



تخمین رطوبت خاک با استفاده از تصاویر سنجنده مودیس (مطالعه موردی: محدوده دشت مشهد)

محمد فشائی^{۱*} - سید حسین ثنائی نژاد^۲ - کامران داوری^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۴/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۶/۰۷

چکیده

مطالعات متعددی تاکنون جهت تخمین رطوبت خاک با استفاده از تصاویر ماهواره ای و شاخص های مختلف پوشش گیاهی از جمله NDVI انجام گرفته است. یک ضعف اساسی این مدل ها و مطالعات این است که این روش ها تاکنون برای مناطقی که دارای پوشش گیاهی ضعیف و یا فاقد پوششی گیاهی هستند ناکارآمد بوده اند. از این روی لازم است روشی ارائه شود که بتواند ضعف مدل های موجود را جبران نماید. تمرکز این پژوهش بر برآورد رطوبت خاک برای مناطق دارای پوشش گیاهی ضعیف و یا فاقد پوشش گیاهی است. مدل دوزنقه ای دما-پوشش گیاهی قادر است با در نظر گرفتن وضعیت رطوبتی گیاه و محیط و همچنین شرایط پوشش گیاهی، با دقت مناسبی شرایط تنش آبی در گیاه را برای مناطق فاقد پوشش گیاهی و یا دارای پوشش گیاهی ضعیف و همچنین پوشش گیاهی متراکم برآورد نماید. در این پژوهش ابتدا توسط تصاویر سنجنده مودیس، پهنه بندی شاخص کمبود آب (WDI) در محدوده مطالعاتی زیر مجموعه دشت مشهد در سال آبی ۹۱-۹۰ صورت گرفته و سپس با استفاده از رابطه تنگاتنگ این متغیر با رطوبت خاک، رابطه ای خطی میان این دو متغیر برآزش داده شد. هم رندی بارندگی و رطوبت نسبی هوا با مقادیر میانگین شاخص کمبود آب، حاکی از انطباق مناسب این شاخص با وضعیت رطوبتی منطقه می باشد. همچنین، ضریب همبستگی ۹۳٪ بین شاخص WDI و رطوبت خاک اندازه گیری شده در عمق ۵ سانتی متری از سطح خاک، تایید دیگری بر صحت نتایج به دست آمده است.

واژه های کلیدی: سنجش از دور، شاخص کمبود آب، رطوبت خاک، مودیس

مقدمه

تنش آبی و همچنین میزان رطوبت خاک می باشد. در حال حاضر با توسعه فناوری سنجش از دور، تخمین رطوبت خاک و ... به طور مستقیم یا غیرمستقیم مورد توجه محققان قرار گرفته است. آنگاه که انطباق بین داده های حسگر و ویژگی های اندازه گیری شده خاک و گیاه صورت می گیرد ما می توانیم در مورد شرایط نواحی وسیعتری که در مورد آنها اندازه گیری زمینی واقعی انجام نگرفته باشد نتیجه گیری نماییم. این عمل منجر به دستیابی به ارزش واقعی سنجش از دور یعنی توانایی در کسب اطلاعات بسیار وسیع با کمترین نیروی کار و در زمانی بسیار کوتاه می گردد. از این روی به منظور مدیریت نیاز آبی در مزارع و باغات بزرگ، افزایش عملکرد و کیفیت محصولات و همچنین پیش آگاهی از آتش سوزی در مراتع و جنگل ها در فصول گرم و خشک، پایش وضعیت تنش آبی گیاهان با استفاده از فناوری سنجش از دور ضرورت می یابد.

افزایش تقاضا برای مصرف آب به دلیل نیاز به تولید مواد غذایی بیشتر، بر لزوم برنامه ریزی در زمینه مسائل آب کشاورزی بیش از پیش تاکید می نماید. با برنامه ریزی صحیح آبیاری و تعیین زمان و میزان مناسب آبیاری، آب مورد نیاز گیاه تامین شده و ضمن عدم مصرف بی رویه ی آب، از بروز اثرات تنش خشکی و کاهش عملکرد محصول نیز جلوگیری می شود. از سوی دیگر با گرم شدن هوا و افزایش خشکی در فصول گرم و خشک به ویژه در مناطقی مانند کشور ایران، خطر بروز آتش سوزی مراتع و جنگلها پیش می آید. آگاهی از زمان، پراکندگی و میزان تنش آبی وارد آمده بر درختان و مراتع در فصول گرم و خشک نیز از جمله دلایل مهم لزوم سنجش

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانشجوی دکتری هواشناسی کشاورزی و دانشیاران گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
* - نویسنده مسئول: (Email: am.fashaee@gmail.com)

تعیین وضعیت سلامتی گیاه با استفاده از دما

تاکنون مطالعات متعددی در خصوص رابطه دمای هوا، دمای سطحی و دمای کانوبی و خصوصیات گیاهی- محیطی از جمله تنش آبی، رطوبت خاک، سبزیگی، بیماری ها و نظایر این ها صورت گرفته است. در این میان بخشی از مطالعات معطوف به تاثیر میزان رطوبت خاک بر پروفیل دمایی کانوبی شده که به عنوان یکی از عوامل تاثیرگذار بر عملکرد و سلامتی گیاهان مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه ضمن رعایت سیر تاریخی و محتوایی مطالعات به طور مختصر به آن ها اشاره می شود.

موران (۱۲) بیان کرد که عبارت "سلامتی اکوسیستم"^۱ به طور معمول به منظور بیان تناسب ساز و کار یک ترکیب اکوسیستمی به کار برده می شود. یک اکوسیستم سالم موجب خواهد شد ساختار و فعالیت های زیست محیطی اکوسیستم در طول زمان به صورت بهینه و به درستی عمل نماید. به طور مثال یک "مرتع سالم"^۲ قادر است سهم مهمی از غذا و علوفه مورد نیاز موجودات زنده، زیستگاه حیات وحش، انرژی، زیبایی های طبیعی و ... را ایجاد نماید. همچنین یک "مزرعه سالم"^۳ نیز رشد نامحدود، غذا و فرآورده های کشاورزی با کیفیت در عین مصرف محدود آب و سموم را در اختیار ما قرار خواهد داد. اما باید به این نکته اشاره نمود که هر چند در خصوص مباحث مربوط به سلامتی مزارع و مراتع اتفاق نظر وجود دارد، اما در خصوص سنجش و پایش آن ها نظرات متنوعی وجود دارد.

به طور مثال یکی از شاخص های توصیف سلامت مزرعه، شاخص درجه تنش روزانه (SDI)^۴ می باشد که توسط هیلر و کلارک (۶) ارائه شده است. این شاخص بر مبنای درجه و طول تنش آبی و در نتیجه تنش فتوسنتزی و آمادگی گیاه برای پذیرش تنش آبی پایه گذاری شده است.

هاتفیلد (۵) بیان نمود در عین حال سلامتی اکوسیستم در مرتع و مزرعه به طور عموم غالباً با دو شاخص سرعت فتوسنتز و سرعت تعرق بیان می شود. همچنین اینکه سرعت تعرق در سلامتی جنگل ها و ریسک آتش سوزی آن ها نسبت به فتوسنتز در درجه دوم اهمیت قرار دارد چندان صحیح نمی باشد. تعرق از اهمیت ویژه ای در سلامتی گیاه برخوردار است، به گونه ای که کاهش اندکی در موجودیت آب گیاه می تواند هم بر رشد و هم بر خصوصیات فیزیولوژیکی گیاه تاثیر داشته باشد.

موران (۱۲) عنوان کرد اهمیت ویژه ای کاربرد سرعت تعرق در توصیف سلامتی گیاه موجب شده است تلاش دوچندانی توسط محققان برای استفاده از اندازه گیری های امواج مادون قرمز حرارتی

به منظور ارزیابی توزیع زمانی و فضایی تعرق گیاه صورت گیرد. ارتباط مستقیم میان فرآیند تعرق و پاسخ حرارتی گیاه، پتانسیل استفاده از اندازه گیری های امواج مادون قرمز حرارتی برای پایش و مدیریت سلامتی گیاه را بر ما نمایان می سازد.

نمانی و رانینگ (۱۳) دریافتند یک رابطه منفی قوی بین دمای سطحی و مشخصه های پوشش گیاهی از جمله شاخص پوشش گیاهی (VI)^۵ و شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI) وجود دارد. در این راستا تحقیقات متعددی در خصوص بررسی شرایط رطوبتی سطحی با استفاده از دما صورت پذیرفت.

