

بررسی تغییرات فصلی رطوبت خاک در استان اصفهان با کمک شاخص ماهواره‌ای مودیس

فاطمه هادیان، رضا جعفری*، حسین بشری و مصطفی ترکش^۱

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۷/۱۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۹/۲۸)

چکیده

در مناطق خشک و نیمه‌خشک رطوبت خاک یکی از مهم‌ترین فاکتورهای تأثیرگذار بر تولید اکوسیستم‌ها محسوب می‌شود. هدف از مطالعه حاضر بررسی تغییرات فصلی رطوبت خاک و پوشش گیاهی در استان اصفهان است. بدین‌منظور داده‌های دمای سطح زمین (LST) و شاخص گیاهی NDVI مودیس برای محاسبه TVDI به کار گرفته شد و میزان رطوبت خاک در فصل رویش در چند عمق خاک (شامل ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰ سانتی‌متر) اندازه‌گیری شد. تغییرات فصلی LST و NDVI در اقلیم‌های مختلف نیز بررسی شد. نتایج نشان داد تغییرات NDVI و LST در این منطقه بسته به نوع اقلیم و خاک، دارای الگوی متفاوتی بوده است و میزان تاج پوشش گیاهی بر LST و نوسان آن تأثیر زیادی می‌گذارد. تغییرات NDVI در فنولوژی گیاهان در مناطق مرطوب در مقایسه با نیمه‌خشک و خشک بیشتر بود. پایش رطوبت خاک حاکی از آن بود که بسته به شرایط فصلی، همبستگی رطوبت اعماق خاک متفاوت بوده است، از این‌رو در اوایل فصل رطوبت سطح خاک (۵-۰ سانتی‌متر) اما در اواسط فصل به دلیل شکل ساختمان و عمق ریشه در بوته‌زارها، رطوبت خاک عمیق‌تر (۳۰-۱۰ سانتی‌متر) بیشترین همبستگی را با TVDI داشتند. بنابراین، یافته‌های این پژوهش اهمیت فصل رویش، شرایط خاک و درصد تاج پوشش و نوع گیاهان را در بررسی مطالعات رطوبت خاک توسط داده‌های ماهواره‌ای بیان می‌دارد.

واژه‌های کلیدی: رطوبت خاک، مقیاس فصلی، LST، NDVI، مودیس، TVDI

۱. گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: reza.jafari@cc.iut.ac.ir

مقدمه

رطوبت زمین یکی از مهم‌ترین متغیرهای زیست‌محیطی است که ارتباط تنگاتنگی با فاکتورهای مهمی مانند اقلیم‌شناسی، اکولوژی و هیدرولوژی دارد. این عامل بر اقلیم گیاهان خاکی تأثیر گذاشته که این امر خود نیز نقش زیادی در تعادل چرخه‌های هیدرولوژی و اقلیم‌شناسی می‌گذارد (۲).

تغییر در مقدار رطوبت زمین باعث تغییر در تولیدکنندگی گیاهان، چرخه انرژی و رواناب سطحی می‌شود. تغییرات اقلیمی نیز تأثیر زیادی بر چرخه آب و میزان آب قابل دسترس توسط گیاهان نشان داده است و میزان انرژی خورشیدی را در گیاهان به کربن تثبیت‌شده تبدیل می‌کند. بنابراین می‌توان گفت که رطوبت خاک در تبادل انرژی بین اتمسفر و اکوسیستم خاکی نقش اساسی دارد (۱۷).

شبیه‌سازی مدل‌های اقلیمی (GCMs) در مقیاس بزرگ نمی‌تواند بدون توجه به مدل هیدرولوژی محلی انجام شود (۸). در پژوهش‌های مختلف میزان رطوبت می‌تواند با کمک روش‌های مختلفی مانند روش‌های زمینی، اطلاعات هواشناسی و استفاده از سنجش از دور بررسی شود، اما جمع‌آوری داده‌های زمینی از جهت وقت و هزینه مقرون به صرفه نیست و شاخص‌های مستخرج از داده‌های هواشناسی به دلیل نقطه‌ای بودن نمی‌تواند اطلاعات درست و پیوسته از وضعیت رطوبت نشان دهد (۲۲). بنابراین سنجش از دور یکی از ابزارهای مهم و اقتصادی برای به‌دست آوردن پارامترهای سطح زمین است و مطالعات زیادی در زمینه پایش خشکسالی و بررسی رطوبت خاک با کمک آن انجام شده است. در بین روش‌های مختلف مطالعات سنجش از دور، استفاده سنجش از دور حرارتی به‌عنوان یکی از روش‌های تعیین دمای سطح زمین و پایش خشکسالی به‌کار گرفته می‌شود. این روش می‌تواند وضعیت رطوبت خاک را در زمین‌های دارای پوشش گیاهی بررسی کند (۱۰).

شاخص خشکسالی نیز در سنجش از دور بر پایه NDVI (Normalized difference vegetation index) است که نشان‌دهنده استرس آبی در گیاهان محسوب می‌شود و در زمان

خشکسالی کوتاه‌مدت در شرایطی که گیاهان هنوز سبز هستند مقدار NDVI کاهش نشان می‌دهد، ولی دمای سطح زمین (LST (Land Surface Temperature) تحت تأثیر رطوبت خاک قرار می‌گیرد (۲۷) که می‌تواند به‌عنوان یک فاکتور کلیدی در مسائل ژئوفیزیکی را در سطوح منطقه‌ای و جهانی بررسی شود (۱۸). مقادیر LST نیز در قالب یکی از ابزارهای مهم برای کسب اطلاعات بیوفیزیکی و بیوشیمیایی از وضعیت سطح زمین در تحقیقات اقلیم‌شناسی قابل توجه است (۷).

در اوایل دهه ۱۹۶۰ میزان دمای سطح زمین و تاج پوشش گیاهی برای تعیین میزان رطوبت پیشنهاد شد و در دهه ۱۹۸۰ توسعه یافت (۲۴). دما به‌عنوان شاخصی برای استرس آبی بر پایه ارتباط دمای برگ و تبخیر و تعرق محسوب می‌شود، با کمبود ذخیره آبی میزان تبخیر و تعرق برگ کاهش یافته و باعث افزایش دمای برگ می‌شود. اما پژوهشگران دریافتند زمانی دما می‌تواند نشان‌دهنده وضعیت رطوبت زمین باشد که از هیچ‌گونه گیاهی پوشیده نشده باشد (۳). بنابراین برای رفع این محدودیت کسری از دمای خاک و شاخص گیاهی به‌عنوان شاخص رطوبت (WDI (Water Deficit Index) در نظر گرفته شد (۱۹) که در این رابطه به دلیل کم کردن تأثیر خاک زمینه ترکیبی از دمای سطح زمین و شاخص پوشش گیاهی مورد نیاز بود.

