



سجش از دور

GIS ایران



سنجش از دور و GIS ایران / سال نهم، شماره چهارم، زمستان ۱۳۹۶
Iranian Remote Sensing & GIS / Vol.9, No. 4, Winter 2018

۱-۲۲

توسعه شاخص‌های دما/ پوشش گیاهی جهت برآورد رطوبت خاک با استفاده از خطوط هم‌رطوبت به‌دست‌آمده از تصاویر سری زمانی سنجنده MODIS

فرزانه محسنی^{۱*} و مهدی مختارزاده^۲

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی نقشه‌برداری گرایش سنجش از دور، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
۲. دانشیار گروه فتوگرامتری و سنجش از دور دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۸/۱۳

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۵/۱۵



چکیده

رطوبت خاک در فرایندهای تعاملی بین جو و زمین و تغییرات جهانی اقلیم نقش مهمی ایفا می‌کند. در سه دهه گذشته، محققان بسیاری به تعیین رطوبت خاک، با استفاده از داده‌های سنجش از دوری، توجه داشته‌اند. روش‌های مثلثی و دوزنقه‌ای از روش‌های سنجش از دوری‌اند که با ترکیب داده‌های حرارتی و مرئی، شاخصی برای میزان رطوبت را تعیین می‌کنند. یکی از مهم‌ترین موارد تأثیرگذار در دقت این روش‌ها، دقت تعیین لبه‌های خشک و مرطوب در نمودار پراکندگی دما/ پوشش گیاهی است. در نتیجه، ناتوانی در تعیین لبه‌های مذکور، در برخی روزها و شرایط، امکان استفاده از این روش‌ها را محدود می‌کند. هدف این مطالعه مطرح کردن روشی برای تعیین دقیق لبه‌های خشک و اشباع، در تمامی روزها و شرایط، با استفاده از تلفیق داده‌های سری زمانی دما و پوشش گیاهی است. به منظور تحقق این هدف، خطوط هم‌رطوبت به‌منزله خطوطی معرفی می‌شوند که رطوبت در امتداد آن‌ها مقدار ثابتی است و برای تعیین لبه‌های خشک و مرطوب در هر روز به کار رفته‌اند. شاخص میزان رطوبت خاک پیشنهادی برای ۲۸ روز در سال ۲۰۱۴، در منطقه‌ای از شهر مونیوتوبا در کشور کانادا، با استفاده از ویژگی‌های دو خط انتخاب‌شده از میان خطوط هم‌رطوبت به‌دست‌آمده از طریق داده‌های دمای سطح، دمای هوا و شاخص پوشش گیاهی سنجنده MODIS، محاسبه و با استفاده از داده‌های زمینی ایستگاه‌های رطوبت‌سنجی شبکه RISMA واقع در این منطقه، ارزیابی شده است. در تمامی ۲۸ روز، تصویر شاخص پیشنهادی که معرف میزان رطوبت خاک است، به‌منزله خروجی روش پیشنهادی به‌دست آمد. ضریب همبستگی شاخص به‌دست‌آمده با میزان رطوبت خاک در روزهای بدون پوشش گیاهی به ۰/۹۲ رسیده و این مقدار ضریب همبستگی، در روزهای با پوشش گیاهی انبوه، کمتر بوده است.

کلیدواژه‌ها: رطوبت خاک، سنجش از دور، روش مثلثی دما/ پوشش گیاهی، لبه‌های خشک و مرطوب فضای پراکندگی، خطوط هم‌رطوبت.

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: تهران، خیابان ولی عصر، تقاطع میرداماد، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، کد پستی ۱۵۴۴۳-۱۹۹۶۷.

تلفن: ۰۹۳۸۵۵۷۸۸۷۲.

Email: farzanemohseni@gmail.com

۱- مقدمه

هواشناسی استفاده شود. منظور از مدل‌های سنسجش از دوری تلفیق استفاده از نوع خاصی از داده‌های ماهواره‌ای، در کنار الگوریتم پردازش آن‌ها، به منظور تعیین پارامتری محیطی است (Weng, 2009). رطوبت خاک در ویژگی‌های گوناگون خاک از جمله رنگ، درجه تیرگی، آلبیدو، دمای سطح، اختلاف در باندهای جذبی نور، دمای روشنایی، ضریب دی‌الکتریک و پارامترهای دیگر آن اثر می‌گذارد. با توجه به محدودت به کاررفته از طیف امواج الکترومغناطیسی، برخی از این ویژگی‌ها را می‌توان استخراج و با خاک خشک مقایسه کرد؛ در نتیجه، روش‌های سنسجش از دور را، با توجه به داده‌های مورد استفاده، می‌توان به روش‌های مرئی^۱، حرارتی^۲ و میکروویو فعال^۳ و غیرفعال^۴ طبقه‌بندی کرد (Sadeghi et al., 2015; Zhang and Zhou, 2016). از آنجاکه هدف این مقاله تعیین میزان رطوبت خاک با استفاده از داده‌های حرارتی و مرئی است، در ادامه، روش‌ها و مدل‌های موجود در این حوزه‌های سنسجش از دور بیان خواهد شد.

در روش‌های مرئی، بازتابندگی^۵ سطح زمین در طول موج‌های ۰/۴ تا ۲/۵ میکرومتر اندازه‌گیری می‌شود. تحقیقات نشان می‌دهد افزایش میزان رطوبت خاک باعث کاهش میزان بازتابش سطح در تمامی باندهای مرئی می‌شود. برداشت‌های آزمایشگاهی و تصاویر ابرطیفی^۶ ماهواره‌ای این فرضیه را اثبات می‌کنند (Lobell and Asner, 2002). محققان بسیاری، با اندازه‌گیری طول موج‌های متفاوت، برآورد بهترین باندها برای تعیین رطوبت خاک، در نظر گرفتن گونه‌های متفاوت خاک به منظور حذف دیگر ویژگی‌های خاک در تغییر بازتابش سطح، عرضه مدل‌های خطی و غیرخطی گوناگون در ایجاد رابطه بین میزان جذب در باندهای

رطوبت خاک میزان آبی است که در فضای مابین ذرات خاک وجود دارد (Weidong et al., 2002). این رطوبت به دو بخش رطوبت سطحی (رطوبت تا عمق ۱۰ سانتی‌متری) و رطوبت ریشه‌ای (رطوبت تا عمق ۲ متری) تفکیک پذیر است (Weng, 2009). با توجه به بیشینه نفوذ امواج الکترومغناطیسی سنسجنده‌های ماهواره‌ای در خاک، آنچه به منزله رطوبت خاک در سنسجش از دور اندازه‌گیری می‌شود رطوبت تا عمق ۱۰ سانتی‌متری خاک است (Walker, 1999). اطلاعات میزان رطوبت خاک و شیوه توزیع آن در فرایندهای آب‌وهوایی، تغییرات اقلیم، فرایندهای کشاورزی، هیدرولوژیکی، مدیریت کشاورزی و کشت و زرع، مدیریت منابع آبی، نمایش میزان بارندگی، مطالعات آب‌وهوایی، سیکل کربن- نیتروژن، مطالعه روند رشد گیاه، تعیین استرس گیاهی، تعیین میزان تبخیر و تعرق، پیش‌بینی خشکسالی، احتمال تبدیل آب باران به رواناب در پیش‌بینی سیل، تغییرات اقلیمی آب‌وهوا، تخمین امکان آتش‌سوزی، پیش‌بینی آلودگی و بسیاری از شاخه‌های علمی دیگر استفاده می‌شود (Lobell and Asner, 2002; Wang et al., 2007;) (Nichols et al., 2011; Younis and Iqbal, 2015).

روش‌های تعیین رطوبت خاک را می‌توان به دو دسته کلی، روش‌های میدانی و استفاده از روش‌های سنسجش از دوری، طبقه‌بندی کرد (Rowlandson et al., 2013). در اندازه‌گیری میدانی، رطوبت حجمی و یا وزنی خاک در عمق‌های متفاوت زمین، با استفاده از بازوهای تولیدکننده امواج الکترومغناطیسی و اندازه‌گیری تابش دی‌الکتریک خاک، تعیین می‌شود (Rahimzadeh-Bajgiran et al., 2012).

از سال ۱۹۷۰، پیشرفت‌های فناوری در ماهواره‌های سنسجش از دوری این امکان را فراهم کرده تا برای تعیین میزان رطوبت خاک با دقت مکانی، پیوستگی زمانی و صرفه اقتصادی، از مدل‌های سنسجش از دور به صورت جایگزینی مناسب برای روش‌های میدانی و

1. Optical Techniques
2. Thermal Methods
3. Active Microwave Remote Sensing
4. Passive Microwave Remote Sensing
5. reflectance
6. Hyperspectral Image

رطوبت خاک در مناطق با پوشش گیاهی است، از این باندها به تنهایی نمی‌توان در تعیین رطوبت خاک استفاده کرد (Carlson, 2007; Nichols et al., 2011; Zhang and Zhou, 2016).

روش‌های تلفیق داده‌های حرارتی/ مرئی که به روش‌های دما/ پوشش گیاهی مشهورند، با ترکیبی از شاخص‌های پوشش گیاهی به‌دست‌آمده از باندهای مرئی و اندازه‌گیری‌های حرارتی، در نمودار پراکندگی دما/ پوشش گیاهی، شاخصی برای میزان رطوبت را تعیین می‌کنند (Carlson et al., 1995). استفاده از ایده‌ی دمای سطح/ شاخص پوشش گیاهی به سال ۱۹۹۳ برمی‌گردد. با استفاده از اطلاعات دمایی و پوشش گیاهی، شاخص‌های متفاوتی برای تعیین میزان رطوبت خاک به‌وجود آمدند. از میان این شاخص‌ها، می‌توان به شاخص استرس پوشش گیاهی (CWSI)^۴، شاخص میزان آب (WDI)^۵، شاخص آب گیاه (VWI)^۶ و شاخص خشکی دما/ پوشش گیاهی (TVDI)^۷ اشاره کرد (Maki et al., 2004; Wang et al., 2004; Patel et al., 2009; Rahimzadeh-Bajgirani et al., 2012; Mobasheri and Amani, 2016).

استفاده از تلفیق داده‌های حرارتی و مرئی، با وجود قدرت تفکیک مکانی مناسب و حساسیت خوب به میزان رطوبت خاک، معایبی دارد که استفاده از این روش‌ها را محدود می‌کند. در این مقاله، سعی شده است که با استفاده از تلفیق داده‌های حرارتی و مرئی و کاهش محدودیت استفاده از آنها، شاخصی برای میزان رطوبت خاک نشان داده شود. در ادامه، تحقیقات اخیر انجام‌شده در این روش‌ها بررسی و مزایا و محدودیت‌های آن‌ها توضیح داده خواهد شد.

جذبی آب و میزان رطوبت خاک و استفاده از ماهواره‌ها و باندهای گوناگون، در تعیین میزان رطوبت از داده‌های مرئی تلاش کردند (Bowers and Smith, 1972; Stoner et al., 1980; Lobell and Asner, 2002; Weidong et al., 2002; Whiting et al., 2004).

در این روش، گاه امکان تخمین تأثیر عواملی که حوزه‌ی مرئی به آن حساس است وجود ندارد و این موضوع تعیین رطوبت خاک را دچار مشکل می‌کند. وجود پوشش گیاهی، نوع کانی‌های موجود در خاک، شرایط متفاوت آب‌وهوایی، دمای هوا، فشار بخار آب موجود در جو، سرعت باد و عوامل دیگر این روش را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. از سویی، در مقایسه با باندهای حرارتی و میکروویو غیرفعال، تأثیر میزان رطوبت خاک در باندهای مرئی کمتر است (Piles et al., 2011; Sánchez-Ruiz et al., 2014).

