



Assessing Surface Soil Moisture in Arid and Semiarid Rangelands Using NDVI and Meteorological Parameters

S. M. R. Behbahani^{1*}, E. Noroozi Aghdam²,
A. Rahimi Khoob³ and H. Aghighi⁴

Abstract

Soil moisture and its temporal and spatial variations are one of the critical parameters in climatic, ecological, and hydrological modeling. Overall and consistent views on different parts of an area, repetitive satellite images from inaccessible areas and over large zones, along with regular periodic data are among important outcomes of the Remote Sensing (RS). Rangelands are highly dependent on the availability of water and therefore the vegetation indices can be used for tracking the changes in soil moisture. This study analyzes the correlation between the field measurements of soil moisture obtained using gravimetric sampling and the coincided and lagged MODIS-NDVIs based on the daily meteorological parameters during the growing season (April-August) from 2003 to 2005 in arid and semi arid rangeland in Khorasan Province, north eastern Iran. Results show that the surface soil moisture in these rangelands is moderately correlated to the coincided and lagged NDVI and can be estimated using NDVI during the growing season. Stronger relations can be obtained for surface soil moisture data lagged by 2 weeks with respect to the vegetation index. Considering wind and cumulative evaporation factors represent better temporal and spatial estimation for the surface soil moisture in the study area.

Keywords: Soil Moisture, NDVI, MODIS, Remote Sensing, Khorasan Province.

تخمین رطوبت خاک سطحی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و پارامترهای هواشناسی در مراتع مناطق خشک و نیمه خشک

سید محمودرضا بهبهانی^{۱*}، الناز نوروزی اقدم^۲،
علی رحیمی خوب^۳ و حسین عقیقی^۴

چکیده

رطوبت خاک و تغییرات زمانی و مکانی آن یکی از اجزاء بسیار مهم مدل‌های اقلیمی، اکولوژیکی و هیدرولوژیکی است. ارائه نمای جامع و یکنواخت از نواحی مختلف زمین، تصویربرداری مکرر از مناطق وسیع و غیرقابل دسترس، به همراه اطلاعات با فواصل زمانی منظم از ویژگی‌های مهم سیستم‌های سنجش از دور می‌باشد. پوشش گیاهی مرتعی در مناطق خشک و نیمه خشک تحت تأثیر رطوبت خاک می‌باشد، بنابراین می‌توان از شاخص‌های پوشش گیاهی حاصل از تصاویر ماهواره‌ای جهت مطالعه مقدار رطوبت خاک استفاده نمود. این تحقیق رابطه رطوبت خاک به دست آمده از اندازه‌گیری‌های میدانی و NDVIهای همزمان و تأخیری حاصل از تصاویر سنجنده مودیس را با بهره‌گیری از داده‌های روزانه هواشناسی در فصل رشد (فروردین- مرداد) گیاهان مرتعی استان خراسان، در سال‌های آماری ۲۰۰۳-۲۰۰۵ توسط مدل‌های رگرسیون خطی مورد مطالعه قرار داده است. نتایج، همبستگی متوسطی را بین رطوبت لایه سطحی خاک و NDVIهای همزمان و تأخیری در طول فصل رشد نشان دادند. بهترین همبستگی بین رطوبت لایه سطحی خاک و NDVI تأخیری ۱۵ روزه به دست آمد. با در نظر گرفتن عامل باد و تبخیر تجمعی مدل‌های بهتری برای تخمین رطوبت لایه سطحی خاک در محدوده زمانی و مکانی تحقیق ارائه شده است.

کلمات کلیدی: رطوبت خاک، NDVI، MODIS، سنجش از دور، استان خراسان.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴ آذر ۱۳۸۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۵ اسفند ۱۳۸۷

1- Associate Professor, Dept. of Irrigation & Drainage Eng. Abureihan Pardis, University of Tehran, Tehran, Iran.

2- PHD. Student, Irrigation & Drainage Engineering, Islamic Azad University, Science and Research Branch of Tehran, Tehran, Iran, Email: el_noroozi@yahoo.com.

3- Assistant Professor, Dept. of Irrigation & Drainage Eng. Abureihan Pardis, University of Tehran, Tehran, Iran.

4- Remote sensing and GIS expert of Iranian Space Agency, Tehran, Iran.

