

برآورد رطوبت سطحی خاک به کمک نمایه‌های پوشش گیاهی و دمای سطح زمین با استفاده از تصاویر سنجنده مودیس (مطالعه موردی: گنبدکاووس)

سحر خزاعی¹، محمود رائینی سرجاز^{2*}، اسماعیل ولی‌زاده³، خلیل قربانی⁴
تاریخ دریافت: 1394/12/2 تاریخ پذیرش: 1395/9/6

چکیده

سنجش رطوبت خاک در پهنه گسترده هزینه‌بر و گاهی نشدنی است. یکی از روش‌های نوین، سنجش از دور است که امکان برآورد رطوبت سطحی خاک را در پهنه‌ای گسترده فراهم می‌سازد. از این رو، هدف از این پژوهش بررسی امکان برآورد رطوبت لایه سطحی خاک با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنجنده مودیس و مقایسه آن با داده‌های زمینی است. برای این کار، در بازه زمانی مهر 1392 تا خرداد 1394، در شهرستان گنبدکاووس نمایه‌های گیاهی و گرمایی استخراج و با داده‌های زمینی واسنجی شدند. یافته‌های این پژوهش نشان داد که همبستگی معنی‌دار ولی ضعیفی بین نمایه‌های گیاهی NMDI، NDVI و رطوبت خاک وجود دارد ($R = 0/62$)، در حالی که همبستگی منفی و بسیار معنی‌داری ($p \leq 0/01$; $R = -0/89$) برای نمایه LST و هم‌چنین دمای باندهای گرمایی 31 و 32 سنجنده با رطوبت خاک دیده شد. نمایه «دما-خشکی گیاهی» (TVDI) نیز با رطوبت همبستگی منفی و بسیار معنی‌داری ($p \leq 0/01$; $R = -0/90$) داشت. هم‌چنین همبستگی خطی و نمایی معنی‌داری میان «نمایه خسی خاک» (SWI) و رطوبت خاک به دست آمد. از یافته‌های این پژوهش نتیجه‌گیری می‌شود که در مقایسه با نمایه‌های گیاهی، از مدل‌های گرمایی و ترکیبی سنجش از دور می‌توان رطوبت سطحی خاک را با دقت بیش‌تری برآورد کرد.

واژه‌های کلیدی: رطوبت سطحی خاک، سنجنده مودیس، گنبدکاووس، نمایه‌های گرمایی، نمایه‌های گیاهی

مقدمه

برآورد کند. یکی از این متغیرها، رطوبت خاک است که پژوهش‌های زیادی برای برآورد آن در حوزه سنجش از دور انجام شده است. امروزه بسیاری از متخصصان سنجش از دور، ترکیب داده‌های بازتابی و گرمایی را برای به دست آوردن اطلاعات از پوشش گیاهی و پایش رطوبت خاک مفید می‌دانند (علوی‌پناه، 1382). اگر اندازه‌گیری‌های سنجش از دور بتوانند با رطوبت لایه سطحی خاک ارتباط برقرار کند، از این راه می‌توان به تغییرات منطقه‌ای و محلی رطوبت لایه سطحی خاک پی برد.

پژوهشگران از آغاز دهه 1980 شروع به استخراج اطلاعات از پوشش گیاهی زمین به وسیله سنجنده‌های ماهواره‌ای کردند. از مهم‌ترین نمایه‌هایی که برای نشان دادن وضعیت پوشش گیاهی و خشکسالی مورد استفاده قرار گرفت می‌توان به NDVI⁵ «نمایه تفاوت نرمال شده گیاهی» اشاره کرد که به صورت گسترده‌ای برای پایش و ارزیابی توانایی پوشش گیاهی روی زمین استفاده می‌شود. این نمایه از دو باند فرسرخ نزدیک و قرمز استفاده می‌کند. به دلیل وابستگی نزدیک بین وضعیت پوشش گیاهی و رطوبت در دسترس

برآورد رطوبت خاک تنها با استفاده از نمونه‌های هیدرولوژیکی در یک منطقه گسترده همیشه امکان‌پذیر نیست و وابسته به شماری از مولفه‌های محلی و ویژگی‌های خاک، مانند همگنی و نفوذپذیری است (Zhao et al., 2010). گزینش این پارامترها سخت و گاهی ناممکن است. از سویی روش‌های زمینی برآورد رطوبت خاک، نقطه ای هستند و افزون بر فعالیت‌های میدانی، آنالیزهای پس پردازش مفصلی نیز دارند. در نتیجه، این روش‌ها به شدت هزینه‌بر هستند (Mallick et al., 2009). سنجش از دور می‌تواند در سطح پوشش گسترده و با هزینه قابل قبول، پارامترهای گوناگونی از علوم زمین را

1- دانشجوی دوره دکتری آبیاری، گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

2- استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

3- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد هواشناسی کشاورزی، گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

4- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان
(Email: raeini@yahoo.com)

* نویسنده مسئول:

(Goetz., 1997). بنابراین نمایه «دما - خشکی گیاه (TVDI)³ می-تواند بیان کننده همه این ویژگی‌ها باشد. گائو و همکاران از تصاویر ماهواره‌ای TM⁴ استفاده کردند و مقادیر دمای سطح زمین و NDVI را در برابر هم رسم کردند. نتایج مقایسه شده با مقادیر بارش نشان داد که نمایه TVDI توانسته است به خوبی شرایط خشکی و کمبود بارش را نشان دهد (Gao et al., 2011). سندهالت و همکاران تغییرات مکانی و زمانی TVDI را با تصاویر سنجنده AVHRR⁵ برای منطقه‌ای در غرب آفریقا بررسی کردند و این تغییرات با یکی از روش‌های هیدرولوژیکی شبیه‌سازی رطوبت، مقایسه شد. نتایج حاکی از این بود که نمایه TVDI تغییرات مکانی رطوبت را در مقیاس بهتری می‌تواند بازتاب کند (Sandholt et al., 2002). پاتل و همکاران در پژوهش خود با استفاده از NDVI و LST، برای تصاویر سنجنده مودیس TVDI را برای 8 روز بررسی کردند. نتایج نشان داد که یک همبستگی بالا ولی منفی بین TVDI و رطوبت خاک به‌ویژه هنگامی که پوشش گیاهی خاک کم است وجود دارد (Patel et al., 2009).

هدف از انجام این پژوهش بررسی امکان برآورد رطوبت لایه سطحی خاک با استفاده از داده‌های باندهای مرئی، فرورسرخ نزدیک و گرمایی سنجنده مودیس در اراضی با اقلیم نیمه‌خشک معتدل گنبدکاووس می‌باشد. برای این منظور وجود همبستگی بین رطوبت خاک به‌دست آمده از عملیات میدانی با نمایه‌های پوشش گیاهی و گرمایی حاصل از تصاویر سنجنده مودیس بررسی شد. نتایج این بررسی می‌تواند به عنوان روشی کاربردی در مطالعات محیطی توسط پژوهشگران علوم گوناگون مورد استفاده قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه در این پژوهش، بخش‌هایی از شمال شرق شهرستان گنبدکاووس در استان گلستان می‌باشد. این منطقه با گستره‌ای نزدیک به 50 کیلومترمربع بین عرض‌های جغرافیایی 25° 37' تا 28° 37' شمالی و طول‌های جغرافیایی 22° 55' تا 22° 55' شرقی واقع شده است. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در شکل 1 آمده است. آب و هوای منطقه مورد مطالعه، بر اساس طبقه بندی اقلیمی آمبرژه دارای اقلیم نیمه‌خشک معتدل بوده و متوسط دمای سالانه آن 18/5 درجه سانتی‌گراد و میانگین بارش سالانه 461/5 میلی‌متر می‌باشد.