موران و همکاران (۱۱) ایده استفاده از دوزنقه دما-پوشش گیاهی را به منظور توصیف رابطه اختلاف دمای هوا و سطح زمین در برابر میزان تراکم مختلف پوشش گیاهی تشریح کردند و از طریق تعریف شاخص کمبود رطوبتی (WDI)^۶ وضعیت تبخیر-تعرق را در هر دو پوشش گیاهی متراکم و ضعیف بررسی کردند. اگر چه ایده استفاده از دوزنقه دما-پوشش گیاهی از نظر علمی مورد تایید محققان قرار گرفته است اما با توجه به دشواری محاسبه اختلاف دمای هوا و دمای سطحی و همچنین جمع آوری کلیه داده های هواشناسی مورد نیاز برای اجرای این الگوریتم، مطالعات موردی محدودی در سطح بین المللی در این خصوص صورت گرفته است.

جکسون و همکاران (۸) بر مبنای رابطه دمای کانوبی و دمای هوا، شاخص تنش رطوبتی گیاه (CWSI)^۷ را ارائه نمودند. بر مبنای این شاخص همبستگی خوبی با متغیرهایی از جمله رطوبت خاک، پتانسیل ماتریک خاک، شوری خاک، آبگرفتگی خاک، مقاومت پخشیدگی سطح برگ، فتوسنتز و نهایتاً عملکرد محصول به دست آمد. این دستاوردها موجب شد، استفاده از این شاخص توسعه یابد و در برنامه ریزی آبیاری و بیماری های گیاهی نیز استفاده شود.

کراپز و همکاران (۹) بیان داشتند، روش مثلثی یا دوزنقه ای یک روش مناسب برای تخمین رطوبت خاک از طریق دما و شاخص پوشش گیاهی اندازه گیری شده بوسیله سنجش از دور است. ایشان سه روش مختلف را برای این منظور انتخاب کردند که عبارتند از روش مثلثی تجربی سندهالت و همکاران (۱۶)، روش دوزنقه ای موران و همکاران (۱۱) و روش مثلثی کارلسون (پتروپولوس) و همکاران (۱۵). روش مثلثی تجربی در مواقعی که داده های هواشناسی کافی وجود ندارد بسیار مناسب است. در غیر این صورت بهره گیری از روابط فیزیکی پنمن مانیتیشیا مدل^۸ SVAT با مبنای

5-Vegetation Index

6-Normalized Difference Vegetation Index

7-Water Deficit Index

8-Crop Water Stress Index

9- Soil Vegetation Atmosphere Transfer

1- Ecosystem Health

2-Healthy Rangeland

3-Healthy Cropland

4-Stress Degree Index

می کند. این دستاورد امکان استفاده از فناوری اندازه گیری امواج مادون قرمز حرارتی به منظور تعیین وضعیت رطوبتی گیاه و خاک و برنامه ریزی آبیاری را فراهم می کند.

فعالیت های زیادی برای تفسیر و اعتبارسنجی روش های مبتنی بر امواج مادون قرمز حرارتی برای تخمین تعرق گیاه و تبخیر از خاک صورت گرفته است. در ادامه به معرفی برخی از این فعالیت ها و روابط پرداخته می شود:

سهام مهمی از کاربرد دمای گیاه در تعیین سلامت اکوسیستم مربوط به برآورد شاخص تنش آبی گیاه (CWSI) است که توسط ایدسو و همکاران (۷) ارائه شده است. ایشان مبانی شاخص تئوری تنش آبی گیاه (CWSIt) را بر رابطه پنمن (۱۴) استوار کردند:

$$\lambda E_{\Gamma} = \Delta(R_n - G) + \rho C_p (VPD) / r_a / [\Delta + \gamma^*] \quad (1)$$

در این رابطه R_n شار تابش خالص (وات بر متر مربع)، G شار گرمای خاک (وات بر متر مربع)، H شار گرمای محسوس (وات بر متر مربع) و λE شار گرمای نهان خاک (وات بر متر مربع)، نیز شیب منحنی فشار بخار در برابر دمای هوا، VPD کمبود فشار بخار اشباع بر حسب هکتوپاسکال، r_a مقاومت روزنه ای بر حسب ثانیه بر متر، چگالی هوا بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب، C_p گرمای ویژه هوا در فشار ثابت بر حسب کیلوژول بر کیلوگرم بر درجه سلسیوس، * از رابطه زیر محاسبه می شود و بر حسب کیلوپاسکال بر درجه سلسیوس می باشد:

$$\gamma^* = \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right) \quad (2)$$

r_{cp} مقاومت کانوپی در شرایط تبخیر-تعرق پتانسیل بر حسب ثانیه بر متر است. سپس با استفاده از رابطه فوق نسبت شار گرمای واقعی به شار گرمای پتانسیل را به شکل زیر به دست آوردند:

$$\lambda E_{\Gamma} / \lambda E_{\Gamma p} = [\Delta + \gamma^*] / \left[\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)\right] \quad (3)$$

$$CWSI_t = 1 - \lambda E_{\Gamma} / \lambda E_{\Gamma p} = \left[\gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right) - \gamma^*\right] / [\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)] \quad (4)$$

$$CWSI_t = 1 - \lambda E_{\Gamma} / \lambda E_{\Gamma p} = [(T_c - T_a)_m - (T_c - T_a)_x] / (T_c - T_a)_r \quad (5)$$

در این روابط $\lambda E_{\Gamma p}$ شار گرمای نهان پتانسیل، r_c مقاومت روزنه ای کانوپی، γ ضریب سایکرومتری بر حسب کیلوپاسکال بر درجه سلسیوس، $(T_c - T_a)$ اختلاف دمای سطح کانوپی و دمای هوا و اندیس های m ، x و r به ترتیب به معنای کمینه، بیشینه و مقدار

تئوری، نتایج دقیق تری به همراه دارند. از مقایسه سه روش مذکور در جنوب فرانسه و با استفاده از داده های سنجش از دور مشاهده شد که مثلث کارلسون پتانسیل مناسبی برای توصیف وضعیت رطوبتی خاک و ریشه گیاه دارد.

وانگ و همکاران (۱۸) با استفاده از داده های ۱۶ ایستگاه رطوبت سنجی خاک، ۳ ایستگاه هواشناسی و ۸۷ ایستگاه باران سنجی و همچنین تصاویر سنجنده مودیس، الگوریتم دوزنقه ای را اجرا کرده و به این نتیجه رسیدند که رابطه دوزنقه ای ایزاری قوی برای محاسبه شاخص کمبود رطوبتی در سطح منطقه می باشد و در عین حال رابطه رگرسیونی آن با رطوبت خاک و پهنه بندی جغرافیایی آن نتایج مناسبی در منطقه نیمه خشکی همچون آریزونا به همراه نداشت. این در حالی بود که رگرسیون زمانی آن از نتایج قابل قبولی برخوردار بود.

سهرابی نیا و همکاران (۱۷) تغییرات دمای سطح زمین را در برابر رطوبت خاک نزدیک سطح زمین تحت تراکم های گوناگون پوشش گیاهی بررسی کردند. آن ها دشت کانتربری در جنوب نیوزلند را مورد بررسی قرار دادند. داده های مربوط به دمای سطح زمین از طریق اندازه گیری میدانی و همچنین از طریق سری زمانی دمای سطح زمین سنجنده مودیس به دست آمد. رابطه این دو دسته داده دمای سطح زمین تحت پوشش های گیاهی مختلف با رطوبت خاک بررسی شد. نتایج حاکی از این بود که رابطه مناسبی میان دمای سطح زمین اندازه گیری شده توسط سنجنده مودیس و رطوبت خاک وجود ندارد در عین حال داده های مربوط به دمای میدانی سطح زمین ۱۲ ساعت پس از آبیاری چهار گیاه مختلف از ضریب همبستگی مناسبی با رطوبت خاک برخوردار بود. همچنین در صورت کوتاه شدن بازه های زمانی، سری زمانی رطوبت خاک به دست آمده از سنجنده مودیس، ضریب همبستگی بهتری با وضعیت رطوبتی خاک مشاهده خواهد شد.