ترکیب دما و شاخص گیاهی می‌تواند اطلاعات زیادی در مورد رطوبت خاک و وضعیت پوشش گیاهی داشته باشد که به‌طور گسترده استفاده شده است و پژوهش‌های زیادی (۲) و (۲۸) با کمک ترکیب دو پارامتر مذکور صورت گرفت و مدل‌های تبخیر و تعرق ارائه شد. نمودار پراکنندگی بین دما و شاخص گیاهی اغلب به‌صورت یک فضای مثلثی و یا دوزنقه‌ای نشان داده می‌شود که به‌صورت یک فضای NDVI-Ts معرفی شده است. در این فضای مثلثی شیب نشان‌دهنده نرخ تبخیر و تعرق است که می‌تواند به‌منظور تعیین میزان دمای هوا استفاده شود (۲۳) در پژوهش‌های مختلف، مناطق با پوشش گیاهی تنک، در یک تیپ گیاهی مشخص، امکان تفکیک دمای پوشش گیاهی و دمای سطح خاک با کمک مثلث NDVI-Ts نشان داده

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

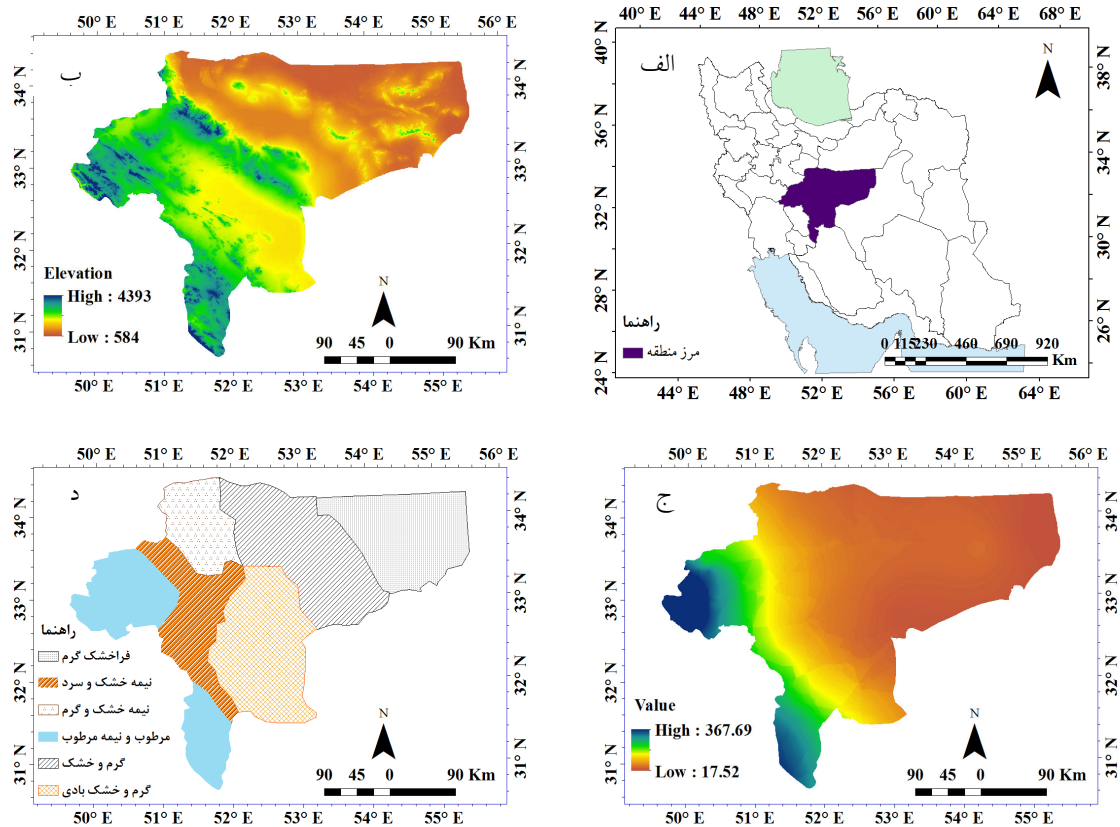
محدوده مورد مطالعه شامل کل استان اصفهان و در عرض جغرافیایی ۳۰° ۳۰' تا ۳۰° ۳۶' و طول جغرافیایی ۴۹° ۳۰' تا ۳۱° ۵۵' واقع شده است. این استان از جمله مناطقی است که دارای تنوع اقلیمی فراوان (مرطوب - فراخشک) است (شکل ۱) (۲۶) و به‌طور کلی از مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور محسوب می‌شود. از یک طرف وجود رشته‌کوه‌های زاگرس در قسمت غرب استان مانع نفوذ رطوبت به نواحی مرکزی و شرق استان شده و از طرف دیگر وجود نواحی پست و کویری شرق استان، هوای بخش وسیعی از آن را تحت تأثیر خود قرار داده است. میزان بارش و دما در استان اصفهان تابع وضعیت توپوگرافی منطقه است. در میان مناطق مختلف استان، خور با میانگین دمای سالانه ۱۹/۵ درجه سانتی‌گراد، گرم‌ترین و سمیرم با متوسط دمای سالانه ۱۰/۶ درجه سانتی‌گراد، سردترین منطقه استان اصفهان هستند. متوسط بارش سالانه در این استان در حدود ۱۲۰ میلی‌متر است. سنگ‌های منطقه شامل گونه‌های آتشفشانی، رسوبی و تخریبی و متعلق به زمان پرکامبرین هستند. رسوباتی نظیر شن، سیلت، گچ و رس همراه با خاک نیمه‌عمیق با بافت سنگین و سبک دیده می‌شود و در اطراف تالاب گاوخونی مواد معدنی نظیر نمک وجود دارد. به دلیل تنوع اقلیمی در استان ۶۹ تپ گیاهی تفکیک شده است که بر اساس گونه غالب شامل گونه‌های *Artemisia spp*، *Astragalus spp* و گندمیان دائمی هستند. گونه *Artemisia spp* تپ غالب مناطق خشک را تشکیل می‌دهد و در نواحی بیابانی شرق استان درختچه‌هایی نظیر *Haloxylon* در ترکیب گیاهی وجود دارد (۱۲).

داده‌های ماهواره‌ای مورد استفاده

به‌منظور تعیین وضعیت رطوبت خاک و گیاهان در مقیاس فصلی، داده‌های سنسجس از دور حرارتی (تصاویر ۸ روزه مودیس - LST) و انعکاسی (تصاویر ۱۶ روزه مودیس -

شد (۲۵). ضمن آنکه مقاومت روزنه گیاهان و نرخ تبخیر و تعرق ارتباط تنگاتنگی با NDVI-Ts داشته است و برای بررسی وضعیت رطوبت خاک استفاده شده است، بنابراین شاخص مذکور در بررسی تغییرات خشکسالی به‌کار گرفته شد و در مطالعات مختلف (۱۳ و ۲۹) نتایج موفقی مشاهده شده است. همچنین استفاده از شاخص‌های رطوبت خاک مستخرج از داده‌های ماهواره‌ای در پایش فصلی (۲۲) و سالیانه، رطوبت خاک در بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک (۱۵) همبستگی بسیار زیادی با مقادیر اندازه‌گیری شده زمینی داشته است که می‌توان به شاخص TVDI اشاره کرد که طبق تحقیقات، ضمن تعیین میزان رطوبت موجود در خاک، توانسته است مقدار استرس آبی گیاهان را در تحقیقات کشاورزی و پایش مراتع تعیین کند (۹).