خاک، این نمایه برای بررسی رطوبت خاک، مورد توجه بیش‌تری بوده است (نوروزی اقدام و همکاران، 1387؛ Gutman., 1990؛ Wang., 2005؛ Tucher., 1989). در برخی از موارد به دلیل پاسخ تاخیری پوشش گیاهی به تغییرات رژیم رطوبتی خاک، NDVI پاسخ تاخیرداری نسبت به رطوبت خاک دارد و اغلب داده‌های رطوبت خاک و سایر مشخصه‌های آب و هواشناسی همبستگی معنی‌داری با NDVI در یک دوره کوتاه زمانی ندارند (Wang et al., 2001). آدگوک و همکاران به بررسی رابطه مستقیم بین نمایه گیاهی NDVI و رطوبت خاک پرداختند و هر دو وجود تاخیر در تاثیر مقدار رطوبت بر نمایه گیاهی NDVI را تایید کردند (Adegoke et al., 2002).

یکی دیگر از نمایه‌های گیاهی، NMDI¹ «نمایه نرمال شده خشک‌سالی چند باندهای» است که به جای استفاده از یک باند جذب آب مایع از تفاوت بین دو باند جذب آب مایع به‌عنوان باندهای حساس به رطوبت خاک و گیاه استفاده می‌کند. این نمایه از 3 باند، یکی در محدوده فرورسرخ نزدیک و دو تا در محدوده طول‌موج کوتاه فرورسرخ به دست می‌آید (Wang et al., 2007). امروزه بسیاری از متخصصان سنجش‌ازدور از ترکیب داده‌های بازتابی و گرمایی برای به دست آوردن اطلاعاتی درباره پوشش گیاهی و پایش رطوبت خاک استفاده می‌کنند (علوی‌پناه، 1382). شماری از پژوهشگران نیز استفاده ترکیبی از اطلاعات ماهواره‌ای دمای سطح زمین (LST)² و نمایه-های گیاهی را در برآورد رطوبت خاک پیشنهاد کردند و باور دارند که ترکیب این داده‌ها می‌تواند اطلاعات بهتری از تنش‌های گیاهی و شرایط رطوبتی سطح زمین فراهم آورد. در مناطق خشک انتظار می‌رود که رابطه‌ای منفی بین NDVI و LST وجود داشته باشد که این می‌تواند به دلیل افزایش دمای سطح زمین برای مناطق با پوشش گیاهی کم و NDVI پایین باشد. این منجر به یک فضای مثلی می‌شود که برای استخراج وضعیت رطوبت سطحی خاک مورد بررسی قرار گرفته است (کشاورز و همکاران، 1390؛ Gao 2007؛ Carlson., 2007؛ Mallick et al., 2009؛ et al., 2011). این روش استخراج رطوبت که به روش مثلی معروف است نخستین بار توسط پریس (Price., 1990) معرفی شد و سپس توسط پژوهشگران دیگر توسعه یافت. مالیک و همکاران مقادیر رطوبت به دست آمده از همین روش در مناطق کشاورزی هند را با مقادیر واقعی رطوبت مقایسه کرده و نمودارهای مثلی تولید شده را به نمایش گذاشتند (Mallick et al., 2009). نمایه NDVI برای واکنش به تنش آب محافظه کارانه عمل می‌کند به عبارتی بعد از تنش آبی، پوشش گیاهی تا مدتی سبز باقی می‌ماند. در برابر دمای سطح به‌سرعت با تنش آبی تغییر می‌کند

3 - Temperature Vegetation Dryness Index

4 - Thematic Mapper

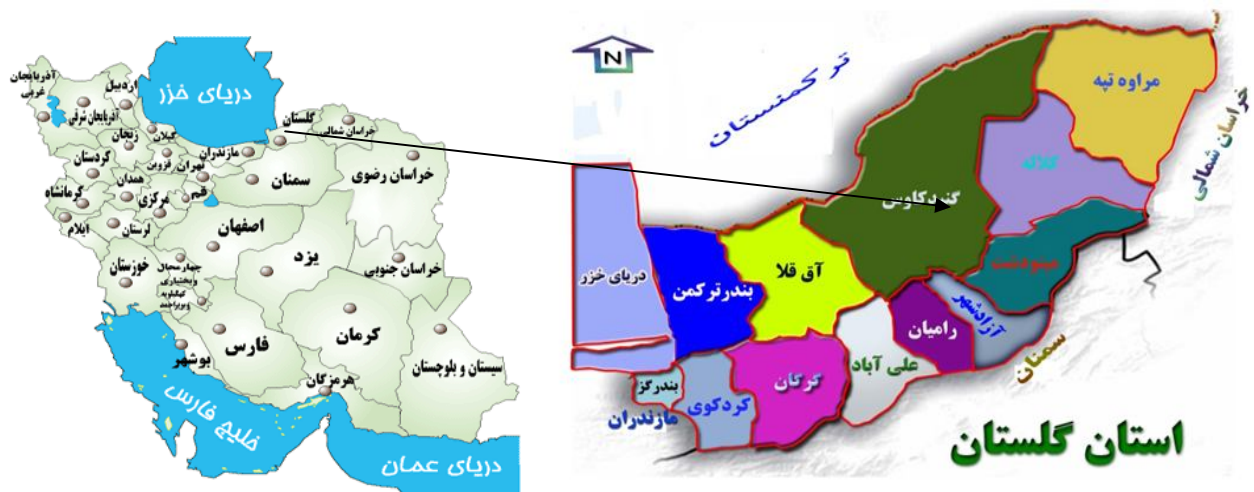
5 - Advanced Very High Resolution Radiometer

1- Normalized Multi Drought Index

2 - Land Surface Temperature

جدول 1- ویژگی‌های تصاویر گرفته شده از سنجنده مودیس

ساعت تصویربرداری (گرینویچ)	تاریخ تصویر (شمسی)	ردیف	ساعت تصویربرداری (گرینویچ)	تاریخ تصویر (شمسی)	ردیف
45:06	05/01/1393	9	07:15	11/07/1392	1
45:07	27/01/1393	10	07:05	19/07/1392	2
45:06	1393/01/31	11	35:07	02/08/1392	3
50:06	1393/02/13	12	07:00	24/08/1392	4
30:07	1393/02/23	13	35:07	04/09/1392	5
50:07	1393/02/28	14	07:05	17/09/1392	6
15:07	1393/03/10	15	06:40	23/10/1392	7
			15:07	19/11/1392	8



شکل 1- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

مربوط به محصولات مودیس دریافت شد.² ویژگی‌های تصاویر مورد استفاده در جدول 1 آورده شده است. برای پردازش این تصاویر از نرم‌افزار 4.8 Envi استفاده شد. پس از انجام تصحیحات لازم بر روی تصاویر مورد نظر مقادیر طیفی باندهای بازتابی و گرمایی استخراج و سپس نمایه‌های گوناگون محاسبه گردید. با استفاده از آن‌ها مدل‌های رگرسیونی گوناگون شامل مدل‌های خطی یک متغیره و چند متغیره و همچنین مدل‌های غیرخطی برای برآورد رطوبت خاک بررسی و مناسب‌ترین آن‌ها برگزیده شد. مقایسه مدل‌های ارایه شده توسط تحلیل‌های آماری و معنی‌داری همبستگی‌ها با آماره F بررسی شد و همچنین برای ارزیابی مدل‌ها، مقایسه میانگین توسط آزمون t انجام شد.