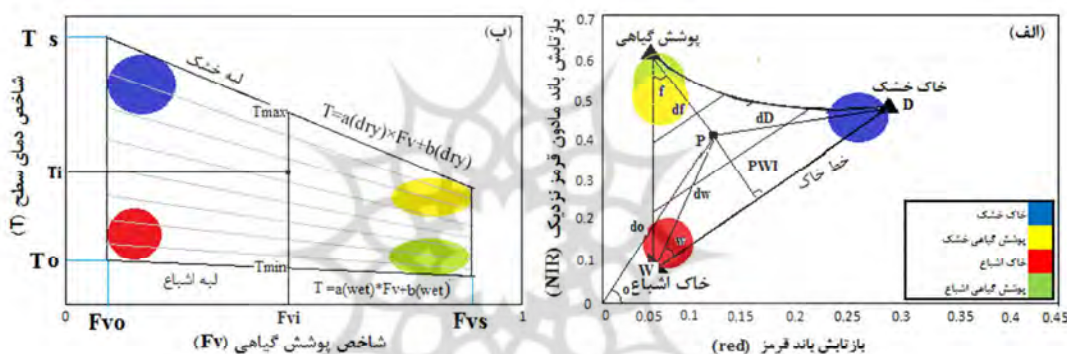
در حوزه سنجش از دور حرارتی، دمای سطح برای تعیین میزان رطوبت نسبی خاک اندازه‌گیری می‌شود. این پارامتر، در واقع، میزان انرژی حرارتی ساطع شده^۱ از سطح زمین و خاک، در طول موج بین ۳۵۰ تا ۱۴۰۰ نانومتر است. ایده استفاده از این حوزه امواج الکترومغناطیسی این است که میزان گسیلندگی^۲ سطح، اینرسی حرارتی^۳ خاک، کسر تبخیر و تعرق خاک به تبخیر و تعرق پتانسیل بسیار متأثر از میزان رطوبت موجود در سطح هستند. تا کنون مدل‌های گوناگونی به منظور تعیین اینرسی خاک، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، اختلاف دمای هوا و دمای سطح به‌دست‌آمده از این تصاویر، تعیین تبخیر و تعرق ایجاد رابطه بین این پارامترها و میزان رطوبت، مطرح شده است (Bastiaanssen, 2000; Tramutoli et al., 2000; Liu et al., 2002; Verstraeten et al., 2006; Yan et al., 2006; Leng et al., 2015).

روش‌هایی که فقط از باندهای حرارتی برای تعیین میزان رطوبت خاک استفاده می‌کنند، اغلب در مناطق بدون پوشش گیاهی، دارای دقت مطلوب‌اند و با افزایش پوشش گیاهی، دقت این روش‌ها بسیار کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه بسیاری از کاربری‌های تعیین میزان

1. emission
2. emissivity
3. thermal inertia
4. Crop Water Stress Index
5. Water Deficit index
6. Vegetation Water Index
7. Temperature Vegetation Dryness Index

به‌دست آوردند. در این مدل، خط خاک به‌منزله خطی تعیین و محاسبه شد که پیکسل‌های نزدیک به آن بدون پوشش گیاهی‌اند و نیز، با استفاده از آن و نقطه جایگیری پیکسل‌هایی با بیشترین پوشش گیاهی به‌منزله رأس مثلث، پارامترهای موقعیتی هر پیکسل محاسبه شد. همچنین، با تلفیق پارامترهای موقعیتی هر پیکسل در نمودار پراکندگی باند قرمز/ مادون‌قرمز نزدیک و پارامتر دمای سطح به‌دست‌آمده از باندهای حرارتی سنجنده لندست، رابطه دیگری از میزان رطوبت خاک به‌دست آوردند (Mobasheri and Amani, 2016).

۱-۱- تخمین رطوبت خاک با استفاده از فضای پراکندگی بازتابش باندهای قرمز و مادون‌قرمز نزدیک
با بررسی رفتار بازتابش خاک در باندهای مرئی قرمز و مادون‌قرمز، می‌توان به این نتیجه رسید که پیکسل‌های موجود در تصویر با توجه به میزان رطوبت، میزان پوشش گیاهی، بافت خاک و برخی عوامل مؤثر دیگر در نمودار پراکندگی باند قرمز/ مادون‌قرمز نزدیک، در بخش مثلث‌شکلی، مانند شکل ۱- الف قرار خواهند گرفت (Amani and Mobasheri, 2015; Mobasheri and Amani, 2016).



شکل ۱. الف) نحوه توزیع پیکسل‌های تصویر در نمودار پراکندگی بازتابش باندهای قرمز و مادون قرمز نزدیک (Amani et al., 2016)؛ ب) نحوه توزیع پیکسل‌های تصویر در نمودار پراکندگی دما/ پوشش گیاهی (Merlin et al., 2012)

در این روش، برای ایجاد ارتباط بین پارامترهای موقعیتی تعیین‌شده از نمودار و میزان رطوبت، به داده‌های رطوبت زمینی نیاز است. همچنین، ضرایب تعیین‌شده برای هر یک از پارامترها ممکن است، در روزهای متفاوت، با هم فرق کند و تأثیر پارامترهای گوناگون، در روزهای متفاوت، چه بسا تغییر داشته باشد. از سویی، برای تعیین این پارامترها، حتماً به وجود خاک‌های بدون پوشش گیاهی در حالت خشک و مرطوب نیاز است تا خط خاک تشکیل شود. همچنین باید در همان روز، در منطقه، پوشش گیاهی کامل وجود داشته باشد که این شرایط ممکن است در بسیاری از روزها اتفاق نیافتد.

ژان و همکاران^۱ (۲۰۰۷)، با استفاده از توزیع پیکسل‌ها در فضای پراکندگی بازتابش باندهای قرمز و مادون‌قرمز نزدیک، شاخص ساده‌ای از میزان رطوبت خاک در شرایط خاک بدون پوشش گیاهی را تعیین کردند و رابطه بین شاخص به‌دست‌آمده و میزان رطوبت خاک را برای منطقه مورد مطالعه و روزهای مورد بررسی بیان داشتند. امانی و مباحثی^۲ (۲۰۱۵)، با بیان جایگیری خاک‌هایی با شرایط متفاوت رطوبتی در نمودار بازتابش باند قرمز/ مادون‌قرمز نزدیک، همانند مناطق مشخص‌شده در شکل ۱- الف با رنگ‌های متفاوت، پارامترهای موقعیتی موجود در فضای پراکندگی برای هر پیکسل و داده‌های زمینی میزان رطوبت را اندازه‌گیری و رابطه‌ای بین آن‌ها

1. Zhan et al.
2. Amani and Mobasheri

۱-۲- تخمین رطوبت خاک با استفاده از نمودار

شاخص‌های دما/ پوشش گیاهی

استفاده از روش دما/ پوشش گیاهی، براساس تغییر دمای سطح، تابعی از میزان رطوبت و پوشش گیاهی محسوب می‌شود. در خاک خشک، دمای خاک از دمای جو اطرافش بیشتر است. با افزایش میزان گیاهان موجود در یک پیکسل زمینی، میزان دمای سطح زمین کم می‌شود زیرا برگ گیاهان گرما را برای تعرق جذب می‌کنند و این باعث ایجاد رابطه شیبدار معکوسی بین دمای سطح زمین (T_s)^۱ و شاخص نسبت پوشش گیاهی (F_V)^۲ می‌شود (Carlson et al., 1995; Nemani et al., 1993; Gillies et al., 1997). این بخش همان لبه خشک در فضای T_s/F_V در شکل ۱-ب است. اگر میزان رطوبت خاک بر اثر بارندگی بیشتر شود، میزان زیادی از نور خورشید صرف تبخیر آب موجود در خاک می‌شود و در نتیجه، دمای سطح زمین و دمای برگ درختان تفاوت چندانی با هم ندارند. این باعث ایجاد رابطه‌ای نسبتاً صاف و بدون شیب تند بین T_s و F_V می‌شود که همان لبه مرطوب در شکل ۱-ب است. درواقع، در نمودار پراکندگی دما/ پوشش گیاهی، پیکسل‌های تصویر با میزان تابش یکسان خورشید، با هر شرایط پوشش گیاهی و میزان رطوبت، در فضایی مانند شکل ۱-ب قرار می‌گیرد که لبه‌های آن حالات خشک و اشباع خاک است (Zhang et al., 2014). خاک‌هایی با پوشش گیاهی صفر تا انبوه، با یک میزان رطوبت خاص، با شیب منحصر به فردی در این نمودار قرار می‌گیرند. یعنی برای هر خط با شیب مشخص، می‌توان میزان رطوبت خاصی را در نظر گرفت. یکی از شاخص‌های تعریف شده با استفاده از نمودار پراکندگی دما/ پوشش گیاهی، شاخص TVDI است (Wang et al., 2004; Wang and Qu, 2009; Patel et al., 2009). شاخص TVDI از طریق رابطه (۱) و با توجه به پارامترهای خطوط شکل ۱-ب محاسبه می‌شود.

$$\text{TVDI} = \frac{T_{s\max} - T_i}{T_{s\max} - T_{s\min}} \quad (1)$$

در این رابطه، T_i دمای پیکسل مورد نظر با مقدار

شاخص پوشش گیاهی خاص در لحظه برداشت تصویر و $T_{s\min}$ و $T_{s\max}$ کمترین و بیشترین دمای ممکن برای شاخص پوشش گیاهی خاص است (Sandholt et al., 2002). در نمودارهای پراکندگی دما/ پوشش گیاهی، می‌توان از شاخص NDVI همچون شاخص پوشش گیاهی (F_V) استفاده کرد.

مقادیر عددی شاخص TVDI و تمامی شاخص‌هایی که با استفاده از روش مثلثی و لبه‌های خشک و مرطوب به دست آمده از آن محاسبه می‌شوند به فاصله پیکسل از لبه‌های خشک و مرطوب و فاصله این دو لبه از هم ربط دارد زیرا، در مقدار خاصی از پوشش گیاهی، این فواصل میزان تبخیر و تعرق پیکسل را به تبخیر و تعرق پتانسیل، که تابعی از میزان رطوبت موجود در پیکسل است، نشان می‌دهد (Wang et al., 2004; Merlin et al., 2008; Wang and Qu, 2009). در نتیجه، برای استفاده از روش‌های بالا در نمودار پراکندگی، نیاز به داشتن حالاتی است که لبه‌های نمودار را تشکیل می‌دهد. یعنی باید خاک بدون پوشش گیاهی در حالت خشک و اشباع و انبوه پوشش گیاهی در حالت بدون استرس و با استرس آبی وجود داشته باشد تا لبه‌ها به خوبی تعیین شوند. دقت تعیین لبه‌های خشک و مرطوب تأثیر مستقیم در دقت شاخص به دست آمده خواهد داشت (Merlin et al., 2008; Petropoulos et al., 2009; Zhang and Zhou, 2016).

رحیم‌زاده و همکاران^۳ (۲۰۱۲)، با افزایش مساحت منطقه مورد مطالعه، امکان وجود شرایط متفاوت پوشش گیاهی و رطوبت را افزایش دادند و برای از بین رفتن تأثیر اختلاف دمای هوا در مناطق دارای توپوگرافی متفاوت، از اختلاف دمای هوا و سطح به جای دمای سطح استفاده کردند.

ژانگ و همکاران^۴ (۲۰۱۴)، با بیان این موضوع که لبه‌های تعیین شده در حالت استفاده از نمودار

1. Surface Temperature
2. Vegetation Fraction
3. Rahimzadeh-Bajgiran et al.
4. Zhang et al.

ندارد و پیکسل‌ها، به‌صورت پراکنده، در فضای نمودار پراکندگی دما/ پوشش گیاهی قرار دارند. در نتیجه، تشخیص لبه خشک و مرطوب بسیار سخت است. افزون بر این، در روزهایی از سال، فقط بخشی از نمودار تشکیل می‌شود؛ مثلاً در روزهای رشد گیاهان که پیکسل خاک بدون پوشش گیاهی در منطقه وجود ندارد، سمت راست نمودار شکل ۱- ب تشکیل نمی‌شود که این موضوع تعیین لبه را با مشکل مواجه می‌کند. از سویی، بزرگ کردن منطقه موجود در تصویر، به‌منظور ایجاد شرایط متفاوت پوشش گیاهی و رطوبت، باعث ایجاد خطایی ناشی از تغییرات تابش خورشید، مقاومت آیرودینامیکی هوا و تغییر دمای هوا با تغییر توپوگرافی می‌شود؛ در نتیجه، خطای شاخص تولیدشده را بسیار افزایش می‌دهد. با تعریف لبه‌های خشک و اشباع درست در روزهای متفاوت در منطقه‌ای کوچک، با فرض ثابت بودن تابش خورشید، دمای هوا و برخی پارامترهای محیطی دیگر، شاخص به‌دست‌آمده از نمودار پراکندگی دما/ پوشش گیاهی با دقت بالایی میزان نسبی رطوبت خاک را تخمین می‌زند.