استان اصفهان در مرکز ایران قرار گرفته که به دلیل وجود رشته کوه‌های زاگرس دارای اقلیم‌های متنوع (مرطوب تا فراخشک) است که وجود پدیده خشکی باعث کاهش رطوبت خاک شده است. در شرایط کم‌آبی و تبخیر بالا میزان رطوبت خاک یکی از مهم‌ترین فاکتورهای رشد در مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شود. از این رو داشتن اطلاعات کافی در زمینه رطوبت خاک از اساسی‌ترین برنامه‌های تحقیقات زیست‌محیطی به‌شمار می‌رود. در این گونه مناطق پراکنش فصلی بارش بسیار نامنظم است و بر دوره فنولوژی گیاهان تأثیر زیادی دارد. عدم بارش و خشکی خاک در اواخر فصل باعث می‌شود رشد گیاهان بسته به فرم رویشی متوقف شود. بنابراین هدف اصلی از این پژوهش پایش فصلی رطوبت خاک در استان اصفهان با محاسبه شاخص خشکی - دمایی (Temperature - Vegetation Dryness Index) TVDI (با کمک شاخص گیاهی NDVI و LST) و داده‌های زمینی است. ضمن آنکه داده‌های ماهواره مودیس در محاسبات شاخص TVDI استفاده می‌شود و تغییرات کلی منطقه نیز با کمک شاخص گیاهی NDVI و LST به تفکیک طبقات اقلیمی بررسی می‌شود.



شکل ۱. الف) موقعیت منطقه مورد مطالعه، ب) نقشه رقومی ارتفاع (DEM)، ج) بارش متوسط سالیانه و د) طبقه‌بندی اقلیمی (۲۶)

رگرسیون خطی محاسبه شد.

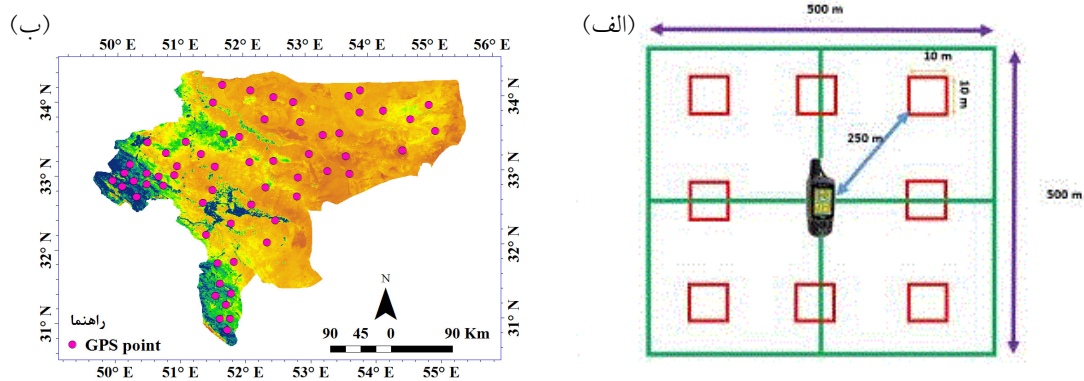
اندازه‌گیری رطوبت خاک

به‌منظور بررسی میزان تولید گیاهی، پس از تفکیک مناطق مشابه از لحاظ خاک و پوشش گیاهی، میزان رطوبت خاک در دوره‌های مختلف در قالب روش چهار پیکسلی اندازه‌گیری شد. در هر دوره زمانی از فصل رویش، تعداد ۶۰ سایت از مناطق مرطوب تا خشک (شکل ۲) تعیین و در یک سطح 500×500 مترمربعی درصد رطوبت خاک در طول فصل رویش در پنج طبقه از عمق خاک (۵-۰، ۵-۱۰، ۱۰-۲۰، ۲۰-۳۰، ۳۰-۴۰ سانتی‌متر) با کمک دستگاه TDR اندازه‌گیری شد (شکل ۲). تعیین سطح نمونه‌برداری با در نظر گرفتن وضوح پیکسل ماهواره مودیس 250×250 مترمربع و طبق معادله ۱ انجام گرفت. در این معادله A سطح نمونه‌برداری، P وضوح پیکسل

(NDVI) به‌کار گرفته شد. با توجه به اختلاف وضوح مکانی داده‌های NDVI (250×250) و LST (1000×1000)، برای یکسان‌سازی مقیاس نقشه‌های دما و شاخص گیاهی از روش ریزمقیاس‌سازی استفاده شد و اندازه پیکسل کلیه تصاویر LST به 250 متر تغییر یافت و با کمک نرم‌افزارهای سنجنش از دور پیش‌پردازش‌ها و کالیبراسیون مربوطه صورت گرفت (۲۱).

بررسی دمای سطح زمین و شاخص گیاهی NDVI

به‌منظور تعیین امکان استفاده از دمای سطح زمین با کمک شاخص گیاهی NDVI ابتدا مقدار LST و NDVI با توجه به نقشه اقلیمی استان (شکل ۱-د) در هر یک از اقلیم‌های آب و هوایی بررسی شد، بنابراین ارزش پارامترهای مذکور در هر یک از طبقات اقلیمی استخراج و رابطه بین مقادیر آنها (LST و NDVI) در طول فصل رویش استان (مارس - اکتبر) از طریق



شکل ۲. الف) روش نمونه برداری زمینی (رطوبت خاک با دستگاه TDR در پلات های ۱۰×۱۰ مترمربعی) و ب) موقعیت مکانی سایت های نمونه برداری

مرحله آخر شاخص TVDI برای هر تصویر با استفاده از معادله ۲ محاسبه می شود. TVDI در مناطق کم آب یک و در مناطق پر آب صفر خواهد بود. در نتیجه رابطه منفی بین رطوبت خاک و TVDI وجود دارد.

(۲)

$$VDI = \frac{LST - LST_{min}}{LST_{max} - LST_{min}} = \frac{LST - LST_{min}}{a + b \times NDVI - LST_{min}}$$

رابطه بین نقشه های TVDI تولید شده با مقادیر اندازه گیری شده رطوبت (داده های زمینی) از طریق رگرسیون خطی انجام گرفت و مقادیر P-value نیز محاسبه شد. به منظور تعیین میزان همبستگی داده های زمینی رطوبت با شاخص خشکی - دمایی TVDI در هر دوره زمانی، در کل استان یک رابطه کلی در نظر گرفته شد.