روش جمع‌آوری داده‌ها و پردازش اطلاعات

برای انجام این پژوهش، منطقه‌ای به طول تقریبی 10 کیلومتر و عرض 5 کیلومتر برگزیده شد که شامل گندم‌زار و مرتع بود و در طی روزهای نمونه‌برداری 511 نقطه برداشت شد. برای اطمینان بیشتر، از چند نقطه درون پیکسل نمونه‌برداری رطوبت خاک صورت گرفت و سرانجام میانگین رطوبت این نقاط به عنوان میانگین رطوبت پیکسل لحاظ شد. بر این اساس 511 نقطه نمونه‌برداری در 125 پیکسل خلاصه شد. نمونه‌های خاک تا عمق 10 سانتی‌متری برداشت شد. تعداد 15 تصویر مناسب تولید شده از تصاویر سنجنده مودیس¹ برای روزهایی که اندازه‌گیری‌های میدانی رطوبت خاک موجود بود، از سایت

2 - <http://lance-modis.eosdis.nasa.gov/cgi-bin/imagery/realtime.cgi>

1- MODIS

نمایه تفاوت نرمال شده گیاهی (NDVI)

این نمایه برای همه پیکسل‌های تصاویر برگزیده شده محاسبه شد.

$$NDVI = \frac{R_{860} - R_{645}}{R_{860} + R_{645}} \quad (1)$$

که در آن، R_{860} (پهنای باند 841 تا 876 نانومتر) معادل باند شماره 2 سنجنده مودیس و R_{645} (پهنای باند 620 تا 670 نانومتر) معادل باند شماره 1 این سنجنده است.

نمایه نرمال شده خشک‌سالی چند باندی (NMDI)

مقدار این نمایه نیز برای همه پیکسل‌های تصاویر برگزیده شده محاسبه شد.

$$NMDI = \frac{R_{860} - (R_{1640} - R_{2130})}{R_{860} + (R_{1640} - R_{2130})} \quad (2)$$

که در آن، R_{860} (پهنای باند 841 تا 876 نانومتر) معادل باند شماره 2 سنجنده مودیس، R_{1640} (پهنای باند 1628 تا 1652 نانومتر) معادل باند شماره 6 و R_{2130} (پهنای باند 2105 تا 2155 نانومتر) معادل باند شماره 7 این سنجنده است.

محاسبه دمای سطح زمین (LST)

دمای سطحی (T_s) بر حسب کلونین از معکوس سازی معادله پلانک و برای جسم غیر سیاه از رابطه 3 به دست می‌آید (بابازاده و همکاران، 1391).

$$T_s = \frac{K_2}{Ln\left(\frac{\varepsilon K_1}{R} + 1\right)} \quad (3)$$

که در آن، R بازتابش باند گرمایی ($W/m^2/sr/\mu s$)، گسیل مندی سطحی و K_1 و K_2 ضریب‌های معادله هستند که از رابطه‌های 4 و 5 به دست می‌آیند.

$$K_1 = \frac{(2\pi hc^2)}{\lambda^5} \quad (4)$$

$$K_2 = \frac{(hc)}{k \lambda} \quad (5)$$

که در آن‌ها، h ثابت پلانک، 6.626×10^{-34} (J.s)، c سرعت نور، 2.998×10^8 (m/s)، k ثابت بولتزمن 1.381×10^{-23} (J/K) و λ طول موج بر حسب متر می‌باشد. برای سنجنده مودیس مقادیر K_1 و K_2 بدین ترتیب محاسبه می‌شود:

$$K_2 = 730/7 \text{ و } K_1 = 1306/3 \quad 31$$

$$K_2 = 475/5 \text{ و } K_1 = 1198/7 \quad 32$$

دمای سطح زمین بر حسب کلونین به صورت رابطه 6 محاسبه می‌شود (Kumar Sen., 2004):

$$LST = 0.39 T31^2 + 2.34 T31 - 0.78 T31 T32 - 1.34 T32 + 0.39 T32^2 + 0.56 \quad (6)$$

نمایه TVDI و SWI

نمایه TVDI و «نمایه خیزی خاک SWI به صورت رابطه 7 محاسبه می‌شوند:

$$TVDI = \frac{LST - LST_{min}}{LST_{max} - LST_{min}} \quad (7)$$

$$SWI = \frac{LST_{max} - LST}{LST_{max} - LST_{min}} \quad (8)$$

که در آن‌ها، LST_{min} کمینه دمای سطح در مثلث تشکیل شده توسط NDVI و LST می‌باشد که معرف لبه مرطوب است، LST_{max} بیشینه دمای سطح در مثلث تشکیل شده می‌باشد و معرف لبه خشک است و LST دمای سطح مربوط به هر پیکسل می‌باشد (Sandholt et al., 2002). شکل 2 مثالی ساده از نمود تشکیل مثلث و لبه‌های خشک و مرطوب می‌باشد. رابطه‌های 9 و 10 برای محاسبه لبه‌های خشک و مرطوب به کار می‌روند:

$$LST_{min} = a + b NDVI \quad (9)$$

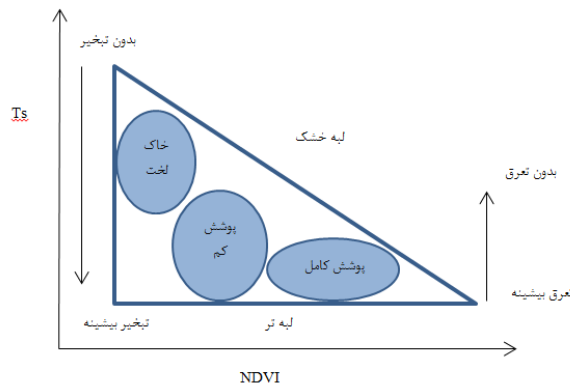
$$LST_{max} = c + d NDVI \quad (10)$$

که در آن‌ها، NDVI نمایه تفاوت نرمال شده گیاهی و a ، b ، c و d ضریب‌های خط هستند.

نتایج و بحث

رطوبت خاک و نمایه‌های گیاهی

جدول 2 روابط میان رطوبت اندازه‌گیری شده خاک و نمایه‌های سنجش از دور را نشان می‌دهد. میان نمایه تفاوت نرمال شده گیاهی (NDVI) به عنوان نمایشگر سبزی‌نگی گیاهی و رطوبت سطحی اندازه‌گیری شده همبستگی نیرومندی دیده نشد. میان نمایه نرمال شده خشک‌سالی چند باندی (NMDI) و رطوبت سطحی اندازه‌گیری شده نیز همبستگی نیرومندی دیده نشد. از آن‌جا که ممکن است مجموعه‌ای از باندهای بازتابی وضعیت رطوبت خاک را بهتر بنمایانند، به همین دلیل میان رطوبت خاک (SM) و دو نمایه بالا و برخی باندهای بازتابی همبستگی‌های چندگانه‌ای برقرار شد (جدول 2).



