

توسعه شاخص کمبود رطوبت خاک با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای مادیس

محمد رضا کشاورز^۱، مجید وظیفه دوست^{۲*} و امین علیزاده^۳

چکیده

نظر به تأثیر رطوبت خاک در فعل و انفعالات بیولوژیک و رشد و نمو گیاهان، تخمین مقدار رطوبت موجود در منطقه توسعه ریشه‌ها اهمیت زیادی در پایش خشکسالی کشاورزی دارد. در این تحقیق، به منظور ارزیابی رطوبت خاک به عنوان یک شاخص خشکسالی کشاورزی، نمایه کمبود رطوبت خاک (SWDI: Soil Wetness Deficit Index) با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای شاخص گیاهی تفاضل نرمال (NDVI) و دمای سطح زمین (LST) توسعه داده شد. بدین منظور داده‌های ماهواره‌ای حرارتی و انعکاسی از سنجنده مادیس در سال‌های ۲۰۰۱-۲۰۰۰ و ۲۰۰۴-۲۰۰۵ که به ترتیب معرف دو دوره خشک و تر می‌باشند با گام‌های زمانی ۸ روزه، بر فراز استان اصفهان استخراج گردید. شاخص SWDI در هر دوره بر اساس مقادیر خیزی خاک (SWI) در دوره‌های ۸ روزه که با ترسیم نمودار **مثلی** پراکنش نقطه‌ای بین مقادیر LST و NDVI بدست آمد، تعیین گردید. نتایج بررسی شاخص SWDI نشان‌دهنده یک دوره عموماً خشک در سال‌های ۲۰۰۰-۰۱ و یک دوره ترسالی در سال‌های ۲۰۰۴-۰۵ در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. تعداد تجمعی روزهای عموماً خشک ($SWDI < 0$) در دوره ۳۰۹ روزه ۲۰۰۰-۰۱ حدود ۱۸۴ روز تخمین زده شد. همچنین تغییرات مقادیر SWDI در دو منطقه تحت کشت دیم و آبی مقایسه گردید. نتایج بدست آمده وقوع خشکسالی در سال ۲۰۰۰-۰۱ در هر دو منطقه تحت کشت و توانایی شاخص SWDI در پایش خشکسالی در زمان‌های مختلف را به خوبی تأیید می‌کند.

واژه های کلیدی: رطوبت خاک، سنجش از دور، خشکسالی، شاخص کمبود رطوبت خاک، مادیس

مقدمه

دارد (Verstraeten, 2006). نظر به تأثیر رطوبت خاک در فعل و انفعالات بیولوژیک و رشد و نمو گیاهان، تخمین مقدار رطوبت موجود در منطقه توسعه ریشه‌ها اهمیت زیادی در پایش خشکسالی کشاورزی دارد.

اساساً پایش مستقیم رطوبت خاک و استخراج داده‌های رطوبت به صورت نقطه‌ای نه تنها پر هزینه و وقت گیر است، بلکه در سطوح وسیع غیر عملی می‌باشد. این در حالی است که خشکسالی پدیده‌ای منطقه‌ای بوده و برای پایش آن نیاز به داده‌های وسیع و منطقه ایست. بنابراین اندازه‌گیری‌های نقطه‌ای رطوبت خاک کافی نبوده و نیاز به ابزاری برای افزایش دامنه داده‌ها و کاهش هزینه‌ها وجود دارد. از سوی دیگر استفاده از روش‌های مطالعه نقطه‌ای و سپس درون‌یابی نتایج، به منظور تعیین رطوبت خاک در سطح وسیع، کفایت لازم را ندارد. چرا که درهم‌کنش عوامل عدم قطعیت تنها در مناطق وسیع به تعادل می‌رسد و در مناطق کم وسعت و در مقیاس منطقه‌ای، با عدم قطعیت زیادی مواجه خواهیم بود. بنابراین نیاز به ابزاری برای پایش رطوبت در مقیاس زمانی و مکانی است تا علاوه بر دقت مناسب، امکان کاربرد عملیاتی آن در مناطق مختلف وجود داشته باشد. در این

خشکسالی کشاورزی بخشی از اقلیم زمین است و هر از گاهی بدون هیچ علائم هشداردهنده و در محدوده‌ای با مرزهای غیر قابل تشخیص اتفاق می‌افتد و بیش از تمامی حوادث طبیعی دیگر، امنیت غذایی مردم را تحت تأثیر قرار می‌دهد. پیش بینی زمان وقوع، توسعه و پایان خشکسالی در مقایسه با سایر بلایای طبیعی بسیار دشوار می‌باشد (Kogan, 1997). رطوبت خاک یک پارامتر تعیین کننده در بسیاری فرایندهای پیچیده زیست محیطی است و نقش تعیین کننده‌ای در وقوع خشکسالی کشاورزی دارد (Kuenzer et al., 2008).

رطوبت خاک در منطقه ریشه‌ها به رطوبت خاک در عمق ۱ تا ۲ متری از سطح خاک اطلاق می‌شود که عموماً قابل دسترس توسط ریشه گیاه می‌باشد و رطوبت قابلیت تبخیر و انتقال به هوای آزاد را

۱-۳ به ترتیب دانشجوی دوره کارشناسی ارشد و استاد، گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استادیار گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه گیلان

*- نویسنده مسئول: (Email: majid.vazifiedoust@yahoo.com)

جذب رنگدانه‌ها در ناحیه مرئی قرمز (۶۶۰ nm) و مادون قرمز نزدیک (۸۶۰ nm) از طیف الکترو مغناطیس ساخته می‌شود. این شاخص در دو دهه گذشته به صورت بسیار گسترده برای تخمین خصوصیات فیزیکی یک دامنه وسیع از گیاهان مورد استفاده قرار گرفته است (Cheng et al., 2008). به طور مثال Wang et al. (2007) و Adegoke and Carleton (2002) به بررسی رابطه مستقیم بین شاخص گیاهی NDVI و رطوبت پرداختند و هر دو وجود تأخیر در تأثیر مقدار رطوبت خاک بر شاخص گیاهی NDVI را تأیید کردند. هرچند که ایشان تأثیر دمای سطح خاک را نادیده گرفتند. همچنین Wang et al. (2007) رابطه NDVI با رطوبت خاک در مناطق نیمه خشک را بسیار معتبرتر از مناطق مرطوب ارزیابی کرده و میزان تأخیر زمانی در تأثیر رطوبت خاک بر NDVI را در مناطق مرطوب بیشتر از مناطق نیمه خشک بیان نمودند. تعدادی از محققین نیز استفاده ترکیبی از اطلاعات ماهواره‌ای دمای سطح زمین (LST) و شاخص‌های گیاهی را در تخمین رطوبت خاک پیشنهاد نمودند و اذعان داشتند که ترکیب این داده‌ها می‌تواند اطلاعات بهتری از تنش‌های گیاهی و شرایط رطوبتی سطح زمین فراهم آورد.

در مناطق خشک انتظار می‌رود که رابطه منفی بین NDVI و LST به دلیل افزایش دمای سطح زمین برای مناطق با NDVI پایین تغییر کند. این منتهی به یک فضای مثلثی می‌شود که برای استخراج وضعیت رطوبت سطحی خاک مورد بررسی قرار گرفته است (Mallick et al., 2009).