نتایج

بررسی تغییرات سالیانه دمای سطح زمین و شاخص گیاهی NDVI
میزان دمای سطح زمین در مناطق مختلف اقلیمی نشان داد که مقدار LST در اقلیم های مختلف در یک زمان با یکدیگر متفاوت است اما در ماه های ژانویه، فوریه و مارس تفاوت چندانی در دمای سطح زمین در اقلیم های آب و هوایی (مرطوب - فراخشک) دیده نشد (شکل ۴). در ماه آپریل نیز دمای سطح زمین در نقاط مختلف تغییر چندانی نداشت اما در ماه می بین مناطق اقلیمی اختلاف دمایی در حدود ۲۰ درجه مشاهده شد

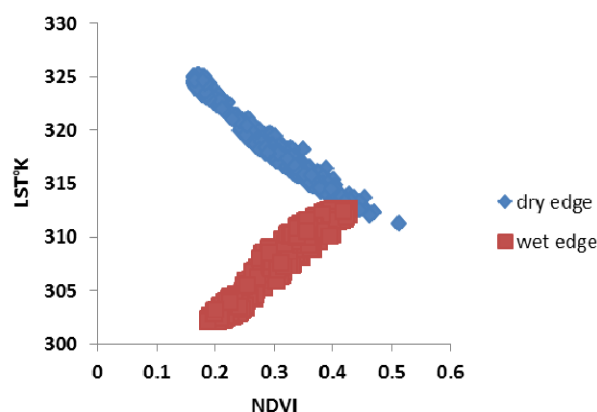
ماهواره برحسب متر و L خطای مورد قبول است (۱۶).

$$A(p \times 1 + 2L) \quad (1)$$

محاسبه شاخص TVDI

نمودار پراکندگی از دمای سطح زمین و شاخص پوشش گیاهی پیکسل ها معمولاً تشکیل یک مثلث فضایی یا دوزنقه ای را می دهد. یک ضلع آن به صورت افقی و به موازات محور NDVI است که ضلع تحتانی مثلث را تشکیل می دهد. ضلع دیگر که به ضلع خشک شهرت یافته است، ضلع فوقانی مثلث را شامل می شود. هر دو ضلع تر و خشک به ترتیب از برآزش معادله خطی بر مقادیر کمینه و بیشینه دمای سطح زمین در نمودار پراکندگی بین NDVI و LST حاصل شده اند. در این پژوهش پس از تشکیل مثلث فضایی با استفاده از معادله ۲، مقدار TVDI را که از بازه صفر تا یک وجود دارد در طول فصل رویش محاسبه شد.

در معادله ۲، LST دمای سطح پیکسل مورد نظر و LST_{max} بیشینه دما در NDVI مربوط به آن پیکسل، LST_{min} کمینه دمای سطح در آن NDVI و مقدار a و b شیب و عرض از مبدأ خط است، برای به دست آوردن معادله خط برآزش داده شده بر مقادیر بیشینه (LST_{max}) و کمینه دما (LST_{min}) پیکسل های دارای بیشترین و کمترین دما انتخاب می شود. با رسم نمودار مربوط به این نقاط در اکسل و تعیین معادله خطی برآزش داده به آنها LST_{min} و LST_{max} به دست آمد (شکل ۳). سپس در



شکل ۳. نمونه‌ای از فضای مثلثی LST-NDVI

مدل‌سازی میزان رطوبت با استفاده از شاخص TVDI

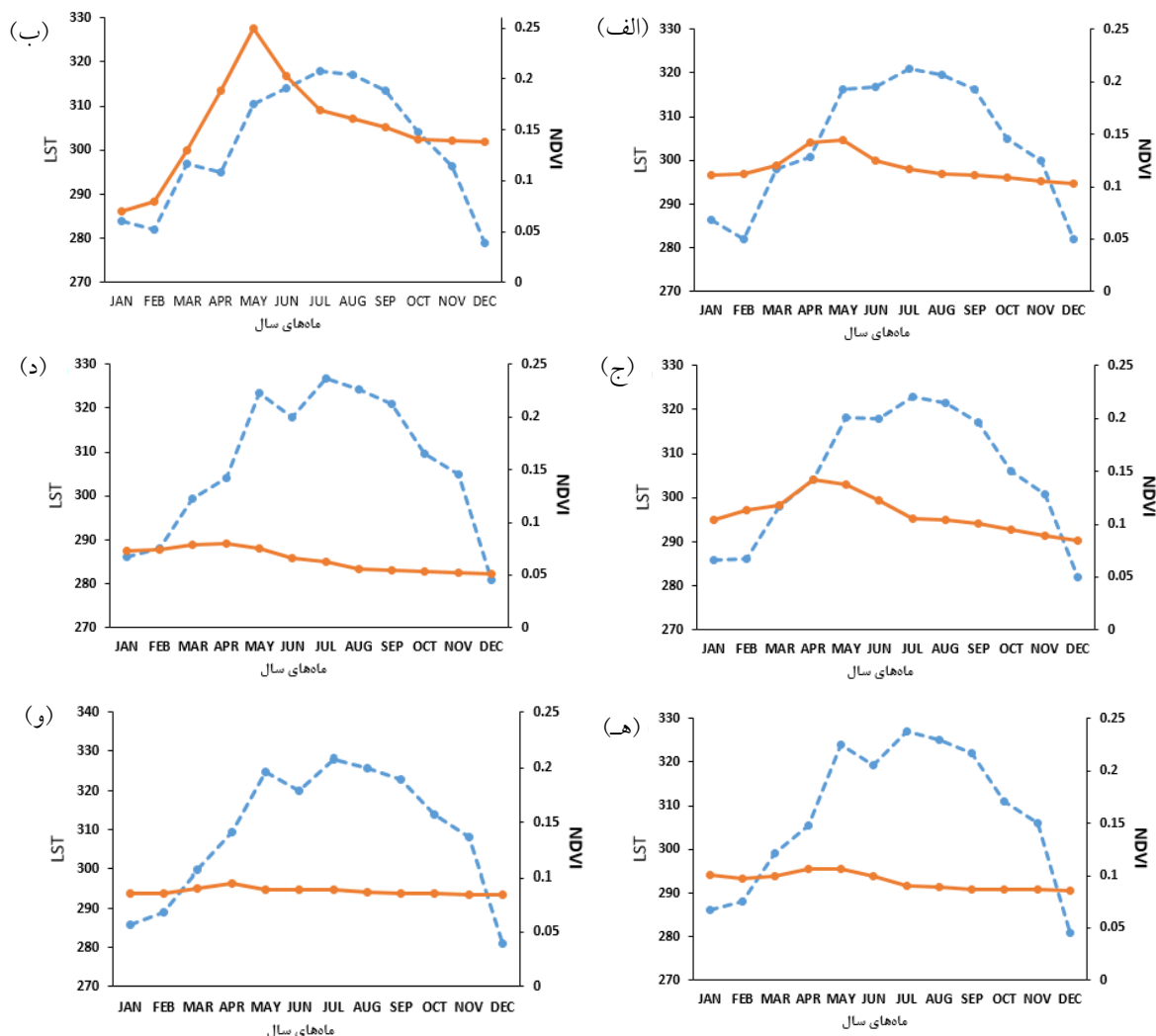
مدل‌سازی رطوبت خاک با کمک TVDI نشان داد که میزان این شاخص در طول زمان و مکان دارای تغییرات فراوان است به طوری که در قسمت‌های غربی استان نسبت به شرق مقدار این شاخص بیشتر است. طبق بررسی داده‌های زمینی این شاخص در مقایسه با TVDI تأثیر کمتری از پوشش گیاهی زمین دارد و رطوبت خاک را بهتر نشان می‌دهد.