شکل 2- نمودار مثلث NDVI/LST و سهم تبخیر و تعرق از سطح خاک (Sandholt et al., 2002)

مدل 1 (جدول 2) همبستگی میان رطوبت خاک و نمایه‌های NDVI و NMDI را نشان می‌دهد. این همبستگی نسبتاً کم و معنی‌دار ($p \leq 0/01$; $R = 0/62$) است و تنها 38% تغییرات رطوبت خاک را نمایندگی می‌کند. با افزودن باندهای بازتابی بیش‌تر (B5, B6, B9, B10, B19) از سنجنده مودیس به مدل 1 و ایجاد مدل 2 همبستگی با رطوبت خاک بسیار بهبود یافت؛ ($p \leq 0/01$; $R = 0/88$) به گونه‌ای که این مدل 77 درصد تغییرات رطوبت سطحی خاک را نمایندگی می‌کند و خطای برآورد از 4/3 به 2/7 درصد کاهش یافت.

جدول 2). با افزودن باندهای بیش‌تر، بهبود چشم‌گیری در افزایش همبستگی و کاهش خطای آزمایشی دیده نشد. برای گزینش تعداد متغیرهای بهینه ورودی به مدل رگرسیون، از نمودار تغییرات ضریب تبیین (شکل 3) در برابر تعداد متغیرها استفاده شد. در نتیجه بر پایه زانوی منحنی، 7 متغیر برای مدل برگزیده شد. (بیشینه ضریب تبیین). به این معنی که با افزایش تعداد متغیرها، تغییر محسوسی در ضریب تبیین صورت نگرفت.

جدول 2- معادله‌ها و ضرایب مدل‌های رگرسیونی برازش داده شده

نوع سنجنش	مدل	معادله	R	RMSE	P
	1	$SM = -15/88 NDVI + 21/30 NMDI - 3/84$	0/62	4/31	$\leq 0/01$
بازتابی	2	$SM = -241/28 B_5 + 110/87 B_6 + 351/52 B_9 - 388/21 B_{10} + 128/41 B_{19} + 11/97 NDVI - 7/05 NMDI + 17/39$	0/88	2/69	$\leq 0/01$
	3	$SM = -0/41 LST + 131/73$	-0/89	2/51	$\leq 0/01$
	4	$SM = -0/44 T_{31} + 140/38$	0/87	2/73	$\leq 0/01$
گرمایی	5	$SM = -0/46 T_{32} + 144/21$	0/85	2/88	$\leq 0/01$
	6	$SM = 2/60 LST - 10/95 T_{31} + 8/06 T_{32} + 96$	0/91	2/64	$\leq 0/01$
	7	$SM = -13/27 TVDI + 15/28$	-0/90	2/39	$\leq 0/01$
ترکیبی	8	$SM = -12/45 SWI + 0/77$	0/87	2/67	$\leq 0/01$
	9	$SM = 2/33 + 13/24 SWI^{2/68}$	0/91	2/27	$\leq 0/01$

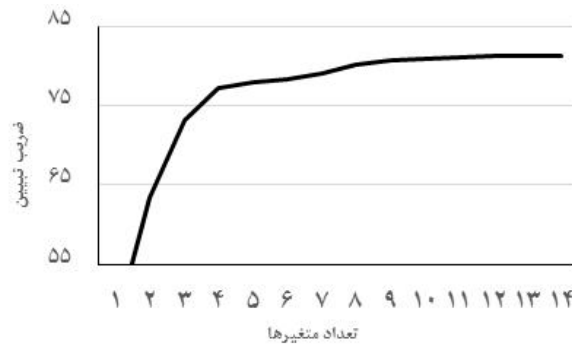
SM - رطوبت برآوردی خاک؛ B - معرف باند و زیرنویس‌های آن مربوط به شماره آن‌ها برای سنجنده مودیس می‌باشد. R - ضریب همبستگی

به دلیل پاسخ تاخیری پوشش گیاهی به تغییرات رطوبت خاک، نمایه‌های گیاهی مانند NDVI و NMDI واکنش تاخیرداری نسبت به رطوبت خاک دارند و در بیش‌تر زمان‌ها داده‌های رطوبت خاک و دیگر مشخصه‌های آب و هواشناسی همبستگی نیرومندی با این نمایه‌ها در یک دوره کوتاه زمانی ندارند (Wang et al., 2007). این پسماند زمانی بستگی به نوع پوشش زمینی و روش تامین آب مورد نیاز گیاهان منطقه است (Wang, 2000؛ Adegoke and Carleton., 2002). هر چه وابستگی به بارندگی بیش‌تر باشد،

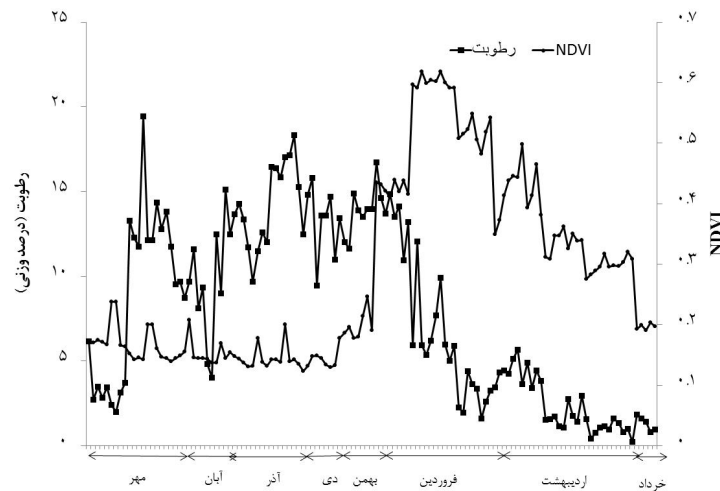
نمایه‌های گیاهی مانند NDVI و NMDI واکنش تاخیرداری نسبت به رطوبت خاک دارند و در بیش‌تر زمان‌ها داده‌های رطوبت خاک و دیگر مشخصه‌های آب و هواشناسی همبستگی نیرومندی با این نمایه‌ها در یک دوره کوتاه زمانی ندارند (Wang et al., 2007). این پسماند زمانی بستگی به نوع پوشش زمینی و روش تامین آب مورد نیاز گیاهان منطقه است (Wang, 2000؛ Adegoke and Carleton., 2002). هر چه وابستگی به بارندگی بیش‌تر باشد،

15 روز مشاهده شد. آدگوک و همکاران نیز به بررسی رابطه مستقیم بین نمایه گیاهی NDVI و رطوبت خاک پرداختند و هر دو وجود تاخیر در تاثیر مقدار رطوبت بر نمایه گیاهی NDVI را تایید کردند (Adegoke et al, 2002).