Mallick et al. (2009) مقادیر رطوبت بدست آمده از همین روش در مناطق کشاورزی هند را با مقادیر واقعی رطوبت مقایسه کرد و نمودارهای مثلثی تولید شده را به نمایش گذاشت. برای مشاهده یک نمای کلی از روش مثلثی LST-NDVI برای تخمین رطوبت سطحی می‌توان به مقاله Carlson (2007) مراجعه نمود. البته وی استفاده از جزء پوشش گیاهی (Fr: fraction vegetation cover) و دمای نسبی (T^*) را به جای استفاده مستقیم از NDVI و LST پیشنهاد نموده است که البته کاری نسبتاً دشوارتر و پیچیده‌تر، اما دقیق‌تر است.

در این مطالعه، به منظور ارزیابی رطوبت خاک به عنوان یک شاخص خشکسالی کشاورزی، نمایه کمبود رطوبت خاک (SWDI: Soil Wetness Deficit Index) با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای NDVI و LST توسعه داده شد. بدین منظور، داده‌های ماهواره‌ای حرارتی و انعکاسی سنجنده مادیس (MODIS: MODerate resolution Imaging Spectroradiometer) در سال‌های ۲۰۰۰-۲۰۰۱ و ۲۰۰۴-۲۰۰۵ که به ترتیب معرف دو دوره خشک و تر می‌باشند با گام‌های زمانی ۸ روزه بر فراز استان اصفهان استخراج گردید. در پایان SWDI در هر دوره، بر

میان تکنیک‌های مبتنی بر سنجنش از دور در مقایسه با اندازه‌گیری نقطه‌ای و یا مدل‌های شبیه سازی به دلیل دقت مکانی (کمتر از ۱km) و زمانی (چند روزه) بهتر، استفاده عملیاتی آسان و دقت محاسباتی رطوبت خاک در حد ۵ درصد حجمی دارای برتری هستند (Walker and Houser, 2004).

روش‌های متعددی برای تعیین رطوبت خاک در سطح وسیع، با استفاده از تکنیک‌های سنجنش از دور و بدون نمونه‌گیری مستقیم از خاک وجود دارد. از آن جمله می‌توان به استفاده از ابزارهای سنجنش با کمک امواج نوری (Peters et al., 1991; Wang et al., 2007)، ماکروویو (Moran et al., 2004; Mattia et al., 2008)، الکترومغناطیس رادیویی (Scheftic et al., 2008) و یا ابزارهای نانوتکنولوژی و حسگرهای MEMS (Jackson et al., 2008) اشاره کرد. برای اطلاعات بیشتر در مورد چگونگی استفاده از امواج مایکروویو فعال و غیر فعال در تخمین SMC (محتوای رطوبت خاک) می‌توانید به مقالات Wagner et al. (1999) و De Ridder (2000) مراجعه نمایید.

روش‌های سنجنش از دور مبتنی بر تصاویر نوری (Optical) و حرارتی (Thermal) در مقایسه با تصاویر راداری دارای محدودیت‌هایی از قبیل عمق نفوذ سطحی محدود، پراکنش زیاد امواج در اثر برخورد با ذرات بخار آب و ذرات معلق در اتمسفر و پوشش گیاهی سطح زمین می‌باشند. با این حال وجود ظرفیت‌های بالقوه در روش‌های سنجنش از دور مبتنی بر تصاویر نوری و حرارتی، از قبیل قدرت تفکیک مکانی بیشتر، پوشش وسیع، قابلیت دسترسی به چند سنجنده ماهواره‌ای، فرکانس‌های زمانی منظم و بالا و امکان استفاده در کاربردهای همزمان، و همچنین همبستگی بالا بین رطوبت خاک و دمای سطحی، بسیار امید بخش می‌باشند (Verstraeten, 2006). گیاهان به طور معنی‌داری در شرایط خشکی واکنش نشان می‌دهند. در نقطه پژمردگی دائم، پتانسیل آب برگ‌ها کمتر از پتانسیل آب خاک باقی می‌ماند، و در این نقطه آب نمی‌تواند با سرعت کافی جذب ریشه شده و بر کمبود آب گیاه غلبه کند. این تنش واکوئل و کلروفیل سلول را در این برگ‌ها تحت تأثیر قرار داده، و این اتفاق نیز به نوبه خود بر نتایج حاصل از سنجنش از دور گیاه مؤثر است (Marshall, 2005). نمایه‌های مبتنی بر نسبت بین باندها یکی از رایجترین تکنیک‌ها برای تخمین خصوصیات پوشش گیاهی و برگ گیاهان از قبیل غلظت رنگدانه‌ها و مقدار رطوبت می‌باشند (Ustin et al., 2004; Peñuelas et al., 1997; Huete et al., 1997; Gao, 1996). برای مثال یکی از نمایه‌های رایج طیفی، نمایه گیاهی تفاضل نرمال NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) می‌باشد. این نمایه همبستگی خوبی را با تغییرات کوتاه مدت رطوبت خاک، خصوصاً در مناطق نیمه خشک نشان داده است (Peters et al., 1991; Wang et al., 2007). شاخص NDVI بر اساس

ژئوئید WGS84 تبدیل گردید. داده‌های LST به منظور همخوانی با داده‌های NDVI به صورت شبکه‌های ۲۵۰ متری بازسازی شد.

توسعه شاخص خیس خاک (SWI)

رطوبت خاک و نسبت پوشش گیاهی به شدت به دمای سطح زمین وابسته است. با این حال تا کنون هیچ رابطه مستقیمی بین LST و رطوبت خاک گزارش نشده است (Mallick et al., 2009). بسیاری از محققان رابطه فیزیکی بین نمایه گیاهی (مثل NDVI) و LST را به شکل یک نمودار پراکنش نقطه‌ای نمایش دادند که در آن از مفهوم فضای مثلثی برای استخراج رطوبت خاک استفاده می‌شود (Stisen et al., 2008; Wang et al., 2006). مفهوم فضای مثلثی NDVI-LST (Mallick et al., 2009) و ارتباط LST (نمودار y) با NDVI در شکل ۱ نمایش داده شده است. ضلع بالایی مثلث نمایانگر لبه خشک/گرم شامل گروهی از نقاط است که در مقادیر مختلف NDVI دارای رطوبت خاک صفر هستند. برخلاف لبه تر/سرد که نمایانگر حداکثر رطوبت خاک در مقادیر مختلف NDVI می‌باشد.