بررسی مدل‌های پردازش شده نشان داد میزان همبستگی بین تصاویر TVDI و با داده‌های زمینی برحسب میزان عمق و فصل سال با یکدیگر متفاوت است. به طور کلی بیشترین میزان همبستگی شاخص مذکور در ششم آوریل دیده می‌شود که با کاهش رطوبت و سبز شدن گیاهان از مقدار همبستگی کاسته شده است. در اواخر فصل رویش و خشک شدن گیاهان همبستگی میان داده‌های TVDI رطوبت زمین اندکی افزایش می‌یابد، ضمن اینکه کمترین مقدار شاخص TVDI در اوایل فصل رویش اما در آخر فصل به دلیل عدم بارش میزان آن افزایش یافته و در برخی از نقاط استان به یک نزدیک می‌شود (شکل ۵). میزان همبستگی بین شاخص TVDI و درصد رطوبت حجمی با توجه به میزان عمق خاک نیز متفاوت است. در اوایل فصل و وجود بارش میزان همبستگی بین شاخص‌های مذکور و رطوبت زمین در عمق پنج سانتی متری نسبت به اعماق بسیار بیشتر است و در اواخر فصل با خشک شدن سطح خاک و وجود فرم رویشی میزان همبستگی بین

که در ماه‌های گرم سال (ژولای، اگوست و سپتامبر) این تفاوت کاهش می‌یابد. مقادیر شاخص گیاهی NDVI نیز بسته به نوع اقلیم آب‌وهوایی دارای نوسان است. در اقلیم‌های فراهشک، گرم و خشک، گرم و خشک بادی و نیمه‌خشک گرم بیشترین مقدار شاخص NDVI در ماه آپریل مشاهده شد اما در اقلیم‌های نیمه خشک و سرد و مرطوب و نیمه‌مرطوب سرد در ماه می بالاترین میزان شاخص گیاهی NDVI وجود داشت. در ناحیه مرطوب و نیمه‌مرطوب سرد، تغییرات مقدار NDVI در اواسط فصل رویش نسبت به مناطق دیگر شدیدتر بود اما در منطقه فراهشک گرم تغییرات سالیانه NDVI نوسان کمتری داشت.

همبستگی بین دمای سطح زمین و شاخص گیاهی NDVI

رابطه بین نقشه دمای زمین (LST) با شاخص گیاهی NDVI (۳۵ نقطه تصادفی) در اقلیم‌های مختلف استان شکل (۱-د) بیانگر آن بود که رابطه بسیار قوی میان این شاخص و نقشه‌های دما وجود دارد اما میزان همبستگی آنها بسته به نوع اقلیم و شرایط فصلی مقادیر متفاوتی دیده شد. به طوری که بیشترین همبستگی در ماه می و کمترین در اکتبر قابل مشاهده بود. در اقلیم مرطوب بیشترین و فراهشک کمترین ارتباط میان داده‌های LST و NDVI وجود داشت. در ماه‌های سپتامبر و اکتبر بین شاخص گیاهی NDVI و LST تقریباً مقادیر R^2 یکسان بودند (جدول ۱).



شکل ۴. الف) مقادیر LST و شاخص گیاهی NDVI در اقلیم مرطوب و نیمه مرطوب، ب) نیمه خشک و سرد، ج) نیمه خشک و گرم، د) خشک و گرم، ه) گرم و خشک بادی، و) فراخشک و گرم

پوشش گیاهی باعث می شود تغییرات دمای هوا در فصول مختلف تأثیر کمتری در دمای سطح زمین داشته باشد که دلیل آن را می توان نقش گیاهان در جذب و بازتاب اشعه خورشیدی و ایجاد پوشش سطحی خاک بیان کرد. طبق مشاهدات (۱۱) عواملی نظیر درصد تاج پوشش گیاهی، مقدار کلروفیل، رطوبت خاک از مهم ترین فاکتورهای تأثیرگذار بر طیف پوشش گیاهی هستند. در پژوهش حاضر هرچند در ماه های سرد (مانند ژانویه (دی)) به دلیل کاهش بازتاب گیاهان تأثیر خاک بر مقادیر LST زیادتیر می شود اما در مناطق مرطوب اختلاف کمتری در میزان LST با فراخشک مشاهده شد (شکل ۴) که این امر را می توان

شاخص رطوبت عمق خاک ۱۰-۳۰ سانتی متری بیشتر می شود و در اواخر فصل نیز میزان همبستگی بین شاخص های مذکور و رطوبت سطح خاک پایین می آید (جدول ۲).

بحث

نتایج بررسی مقادیر NDVI و LST در مقیاس فصلی نشان دهنده آن بود که رطوبت زمین در اعماق مختلف خاک، دمای سطح زمین و پوشش گیاهی در منطقه مورد مطالعه بسته به شرایط اقلیمی روندهای متفاوتی مشاهده می شود. وجود