پسماند زمانی کوتاه‌تر خواهد بود. نوروبی اقدام و همکاران (1387) در پژوهشی رابطه بین رطوبت خاک به دست آمده از اندازه‌گیری میدانی NDVI تاخیری و هم‌زمان حاصل از سنجنده مودیس را در فصل رشد گیاهان مرتعی استان خراسان رضوی به وسیله رگرسیون خطی مورد مطالعه قرار داده و بیشینه همبستگی ($R=0/56$) در زمان تاخیر



شکل 3- منحنی تغییرات ضریب تبیین با تعداد متغیرها



شکل 4- روند تغییرات نمایه NDVI با تغییرات رطوبت سطح خاک در دوره نمونه‌برداری (پاییز و زمستان 1392 و بهار 1393؛ گنبد کاووس)

(LST) را نشان می‌دهد. همبستگی منفی بالا و بسیار معنی‌داری ($p \leq 0/01$; $R = -0/89$) میان دمای سطح خاک (LST) و رطوبت اندازه‌گیری شده نمایشگر آن است که 79 درصد تغییرات رطوبت سطح خاک توسط این نمایه بازگو می‌شود و خطای برآوردی در مقایسه با مدل 2 نیز اندکی کاهش یافته است. برتری این مدل بر مدل 2 کاهش شمار متغیرها از 7 به 1 است. بر پایه معادله تراز تابش سهم شار گرمای نهان با افزایش تبخیر و تعرق افزایش و سهم گرمای محسوس کاسته می‌شود (فائمی بایگی و همکاران، 1391). از این رو، با فراهم بودن رطوبت در سطح خاک، شار گرمای نهان افزایش و سهم گرمای محسوس و گرمای انباشتی در خاک کاهش می‌یابد، پس شیب منفی رابطه SM با LST گویای این فرایند فیزیکی است

روند تغییرات نمایه NDVI با رطوبت در دوره نمونه‌برداری (از مهرماه 92 تا خرداد 93) شکل 4 دیده می‌شود. برای مزرعه گندم دوره نمونه‌برداری شامل دوره‌های قبل از کاشت، دوره رشد و برداشت می‌باشد. در آغاز دوره که پوشش گیاهی ضعیف بوده، رطوبت در خاک ذخیره شده و NDVI با یک دوره تاخیر نسبت به بیشینه رطوبت، به مقدار بیشینه خود رسیده است. در دوره پایانی نیز به دلیل برداشت محصول و نیز کاهش بارندگی‌ها، پوشش گیاهی و در نتیجه نمایه NDVI کاهش یافته است.

رطوبت خاک و نمایه‌های گرمایی

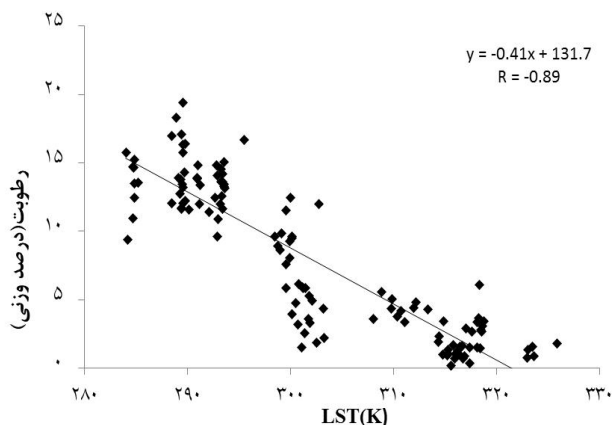
مدل 3 (جدول 2) همبستگی میان رطوبت خاک و نمایه گرمایی

LST، T_{31} و T_{32} ، برآورد بهتری از رطوبت سطحی خاک فراهم می‌کند.

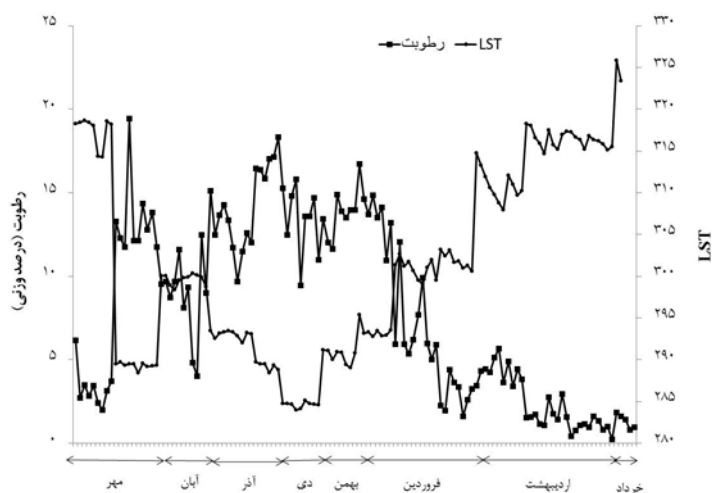
شاخص‌های گیاهی برای واکنش به آب محافظه کارانه عمل می‌کنند؛ به این مفهوم که پس از تنش آبی، رسانایی پوشش گیاهی به بخار آب کاهش می‌یابد و این رخداد بر بازتابندگی پرتوهای برخوردی اثر می‌گذارد، که پیامد آن افزایش مصرف انرژی در پاره‌های گرمای محسوس و انباشت در برگ خواهد بود، از این رو دمای سطح با تنش آبی تغییر خواهد کرد (Gomez, 1997). روند تغییرات رطوبت خاک با زمان در دوره نمونه برداری (از مهر ماه 92 تا خرداد 93) در شکل 6 دیده می‌شود. بر پایه این نمودار تغییرات زمانی رطوبت خاک با تغییرات LST وارونه است بدین گونه که هرگاه دمای سطح کم بوده مقدار رطوبت خاک زیاد بوده است. این تغییرات تقریباً هم‌زمان به رخداد پیوسته و دارای کم‌ترین پسماند زمانی می‌باشند. این موضوع پاسخ سریع تغییرات رطوبت نسبت به تغییرات دما را تایید می‌کند.

(شکل 5). برای مدل‌های 4 و 5 (جدول 2)، برای برآورد رطوبت خاک به جای LST از دماهای باند 31 و 32 سنجنده مودیس، که نمایشگر دمای زمین و ابرها هستند، استفاده شد، که به ترتیب دارای ضریب همبستگی 0/87- و 0/85- می‌باشند. این دو مدل در هم‌سنجی با مدل 3 از برتری ویژه‌ای برخوردار نیست.

یافته‌های دمای زمین و باند‌های گرمایی زمین نشانگر نقش آن‌ها در آشکارسازی رطوبت خاک است، از این رو می‌توان با ترکیب آن‌ها به مدل بهتری دست یافت. مدل 6 (جدول 2) رابطه رگرسیونی سه متغیره LST، T_{31} و T_{32} را با رطوبت خاک نشان می‌دهد، که ضریب همبستگی را حدود 3 درصد افزایش داده است ($R = 0/91$; $R^2 = 2/62$). به دلیل کاربرد دماهای باند 31 و 32 در محاسبه دمای سطح زمین و تاثیر مقدار رطوبت بر آن‌ها روابط رگرسیونی خطی یک متغیره و چند متغیره که بیان کننده پیوند بین آن‌ها و رطوبت خاک است بررسی شد. بنابراین، برپایه این یافته‌ها مدل 6 شامل سه متغیر



شکل 5- رابطه دمای برآوردی سطح زمین (از تصاویر سنجنده مودیس) و رطوبت خاک اندازه‌گیری شده (مدل 3)

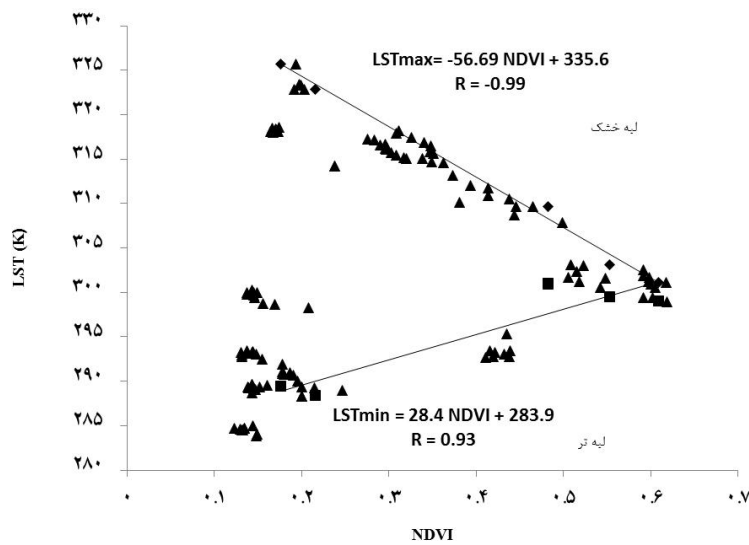


شکل 6- روند تغییرات نمایه LST با تغییرات رطوبت سطح خاک در دوره نمونه برداری (پاییز و زمستان 1392 و بهار 1393؛ گنبد کاووس)