با توجه به توضیحات بیان‌شده از مزایا و محدودیت‌های روش‌های پیشین، هدف این مقاله طرح روشی برای تعیین گوشه‌های خاک خشک، خاک اشباع، پوشش‌های گیاهی بدون استرس آبی و پوشش گیاهی خشک در نمودار پراکندگی دما/ پوشش گیاهی، به‌منظور بهبود شرایط لازم برای تعیین تبخیر و تعرق نسبی هر روز و تخمین میزان رطوبت خاک با استفاده از آن است. در این مقاله، از مفهومی با عنوان خط هم‌رطوبت، به‌منزله خطوطی از نمودار دما/ پوشش گیاهی که رطوبت در آن مقدار یکسانی است، برای محاسبه شاخص رطوبت خاک استفاده شده است. از آنجاکه لبه‌های خشک و مرطوب در منطقه برای تعیین میزان تبخیر و همچنین، تعرق و تبخیر و دقیق پتانسیل به‌کار می‌روند، تعیین شیب و جایگیری دقیق خطوط خشک و مرطوب در هر روز با استفاده از خطوط هم‌رطوبت آن روز به‌دست می‌آید. با حذف

پراکندگی دما/ پوشش گیاهی در یک منطقه ممکن است دقیق‌ترین لبه و خشک‌ترین و مرطوب‌ترین حالت نباشند، لبه‌های فرضی را با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی شبیه‌سازی کردند. این داده‌ها شامل سرعت باد، دما، رطوبت هوا، میزان تابش، شاخص پایداری جو و مقاومت آیرودینامیکی سطح می‌شود که ممکن است به‌راحتی برای تمامی مناطق در دسترس نباشد.

به‌تازگی، با استفاده از شاخص‌های به‌دست‌آمده، برای تعیین میزان رطوبت خاک و ایجاد ارتباط بین تصاویر مایکروویو فعال و غیرفعال با میزان رطوبت خاک، از نمودار یادشده به‌منزله کسر تبخیر و تعرق در مطالعات بسیاری استفاده شده است. تفاوت این مطالعات در شاخص پوشش گیاهی مورد استفاده شیوه محاسبه لبه‌های خشک و مرطوب و حذف خطا از داده‌های دمای سطح سنجنده ماهواره‌ای است (Merlin et al., 2008; Piles et al., 2010; Sánchez- Ruiz et al., 2014; Djamaï et al., 2016).

دقت تعیین شاخص حاصل از نمودارهای پراکندگی دما/ پوشش گیاهی و بازتابش باندهای قرمز و مادون‌قرمز نزدیک مرتبط با دقت تعیین لبه‌های خشک و مرطوب است (Zhang et al., 2015). همان‌گونه‌که اشاره شد، تمامی پیکسل‌ها در حالات بدون پوشش تا پوشش انبوه، با میزان تبخیر و تعرق یکسان، به‌منزله شاخصی برای میزان رطوبت خاک، روی خطی با شیب و جایگیری منحصر به‌فرد در نمودار پراکندگی دما/ پوشش گیاهی قرار می‌گیرند که میزان رطوبت آن‌ها طبق فاصله از خط خشک و خط مرطوب روز مورد نظر در تصویر مشخص می‌شود. هرچه فاصله از خط خشک بیشتر باشد، خاک مرطوب‌تر است. بنابراین، اگر شیب و جایگیری لبه‌های خشک و مرطوب درست نباشد، نمی‌توان طبق نمودار پراکندگی دما/ پوشش گیاهی میزان رطوبت را تعیین کرد (Zhang et al., 2015).

در بسیاری از شرایط آب‌وهوایی و در بسیاری از مناطق، امکان وجود خاک در یک شیب مشخص وجود

داده‌های زمینی مربوط به پروژه SMAPVEX12، از تاریخ ۶ ژوئن تا ۱۷ ژوئیه سال ۲۰۱۲، مشاهده شود. پروژه مذکور تصویر طبقه‌بندی شکل ۲ را به صورت داده اولیه در اختیار استفاده‌کنندگان اطلاعات رطوبت خاک ایستگاه‌های زمینی قرار داده است (Djamai et al., 2016). این منطقه شامل ۳۲/۲٪ زمین‌های محصولات غلات، ۱۳/۲٪ زمین‌های کانولا، ۷٪ زمین‌های ذرت، ۶/۷٪ زمین‌های سویا و باقی مناطق شامل ۱۶/۴٪ مرتع و زمین‌های چمنی است. مربع‌های مشخص شده با رنگ قرمز در این شکل محل قرارگیری ایستگاه‌های رطوبت‌سنجی‌اند (McNair et al., 2015).

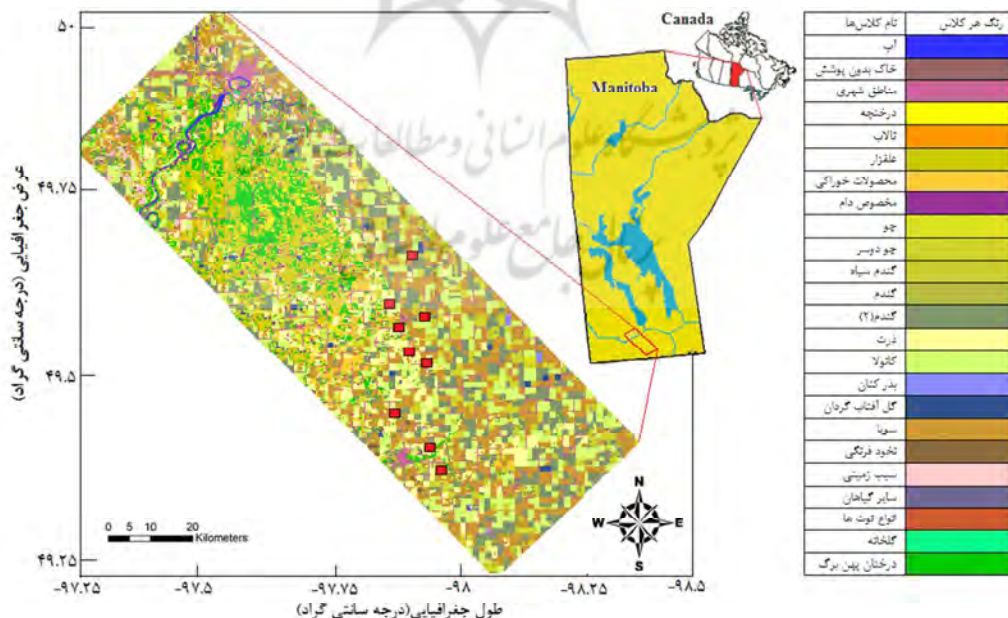
انتخاب این منطقه چند دلیل داشت. این منطقه دارای تغییرات گوناگون نوع خاک و پوشش گیاهی است که باعث می‌شود تأثیر بافت خاک و نوع عوارض پوشش گیاهی در نتایج حاصل قابل بررسی باشد و نیز، دامنه وسیعی از تغییرات میزان رطوبت خاک را در روزهای متفاوت داشته باشد (McNair et al., 2015).

محدودیت تعیین دقیق لبه‌های خشک و اشباع، می‌تواند انتظار داشت شاخص به دست آمده به منزله کسر تبخیر و تعرق نماینده بهتری برای میزان رطوبت خاک باشد.

در ادامه مقاله و در بخش دوم، ویژگی‌های منطقه مورد مطالعه و توضیحی درباره داده‌های مورد استفاده بیان شده است. در بخش سوم، روش پیشنهادی تحلیل و توضیح داده می‌شود. بخش چهارم نتایج اجرای روش پیشنهادی مطرح و در مورد آن بحث می‌شود. بخش پنجم مربوط به نتیجه‌گیری، جمع‌بندی و پیشنهادها برای مطالعات آبی است.

۲- منطقه مورد مطالعه

در این تحقیق، شبکه رطوبت‌سنجی RISMA در کشور کانادا و جنوب مرکزی شهر مونتوبیا، با مرکزی به موقعیت جغرافیایی $98^{\circ} 0' 23''$ غربی و $49^{\circ} 48' 40''$ شمالی، به منزله منطقه مورد مطالعه انتخاب شده است (Hosseini and McNair, 2017). در شکل ۲، تصویر هوایی طبقه‌بندی شده‌ای از منطقه در بازه برداشت



شکل ۱. تصویر طبقه‌بندی از منطقه مورد مطالعه

۲-۱ داده‌های زمینی رطوبت خاک

اندازه‌گیری‌های زمینی رطوبت، در این شبکه، با استفاده از سه دستگاه رطوبت‌سنج II Hydro prob با نام‌های A، B و C، با پیکره‌بندی چهارگانه در عمق‌های ۵، ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متر، تولید می‌شوند. این سه دستگاه تفاوتی با هم ندارند و علت استفاده از سه حسگر فقط افزایش تعداد نمونه‌ها و دقت در اندازه‌گیری است. در این دستگاه‌ها، سیگنال الکترومغناطیسی با فرکانس ۵۰ مگاهرتز از یک اسیلاتور تولید و از طریق بازوی سه‌گانه فلزی، به خاک منتقل می‌شود. میزان سیگنال برخورد کرده و بازگشت داده‌شده اندازه‌گیری و میزان رطوبت خاک تخمین زده می‌شود. این حسگرها، در بازه‌های یک‌ساعته، رطوبت حجمی خاک را با دقت بیشتر از ۰.۴٪ حجمی اندازه‌گیری می‌کنند (Rowlandson et al., 2013).

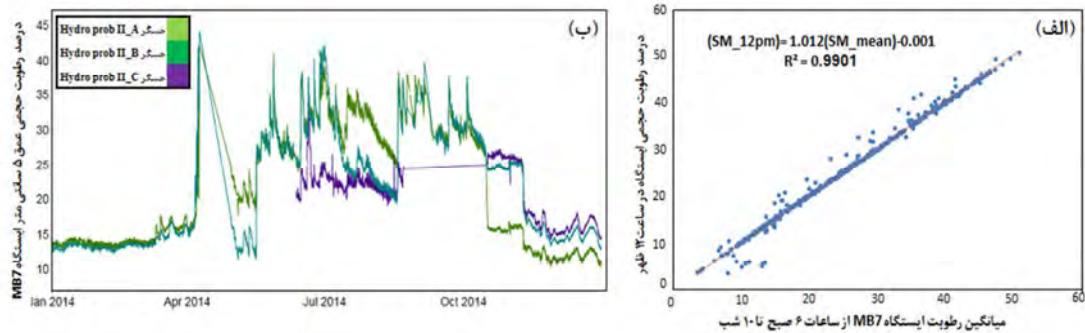
در مطالعات قبلی، برای ارزیابی دقت روش، از داده‌های رطوبت خاک در زمانی استفاده می‌کردند که سنجنده ماهواره‌ای از محل تصویربرداری می‌کند. شکل ۳- الف میزان همبستگی بین میانگین داده‌های رطوبت خاک یک ایستگاه، از ساعت ۶ صبح تا ۱۰ شب، و رطوبت در ساعت ۱۲ ظهر را، به مدت ۱۰ روز تصادفی از سال ۲۰۱۴، نشان می‌دهد. نمودار موجود در شکل ۳- الف بیان می‌کند که رطوبت میانگین روزانه، با ضریب همبستگی $R=99\%$ ، با میزان رطوبت خاک ساعت ۱۲ ظهر در عمق ۵ سانتی‌متر مرتبط است. از آنجا که ساعت ۱۲ ظهر ساعت میانی روز است، می‌توان نتیجه گرفت تغییرات میزان رطوبت خاک برای یک ایستگاه زمینی در یک روز بسیار ناچیز است؛ به طوری که رطوبت روزانه عمق ۵ سانتی‌متری خاک را می‌توان پارامتری نسبی و تقریباً ثابت در طول روز دانست. بنابراین، برای ارزیابی مدل پیشنهادی، لازم نیست از رطوبت در لحظه عبور ماهواره از منطقه استفاده کرد زیرا در بسیاری از ایستگاه‌ها، در لحظه عبور ماهواره، میزان رطوبت زمینی ثبت نشده است. با توجه به این توضیحات، در این مطالعه برای ارزیابی شاخص معرفی شده، به جای استفاده از داده‌های زمینی

رطوبت خاک منطقه در لحظه عبور ماهواره، از داده‌های رطوبت خاک عمق ۵ سانتی‌متر در ساعت ۱۲ ظهر استفاده شده است. همچنین، برای تشکیل مدل پیشنهادی، دمای هوای مربوط به میانگین ساعات ۱۰ و ۱۱ صبح ایستگاه‌های هواشناسی به کار رفته است.

همان‌گونه که اشاره شد، در هر ایستگاه، سه حسگر متفاوت A، B و C اندازه‌گیری رطوبت خاک را انجام می‌دهند. ماهیت اندازه‌گیری در این سه حسگر تفاوتی با هم ندارد اما، در برخی روزها، رطوبت ثبت شده از طریق آنها به شدت با هم متفاوت است. چون هیچ اطلاعاتی از بهترین دقت برداشت داده از هر یک از حسگرها در دسترس نیست، در این مقاله، برای تعیین رطوبت یک نقطه، فقط از اندازه‌گیری‌های حسگر A به صورت تصادفی استفاده شده است. همچنین این حسگر، برخلاف حسگر C، در تمامی بازه سال ۲۰۱۴ اطلاعات رطوبت خاک را گزارش می‌دهد که این موضوع انتخاب A را در مقایسه با C توجیه می‌کند. شکل ۳- ب اختلاف بین میزان رطوبت‌های ثبت شده از عمق ۵ سانتی‌متر با حسگرهای A، B و C را، طی سال ۲۰۱۴، برای یکی از ایستگاه‌های موجود در منطقه نشان می‌دهد. اختلاف مشاهده شده به این معناست که هر یک از ایستگاه‌ها، در برخی روزها، ممکن است دارای خطایی در اندازه‌گیری رطوبت باشند. این موضوع می‌تواند یکی از منابع تولید خطا در نظر گرفته شود.