استفاده از امواج مادون قرمز حرارتی در سنجش دمای کانوپی

در سال ۱۹۶۰، دانشمندان به استفاده از حرارت سنج مادون قرمز برای سنجش از دور دمای برگ روی آوردند. وایگن و نامکن (۱۹) دریافته دمای برگ گیاه پنبه با منقبض شدن گیاه افزایش و به طور خطی با باز و شکفته شدن آن کاهش می یابد. ایشان بر اساس مشاهداتشان یک قاعده برای اندازه گیری پیشنهاد کردند که هم اکنون نیز استفاده می شود. این قاعده چنین است: تفسیر دمای برگ نیاز به یک همسانی و همزمانی در اندازه گیری ها دارد که هنگام بعد از ظهر زمان مناسبی برای این کار می باشد. با توسعه تکنولوژی امواج مادون قرمز حرارتی، تحقیقات از مطالعه برگ های تکی به مطالعه گیاهان در داخل کانوپی ارتقا یافت. برای یک کانوپی، سرد شدن ناشی از تعرق گیاه نقش مهمی در تعیین دمای گیاه ایفا

مرکز این استان شهر مشهد است که در عرض شمالی ۳۶ درجه و ۱۷ دقیقه، طول شرقی ۵۹ درجه و ۳۶ دقیقه و ارتفاع ۹۷۰ متری از سطح دریا واقع شده است (پورتال سازمان حفاظت محیط زیست خراسان رضوی (۱)).

منطقه مطالعاتی در محدوده مرکزی دشت مشهد و به وسعت ۱۲۰۰ کیلومتر مربع در اطراف مرکز تحقیقات کشاورزی گلکان واقع شده است. به منظور اجتناب از تصحیحات ارتفاعی در داده های زمینی و ماهواره ای و امکان تعمیم برخی از داده های نقطه ای به کل منطقه مورد مطالعه، محدوده جغرافیایی این منطقه به گونه ای انتخاب شد که اولاً ایستگاه گلکان در مرکز آن قرار گیرد ثانیاً تا حد امکان در محدوده دشت و هموار باشد. ایستگاه تحقیقات باغبانی گلکان با مساحت ۱۸۰ هکتار واقع در ۳۵ کیلومتری جاده مشهد-قوچان و برخورداری از موقعیت مناسب اقلیمی و سابقه طولانی، در حال حاضر زیر کشت باغات و خزانه، تولید بذر مادری جو ماکویی، ذرت لاین و طرح های تحقیقات سبزی و صیفی قرار دارد (پورتال سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی (۲)).

داده های هواشناسی و رطوبت خاک

داده های روزانه هواشناسی و همچنین رطوبت خاک (شکل ۲) مربوط به سال آبی ۹۰-۸۹ و ۹۱-۹۰ ایستگاه گلکان از مرکز تحقیقات سازمان هواشناسی استان خراسان رضوی دریافت شده است. داده های رطوبت خاک مربوط به سال آبی ۹۰-۸۹ دارای نواقص متعدد بوده لذا مورد استفاده قرار نگرفت.

داده های رطوبت خاک در این ایستگاه به صورت هفتگی و نقطه ای در ۵ عمق ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۵۰ سانتی متری از سطح زمین به وسیله دستگاه TDR اندازه گیری می شود. همچنین دمای سطح خاک، دمای هوای، رطوبت نسبی، سمت و سرعت باد، ساعت آفتابی، تبخیر و مقدار بارندگی نیز همزمان با برداشت داده های خاک اندازه گیری می شود. بازه زمانیداده برداری مربوط به ۱ فروردینالی ۱۵ مهر ۹۱ میباشد که از یک نقطه واقع در ایستگاه هواشناسی کشاورزی گلکان صورت گرفته است.

الگوریتم محاسبه شاخص کمبود آب WDI

بر مبنای فرضیه شکل دوزنقه ای و تئوریشاخص کمبود آب، موران و همکاران شاخص کمبود آب را برای برآورد سرعت تبخیر-تعرق و کمبود آب نسبی مزرعه برای شرایط پوشش گیاهی کامل و پوشش گیاهی پراکنده ارائه نمودند. مبنای تئوری دوزنقه ای

$$R_n = G + H + \lambda E \quad (7)$$

اندازه گیری شده می باشد.

مقدار شاخص تنش آبی گیاه برای گیاه فاقد تنش برابر با صفر و برای گیاه تحت تنش شدید آبی برابر با یک می باشد.

کاربرد شاخص CWSI به همراه ماهواره یا سنجنده های هوایی در اندازه گیری دمای سطحی به شرایطی که سطح پوشیده از گیاه باشد محدود می شود و در این حالت دمای اندازه گیری شده سطحی برابر با دمای کانوپی خواهد بود. این محدودیت از کارایی این شاخص برای شرایط پوشش گیاهی غیرمتراکم در برنامه ریزی آبیاری می کاهد.

برای هماهنگ شدن با شرایط پوشش گیاهی غیرمتراکم، موران و همکاران (۱۱) شاخص کمبود آب (WDI) را ارائه نمود که در آن دمای سطح خاک و گیاه توأمان اندازه گیری می شود.

(۶)

$$WDI = 1 - \frac{\lambda E_{\Gamma}}{\lambda E_{\Gamma p}} \\ = \frac{[(T_s - T_a)_m - (T_s - T_a)_c]}{[(T_s - T_a)_m - (T_s - T_a)_x]}$$

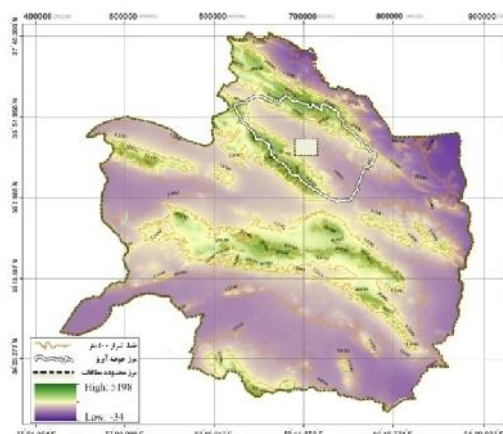
در رابطه فوق T_s دمای سطح زمین می باشد. شاخص کمبود آب عملاً در سطح پوشیده از گیاه برابر با شاخص تنش آبی گیاه می باشد و در این حالت دمای سطحی با دمای کانوپی برابر خواهد بود. برای شرایط سطح کاملاً پوشیده از گیاه، شاخص کمبود آب برابر با صفر و برای شرایط بیشینه تنش آبی، این شاخص برابر با یک خواهد بود.

مواد و روش ها

در این پژوهش به منظور یافتن رابطه ای رگرسیونی برای تخمین رطوبت خاک در محدوده دشت مشهد، با استفاده از تصاویر ماهواره ای سنجنده مودیس، ابتدا شاخص کمبود آب WDI به صورت پیکسلی محاسبه شده، سپس رابطه ای خطی بین شاخص مذکور و داده های رطوبت خاک اندازه گیری شده در محدوده مطالعاتی برازش داده شد.

محدوده مطالعاتی

استان خراسان رضوی (شکل ۱) که در شمال شرق ایران واقع شده با مساحتی معادل ۱۱۷۷۶۹ کیلومترمربع معادل هفت درصد مساحت کل کشور را به خود اختصاص داده است. از منظر جغرافیایی این استان بین ۵۶ درجه و ۱۹ دقیقه تا ۶۱ درجه و ۱۶ دقیقه طول شرقی و ۳۳ درجه و ۵۲ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۴۲ دقیقه عرض جغرافیایی شمالی قرار گرفته است (پورتال استانداری خراسان رضوی (۳)).



