح محسوب می‌شود که از محدودیت‌های این مطالعه است. نتایج این تحقیق، برخلاف Luca و همکاران (۲۰۰۷) نشان داد که توپوگرافی نمی‌تواند عامل اصلی کنترل‌کننده رطوبت خاک باشد. البته این تحقیق در محدوده بیشتر کوهستانی و در مسیر سیکلون‌های بارشی قرار گرفته و ممکن است در محدوده‌هایی که در مسیر اصلی سامانه‌های بارش‌زا قرار نگرفته‌اند و یا شیب کم دارند، نتایج متفاوتی حاصل شود. نتایج تحقیقات سایر محققان نظیر Sharma و همکاران (۲۰۱۱)، Brown و همکاران (۲۰۱۲)، Usman و همکاران (۲۰۱۵)، Asakereh و SeifiPour (۲۰۱۶) و Asakereh و Razmi (۲۰۱۸) نیز نشان‌دهنده کارایی بهتر مدل *GWR* نسبت به مدل *OLS* است. توزیع متفاوت مکانی بارش‌ها و همچنین تأثیر متفاوت عنصر اقلیمی و متغیرهای محیطی باعث تفاوت مکانی رطوبت خاک شده است. مدل‌سازی تأثیر این عوامل، می‌تواند در شناخت رفتار و پراکندگی رطوبت خاک برای ارزیابی‌های خشکسالی بسیار مؤثر باشد. هدف از این تحقیق، مدل‌سازی مکانی رطوبت خاک پس از

عمق ۱۰-۱۲ سانتی متری داخل خاک نفوذ می کند) در مدل سازی استفاده شود. در نهایت، می توان بیان داشت که با استفاده از نقشه های پیش بینی *GWR* می توان مناطق در معرض کاهش یا افزایش شدید

معناداری رطوبت خاک را در استان کردستان شناسایی کرده و در راستای بهبود فرایند تصمیم گیری و پیش بینی نیازهای خدماتی ارگان های ذی ربط به کار برد.

منابع مورد استفاده

1. Amani, M., S. Parsian, S. Mir Mazloumi and O. Aieneh. 2016. Two new soil moisture indices based on the NIR-red triangle space of Landsat-8 data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 73: 176-186 (in Persian).
2. Asakereh, H. 2004. Spatial change modeling of climatic data a case study: annual precipitation of Esfahan Province. *Geographical Research*, 19(74): 213-232 (in Persian).
3. Asakereh, H. and R. Razmi. 2018. Spatial modeling of summer precipitation in north-west of Iran. *Researches in Geographical Sciences*, 18(50): 155-178 (in Persian).
4. Asakereh, H. 2011. *Fundamentals of statistical climatology*. Zanjan University Press, 545 pages.
5. Asakereh, H. and Z. Seifipour. 2013. Spatial modeling of annual precipitation in Iran. *Geography and Development Iranian Journal*, 10(29): 15-30 (in Persian).
6. Babaeian, E., M. Homae and A. Norouzi. 2013. Estimation of surface soil moisture using ENVISAT ASAR radar images. *Water Research in Agriculture*, 27(4): 622-611 (in Persian).
7. Brown, S., L. Versace, V. Laurenson, D. Ierodiaconou, J. Fawcett and S. Salzman. 2012. Assessment of spatiotemporal varying relationships between rainfall, land cover and surface water area using geographically weighted regression. *Environmental Modeling and Assessment*, 17(3): 241-254.
8. Erfanian, M., A. Alijanpour and M. Hosseink. 2013. An introduction to multiple regression methods (GWR and OLS) for modeling the land use effects on water quality. *Extension and Development of Watershed Management*, 1: 18-29 (in Persian).
9. Falloon, P., D. Bebber, J. Bryant, M. Bushell, A. Challinor, J. Dessai and A.K. Koehler. 2015. Using climate information to support crop breeding decisions and adaptation in agriculture. *World Agriculture*, 5(1): 25-43.
10. Gao, L., M. Shao. X. Peng and D. Shey. 2015. Spatio-temporal variability and temporal stability of water contents distributed within soil profiles at a hillslope scale. *Catena*, 132: 29-36.
11. Kerlinger, P. 2005. *Multiple regressions in behavioral research*. Samt Press, Tehran, 534 pages.
12. Khanmohammadi, F., M. Homae and A. Noroozi. 2015. Soil moisture estimating with NDVI and land surface temperature and normalized moisture index using MODIS images. *Journal of Soil and Water Resources Conservation*, 4: 37-45 (in Persian).
13. Koohbanani, H. and R. Yazdani. 2019. Mapping the moisture of surface soil using Landsat 8 imagery, case study: Suburb of Semnan City. *Geography and Sustainability of Environment*, 8(3): 65-77 (in Persian).
14. Lai, X., Q. Zhu, Z. Zhou and K. Liao. 2017. Influences of sampling size and pattern on the uncertainty of correlation estimation between soil water content and its influencing factors. *Journal of Hydrology*, 555: 41-50.
15. Lee, Y., C. Jung and S. Kim. 2019. Spatial distribution of soil moisture estimates using a multiple linear regression model and Korean geostationary satellite (COMS) data. *Agricultural Water Management*, 213: 580-593.
16. Lu, B., P. Harris, M. Charlton and C. Brunson. 2015. Calibrating a geographically weighted regression model with parameter-specific distance metrics. *Procedia Environmental Sciences*, 26: 109-114.
17. Luca, C., B. Si and R. Farrell. 2007. Upslope length improves spatial estimation of soil organic carbon content. *Canadian Journal of Soil Science*, 87(3): 291-300.
18. Mekonnen, F. 2009. *Satellite remote sensing for soil moisture estimation: Gumara Catchment, Ethiopia*. MSc Thesis, WREM Department of ITC, Enschede, the Netherlands, 127 pages.