۲-۲- تصاویر ماهواره‌ای

به منظور تحقق هدف مطالعه، که تعیین لبه‌های صحیح خشک و اشباع است، به وجود خاک در حالت خشک و اشباع و پوشش گیاهی در حالت استرس آبی و با بیشترین تبخیر و تعرق نیاز است تا خطوط و گوشه‌های نمودار پراکندگی، که برای تعیین میزان رطوبت خاک به کار می‌رود، تکمیل شود. بدین منظور، داده‌های دمای سطح تولیدشده از طریق سنجنده MODIS Terra (MOD11A1)، در بازه سال ۲۰۱۴، به کار رفته است. این تولیدات دمای سطح را، در لحظه عبور ماهواره در



شکل ۳. الف) نمودار ارتباط بین رطوبت اندازه‌گیری شده در ساعت ۱۲ ظهر و میانگین رطوبت خاک از ساعات ۶ صبح تا ۱۰ شب؛ ب) رطوبت‌های ثبت شده با حسگرهای A، B و C در بازه سال ۲۰۱۴ در ایستگاه MB07

۳- روش پیشنهادی

در مقدمه، اشاره شد که در بسیاری از شرایط آب‌وهوایی و در بسیاری از مناطق، امکان توزیع پیکسل‌های تصویر در یک خط مشخص در نمودار پراکندگی دما/ پوشش گیاهی وجود ندارد و پیکسل‌ها، به‌صورت پراکنده، در فضای نمودار پراکندگی دما/ پوشش گیاهی قرار می‌گیرند؛ در نتیجه، تشخیص لبه خشک و مرطوب بسیار سخت است. از سویی، امکان دارد پیکسل‌هایی با چهار شرط ویژه برای تولید لبه‌ها در منطقه وجود نداشته باشند.

در صورت وجود پیکسل‌های کاملاً خاکی در منطقه، در نمودار فضای پراکندگی بازتابش باند قرمز و مادون قرمز، انتظار می‌رود لبه معرف خط خاک کاملاً تشکیل شود (نک: «خط خاک» در مقاله: Mobasher and Amani, 2016). شکل ۴- الف نمودار پراکندگی بازتابش قرمز/ مادون قرمز را برای منطقه مورد نظر، در ۲۸ ژوئیه ۲۰۱۴، نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، با توجه به رشد گیاهان در این بازه سال، خط خاک در این تصویر وجود ندارد. شکل ۴- ب نمودار پراکندگی مذکور در منطقه را، برای روز ۱۳ آوریل ۲۰۱۴، نشان می‌دهد که با توجه به نبود پوشش گیاهی در منطقه، خط خاک تشکیل شده است اما لبه انبوه پوشش گیاهی در نمودار وجود ندارد. شکل ۴- ج این نمودار را برای تصویر برفی روز ۲۰ دسامبر ۲۰۱۴

ساعات ۱۰:۳۰ صبح و ۱۰:۳۰ شب، با قدرت تفکیک مکانی یک کیلومتر، در اختیار کاربران قرار می‌دهند. برای تمامی روزهای سال، تصاویر دمای سطح دانلود و بررسی شد.

تولیدات هشت‌روزه بازتابش‌های باند قرمز و باند مادون قرمز نزدیک سنجنده مادیس (MOD09A1)، با قدرت تفکیک مکانی ۰/۵ کیلومتر، دانلود و برای محاسبه شاخص NDVI و نیز تشکیل نمودار پراکندگی باند قرمز/ مادون قرمز، به‌منظور نمایش نبود پیکسل‌های مرزی در تمامی روزها، استفاده شده است.

از تولیدات شانزده‌روزه آلبیدوی سطح (MOD43B3)، با قدرت تفکیک مکانی ۰/۵ کیلومتر، به‌منظور جداسازی پیکسل‌هایی دارای پوشش برف (پیکسل‌هایی با آلبیدوی بالا و جایگیری پایین‌تر از خط خاک در نمودار پراکندگی باندهای قرمز/ مادون قرمز و نیز NDVI و Ts بسیار کم و جدا شده در نمودار دما/ پوشش گیاهی)، دانلود و استفاده شده است.

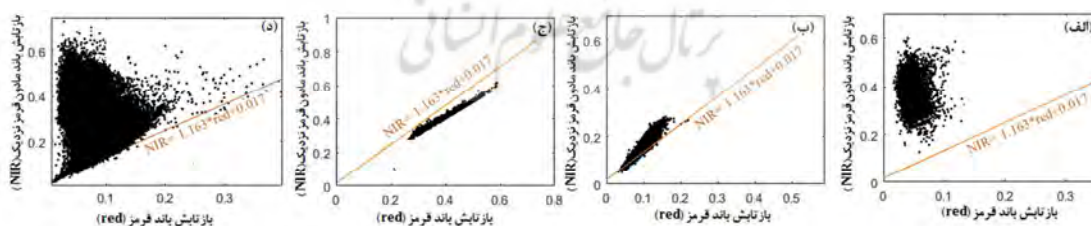
پس از بازکردن تصاویر، با استفاده از ابزار مربوط به تولیدات سنجنده مادیس (MODIS toolkit) در نرم‌افزار ENVI، و انتخاب سیستم تصویر lat/lon به‌منظور نمونه‌برداری دوباره و زمین مرجع کردن تصاویر، برای یکپارچه‌سازی تمامی داده‌ها، قدرت تفکیک مکانی تمامی تصاویر به یک کیلومتر تبدیل شد.

پوشش گیاهی، نمی‌توان از داده‌های دمای سطح خاک (LST)^۱ استفاده کرد زیرا، در روزهای متفاوت، اختلاف حرارت سطح ممکن است ناشی از عواملی همچون دمای هوا و میزان متفاوت تابش خورشید باشد که این موضوع فرض تابش یکسان در پیکسل‌های موجود در تشکیل نمودار پراکندگی دما/ پوشش گیاهی را، برای تولید شاخص رطوبت، برهم می‌زند.

در این مطالعه، برای از بین بردن تأثیر اختلاف دمای هوا و تابش نور خورشید در روزهای متفاوت یک سال، به جای استفاده از دمای سطح خاک به‌منزله فاکتور دمایی، از اختلاف دمای سطح و دمای هوا استفاده شده است؛ با این فرض که خاک‌هایی با میزان رطوبت بیشتر اختلاف دمای کمتری با میزان دمای هوا دارند و هرچه خاک خشک‌تر باشد، این اختلاف بیشتر می‌شود. این مناطق، به ترتیب، منطقه قرمز و منطقه آبی شکل ۱-ب هستند. برای پوشش گیاهی هم، در حالت بدون استرس آبی، دمای پیکسل برابر دمای هوای منطقه است؛ یعنی اختلاف دما تقریباً صفر است و در حالت همراه با استرس آبی، در پوشش گیاهی، این اختلاف اندکی بیشتر می‌شود اما به حالت خاک بدون پوشش نمی‌رسد. این مناطق، به ترتیب، با رنگ سبز و زرد در شکل ۵-ب مشخص شده‌اند.

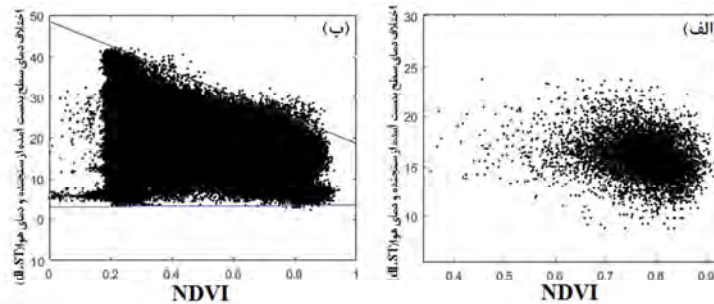
نمایش می‌دهد که، با توجه به ماهیت بازتابندگی برف، جایگیری این پیکسل‌ها پایین‌تر از خط خاک است. این حالت، برای روزهایی که دمای هوا کمتر از صفر درجه سانتی‌گراد است، دیده می‌شود. در نتیجه، در تمامی روزهای ذکر شده، سه حالت خاک خشک و اشباع و پوشش گیاهی در کنار هم وجود ندارد. اگر نمودار پراکندگی بازتابش قرمز/ مادون قرمز بازه یکساله، برای روزهای بدون برف و ابر در سال ۲۰۱۴، تشکیل شود؛ خواهیم دید شکل مثلی پیش فرض در نمودار پراکندگی ذکر شده کاملاً تشکیل خواهد شد (شکل ۴-د).

توضیحات بیان شده درباره نمودار فضای پراکندگی بازتابش باند قرمز/ مادون قرمز نزدیک، برای نمودار فضای پراکندگی دما/ پوشش گیاهی نیز صادق است. اگر نمودار پراکندگی دما/ پوشش گیاهی برای روزهای بازه رشد گیاهان رسم شود، لبه‌های خشک و مرطوب، در حالت خاک انبوه تا بدون پوشش، تشکیل نخواهند شد. شکل ۵-الف این نمودار را، برای روز ۲۸ ژوئیه ۲۰۱۴، نشان می‌دهد. میانگین شاخص پوشش گیاهی NDVI در این روز ۰/۷۸ است و با توجه به نبود خاک بدون پوشش گیاهی، لبه‌ها به درستی تشکیل نشده است. برای ادغام اطلاعات روزهای متفاوت یک سال، به منظور کامل کردن شکل نمودار پراکندگی دما/



شکل ۴. الف) فضای پراکندگی بازتابش باند قرمز/ مادون قرمز برای روزی با پوشش گیاهی انبوه و بدون خاک در منطقه؛ ب) فضای پراکندگی ذکر شده در روز بدون پوشش گیاهی؛ ج) فضای پراکندگی ذکر شده در روز برفی؛ د) فضای پراکندگی ایجاد شده با استفاده از تصاویر سری زمانی بازه یکساله بدون ابر و برف در منطقه

1. Land Surface Temperature



شکل ۵. الف) نمودار فضای پراکندگی اختلاف دمای سطح از زمین، برای روز ۲۸ ژوئیه، با پوشش گیاهی انبوه در منطقه؛ ب) نمودار فضای پراکندگی ذکر شده برای تصاویر بازه یکساله ۲۰۱۴، در روزهای بدون برف و ابر و خطوط خشک و اشباع در آن؛ ج) خطوط هم‌رطوبت تولید شده با استفاده از نمودار بخش (ب)

برای تعیین لبه‌های خشک و مرطوب روز ژام، ابتدا باید خطوط هم‌رطوبت پیش‌فرض تعیین شود. خطوط هم‌رطوبت خطوطی‌اند که میزان رطوبت خاک در آنها برابر و، در نتیجه، میزان شاخص TVSMI نیز روی این خطوط برابر است. برای تولید این خطوط، ابتدا محور $NDVI=1$ به بخش‌های مساوی میان خطوط لبه اشباع و خشک تقسیم و برای نقاط تعیین شده، میزان شاخص TVSMI، با استفاده از دو لبه اصلی اشباع و خشک، محاسبه می‌شود. نقاط متناظر آنها روی خط $NDVI=0$ نقاطی‌اند که TVSMI در آنها برابر با میزان این شاخص در نمودار $NDVI=1$ بوده است. با یافتن نقاط متناظر و وصل کردن این نقاط به هم، خطوط هم‌رطوبت تشکیل می‌شوند. با تشکیل نمودار پراکندگی برای هر روز و تعیین اینکه پیکسل‌های روز مورد نظر به کدام‌یک از خطوط هم‌رطوبت نزدیک‌تر است، لبه خشک و مرطوب برای آن روز به دست می‌آید. با این روش، محدودیت تولید لبه‌های خشک و مرطوب، در روزهایی که تمامی بخش مثلثی نمودار دما/ پوشش گیاهی تشکیل نمی‌شود و یا روزهایی که فضای پراکندگی تشکیل شده شباهتی به مثلث ندارد، از بین می‌رود.