شکل ۱- مدل ارتفاعی رقومی استان خراسان رضوی (منطقه مطالعاتی توسط کادر مربعی نمایش داده شده است)
Figure 1- Khorasan Razavi province Digital Elevation Model (DEM), (Study area displayed by a square box in Figure)



شکل ۲- سایت اندازه گیری رطوبت خاک در مرکز تحقیقات کشاورزی گلکمان (محدوده ۲ در ۲ متر مربعی)
Figure 2- Soil moisture measurement site at Golmakan agriculture research center (2×2 square meter area)

$$(T_s - T_a) = \left[\frac{r_a(R_n - G)}{C_v} \right] \times \{ (1 + r_{cp}/r_a) / [1 + \gamma(1 + r_{cp}/r_a)] \} - VPD / \{ 1 + r_{cp}/r_a \} \quad (1)$$

متغیر مقاومت آیرودینامیکی (r_a) با استفاده از رابطه زیر که توسط براتزارت (۴) ارائه شده است قابل محاسبه می باشد:

$$r_a = \left[\ln \left(\frac{z-d}{z_{0m}} \right) - \psi_m \right] \left[\ln \left(\frac{z-d}{z_{0h}} \right) - \psi_h \right] / k^2 u_z \quad (11)$$

در رابطه فوق z ارتفاع از سطح زمین است که T_a و u_z در آن ارتفاع اندازه گیری می شود. همچنین تابش خالص نیز از رابطه ذیل محاسبه می شود:

$$R_n = (1 - \alpha_s) R_s + \alpha_a \times T_a^4 - \epsilon_s \sigma T_s^4 \quad (12)$$

در رابطه فوق متغیر آلبیدوی سطحی امواج طول موج کوتاه می باشد.

در این رابطه H شار گرمای محسوس (وات بر متر مربع) و E شار گرمای نهان خاک (وات بر متر مربع) است. در شکل دیگری از رابطه فوق متغیرهای H و E به شکل زیر بیان می شود:

$$H = C_v (T_s - T_a) / r_a \quad (8)$$

$$(9)$$

$$\lambda E = [\lambda (R_n - G) + C_v (VPD) / r_a] / [1 + r_c / r_a]$$

در رابطه فوق دمای سطحی و دمای هوا بر حسب کلوین، C_v ظرفیت گرمایی ویژه هوا (۱۶/۲۹۵ ژول بر کلوین بر متر مکعب) و فشار بخار اشباع بر حسب هکتوپاسکال می باشد. با ترکیب روابط فوق، اختلاف دمای سطحی و دمای هوا به منظور به دست آوردن مختصات چهار رأس دوزنقه با استفاده از رابطه ذیل محاسبه می شود:

$$(10)$$

مختصات شکل دوزنقه ای (شکل ۳) به برخی اندازه گیری های میدانی برای به دست آوردن متغیرهای تابش خالص، کمبود فشار بخار، دمای هوا و سرعت باد نیاز است. همچنین لازم است در زمان اندازه گیری میزان پوشش گیاهی و مقاومت کانوبی حداقل و حداکثر، سنجش یا تخمین زده شود.

داده های هواشناسی

به منظور محاسبه شاخص WDI لازم است متغیرهای ذیل اندازه گیری شوند:

سرعت باد در ارتفاع ۲ متری، فشار هوا، دمای میانگین روزانه، شیب منحنی فشار بخار اشباع-دمای هوا، ثابت سایکرومتری، فشار بخار اشباع در دمای میانگین، کمبود فشار بخار اشباع، تابش فراجوی، تابش طول موج کوتاه خورشیدی، تابش طول موج بلند، تابش خالص، شار گرمای خاک و مقاومت آبرودینامیک هوا

داده های ماهواره ای سنجنده مودیس (MODIS)

ماهواره ترا توسط کشور آمریکا در دسامبر ۱۹۹۹ به فضا پرتاب شد. این ماهواره در حال حاضر فعال بوده و دارای سنجنده های متعددی است، که از آن میان سنجنده های مودیس و استر در ایران، شناخته شده تر از بقیه هستند. سنجنده مودیس دارای ۳۶ باند است که در محدوده طیفی ۰/۴ الی ۱۵ میکرون قرار گرفته اند. قابلیت تفکیک زمینی باندهای ۱ و ۲ حدود ۲۵۰ متر، باندهای ۳ الی ۷، حدود ۵۰۰ متر و بقیه باندها حدود ۱۰۰۰ متر است. به خاطر اینکه زاویه اسکن این سنجنده ۵۵ ± درجه بوده و در مدار ۷۰۵ کیلومتر از سطح زمین قرار دارد، پهنای نوارهای تصویربرداری این سنجنده ۲۳۳۰ کیلومتر می باشد و در نتیجه در هر یک یا دو روز، پوشش جهانی را فراهم می سازد.

به دلیل هفتگی بودن اندازه گیری رطوبت خاک در ایستگاه گلکان و همچنین پراکندگی زمانی اندازه گیری در برخی ایام سال، از این روی، انتخاب سنجنده ای که قدرت تفکیک زمانی بیشتری برآیافتن تطبیق با داده های زمینی در اختیار داشته باشد مد نظر است. از سوی دیگر لازم است بهطور همزمان سنجنده دارای تصاویر مرئی و نامرئی (مادون قرمز حرارتی) جهت تامین داده های مورد نیاز الگوریتم برآورد شاخص کمبود آب باشد.

از این روی سنجنده مودیس با تولید تصاویر یکی یا دو روزه در اولویت کار این پژوهش قرار گرفت.

در این پژوهش با توجه به اینکه از فناوری سنجش از دور به عنوان ابزاری برای تامین داده ها و محاسبات بهره گرفته می شود لذا در صورتی که محصولات تولیدی سازمان فضایی ناسا از دقت کافی برخوردار باشد، در این حالت ضرورتی بر استفاده از تصاویر و داده های خام وجود نخواهد داشت.

مقدار این متغیر برای باندهای ۱ تا ۷ سنجنده مودیس از رابطه ذیل محاسبه می شود: (لیانگ (۱۰))

$$\alpha = 0.3973\alpha_1 + 0.23821\alpha_2 + 0.3489\alpha_3 + (13) \\ 0.265\alpha_4 + 0.1604\alpha_5 - 0.0138\alpha_6 + 0.0682\alpha_7 + 0.0036$$

متغیر R_s تابش خورشیدی می باشد که مستقیماً از طریق ثابت خورشیدی محاسبه می شود. همچنین متغیرهای زاویه میل خورشیدی، موقعیت جغرافیایی، روز از سال، گذرندگی اتمسفری، ارتفاع از سطح نیز دخیل هستند. رابطه پایه برای محاسبه تابش خورشیدی توسط زیلمان (۲۰) به شکل زیر پیشنهاد شده است:

$$R_s = \frac{S_0 \cos^2 \theta}{1.085 \cos \theta + e^{\theta(2.7 + \cos \theta)} \times 10^{-3} + 0.1} \quad (14)$$

در رابطه فوق S_0 ثابت خورشیدی در بالای اتمسفر (۱۳۶۷ وات بر متر مربع)، زاویه سمت الرأس خورشیدی، e^{θ} فشار بخار می باشد. شاخص کمبود آب برای محاسبه مختصات چهار راس دوزنقه دما-پوشش گیاهی از رابطه توازن انرژی پنمن - مانیتیت استفاده کرده و چهار ترکیب مختلف حدی دما و پوشش گیاهی را محاسبه می نماید. رابطه توازن انرژی برای شرایط پوشش گیاهی کامل و به خوبی آبیاری شده به شکل زیر است:

$$(T_s - T_a)_1 = \left[\frac{r_a(R_n - G)}{f C_p} \right] \times [(1 + r_{cp}/r_a) / \{ \gamma + \nu(1 + r_{cp}/r_a) \}] - [VPD / \{ (1 + r_{cp}/r_a) \}] \quad (15)$$

برای شرایط پوشش گیاهی کامل و فاقد آب در دسترس رابطه توازن انرژی به شکل زیر خواهد بود:

$$(T_s - T_a)_2 = \left[\frac{r_a(R_n - G)}{f C_p} \right] \times [(1 + r_{cx}/r_a) / \{ \gamma + \nu(1 + r_{cx}/r_a) \}] - [VPD / \{ (1 + r_{cx}/r_a) \}] \quad (16)$$

