

مدل سازی تأثیر خصوصیات بیوفیزیکی و توپوگرافی سطح بر توزیع مکانی رطوبت خاک در تابستان (مطالعه موردی: حوضه آبخیز بالخلی چای)

سولماز فتح‌العلومی^۱، علی‌رضا واعظی^{۳*}، سید کاظم علوی‌پناه^۴، اردوان قربانی^۵

۱. دانشجوی دکتری علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان

۲. کارشناس، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل

۳. استاد، گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان

۴. استاد، گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران

۵. استاد، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل

(تاریخ دریافت ۱۳۹۸/۱۲/۱۶؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۹/۲/۲۳)

چکیده

استفاده از داده‌های ماهواره‌ای برای برآورد سریع رطوبت خاک و تعیین عوامل محیطی مؤثر بر آن، در سال‌های اخیر توسعه یافته است. هدف از پژوهش حاضر، بررسی تأثیر خصوصیات بیوفیزیکی و توپوگرافی سطح بر توزیع مکانی رطوبت خاک در تابستان بود. به این منظور، رطوبت خاک در ۱۴۸ نقطه در حوضه آبخیز بالخلی چای در استان اردبیل اندازه‌گیری شد و از روش مثلثی مبتنی بر سنجش از دور بر مبنای مدل رقومی ارتفاع ASTER، نقشه پوشش زمین و داده‌های اقلیمی برای مدل‌سازی رطوبت خاک استفاده شد. خصوصیات بیوفیزیکی سطح از جمله نمناکی، سبزیگی، روشنایی، و دمای سطح زمین و متغیرهای توپوگرافی (زاویه محلی فرود خورشید، ارتفاع، درجه و جهت شیب) محاسبه شدند. خطای مدل در ماه‌های مختلف با استفاده از آماره‌های خطا تعیین شد. بر اساس نتایج، مقدار میانگین رطوبت خاک در منطقه در ماه‌های تیر، مرداد و شهریور به ترتیب ۴/۶۷، ۶/۲۲ و ۴/۶۶ درصد حجمی بود. ضریب تبیین (R^2) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) بین رطوبت خاک برآوردی و اندازه‌گیری شده در شهریورماه کمترین مقدار (به ترتیب ۰/۷۸ و ۱/۴۴) را داشت. قوی‌ترین رابطه خطی بین رطوبت خاک و متغیرهای بیوفیزیکی (توپوگرافی) در تیرماه (به ترتیب با R^2 و RMSE برابر با ۰/۵۳ و ۰/۲۹) بود. با افزایش دمای سطح و روشنایی، رطوبت خاک کاهش یافت. با این حال، افزایش مقدار سبزیگی، نمناکی، ارتفاع و زاویه محلی فرود خورشید سبب افزایش مقدار رطوبت خاک شد. نتایج پژوهش حاضر نشان داد از مدل مثلثی می‌توان برای بررسی توزیع مکانی رطوبت خاک با استفاده از خصوصیات بیوفیزیکی و توپوگرافی سطح بهره گرفت. استفاده از نتایج پژوهش حاضر می‌تواند در بهبود دقت مدل‌سازی رطوبت برای استفاده در کاربردهای مختلف از جمله مدیریت آبیاری، پیش‌بینی رواناب و کشاورزی دقیق بسیار مفید باشد.

کلیدواژگان: خصوصیات بیوفیزیکی، دمای سطح زمین، زاویه محلی فرود خورشید، لندست ۸، ویژگی‌های توپوگرافی.

مقدمه

رطوبت خاک سطحی، متغیری مهم در چرخه آبی طبیعت است و تأثیر زیادی بر تعادل آب و انرژی جهانی دارد. رطوبت خاک با تأثیر بر فرایندهای اکولوژیک، هیدرولوژیک و هواشناسی این نقش را ایفا می‌کند. تغییرپذیری خصوصیات بیوفیزیکی و توپوگرافی سطح و پوشش گیاهی در زمان و مکان، رطوبت خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد. با توجه به اهمیت رطوبت خاک در مطالعات علمی و کاربردی، اندازه‌گیری، مدل‌سازی، نظارت بر روند تغییرات مکانی و زمانی و تعیین متغیرهای مؤثر بر توزیع مکانی و زمانی این متغیر اهمیت زیادی دارد. متغیرهای توپوگرافی از جمله شیب، جهت شیب و ارتفاع با تأثیر بر خصوصیات هیدرولیکی خاک از راه تغییر شیب هیدرولیکی خاک، از عوامل مهم و مؤثر بر توزیع مکانی رطوبت خاک محسوب می‌شوند [۱ و ۲]. تغییر خصوصیات بیوفیزیکی سطح از جمله روشنایی، سبزیگی و دمای سطح با تأثیر بر تبخیر-تعرق، سرعت نفوذ و درصد رواناب، سبب تغییر مکانی و زمانی رطوبت خاک می‌شوند [۳-۶]. همچنین، تغییر متغیرهای اقلیمی از جمله دمای هوا، رطوبت نسبی و بارش سبب تغییر توزیع مکانی و زمانی رطوبت خاک می‌شوند [۷]. به دلیل تأثیر مجموعه عوامل بیوفیزیکی و توپوگرافی سطح و شرایط محیطی و اقلیمی [۸ و ۹]، تغییرات مکانی و زمانی رطوبت خاک زیاد است.

از آنجا که اندازه‌گیری‌های زمینی رطوبت خاک در پهنه‌های وسیع به دلیل پویایی زمانی و مکانی آن، پرهزینه و زمان‌بر است، امروزه برآورد رطوبت خاک در مقیاس‌های مکانی بزرگ، با روش‌هایی همچون سنجش از دور انجام می‌شود. مطالعات متعددی به مدل‌سازی رطوبت خاک، توسعه و ارزیابی کارایی این روش‌ها و داده‌ها پرداخته‌اند [۱۰ و ۱۱]. با این حال، مطالعات محدودی در زمینه شناسایی دقیق خصوصیات سطح مؤثر بر توزیع مکانی رطوبت خاک انجام شده است. شناخت و مدل‌سازی دقیق الگوی مکانی رطوبت در منطقه به مدیریت بهتر از جمله در پیش‌بینی سیل و رواناب منجر خواهد شد. در مورد تأثیر ویژگی‌های سطح بر توزیع مکانی رطوبت خاک، مطالعاتی در سراسر دنیا انجام گرفته است. به این منظور، نیو و همکاران (۲۰۱۵) کاربری زمین را یکی از عوامل مهم مؤثر بر کنترل تغییرات مکانی و زمانی رطوبت خاک معرفی کردند که با تأثیر بر تبخیر و تعرق، سرعت نفوذ و

رواناب این نقش را ایفا می‌کند. بیشترین میزان رطوبت خاک در مراتع بود و با خصوصیات توپوگرافی شامل ارتفاع و درجه شیب همبستگی معنادار داشت [۱۲].

زوکو و همکاران (۲۰۱۴) بیان کردند که با وجود تفاوت چشمگیر کاربری‌ها، الگوی زمانی رطوبت در مکان‌های مختلف مشابه است، در حالی که تنوع مکانی نسبت به نمونه‌گیری‌های قبلی در همان منطقه ولی در کاربری‌های مشابه، بیشتر بود [۱۳]. ساکستون و رالز (۲۰۰۶) با تخمین برخی ویژگی‌های خاک مانند بافت، ماده آلی و ساختمان خاک، خصوصیات آب خاک مثل هدایت هیدرولیکی را برآورد کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد همبستگی آماری بین بافت و دیگر خصوصیات خاک، پتانسیل آب خاک و هدایت هیدرولیکی می‌تواند تخمین‌های کافی را برای بسیاری از تحلیل‌ها و تصمیم‌ها فراهم کند [۱۴]. سوگاتان و همکاران (۲۰۱۴) رابطه رطوبت خاک با آلبیدوی سطح را مطالعه کردند و نتیجه گرفتند که با افزایش رطوبت خاک، آلبیدوی سطح به صورت نمایی سقوط می‌کند. همچنین، انتشار حرارتی و هدایت حرارتی خاک از مشخصات دمای زیر خاک قابل تخمین است. محققان یادشده وابستگی طبیعی انتشار حرارتی و هدایت حرارتی و رطوبت خاک را تأیید کردند [۱۵]. گاو و همکاران (۲۰۱۸) بیان کردند که توان تشعشعی تابعی از رنگ خاک، رطوبت، زبری و طول موج است و زبری سطح سبب افزایش توان تشعشعی خاک می‌شود. از طرفی، هر چه رطوبت خاک بیشتر باشد، توان تشعشعی خاک نیز افزایش خواهد یافت، به طوری که خاک‌های مرطوب توان تشعشعی بیشتری دارند [۱۶]. زیبک و همکاران (۲۰۱۸) طی پژوهشی نشان دادند رطوبت خاک تحت تأثیر پوشش گیاهی قرار می‌گیرد. با افزایش پوشش گیاهی، دمای سطح کاهش یافته و تابش طول موج بلند خروجی از سطح کاهش می‌یابد؛ در نتیجه میزان رطوبت در چنین سطوحی بیشتر است [۱۷]. بیشتر مطالعات گذشته تأثیر کاربری زمین و خصوصیات توپوگرافی بر رطوبت خاک را بررسی کرده‌اند، در حالی که بر اساس دانش پایه، خصوصیات بیوفیزیکی سطح و متغیرهای محیطی نیز بر تغییرات رطوبت خاک مؤثرند. با توجه به بحران آب در سال‌های اخیر و با توجه به اینکه حوضه آبخیز منطقه‌ای است که می‌توان رواناب‌های سطحی و سایر مسائل مربوط به آب را در آن مهار کرد، می‌توان حوضه آبخیز را یک واحد طبیعی برای آمایش و مدیریت سرزمین دانست.

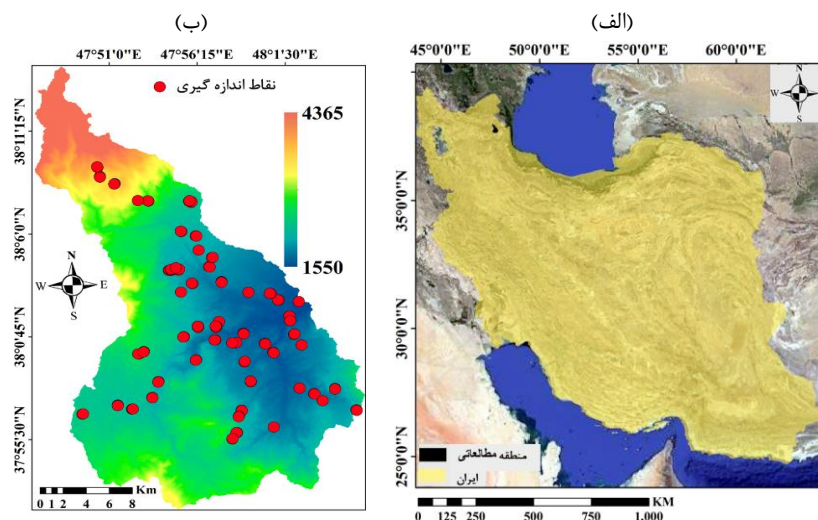
در استان اردبیل و بخش دیگر در استان آذربایجان شرقی واقع شده است (شکل ۱). مساحت حوضه ۵۶۷ کیلومترمربع، شیب متوسط ۱۷/۲ درصد، ارتفاع متوسط ۲۱۰۹ متر از سطح دریا و مرتفع‌ترین نقطه آن، ۴۳۶۳ متر و مربوط ارتفاعات کوهستان سبلان در قسمت شمالی حوضه است. پست‌ترین نقطه در حوضه دارای ارتفاع ۱۵۵۰ متر از سطح دریاست که در قسمت خروجی حوضه به سد یامچی منتهی می‌شود. اقلیم منطقه با توجه به میانگین دمای سالانه ۸ درجه سانتی‌گراد، و متوسط بارندگی سالانه ۲۰ ساله (از سال ۱۳۶۵ تا ۱۳۸۴)، ۳۶۰ میلی‌متر در سیستم طبقه‌بندی آمبرژه، نیمه‌خشک سرد، است (سایت اداره هواشناسی استان اردبیل). بافت خاک سطحی در فلات‌ها و تراس‌های فوقانی Fine Sandy Loam و در قسمت‌های مرکزی و جنوبی با اراضی سبک Fine Loamy Sand است. رژیم رطوبتی و حرارتی خاک منطقه به ترتیب زیریک (Xeric) و مزیک (Mesic) است (سازمان آب منطقه‌ای استان اردبیل، ۱۳۷۵). رودخانه بالخلی‌چای یکی از سرشاخه‌های مهم رودخانه ارس در شمال غرب ایران است که در جهت جنوبی-شمالی جریان دارد و آب‌های سرشاخه‌های فرعی را از شرق و جنوب حوضه جمع‌آوری می‌کند. این رودخانه به دلیل تأمین آب شرب و کشاورزی منطقه، یکی از رودخانه‌های دائمی مهم استان اردبیل است. موقعیت جغرافیایی حوضه آبخیز بالخلی‌چای در ایران در شکل ۱ نشان داده شده است.