جدول ۱. همبستگی بین دمای هوا و شاخص گیاهی NDVI در اقلیم‌های مختلف استان اصفهان

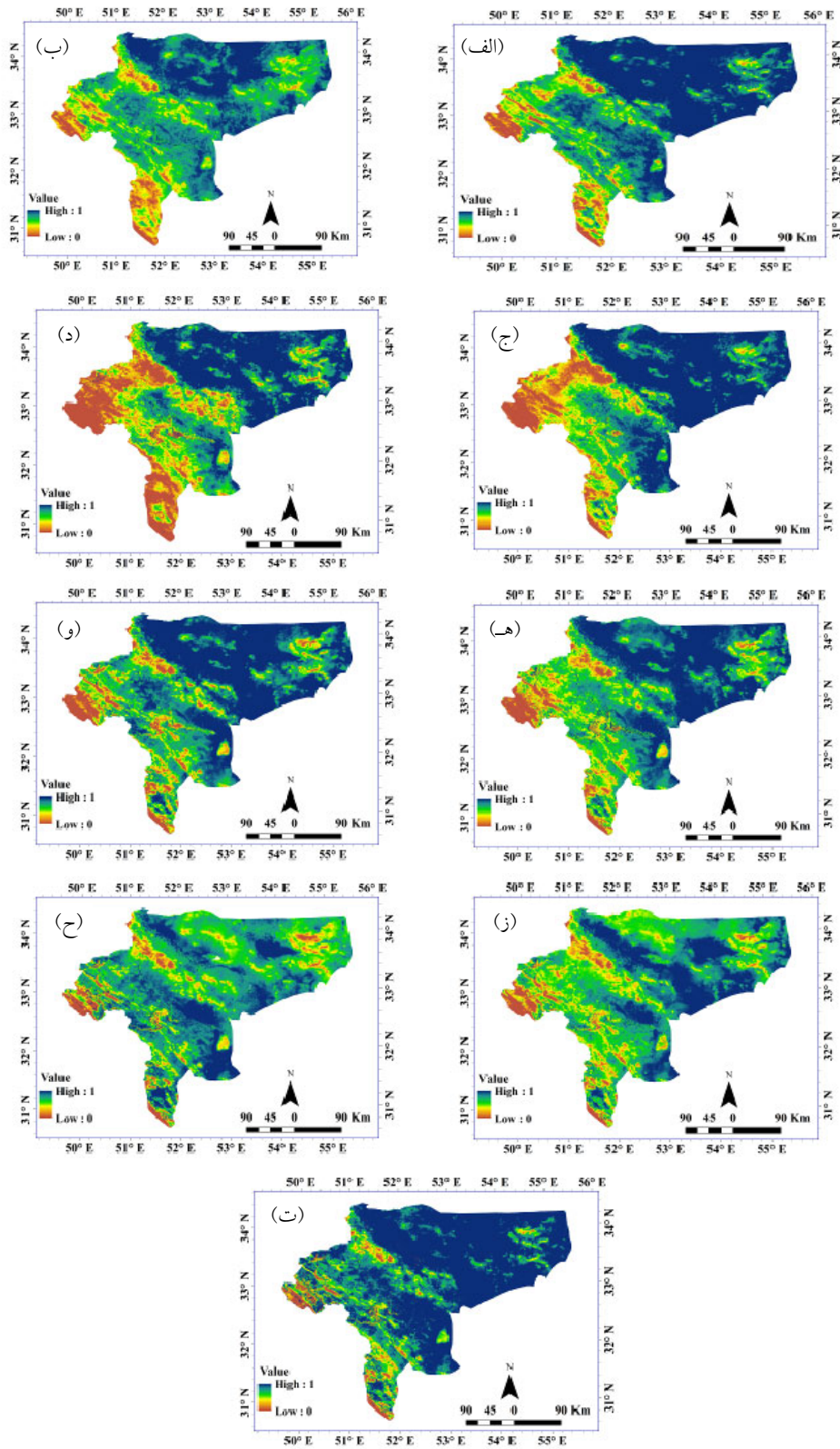
مهر	شهریور	مرداد	تیر	خرداد	اردیبهشت	فروردین	اسفند	
۰/۴۱(۰)	۰/۴۳(۰)	۰/۵۱(۰)	۰/۶۰(۰)	۰/۷۸(۰)	۰/۹۲(۰)	۰/۸۷(۰)	۰/۱۲(۰/۰۶۱)	مرطوب و نیمه‌مرطوب سرد
۰/۲۳(۰/۰۰۸)	۰/۲۵(۰/۰۰۶)	۰/۳۹(۰)	۰/۴۹(۰)	۰/۵۹(۰)	۰/۸۶(۰)	۰/۸۴(۰)	۰/۳۳(۰/۰۰۲)	نیمه‌خشک و سرد
۰/۱۹(۰/۰۲۴)	۰/۲۰(۰/۰۱۱)	۰/۳۶(۰)	۰/۴۶(۰)	۰/۵۲(۰)	۰/۸۱(۰)	۰/۷۵(۰)	۰/۳۹(۰)	نیمه‌خشک و گرم
۰/۱۳(۰/۰۴۲)	۰/۱۴(۰/۰۳۶)	۰/۲۷(۰/۰۰۳)	۰/۳۷(۰)	۰/۴۷(۰)	۰/۷۹(۰)	۰/۷۰(۰)	۰/۴۳(۰)	گرم و خشک
۰/۱۰(۰/۰۶۹)	۰/۱۲(۰/۰۶۱)	۰/۲۱(۰/۰۰۹)	۰/۳۴(۰/۰۰۱)	۰/۴۲(۰)	۰/۷۵(۰)	۰/۶۵(۰)	۰/۵۶(۰)	گرم و خشک بادی
۰/۱۰(۰/۰۷۵)	۰/۱۲(۰/۰۵۹)	۰/۲۵(۰/۰۰۶)	۰/۲۷(۰/۰۰۳)	۰/۳۶(۰)	۰/۷۱(۰)	۰/۶۲(۰)	۰/۶۰(۰)	فراخشک و گرم

جدول ۲. میزان همبستگی شاخص TVDI و درصد رطوبت حجمی خاک در فصل رویش

11JUL	25JUN	9JUN	24MAY	8MAY	22APR	6APR	21MAR	5MAR	
-۰/۲۳(۰)	-۰/۲۴(۰)	-۰/۲۹(۰)	-۰/۴۵(۰)	-۰/۵۵(۰)	-۰/۶۷(۰)	-۰/۷۸(۰)	-۰/۶۴(۰)	-۰/۴۸(۰)	۰-۵ سانتی‌متر
-۰/۱۷(۰)	-۰/۲۲(۰)	-۰/۳۴(۰)	-۰/۳۵(۰)	-۰/۳۲(۰)	-۰/۴۷(۰)	-۰/۶۵(۰)	-۰/۵۱(۰)	-۰/۳۸(۰)	۵-۱۰ سانتی‌متر
-۰/۱۸(۰)	-۰/۱۹(۰)	-۰/۴۵(۰)	-۰/۳۳(۰)	-۰/۲۳(۰)	-۰/۳۴(۰)	-۰/۵۲(۰)	-۰/۴۱(۰)	-۰/۲۳(۰)	۱۰-۲۰ سانتی‌متر
-۰/۲۲(۰)	-۰/۲۳(۰)	-۰/۳۳(۰)	-۰/۳۱(۰)	-۰/۱۸(۰)	-۰/۲۱(۰)	-۰/۴۳(۰)	-۰/۳۶(۰)	-۰/۲۱(۰)	۲۰-۳۰ سانتی‌متر
-۰/۱۹(۰)	-۰/۲۰(۰)	-۰/۲۳(۰)	-۰/۲۸(۰)	-۰/۲۰(۰)	-۰/۱۵(۰)	-۰/۲۵(۰)	-۰/۲۱(۰)	-۰/۱۶(۰)	۳۰-۴۰ سانتی‌متر

گزارش‌ها نیز بیان کردند (۵) گیاهان مناطق خشک و فراخشک ساختمان فیزیولوژی متفاوتی با گیاهان مناطق مرطوب دارند و نسبت به تغییرات رطوبت خاک و خشکسالی سازگار شده‌اند. طبق بررسی انجام شده وجود توپوگرافی در مناطق شرقی نقش مهمی در تغییرات مکانی دمای هوا دارد. با افزایش ارتفاع از سطح دریا دمای هوا و به‌دنبال آن دمای سطح زمین نسبت به مناطق دشتی کاهش نشان داد (شکل‌های ۱ و ۴). در آغاز فصل رویش دما نقش مهمی در جوانه‌زنی و شروع رشد گیاهان ایفا می‌کند و در مناطق شرقی به‌دلیل افزایش دما، فنولوژی گیاهان زودتر آغاز می‌شود و پایان می‌یابد که باعث افزایش بازتاب گیاهان شده و طبق نتایج (شکل ۴) مقادیر NDVI نسبت به مناطق مرطوب زودتر افزایش و کاهش داشته است. در اقلیم فراخشک به‌دلیل پایین بودن درصد پوشش سطح زمین مقدار نوسان LST نسبت به مناطق مرطوب بیشتر است. در مناطق مرطوب به‌دلیل وجود رطوبت بیشتر، مقدار تبخیر از سطح خاک افزایش و LST کاهش می‌یابد. با افزایش تراکم پوشش گیاهی با فرم رویشی بوته‌ای مقدار جذب رطوبت از طبقات زیرین خاک و فتوستز در فصول گرم نسبت به مناطق شرقی زیادتر

تأثیر بافت خاک، نفوذپذیری و مقادیر لاشبرگ در جذب رطوبت و بازتاب طیفی دانست. در مناطق مرطوب و نیمه‌مرطوب در فصول سرد به‌دلیل وجود پوشش گیاهی نزولات آسمانی قدرت نفوذ بیشتری داشته و به‌دلیل وجود لاشبرگ قدرت نگهداری آب در خاک بیشتر است و نسبت کربن آلی خاک نسبت به مواد معدنی نقش مهمی در جذب و بازتاب انرژی خورشید دارد به‌طوری که با افزایش ماده آلی، رنگ خاک تیره‌تر شده است و نسبت جذب انرژی خورشید افزایش می‌یابد درحالی که جذب انرژی در مناطق خشک و فراخشک شرقی به‌دلیل روشن بودن خاک و وجود لایه‌های گچی و نمکی کاهش نشان داد، ضمن آنکه در فصول رشد نیز در مناطق مرطوب و نیمه‌مرطوب تراکم پوشش گیاهی بر بازتاب طیفی خاک و در نتیجه دمای سطح زمین تأثیر گذاشته است (۴) و باعث می‌شود مقادیر LST در طول سال نوسان کمتری داشته باشند. تغییرات پوشش گیاهی در مناطق مرطوب و نیمه‌مرطوب (شاخص گیاهی NDVI) در پاسخ به شرایط آب‌وهوایی در طول سال با وضوح بیشتری مشاهده می‌شود (شکل ۴).