در ناحیه‌ای که لبه خشک (Dry edge) نامیده می‌شود مقادیر حداکثر دما (T_{max}) وجود دارد که با فرض خطی بودن تغییرات دما در این ناحیه، معرف حالت خاک خشک (رطوبت حداقل) است. در مقابل، حداقل مقادیر دما (خط T_{min}) نیز خطی اریب را تشکیل می‌دهند که لبه تر (Wet edge) نام دارد و خاک اشباع یا خیلی مرطوب (رطوبت حداکثر) را نمایش می‌دهد. فرض بر این است که رطوبت به طور خطی بین لبه خشک و تر تغییر می‌کند (Verstraeten, 2006). بر این اساس، برای هر پیکسل به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$SWI_i = \frac{T_{max(i)} - T_s(i)}{T_{max(i)} - T_{min(i)}} = \frac{\theta_v(i) - \theta_{min(i)}}{(\theta_{max(i)} - \theta_{min(i)})} \quad (1)$$

که در آن اندیس i نماینده شماره پیکسل، θ_{max} و θ_{min} حداقل و حداکثر ظرفیت حجمی نگهداری رطوبت خاک و θ_v رطوبت حجمی خاک در لحظه محاسبه می‌باشد. حداقل و حداکثر ظرفیت حجمی نگهداری رطوبت خاک بر اساس نوع بافت خاک تعیین می‌شوند؛ $T_s(i)$ همان LST پیکسل i است؛ $T_{min(i)}$ حداقل دمای مشاهده شده و $T_{max(i)}$ حداکثر دمای مشاهده شده متناظر با پیکسل مورد نظر است که بر اساس مقدار NDVI متغیر می‌باشند. برای یافتن مقدار T_{min} و T_{max} در هر پیکسل از فرمول زیر استفاده می‌شود:

$$T_{max(i)} = b + a(NDVI_{(i)}) \quad (2)$$

$$T_{min(i)} = d + c(NDVI_{(i)}) \quad (3)$$

اساس مقادیر خیس خاک (SWI) که با ترسیم نمودار پراکنش نقطه‌ای مثلثی بین مقادیر LST و NDVI بدست آمد، تعیین گردید.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

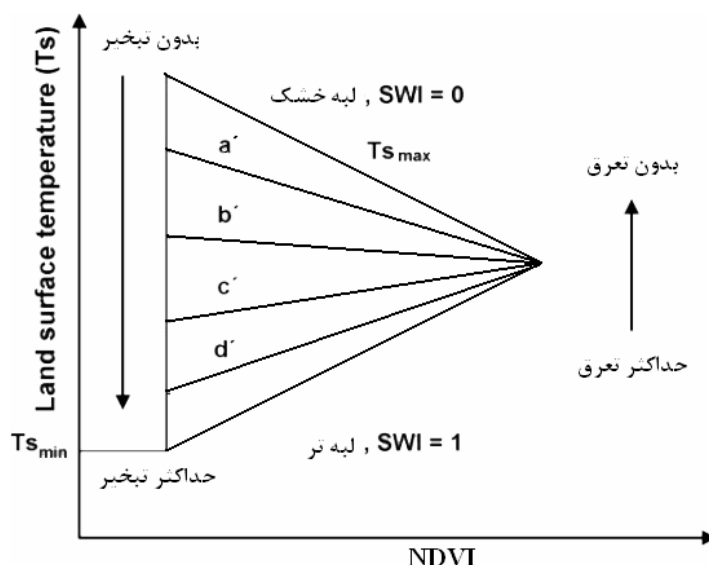
منطقه مورد مطالعه کل استان اصفهان با مساحت تقریبی km^2 ۲۱۴۵۰۳ می‌باشد که در مرکز ایران (از $30/67$ تا $34/58$ درجه شمالی و از $49/67$ تا $55/55$ درجه شرقی) واقع گردیده است. اقلیم منطقه نیمه خشک و بارندگی بسیار محدود (حدود mm ۱۳۰ در سال) است که عموماً در فصل زمستان تا اوایل بهار و از ماه دسامبر تا آوریل رخ می‌دهد. اراضی تحت کشت در منطقه حدود 6% (638037 هکتار) از مساحت استان را شامل می‌شود که از این مقدار، حدود 95% (609250 هکتار) به کشت آبی و 5% (28787 هکتار) به کشت دیم اختصاص دارد. حداکثر دما در تابستان و به طور متوسط به 30 درجه سانتیگراد در ماه ژوئیه می‌رسد، و حداقل دما در ژانویه و تا 3 درجه سانتیگراد سقوط می‌کند (Akbari et al., 2007).

استخراج، آماده‌سازی و پردازش تصاویر

پایش مداوم تغییرات کوتاه مدت رطوبت سطح خاک در مناطق دارای پوشش گیاهی با جزئیات مکانی بیشتر تنها از طریق داده‌های باند مادون قرمز نوری-حرارتی با حسگرهای دارای تفکیک مکانی متوسط (250 متر تا 1 کیلومتر سنجنده مادیس از ماهواره ترا و آکووا) با حداقل یک بار عبور در هر دو روز مقدور است (Mallick et al., 2009). بنابراین در این تحقیق تصاویر بازتابش سطحی تصحیح شده در دو باند مرئی (باند 1 در محدوده 648 nm) و مادون قرمز نزدیک (باند 2 در محدوده 858 nm) که در سطح 3 تولیدات تحت عنوان MOD09Q1 با تفکیک مکانی 250 متر، گام‌های زمانی 8 روز و با سیستم تصویر Sinusoidal ارائه می‌شود استفاده گردید.

داده‌های مادیس برای دوره‌های 8 روزه از سپتامبر سال 2000 تا ژوئیه سال 2001 و از سپتامبر سال 2004 تا ژوئیه سال 2005 (کاشی 22 افقی و 5 عمودی که اصفهان را پوشش می‌دهد) از سایت Wist دریافت شد. شاخص گیاهی NDVI با استفاده از داده‌های MOD09Q1 به روش اتوماتیک بدست آمد.

برای برآورد دمای سطح زمین از داده‌های LST (V005) که در سطح 3 تولیدات مادیس تحت عنوان MOD11A2 با تفکیک مکانی 927 متر، گام‌های زمانی 8 روز و با سیستم تصویر Sinusoidal ارائه می‌شود استفاده گردید. در مسیر اصلاح هندسی، ابتدا تصاویر با روش نزدیکترین همسایه بازسازی شد و سپس به سیستم تصویر UTM با



شکل ۱ - نمودار مفهومی از رابطه منتهی LST-NDVI برای تعیین شاخص خیسى خاک. مقدار SWI در سراسر لبه خشک صفر و در سراسر لبه تر ۱ است. خطوط همتراز SWI با مقادیر ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸ و به ترتیب با a', b', c', d' مشخص شده‌اند.