مدیریت صحیح آبخیز، شرایطی فراهم می‌سازد که ضمن تأمین منافع جامعه، تأثیر منفی بر منابع به کمترین حد برسد. به همین منظور، مدل‌سازی رطوبت به‌عنوان متغیر تعیین‌کننده در حوضه و همچنین، شناسایی و تعیین میزان تأثیر عوامل مؤثر بر رطوبت در مقیاس حوضه آبخیز بسیار ضروری است. با توجه به اینکه ناهمگنی مکانی خصوصیات سطح در منطقه مطالعه‌شده در فصل تابستان بیشتر از فصل‌های دیگر است، بنابراین فصل تابستان برای مطالعه حاضر مناسب‌تر است. از این‌رو، هدف از پژوهش حاضر، بررسی کارایی روش مثلثی در برآورد رطوبت خاک و سپس، بررسی تأثیر خصوصیات بیوفیزیکی و توپوگرافی سطح زمین بر توزیع مکانی رطوبت خاک در تابستان بر اساس داده‌های سنجش از دور در حوضه آبخیز است.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعه‌شده

حوضه آبخیز بالخلی‌چای در استان اردبیل یکی از حوضه‌های آبخیز مهم در منطقه است که به دلیل شرایط کوهستانی منطقه و تغییرات ناگهانی شیب و تغییرات ارتفاعی، خصوصیات هیدرولوژیکی و ژئومورفولوژیکی خاصی دارد که آن را نسبت به فرسایش و سیلاب، آسیب‌پذیر می‌سازد. از این‌رو، به دلیل ناهمگنی خصوصیات بیوفیزیکی و توپوگرافی سطح، این منطقه برای مدل‌سازی تأثیر خصوصیات بیوفیزیکی و توپوگرافی سطح بر توزیع مکانی رطوبت خاک انتخاب شد. بخش اصلی این حوضه



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعاتی در ایران (الف) و موقعیت نقاط اندازه‌گیری رطوبت در منطقه روی نقشه مدل رقومی ارتفاع

(ب) ASTER

جمع آوری داده‌ها

با در نظر گرفتن وسعت و ابعاد منطقه مطالعه‌شده، توان تفکیک مکانی و زمانی، پوشش زمانی و مکانی، دسترسی رایگان و وجود باندهای انعکاسی و حرارتی، تصاویر لندست مناسب‌ترین داده برای بررسی کارایی روش مثلثی در برآورد رطوبت خاک و بررسی تأثیر خصوصیات بیوفیزیکی و توپوگرافی سطح زمین بر توزیع مکانی آن در مطالعه حاضر است. از طرفی، ناهمگنی مکانی خصوصیات سطح در منطقه مطالعه‌شده در فصل تابستان بیشتر از فصل‌های دیگر است. در فصل‌های گرم تغییرات مکانی تابش خورشید ورودی به سطح بسیار بیشتر از فصل سرد است [۱۸]. بیش از نیمی از زمین‌های منطقه به‌ویژه در بخش شمالی منطقه متعلق به مراتع است (شکل ۵) که در ماه‌های گرم سال به دلیل کوچ عشایر به سمت بخش‌های شمالی و سرد منطقه تحت چرای دام قرار می‌گیرد و این وضعیت تا اواخر فصل گرم ادامه دارد که همین موضوع خصوصیات سطح را تحت تأثیر قرار می‌دهد و آن را ناهمگن می‌سازد. همچنین، بخش‌های مرکزی منطقه مطالعه‌شده در فصل تابستان زیر کشت محصولات گندم، یونجه، عدس و نخود قرار دارند. همچنین، در فصل‌های گرم تغییرات مکانی رطوبت خاک و دمای سطح در منطقه مطالعه‌شده بیشتر از فصل سرد است. از این‌رو، برای بررسی تأثیر خصوصیات بیوفیزیکی و توپوگرافی سطح زمین بر توزیع مکانی رطوبت خاک استفاده از داده‌های فصل تابستان نسبت به فصل‌های دیگر مناسب‌تر است. از این‌رو، تصاویر ماهواره لندست ۸ برای تاریخ‌های ۱۰ تیر، ۲۷ مرداد و ۱۲ شهریور ۱۳۹۷ با پوشش ابر کمتر از ۱۰ درصد برای مدل‌سازی رطوبت خاک و خصوصیات بیوفیزیکی سطح استفاده شد. در مطالعه حاضر از باندهای انعکاسی و حرارتی تصویر لندست به‌ترتیب با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ و ۱۰۰ متر استفاده شد. توان تفکیک زمانی این ماهواره ۱۶ روز است و هر دو سنسور انعکاسی و حرارتی اطلاعات سطح زمین را ثبت می‌کنند [۱۹]. برای مدل‌سازی متغیرهای توپوگرافی، از مدل رقومی ارتفاع (DEM) ASTER^۱ با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر

استفاده شد [۲۰ و ۲۱]. داده‌های هواشناسی و اقلیمی مورد نیاز از سازمان هواشناسی استان اردبیل تهیه شد که شامل رطوبت نسبی، دما و فشار هوا می‌شد. از داده‌هایی استفاده شد که هم‌زمان با لحظه عبور ماهواره از منطقه ثبت شده بودند. ارزیابی دقت رطوبت خاک مدل‌شده، با استفاده از داده‌های رطوبت خاک اندازه‌گیری‌شده با دستگاه رطوبت‌سنج ΔT مدل SM 150 (شکل ۲) در زمان گذر ماهواره انجام شد. موقعیت جغرافیایی نقاط نمونه‌برداری به‌گونه‌ای انتخاب شدند که توزیع مکانی مناسبی در سطح منطقه مطالعه‌شده داشته باشند و همچنین، ناهمگنی خصوصیات بیوفیزیکی و توپوگرافی سطح منطقه مطالعه‌شده را به بهترین شکل پوشش دهند. بر این اساس، رطوبت خاک در ۱۴۸ نقطه به‌صورت زمینی در کاربری‌های غالب در منطقه شامل مرتع، کشت دیم گندم، زمین‌های رهاشده و شخم‌خورده اندازه‌گیری شد (شکل ۱). این نقاط در کاربری‌های مختلف به‌گونه‌ای انتخاب شدند که دربرگیرنده جهت‌ها و درجه شیب دامنه‌های منطقه باشند.

تعیین خصوصیات بیوفیزیکی سطح

برای مدل‌سازی رطوبت خاک و بررسی تأثیر خصوصیات بیوفیزیکی و توپوگرافی سطح بر توزیع مکانی رطوبت، ابتدا پیش‌پردازش تصاویر لندست ۸ انجام شد و شاخص اختلاف نرمال‌شده پوشش گیاهی^۲ و دمای سطح زمین^۳ که متغیرهای استفاده‌شده در روش مثلثی هستند، استخراج شد. سپس، خصوصیات بیوفیزیکی سطح شامل نمناکی^۴، سبزیگی^۵ روشنایی^۶ و توپوگرافی^۷ سطح از جمله زاویه محلی فرود خورشید^۸، ارتفاع، شیب و جهت شیب با استفاده از نقشه DEM به‌دست آمد. در مرحله بعد رطوبت خاک بر مبنای روش مثلثی^۹، DEM و مجموعه داده‌های رطوبت خاک اندازه‌گیری‌شده، مدل‌سازی و ارزیابی شد. در نهایت، توزیع مکانی رطوبت خاک و تأثیر خصوصیات بیوفیزیکی و توپوگرافی سطح بر آن بر اساس شاخص‌های میانگین و انحراف معیار بررسی شد. آماره انحراف معیار

3. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

4. Land Surface Temperature (LST)

5. Wetness

6. Greenness

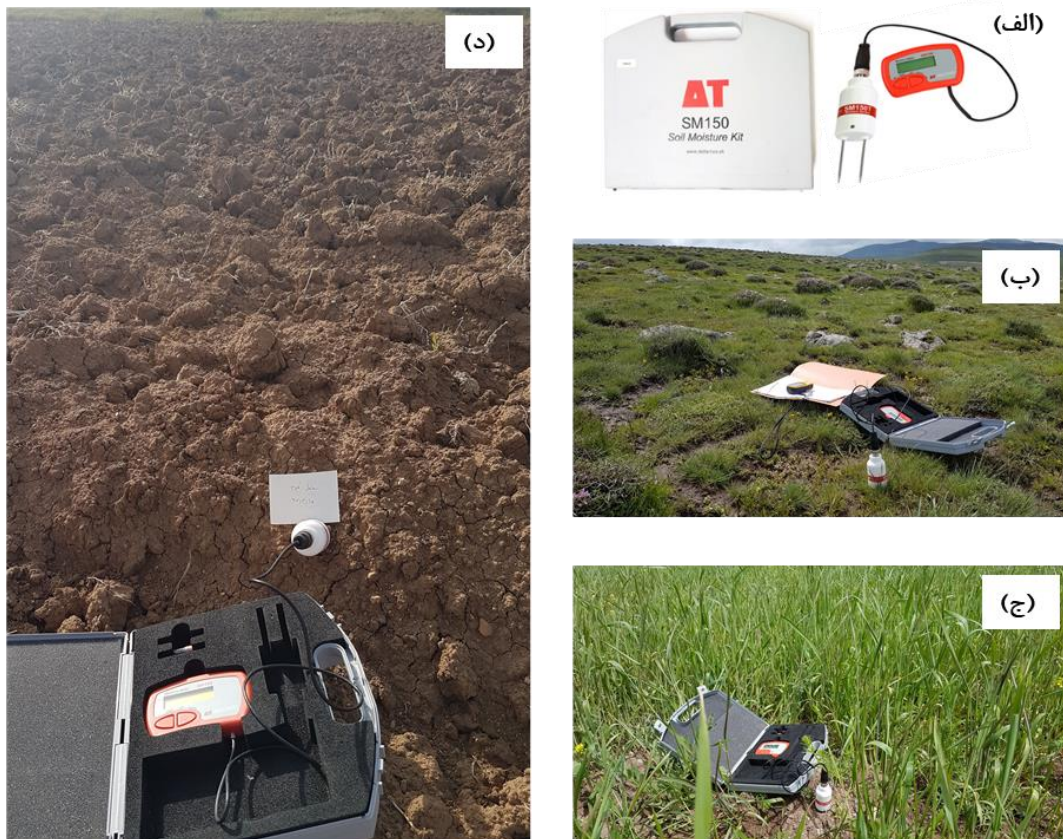
7. Brightness

8. Solar Local Incidence Angle (SLIA)

9. Triangle method

1. Digital Elevation Model

2. Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer



شکل ۲. دستگاه رطوبت‌سنج استفاده‌شده در پژوهش (الف) و اندازه‌گیری رطوبت در کاربری‌های (ب) مرتع، (ج) گندم دیم و (د) زمین شخم‌خورده

به استفاده از منابع متفاوت تهیه‌شده، مطابقت هندسی داده‌های مختلف با روش تصحیح هندسی ثابت تصویر به تصویر، برای تطبیق باندهای انعکاسی و حرارتی لندست ۸ و DEM انجام شد. خطای تطابق هندسی تصاویر لندست ۸ و DEM، کمتر از نصف پیکسل بود.