شکل ۵. شاخص گیاهی TVDI در استان اصفهان: (الف) ۵Mar، (ب) ۲۱ Mar، (ج) ۶Apr، (د) ۲۲Apr، (ه) ۸May، (و) ۲۴May، (ز) ۹Jun، (ح) ۲۵Jun و (ط) ۱۱Jul

خاک بر شاخص NDVI و LST میزان تغییرات شاخص TVDI با رطوبت خاک مشابهت بیشتری مشاهده می‌شود. بنابراین می‌توان دریافت که میزان همبستگی شاخص TVDI با رطوبت خاک به وضعیت پوشش گیاهی (مانند فنولوژی، تراکم و درصد پوشش گیاهی)، نوع پوشش، شرایط آب‌وهوایی و موقعیت فصلی و جغرافیایی بستگی دارد.

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی می‌توان نتیجه‌گیری کرد که استفاده از سنجش از دور حرارتی (LST) و انعکاسی (NDVI) می‌تواند اطلاعات بسیار زیادی در وضعیت گیاهان و خاک مناطق فراخشک تا مرطوب ارائه کند. در این پژوهش ترکیب تصاویر ۱۶ روزه (NDVI) و ۸ روزه (LST) مودیس کارایی بسیار مناسبی را در تعیین رطوبت خاک در مقیاس فصلی نشان دادند. بنابراین نتایج حاصل از این پژوهش را می‌توان به‌صورت زیر عنوان کرد:

تغییرات فصلی دمای سطح زمین و پوشش گیاهی بسته به نوع اقلیم دارای الگوهای متفاوتی بوده است و با شرایط منطقه‌ای مانند نوع و ترکیب خاک و درصد پوشش گیاهی ارتباط نزدیکی دارد.

استفاده از شاخص گیاهی NDVI نسبت به LST تغییرات پوشش گیاهی را بهتر نشان می‌دهد و در مناطق با پوشش گیاهی متراکم به دلیل تأثیر پوشش گیاهی مقادیر LST به‌تنهایی نمی‌تواند شرایط خاک را منعکس سازد.

عواملی مانند نوع پوشش گیاهی، درصد تاج پوشش، فرم رویشی، نوع خاک و زمان مطالعه در مطالعه تعیین رطوبت خاک با کمک شاخص خشکی - دمای (TVDI) تأثیرگذار است.

بررسی میزان رطوبت با کمک TVDI نشان داد با کمک این شاخص مذکور می‌توان وضعیت رطوبت خاک را در مقیاس فصلی با داده‌های زمینی و تصاویر ماهواره‌ای پایش کرد و نتایج حاصل را در مطالعات خاک‌شناسی، پوشش گیاهی و مدل‌سازی اکوسیستم و شناخت محیط زیست استفاده کرد.

بود و مقدار شاخص NDVI افزایش و LST کاهش یافت. ضمن آنکه افزایش تبخیر و تعرق کاهش دمای هوا را نیز به‌دنبال داشت که در گزارش‌های مختلف نیز تأثیر مقدار تبخیر و تعرق و تراکم پوشش گیاهی بر LST نیز تأیید شده است (۲۰). علاوه بر این، افزایش بارش در مناطق غربی نسبت به شرقی (شکل ۱) نقش مهمی در جذب اشعه مادون قرمز گرمایی داشته و مقادیر NDVI در فصول سرد نسبت به مناطق شرقی افزایش بیشتری داشت (شکل ۴).

تغییرات فصلی نقش مهمی بر همبستگی رطوبت خاک و شاخص TVDI داشته است. طبق نتایج (جدول ۲)، در اوایل فصل رویش به دلیل تراکم و سبزیگی گیاهان تأثیر خاک زمینه بر شاخص گیاهی NDVI و مقدار LST بیشتر بود اما در قسمت‌های عمیق خاک (عمق ۳۰-۲۰ سانتی‌متر) نسبت به سطح زمین در اوایل فصل رویش میزان همبستگی بین رطوبت و شاخص TVDI کمتر است و اگرچه به دلیل عدم بارش تابستان ارتباط میان شاخص مذکور و رطوبت ضعیف می‌شود اما در اواخر فصل میزان همبستگی آن با رطوبت عمقی نسبت به سطح بیشتر بود که دلیل آن را می‌توان نوع پوشش گیاهی و تأثیر رطوبت عمیق خاک بر وضعیت پوشش و شاخص NDVI در تیپ‌های گیاهی بوته‌زار دانست، وجود ریشه‌های عمیق در مناطق بوته‌زار باعث می‌شود زمان تأثیر بارش بر پوشش گیاهی نسبت به گیاهان یک‌ساله تأخیر داشته باشد (۶). افزایش تراکم پوشش گیاهی در اواسط و اواخر فصل رویش نیز باعث می‌شود اثر خاک زمینه بر شاخص NDVI کاسته و بازتاب گیاهان بیشتر شود، از این‌رو در شرایطی که خاک سطحی خشک است، مقدار شاخص TVDI به دلیل رطوبت زیرین خاک (۱۰-۳۰ سانتی‌متر) و افزایش شاخص NDVI افزایش می‌یابد. مشابه این امر توسط پژوهشگران دیگر نیز تأیید شده است (۱). رابطه میان شاخص TVDI با رطوبت خاک در طول فصل متغیر بود که به تغییرات شاخص NDVI و رابطه فصلی آن با خاک مربوط می‌شود. براساس مشاهدات پژوهش حاضر (جدول ۲) و سایر گزارش‌ها (۱۴) در اوایل فصل رویش به دلیل افزایش تأثیر