اینرو، مقادیر کمبود می‌تواند بین ماه‌ها نیز مقایسه شود. مقادیر SD در طول هر دوره ۸ روزه، میزان خشکی (و یا تری) آن دوره در مقایسه با دوره‌های مشابه را نمایش می‌دهد. اما خشکسالی تنها زمانی رخ می‌دهد که برای دوره طولانی مدتی ادامه یابد به طوری که بر رشد گیاه تأثیر بگذارد. از آنجا که مقادیر SD بین ۱۰۰- تا ۱۰۰+ قرار دارد، بدترین خشکی می‌تواند با یک خط مستقیم با معادله زیر نمایش داده شود:

$$\sum_{t=1}^t SD_t = -100t - 100 \quad (5)$$

که t شماره دوره ۸ روزه است. اگر این خط نمایانگر بدترین خشکسالی باشد (که بر ای قابل مقایسه بودن با نمایه پالمر آنرا -۴ در نظر می‌گیریم)، بنابراین SWDI برای هر دوره می‌تواند به صورت زیر محاسبه شود:

$$SWDI_t = \frac{\sum_{t=1}^t SD_t}{25t+25} \quad (6)$$

اکنون با قسمت پیچیده‌ای از کار روبرو می‌شویم که انتخاب دوره زمانی است که در آن مقادیر خشکی باید جمع شوند تا شدت خشکسالی را تعیین کنند. به منظور غلبه بر این مشکل و بحساب آوردن دوره زمانی به صورت غیر مستقیم، نمایه خشکسالی بر اساس یک پایه افزایشی همانطور که توسط Palmer (1965) پیشنهاد شده است محاسبه شد:

$$SWDI_t = SWDI_{t-1} + \Delta SWDI_t \quad (7)$$

ما می‌توانیم $i=1$ و $t=1$ را در معادله ۶ قرار دهیم و داریم:

$$SWDI_1 = \frac{SD_1}{50} \quad (8)$$

که در آن NDVI(i) مقدار نمایه گیاهی در پیکسل مورد نظر؛ و a و b به ترتیب شیب و عرض از مبدأ نمودار لبه خشک و c و d به ترتیب شیب و عرض از مبدأ نمودار لبه تر می‌باشند که برای هر پراکنش نقطه‌ای LST-NDVI مقادیر ثابتی هستند و با رگرسیون-گیری بدست می‌آیند. نمونه‌ای از فضای مثلثی و خطوط لبه تر و خشک را می‌توانید در شکل ۲ مشاهده کنید.

معرفی یک شاخص تعیین خشکی

به منظور فراهم نمودن امکان مقایسه تغییرات رطوبت در دوره‌های ترسالی و خشکسالی، و با الهام از نتایج تحقیقات Narasimhan و Srinivasan (2005) در تولید نمایه کمبود رطوبت خاک یا SMDI، نمایه کمبود خیسى خاک (SWDI) براساس مقادیر SWI با گام‌های زمانی ۸ روزه به صورت زیر توسعه داده شد:

$$SD_t = \frac{SWI_t - MSWI_j}{maxSWI_j - minSWI_j} \times 100 \quad (4)$$

که در آن i شماره دوره ۸ روزه، j شماره ماه، SDi درصد کمبود رطوبت خاک، SWIi مقدار SWI مشاهده شده در دوره i ام و MSWIj میانه مقادیر رطوبت مشاهده شده در ماه ژام در هر دو سال است و برای تمام دوره‌های ۸ روزه که در آن ماه قرار دارند مقداری ثابت است. maxSWI یا حداکثر مقدار ممکن برای SWI برابر ۱۰۰ و minSWI یا حداقل مقدار SWI صفر در نظر گرفته شد. با استفاده از معادله ۴، تأثیر ماه بر رطوبت خاک حذف می‌شود. از

$$SWDI_i = \frac{SD_i}{50} + 0.5SWDI_{i-1} \quad (11)$$

SWDI در طول هر دوره ۸ روزه بین مقادیر ۴- و ۴ تغییر می‌کند که به ترتیب شرایط خشک و تر را نشان می‌دهد.

نتایج و بحث

مقادیر SWI با رسم مثلث‌های NDVI-LST (شکل ۲) توسط برنامه‌ای که به همین منظور در نرم افزار MATLAB نوشته شده بود به طور خودکار و برای هر دوره ۸ روزه استخراج شد.

با استفاده از مقادیر SWI شاخص SDWI با گام‌های ۸ روزه تولید گردید. در شکل ۳ مقادیر SWDI در سه مقطع زمانی مختلف (روزهای ژولیوسی ۱۷، ۲۳ و ۱۸۵) در دو سال ۲۰۰۱ و ۲۰۰۵ به تصویر کشیده شده است. شکل ۳ (a و b) مربوط به مقادیر SWDI در روز ژولیوسی ۱۷ در سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۰۵ است. همانطور که مشهود است در تصویر مربوط به دوره ۲۰۰۱ مقادیر شاخص عموماً بین ۲- تا صفر متغیراند (شکل ۳.a). خشکی در این دوره همه مناطق مخصوصاً نواحی غربی استان را کاملاً در بر گرفته است. تنها ناحیه‌ای که مشخصاً در ترسالی قرار دارد، حاشیه رودخانه زاینده رود است که در نواحی مرکزی استان واقع شده است. در تصویر مربوط به همین تاریخ سال ۲۰۰۵، تفاوت زیادی در مقادیر شاخص در نواحی شرقی با دوره قبل مشاهده نمی‌شود (شکل ۳.b).

از آنجا که این اولین دوره ۸ روزه است:

$$SWDI_1 - SWDI_0 = \Delta SWDI_1 = \frac{SD_1}{50} \quad (9)$$

اگر متعاقباً دوره‌های نرمال یا نزدیک نرمال رخ دهند، یک خشکسالی نمی‌تواند در طبقه شدید ادامه پیدا کند. بنابراین نرخ که SD باید افزایش یابد تا مقدار SWDI ثابت باقی بماند به مقدار SWDI مورد نظر بستگی دارد. به همین دلیل، باید برای تمام ماه‌هایی که به صورت خشک آغاز می‌شوند یک عبارت دیگر به معادله ۹ اضافه شود:

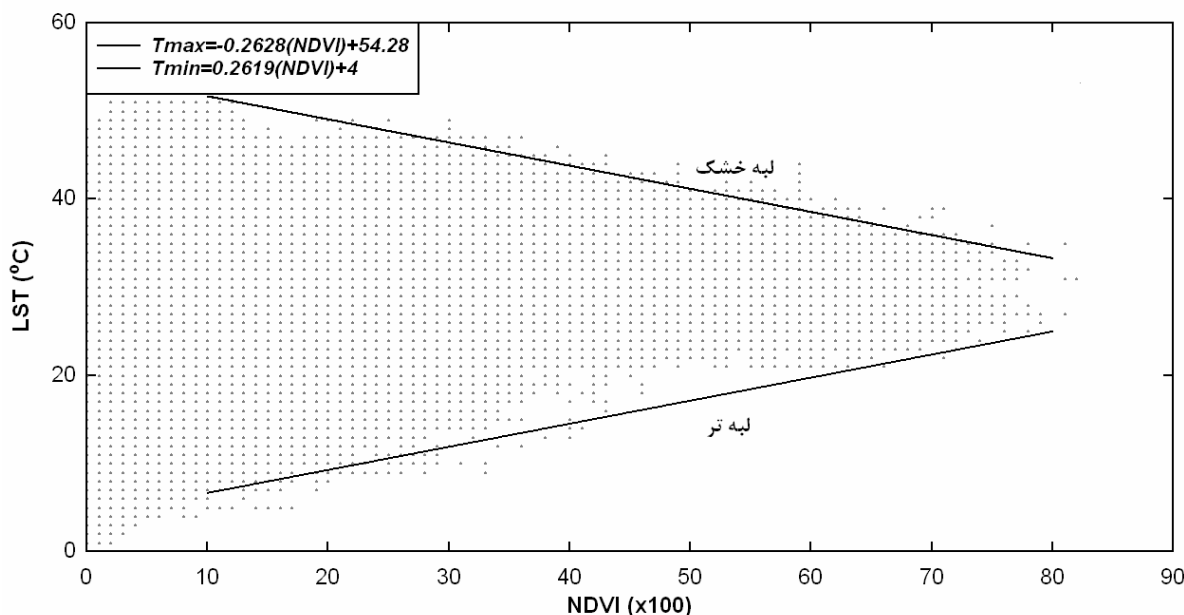
$$\Delta SWDI_i = \frac{SD_i}{50} + cSWDI_{i-1} \quad (10)$$