*- Corresponding Author

۱- دانشیار پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

۲- دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، دانشگاه آزاد اسلامی- واحد علوم و تحقیقات تهران

۳- استادیار پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

۴- کارشناس ارشد سازمان فضایی ایران

*- نویسنده مسئول

۱- مقدمه

تغییرات پوشش گیاهی با تأخیر نسبت به تغییرات رژیم رطوبتی خاک مشاهده می‌شوند. در جنگل‌ها و اراضی کشاورزی، NDVI به بارندگی بعد از دو تا سه ماه پاسخ می‌دهد، زمان تأخیر وابسته به نوع پوشش گیاهی و نحوه تأمین آب مورد نیاز گیاهان منطقه می‌باشد (Nicholson & Farrar, 1994; Wang, 2000; Wang, et al., 2001).

هدف از این تحقیق، بررسی امکان برآورد رطوبت لایه سطحی خاک با استفاده از شاخص NDVI سنجنده Terra/MODIS³ و پارامترهای هواشناسی در اراضی مرتعی مناطق خشک و نیمه خشک است. در این تحقیق از اطلاعات سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵ برای بررسی و ایجاد رابطه بین رطوبت خاک حاصل از عملیات میدانی با مقادیر همزمان و تأخیری NDVI به دست آمده از تصاویر سنجنده مودیس، استفاده شده است که می‌تواند به عنوان روشی ارزان، سریع و ساده در مطالعه رطوبت خاک و پیش بینی آن مورد استفاده قرار گیرد.

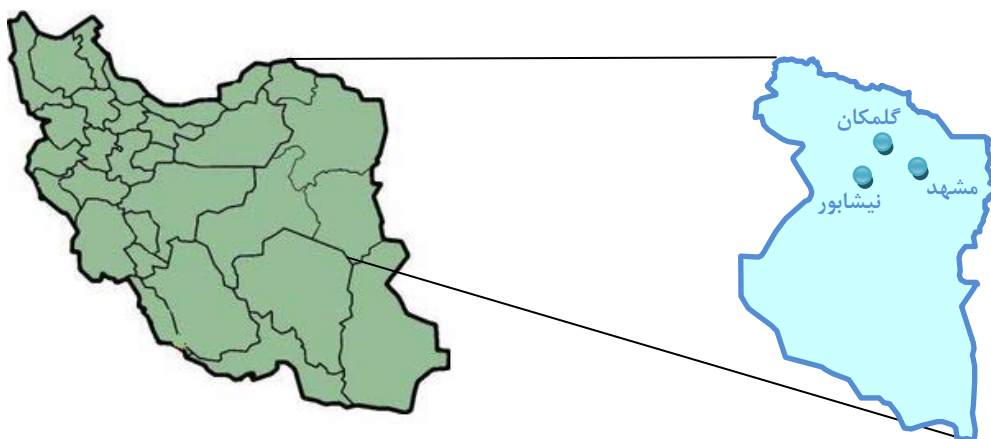
۲- روش تحقیق

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه، بخشی از مراتع قسمت شمالی استان خراسان است. استان خراسان در شمال شرقی کشور بین ۵۵ درجه و ۱۷ دقیقه تا ۶۱ درجه و ۱۵ دقیقه طول شرقی و ۳۰ درجه و ۲۴ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۱۷ دقیقه عرض شمالی قرار دارد. شکل ۱، موقعیت منطقه مورد مطالعه را در بخش شمال شرقی کشور نشان می‌دهد.

رطوبت خاک، یکی از پارامترهای بنیادی محیط زیست با طبیعت دینامیک و یکی از اجزاء بسیار مهم مدل‌های اقلیمی، اکولوژیکی و هیدرولوژیکی است (بدایع جمالی و همکاران، ۱۳۷۷؛ بای‌بوردی، ۱۳۸۰؛ بهبهانی، ۱۳۸۰؛ Metternicht & Zinck, 1996; Wigner et al., 1998). روش‌های سنتی در اندازه‌گیری‌های میدانی رطوبت خاک، قادر به ارائه تغییرات مکانی و زمانی رطوبت خاک به نحو مطلوب نمی‌باشند و عملاً در سطح حوضه‌ها امکان‌پذیر نیستند. داده‌های سنجنده‌های ماهواره‌ای به صورت پیوسته و در محدوده وسیعی وجود دارند و اطلاعات وسیعی از پدیده‌های محیطی در کل فضا، در مقایسه با موقعیت‌های نقطه‌ای مثل ایستگاه‌های هواشناسی ارائه می‌دهند (Kogan, 2000; Legates, 2000). این قابلیت، تصاویر ماهواره‌ای را برای پایش رطوبت کارا می‌سازد. شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال شده^۲ (NDVI) (از اوایل دهه ۱۹۸۰) به صورت گسترده برای پایش و ارزیابی پوشش گیاهی استفاده شده است. به دلیل ارتباط نزدیک بین وضعیت پوشش گیاهی و رطوبت در دسترس خاک، این شاخص بیشتر برای بررسی رطوبت خاک مورد استفاده قرار گرفته است (Townshend, 1987; Tucker, 1996; Wang, 2005).