برآورد رطوبت خاک با فن‌سنجش از دور
برآورد رطوبت خاک با استفاده از روش مثلثی که نوعی روش مبتنی بر داده‌های سنجش از دور است، انجام شد. این روش از معروف‌ترین و شناخته‌شده‌ترین روش‌های سنجش از دوری است که برای برآورد تبخیر-تعرق و رطوبت خاک به کار می‌رود [۲۳]. در این روش با تشکیل فضای ویژگی بین دمای سطح زمین و شاخص تفاضل گیاهی نرمال‌شده و ارتباط با تعدادی از نقاط کنترل رطوبت زمینی به بازیابی رطوبت خاک پرداخته می‌شود. کاربرد ساده و آسان، یکی از مزایای اصلی این روش است. قدرت تفکیک مکانی و زمانی نتایج این روش، به قدرت

برای بررسی میزان پراکنش داده‌های رطوبت خاک در حوضه استفاده شد. مقدار زیاد این آماره نشان‌دهنده تغییرات آشکار مقادیر رطوبت خاک اندازه‌گیری‌شده در نقاط نمونه‌برداری است. این تغییرات می‌تواند ناشی از تأثیر عوامل اقلیمی و محیطی در محتوای رطوبتی خاک باشد.

پیش‌پردازش تصاویر ماهواره‌ای

قبل از محاسبه و استخراج متغیرهای مختلف، پیش‌پردازش تصاویر لندست ۸ انجام شد. به این منظور، تصحیحات رادیومتریک، اتمسفری و هندسی صورت گرفت. برای تصحیح رادیومتریک، آثار اتمسفر، هندسه دید سنجنده و توپوگرافی برای باندهای انعکاسی و حرارتی در نظر گرفته شد. برای تصحیح اتمسفری باندهای انعکاسی لندست ۸ از الگوریتم FLAASH^۱ استفاده شد که این الگوریتم از پایگاه داده مدل‌های انتقال تابش MODTRAN 6 استفاده می‌کند [۲۲]. همچنین، با توجه

1. Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Hypercubes

$$T = LST \left(\frac{P_0}{P} \right)^{0.286} \quad (۴)$$

$$P = 1013 \left(\frac{293 - 0.0065Z}{293} \right)^{5.26} \quad (۵)$$

که در آن، T دمای سطح استاندارد بر حسب کلوین، LST دمای سطح زمین بر حسب کلوین، P_0 فشار مرجع استاندارد (۱۰۱۳ mb)، P فشار اتمسفر در سطح (mb) و Z ارتفاع (m) است.

$$*LST = \frac{T - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}} \quad (۶)$$

*LST دمای مقیاس‌بندی شده، T دمای مشاهده شده برای هر پیکسل، T_{\max} و T_{\min} به ترتیب دمای حداکثر و حداقل هستند.

برای تعیین بهینه ضرایب مجهول در رابطه ۱ و ارزیابی دقت رطوبت خاک مدل شده، از داده‌های رطوبت زمینی اندازه‌گیری شده استفاده شد. برای این کار، ۷۰ درصد از داده‌های رطوبت خاک اندازه‌گیری شده برای آموزش مدل و تعیین ضرایب مجهول به صورت بهینه و ۳۰ درصد دیگر برای ارزیابی رطوبت خاک به صورت تصادفی انتخاب شدند. برای ارزیابی نتایج، ضریب تبیین (R^2) و خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) بین رطوبت مدل شده و اندازه‌گیری شده، محاسبه شدند.

بررسی تأثیر خصوصیات بیوفیزیکی و توپوگرافی سطح بر توزیع مکانی رطوبت خاک

در مطالعه حاضر برای بررسی و ارزیابی تأثیرگذاری هر یک از خصوصیات بیوفیزیکی، توپوگرافی و کاربری زمین بر رطوبت خاک، ضرایب همبستگی بین رطوبت خاک و خصوصیات بیوفیزیکی و توپوگرافی سطح محاسبه شد. از متغیرهای مربوط به خصوصیات بیوفیزیکی سطح و متغیرهای توپوگرافی استفاده شد. دسته اول شامل شاخص‌های نمناکی، سبزی‌نگی، روشنایی، LST و دسته دوم شامل زاویه محلی فرود خورشید در لحظه گذر ماهواره، ارتفاع، شیب، جهت شیب و همچنین، کاربری زمین^۱ بودند. در پژوهش حاضر برای محاسبه LST از الگوریتم SC^2

تفکیک مکانی سنجنده‌های استفاده شده بستگی دارد [۲۳]. فرض روش یادشده این است که دمای سطح مناطقی که به طور کامل پوشیده از پوشش گیاهی هستند، مساوی با دمای مرطوب‌ترین سطح است. به بیان دیگر، تاج پوشش گیاهی کامل در منطقه، به عنوان مرطوب‌ترین قسمت منطقه در نظر گرفته می‌شود. بعد از به دست آمدن رابطه بین دما و شاخص گیاهی هر پیکسل، دو خط برازشی حول پیکسل‌ها رسم می‌شود. این دو خط که به بهترین شکل روی پیکسل‌ها برازش می‌یابند، به نام لبه‌های (اضلاع) خشک و مرطوب شناخته می‌شوند. ضلع خشک حاوی پیکسل‌های با دمای سطح زیاد و شاخص گیاهی کم است. ضلع دیگر که گاهی به موازات محور افقی ترسیم می‌شود، ضلع مرطوب نام دارد که نماینده پیکسل‌های مناطق مرطوب با دمای سطح کم است. در حد بالایی یا لبه خشک، رطوبتی در سطح موجود نیست و تبخیر صورت نمی‌گیرد و در حد پایینی یا لبه مرطوب، رطوبت، نفوذ و تعرق در حالت بیشینه خود قرار دارد [۲۴]. موقعیت هر پیکسل در فضای ویژگی بین دمای سطح زمین و شاخص اختلاف نرمال شده پوشش گیاهی میزان رطوبت آن را تعیین می‌کند [۲۵ و ۲۶]. مدل مثلثی را می‌توان به وسیله یک رابطه رگرسیون خطی به شکل روابط ۱ تا ۳ نشان داد.

$$SM = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n a_{ij} * NDVI^{(i)} * LST^{(j)} \quad (۱)$$

$$*NDVI = (NDVI - NDVI_0) / (NDVI_s - NDVI_0) \quad (۲)$$

$$*LST = (LST - LST_0) / (LST_s - LST_0) \quad (۳)$$

که در آن، SM، LST و NDVI به ترتیب، رطوبت خاک، دمای سطح زمین و شاخص اختلاف نرمال شده پوشش گیاهی هستند. زیرنویس‌های 0 و s به ترتیب مربوط به خاک لخت و پوشش گیاهی متراکم هستند.

به دلیل تأثیر شرایط توپوگرافی بر دمای سطح زمین و تحت تأثیر قرار گرفتن رطوبت برآورد شده به ویژه در مناطق کوهستانی [۲۷]، از LST نرمال شده نسبت به ارتفاع در مدل سازی رطوبت با استفاده از روش مثلثی استفاده شد [۲۸ و ۲۹] (روابط ۴ تا ۶).

ترکیب‌های باندی تسلدکپ^۳ با استفاده از ترکیب‌های خطی بر مبنای باندهای انعکاسی تصاویر و ماتریس ضرایب اختصاصی، اطلاعات مفید و مؤثری از خصوصیات بیوفیزیکی سطح منطقه مطالعاتی را از تصاویر اولیه استخراج می‌کند که شامل اطلاعات مربوط به نمناکی، سبزی‌نگی و روشنایی هستند. نمناکی نشان‌دهنده خصوصیات عوارض مرتبط با آب، رطوبت خاک، گیاه و اراضی ساخته‌شده، سبزی‌نگی نشان‌دهنده اطلاعات پوشش گیاهی و روشنایی نشان‌دهنده اطلاعات درصد سطوح نفوذناپذیر شامل اراضی بایر و ساخته‌شده در منطقه مطالعه‌شده هستند [۳۴ و ۳۵].

ماتریس ضرایب اختصاصی، برای سنجنده‌های مختلف، متفاوت‌اند که با تجزیه و تحلیل‌های آماری و تجربی به صورت مجزا برای سنجنده‌های مختلف محاسبه می‌شوند. ضرایب مربوط به TCT برای تصاویر لندست ۸ برای استخراج خصوصیات نمناکی، سبزی‌نگی و روشنایی به صورت جدول ۱ نشان داده شده است [۳۴ و ۳۶].

نتایج و بحث

تغییرات رطوبت خاک در حوضه

پارامترهای آماری برای رطوبت خاک اندازه‌گیری شده در نقاط نمونه‌برداری شده محاسبه شده و در جدول ۲ نشان داده شده‌اند. بیشترین مقدار میانگین رطوبت خاک اندازه‌گیری شده در نقاط نمونه‌برداری ۶/۰۰ درصد مربوط به ماه مرداد بود. مقادیر میانگین رطوبت اندازه‌گیری شده در هر دو ماه تیر و شهریور تقریباً یکسان بود. با توجه به اینکه در ماه مرداد رشد گیاهان (به خصوص گیاهان کشت‌شده) در منطقه در حداکثر میزان خود بود، به دلیل نقش پوشش گیاهی در حفظ و نگهداری رطوبت در خاک، بیشترین مقدار رطوبت در مرداد اندازه‌گیری شد. از طرفی، پوشش گیاهی با جلوگیری از تابش نور خورشید به سطح زمین و سایه‌اندازی روی خاک، مانع از افزایش حرارت در سطح زمین می‌شود و در نتیجه، میزان تبخیر از سطح خاک کاهش می‌یابد و رطوبت در خاک باقی می‌ماند [۳۷]. در تیرماه رشد گیاهان به حداکثر خود نرسید و در شهریورماه نیز بخش عمده‌ای از محصولات کشاورزی برداشت شد و گیاهان مرتعی نیز بر اثر چرای دام نسبت به مرداد کاهش یافتند. به همین دلیل، شرایط رطوبتی این دو ماه مشابه و

استفاده شد. محاسبه دقیق LST با استفاده از این الگوریتم نیازمند مدل‌های انتقال تابشی اتمسفری با کیفیت خوب، دانش مناسب پیرامون ضریب گسیلندگی سطح زمین^۱، یک پروفایل اتمسفری دقیق و در نظر گرفتن آثار توپوگرافی به صورت دقیق است [۳۰]. به دلیل اینکه باند ۱۱ حرارتی لندست ۸ بایاس و خطای بزرگ در محاسبه LST دارد [۱۹]، LST به روش SC که از باند ۱۰ استفاده می‌کند، محاسبه شد. این الگوریتم در مطالعات متعددی استفاده شده است. رابطه کلی برای محاسبه LST با استفاده از این الگوریتم به صورت رابطه ۷ است [۳۱ و ۳۲].

$$LST = \gamma \left(\frac{1}{LSE} (\psi_1 L_{sen} + \psi_2) + \psi_3 \right) + \delta \quad (7)$$

که در آن، Lsen میزان انرژی ثبت‌شده در سنجنده برای باند حرارتی، LSE ضریب گسیلندگی مربوط به طول موج باند حرارتی استفاده‌شده و γ و δ متغیرهای وابسته به تابع پلانک هستند که به صورت روابط ۸ و ۹ محاسبه می‌شوند [۳۱ و ۳۳].

$$\gamma = \frac{T_{sen}^2}{b_{\lambda} L_{sen}} \quad (8)$$

$$\delta = -\gamma L_{sen} + T_{sen} \quad (9)$$

در این روابط، Tsen دمای درخشندگی ثبت‌شده در سنجنده، Lsen میزان انرژی ثبت‌شده در سنجنده برای باند حرارتی ۱۰، b_{λ} ضریب ثابتی است که برای باند ۱۰ لندست ۸ برابر با ۱۳۲۴ درجه کلوین در نظر گرفته می‌شود. همچنین، ψ_1 ، ψ_2 و ψ_3 توابع اتمسفری هستند که با استفاده از رابطه ۱۰ به دست می‌آیند [۳۱ و ۳۳].

$$\begin{cases} \psi_1 = 0.04019w^2 + 0.02916w + 1.01523 \\ \psi_2 = -0.38333w^2 - 1.50294w - 0.20324 \\ \psi_3 = 0.00918w^2 + 1.36072w - 0.27514 \end{cases} \quad (10)$$

که در آن، w میزان بخار آب موجود در اتمسفر است که از محصول بخار آب مادیس (MOD07) به دست آمد. در مطالعه حاضر برای محاسبه LSE از روش مبتنی بر آستانه‌گذاری بر NDVI^۱ استفاده شد [۳۱ و ۳۲].