اکنون معادله ۱۰ می‌تواند برای C حل شود. با فرض SWDI برابر ۴- در گام‌های زمانی متوالی، می‌توان SD_i را برابر ۱۰۰- در نظر گرفت:

$$\begin{aligned} \Delta SWDI_i &= \frac{-100}{50} + c(-4.0), \\ 0 &= -2 - 4c, \\ c &= -0.5 \end{aligned}$$

بنابراین، شدت خشکسالی در هر دوره ۸ روزه به این صورت برآورد می‌شود:

$$SWDI_i = SWDI_{i-1} + \frac{SD_i}{50} - 0.5SWDI_{i-1}$$



شکل ۲ - نمودار پراکنش نقطه‌ای LST-NDVI از داده‌های ماهواره‌ای مادیس بر فراز استان اصفهان در یک روز آفتابی (روز ژولیوسی ۱۰۵ سال ۲۰۰۵، معادل ۱۵ آوریل)

داری از مقادیر آن در ۲۰۰۱-۲۰۰۰ بیشتر است (شکل‌های ۵، الف و ب). تنها در مورد NDVI در مناطق دیم (شکل ۶، ب) اختلاف معنی دار بین دو سال مشاهده نشد.

در ادامه به منظور نمایش کاربرد شاخص معرفی شده در پایش خشکسالی، SWDI، چگونگی تغییرات این شاخص در مقیاس مزرعه‌ای و در دو منطقه کشاورزی هر کدام به وسعت ۹ پیکسل (حدود ۵۶ هکتار) یکی تحت کشت دیم (Lat=31° 14', Lon=) و یکی تحت کشت آبی (Lat=32° 48', Lon= 51° 34') به ترتیب در نمودارهای ۷، الف و ۷، ب مقایسه گردیده است. در این دو نمودار وجود دوره خشکسالی در سال‌های ۲۰۰۱-۲۰۰۰ و ترسالی در سال‌های ۲۰۰۴-۲۰۰۵ محرز است.

دامنه تغییرات SWDI در دو مزرعه مذکور برای کشت دیم بین ۱/۷- و ۱/۲ و برای کشت آبی دامنه بسیار محدودتر و بین ۰/۳- و ۰/۷۵ می‌باشد. این تفاوت ناشی از آن است که در منطقه آبی بر خلاف منطقه دیم، آبیاری صورت می‌گیرد و این امر تا حدود زیادی خشکی را تعدیل کرده است. این اتفاق از سویی تأییدی بر نتایج بدست آمده است.

بیشترین دامنه تغییرات مقادیر SWDI در هر دو مزرعه، در حدود روز ژوئیه‌سی ۱۷ تا ۳۰ رخ داده است. تقریباً در همین دوره حداقل مقادیر NDVI (شکل‌های ۴، الف و ۴، ب) و دمای سطح زمین (شکل‌های ۶، الف و ۶، ب) را شاهد هستیم (خواب زمستانی). به عبارت دیگر، عدم وجود پوشش گیاهی در دوره تر همراه با افزایش ترسالی و در دوره خشک همراه با افزایش خشکسالی است و گیاه نقشی تعدیل کننده در کاهش یا افزایش شرایط خشکسالی یا ترسالی داشته است. میانگین مقادیر SWI در همین محدوده زمانی در هر دو دوره و هر دو منطقه دیم و آبی افزایش یافته که این نیز تأییدی بر صحت مقادیر SWI استخراج شده است (شکل‌های ۵، الف و ۵، ب). چرا که عدم وجود پوشش گیاهی که از کاهش NDVI قابل تشخیص است موجب کاهش مصرف رطوبت خاک می‌شود. مقایسه مقادیر SWI و SWDI در این زمان نشان می‌دهد که افزایش رطوبت به تنهایی نشاندهنده پایان خشکسالی نیست و باید اثر ماه‌های قبل را در نظر داشت.

با بررسی نتایج SWDI در منطقه آبی (شکل ۷، ب)، تغییر وضعیت از حالت خشک به حالت تر در ۲۰۰۱-۲۰۰۰ و بالعکس در سال‌های ۲۰۰۴-۲۰۰۵ کاملاً مشهود است. در منطقه دیم هم در همین زمان مقادیر شاخص در هر دو دوره بسیار به هم نزدیک شده‌اند. بنابراین با توجه به آنچه در بررسی کلی منطقه بیان شد این احتمال تقویت می‌شود که در اواخر هر دو دوره در بسیاری از نقاط شاهد جابجایی شرایط هیدرولوژیک از خشک به تر و برعکس هستیم.

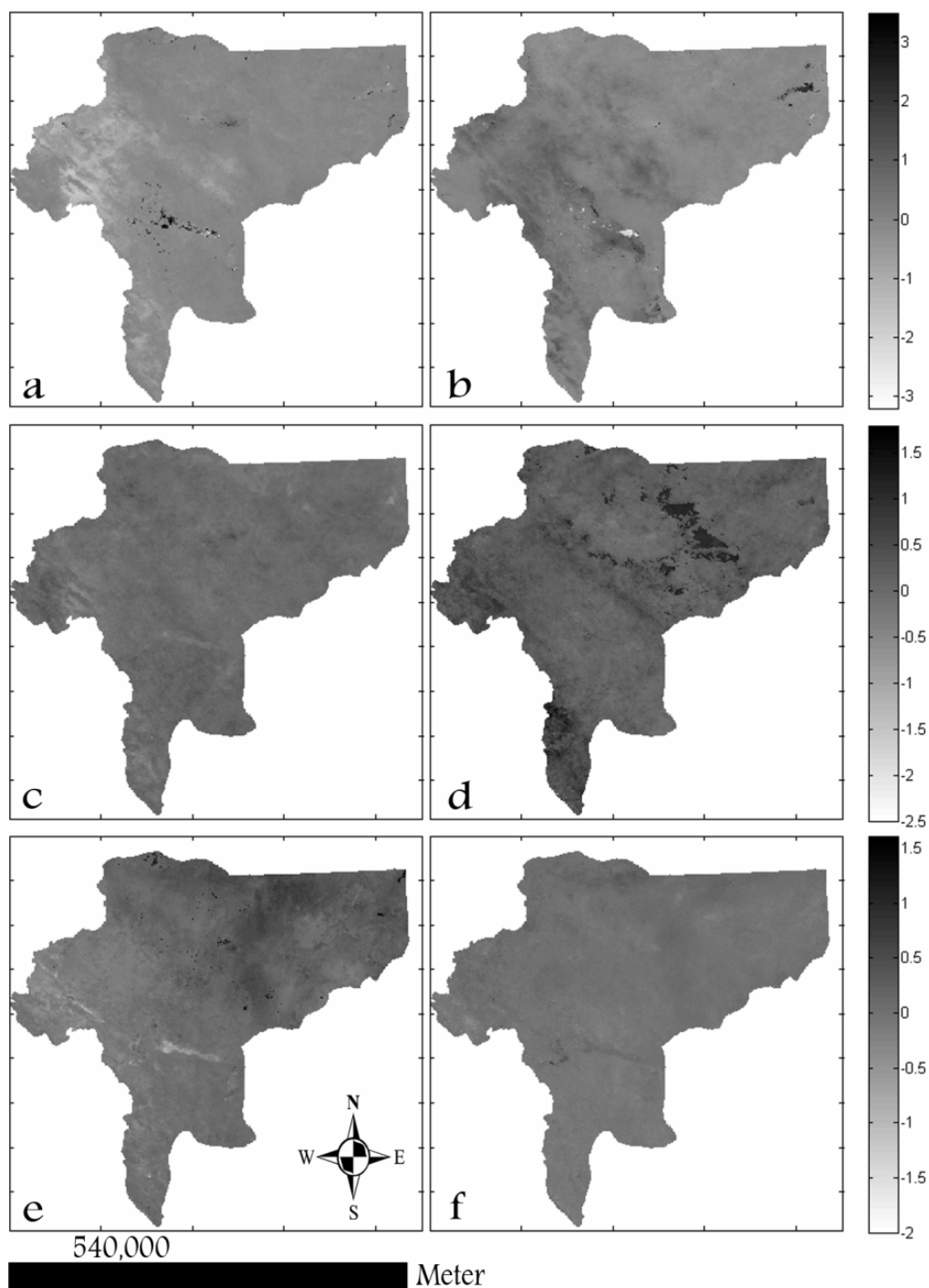
اما در نواحی غربی و جنوبی ترسالی به طور واضح قابل مشاهده است. مقادیر شاخص در این مناطق غالباً مثبت بوده و به ۲ و گاه به ۳ رسیده و شرایط بسیار خوبی را تجربه می‌کند.