برای هریک از روزها، از بین خطوط هم‌رطوبت تولید شده، دو خط بالایی و پایینی متصل به محدوده پیکسل‌های آن روز به منزله لبه‌های خشک و مرطوب

با این توضیحات و با استفاده از اطلاعات اختلاف دمای سطح و دمای هوا و نیز شاخص پوشش گیاهی NDVI، برای روزهای بدون ابر در بازه سال ۲۰۱۴، به نمودار کامل شکل ۵- ب خواهیم رسید. در بازه یکساله، تمامی حالات رشد پوشش گیاهی، از بدون پوشش گیاهی تا پوشش گیاهی انبوه، به وجود می‌آید؛ در نتیجه، محور افقی نمودار پراکندگی کاملاً تشکیل می‌شود. همچنین، در این بازه، رطوبت زمینی تغییرات گسترده‌ای می‌کند و این باعث تغییر اختلاف دمای سطح از دمای هوای منطقه می‌شود؛ بنابراین، در محور عمودی نیز محدوده وسیعی از حالات تشکیل می‌شود. با اطمینان می‌توان گفت لبه‌های تشکیل شده در شکل ۵- ب خشک‌ترین و مرطوب‌ترین حالت خاک و پوشش گیاهی موجود در منطقه‌اند.

پس از تعیین این لبه‌ها، شاخص رطوبت خاک دما/ پوشش گیاهی (TVSMI)^۱، به منزله شاخصی برای میزان رطوبت خاک برای پیکسل ژام، با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$TVSMI_i = \frac{a(dry)_j \times NDVI_i + b(dry)_j - dLST_i}{a(dry)_j \times NDVI_i + b(dry)_j - a(wet)_j \times NDVI_i + b(wet)_j} \quad (2)$$

در این معادله، $a(dry)_j$ شیب لبه خشک برای روز ژام، $b(dry)_j$ عرض از مبدأ لبه خشک برای روز ژام، $a(wet)_j$ شیب لبه مرطوب برای روز ژام و $b(wet)_j$ عرض از مبدأ لبه مرطوب برای روز ژام است.

1. Temperature Vegetation Soil Moisture Index

۱- از تولیدات آلبیدوی سطح سنجنده مادیس (MOD43B3) برای تعیین پیکسل‌های برفی استفاده می‌شود. در این مرحله، تمامی مناطق و روزهایی که تصویر آلبیدوی آن‌ها مقادیر بالاتر از ۰/۵ دارند جدا می‌شوند. پیکسل‌های این روزها در نمودار پراکندگی باندهای قرمز/ مادون‌قرمز مقادیر زیادی دارند و نیز زیر خط خاک قرار می‌گیرند. تمامی روزهایی که دمای هوای منطقه در آن‌ها کمتر از صفر درجه است، در این مرحله، حذف می‌شوند.

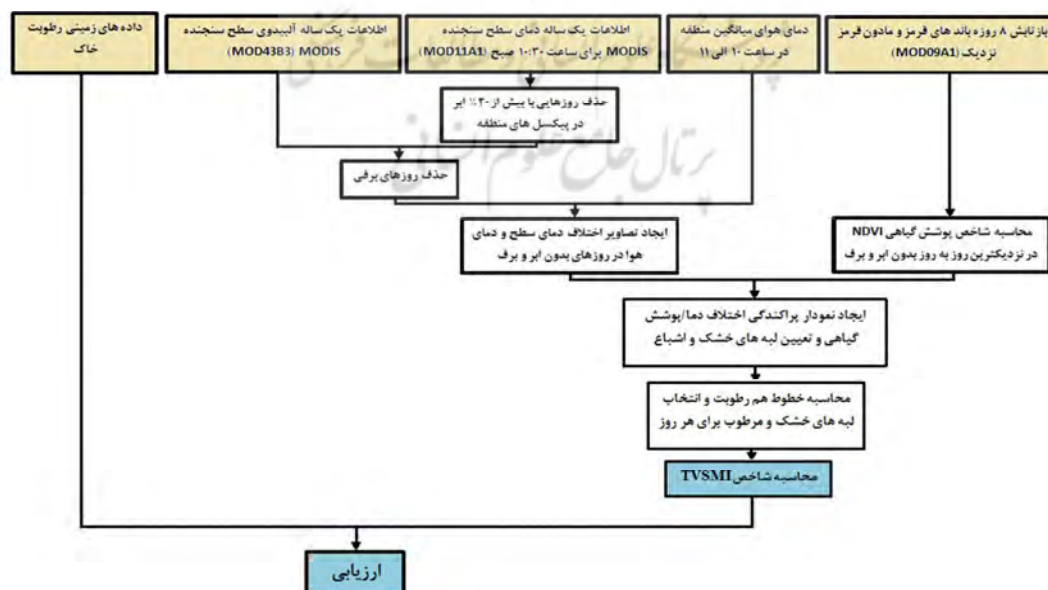
۱. پس از جداسازی روزهای بدون ابر و برف، برای دیگر روزها، تصاویر اختلاف دمای سطح از دمای هوای منطقه محاسبه می‌شود. در مناطق هموار، دمای هوا از میانگین مقادیر دمای هوا، در ساعات ۱۰ تا ۱۱ صبح، در ایستگاه‌های هواشناسی به‌دست می‌آید. شایان ذکر است در صورتی که منطقه دارای توپوگرافی ناهموار باشد، استفاده از میانگین دمای هوا درست نیست و برای در نظر گرفتن تأثیر توپوگرافی، باید پروفایل دمای هوا تشکیل شود.

۲. شاخص پوشش گیاهی NDVI، با استفاده از بازتابش‌های باندهای مادون‌قرمز نزدیک و باندهای قرمز به‌دست‌آمده از باندهای ۱ و ۲ تولیدات MOD09A1

انتخاب می‌شود، ویژگی‌های موقعیتی و شیب آن‌ها در رابطه (۲) قرار می‌گیرد و شاخص TVSMI با استفاده از آن‌ها به‌دست می‌آید. برای تعیین دقیق‌تر لبه‌های خشک و مرطوب در هر روز، می‌توان تعداد خطوط هم‌رطوبت را افزایش داد. با افزایش تعداد خطوط، احتمال اینکه خط تعیین‌شده نزدیک‌ترین خط به لبه واقعی در روز مورد نظر باشد افزایش می‌یابد.

با توجه به این توضیحات، می‌توان روند کلی تعیین شاخص نسبی میزان رطوبت خاک را، با استفاده از شکل ۶، بیان کرد. مراحل تعیین شاخص TVSMI، به‌منزله شاخصی برای میزان رطوبت، به‌صورت زیر طبقه‌بندی شده است.

۱- همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، ابتدا برای بازه یک‌ساله، تولیدات یک‌کیلومتری دمای سطح سنجنده مادیس (MOD11A1) دانلود و پس از پیش‌پردازش‌های لازم، از باند دمای سطح در عبور صبح از منطقه، تقریباً ساعت ۱۰:۳۰ صبح، به‌منزله دمای سطح زمین استفاده می‌شود. در این تصاویر، پیکسل‌های دارای ابر مقداری ندارند؛ بنابراین، از بین تمامی تصاویر، آن دسته از تصاویری که کمتر از ۲۰٪ منطقه در آن‌ها دارای ابر است جدا می‌شوند.



شکل ۶. مراحل تخمین شاخص رطوبت سنجی TVSMI

نمودار دما/ پوشش گیاهی، می‌توان شاخص دقیقی از میزان رطوبت خاک را تعیین کرد.

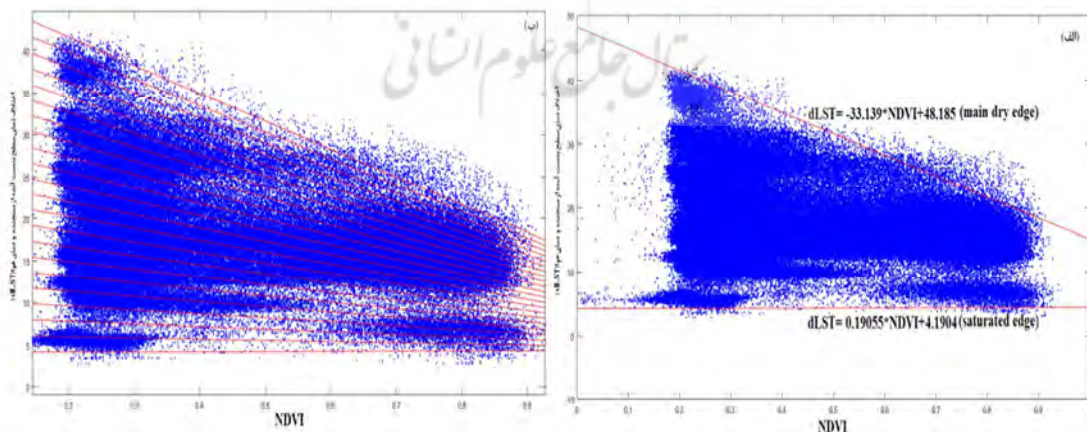
۴- نتایج و بحث

بر اساس الگوریتم یادشده در بخش قبل، تمامی مراحل به ترتیب انجام شد. از آنجا که منطقه مورد مطالعه در این مقاله منطقه‌ای سردسیر است، در بازه سال ۲۰۱۴، فقط ۲۸ روز آن بدون برف و ابر شناسایی شد. برای این ۲۸ روز، داده‌های سنجش از دوری مورد نیاز، شامل دمای سطح (LST) و شاخص پوشش گیاهی (NDVI) تولیدشده، از طریق سنجنده MODIS دانلود شد. همچنین، میانگین دمای هوای منطقه در این روزها، در ساعات ۱۰ و ۱۱ صبح، با استفاده از داده‌های هواشناسی جمع‌آوری و از آن برای تولید تصاویر اختلاف دمای سطح از دمای هوا استفاده شد. داده‌های این روزها برای تولید نمودار مثلی کامل و تشکیل خطوط هم‌رطوبت به کار رفته است. شکل ۷- الف نمودار مثلی تولیدشده با استفاده از داده‌های این روزها را نشان می‌دهد. با توجه به این موضوع که در بازه‌های یکساله، تمامی حالات رشد گیاهان و نیز تنوع در میزان رطوبت سطح برای تمامی زمین‌ها اتفاق می‌افتد، می‌توان انتظار داشت که شکل مثلی و یا

سنجنده مادیس، با قدرت تفکیک مکانی ۰/۵ کیلومتر، محاسبه می‌شود و به منظور یکپارچه‌سازی قدرت تفکیک این باندها و باندهای حرارتی، تمامی تولیدات به یک کیلومتر تبدیل می‌شوند.

۳. برای تمامی روزهای بدون ابر و برف، با داشتن تصاویر اختلاف دمای سطح از دمای هوای منطقه و شاخص پوشش گیاهی NDVI، نمودار پراکندگی دما/ پوشش گیاهی تشکیل می‌شود. با در نظر گرفتن میزان تراکم نقاط، نقاط موجود در لبه‌های نمودار که تراکم اندکی دارند حذف می‌شوند و از نقاط دیگر برای تعیین لبه‌های خشک و مرطوب استفاده می‌شود.

۴. پس از تعیین لبه‌های خشک و اشباع، خطوط هم‌رطوبت محاسبه و تعیین می‌شوند. از میان خطوط تعیین‌شده برای هر روز، با توجه به جایگیری پیکسل‌های روز مورد نظر بین دو خط، لبه‌های خشک و مرطوب هر روز تعیین می‌شود و با استفاده از ویژگی‌های شیب و عرض از مبدأ آن دو خط، شاخص TVSMI، مطابق با رابطه مورد اشاره، محاسبه می‌شود. در نتیجه، برای تعیین شاخص رطوبت خاک در هر روز، با پردازش داده‌های دمای سطح و شاخص پوشش گیاهی آن روز و نیز پردازش این داده‌ها برای یک سال قبل از آن و استفاده از تمامی این اطلاعات در یک



شکل ۷. الف) فضای پراکندگی اختلاف دما/ پوشش گیاهی به‌وجودآمده با داده‌های بازه یکساله در منطقه مورد مطالعه؛ ب) خطوط هم‌رطوبت محاسبه‌شده با استفاده از نمودار اختلاف دما/ پوشش گیاهی

همان گونه که در شکل می بینیم، پیکسل های مربوط به این روز بین خطوط ۵ تا ۷ قرار گرفته اند که، به ترتیب، لبه مرطوب و خشک را برای روز مورد نظر تشکیل می دهند. از شیب و عرض از مبدأ این خطوط برای محاسبه شاخص TVSMI روز مورد نظر استفاده می شود. بین لبه های خشک و مرطوب مدل پیشنهادی و لبه های خشک و مرطوب به دست آمده از تصویر و بدون استفاده از داده های سری زمانی، اختلاف شیب زیادی وجود دارد. این اختلاف به این علت است که در مطالعات گذشته، برای به دست آوردن محدوده های خشک و اشباع، فقط از داده های یک روز استفاده می شد؛ در حالی که ممکن است، در روز مورد نظر، فقط بخش کوچکی از شکل تشکیل شود و این مهم باعث ایجاد خطای بسیاری در برآورد لبه های خشک و مرطوب و همچنین، محاسبه نادرست شاخص رطوبت خاک می شود.