چند که اختلاف آن با تیرماه بسیار ناچیز است. کمترین میزان اختلاف بین میانگین مقدار واقعی (اندازه‌گیری) و میانگین مقدار برآوردشده مربوط به شهریور (مقدار اندازه‌گیری شده ۴/۶۰ و مقدار برآوردشده برابر ۴/۶۶ درصد) با کمترین مقدار انحراف معیار در میانگین میزان رطوبت برآوردشده (۲/۶۳) نسبت به مقادیر دیگر بود (جدول‌های ۲ و ۳). کم بودن انحراف معیار رطوبت در شهریور و تا حدودی همگن بودن توزیع رطوبت در منطقه در مقایسه با دو ماه دیگر احتمالاً به دلیل کاهش تراکم پوشش گیاهی بر اثر برداشت محصولات کشاورزی و چرای دام‌ها در این ماه در منطقه مطالعه شده است. برداشت گیاهان سبب می‌شود سطح منطقه یکنواخت‌تر شده و نقش پوشش گیاهی در حفظ رطوبت در برخی مناطق نسبت به مناطق بدون کشت حذف شود. در نتیجه، علاوه بر کاهش نسبی مقدار میانگین رطوبت در شهریورماه، ناهمگنی در توزیع رطوبت در منطقه نیز کمتر شده است [۳۹ و ۴۰]. به بیان دیگر، ناهمگنی مکانی خصوصیات بیوفیزیکی سطح مثل درصد پوشش گیاهی منطقه مطالعه شده در شهریورماه کمتر از ماه‌های تیر و مرداد بوده و به همین دلیل، توزیع مکانی رطوبت خاک در این ماه همگن‌تر است.

نسبت به مرداد کمتر بود. بیشترین مقدار انحراف معیار رطوبت خاک اندازه‌گیری شده در منطقه ۴/۱۵ و مربوط به مرداد بود. مقادیر زیاد انحراف معیار رطوبت خاک، مؤید تأثیر تنوع خصوصیات بیوفیزیکی و توپوگرافی سطح بر توزیع رطوبت خاک در منطقه است. این نتایج با نتایج تحقیق فتح‌العلومی و همکاران (۲۰۲۰) در یک راستاست [۱۸]. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، این خصوصیات در سطح منطقه مطالعه شده بسیار متغیرند و سبب پراکندگی و توزیع ناهمگن رطوبت در سطح منطقه شده‌اند. با توجه به تنوع توپوگرافی در منطقه، پراکنش بارندگی و همچنین، دما در منطقه یکسان نیست و این عامل نیز می‌تواند یکی از دلایل مؤثر در تغییرات مکانی رطوبت خاک باشد. در پژوهش ونگ و همکاران (۲۰۱۸) نشان داده شد که تغییرات مکانی رطوبت خاک بیشتر تحت تأثیر تغییرات مکانی بارش قرار دارد [۳۸]. پارامترهای آماری برای رطوبت برآوردشده نیز محاسبه شده و در جدول ۳ نشان داده شده است. بر اساس نتایج یادشده، بیشترین میزان رطوبت برآوردشده و انحراف معیار مربوط به ماه مرداد است که این نتایج با نتایج رطوبت اندازه‌گیری شده (جدول ۲) همخوانی دارد. کمترین مقدار میانگین رطوبت برآوردشده نیز مربوط به شهریور است، هر

جدول ۱. ضرایب مربوط به ترکیب‌های بانندی تسلدکپ برای تصاویر لندست ۸

شاخص	باند ۱	باند ۲	باند ۳	باند ۴	باند ۵	باند ۶	باند ۷
نمناکی	-	۰/۱۵۱۱	۰/۱۹۷۳	۰/۳۲۸۳	۰/۳۴۰۷	-۰/۷۱۱۷	-۰/۴۵۵۹
سبزینگی	۰	-۰/۲۹۴۱	-۰/۲۴۳	-۰/۵۴۲۴	۰/۷۲۷۶	۰/۰۷۱۳	-۰/۱۶۰۸
روشنایی سطح	-	۰/۳۰۲۹	۰/۲۷۸۶	۰/۴۷۳۳	۰/۵۵۹۹	۰/۵۰۸	۰/۱۸۷۲

جدول ۲. پارامترهای آماری رطوبت خاک اندازه‌گیری شده در حوضه آبخیز مطالعه شده برای تاریخ‌های مختلف

رطوبت اندازه‌گیری شده (%)	میانگین	انحراف معیار	حداقل	حداکثر
تیر	۴/۶۰	۳/۸۲	۳/۱۱	۱۴/۶
مرداد	۶/۰۰	۴/۱۵	۲/۸۳	۱۵/۶
شهریور	۴/۶۰	۳/۱۰	۳/۵۱	۱۳/۶

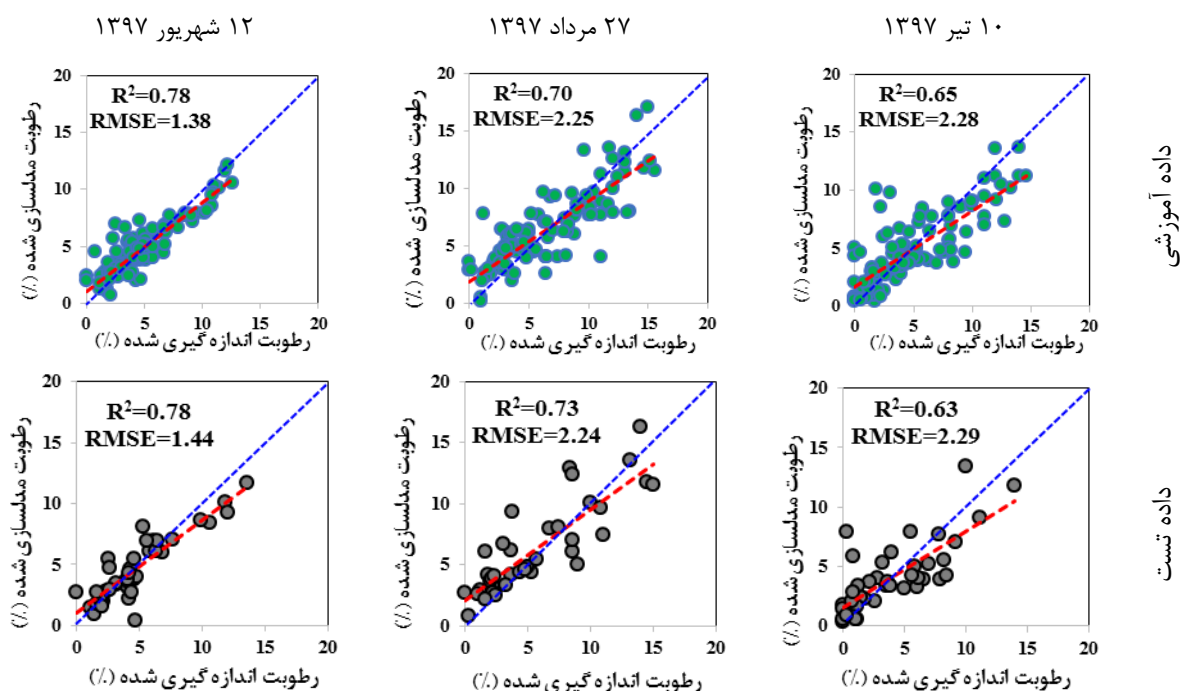
جدول ۳. پارامترهای آماری رطوبت خاک برآوردشده در حوضه آبخیز مطالعه شده برای تاریخ‌های مختلف

رطوبت (%)	ماه	میانگین	انحراف معیار	حداقل	حداکثر
برآوردشده	تیر	۴/۶۷	۳/۱۱	۲/۵۱	۱۷/۱۳
برآوردشده	مرداد	۶/۲۲	۳/۵۰	۳/۶۳	۱۸/۳۵
برآوردشده	شهریور	۴/۶۶	۲/۶۳	۱/۱۶	۱۶/۲

آموزش (۰/۶۵ و ۲/۲۸)، (۰/۷۰ و ۲/۲۵) و (۰/۷۸ و ۱/۳۸) و برای داده‌های تست (۰/۶۳ و ۲/۲۹)، (۰/۷۳ و ۲/۲۴) و (۰/۷۸ و ۱/۴۴) به ترتیب برای تاریخ‌های ۱۰ تیر، ۲۷ مرداد و ۱۲ شهریور ۱۳۹۷ بود.

ارزیابی دقت مدل مثلثی

شکل ۳ انطباق مقادیر رطوبت خاک سطحی برآوردی را با داده‌های زمینی در سه تاریخ مطالعه شده نشان می‌دهد. مقادیر (R^2 و RMSE) بین رطوبت خاک مدل‌شده و اندازه‌گیری‌شده در منطقه مطالعه شده برای داده‌های



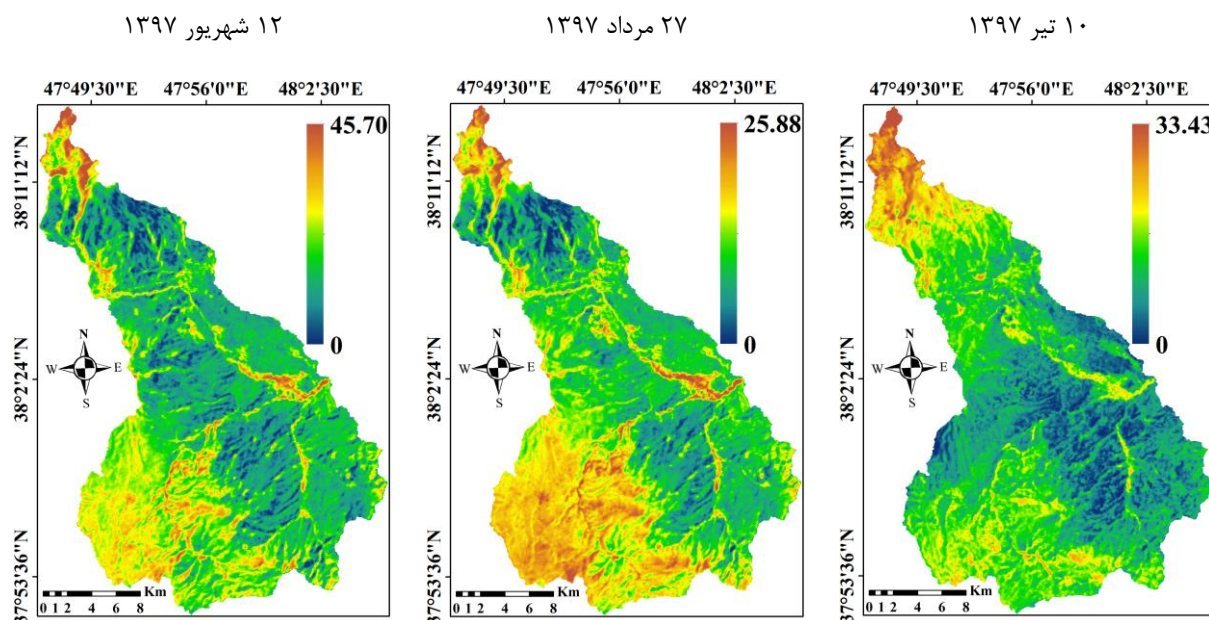
شکل ۳. تشریح تغییرات رطوبت اندازه‌گیری‌شده و رطوبت مدل‌سازی‌شده در حوضه آبخیز بالخلی‌جای در زمان‌های مختلف با استفاده از آماره‌های R^2 و RMSE و خط یک‌به‌یک