شکل‌های ۳، c و ۳، d مربوط به روز ژوئیه‌سی ۷۳ (به ترتیب در سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۰۵) است. در سال ۲۰۰۱، خشکی نسبت به اوایل دوره بسیار تعدیل شده و مقادیر شاخص به صفر نزدیکتر است. اگرچه در بسیاری از نواحی مقادیر بین ۰/۵- و صفر متغیر است. این امر در تمام استان به طور یکسان قابل رؤیت است. در تصویر مربوط به سال ۲۰۰۵ نیز شرایط نسبت به اوایل دوره بهبود یافته و اگرچه مقادیر شاخص به ۲ و ۳ نمی‌رسد اما گسترش ناحیه ترسالی بسیار مشخص‌تر از اوایل دوره است و نواحی خشک بسیار کمی در سطح استان مشاهده می‌شود (شکل ۳، d).

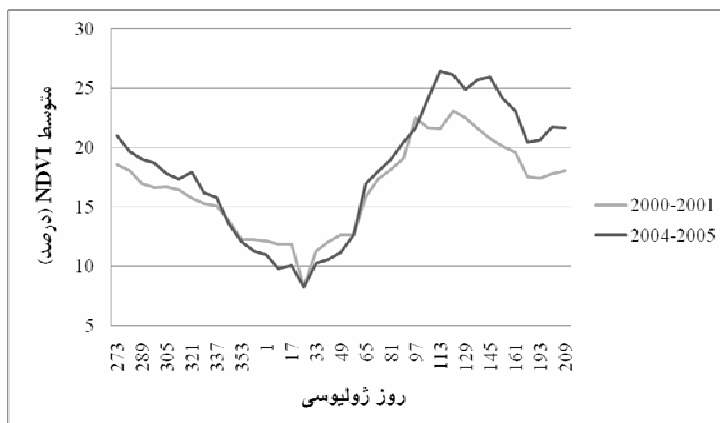
در روز ژوئیه‌سی ۱۸۵ سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۰۵ (شکل‌های ۳، e و ۳، f) نقطه عطفی در مقادیر SWDI مشاهده می‌گردد. در اواسط سال ۲۰۰۱، نواحی شرقی استان تا حد زیادی از حالت خشکی بیرون آمده است اما در نواحی غربی و جنوبی خشکسالی دوباره در حال شکل‌گیری است (شکل ۳، e). این روند تا اواخر سال ۲۰۰۱ ادامه دارد به طوری که در انتهای دوره (روز ۲۰۹ سال ۲۰۰۱) تمام استان به استثنای حاشیه رودخانه مرکزی و نواحی شمالی، حالت ترسالی را تجربه می‌کند. در سال ۲۰۰۵، در تمام استان حرکتی به سمت افزایش خشکی مشاهده می‌شود (شکل ۳، f). البته این سیستم، به خصوص در حاشیه رودخانه مرکزی، دوباره تعدیل می‌شود و در انتهای دوره (روز ۲۰۹ سال ۲۰۰۵) تمام استان در حالت ترسالی است. در کل، تعداد تجمعی روزهای عموماً خشک در دوره ۲۰۰۱-۲۰۰۰ حدود ۱۸۴ روز تخمین زده شد. به این معنا که در این تعداد روز اکثر پیکسل‌ها خشکی ($SWDI < 0$) را تجربه کرده‌اند.

همچنین مقادیر NDVI، SWI و LST در تمام مناطق کشاورزی دیم و آبی در هر دو سال در مقاطع زمانی ۸ روزه میانگین‌گیری شده و در نمودارهای ۴ تا ۶ نمایش داده شده است. محور افقی نشاندهنده روز ژوئیه‌سی است که از روز ۲۷۳ سال ۲۰۰۰ (یا ۲۰۰۴) آغاز شده و تا روز ۲۰۹ سال ۲۰۰۱ (یا ۲۰۰۵) ادامه دارد.

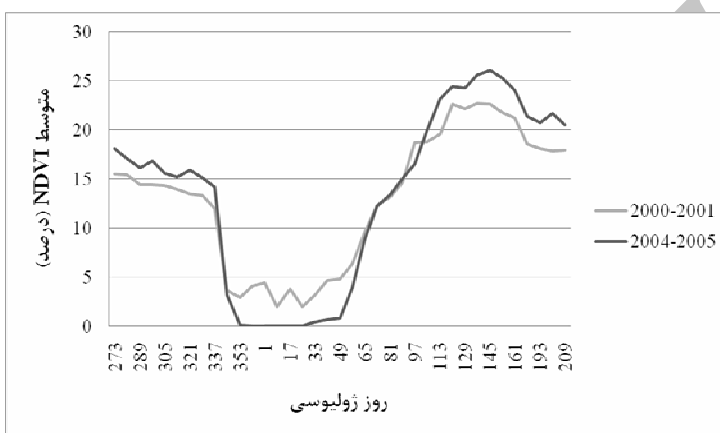
برای کنترل نتایج، برای هر سه شاخص NDVI، SWI و LST و در هر دو منطقه، میان مقادیر بدست آمده در دو دوره ۲۰۰۱-۲۰۰۰ و ۲۰۰۴-۲۰۰۵ در مناطق تحت کشت آبی و دیم بعد از کنترل یکسان بودن توزیع داده‌ها مقایسه میانگین انجام شد. برای این منظور هر مقطع زمانی یک بلوک و هر یک از دو سال مورد مطالعه یک تیمار در نظر گرفته شد. مقایسه میانگین‌ها با آزمون دانکن نشان داد که مقادیر بدست آمده برای همه متغیرها در هر دو منطقه دیم و آبی در سطح ۰/۰۱ متفاوت‌اند و اختلاف آنها معنی‌دار است. بدین معنا که مثلاً مقادیر رطوبت خاک (SWI) در سال ۲۰۰۴-۲۰۰۵ به طور معنی