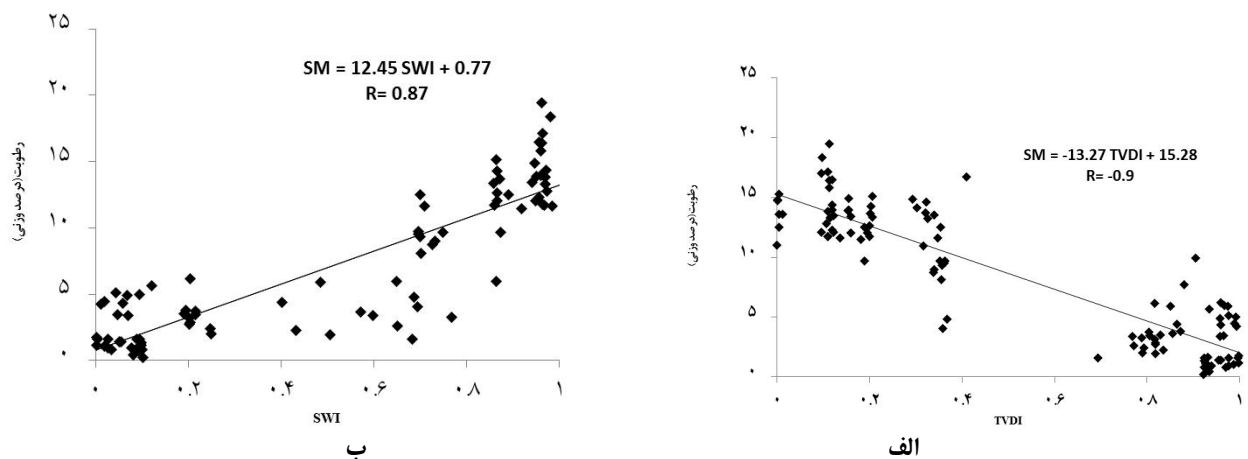
رطوبت خاک و نمایه‌های ترکیبی پوشش گیاهی و گرمایی

با استفاده از داده‌های نمایه‌های NDVI و LST، فضای مثلثی شکل 7 به دست آمد که دربرگیرنده لبه‌های خشک و تر می‌باشد. برپایه چیدمان داده‌ها در این نمودار، همبستگی میان LST و NDVI بیشینه (LST_{max}) و کمینه (LST_{min})، در دماهای کم‌تر و بیش‌تر از 300 درجه کلوین (میانگین دمای سطح زمین)، برآورد شد. یافته‌های این نمودار نشان می‌دهد که در بازه دماهای کم‌تر از 300 درجه کلوین با افزایش نمایه NDVI تا رسیدن به لبه تر، همبستگی مثبت و بسیار معنی‌داری میان LST و NDVI ($R = 0/93$) برقرار است. این پدیده نمایشگر آن است که بیش‌تر تابش خالص خورشیدی

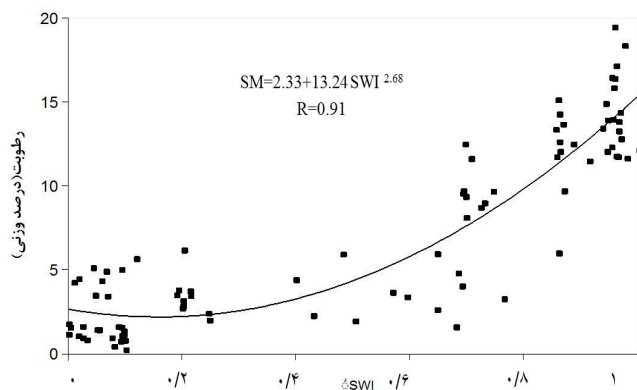
در این بازه صرف گرمایش خاک و گیاه و فرآیند تبخیر-تعرق شده است. با افزایش دما، فرای این مرز، انرژی خالص در پوشش گیاهی اندک صرف گرمای محسوس و هم صرف انباشت در خاک شده است، و با افزایش پوشش گیاهی سهم پاره گرمای محسوس کاهش یافته است، از این رو پیوند میان LST و NDVI، گرچه بسیار معنی‌دار ($R = -0/99$) است، ولی دارای شیب منفی است (شکل 7). این یافته‌ها با یافته‌های قائمی بایگی و همکاران (1391) هم‌خوانی دارد. آنان برای برآورد تبخیر تعرق با روش باون دریافتند که در ساعت‌های خنک روز، پیش از نیم‌روز، بیش‌تر گرمای خالص صرف گرمای محسوس می‌شود.



شکل 7- نمود مثلث LST-NDVI و لبه‌های خشک و تر رطوبت خاک در منطقه گنبد (داده‌های پاییز و زمستان 1392 و بهار 1393؛ گنبدکاووس)



شکل 8- همبستگی خطی میان رطوبت سطح خاک و نمایه‌های الف) TVDI (مدل 7) ب) SWI (مدل 8)



شکل 9- همبستگی نمایی میان نمایه SWI و رطوبت سطح خاک (مدل 9)

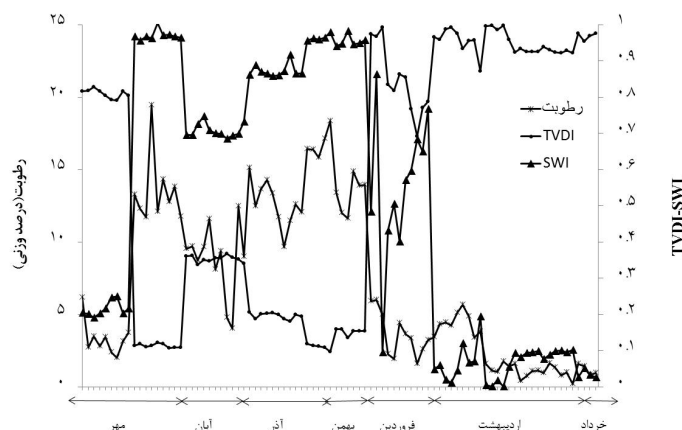
ریشه در سه کشتزار ذرت علوفه‌ای و یونجه استفاده کردند و نتایج آن‌ها نشان داد که با استفاده از فضای مثلثی و نمایه SWI برآورد مناسبی از وضعیت رطوبت خاک در سه کشتزار حاصل شد. با بررسی تغییرات رطوبت خاک با نمایه SWI به نظر می‌رسد رابطه غیر خطی بین رطوبت خاک و این نمایه بتواند وضعیت برآورد رطوبت را بهتر بنمایاند. به همین دلیل میان آن‌ها همبستگی غیر خطی و نمایی برقرار شد (جدول 2). مدل 9 همبستگی نمایی میان رطوبت خاک و نمایه SWI را نشان می‌دهد. همبستگی مثبت و بسیار معنی‌دار ($p \leq 0/01$; $R = 0/91$) میان آن‌ها نمایشگر آن است که 83 درصد تغییرات رطوبت خاک توسط این رابطه بازگو می‌شود، که نسبت به مدل خطی همین نمایه، بهبودی 4 درصدی در مقدار ضریب همبستگی و خطای برآوردی را نشان می‌دهد (شکل 9). با توجه به این که مدل خطی نیز همبستگی معنی‌دار و نیرومندی دارد و از طرفی مدل‌های خطی ساده‌تر هستند می‌توان برحسب شرایط از هر دو مدل ارایه شده استفاده کرد. تغییرات TVDI و SWI با رطوبت در دوره نمونه‌برداری (از مهرماه 92 تا خرداد 93) شکل 10 دیده می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود نوسان‌های افزایش و کاهش رطوبت به صورت مستقیم بر شاخص SWI و به صورت وارونه بر نمایه TVDI تاثیر گذاشته است.