منابع مورد استفاده

1. Chen, J., C. Wang, H. Jiang, L. Mao and Z. Yu. 2011. Estimating soil moisture using Temperature–Vegetation Dryness Index (TVDI) in the Huang-huai-hai (HHH) plain. *International Journal of Remote Sensing* 32 :1165-1177.
2. Chen, S., L. Zhang, X. Liu, M. Guo and D. She. 2018. The use of SPEI and TVDI to assess temporal-spatial variations in drought conditions in the middle and lower reaches of the yangtze river basin, China. *Advances in Meteorology* 2018: 1-11.
3. Coll, C., V. Caselles, E. Valor, R. Niclòs, J. M. Sánchez, J. M. Galve and M. Mira. 2007. Temperature and emissivity separation from ASTER data for low spectral contrast surfaces. *Remote Sensing of Environment* 110: 162-175.
4. Daughtry, C., C. Walthall, M. Kim, E. B. De Colstoun and J. McMurtrey Iii. 2000. Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance. *Remote Sensing of Environment* 74: 229-239.
5. Devitt, D. A., J. Piorkowski, S. Smith, J. Cleverly and A. Sala. 1997. Plant water relations of *Tamarix ramosissima* in response to the imposition and alleviation of soil moisture stress. *Journal of Arid Environments* 36: 527-540.
6. Golluscio, R., O. Sala and W. Lauenroth. 1998. Differential use of large summer rainfall events by shrubs and grasses : a manipulative experiment in the Patagonian steppe. *Oecologia* 115: 17-25.
7. Guo, G., Z. Wu, R. Xiao, Y. Chen, X. Liu and X. Zhang. 2015. Impacts of urban biophysical composition on land surface temperature in urban heat island clusters. *Landscape and Urban Planning* 135: 1-10.
8. Hagemann, S., C. Chen, J. O. Haerter, J. Heinke, D. Gerten and C. Piani. 2011. Impact of a statistical bias correction on the projected hydrological changes obtained from three GCMs and two hydrology models. *Journal of Hydrometeorology* 12: 556-578.
9. Hazaymeh, K. and Q. K. Hassan. 2017. A remote sensing-based agricultural drought indicator and its implementation over a semi-arid region, Jordan. *Journal of Arid Land* 9: 319-330.
10. Holzman, M. E., R. Rivas and M. C. Piccolo. 2014. Estimating soil moisture and the relationship with crop yield using surface temperature and vegetation index. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 28: 181-192.
11. Huete, A., R. Jackson and D. Post. 1985. Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds. *Remote Sensing of Environment* 17: 37-53.
12. Jafari, R., H. Bashari and M. Tarkesh. 2017. Discriminating and monitoring rangeland condition classes with MODIS NDVI and EVI indices in Iranian arid and semi-arid lands. *Arid Land Research and Management* 31: 94-110.
13. Khan, J., P. Wang, Y. Xie, L. Wang and L. Li. 2018. Mapping MODIS LST NDVI imagery for drought monitoring in Punjab Pakistan. *IEEE Access* 6: 19898-19911.
14. Li, X., H. Wang, H. Long, D. Wei and Y. Bao. 2012. A model for the estimation of fractional vegetation cover based on the relationship between vegetation and soil moisture. *International Journal of Remote Sensing* 33: 3580-3595.
15. Li, Z., Y. Wang, Q. Zhou, J. Wu, J. Peng and H. Chang. 2008. Spatiotemporal variability of land surface moisture based on vegetation and temperature characteristics in Northern Shaanxi Loess Plateau, China. *Journal of Arid Environments* 72: 974-985.
16. McCoy, R. M. 2005. *Field Methods in Remote Sensing*. Guilford New York.
17. Melillo, J. M., A. D. McGuire, D. W. Kicklighter, B. Moore, C. J. Vorosmarty, and A. L. Schloss. 1993. Global climate change and terrestrial net primary production. *Nature* 363: 234-240.
18. Miliareisis, G. C. 2009. Regional thermal and terrain modelling of the Afar Depression from MODIS multi-temporal monthly night LST data. *International Journal of Remote Sensing* 30: 2429-2436.
19. Moran, M., T. Clarke, Y. Inoue and A. Vidal. 1994. Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. *Remote Sensing of Environment* 49: 246-263.
20. Ottlé, C. and D. Vidal-Madjar. 1994. Assimilation of soil moisture inferred from infrared remote sensing in a hydrological model over the HAPEX-MOBILHY region. *Journal of Hydrology* 158: 241-264.
21. Pack, S. M. 2009. A MODIS Imagery Toolkit for ArcGIS Explorer.
22. Rahimzadeh-Bajgiran, P., K. Omasa and Y. Shimizu. 2012. Comparative evaluation of the Vegetation Dryness Index (VDI), the Temperature Vegetation Dryness Index (TVDI) and the improved TVDI (iTVDI) for water stress detection in semi-arid regions of Iran. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 68: 1-12.
23. Schirmbeck, L. W., D. C. Fontana and J. Schirmbeck. 2018. Two approaches to calculate TVDI in humid subtropical climate of southern Brazil. *Scientia Agricola* 75: 111-120.
24. Wang, C., S. Qi, Z. Niu and J. Wang. 2004. Evaluating soil moisture status in China using the temperature–vegetation dryness index (TVDI). *Canadian Journal of Remote Sensing* 30: 671-679.
25. Wang, X., L. Yin, F. Xiao, M. Zhang, L. Liu, Z. Zhou and Y. Ao. 2018. The desertification process in the S ilk Road Economic Belt in the past 15 years : A study using MODIS data and GIS analysis. *Geological Journal* 53: 322-331.

26. Yaghmaei, L., S. Soltani and M. Khodagholi. 2009. Bioclimatic classification of Isfahan province using multivariate statistical methods. *International Journal of Climatology* 29: 1850-1861.
27. Yang, S. H., S. D. Lee, Y. J. Kim and J. Y. Rhee. 2013. Greenhouse heating and cooling with a heat pump system using surplus air and underground water thermal energy. *Engineering in Agriculture, Environment and Food* 6: 86-91.
28. Zhang, X., H. Zhao and J. Yang. 2018. Spatial downscaling of land surface temperature in combination with TVDI and elevation. *International Journal of Remote Sensing* 40(5-6):1-12.
29. Zormand, S., R. Jafari and S. S. Koupaei. 2017. Assessment of PDI, MPDI and TVDI drought indices derived from MODIS Aqua/Terra Level 1B data in natural lands. *Natural Hazards* 86: 757-777.

Seasonal Evaluation of Soil Moisture Changes in Isfahan Province Using Temperature Vegetation Dryness Index (TVDI)

F. Hadian, R. Jafari*, H. Bashari and M. Tarkesh¹

(Received: October 7-2018; Accepted: December 19-2018)

Abstract

Soil moisture is one of the most important factors that can affect productivity in ecosystems in arid and semiarid regions. The aim of this study was to investigate soil moisture and vegetation changes in the Isfahan province at the seasonal scale. For this purpose, MODIS Land Surface Temperature (LST) and NDVI data were used to calculate the TVDI index, and the rate of soil moisture content was also measured at several soil depths including 5, 10, 20, 30 cm. in the growing season. Seasonal changes of LST and NDVI indices were also studied in different climate regions ranging from humid to hyperarid. The results showed that the changes in NDVI and LST in this region were different, depending on the climate type and soil conditions; the LST and its changes mostly depended on the amount of vegetation cover NDVI changes based on the plant phenology in humid regions, which were greater than that in arid and semi-arid climates. Soil moisture monitoring indicated that the relationships between TVDI and different soil depths varied based on the seasonal conditions. In the early growing season, the soil moisture at the depth of 0-5 cm had a higher correlation with TVDI, but in the middle of growing season, the deeper soil moisture (10-30 cm) showed the highest correlation. Therefore, the findings of this research indicated the importance of the growing season, soil conditions and vegetation percentage and types in the soil moisture studies by using satellite data.

Keywords: Soil moisture, Seasonal scale, LST, NDVI, MODIS, TVDI

1. Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

*: Corresponding Author, Email: reza.jafari@cc.iut.ac.ir