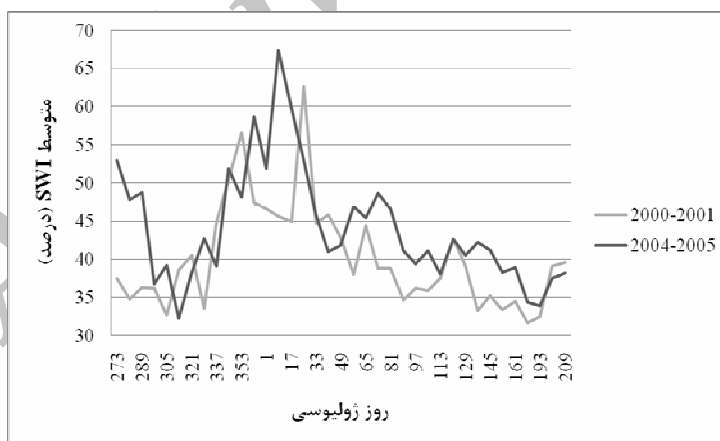
شکل ۳- توزیع جغرافیایی شاخص SWDI در روزهای ژولیوسی (a) ۲۰۰۱:۱۷، (b) ۲۰۰۵:۱۷، (c) ۲۰۰۱:۷۳، (d) ۲۰۰۵:۷۳، (e) ۲۰۰۱:۱۸۵، (f) ۲۰۰۵:۱۸۵، (e)



شکل ۴- الف) - مقایسه متوسط مقادیر NDVI در مزارع تحت کشت آبی استان اصفهان در دو سال مورد مطالعه



شکل ۴- ب) - مقایسه متوسط مقادیر NDVI در مزارع تحت کشت دیم استان اصفهان در دو سال مورد مطالعه



شکل ۵- الف) - مقایسه متوسط مقادیر SWI در مزارع تحت کشت آبی استان اصفهان در دو سال مورد مطالعه



شکل ۵ - ب) - مقایسه متوسط مقادیر SWI در مزارع تحت کشت دیم استان اصفهان در دو سال مورد مطالعه



شکل ۶ - الف) - مقایسه متوسط مقادیر LST در مزارع تحت کشت آبی استان اصفهان در دو سال مورد مطالعه



شکل ۶ - ب) - مقایسه متوسط مقادیر LST در مزارع تحت کشت دیم استان اصفهان در دو سال مورد مطالعه



شکل ۷- الف) - مقایسه متوسط مقادیر SWDI در مزرعه تحت کشت دیم انتخاب شده در دو سال مورد مطالعه



شکل ۷- ب) - مقایسه متوسط مقادیر SWDI در مزرعه تحت کشت آبی انتخاب شده در دو سال مورد مطالعه

جدول ۱ - نتایج آزمون مقایسه میانگین برخی شاخص‌ها در دو دوره مورد مطالعه در سطوح معنی داری ۱ و ۵ درصد در مزارع تحت کشت آبی (علامت مثبت نشان‌دهنده معنی دار بودن اختلاف میانگین)

کشت آبی	0.05	0.01	میانگین مشاهدات سال ۲۰۰۰-۲۰۰۱	میانگین مشاهدات سال ۲۰۰۴-۲۰۰۵	درجه آزادی خطا	CV
LST	+	+	۲۳/۳۴	۲۱/۷۶	۳۶	۲۳
SWI	+	+	۰/۴۲	۰/۴۴	۶	۱۱/۶۷
NDVI	+	+	۰/۱۶۶	۰/۱۷۹	۳۶	۸

جدول ۲ - نتایج آزمون مقایسه میانگین برخی شاخص‌ها در دو دوره مورد مطالعه در سطوح معنی داری ۱ و ۵ درصد در مزارع تحت کشت دیم (علامت مثبت نشان‌دهنده معنی دار بودن اختلاف میانگین)

کشت دیم	0.05	0.01	میانگین مشاهدات سال ۲۰۰۰-۲۰۰۱	میانگین مشاهدات سال ۲۰۰۴-۲۰۰۵	درجه آزادی خطا	CV
LST	+	+	۳۶/۰۳	۲۷/۴۱	۳۶	۶/۸
SWI	+	+	۰/۵۵	۰/۶۴	۳۶	۱۱/۷۱
NDVI	-	-	۰/۱۳۴	۰/۱۳	۳۶	۱۳/۸۹

خلاصه و نتیجه گیری

Microwave/Imager. *Boundary-Layer Meteorol*, 96: 421-432.

Gao, B.C., (1996), NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58 : 257-266.

Huete, A. R., Liu, H. Q., Batchily, K., and van Leeuwen, W., (1997), A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 59:440-451.

Jackson, T., Mansfield, K., Saafi, M., Colman, T., and Romine, P., (2008), Measuring soil temperature and moisture using wireless MEMS sensors. *Measurement*, 41 : 381-390.

Kogan, F., (1997), Global Drought Watch from Space. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(4): 621-635.

Kuenzer, C., Bartalis, Z., Schmidt, M., Zhao, D., and Wagner, W., (2008), TREND analyses of a global soil moisture time series derived from ERS-1/2 scatterometer data: floods, droughts and long term changes. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVII. Part B7. Beijing, China.

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.

Marshall, G.S., (2005), Drought Detection And Quantification Using Field-Based Spectral Measurements Of Vegetation In Semi-Arid Regions. New Mexico Institute of Mining and Technology Department of Earth and Environmental Science.

Mattia, F., Satalino, G., Pauwels, V.R.N., and Loew A., (2008), Soil moisture retrieval through a merging of multi-temporal L-band SAR data and hydrologic modeling. *Hydrology and Earth System Sciences*, 5: 3479-3515.

Moran, M.S., Peters-Lidard, C.D., Watts, J.M., and McElroy, S., (2004), Estimating soil moisture at the watershed scale with satellite-based radar and land surface models, *Can. J. Remote Sens*, 30(5): 805-826.

Narasimhan, B., and Srinivasan, R., (2005), Development and evaluation of Soil Moisture Deficit Index (SMDI) and Evapotranspiration Deficit Index (ETDI) for agricultural drought monitoring. *Agricultural and Forest Meteorology*, 133: 69-88.

Peñuelas, J., Piñol, J., Ogaya, R., and Filella, I. (1997), Estimation of plant water concentration by the reflectance water index WI (R900/R970). *International Journal of Remote Sensing*, 18: 2869-2875.