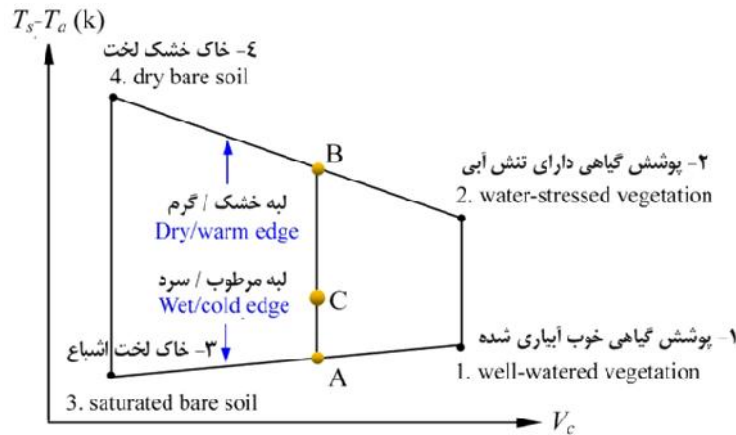
متغیر r_{cx} مقاومت کانوبی در شرایطی است که تقریباً روزنه های گیاهی در حالت بسته قرار دارد. برای شرایط فاقد پوشش گیاهی به خوبی آبیاری شده که مقاومت کانوبی مشابه سطح آزاد آب برابر با صفر خواهد بود رابطه توازن انرژی به شکل زیر در می آید:

$$(T_s - T_a)_3 = \left[\frac{r_a(R_n - G)}{\rho C_p} \right] \left[\frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \right] - \left[\frac{VPD}{\Delta + \gamma} \right] \quad (17)$$

و برای خاک فاقد پوشش گیاهی و بدون آب در دسترس که مقاومت کانوبی در آن بیشینه خواهد بود رابطه توازن انرژی به شکل زیر خواهد بود:

$$(T_s - T_a)_4 = \left[\frac{r_a(R_n - G)}{\rho C_p} \right] \quad (18)$$

در روابط ارائه شده توسط موران و همکاران به منظور ترسیم



شکل ۳- شکل شماتیک ذوزنقه دما-پوشش گیاهی
Figure 3- Ts~VI trapezoid schematic shape

جدول ۱- مشخصات محصولات مودیس استفاده شده
Table 1- Used MODIS production specifications

نام اختصاری محصول Production short name	کاربرد Application	تفکیک زمانی Temporal resolution	تفکیک مکانی Spatial resolution
MOD09A1	بازتاب سطحی Surface albedo	8 روزه 8-days	500 متر 500 meters
MOD11A1	دما و بازتاب سطحی Temperature & surface albedo	روزانه Daily	1 کیلومتر 1 kilometer
MOD13A1	شاخص گیاهی Vegetation index	8 روزه 8-days	250 متر 250 meters

قرار می گیرند.
در این پژوهش تصاویر مربوط به ۱۸ روز در سال زراعی ۹۱-۹۰ واقع در بهار و تابستان ۱۳۹۱ که غیر ابری و فاقد خطای پردازش تصویر بوده اند مورد استفاده قرار گرفته است.

محاسبه Ts در الگوریتم ذوزنقه ای

همانطور که پیش تر توضیح داده شد، برای اجرای الگوریتم ذوزنقه ای دما- پوشش گیاهی لازم است دمای سطح زمین به ازای هر پیکسل محاسبه شود. با توجه به اینکه در هر معادله به طور همزمان سه متغیر مجهول وجود دارد (Ts، Rn و ra) که هر سه مبتنی بر متغیر دمای سطحی هستند، لذا می توان از طریق فرآیند سعی و خطا مقدار Ts و در نتیجه سایر متغیرها را برای هر یک از چهار راس ذوزنقه به ازای هر پیکسل به دست آورد.
در شکل ۴ به طور نمادین فرآیند تکرار مربوط به محاسبه دمای سطحی نشان داده است.

از این روی در این پژوهش کلیه تصاویر از سطح ۲ و ۳ محصولات مودیس انتخاب شدند. در جدول (۱) محصولات مورد استفاده معرفی شده اند:

MOD09A1: محصول بازتاب سطحی مودیس، بهترین تخمین از بازتاب طیفی که امکان اندازه گیری آن در سطح زمین وجود دارد را ارائه می نماید. این محصول که در سطح دوم و سوم محصولات مودیس قرار دارد طی بازه زمانی ۸ روزه بهترین داده های مربوط به بازتاب سطحی با کمترین خطای مربوط به پراکنش و یا جذب نور توسط ذرات جو، پوشش ابر و ... را ارائه می نماید. باندهای ۱ تا ۷ این تصویر دارای قدرت تفکیک مکانی ۵۰۰ متر بوده و سایر باندها داده های مربوط به عوامل تصحیح تصویر را ارائه می دهد.

MOD11A1: این محصول با قدرت تفکیک مکانی ۱ کیلومتر متغیرهای دما و بازتاب سطحی را به صورت پیکسلی ارائه می نماید. با توجه به اینکه محصولات سطح دوم به بعد مودیس دارای تصحیحات هندسی، رادیومتریک و اتمسفری هستند، لذا با انتخاب روزهای غیر ابری، به جز موارد خاص که اشکالی جدی در کیفیت تصاویر رویت می شود، در سایر تصاویر بدون تصحیح مورد استفاده