Wang (2005) با بررسی ارتباط موجود بین رطوبت مشاهده شده لایه سطحی خاک و NDVI حاصل از تصاویر سنجنده مودیس طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۴، در منطقه‌ای با اقلیم نیمه‌خشک و در فصل رشد، همبستگی خوبی بین این دو پارامتر، در ناحیه توسعه ریشه، به دست آورد.



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

۲-۲- منابع داده‌ها

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (1)$$

این شاخص برای تمامی پیکسل‌های تصویر با استفاده از رابطه بالا، محاسبه شد. برای افزایش دقت برآورد، از مقادیر میانگین ۹ پیکسل تصویر (پنجره ۳×۳) که ایستگاه مورد نظر در مرکز این پنجره قرار دارد) استفاده گردید.

- داده‌های هواشناسی

برای تخمین دقیق‌تر رطوبت لایه سطحی خاک، علاوه بر NDVI، از برخی داده‌های روزانه هواشناسی (تهیه شده از مرکز آمار و اطلاعات سازمان هواشناسی کشور) شامل سرعت باد، دمای هوا، بارندگی و تبخیر نیز استفاده شد.

۲-۳- آماده سازی و پیش پردازش تصاویر

پیش از استفاده از تصاویر ماهواره‌ای باید تصحیحات رادیومتری، هندسی و اتمسفری بر روی آن‌ها انجام شود. تصحیحات رادیومتری بر روی باندهای مرئی، اعداد رقومی پیکسل‌ها را به آلبیدو و باندهای حرارتی را به دما تبدیل می‌کند. در این تحقیق، تصحیحات رادیومتری باندهای ۱ و ۲ سنجنده مودیس (که برای تعیین NDVI استفاده می‌شوند)، براساس معادلات و ضرایب توصیه شده در سایت مودیس انجام شد. تصحیحات هندسی با استفاده از پارامترهای مداری ماهواره و خطوط ساحلی دریای خزر و حذف اثرات اتمسفری بر روی تصاویر با روش پیکسل‌های تیره^۴ و با استفاده از نقشه عمق‌سنجی دریای خزر انجام گرفت.

۳- نتایج

آزمون‌های همبستگی به منظور تعیین ارتباط شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال شده (NDVI) با داده‌های مشاهده شده رطوبت خاک (Observed SM) در شرایط متفاوت (NDVIهای تأخیری ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ روزه نسبت به رطوبت لایه سطحی خاک)، انجام شد. شکل (۲) نمودار رگرسیونی رابطه شاخص NDVI با رطوبت حجمی لایه سطحی خاک^۵ (VSM) را در طول دوره مطالعاتی نشان می‌دهد.

مقادیر واقعی رطوبت لایه سطحی خاک، شاخص NDVI حاصل از تصاویر سنجنده مودیس و پارامترهای هواشناسی، امکان تجزیه و تحلیل داده‌ها را به منظور دستیابی به مدل‌های برآورد رطوبت لایه سطحی خاک (SMC) با کمک رگرسیون‌های ساده و چند متغیره خطی فراهم نمودند. ۷۵ درصد از داده‌ها برای تدوین مدل و ۲۵ درصد از آن‌ها برای ارزیابی مدل‌های به دست آمده، استفاده شد.

- رطوبت خاک

داده‌های رطوبت لایه سطحی خاک (۱۰-۰ سانتی‌متر) سه ایستگاه مشهد، گل‌مکان و نیشابور در سه سال آماری ۲۰۰۳، ۲۰۰۴ و ۲۰۰۵، که تقریباً هر ۵ روز یکبار به روش وزنی-حرارتی اندازه‌گیری شده و در بخش آمار و اطلاعات سازمان هواشناسی استان خراسان موجود بود، به عنوان داده‌های مرجع در این تحقیق استفاده شد. نام و مختصات جغرافیایی ایستگاه‌های منتخب در جدول ۱ آمده است.