Peters, A.J., Rundquist, D.C., and Wilhite, D.A., (1991), Satellite detection of the geographic core of the 1988

از نمودارهای توزیعی مثلثی از رابطه LST (دمای سطح زمین) و NDVI (نمایه گیاهی تفاضل نرمال) برای بدست آوردن SWI (نمایه خیسگی خاک) استفاده شد. مقادیر SWI نیز برای استخراج SD (کمبود رطوبت خاک) به کار گرفته شد. یک نمایه خشکسالی (SWDI) مستقل از شرایط اقلیمی با قدرت تفکیک مکانی ۲۵۰ متر و تفکیک زمانی ۸ روزه، با کمک مقادیر کمبود رطوبت (SD) استخراج و بین مقادیر ۴- تا ۴ طبقه بندی شد.

بنابر آنچه از بررسی اجمالی شاخص SWDI بدست می آید، معرفی یک دوره به عنوان دوره ترسالی یا خشکسالی برای یک منطقه وسیع، کاری غیر علمی و دور از واقعیت است. وجود دامنه گسترده از وقایع خشک و تر در یک زمان در منطقه نشان می دهد قضاوت در مورد ترسالی یا خشکسالی بودن یک منطقه به وسعت یک استان بر اساس داده های بارندگی چند ایستگاه محدود بارانسنجی نادرست بوده و ممکن است اساساً در مناطق مجاور همان ایستگاه شرایط متفاوتی را تجربه کنیم. چنین برداشت هایی گاهی موجب خسارت مالی ناشی از تصمیمات نادرست خواهد شد که به دلیل عدم تشخیص صحیح وضعیت موجود گرفته شده است. سنجش از دور و استفاده از تصاویر ماهواره ای که به صورت رایگان موجود می باشند می تواند ابزاری مناسب برای تصمیم گیری های کلان در برنامه ریزی کشاورزی به حساب آید.

مقایسه مقادیر SWI و SWDI نشان می دهد که افزایش رطوبت به تنهایی نشاندهنده پایان خشکی نیست و باید اثر ماه های قبل را در نظر داشت.

عدم وجود پوشش گیاهی در دوره تر همراه با افزایش ترسالی و در دوره خشک همراه با افزایش خشکسالی است و گیاه نقشی تعدیل کننده در کاهش یا افزایش شرایط خشکسالی یا ترسالی دارد.

مراجع

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.

Akbari, M., Toomanian, N., Droogers, P., Bastiaanssen, W., and Gieske, A., (2007), Monitoring irrigation performance in Esfahan, Iran, using NOAA satellite imagery. *Agricultural Water Management*, 88: 99 - 109.

Cheng, Y.B., Ustin, S.L., Riaño, D., and Vanderbilt, V.C., (2008), Water content estimation from hyperspectral images and MODIS indexes in Southeastern Arizona. *Remote Sensing of Environment*, 112 : 363-374.

De Ridder, K., (2000), Quantitative estimate of skin soil moisture with the Special Sensor

- flux model. PhD thesis .katholieke university the Leuven.
- Verstraeten, W.W., Veroustraete, F., and Feyen, J., (2008), Review: Assessment of Evapotranspiration and Soil Moisture Content Across Different Scales of Observation. *Sensors.*, 8: 70-117.
- Wagner, W., Lemoine, G., and Rott, H., (1999), A method for estimating soil moisture from ERS scatterometer and soil data. *Remote Sens. Environ.*, 70: 191–207.
- Walker, J.P. and Houser, P.R., (2004), Requirements of a global near-surface soil moisture satellite mission: accuracy, repeat time, and spatial resolution, *Advances in Water Resources*, 27: 785-801.
- Wang, K.C., Li, Z.Q., and Cribb, M.M., (2006), Estimation of evaporative fraction from a combination of day and night land surface temperatures and NDVI: a new method to determine Priestley-Taylor parameter. *Remote Sens. Environ.*, 102: 293–305.
- Wang, X., Xie, H., Guan, H., and Zhou, X., (2007), Different responses of MODIS-derived NDVI to root-zone soil moisture in semi-arid and humid regions. *Journal of Hydrology*, 340: 12– 24.
- Nebraska drought. *Agricultural and Forest Meteorology*, 57: 1-3.
- Palmer, W.C., (1965), *Meteorological Drought*. Research Paper No. 45, US Weather Bureau, Washington, DC.
- Scheftic, W. D., Cummins, K. L., Krider, E. P., Sternberg, B. K., Goodrich, D., Moran, S., and Scott, R., (2008), wide-area soil moisture estimation using the propagation of lightning generated low-frequency electromagnetic signals. 20th international lightning detection conference.
- Stisen, S., Sandholt, I., Noergard, A., Fensholt, R., and Jensen, K.H., (2008), Combining the method with thermal inertia to estimate regional evapotranspiration-applied to MSG-SEVIRI data in the Senegal River basin. *Remote Sens. Environ.*, 112: 1242–1255.
- Ustin, S.L., Darling, D., Kefauver, S., Greenberg, J., Cheng, Y.B., and Whiting, M.L., (2004), Remotely sensed estimates of crop water demand. Paper presented at S.P.I.E. The International Symposium on Optical Science and Technology. 49th Annual Meeting, Denver, CO, 2-6 August.
- Verstraeten, W.W., (2006) integration of remotely sensed hydrological data into an ecosystem carbon

تاریخ دریافت: ۸۹/۱/۲۴

تاریخ پذیرش: ۸۹/۱۰/۱۵

Archive of SID

Development of Soil Wetness Deficit Index (SWDI) using MODIS satellite data

M. R. Keshavarz¹, M. Vazifedoust^{2*} and A. Alizadeh³

Abstract

Due to the importance of soil moisture in plants growth and biology interactions, it is considered as a key index of agricultural drought monitoring. In this research, to evaluate soil moisture deviation as an indicator of agricultural drought, a Soil Wetness Deficit Index (SWDI) was developed using satellite data of vegetation index (NDVI) and land surface temperature (LST). For this purposes, 8-day-products of land surface reflectance (MOD09Q1) and LST (MOD11A2) derived from MODIS satellite data over Esfahan in the period of 2000-01 (dry year) and 2004-05 (wet year) 8-day time step were ordered and downloaded from internet. The SWDI in each time step was determined based on 8-day-Soil Wetness Index (SWI) derived from application of a triangle space concept between LST and NDVI data. Using satellite data of LST and vegetation index NDVI, amount of water stress during each time step was estimated from a linear relation. The new developed drought index mapped well the spatial distribution of dry periods and their intensity in the agronomy year of 2000-01. The cumulative number of dry days (SWDI<0) in the period of 2000-01 was estimated as 184 days. The results confirmed also the existence of wet periods in the year 2004-05. After comparison of SWDI variations in two areas of irrigated and dry farming, the promising results were obtained. SWDI index has the capability of drought monitoring in different time scales.

Keywords: Drought, MODIS, Remote Sensing, Soil moisture, Soil Wetness Deficit Index

Archive of SID

1,3- M.Sc. Student and Professor of Water Engineering, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, respectively

(*- Corresponding Author Email: majid.vazifedoust@yahoo.com)

2-Assistant Professor of Water Engineering, College of Agriculture, Guilan University