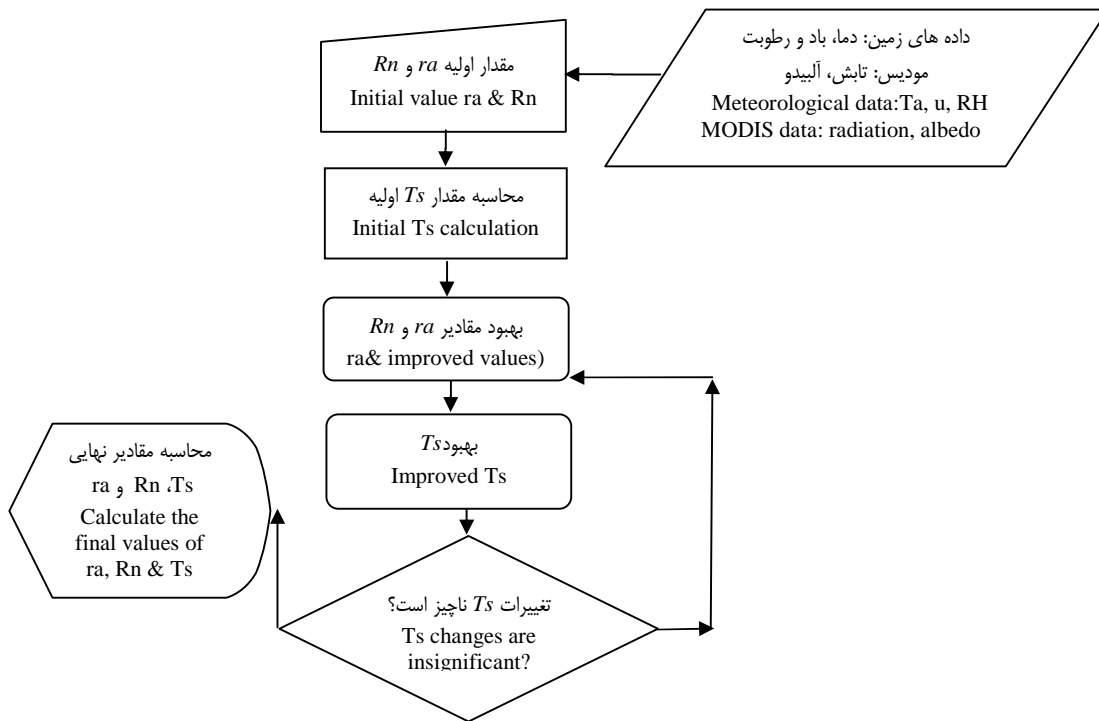
نتایج و بحث

پهنه بندی شاخص کمبود رطوبت WDI

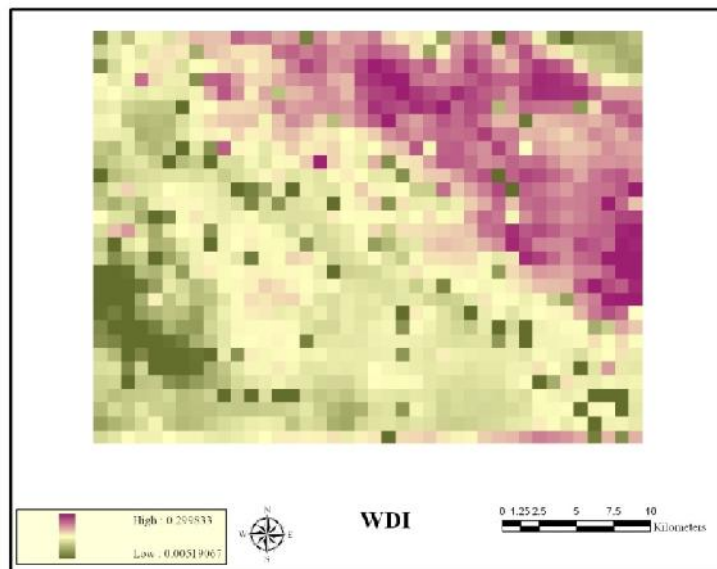
شاخص کمبود آب با استفاده از نرم افزار ERDAS IMAGINE 2010 و همچنین ArcMap 9.2 برای کلیه روزها و به تفکیک پیکسل ها محاسبه و پهنه بندی شد. به طور مثال همانطور که در شکل ۵ ملاحظه می شود، بیشترین مقدار شاخص برابر با ۰/۳۹ (بیشترین تنش) و کمترین مقدار آن برابر با ۰/۰۰۵ (کمترین تنش) و نزدیک به صفر می باشد. میانگین شاخص برابر با ۰/۱۷۲، نما برابر با ۰/۱۵۹ و انحراف معیار استاندارد ۰/۰۴۲ می باشد. در این تصویر ملاحظه می شود که بخش شمال شرقی تصویر که عمدتاً پوشیده از مزارع کشاورزی دیم و فاریاب هستند نسبت به مناطق مرتفع و دیمیا کوهستانی دارای تنش آبی بیشتری هستند. لازم به ذکر است با توجه به رابطه (۶)، شاخص WDI وابسته به مقادیر حداقل، حداکثر و دورسنجی شده عبارت $(T_s - T_a)$ می باشد. از سوی دیگر طبق روابط (۱۴) تا (۱۷) محاسبه $(T_s - T_a)$ نیز وابسته به محاسبه R_n می باشد. بخشی از متغیرهای به کار برده شده در محاسبه R_n با

استفاده از داده های دریافتی از باند ۳۱ و ۳۲ سنجنده مودیس (باند های حرارتی) که دارای قدرت تفکیک مکانی ۱۰۰۰ متر می باشند به دست آمده اند. اگرچه در محاسبه R_n از متغیرهایی با قدرت تفکیک مکانی ۲۵۰ متر نیز استفاده شده است اما نهایتاً کلیه تصاویر بر این اساس کمترین دقت تفکیک مکانی (۱۰۰۰ متر) تعیین مقیاس شده و تصاویر نهایی پهنه بندی شاخص WDI دارای پیکسل هایی با بعد مکانی حدوداً ۱۰۰۰ متر می باشند.

در سایر روزهای سال تحت تاثیر بارندگی و آبیاری مزارع، تغییرات شاخص کمبود آب روندی منطقی را نمایش می دهد. افزایش مقدار شاخص در دوره های زمانی فاقد بارندگی و کاهش آن در روزهای پس از بارش حاکی از صحت مدل می باشد. همچنین نوسانات شاخص در مناطق زراعی نسبت به مناطق دیم و بایر حاکی از تاثیر آبیاری بر پروفیل دمایی سطحی و در نتیجه تغییر در شاخص کمبود رطوبت دارد.



شکل ۴- فلوجارت فرآیند تکرار برای محاسبه دمای سطح زمین
Figure 4- Iterative flowchart for surface temperature(Ts) calculation

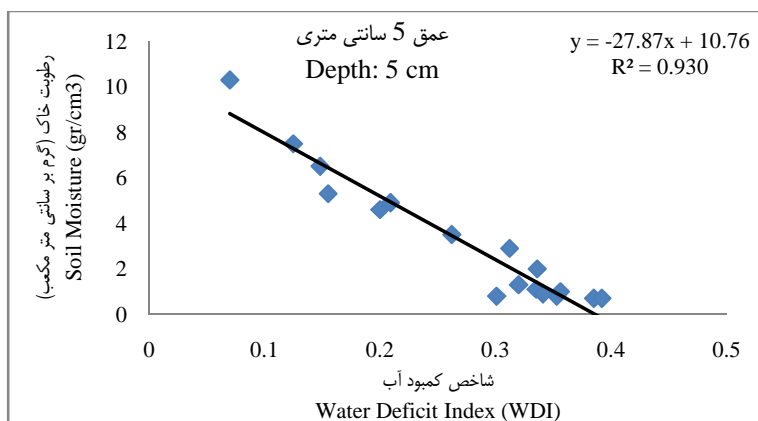


شکل ۵- پهنه بندی شاخص کمبود آب در روز ژولیوسی شماره ۹۷
 Figure 5- Water Deficit Index zoning (in the Julian day#97)

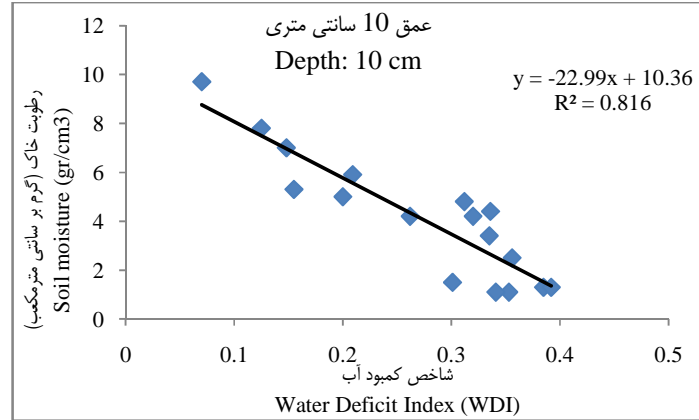
تخمین رطوبت خاک

با توجه به رابطه تنگاتنگ میان اختلاف دمای پروفیل بالای سطح خاک و رطوبت خاک و اینکه شاخص کمبود آب (WDI) نیز بر همین اساس استوار شده است، لذا پس از محاسبه شاخص کمبود آب در سطح محدوده مطالعاتی، رابطه رگرسیونی دو متغیر مذکور در محل ایستگاه گل‌مکان به صورت نقطه ای بررسی می شود. در این رابطه، شاخص WDI از میانگین مقادیر محاسبه شده آن در چهار پیکسل اطراف ایستگاه گل‌مکان به دست آمده و با مقادیر اندازه گیری شده

رطوبت خاک در یک نقطه در محدوده ایستگاه گل‌مکان (شکل ۳) برازش داده شده است. وانگ و همکاران (۱۸) نشان دادند که در مناطق نیمه خشک و نیمه مرطوب، رابطه برازش داده شده هر چند از نظر پهنه بندی مکانی ممکن است از دقت خوبی برخوردار نباشد اما به صورت نقطه ای نتایج قابل قبولی را به همراه داشته است. شکل ۶ و ۷ منحنی برازش داده شده را در دو عمق ۵ و ۱۰ سانتی متری از سطح خاک نمایش می دهد.



شکل ۶- برازش رابطه خطی بین رطوبت خاک در عمق ۵ سانتی متری و شاخص کمبود آب
 Figure 6- Fitting a linear relationship between soil moisture and water deficit index (soil depth: 5 cm)



شکل ۷- برازش رابطه خطی بین رطوبت خاک در عمق ۱۰ سانتی متری و شاخص کمبود آب
Figure 7- Fitting a linear relationship between soil moisture and water deficit index (soil depth: 10 cm)

جدول (۲) نشان می دهد که به طور متوسط حدود ۴۴ درصد مقادیر شاخص در محدوده ۰/۲ تا ۰/۳ قرار گرفته است. همچنین پس از آن حدود ۲۲ درصد مقادیر شاخص در محدوده ۰/۳ تا ۰/۴ قرار گرفته اند. در مجموع می توان گفت بیش از ۶۵ درصد مقادیر شاخص در بازه زمانی انجام مطالعات در محدوده ۰/۲ تا ۰/۴ قرار گرفته اند که با توجه به بیشینه مقدار شاخص در این دوره (۰/۵۸۹) در روز شماره ۲۰۱ ژولایوسی و کمینه مقدار شاخص (۰/۰۰۴) در روز شماره ۱۲۹ ژولایوسی، می توان گفت تنش آبی موجود در محدوده مطالعاتی در بازه شش ماهه مشاهدات در حد متوسط بوده و انتظار می رود در این دوره عملکرد محصولات و مرتع در حد نرمال بوده و شاهد افت یا فرونی در عملکرد جوامع گیاهی منطقه نباشیم که مشاهدات عمومی صورت گرفته از منطقه بر اساس پرسش های میدانی گواهی بر همین مدعاست.