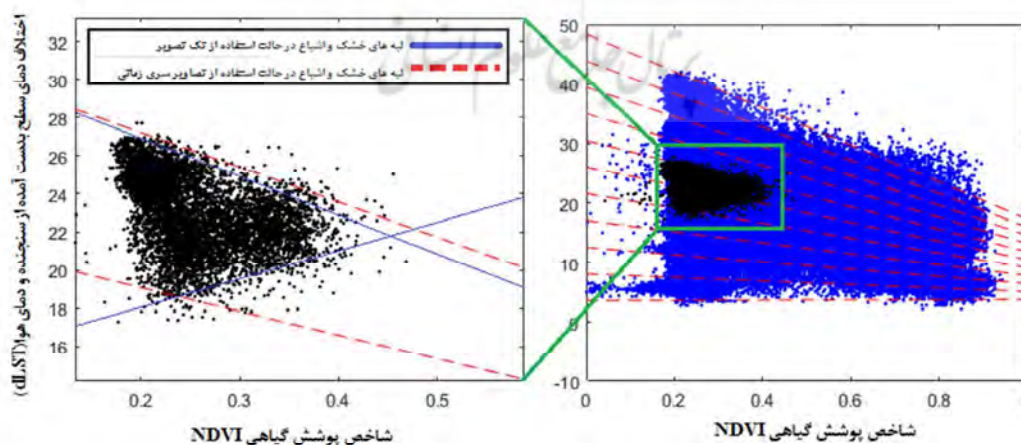
همان طور که قبلاً هم اشاره شد، برای تمامی روزها، بعد از تعیین لبه های خشک و مرطوب، شاخص TVSMI محاسبه شده است. در شکل ۹، خروجی شاخص TVSMI برای روز ۲۲ سپتامبر ۲۰۱۴ در منطقه آورده شده است. شکل ۹- الف تصویر اختلاف

دوزنقه ای به درستی تشکیل و لبه های خشک و اشباع به طور دقیق تعیین شود. همچنین، در شکل ۷- ب، خطوط هم رطوبت محاسبه شده با استفاده از این نمودار نشان داده شده است. در این مقاله، ۲۰ خط هم رطوبت محاسبه شده است. تعداد این خطوط به دلخواه است و هر چقدر بیشتر باشد، احتمال نزدیک تر بودن خط هم رطوبت منتخب به لبه خشک و اشباع اصلی هر روز بیشتر می شود.

پس از تعیین خطوط هم رطوبت، با توجه به اینکه پیکسل های موجود در روز مورد نظر در کدام بخش از نمودار پراکندگی قرار گرفتند، دو خط از میان خطوط هم رطوبت، به منزله لبه های خشک و مرطوب برای روزهای گوناگون، تعیین شد.

استفاده از این خطوط برای تعیین لبه های خشک و مرطوب باعث می شود لبه های انتخاب شده، با لبه های ظاهری فضای پراکندگی دما/ پوشش گیاهی مربوط به یک روز، بسیار متفاوت باشد. شکل ۸ اختلاف بین لبه های خشک و مرطوب تولید شده با استفاده از مدل پیشنهادی و لبه های تعیین شده در مطالعات گذشته را، برای روز ۱۰ مه ۲۰۱۴، نشان می دهد.

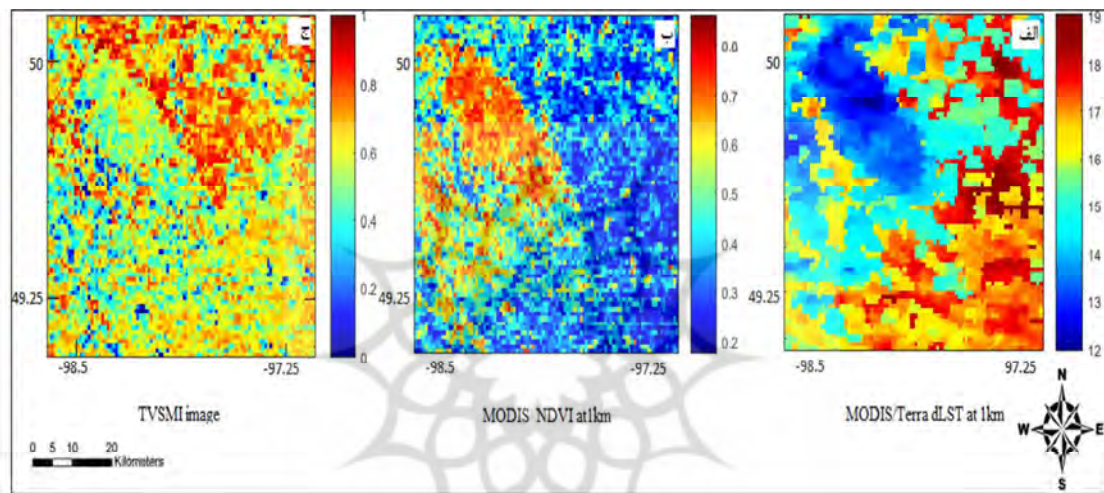
در شکل ۸، برای نمایش بهتر خطوط، فقط ۱۱ خط از ۲۰ خط هم رطوبت آورده شده است.



شکل ۸. نحوه جایگیری پیکسل های روز ۱۰ مه ۲۰۱۴ در فضای پراکندگی اختلاف دما/ پوشش گیاهی. خطوط آبی لبه های تعیین شده از روش های قبلی و خطوط قرمز لبه های تعیین شده با استفاده از مدل پیشنهادی اند.

تشخیص داده می‌شود. این موضوع، به‌صورت بصری، توانایی و توجیه فیزیکی بالای مدل پیشنهادی را در تعیین میزان رطوبت خاک نشان می‌دهد. شاخص به‌دست‌آمده با استفاده از داده‌های زمینی ایستگاه‌های رطوبت‌سنجی در تمامی ۲۸ روز ارزیابی شد. در جدول ۱، نتایج ارزیابی شاخص TVSMI برای تمامی روزها، تعداد ایستگاه‌های موجود در هر روز و ضریب همبستگی بین شاخص به‌دست‌آمده و میزان رطوبت زمینی خاک را نشان می‌دهد.

دمای سطح از دمای هوا منطقه، شکل ۹- ب تصویر شاخص پوشش گیاهی مربوط به روز مورد نظر و شکل ۹- ج شاخص TVSMI است که با استفاده از این دو تصویر، اختلاف دما و پوشش گیاهی و دو خط هم‌رطوبت تشکیل شده است. همان‌طور که در سه تصویر می‌توان دید، با وجود ناتوانی در تشخیص رودخانه موجود در قسمت چپ و بالای تصاویر دما و پوشش گیاهی، این ناحیه در تصویر شاخص TVSMI به‌صورت ناحیه‌ای به‌شکل عارضه خطی و دارای رطوبت زیاد



شکل ۹. الف) تصویر اختلاف دمای سطح از دمای هوا با قدرت تفکیک مکانی یک کیلومتر؛ ب) تصویر شاخص NDVI با قدرت تفکیک مکانی یک کیلومتر؛ ج) تصویر شاخص رطوبت سطح TVSMI به‌منزله خروجی الگوریتم

جدول ۱. نتایج به‌دست‌آمده از اجرای روش پیشنهادی در ۲۸ روز از سال ۲۰۱۴

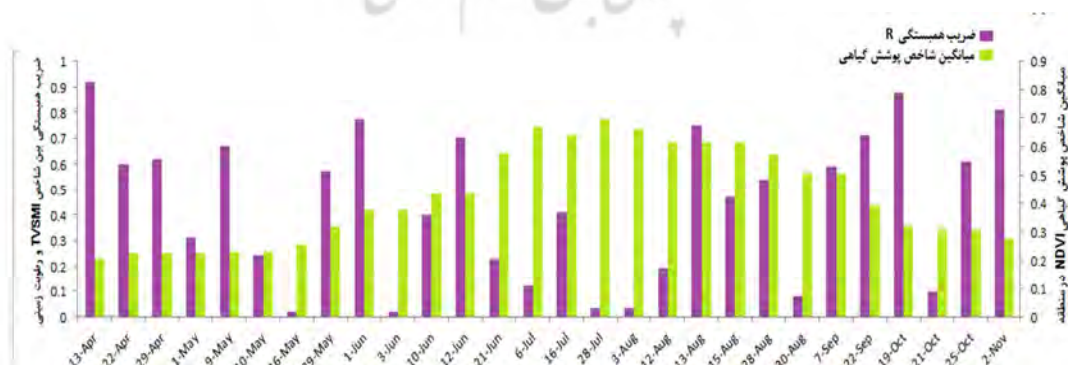
روز	تعداد ایستگاه‌ها	ضریب همبستگی R	روز	تعداد ایستگاه‌ها	ضریب همبستگی R
۱۳ آوریل	۴	۰/۹۲	۱۶ ژوئیه	۶	۰/۴۱
۲۲ آوریل	۵	۰/۶	۲۸ ژوئیه	۶	۰/۰۱
۲۹ آوریل	۴	۰/۶۲	۳ اوت	۴	۰/۰۱
۱ مه	۶	۰/۳۱	۱۲ اوت	۵	۰/۱۹
۹ مه	۵	۰/۶۷	۱۳ اوت	۶	۰/۷۵
۱۰ مه	۵	۰/۲۴	۱۵ اوت	۶	۰/۷۴
۱۶ مه	۷	۰/۰۱	۲۸ اوت	۶	۰/۵۴
۲۹ مه	۷	۰/۵۷	۳۰ اوت	۷	۰/۰۹
۱ ژوئن	۵	۰/۷۷	۷ سپتامبر	۶	۰/۵۹
۳ ژوئن	۶	۰/۰۱	۲۲ سپتامبر	۵	۰/۷۱
۱۰ ژوئن	۶	۰/۴	۱۹ اکتبر	۷	۰/۸۸
۱۲ ژوئن	۵	۰/۷	۲۱ اکتبر	۷	۰/۱
۲۱ ژوئن	۶	۰/۲۳	۲۵ اکتبر	۶	۰/۶۱
۶ ژوئیه	۶	۰/۱۲	۲ نوامبر	۵	۰/۸۱

افزون‌بر میزان پوشش گیاهی منطقه، میزان رطوبت موجود در خاک و جایگیری ایستگاه‌های زمینی رطوبت‌سنجی نیز در دقت روش تأثیرگذار است. رطوبت پارامتر بسیار متنوعی است که میزان آن، در منطقه و یا حتی در زمین کشاورزی، به سرعت تغییر می‌کند. استفاده از داده‌های یک کیلومتر باعث می‌شود آنچه به‌منزله شاخص نهایی الگوریتم تولید شود میانگینی از میزان رطوبت موجود در مساحتی برابر با یک کیلومترمربع باشد. حال آنکه در فصل‌های پوشش گیاهی، زمین‌های کشاورزی آبیاری می‌شوند. مقدار آبیاری انجام‌شده سبب می‌شود برداشت‌های نقطه زمین کشاورزی، که ایستگاه رطوبت‌سنجی در آن قرار دارد، و اندازه‌گیری‌های بزرگ‌مقیاس سنجنده MODIS، که متأثر از سایر نقاط موجود در یک پیکسل است، با هم متفاوت باشند. با توجه به تنوع زیاد مقادیر رطوبت زمینی خاک در این مساحت، این موضوع باعث می‌شود عدد شاخص به‌دست‌آمده با مقادیر زمینی اندازه‌گیری‌شده از طریق ایستگاه‌های هواشناسی مطابقت زیادی نداشته باشد.

یکی دیگر از عوامل ایجاد خطا را می‌توان خطوط هم‌رطوبت منتخب به‌منزله لبه‌های خشک و مرطوب دانست. همان‌گونه‌که در بخش‌های قبل نیز اشاره شد، با جایگیری پیکسل‌های متفاوت یک روز در نمودار پراکندگی اختلاف دما/ پوشش گیاهی، بخشی از شکل

طبق جدول، بین شاخص به‌دست‌آمده و میزان رطوبت خاک، میانگین ضریب همبستگی ۰/۵۵ وجود دارد. میزان همبستگی این شاخص و میزان رطوبت خاک، در برخی روزها، به ۰/۹۲ می‌رسد. این میزان همبستگی به عوامل متفاوتی، از جمله میزان پوشش گیاهی منطقه، وابسته است. این موضوع را می‌توان با استفاده از شکل ۱۰ نیز نمایش داد.