برای ارزیابی مدل‌های ارائه شده از آزمون t در سطح 5 درصد و به روش مقایسه میانگین‌های نمونه‌های مستقل بین مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر به‌دست‌آمده از مدل‌های رگرسیونی انجام شد (جدول 3). در همه موارد فرض صفر برای مدل‌های ارائه شده پذیرفته شد (تایید فرض صفر به این معناست که تفاوت معنی‌داری بین مقادیر رطوبت خاک مشاهداتی و برآوردی وجود ندارد) و در نتیجه اختلاف معنی‌داری بین مقدارهای رطوبت اندازه‌گیری شده و برآورد شده وجود نداشت (جدول 3). با توجه به همه مدل‌های ارائه شده، بیشترین همبستگی ($R = 0/91$) مربوط به مدل غیر خطی با نمایه SWI (مدل 9) و همچنین مدل گرمایی ارائه شده شامل سه متغیر

مدل 7 (جدول 2) همبستگی میان رطوبت خاک و «نمایه دما-خشکی گیاهی» (TVDI) را نشان می‌دهد. همبستگی منفی بالا و بسیار معنی‌دار ($p \leq 0/01$; $R = -0/90$) میان TVDI و رطوبت اندازه‌گیری شده نمایشگر آن است که 81 درصد تغییرات رطوبت سطح خاک توسط این نمایه بازگو می‌شود و خطای برآوردی (2/39) (RMSE=) نسبت به همه مدل‌های پیشین کم‌تر است. از آنجایی که شاخص TVDI شدت خشکی را نشان می‌دهد، انتظار می‌رود که با افزایش رطوبت، مقدار این نمایه کاهش یابد (شکل 8 - الف). پاتل و همکاران در پژوهش خود TVDI را با استفاده از NDVI و LST برای تصاویر سنجنده مودیس در 8 روز بررسی کردند. یافته‌های آنان نشان داد که رابطه‌ای نیرومند و منفی بین TVDI و رطوبت خاک وجود دارد، به‌ویژه زمانی که پوشش گیاهی کم باشد (Patel et al., 2009). عسکری و همکاران (1393) نیز در پژوهش خود روند تغییرات بارندگی و نمایه TVDI را بررسی کردند. آن‌ها مشاهده کردند که با افزایش مقدار بارندگی (رطوبت) نمایه TVDI کاهش می‌یابد.

همچنین با استفاده از فضای مثلثی و لبه‌های خشک و تر به دست آمده، نمایه خیسگی خاک (SWI) نیز محاسبه شد. مدل 8 (جدول 2) همبستگی خطی میان رطوبت خاک و نمایه SWI را نشان می‌دهد. همبستگی مثبت و بسیار معنی‌دار ($R = 0/87$) میان SWI و رطوبت اندازه‌گیری شده نمایشگر آن است که 76 درصد تغییرات رطوبت سطح خاک توسط این نمایه نمایندگی می‌شود. این نمایه نسبت به نمایه TVDI دارای خطای برآوردی بیش‌تر به میزان 28 درصد و همبستگی ضعیف‌تر به میزان 3 درصد است. از آنجایی که شاخص SWI، شدت خیسگی خاک را بیان می‌کند، انتظار می‌رود که با افزایش رطوبت، مقدار این نمایه نیز افزایش یابد (شکل 8 - ب). این نمایه توسط کشاورز و همکاران (1390) برای روندیابی رطوبت خاک در اصفهان به کاربرده شد. هم‌چنین فلاح و همکاران (1393) از این شاخص برای برآورد رطوبت خاک تا ژرفای

LST، T31 و T32 (مدل 6) می‌باشد. همچنین کم‌ترین خطای برآورد نیز مربوط به مدل غیر خطی با نمایه SWI (مدل 9) است.



شکل 10- روند تغییرات TVDI، SWI و رطوبت اندازه‌گیری شده در منطقه گنبد (داده‌های پاییز و زمستان 1392 و بهار 1393؛ گنبد کاووس)

جدول 3- مقایسه میانگین رطوبت‌های اندازه‌گیری شده و برآورد شده با استفاده از نمایه‌های سنجش از دور در منطقه گنبد کاووس (داده‌های پاییز و زمستان 1392، و بهار 1393)

مدل	میانگین	خطای استاندارد	انحراف معیار	P*
1	8/01	0/31	3/42	0/05>
2	8/01	0/43	4/81	0/05>
3	8/01	0/43	4/86	0/05>
4	8/01	0/42	4/75	0/05>
5	8/01	0/42	4/66	0/05>
6	8/01	0/44	4/99	0/05>
7	8/14	0/47	4/96	0/05>
8	6/97	0/49	4/76	0/05>
9	7/10	0/52	4/93	0/05>

* در سطح 5% اختلاف‌ها معنی دار نبودند.

توان از یک الگوریتم خاص برای همه مناطق استفاده کرد. باید برای هر منطقه با توجه به شرایط محیطی و آب و هوایی کم خطاترین و بهترین روش را برای برآورد رطوبت سطحی به دست آورد. البته روش‌های نظریه بر اساس رابطه‌های فیزیکی می‌تواند نتایج دقیق‌تری بدست دهد و این موضوع نیاز به پارامترها و روش‌های حل پیچیده‌تری دارد. تلاش برای ساده‌سازی هر چه بیش‌تر این مدل‌ها با دقت قابل قبولی می‌تواند زمینه‌ساز پژوهش‌های بیش‌تری در آینده باشد.

منابع

بابازاده، ح.، نوروزی اقدم، الف، عقیقی، ح.، شمس نیاس، الف و خدادادی دهکردی، د. 1391. تخمین رطوبت لایه سطحی خاک اراضی مرتعی مناطق خشک و نیمه خشک با استفاده از شاخص دما و پوشش گیاهی (مطالعه موردی: استان خراسان)، فصلنامه علمی-

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

به‌طور کلی می‌توان گفت استفاده از نمایه‌های گیاهی مانند NDVI و NMDI به تنهایی رابطه قوی با رطوبت سطح ندارد که می‌تواند به دلیل پاسخ تاخیری پوشش گیاهی به تغییرات رژیم رطوبتی خاک باشد. با دخالت نمایه‌های گرمایی و استفاده از روش مثلثی، رطوبت خاک به دست آمده از مدل‌های دقیق‌تر و نزدیک‌تر به واقعیت خواهد بود. در این پژوهش نمایه‌های گرمایی به تنهایی توانستند رابطه خوبی با رطوبت سطحی خاک برقرار کنند. برای شناخت بهتر ارتباط بین رطوبت و نمایه‌های ماهواره‌ای بهتر است که این گونه پژوهش‌ها با سنجنده‌های متفاوت و دارای دقت‌های مکانی و زمانی بالاتر و همچنین برای کاربری اراضی مختلف نیز انجام شود. در پایان باید به این نکته اشاره کرد که با توجه به تجربی بودن مدل‌های مورد استفاده نمی‌توان به‌طور مشخص اعلام کرد که می-