برازش رابطه خطی میان دو متغیر رطوبت خاک و شاخص کمبود آب در محدوده مرکز تحقیقات گلکمان در عمق ۵ سانتی متری از سطح خاک، با توجه به ضریب همبستگی ۹۳٪ نشان دهنده همبستگی نسبتاً زیاد این دو متغیر به یکدیگر است. همچنین ضریب همبستگی ۸۱٪ در برازش رابطه خطی مربوط به شاخص کمبود آب و رطوبت خاک در عمق ۱۰ سانتی متری از سطح خاک، اولاً حاکی از وجود همبستگی میان این دو متغیر بوده و ثانیاً کاهش مقدار این ضریب نسبت به ضریب همبستگی رابطه خطی برای عمق ۵ سانتی متر، نشان دهنده عدم تصادفی بودن این رابطه و است. چرا که انتظار می رود با افزایش عمق خاک و افزایش زمان تاخیر در انتقال خصوصیات سطحی خاک، از مقدار ضریب همبستگی رابطه رگرسیونی در عمق های بیشتر کاسته شود که ضرایب به دست آمده موید این موضوع است. همچنین رابطه منفی میان این دو متغیر نیز طبیعی بوده و با افزایش رطوبت خاک، تنش آبی کاهش یابد و بالعکس.

جدول ۲- خلاصه خصوصیات آماری پهنه بندی شاخص کمبود آب
Table 2- Summary of statistical properties of water deficit Index zoning

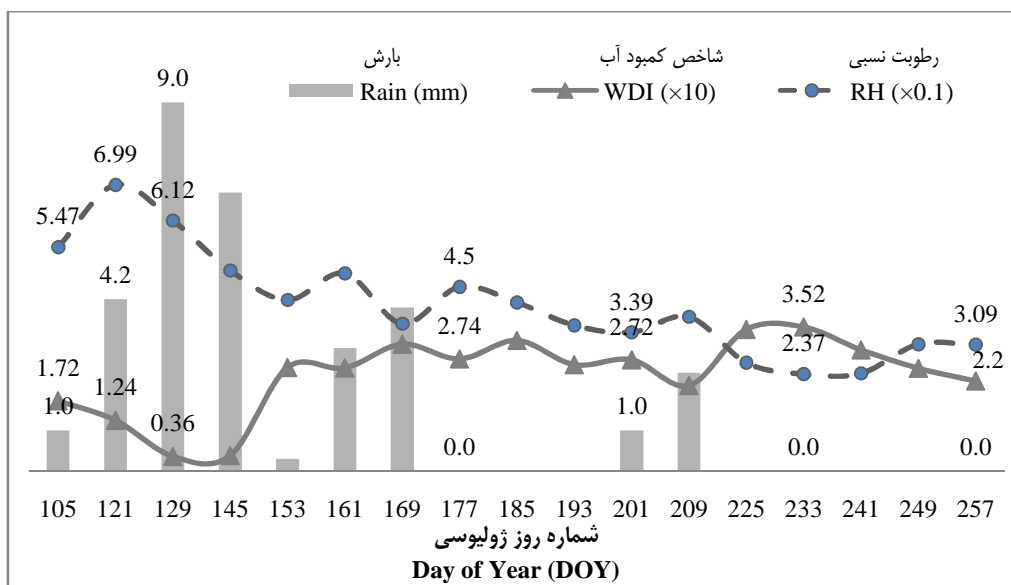
خصوصیات آماری Statistical properties						حدود شاخص کمبود آب WDI range					
انحراف معیار Standard deviation	میانگین Median	میانگین Average	کمینه Minimum	بیشینه Maximum	> 0.5	0.4 - 0.5	0.3 - 0.4	0.2 - 0.3	0.1 - 0.2	0 - 0.1	
0.0477	0.2599	0.2294	0.0004	0.589	0.07%	2.12%	22.01%	44.35%	17.6%	14.39%	

مقادیر ریزش های جوی و وضعیت رطوبتی هوا به نمایش در آمده است. همانطور که انتظار می رود با وقوع بارندگی قابل ملاحظه در

به منظور بررسی انطباق مقادیر محاسبه شاخص با شرایط واقعی و خصوصیات رطوبتی جو، در شکل (۸) روند نوسانات شاخص در برابر

که بارندگی قابل ملاحظه ای صورت گرفته است شرایط ذکر شده به خوبی مشاهده می شود. در سایر روزها نیز با توجه به شدت بارندگی و تاثیر بارش های قبلی وضعیت مشابهی مشاهده می شود.

منطقه، پس از ۲۴ تا ۴۸ ساعت آینده افزایش رطوبت در جو و تامین رطوبت خاک در محیط ریشه گیاه موجب کاهش تنش آبی شده و بر این اساس لازم است اوج و حضيض منحنی شاخص و بارش در خلاف جهت یکدیگر نمایان شوند. به طور مثال در روز شماره ۱۲۹



شکل ۸- مقایسه روند تغییرات بارش، رطوبت نسبی و شاخص کمبود آب

Figure 8- Comparison of trends in rainfall, relative humidity and water deficit index

کاهش رطوبت نسبی هوا در منطقه مطالعاتی مصادف با افزایش مقادیر شاخص کمبود آب بود.

تعداد دفعات محدود اندازه گیری رطوبت خاک در محدوده مطالعاتی، دامنه استفاده از تصاویر متنوع ماهواره ای را محدود کرده بود. استفاده از محدوده مکانی نسبتاً کوچک، کاهش تعداد تصاویر ماهواره ای استفاده شده به دلیل عدم هم پوشانی زمانی لازم و امثال آن از جمله چالش های موجود در این پژوهش می باشد. از سوی دیگر در این پژوهش هدف اصلی، بررسی نتایج حاصل از به کارگیری تئوری مدل دوزنقه ای دما- پوشش گیاهی بوده که بر این اساس، ارزیابی نقطه ای متغیرها نیز توانست هدف مورد نظر را تامین نماید لذا استخراج رابطه رگرسیونی که امکان پهنه بندی مکانی داشته باشد در اولویت دوم اهمیت قرار داشته که می تواند در پژوهش های بعدی بررسی شود.

استفاده از داده های باندهای حرارتی سنجنده مودیس که از قدرت تفکیک مکانی ۱۰۰۰ متر برخوردار هستند نیز یکی دیگر از عوامل کاهش دقت محاسبات و برآوردها می باشد.

نتیجه گیری

نتایج مربوط به بررسی رابطه خطی میان شاخص کمبود آب و رطوبت خاک سطحی اولاً حاکی از وجود ضریب همبستگی مناسب (۹۳ درصد) بین این دو متغیر در محدوده مطالعاتی مورد نظر بود. ثانیاً بررسی ضریب همبستگی (۸۲ درصد) شاخص کمبود آب و رطوبت خاک در عمق ۱۰ سانتی متری نیز نشان دهنده صحت رابطه برآزش یافته بین این دو متغیر بود. همچنین با توجه به نقطه ای بودن داده های رطوبت خاک از پهنه بندی مکانی آن و تعمیم به سایر نقاط دشت خودداری شده و انتظار می رود با ورود اطلاعات توپوگرافی بیشتر و افزایش زمانی و مکانی داده های رطوبت خاک، بتوان به نتایج بهتر و تعمیم یافته تری نیز دست یافت.