شکل ۱۰ رابطه تغییرات ضریب همبستگی بین شاخص TVSMI و میزان رطوبت خاک با تغییرات میزان پوشش گیاهی موجود در منطقه را نشان می‌دهد. در این نمودار می‌توان دید، با افزایش میزان پوشش گیاهی، ضریب همبستگی بین شاخص به‌دست‌آمده و میزان رطوبت خاک کمتر می‌شود. این تغییر همبستگی به این دلیل است که داده‌های رطوبت زمینی از سطح خاک برداشت می‌شوند؛ درحالی‌که تصاویر ماهواره‌ای، در روزهای دارای پوشش گیاهی، قادر به نفوذ در پوشش گیاهی نیست و آنچه به‌صورت رطوبت در این روزها اندازه‌گیری می‌شود میزان استرس پوشش گیاهی است. این درحالی است که بسیاری از گیاهان، حتی در شرایط کمبود میزان رطوبت خاک، سبزیگی و میزان تبخیر و تعرق خود را تا حدودی حفظ می‌کنند و این باعث ایجاد خطا بین نمونه‌برداری‌های زمینی و شاخص به‌دست‌آمده از تصاویر ماهواره‌ای در فصل‌های دارای پوشش گیاهی بیشتر می‌شود.



شکل ۱۰. نمودار ضریب همبستگی و میانگین شاخص پوشش گیاهی در روزهای مورد مطالعه در منطقه

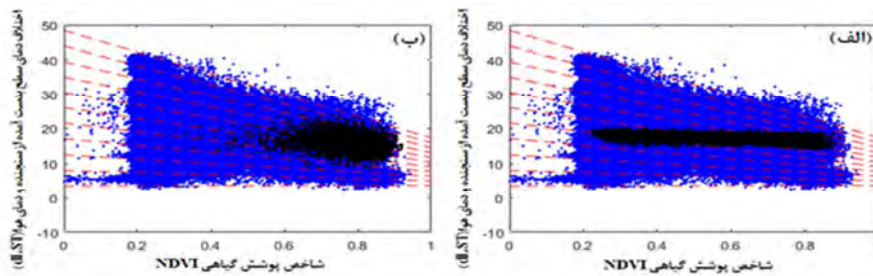
یکی از نقص‌های استفاده از روش‌های پیشین و روش پیشنهادی، برای تعیین میزان رطوبت خاک، این است که چون برای تمامی روزها، از لبه‌های جداگانه‌ای برای محاسبه شاخص استفاده می‌شود و ارتباط میان لبه‌ها و میزان رطوبت خاک به صورت مجزا در نظر گرفته نمی‌شود، نمی‌توان این شاخص‌ها را به صورت مقایسه رطوبت در روزهای متفاوت به کار برد. با مقایسه تصاویر شاخص TVSMI به دست آمده از دو روز، می‌توان این موضوع را به خوبی مشاهده کرد. شکل ۱۲ تصویر شاخص TVSMI را، در دو روز متفاوت، ۱ ژوئن ۲۰۱۴ (الف) و ۱۲ ژوئن ۲۰۱۴ (ب)، نشان می‌دهد. میانگین رطوبت در هر یک از این روزها، به ترتیب، ۰/۱۹ و $0/19 \text{ (m}^3/\text{m}^3\text{)}$ اندازه‌گیری شده که، به ترتیب، بیشترین و کمترین میزان رطوبت در میان روزهای مورد مطالعه است. اما همان گونه که در تصاویر شاخص TVSMI آنها می‌توان دید، تغییر میزان رطوبت خاک را نمی‌توان به صورت مقایسه‌ای از روی شاخص به دست آمده متوجه شد.

در شکل ۱۲، مشاهده می‌شود که در روز ۱۲ ژوئن، رنگ اختصاص یافته به تمامی پیکسل‌ها، تقریباً در سرتاسر تصویر، مقدار رطوبتی بیشتر از رنگ‌های روز ۱ ژوئن را نشان می‌دهد اما این مقدار افزایش شاخص، مقدار رطوبت حجمی نیست. در واقع، فقط به صورت بصری و عدد بدون واحد می‌توان افزایش میزان رطوبت را دید اما نمی‌توان میزان حجمی افزایش رطوبت خاک را، با استفاده از شاخص، به دست آورد.

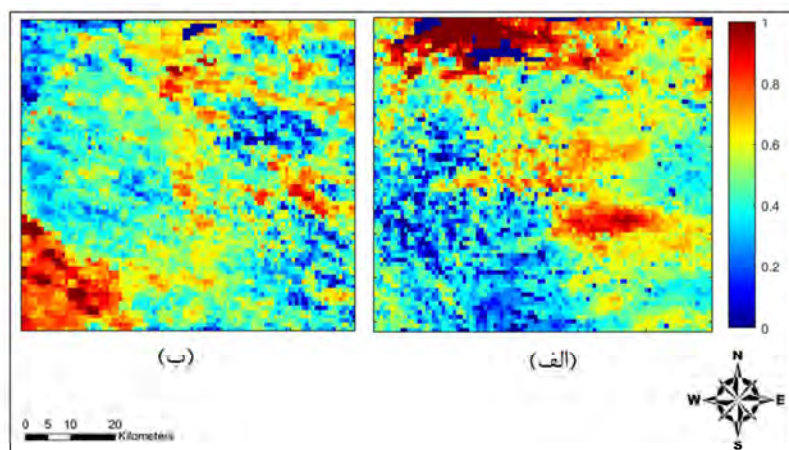
مثلی تشکیل می‌شود. هرچه پیکسل‌های یک روز در یک بخش از نمودار قرار بگیرند و لبه‌های خشک و مرطوب، به صورت بصری، نمایشی از لبه‌های پیش‌بینی شده با خطوط هم‌رطوبت باشند، می‌توان انتظار داشت دقت شاخص افزایش یابد. شکل ۱۱- الف نحوه جایگیری پیکسل‌های روز ۳۰ اوت را، در نمودار پراکندگی اختلاف دما/ پوشش گیاهی، نشان می‌دهد.

در این شکل، می‌توان دید که شیب خط حاصل از پیکسل‌های روز مورد نظر با شیب خطوط هم‌رطوبت یکسان نیست و این باعث می‌شود شاخص تولید شده با میزان رطوبت خاک ضریب همبستگی بالایی نداشته باشد و ضریب همبستگی ۰/۰۹ برای این روز به دست آید. در واقع، می‌توان نتیجه گرفت هرچه پیکسل‌های یک تصویر، به بهترین شکل، برآوردی از لبه‌های تعیین شده به منزله لبه‌های خشک و مرطوب باشند؛ شاخص تولید شده با دقت بیشتری میزان رطوبت خاک را تخمین می‌زند.

دور بودن لبه‌های خشک و مرطوب از هم، وقتی پوشش گیاهی در منطقه انبوه است، نیز می‌تواند یکی از دلایل کاهش ضریب همبستگی بین شاخص به دست آمده و میزان رطوبت خاک باشد زیرا در این صورت، با تغییرات اندک میزان رطوبت خاک، پیکسل‌ها به میزان زیادی از هم فاصله می‌گیرند. در شکل ۱۱- ب، پراکندگی پیکسل‌های روز ۲۸ ژوئن را بین خطوط ۴ تا ۱۰ مشاهده می‌کنیم که این موضوع توجهی برای میزان همبستگی اندک بین شاخص و رطوبت خاک، در روزهای با پوشش گیاهی انبوه، به شمار می‌رود.



شکل ۱۱. الف) پیکسل‌های روز ۳۰ اوت؛ ب) پیکسل‌های روز ۲۸ ژوئن در نمودار پراکندگی اختلاف دما/ پوشش گیاهی



شکل ۱۲. تصویر شاخص TVSMI برای روزهای ۱ ژوئن (الف) و ۱۲ ژوئن (ب) سال ۲۰۱۴

که می‌توان انتظار تمامی شرایط پوشش گیاهی و رطوبتی را در منطقه داشت، با استفاده از تصاویر این بازه زمانی، امکان تشکیل کاملاً دقیق لبه‌های خشک و مرطوب در نمودار پراکندگی دما/ پوشش گیاهی فراهم شد.

برای از بین بردن تأثیر میزان متفاوت تابش خورشید در روزهای گوناگون سال، به جای استفاده از دمای سطح، از اختلاف دمای سطح و دمای هوا به منزله تابعی از میزان پوشش گیاهی و میزان رطوبت خاک استفاده شد. کاربرد اختلاف دمای سطح و دمای هوای منطقه، افزون بر اینکه تابعی از میزان رطوبت خاک است، به عواملی همچون سرعت باد و مقاومت آیرودینامیکی هوا در روزهای متفاوت ربط دارد که در این مطالعه، از آن‌ها صرف نظر شده است. این موضوع می‌تواند یکی از منابع خطای ایجاد شده در این روش باشد.

همچنین در این مقاله، ایده استفاده از خطوط هم‌رطوبت برای تعیین میزان رطوبت خاک هر روز مطرح شد. خطوط هم‌رطوبت خطوطی اند که برای تمامی پیکسل‌های موجود روی آنها، شاخص نسبت تبخیر و تعرق واقعی به تبخیر و تعرق پتانسیل با هم برابر است. با تعیین این خطوط، لبه‌های خشک و مرطوب برای روزهای متفاوت به دست آمد و با استفاده از این لبه‌ها، شاخص مورد نظر محاسبه شد. این شاخص با ضریب همبستگی میانگین ۰/۵۲، تخمینی از

در مقالات گوناگونی، با استفاده از مقادیر زمینی رطوبت اندازه‌گیری شده و میزان شاخص به دست آمده، رابطه را برای تعیین رطوبت حجمی خاک، از طریق شاخص مورد نظر، تعریف کردند که این موضوع نیازمند داده‌های زمینی بسیار زیادی در زمینه رطوبت خاک در شرایط متفاوت، با توزیع مناسب در یک پیکسل یک کیلومتری، و در روزهای متفاوت سال است تا بتوان از درستی رابطه به دست آمده اطمینان حاصل کرد.

۵- نتیجه‌گیری

طبق آنچه در بخش‌های قبل بیان شد، یکی از محدودیت‌های استفاده از روش‌های تلفیق داده‌های مرئی و حرارتی در نمودار پراکندگی دما/ شاخص پوشش گیاهی، به منظور تعیین رطوبت خاک، تعیین لبه‌های خشک و مرطوب نادرست در نمودار پراکندگی و در نتیجه، محاسبه شاخص اشتباه رطوبت، با توجه به فاصله پیکسل به لبه‌های خشک و مرطوب است.

در این مقاله، با استفاده از تصاویر سری زمانی دمای سطح و شاخص پوشش گیاهی سنجنده MODIS، امکان تولید لبه‌های خشک و اشباع در یک منطقه با تابش و میزان دمای هوای نسبتاً یکسان در آن منطقه فراهم شد. با توجه به اینکه در بازه یکساله، تغییرات میزان پوشش گیاهی، دما و رطوبت به شکلی است

سانتی‌متری خاک استفاده شده است. علت استفاده از این حسگر این است که، نخست، این حسگر در تمامی بازه سال ۲۰۱۴، دارای میزان رطوبت خاک در ساعت ۱۲ ظهر است. همچنین، از آنجاکه درمورد میزان دقت هریک از حسگرها اطلاعاتی در دسترس نیست، دقت آن‌ها یکسان فرض شد و یکی از آنها، به صورت تصادفی، استفاده شده است. با این کار، حجم محاسبات مربوط به میانگین‌گیری اندازه‌گیری‌های تمامی حسگرها کاهش می‌یابد. در برخی روزها، رطوبت اندازه‌گیری شده با این حسگر متفاوت از حسگرهای نوع B و C است که این خود می‌تواند دلیلی برای خطای ایجاد شده در برخی روزها و برخی ایستگاه‌ها باشد.

منابع

- Amani, M. & Mobasheri, M.R., 2015, **A Parametric Method for Estimation of Leaf Area Index Using Landsat ETM+ Data**, *GIScience & Remote Sensing*, 52(4), PP. 478-497.
- Amani, M., Parsian, S., MirMazloumi, S.M. & Aieneh, O., 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*, 50, PP. 176-186.
- Bastiaanssen, W.G.M., 2000, **SEBAL-Based Sensible and Latent Heat Fluxes in the Irrigated Gediz Basin, Turkey**, *Journal of Hydrology*, 229(1), PP. 87-100.
- Bowers, S.A. & Smith, S.J., 1972, **Spectrophotometric Determination of Soil Water Content**, *Soil Science Society of America Journal*, 36(6), PP. 978-980.
- Carlson, T., 2007, **An Overview of the "Triangle Method" for Estimating Surface Evapotranspiration and Soil Moisture from Satellite Imagery**, *Sensors*, 7(8), PP. 1612-1629.
- Carlson, T.N., Capehart, W.J. & Gillies, R.R., 1995, **A New Look at the Simplified Method for Remote Sensing of Daily Evapotranspiration**, *Remote Sensing of Environment*, 54(2), PP. 161-167.