زمین است. نتایج پژوهش اقدامی و همکاران (۲۰۱۹) نیز مؤید همین موضوع است. در مطالعه یادشده نشان داده شد که زمین‌های با کاربری مرتع، بیشترین میزان کربن آلی را بین سایر کاربری‌ها دارند [۴۲]. مقدار (میانگین، انحراف معیار) رطوبت خاک منطقه مطالعه شده به ترتیب (۰/۶۰، ۴/۸۲)، (۰/۰۰، ۶/۱۵) و (۰/۰۱، ۳/۰۱) برای ۱۰ تیر، ۲۷ مرداد و ۱۲ شهریور ۱۳۹۷ بود که نشان‌دهنده ناهمگنی مکانی و زمانی رطوبت خاک در سطح منطقه مطالعه شده در تاریخ‌های بررسی شده است. نتایج مشابهی توسط محققان دیگر نیز گزارش شد که بیان کردند رطوبت خاک در مراتع بومی در تمام دوره‌های مرطوب و خشک مطالعه شده بیشتر از کاربری‌های جنگل و زمین زراعی بود [۴۳ و ۴۴]. در مطالعه زوکو و همکاران (۲۰۱۴) به خلاف این پژوهش، بیشترین مقدار رطوبت خاک مربوط به کاربری چمن‌زار بود و این کاربری بیشترین همبستگی

نقشه حاصل از برآورد رطوبت خاک بر اساس مدل مثلثی برای تاریخ‌های مطالعه شده در حوضه آبخیز بالخلی‌جای تولید و در شکل ۴ نشان داده شده است. نتایج برآورد رطوبت خاک (شکل ۴) بیان می‌کند که به طور کلی در هر سه تاریخ تیر، مرداد و شهریور ۱۳۹۷ مناطق شمال و جنوب غربی منطقه مطالعه شده بیشترین مقادیر رطوبت را داشتند. کاربری غالب زمین در این مناطق مرتع و از نظر توپوگرافی جزء مناطق پرشیب حوضه هستند. دمای هوا در این بخش از حوضه سردتر از بقیه مناطق، میزان بارندگی در این بخش‌ها بیشتر، تبخیر از سطح خاک کمتر و در نتیجه، رطوبت خاک بیشتر است. همچنین، در مراتع که تحت تأثیر چرا قرار دارند، کربن آلی بیشتر است. آلی به دلیل خاصیت اسفنجی موجب افزایش جذب و نگهداری آب در خاک می‌شود [۴۱]، بنابراین ظرفیت نگهداری آب خاک در مراتع بیشتر از سایر کاربری‌های

قسمت‌های مسطح مرکزی منطقه مطالعه شده کمتر از ارتفاعات بالاتر بود، زیرا عدم بارندگی در فصل خشک سبب همگن‌سازی رطوبت در این منطقه شده است. نتایج مشابهی توسط محققان دیگر نیز گزارش شده است [۴۵].

را با میانگین رطوبت منطقه مطالعه شده داشت، اما تغییرات زمانی رطوبت در پژوهش آنها تقریباً ثابت بود. این محققان تغییرات کاربری زمین را عامل اصلی تغییرات مکانی رطوبت خاک دانستند [۱۳]. تغییرات رطوبت در



شکل ۴. نقشه رطوبت منطقه به دست آمده با روش مثلث برای منطقه مطالعه شده در تاریخ‌های مختلف

حوضه دیده شدند. نقشه روشنایی سطح منطقه نشان‌دهنده تنوع خصوصیت روشنایی سطح در منطقه است، به طوری که مقدار آن از ۰/۰۸ تا ۲/۰۷ متغیر بود. کمترین مقدار روشنایی سطح در مناطق نزدیک به خروجی حوضه با پوشش گیاهی نسبتاً زیاد و بیشترین مقدار آن، مربوط به بخش‌های شمال با پوشش برف و خاک لخت و نیز بخش‌های جنوب غرب حوضه است. بر اساس نقشه LST، بیشترین دمای سطح زمین در منطقه مطالعه شده ۵/۸ مربوط به مناطق شمالی مرتفع و کمترین مقدار آن، ۵۶/۳ درجه سانتی‌گراد مربوط به مناطق مرکزی منطقه مطالعه شده متغیر بود. زاویه محلی فرود خورشید نیز از ۵/۶ تا ۶۴/۱ در سطح منطقه متغیر است. با توجه به نقشه DEM منطقه، مرتفع‌ترین بخش‌های منطقه در قسمت شمال آن واقع شده است و بیشترین ارتفاع در این بخش، ۴۳۶۵ متر است. از قسمت‌های شمال به سمت مرکز آن، رفته‌رفته از ارتفاع کاسته می‌شود و در خروجی حوضه که در شرق آن قرار دارد، به ۱۵۵۰ متر می‌رسد. همچنین، دورترین قسمت جنوب غربی حوضه نیز تا

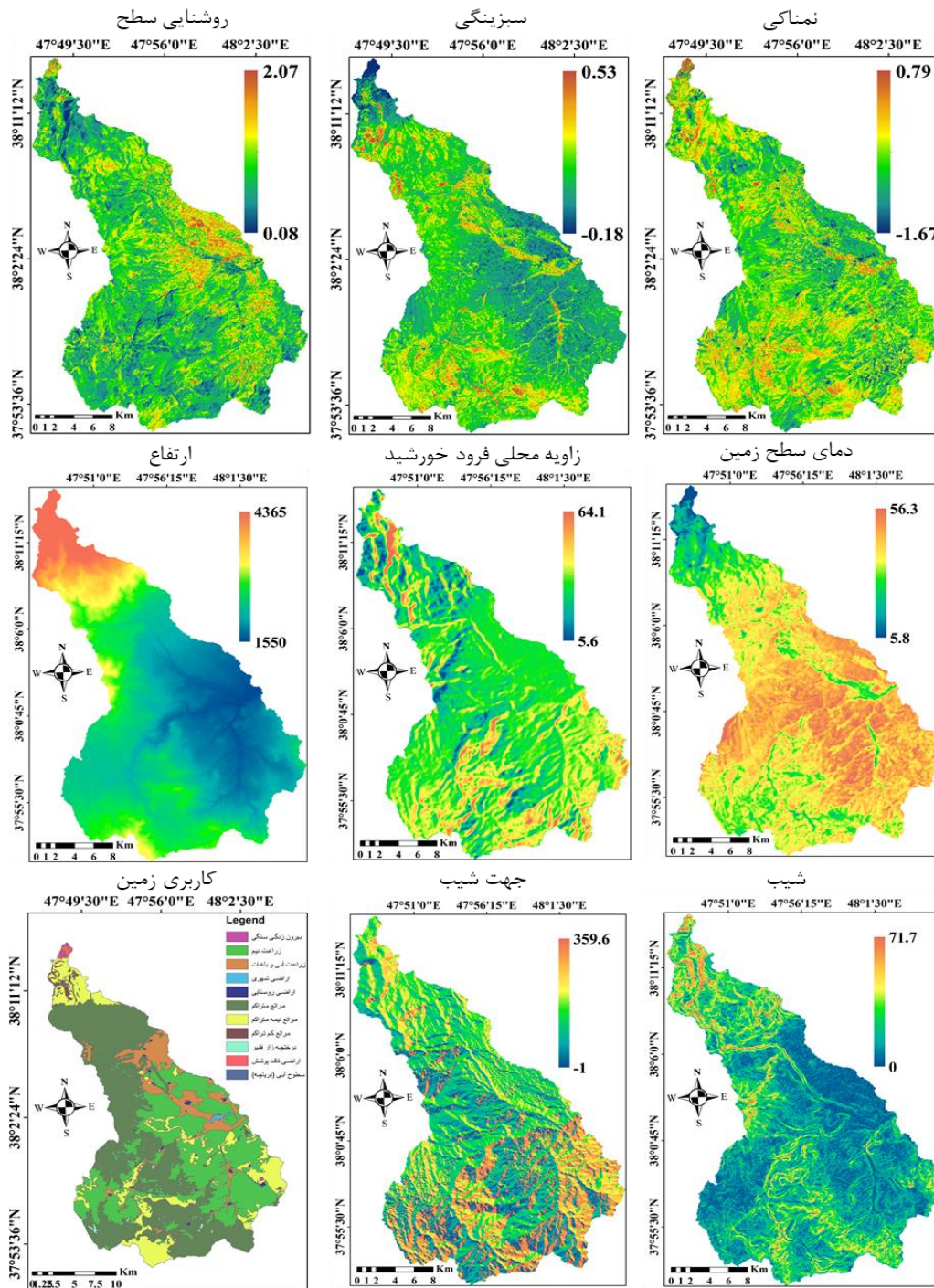
خصوصیات بیوفیزیکی و توپوگرافی منطقه

نقشه‌های خصوصیات بیوفیزیکی و توپوگرافی سطح و نقشه کاربری اراضی منطقه مطالعه شده به طور نمونه برای تاریخ ۱۲ شهریور ۱۳۹۷ در شکل ۵ نشان داده شده است. این نقشه‌ها بیانگر تغییرات خصوصیات مختلف در سطح منطقه مطالعه شده هستند که این ناهمگنی‌ها به نوبه خود بر ناهمگنی و تغییرات مکانی رطوبت خاک مؤثرند. محمودآبادی و همکاران (۲۰۱۷) نیز از رابطه بین خصوصیات بیوفیزیکی و توپوگرافی سطح در برآورد خصوصیات خاک بهره بردند [۴۶]. به طور مثال، مقدار شاخص نمناکی در مناطق مرتفع و در مسیر رودخانه بیشترین مقدار را داشت. مقدار این متغیر بین ۱/۶۷- و ۰/۷۹ در سطح منطقه مطالعه شده متغیر بود. مقدار شاخص سبزیگی در منطقه مطالعه شده بین ۰/۱۸- و ۰/۵۳ متغیر بود. بیشترین مقدار شاخص سبزیگی به طور پراکنده در نیمه بالای حوضه و جنوب غرب و کمترین مقدار آن، در بخش‌های شمالی که مربوط به ارتفاعات و زمین‌های لخت و سنگی است و همچنین، جنوب شرق

فتح‌العلومی و همکاران: مدل‌سازی تأثیر خصوصیات بیوفیزیکی و توپوگرافی سطح بر توزیع مکانی رطوبت خاک در ... ۵۷۳

می‌شود. بیشترین پوشش زمین در بخش‌های کم‌ارتفاع که زمین‌های سهل‌الوصول و خاک مناسب برای کشاورزان دارند، زراعی است و در بخش‌های حاشیه‌ای و مرتفع حوضه که اغلب مرتفع و فاقد دسترسی آسان هستند، مرتع است.

حدودی مرتفع است. متغیر بودن ارتفاع منجر به تنوع شیب در منطقه شده است. شیب‌های تند ۷۱/۷ درجه‌ای در بخش‌های شمالی و جنوبی منطقه مطالعه شده پراکنده شده‌اند. مقدار کمی جهت شیب از ۳۵۹/۶ تا ۱- متغیر است و بیشترین تنوع آن در نیمه پایینی حوضه مشاهده



شکل ۵. نقشه‌های خصوصیات بیوفیزیکی و توپوگرافی سطح و نقشه پوشش زمین برای منطقه مطالعه شده در تاریخ ۱۲ شهریور ۱۳۹۷

مقادیر انحراف معیار متغیرهای موجود در جدول ۴، بیشترین تغییرات در منطقه مطالعه شده به ترتیب مربوط به ارتفاع، جهت شیب، زاویه محلی فرود خورشید، شیب و سپس LST است. در واقع، تغییرات خصوصیات توپوگرافی در منطقه بیشتر از خصوصیات بیوفیزیکی است. فتح‌العلومی و همکاران (۲۰۲۰) نیز نتایج مشابهی را ارائه کردند [۱۸].