- Sensing.18.1: 71– 94.
- Gutman,G. 1990. Towards monitoring drought from space. *Journal of Climate*. 3: 282-295.
- Kumar Sen,P. 2004. Diagnosing Irrigation Water Resources with Multi Sensor Remote sensing and GIS Tecniques (A case study of the Roxo Dam Irrigation System, Portugal). International Institute for Geo Information Science and Earth Observation Enschede, the Netherlands.
- Mallick,K., Bhattacharya,B.K and Patel,N.K. 2009. Estimating volumetric surface moisture content for cropped soils using a soil wetness index based on surface temperature and NDVI. *Agricultural and Forest Meteorology*. 149: 1327– 1342.
- 105:69–80.
- Patel,N.R. Anapashsha,R. Kumar,S.S. Saha,K. and Dadhwal,K. 2009. Assessing potential of MODIS derived temperature/vegetation condition index (TVDI) to infer soil moisture status. *International Journal of Remote Sensing*. 30.1: 23–39.
- Price,J.C. 1990. Using Spatial Context in Satellite Data to Infer Regional Scale Evapotranspiration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 28: 940-948.
- Sandholt,I., Rasmussen,K and Andersen,J. 2002. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. *Remote Sensing of Environment*, 79: 213– 224.
- Tucher,C.J. 1989. Comparing SMMR and AVHRR data for drought monitoring. *International Journal of Remote Sensing*, 10: 1663-1672.
- Wang,J. 2000. Relations between productivity, climate, and Normalized Difference Vegetation Index in the central Great Plains. Lawrence: University of Kansas (PhD dissertation).
- Wang,X. 2005. Relation between ground- based soil moisture and satellite image – based NDVI.
- Wang,J., Price,K.P and Rich,P.M. 2001. Spatial patterns of NDVI in response to precipitation and temperature in the central Great Plains. *International Journal of Remote Sensing*, 22: 3827– 3844.
- Wang,L and OU,J.J. 2007. NMDI: A Normalized Multi-Band Drought Index For Monitoring Soil And Vegetation Moisture With Satellite Remote Sensing. *Geophysical Research Letters* 34: L20405, 1-5.
- Zhao,S., Yang,Y., Qiu,G., Qin,Q., Yao,Y., Xiong,Y and Li,C. 2010. Remote detection of bare soil moisture using a surface-temperature-based soil evaporation transfer coefficient, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 12: 351-358
- پژوهشی تحقیقات مرتع و بیابان ایران. جلد 19، شماره 1، صفحه 120-132.
- عسکری شهید،م، شاکری پور، م، درویشی بلورانی، ع و میرزاپور، ف. 1393. بررسی تاثیر قدرت تفکیک مکانی سنجنده و پوشش سطحی تصاویر ماهواره‌ای MODIS و ETM+ بر شاخص خشکی دما- گیاه TVDI جهت پایش خشکسالی، بیست و یکمین همایش ملی ژئوماتیک.
- علوی پناه، ک. 1382. کاربرد سنجنش‌ازدور در علوم زمین (علوم خاک). انتشارات دانشگاه تهران. 438ص.
- فلاح، م، وظیفه‌دوست، م، نوری، ح. و لیاقت، م. 1393. استفاده از شاخص رطوبت خاک (SWI) حاصل از تولیدات سنجنده مودیس در تخمین مودیس در تخمین رطوبت خاک زراعی (مطالعه موردی: بخشی از اراضی قزوین). اولین همایش ملی بهینه‌سازی مصرف آب.
- قائم بیگی، م، رائینی سرجاز، م و موسوی بایگی، م. 1391. ارزیابی و برآورد تبخیر- تعرق گندم در مراحل مختلف رشد با روش تراز انرژی (نسبت باون) و مقایسه آن با نتایج لایسیمتر. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد 26، شماره 5، صفحه 1152-1160.
- کشاورز،م،ر، وظیفه دوست،م، علیزاده، الف و اسدی،ع. 1390. استخراج و روندیابی رطوبت خاک به کمک داده‌های ماهواره‌ای سنجنده مودیس (مطالعه موردی: استان اصفهان). نشریه آبیاری و زهکشی ایران، جلد 5، شماره 2، صفحه 209-219.
- نوروزی اقدم، الف، بهبهانی،س،م،ر، رحیمی خوب، ع و عقیقی،ح. 1387. مدل رطوبتی لایه سطحی خاک با استفاده از شاخص NDVI (مطالعه موردی: مراتع استان خراسان رضوی). مجله محیط شناسی، جلد 34، شماره 48، صفحه 136-127.
- Adegoke,J.O., and Carleton,A.M. 2002. Relations between soil moisture and satellite vegetation indices in the U.S. corn belt, *Journal of Hydrometeorology*, 3:395-405.
- Carlson,T. 2007. An Overview of the "Triangle Method" for Estimating Surface Evapotranspiration and Soil Moisture from Satellite Imagery. *Sensors*, 7: 1612-1629.
- Gao,Z., Gao,W and Chang,N.B. 2011. Integrating temperature vegetation dryness index (TVDI) and regional water stress index (RWSI) for drought assessment with the aid of LANDSAT TM/ETM+ images. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 13:495–503.
- Goetz,S.J. 1997. Multisensory analysis of NDVI, surface temperature and biophysical ariables at a mixed grassland ite. *International Journal of Remote*

Estimation of Surface Soil Moisture Using Vegetation and Thermal Indices from MODIS Images (Case study: Gonbad-e Qavus)

S. Khazaei¹, M. Raeini Sarjaz^{2*}, E. Valizadeh³, Kh. Ghorbani⁴

Recived: Feb.21, 2016

Accepted: Nov.26, 2016

Abstract

Estimating soil moisture along a vast area is mostly expensive and sometimes undoable. One of the newly available technique is remote sensing, which allows the possible surface soil moisture estimates in a large scale. Therefore, the objective of this research was to investigate the possibility of estimating surface soil moisture using MODIS satellite images in compare to soil moisture measured data. To conduct this research, vegetation and temperature indices from MODIS images were extracted from October 2013 to June 2014 period for Gonbad-e Qavus region, then measurements were calibrated with field measurement data. The results indicated that significant but weak correlations are available between NDVI and NMDI indices with measured surface soil moistures ($R= 0.62$), while there were highly significant, but negative correlations ($p \leq 0.01$; $R = -0.89$) for LST index and thermal bands of 31 and 32 with surface soil moistures. The TVDI index also had highly significant, but negative correlation ($p \leq 0.01$; $R = -0.90$) with surface soil moisture. There were also highly significant linear and exponential correlations between SWI index and surface soil moisture. In conclusion, the results indicate promising relations for thermal and combined models to estimate surface soil moisture relative to vegetation models.

Keywords: Surface soil moisture - Gonbad-e Qavus - temperature index- vegetation index

1- PhD Student of Irrigation and Drainage, Department of Water Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University

2- Professor, Department of Water Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University

3- MS Graduate Agrometeorology, Department of Water Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University

4- Associate Professor, Department of Water Engineering, Gorgan Agricultural Sciences and Natural Resources University

(*-Corresponding Author Email: m.raeini@sunru.ac.ir)