میزان رطوبت خاک فراهم می‌کند. با این روش، ضریب همبستگی برای شرایط با پوشش گیاهی کم به ۰/۹۲ نیز می‌رسد.

در این تحقیق، ۲۰ خط هم‌رطوبت تعیین و برای تمامی روزها، از این خطوط برای تعیین لبه‌های خشک و مرطوب استفاده شده است. در مطالعات آتی، می‌توان تأثیر افزایش تعداد خطوط هم‌رطوبت را در افزایش ضریب همبستگی شاخص به‌دست‌آمده و میزان رطوبت خاک بررسی کرد

با این شیوه، لبه‌های خشک و مرطوب، هر روز به صورت جداگانه و بدون وابستگی به سایر لبه‌ها، انتخاب می‌شود. این موضوع باعث می‌شود نتوان از این شاخص برای مقایسه رطوبت یک روز با روز دیگر در یک منطقه استفاده کرد. در واقع، با اینکه این شاخص در هر روز رطوبت نسبی یک پیکسل را، در مقایسه با دیگر پیکسل‌ها، به خوبی نشان می‌دهد؛ نمی‌توان آن را برای مقایسه رطوبت روزهای متفاوت به کار برد. در مطالعات آینده، با توجه این خطوط در مقایسه با یکدیگر، با استفاده از ضریبی که معرف جایگیری این خطوط در نمودار پراکندگی دما/ پوشش گیاهی است، ممکن است مشکل برطرف شود.

ضریب همبستگی این شاخص، در روزهایی از سال که پوشش گیاهی در منطقه انبوه می‌شود، کمتر از دیگر روزهاست و این به دلیل اندازه‌گیری شاخص TVSMI از میزان استرس آبی گیاه در آن روزهاست؛ در حالی که اندازه‌گیری میدانی میزان رطوبت سطح زمین را اندازه‌گیری کرده است. با توجه به اینکه بسیاری از گیاهان، حتی در شرایط کم‌آبی سطح زمین هم، سبزی‌نگی و تبخیر و تعرق خود را تا حدودی حفظ می‌کنند، این اختلاف توجه‌پذیر است. با در نظر گرفتن روابط محاسبه دمای سطح خاک از دمای تولیدشده، از طریق سنجنده مادیس، می‌توان این مشکل را تا حدودی از بین برد.

در این مطالعه، از داده‌های حسگر نوع Hydro prob II-A برای اندازه‌گیری میزان رطوبت عمق ۵

- Djamai, N., Magagi, R., Goïta, K., Merlin, O., Kerr, Y. & Roy, A., 2016, **A Combination of DISPATCH Downscaling Algorithm with CLASS Land Surface Scheme for Soil Moisture Estimation at Fine Scale During Cloudy Days**, Remote Sensing of Environment, 184, PP. 1-14.
- Gillies, R.R., Kustas, W.P. & Humes, K.S., 1997, **A Verification of the 'Triangle' Method for Obtaining Surface Soil Water Content and Energy Fluxes from Remote Measurements of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Surface E**, International Journal of Remote Sensing, 18(15), PP. 3145-3166.
- Hosseini, M. & McNairn, H., 2017, **Using Multi-Polarization C-and L-Band Synthetic Aperture Radar to Estimate Biomass and Soil Moisture of Wheat Fields**, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 58, PP. 50-64.
- Leng, P., Song, X., Li, Z.L., Wang, Y. & Wang, R., 2015, **Toward the Estimation of Surface Soil Moisture Content Using Geostationary Satellite Data over Sparsely Vegetated Area**, Remote Sensing, 7(4), PP. 4112-4138.
- Liu, C., Zhang, X. & Zhang, Y., 2002, **Determination of Daily Evaporation and Evapotranspiration of Winter Wheat and Maize by Large-Scale Weighing Lysimeter and Micro-Lysimeter**, Agricultural and Forest Meteorology, 111(2), PP. 109-120.
- Lobell, D.B. & Asner, G.P., 2002, **Moisture Effects on Soil Reflectance**, Soil Science Society of America Journal, 66(3), PP. 722-727.
- Maki, M., Ishihara, M. & Tamura, M., 2004, **Estimation of Leaf Water Status to Monitor the Risk of Forest Fires by Using Remotely Sensed Data**, Remote Sensing of Environment, 90(4), PP. 441-450.
- McNairn, H., Jackson, T.J., Wiseman, G., Belair, S., Berg, A., Bullock, P., Colliander, A., Cosh, M.H., Kim, S.B., Magagi, R. & Moghaddam, M., 2015, **The Soil Moisture Active Passive Validation Experiment 2012 (SMAPVEX12): Prelaunch Calibration and Validation of the SMAP Soil Moisture Algorithms**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 53(5), PP. 2784-2801.
- Merlin, O., Walker, J.P., Chehbouni, A. & Kerr, Y., 2008, **Towards Deterministic Downscaling of SMOS Soil Moisture Using MODIS Derived Soil Evaporative Efficiency**, Remote Sensing of Environment, 112(10), PP. 3935-3946.
- Merlin, O., Rudiger, C., Al Bitar, A., Richaame, P., Walker, J.P. and Kery, Y. H., 2012, **Disaggregation of smos soil moisture in southeastern Australia**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing, 50(5), PP 1556-1571.
- Mobasheri, M.R. & Amani, M., 2016, **Soil Moisture Content Assessment Based on Landsat 8 Red, Near-Infrared, and Thermal Channels**, Journal of Applied Remote Sensing, 10(2), PP. 026011-026011.
- Nemani, R., Pierce, L., Running, S. & Goward, S., 1993, **Developing Satellite-Derived Estimates of Surface Moisture Status**, Journal of Applied Meteorology, 32(3), PP. 548-557.
- Nichols, S., Zhang, Y. & Ahmad, A., 2011, **Review and Evaluation of Remote Sensing Methods for Soil-Moisture Estimation**, Journal of Photonics for Energy, PP. 028001-028001.
- Patel, N.R., Anapashsha, R., Kumar, S., Saha, S.K. & Dadhwal, V.K., 2009, **Assessing Potential of MODIS Derived Temperature/Vegetation Condition Index (TVDI) to Infer Soil Moisture Status**, International Journal of Remote Sensing, 30(1), PP. 23-39.
- Petropoulos, G., Carlson, T.N., Wooster, M.J. & Islam, S., 2009, **A Review of Ts/VI Remote Sensing Based Methods for the Retrieval of Land Surface Energy Fluxes and Soil Surface Moisture**, Progress in Physical Geography, 33(2), PP. 224-250.
- Piles, M., Camps, A., Vall-Llossera, M., Corbella, I., Panciera, R., Rudiger, C., Kerr, Y.H. & Walker, J., 2011, **Downscaling SMOS-Derived Soil Moisture Using MODIS Visible/Infrared Data**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 49(9), PP. 3156-3166.
- Piles, M., Camps, A., Vall-Llossera, M., Sánchez, N., Martínez-Fernández, J.,

- Monerri, A., Baroncini-Turricchia, G., Perez-Gutierrez, C., Aguasca, A., Acevo, R. & Bosch-LMs, X., 2010, **Soil Moisture Downscaling Activities at the REMEDHUS Cal/Val Site and its Application to SMOS**, In Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment (MicroRad), 2010 11th March, Specialist Meeting on (PP. 17-21). IEEE.
- Rahimzadeh-Bajgiran, P., Berg, A.A., Champagne, C. & Omasa, K., 2013, **Estimation of Soil Moisture Using Optical/Thermal Infrared Remote Sensing in the Canadian Prairies**, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 83, PP. 94-103.
- Rahimzadeh-Bajgiran, P., Omasa, K. & Shimizu, Y., 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, PP. 1-12.
- Rowlandson, T.L., Berg, A.A., Bullock, P.R., Ojo, E.R., McNairn, H., Wiseman, G. & Cosh, M.H., 2013, **Evaluation of Several Calibration Procedures for a Portable Soil Moisture Sensor**, Journal of hydrology, 498, PP. 335-344.
- Sadeghi, M., Jones, S.B. & Philpot, W.D., 2015, **A Linear Physically-Based Model for Remote Sensing of Soil Moisture Using Short Wave Infrared Bands**, Remote Sensing of Environment, 164, PP. 66-76.
- Sánchez-Ruiz, S., Piles, M., Sánchez, N., Martínez-Fernández, J., Vall-Ilossera, M. & Camps, A., 2014, **Combining SMOS with Visible and Near/Shortwave/Thermal Infrared Satellite Data for High Resolution Soil Moisture Estimates**, Journal of Hydrology, 516, PP. 273-283.
- Sandholt, I., Rasmussen, K. & Andersen, J., 2002, **A Simple Interpretation of the Surface Temperature/Vegetation Index Space for Assessment of Surface Moisture Status**, Remote Sensing of Environment, 79(2), PP. 213-224.
- Stoner, E.R., Baumgardner, M.F., Weismiller, R.A., Biehl, L.L. & Robinson, B.F., 1980, **Extension of Laboratory-Measured Soil Spectra to Field Conditions**, Soil Science Society of America Journal, 44(3), PP. 572-574.
- Tramutoli, V., Claps, P., Marella, M., Pergola, N. & Sileo, C., 2000, **Feasibility of Hydrological Application of Thermal Inertia from Remote Sensing**, In 2nd Plinius Conference on Mediterranean Storms, Siena, Italy, October, (PP. 16-18).
- Verstraeten, W.W., Veroustraete, F., van der Sande, C.J., Grootaers, I. & Feyen, J., 2006, **Soil Moisture Retrieval Using Thermal Inertia, Determined with Visible and Thermal Spaceborne Data, Validated for European Forests**, Remote Sensing of Environment, 101(3), PP. 299-314.
- Walker, J. P., 1999. **Estimating soil moisture profile dynamics from near-surface soil moisture measurements and standard meteorological data** (Doctoral dissertation, university of Newcastle).
- Wang, C., Qi, S., Niu, Z. & Wang, J., 2004, **Evaluating Soil Moisture Status in China Using the Temperature-Vegetation Dryness Index (TVDI)**, Canadian Journal of Remote Sensing, 30(5), PP. 671-679.
- Wang, L. & Qu, J.J., 2009, **Satellite Remote Sensing Applications for Surface Soil Moisture Monitoring: A Review**, Frontiers of Earth Science in China, 3(2), PP. 237-247.
- Wang, X., Xie, H., Guan, H. & Zhou, X., 2007, **Different Responses of MODIS-Derived NDVI to Root-Zone Soil Moisture in Semi-Arid and Humid Regions**, Journal of Hydrology, 340(1), PP. 12-24.
- Weidong, L., Baret, F., Xingfa, G., Qingxi, T., Lanfen, Z. & Bing, Z., 2002, **Relating Soil Surface Moisture to Reflectance**, Remote Sensing of Environment, 81(2), PP. 238-246.
- Weng, Q., 2009, **Thermal Infrared Remote Sensing for Urban Climate and Environmental Studies: Methods, Applications, and Trends**, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 64(4), PP. 335-344.
- Whiting, M.L., Li, L. & Ustin, S.L., 2004, **Predicting Water Content Using Gaussian Model on Soil Spectra**, Remote Sensing of Environment, 89(4), PP. 535-552.
- Yan, F., Qin, Z., Li, M. & Li, W., 2006,

- Progress in Soil Moisture Estimation from Remote Sensing Data for Agricultural Drought Monitoring**, In Proc. of SPIE. Vol., September, (Vol. 6366, PP. 636601-1).
- Younis, S.M.Z. & Iqbal, J., 2015, **Estimation of Soil Moisture Using Multispectral and FTIR Techniques**, The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, 18(2), PP. 151-161.
- Zhan, Z., Qin, Q., Ghulan, A. & Wang, D., 2007, **NIR-Red Spectral Space Based New Method for Soil Moisture Monitoring**, Science in China Series D: Earth Sciences, 50(2), PP. 283-289.
- Zhang, D., Li, Z.L., Tang, R., Tang, B.H., Wu, H., Lu, J. & Shao, K., 2015, **Validation of a Practical Normalized Soil Moisture Model with in Situ Measurements in Humid and Semi-Arid Regions**, International Journal of Remote Sensing, 36(19-20), PP. 5015-5030.
- Zhang, D., Tang, R., Zhao, W., Tang, B., Wu, H., Shao, K. & Li, Z.L., 2014, **Surface Soil Water Content Estimation from Thermal Remote Sensing Based on the Temporal Variation of Land Surface Temperature**, Remote Sensing, 6(4), PP. 3170-3187.
- Zhang, D. & Zhou, G., 2016, **Estimation of Soil Moisture from Optical and Thermal Remote Sensing: A Review**, Sensors, 16(8), p. 1308.