تأثیر خصوصیات بیوفیزیکی و توپوگرافی بر توزیع مکانی رطوبت

ناهمگنی خصوصیات بیوفیزیکی و توپوگرافی سطح می‌تواند منجر به تغییرپذیری مکانی رطوبت در حوضه آبخیز شود [۴ و ۷]. ضریب همبستگی بین هر یک از خصوصیات بیوفیزیکی و توپوگرافی سطح و رطوبت بررسی و نتایج در جدول ۵ ارائه شده است.

بررسی بصری نقشه‌های خصوصیات سطح نشان می‌دهد که به‌طور کلی خصوصیات بیوفیزیکی، شرایط توپوگرافی و نیز کاربری زمین (پوشش زمین) در سطح حوضه آبخیز مطالعه شده ناهمگن بود. مقادیر کمترین، بیشترین، میانگین و انحراف معیار خصوصیات بیوفیزیکی و توپوگرافی سطح منطقه مطالعه شده برای هر سه مورد مطالعه محاسبه شده و در جدول ۴ نشان داده شده است. مقادیر میانگین و انحراف معیار خصوصیات بیوفیزیکی و توپوگرافی نشان داده شده در جدول ۴ بیانگر تغییرات مکانی خصوصیات سطح منطقه مطالعه شده است. به‌طور مثال، میانگین دمای سطح منطقه مطالعه شده در تیر، مرداد و شهریور ماه به ترتیب ۴۲/۷۷، ۳۶/۴۵ و ۳۳/۶۳ درجه سانتی‌گراد است که تغییرات اقلیمی، فصلی و تأثیر خصوصیات بیوفیزیکی سطح را نشان می‌دهد. با توجه به

جدول ۴. برخی متغیرهای آماری خصوصیات بیوفیزیکی، توپوگرافی و زاویه محلی تابش خورشید در منطقه مطالعاتی در تاریخ‌های مختلف

ماه	متغیر	نمناکی	سبزی‌نگی	روشنایی سطح	دمای سطح زمین	زاویه محلی فرود خورشید	ارتفاع	شیب	جهت شیب
تیر		-۱/۶۷	-۰/۱۱	۰/۰۸	۵/۸	۵/۶			
مرداد	کمترین	-۰/۴۳	-۰/۱۳	۰/۰۹	۶/۸	۷/۹	۱۵۵۰	۰	-۱
شهریور		-۰/۶۱	-۰/۱۳	۰/۱۲	۵/۴	۸/۴			
تیر		۰/۵۹	۰/۵۳	۲/۰۷	۵۶/۳	۶۴/۱			
مرداد	بیشترین	۰/۱۵	۰/۳۳	۱/۲۴	۵۲/۴	۶۸/۲	۴۳۶۵	۷۱/۷	۳۵۹/۶
شهریور		۰/۱۴	۰/۳۲	۱/۰۰	۵۰/۲	۷۹/۱			
تیر		-۰/۵۳	۰/۱۳	۰/۷۳	۴۲/۷۷	۳۰/۳۷			
مرداد	میانگین	-۰/۱۲	۰/۰۷	۰/۴۷	۳۶/۴۵	۳۳/۶۰	۲۱۰۴/۳۹	۹/۳۹	۱۵۶/۸
شهریور		-۰/۱۲	۰/۰۹	۰/۴۹	۳۳/۶۳	۳۷/۱۹			
تیر	انحراف	۰/۱۲	۰/۰۶	۰/۱۰	۴/۸	۷/۸۱			
مرداد		۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۷	۳/۳۳	۷/۸۴	۴۵۸/۷۹	۷/۳۷	۹۶/۹
شهریور	معیار	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۷	۳/۲۳	۷/۸۸			

جدول ۵. ضریب همبستگی بین هر یک از خصوصیات بیوفیزیکی و توپوگرافی سطح و رطوبت در تاریخ‌های مختلف

ماه	نمناکی	سبزی‌نگی	روشنایی سطح	دمای سطح زمین	زاویه محلی فرود خورشید	ارتفاع	شیب	جهت شیب
تیر	۰/۵۱	۰/۵۰	۰/۴۲	-۰/۷۱	۰/۱۳	۰/۶۱	۰/۳۸	۰/۰۴
R مرداد	۰/۵۰	۰/۴۷	۰/۴۰	-۰/۶۷	۰/۱۵	۰/۶۵	۰/۴۳	۰/۰۸
شهریور	۰/۴۸	۰/۴۸	۰/۳۹	-۰/۶۴	۰/۱۸	۰/۶۷	۰/۴۵	۰/۱۱
میانگین	۰/۴۹	۰/۴۸	۰/۴۰	-۰/۶۷	۰/۱۵	۰/۶۴	۰/۴۲	۰/۰۷

[۵۳]. همچنین، نمناکی نیز به دلیل ارتباط آن با تنش آبی سطح، از عوامل مؤثر بر رطوبت خاک هستند که تأثیر آن کمتر از دمای سطح ولی به‌نوبه خود درخور توجه است. در مطالعه اسوار و همکاران (۲۰۱۶) تأثیر شاخص نمناکی بر رطوبت خاک کمتر از LST بوده، اما از نظر آماری معنادار بود [۵۴].

خصوصیات بیوفیزیکی و توپوگرافی مطالعه‌شده در این پژوهش کلاس‌بندی شدند و میانگین رطوبت در هر یک از کلاس‌های یادشده تعیین شد. همچنین، میانگین رطوبت در هر کاربری نیز به‌طور جداگانه تعیین شد (شکل ۶). نتایج شکل ۶ نشان می‌دهد که مقدار میانگین رطوبت در طبقات مختلف خصوصیات سطح متفاوت است. بیشترین مقدار رطوبت در کلاس‌های مختلف خصوصیات بیوفیزیکی سطح شامل نمناکی، سبزیگی مربوط به بیشترین مقدار این شاخص‌ها یعنی کلاس نهایی (کلاس ۰-۰۰ نمناکی و ۰/۴۵-۰/۵ سبزیگی) بود، چراکه هر دو خصوصیت رابطه مستقیم با رطوبت خاک دارند. با افزایش میزان شاخص نمناکی و سبزیگی، میزان رطوبت خاک سطحی افزایش می‌یابد. به‌طور کلی، پوشش گیاهی از راه‌های مختلف کمک به حفظ و افزایش رطوبت خاک می‌کند. پوشش گیاهی به‌عنوان مانعی در برابر نور خورشید و در نتیجه، افزایش دمای سطح عمل می‌کند و با کاهش میزان تبخیر از سطح سبب افزایش و حفظ رطوبت می‌شود [۵۵ و ۵۶]. همچنین، ریشه گیاهان سبب تقویت ساختمان خاک می‌شود و چنین خاکی توانایی بیشتری در جذب و نگهداری آب دارد [۵۷]. بیشترین میانگین رطوبت در کمترین میزان روشنایی سطح (۰/۴۵ تا ۰/۵۵) دیده شد. میزان روشنایی کم دارای آلبیدو و دمای سطح کمتر و در نتیجه، رطوبت بیشتر همراه بود. مناطقی که روشنایی زیادی دارند، مربوط به خاک‌های لخت بودند. با این‌حال، سطح بالای روشنایی در منطقه مطالعه‌شده مربوط به پوشش برف است و همین موضوع سبب شد که در مقادیر بیشتر از متوسط روشنایی سطح مقدار رطوبت به‌دلیل وجود برف دوباره افزایش نشان دهد. به همین دلیل، میانگین رطوبت برای کلاس‌های مختلف روشنایی سطح ابتدا روند نزولی و سپس، یک روند صعودی را نشان داد. در مورد ارتفاع نیز رابطه مستقیم بین مقدار رطوبت و این متغیر وجود دارد و در طبقات ارتفاعی بالاتر به‌دلیل افت

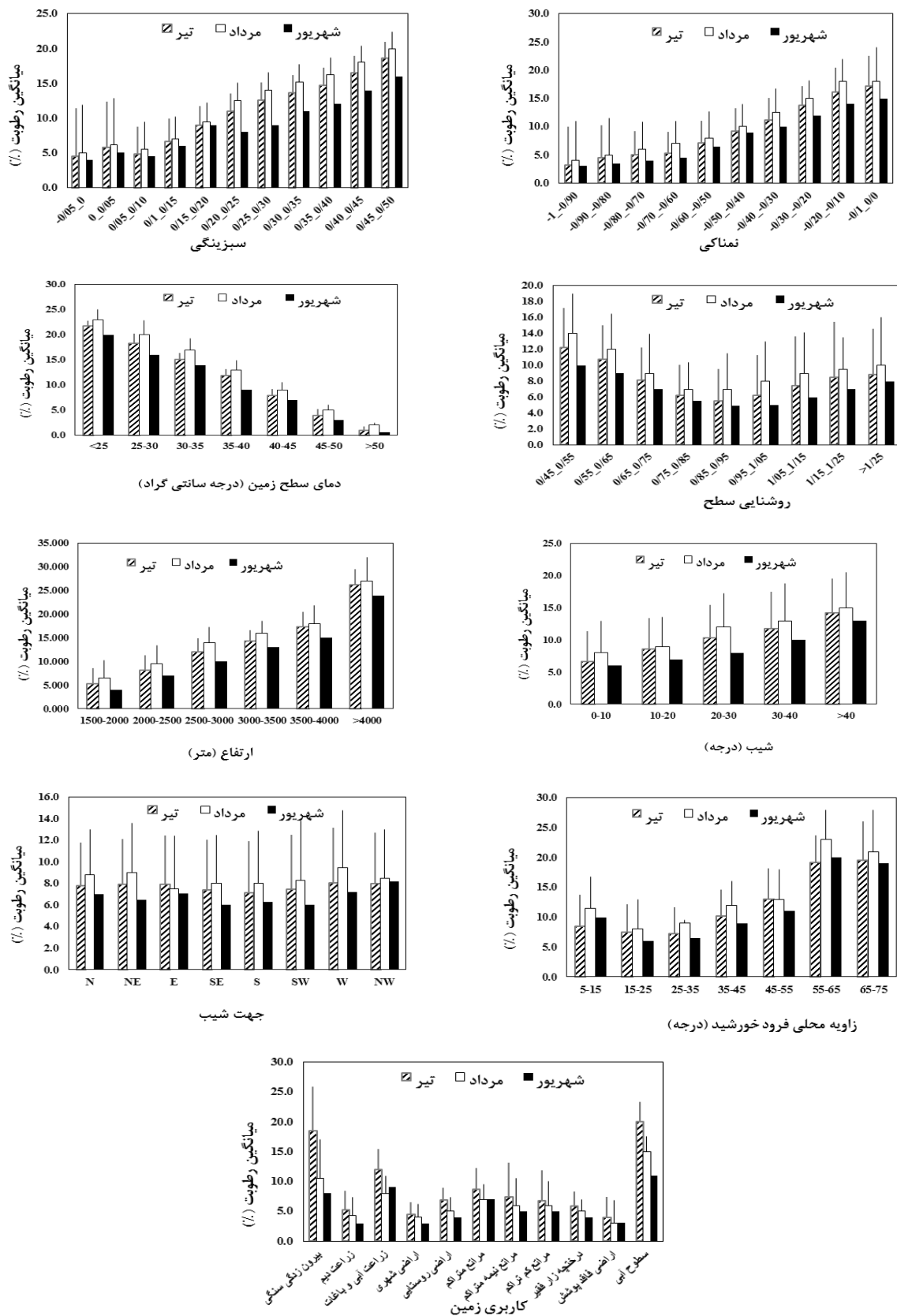
با توجه به جدول ۵، LST با میانگین ضریب همبستگی برابر با ۰/۶۷- و جهت شیب با ضریب همبستگی برابر با ۰/۰۷ به‌ترتیب بیشترین و کمترین تأثیر را بر توزیع مکانی رطوبت خاک در تاریخ‌های مطالعه‌شده داشتند. LST با تأثیر بر میزان تبخیر آب از سطح خاک، سبب کاهش میزان رطوبت می‌شود و در نتیجه، در مناطقی که دمای سطح زیاد است، مقدار رطوبت خاک کمتر است [۴۷ و ۴۸]. بابائیان و همکاران نیز نشان دادند که با افزایش LST، رطوبت خاک کاهش می‌یابد [۴۹]. در مناطق مرکزی، میزان LST زیاد و رطوبت کم است و در مناطق شمال و جنوب غرب حوضه آبخیز این مقادیر برعکس است (شکل‌های ۴ و ۵). تعدادی از تحقیقات گذشته ثابت کردند که بین رطوبت خاک و LST رابطه قوی وجود دارد [۴۷-۴۹]. در واقع، سطوح مختلف رطوبت خاک سبب ایجاد اختلاف در خصوصیات طیفی خاک می‌شود و بازتاب خاک با افزایش رطوبت در باند مادون قرمز نزدیک موج مرئی کاهش می‌یابد و همین موضوع سبب رابطه بین رطوبت و LST می‌شود. رطوبت خاک از طریق تأثیرگذاری بر ضریب گسیلندگی، LST را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۵۰]. ژائو و همکاران (۲۰۱۹) بیان کردند که بین پوشش گیاهی و رطوبت سطح یک ارتباط مستقیم وجود دارد [۲۷]. در مناطق با پوشش گیاهی بیشتر مقدار رطوبت خاک بیشتر است (شکل‌های ۴ و ۵). ارتباط بین رطوبت خاک و سبزیگی مستقیم است. مقادیر این شاخص نشان‌دهنده میزان پوشش گیاهی در سطح زمین است و هر چه پوشش گیاهی بیشتر باشد، میزان حفظ رطوبت از طریق جذب توسط ریشه و نگهداری آن توسط این پوشش بیشتر خواهد بود. همچنین، پوشش گیاهی با تأثیر بر تبخیر و تعرق و به‌عنوان مانعی در برابر نور خورشید می‌تواند سبب افزایش رطوبت سطح شود. بر همین اساس، این خصوصیت جزء متغیرهای مهم و مؤثر بر رطوبت است [۵۱]. فرانسچینی و همکاران (۲۰۱۹) نیز وجود ارتباط معناداری بین خصوصیات خاک و شاخص‌های پوشش گیاهی مثل NDVI و سبزیگی را بیان کردند [۵۲]. ارتفاع نیز، از مؤثرترین متغیرها بر رطوبت خاک در منطقه مطالعه‌شده است. با افزایش ارتفاع، مقدار رطوبت افزایش می‌یابد. به‌همین دلیل، ارتباط ارتفاع و رطوبت، مستقیم است