19. Saghafian, B., A. Shokoohi and T. Raziei. 2003. Drought spatial analysis and development of severity-duration-frequency curves for an arid region. *International Association of Hydrological Sciences*, 278: 305-311.
20. Sharma, V., A. Irmak, I. Kabenge and S. Irmak. 2011. Application of GIS and geographically weighted regression to evaluate the spatial non-stationarity relationships between precipitations vs. irrigated and rainfed maize and soybean yields. *Transactions of the ASABE*, 54(3): 953-972.
21. Tabatabaenejad, A., M. Burgin, X. Duan and M. Moghaddam. 2014. P-band radar retrieval of subsurface soil moisture profile as a second-order polynomial: first AirMOSS results. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(2): 645-658.
22. Usman, U., L. Aliyu and M.K. Aminu. 2015. Study of the geographically weighted regression application on climate data. *Mathematical Theory and Modeling*, 5: 8-21.
23. Van Loon, F., K. Stahl, G. Baldassarre, J. Clark, S. Rangelcroft, N. Wanders and R. Uijlenhoet. 2016. Drought in a human-modified world: reframing drought definitions understanding and analysis approaches. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(9): 3631-3650.
24. Vereecken, H., A. Huisman, Y. Pachepsky, C. Montzka, J. Van Der Kruk, H. Bogen and J. Vanderborght. 2014. On the spatio-temporal dynamics of soil moisture at the field scale. *Journal of Hydrology*, 516: 76-96.
25. Wang, Q., J. Ni and J. Tenhunen. 2005. Application of geographically weighted regression analysis to estimate net primary production of Chinese forest ecosystems. *Global Ecology and Biogeography*, 14(4): 379-393.
26. Xu, G., T. Zhang, Z. Li, P. Cheng and S. Cheng. 2017. Temporal and spatial characteristics of soil water content in diverse soil layers on land terraces of the Loess Plateau. *Catena*, 158: 20-29.
27. Yagci, L., L. Di and M. Deng. 2013. The effect of land-cover change on vegetation greenness-based satellite agricultural drought indicators: a case study in the southwest climate division of Indiana. *International Journal of Remote Sensing*, 34(20): 6947-6968.
28. Yoshioka, M., S. Takakura, T. Ishizawa and N. Sakai. 2015. Temporal changes of soil temperature with soil water content in an embankment slope during controlled artificial rainfall experiments. *Journal of Applied Geophysics*, 114: 134-145.