تشابه روند تغییرات شاخص کمبود آب با بارش و رطوبت نسبی در محدوده مطالعاتی نیز حاکی از انطباق نتایج به دست آمده از شاخص کمبود آب و شرایط آب و هوای منطقه است. به گونه ای ظرف ۲۴ تا ۷۲ ساعت پس از هر بارندگی و متناسب با میزان بارندگی، کاهش مقادیر شاخص کمبود آب مشاهده شد. همچنین

منابع

- 1- Brutsaert W.H. 1982. Evaporation into the Atmosphere, D. Reidel Publ. Co., London, England, 299 p.
- 2- Hatfield, J.L. 1997. Plant-water interactions, Chapter 3 IN Plants for Env. Studies, CRC Lewis Publishers, New York, pp. 81-103.
- 3- Hiler E.A., and Clark R.N. 1971. Stress day index to characterize effects of water stress on crop yield. Trans. ASAE 14:757-761.
- 4- Idso S.B., R.D., Jackson P.J. Pinter Jr., Reginato R.J. and Hatfield J.L. 1981. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability, Agric. Meteorol. 24:45-55.
- 5- Jackson R. D. 1987. The crop water stress index: A second look, in Proc, Int, Conf, on Measurement of Soil and Plant Water Status, Utah State Univ., 6-10 Jul, Logan, UT.
- 6- Krapez J. C. 2009. Comparison of three methods based on the Temperature-NDVI diagram for soil moisture characterization, Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XI, edited by Christopher M. U. Neale, Antonino Maltese, Proc. of SPIE Vol. 7472, 74720Y, France
- 7- Liang S. 1999. Retrieval of Land Surface Albedo from Satellite Observations: A Simulation Study[J], J. Appl. Meteorol., 38, 712-725.
- 8- Moran M. S., Clarke T. R., Inoue Y., and Vidal. 1994. Estimating crop water deficit using the relation between surface air temperature and spectral vegetation index, Remote Sens. Environ., 49, 246-263.
- 9- Moran M. S. 2000. Thermal infrared measurement as indicator of plant ecosystem health, USDA-ARS Southwest Watershed Research Center, Tucson, Arizona (1), 257-282.
- 10- Nemani R. R., and Running S. W, 1989. Estimation of regional surface resistance to evapotranspiration from NDVI and thermal IR AVHRR data, J. Appl. Meteorol., 28, 276-284.
- 11- Penman H.L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass, Proc. Roy. Soc. London A193:120-146.
- 12- Petropoulos G., Carlson N., Wooster M. J., Islam S., and Hall A. 2009. A review of T_s / VI remote sensing based methods for the retrieval of land surface energy fluxes and soil surface moisture, 33(2), 224-250. doi:10.1177/0309133309338997.
- 13- Portal of Khorasan Razavi environmental protection agency, Province introduction, Environmental specifications. Available at <http://www.rko.doe.ir/Portal/home> (visited 24 April 2013)
- 14- Portal of Khorasan Razavi governer, Province introduction. Available at <http://khorasan.ir> (visited 24 April 2013)
- 15- Portal of Khorasan Razavi research, education and propagation agriculture agency, New NEWS, Golmakan Gardening research station, Propagators and gardeners. Available at <http://www.areo.ir> (visited 1 February 2013)
- 16- 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 Sens. Environ., 79(2), 213-224.
- 17- Sohrabinia M. Geostatistical analysis of surface temperature and in-situ soil moisture using LST time-series from modis, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXIX-B7, 2012, XXII ISPRS Congress, 25 August - 01 September 2012, Melbourne, Australia
- 18- Wang W. 2010. Estimate soil moisture using trapezoidal relationship between remotely sensed land surface temperature and vegetation index, Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss., 7, 8703-8740, 2010
- 19- Wiegand C.L., and Namken L.N. 1966. Influences of plant moisture stress, solar radiation and air temperature on cotton leaf temperature, Agron. J. 58:552-556.
- 20- Zillman J. W. 1972. A study of some aspects of the radiation and heat budgets of the southern hemisphere oceans, Canberra: Australian Government Publishing Service, Canberra, Australia.



Soil Moisture Estimation Using MODIS Images (Case Study: Mashhad Plain Area)

M. Fashae^{1*} – S. H. Sanaee Nejad² – K. Davary³

Received: 01-07-2014

Accepted: 29-08-2015

Introduction: Numerous studies have been undertaken based on satellite imagery in order to estimate soil moisture using vegetation indices such as NDVI. Previous studies suffer from a restriction; these indices are not able to estimate where the vegetative coverage is low or where no vegetation exists. Hence, it is essential to develop a model which can overcome this restriction. Focus of this research is on estimation of soil moisture for low or scattered vegetative land covers. Trapezoidal temperature-vegetation (Ts-VI) model is able to consider the status of soil moisture and vegetation condition. It can estimate plant water deficit for weak or no vegetation land cover.

Materials and Methods: Moran proposed Water Deficit Index (WDI) for evaluating field evapotranspiration rates and relative field water deficit for both full-cover and partially vegetated sites. The theoretical basis of this method is based on the energy balance equation. Penman-Monteith equation of energy balance was used to calculate the coordinates of the four vertices of the temperature-vegetation trapezoid also for four different extreme combinations of temperature and vegetation. For the (Ts-Ta)-Vc trapezoid, four vertices correspond to 1) well-watered full-cover vegetation, 2) water-stressed full-cover vegetation, 3) saturated bare soil, and 4) dry bare soil. WDI is equal to 0 for well-watered conditions and equals to 1 for maximum stress conditions. As suggested by Moran et al. to draw a trapezoidal shape, some field measurements are required such as wind speed at the height of 2 meters, air pressure, mean daily temperature, vapor pressure-temperature curve slope, Psychrometrics constant, vapor pressure at mean temperature, vapor pressure deficit, external radiation, solar radiation of short wavelength, longwave radiation, net radiation, soil heat flux and air aerodynamic resistance is included. Crop vegetation and canopy resistance should be measured or estimated. The study area is selected in the Mashhad plain in Khorasan Razavi province of I.R. Iran. Study area is about 1,200 square kilometers and is located around the Golmakan center of agricultural research. In this study, water deficit index (WDI) was zoning by MODIS images in subset of Mashhad plain during water year of 2011-2012. Then, based on the close relationship between WDI and soil moisture parameter, a linear relationship between these two parameters were fitted. Soil moisture is measured by the TDR and every 7 days at 5 depths of 5, 10, 20, 30 and 50 cm from the surface. Remote Sensing (RS) technology used as a tool for providing some of the data that is required. The moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) instrument is popular for monitoring soil moisture because of its high spectral (36 bands) resolution, moderate spatial (250–1000 m) resolution and various products for land surface properties. MODIS products used in the present study include: MOD09A1 land surface albedo data, MOD11A1 land surface temperature data, and MOD13A1 vegetation data. Using ArcMap 9.2 and ERDAS IMAGINE 2010 softwares, WDI was calculated pixel by pixel for 18 days (non-cloudy days and simultaneous with measurement of soil moisture at the station).

Results and Discussion: The results showed that the northeastern region is predominantly rainfed and irrigated farmlands are under water stress. Conversely, the southwestern part of the area is mountainous with less water stress. Based on NDVI, there is also less crop cover in the southwestern part of the region during the year. The results showed that about 44% of the index values are in the range of 0.2-0.3. Then about 22% of the index values are in the range of 0.3-0.4. Thus it can be concluded that over 66% of the index values are in the range of 0.2-0.4. According to the maximum index value (WDI=0.59 on the 201th day of year) and the minimum values (WDI=0.0004 on the 129th day of year) during the time period of study, it seems that water stress in the study area in the six-month period of observation is moderate. To validate the results, changes in precipitation, relative humidity and WDI values were compared. As expected, after the occurrence of any significant rainfall, water stress is decreased and decreasing in relative humidity, coincided with increase in water stress. In the next step, the linear relationship between measured values of soil moisture and WDI values were fitted in 2 depth of 5 and 10 cm. It should be noted that the average values of WDI of four pixels surrounding the Golmakan station was

1, 2 and 3- Ph.D Student of Agrometeorology and Associate Professors of Water Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad, Iran, Respectively

(*- Corresponding Author Email: am.fashae@gmail.com)

used in calculation of the regression coefficients Similar research has shown that Ts~VI trapezoid based WDI can accurately capture temporal variation in surface soil moisture, but the capability of detecting spatial variation is poor for such a semi-arid region like Mashhad. The high correlation coefficient (93%) obtained from soil moisture (5 cm) and WDI regression showed the good mutual impacts of these two parameters on each other. The correlation coefficient between WDI index and soil moisture at a depth of 10 cm was equal to 83%. Reducing the value of the correlation coefficient was probably due to the delay in transferring the soil moisture changes to underlying depth.

Conclusion: The similarity of the mean values of rainfall and relative humidity of the air showed good compliance with the WDI. Good correlation coefficient (93%) between WDI and soil moisture (measured at depth of 5cm in the station) certifies the accuracy of the results obtained from WDI. The results showed that Ts~VI trapezoid based WDI can well capture temporal variation in surface soil moisture, while in this study, spatial zoning was avoided because of the lack of soil moisture data within the study area.

Keywords: Modis, Remote Sensing, Soil Moisture, Water Deficit Index