بیشترین میزان رطوبت را نشان دادند. زوکو و همکاران (۲۰۱۴) نیز در مطالعات خود نشان دادند که تنوع کاربری سبب افزایش تغییرات مکانی رطوبت خاک می‌شود [۱۳]. در تمام خصوصیات بررسی شده و کلاس‌های مختلف این خصوصیات میزان رطوبت در مردادماه نسبت به دو ماه دیگر بیشتر ولی روند کلی تغییرات در هر سه ماه مشابه بود. تغییرات مکانی رطوبت خاک در پژوهش الکساندریدیس و همکاران (۲۰۱۶) نیز تابع الگوی انواع پوشش زمین و ویژگی‌های اصلی ژئومورفولوژیکی حوضه بود [۶۳].

نتیجه‌گیری

رطوبت خاک متغیری کلیدی در مطالعه برهمکنش‌های زمین-اتمسفر بوده و در بسیاری از مطالعات مربوط به زمین از جمله کشاورزی، هیدرولوژی و علوم محیطی اهمیت زیادی دارد. این متغیر یکی از ویژگی‌های پویای خاک است که برآورد آن به‌خصوص در مقیاس‌های بزرگ و بدون داده‌های کافی، اهمیت زیادی دارد. این مطالعه مزیت استفاده از داده‌های سنجش از دوری و تصاویر ماهواره‌ای در برآورد رطوبت در مقیاس حوضه آبخیز را به‌خوبی نشان داد. بر اساس نتایج پژوهش حاضر، روش مثلثی که نوعی روش مبتنی بر اطلاعات سنجش از دور است، در مدل‌سازی و برآورد رطوبت قابل قبول است. رطوبت خاک حاصل تأثیر متقابل عامل‌های مختلف است. میزان تأثیرگذاری هر یک از متغیرهای محیطی و خصوصیات بیوفیزیکی سطح بر رطوبت خاک متفاوت است. مقدار میانگین و انحراف معیار رطوبت خاک در طبقات مختلف خصوصیات بیوفیزیکی و توپوگرافی سطح متغیر بود. نتایج نشان می‌دهد با افزایش مقدار LST و روشنایی سطح، مقدار رطوبت خاک کاهش یافت. با این حال، افزایش مقدار سبزیگی، نمناکی، ارتفاع و زاویه محلی فرود خورشید سبب افزایش مقدار رطوبت خاک شد. در منطقه مطالعه شده، تأثیر خصوصیات بیوفیزیکی بر توزیع مکانی رطوبت خاک بیشتر از تأثیر خصوصیات توپوگرافی بود. در مقایسه با مطالعات قبلی، مطالعه حاضر بینش مهمی در مورد تغییرپذیری مکانی رطوبت خاک در مناطق کوهستانی از منظر مشاهدات سنجش از دور ارائه می‌دهد. نتایج به‌وضوح نشان می‌دهند تأثیر خصوصیات

دما و افزایش بارش به‌صورت برف و باران، میزان رطوبت خاک نسبت به ارتفاعات پایین‌تر بیشتر بود [۵۸ و ۵۹]. رابطه رطوبت با LST معکوس بود و با افزایش LST، رطوبت کاهش یافت، چراکه با افزایش دما رطوبت تبخیر شده و از خاک خارج می‌شود [۶۰]. تندترین شیب‌ها بیشترین میزان رطوبت را داشتند، به این دلیل که شیب‌های تند معمولاً در مرتفع‌ترین بخش‌های منطقه قرار دارند و در نتیجه، چون بارش بیشتر و دمای کمتری دارند، رطوبت نیز در آنها بیشتر است. در خصوص کلاس‌های جهت شیب روند مشخصی وجود نداشت، اما در مورد زاویه محلی فرود خورشید، کلاس آخر (۶۵ تا ۷۵ درجه)، بیشترین میزان رطوبت را داشت. بر اساس تحقیق یانگ و همکاران (۲۰۱۲) دو عامل موقعیت و جهت شیب، رطوبت خاک سطحی را بیشتر از لایه‌های عمقی تحت تأثیر قرار دادند، در حالی که درجه شیب، هر دو را به‌طور معنادار تحت تأثیر قرار داد. این محققان دو عامل موقعیت و جهت شیب را از مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده تغییرات مکانی رطوبت خاک معرفی کردند [۶۱]. با افزایش زاویه محلی فرود خورشید، مقدار تابش طول موج کوتاه رسیده به سطح کاهش، دمای سطح کاهش و در نتیجه، رطوبت خاک افزایش یافت. فیروزجایی و همکاران (۲۰۱۹) در پژوهش خود نتایج مشابهی را گزارش کردند [۶۲]. به‌طور کلی، بر اساس نتایج شکل ۶، با افزایش دمای سطح زمین (کلاس ۲۵ < نسبت به کلاس ۵۰ >) مقدار میانگین رطوبت خاک ۲۰ درصد کاهش یافت. با افزایش مقدار سبزیگی (کلاس ۰/۰۵ - تا ۰/۰۰ نسبت به ۰/۵۰ تا ۰/۴۵)، نمناکی (کلاس ۰/۹۰ - تا ۰/۰۰) نسبت به کلاس ۰/۱۰ - تا ۰/۰۰) ارتفاع کلاس (۱۵۰۰ - تا ۲۰۰۰) نسبت به ۴۰۰۰ > متر و زاویه محلی فرود خورشید کلاس (۳ - ۱۵) نسبت به (۶۵ - ۷۵) درجه مقدار میانگین رطوبت خاک به ترتیب ۱۴، ۱۳، ۲۱ و ۱۰ درصد افزایش یافت. میانگین رطوبت برای کلاس اراضی شهری و همچنین اراضی بدون پوشش نسبت به دیگر کاربری‌ها کمتر بود که نشان‌دهنده آثار منفی فعالیت‌های انسانی روی خاک و در نتیجه، کاهش توانایی خاک در جذب و نگهداری رطوبت خاک بود. ولی بیرون‌زدگی‌های سنگی به دلیل اینکه غالباً در بخش‌های مرتفع حوضه قرار دارند و این مناطق در بیشتر اوقات سال پوشیده از برف است،



شکل ۶. میانگین و انحراف معیار رطوبت در کلاس‌های مختلف خصوصیات بیوفیزیکی و توپوگرافی سطح و پوشش زمین در منطقه مطالعه‌شده

- climate: A review. *Earth-Science Reviews*. 2010;99(3-4):125-61.
- [8]. Western AW, Zhou S-L, Grayson RB, McMahon TA, Blöschl G, Wilson DJJoH. Spatial correlation of soil moisture in small catchments and its relationship to dominant spatial hydrological processes. 2004;286(1-4):113-34.
- [9]. Vereecken H, Huisman J, Bogaen H, Vanderborght J, Vrugt J, Hopmans JW. On the value of soil moisture measurements in vadose zone hydrology: A review. *Water resources research*. 2008;44(4).
- [10]. Srivastava HS, Patel P, Sharma Y, Navalgund RR. Large-area soil moisture estimation using multi-incidence-angle RADARSAT-1 SAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2009;47(8):2528-35 .
- [11]. Silva BM, Silva SHG, Oliveira GCd, Peters PHCR, Santos WJRd, Curi N. Soil moisture assessed by digital mapping techniques and its field validation. *Ciência e Agrotecnologia*. 2014;38(2):140-8.
- [12]. Niu C, Musa A, Liu Y. Analysis of soil moisture condition under different land uses in the arid region of Horqin sandy land, northern China. *Solid Earth*. 2015;6(4):1157-67.
- [13]. Zucco G, Brocca L, Moramarco T, Morbidelli R. Influence of land use on soil moisture spatial-temporal variability and monitoring. *Journal of hydrology*. 2014;516:193-9.
- [14]. Saxton KE, Rawls WJ. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil science society of America Journal*. 2006;70(5):1569-78.
- [15]. Sugathan N, Biju V, Renuka G. Influence of soil moisture content on surface albedo and soil thermal parameters at a tropical station. *Journal of earth system science*. 2014;123(5):1115-28.
- [16]. Gao H, Zhang W, Chen H. An Improved Algorithm for Discriminating Soil Freezing and Thawing Using AMSR-E and AMSR2 Soil Moisture Products. *Remote Sensing*. 2018;10(11):1697.
- [17]. Zwieback S, Colliander A, Cosh MH, Martínez-Fernández J, McNairn H, Starks PJ, et al. Estimating time-dependent vegetation biases in the SMAP soil moisture product. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2018;22(8):4473-89.

بیوفیزیکی و توپوگرافی بر توزیع مکانی رطوبت خاک بسیار مهم، اما کاملاً پیچیده است. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده در صورت وجود تصاویر لندست بدون پوشش در سال‌های آینده، تأثیر خصوصیات بیوفیزیکی و توپوگرافی سطح بر توزیع مکانی رطوبت خاک در فصل‌های دیگر برای این حوضه آبخیز بررسی شود. همچنین، بررسی هدف پژوهش حاضر در دیگر حوضه‌های آبخیز ایران در مطالعات آینده می‌تواند از نظر پژوهشی و کاربردی اهمیت زیادی داشته باشد.

منابع

- [1]. Tóth B, Szatmári G, Takács K, Laborci A, Makó A, Rajkai K, et al. Mapping soil hydraulic properties using random forest based pedotransfer functions and geostatistics. *HYDROLOGY AND EARTH SYSTEM SCIENCES*. 2019;23(6):2615-35 .
- [2]. McNeill S, Lilburne L, Carrick S, Webb T, Cuthill T. Pedotransfer functions for the soil water characteristics of New Zealand soils using S-map information. *Geoderma*. 2018;326:96-110.
- [3]. Rao K, Chandra G, RAO PN. The relationship between brightness temperature and soil moisture Selection of frequency range for microwave remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*. 1987;8(10):1531-45.
- [4]. Qiu Y, Fu B, Wang J, Chen L. Spatial variability of soil moisture content and its relation to environmental indices in a semi-arid gully catchment of the Loess Plateau, China. *Journal of Arid Environments*. 2001;49(4):723-50.
- [5]. Vivoni ER, Rodríguez JC, Watts CJ. On the spatiotemporal variability of soil moisture and evapotranspiration in a mountainous basin within the North American monsoon region. *Water Resources Research*. 2010;46(2).
- [6]. Firozjaei MK, Kiavarz M, Nematollahi O, Karimpour Reihan M, Alavipanah SK. An evaluation of energy balance parameters, and the relations between topographical and biophysical characteristics using the mountainous surface energy balance algorithm for land (sebal). *International Journal of Remote Sensing*. 2019:1-31 .
- [7]. Seneviratne SI, Corti T, Davin EL, Hirschi M, Jaeger EB, Lehner I, et al. Investigating soil moisture-climate interactions in a changing

- [18]. Fatholouloumi S, Vaezi AR, Alavipanah SK, Ghorbani A, Biswas A. Comparison of spectral and spatial-based approaches for mapping the local variation of soil moisture in a semi-arid mountainous area. *Science of The Total Environment*. 2020;138319.
- [19]. Barsi JA, Schott JR, Hook SJ, Raqueno NG, Markham BL, Radocinski RG. Landsat-8 thermal infrared sensor (TIRS) vicarious radiometric calibration. *Remote Sensing*. 2014;6(11):11607-26.
- [20]. Elkhrachy I. Vertical accuracy assessment for SRTM and ASTER Digital Elevation Models: A case study of Najran city, Saudi Arabia. *Ain Shams Engineering Journal*. 2017.
- [21]. Mukherjee S, Joshi PK, Mukherjee S, Ghosh A, Garg R, Mukhopadhyay A. Evaluation of vertical accuracy of open source Digital Elevation Model (DEM). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2013;21:205-17.
- [22]. Cooley T, Anderson G, Felde G, Hoke M, Ratkowski A, Chetwynd J, et al., editors. FLAASH, a MODTRAN4-based atmospheric correction algorithm, its application and validation. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2002 IGARSS'02 2002 IEEE International*; 2002: IEEE.
- [23]. Zhang D, Zhou G. Estimation of soil moisture from optical and thermal remote sensing: A review. *Sensors*. 2016;16(8):1308.
- [24]. Jung C, Lee Y, Cho Y, Kim S. A study of spatial soil moisture estimation using a multiple linear regression model and MODIS Land surface temperature data corrected by conditional merging. *Remote Sensing*. 2017;9(8):870.
- [25]. Xu C, Qu J, Hao X, Cosh M, Prueger J, Zhu Z, et al. Downscaling of surface soil moisture retrieval by combining MODIS/Landsat and in situ measurements. *Remote Sensing*. 2018;10(2):210.
- [26]. Srivastava PK. Satellite soil moisture: Review of theory and applications in water resources. *Water Resources Management*. 2017;31(10):3161-76.
- [27]. Zhao W, Duan S-B, Li A, Yin G. A practical method for reducing terrain effect on land surface temperature using random forest regression. *Remote sensing of environment*. 2019;221:635-49.
- [28]. Mekonnen D. Satellite remote sensing for soil moisture estimation: Gumara catchment. *Ethiopia Satellite remote sensing for soil moisture estimation: Gumara catchment, Ethiopia*. 2009.
- [29]. Rahmati M, Oskouei MM, Neyshabouri MR, Walker J, Fakherifard A, Ahmadi A, et al. Soil moisture derivation using triangle method in the lighvan watershed, north western Iran. *Journal of soil science and plant nutrition*. 2015;15(1):167-78.
- [30]. Sobrino JA, Jimenez-Munoz JC, Paolini L. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of environment*. 2004;90(4):434-40.
- [31]. Yu X, Guo X, Wu Z. Land surface temperature retrieval from Landsat 8 TIRS—Comparison between radiative transfer equation-based method, split window algorithm and single channel method. *Remote Sensing*. 2014;6(10):9829-52.
- [32]. Jiménez-Muñoz JC, Sobrino JA. A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2003;108(D22).
- [33]. Jiménez-Muñoz JC, Sobrino JA, Skoković D, Mattar C, Cristóbal J. Land surface temperature retrieval methods from Landsat-8 thermal infrared sensor data. *IEEE Geoscience and remote sensing letters*. 2014;11(10):1840-3.
- [34]. Liu Q, Liu G, Huang C, Liu S, Zhao J, editors. A tasseled cap transformation for Landsat 8 OLI TOA reflectance images. *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2014 IEEE International*; 2014: IEEE.
- [35]. Liu Q, Liu G, Huang C, Xie C. Comparison of tasseled cap transformations based on the selective bands of Landsat 8 OLI TOA reflectance images. *International Journal of Remote Sensing*. 2015;36(2):417-41.
- [36]. Huang C, Wylie B, Yang L, Homer C, Zylstra G. Derivation of a tasseled cap transformation based on Landsat 7 at-satellite reflectance. *Int J Remote Sens*. 2002;23(8):1741-8.
- [37]. Holtgrave A-K, Förster M, Greifeneder F, Notarnicola C, Kleinschmit B. Estimation of Soil Moisture in Vegetation-Covered Floodplains with Sentinel-1 SAR Data Using Support Vector Regression. *PFG–Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*. 2018;86(2):85-101.
- [38]. Weng B, Bi W, Zhao Z, Xu T, Yan D.

- Spatial and temporal variability of soil moisture based on multifractal analysis. *Arabian Journal of Geosciences*. 2018;11(16):469.
- [39]. Firozjahi MK, Kiavarz M, Alavipanah SK, Lakes T, Qureshi S. Monitoring and forecasting heat island intensity through multi-temporal image analysis and cellular automata-Markov chain modelling: A case of Babol city, Iran. *Ecological Indicators*. 2018;91:155-70.
- [40]. Yu Q, Acheampong M, Pu R, Landry SM, Ji W, Dahigamuwa T. Assessing effects of urban vegetation height on land surface temperature in the city of Tampa, Florida, USA. *International journal of applied earth observation and geoinformation*. 2018;73:712-20.
- [41]. Adugna G. A review on impact of compost on soil properties, water use and crop productivity. *Academic Research Journal of Agricultural Science and Research*. 2016;4(3):93-104 .
- [42]. Eghdami H, Azhdari G, Lebaillly P, Azadi H. Impact of land use changes on soil and vegetation characteristics in Fereydan, Iran. *Agriculture*. 2019;9(3):58 .
- [43]. Toohey RC, Boll J, Brooks ES, Jones JR. Effects of land use on soil properties and hydrological processes at the point, plot, and catchment scale in volcanic soils near Turrialba, Costa Rica. *Geoderma*. 2018;315:138-48 .
- [44]. Yu B, Liu G, Liu Q, Wang X, Feng J, Huang C. Soil moisture variations at different topographic domains and land use types in the semi-arid Loess Plateau, China. *Catena*. 2018;165:125-32.
- [45]. Katra I, Blumberg D, Lavee H, Sarah P. Topsoil moisture patterns on arid hillsides—micro-scale mapping by thermal infrared images. *Journal of Hydrology*. 2007;334(3-4):359-67.
- [46]. Mahmoudabadi E, Karimi A, Haghnia GH, Sepehr A. Digital soil mapping using remote sensing indices, terrain attributes, and vegetation features in the rangelands of northeastern Iran. *Environmental monitoring and assessment*. 2017;189(10):500.
- [47]. Dai A, Trenberth KE, Qian T. A global dataset of Palmer Drought Severity Index for 1870–2002: Relationship with soil moisture and effects of surface warming. *Journal of Hydrometeorology*. 2004;5(6):1117-1130.
- [48]. Zhang R, Kim S, Sharma A. A comprehensive validation of the SMAP Enhanced Level-3 Soil Moisture product using ground measurements over varied climates and landscapes. *Remote sensing of environment*. 2019;223:82-94 .
- [49]. Babaeian E, Sadeghi M, Franz TE, Jones S, Tuller M. Mapping soil moisture with the OPTical TRapezoid Model (OPTRAM) based on long-term MODIS observations. *Remote Sens Environ*. 2018;211:425-40.
- [50]. El Harti A, Lhissou R, Chokmani K, Ouzemou J-e, Hassouna M, Bachaoui EM, et al. Spatiotemporal monitoring of soil salinization in irrigated Tadla Plain (Morocco) using satellite spectral indices. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2016;50:64-73.
- [51]. Kurc S, Benton L. Digital image-derived greenness links deep soil moisture to carbon uptake in a creosotebush-dominated shrubland. *Journal of Arid Environments*. 2010;74(5):585-94.
- [52]. Franceschini MHD, Demattê JA, da Silva Terra F, Vicente L, Bartholomeus H, de Souza Filho CR. Prediction of soil properties using imaging spectroscopy: Considering fractional vegetation cover to improve accuracy. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2015;38:358-70.
- [53]. Martínez-Murillo J, Hueso-González P, Ruiz-Sinoga J. Topsoil moisture mapping using geostatistical techniques under different Mediterranean climatic conditions. *Science of The Total Environment*. 2017;595:400-12.
- [54]. Eswar R, Sekhar M, Bhattacharya B. Disaggregation of LST over India: comparative analysis of different vegetation indices. *International Journal of Remote Sensing*. 2016;37(5):1035-54.
- [55]. Levine E, Knox R, Lawrence W. Relationships between soil properties and vegetation at the Northern Experimental Forest, Howland, Maine. *Remote Sensing of Environment*. 1994;47(2):231-241.
- [56]. Zhou D, Zhang L, Li D, Huang D, Zhu C. Climate–vegetation control on the diurnal and seasonal variations of surface urban heat islands in China. *Environmental Research Letters*. 2016;11(7):074009 .
- [57]. Zhao D, Xu M, Liu G, Ma L, Zhang S, Xiao T, et al. Effect of vegetation type on microstructure of soil aggregates on the Loess Plateau, China. *Agriculture, ecosystems & environment*. 2017;242:1-8.
- [58]. Kattel D, Yao T, Yang K, Tian L, Yang G,

- Joswiak D. Temperature lapse rate in complex mountain terrain on the southern slope of the central Himalayas. *Theoretical and applied climatology*. 2013;113(3-4):671-82.
- [59]. Firozjaei M, Fathololuomi S, Alavipanah S, Kiavarz M, Vaezi A, Biswas A, et al. Modeling the Impact of Surface Characteristics on the Near Surface Temperature Lapse Rate. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2019;42:395-9.
- [60]. Jiang Y, Weng Q. Estimation of hourly and daily evapotranspiration and soil moisture using downscaled LST over various urban surfaces. *GIScience & Remote Sensing*. 2017;54(1):95-117.
- [61]. Yang L, Wei W, Chen L, Jia F, Mo B. Spatial variations of shallow and deep soil moisture in the semi-arid Loess Plateau, China. *Hydrology & Earth System Sciences*. 2012;16(9).
- [62]. Firozjaei MK, Kiavarz M, Nematollahi O, Karimpour Reihan M, Alavipanah SK. An evaluation of energy balance parameters, and the relations between topographical and biophysical characteristics using the mountainous surface energy balance algorithm for land (SEBAL). *International Journal of Remote Sensing*. 2019;40(13):5230-60.
- [63]. Alexandridis TK, Cherif I, Bilas G, Almeida WG, Hartanto IM, Van Andel SJ, et al. Spatial and temporal distribution of soil moisture at the catchment scale using remotely-sensed energy fluxes. *Water*. 2016;8(1):32.