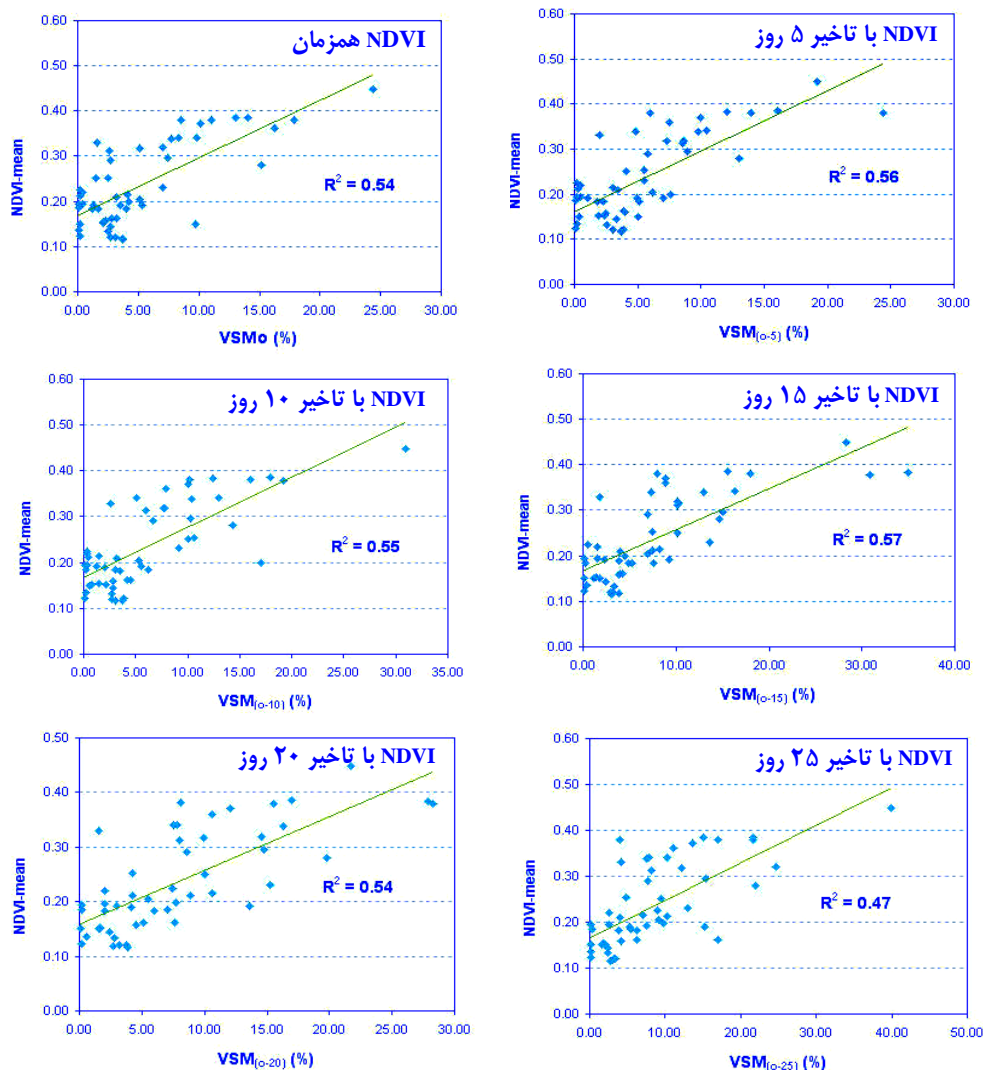
جدول ۱- نام و مختصات جغرافیایی ایستگاه‌های منتخب

ایستگاه	طول جغرافیایی (درجه شرقی)	عرض جغرافیایی (درجه شمالی)	ارتفاع از سطح دریا (متر)
مشهد	۵۹/۶۳	۳۶/۲۵	۹۹۰
گل‌مکان	۵۹/۲۸	۳۶/۵۳	۱۱۷۶
نیشابور	۵۸/۸	۳۶/۲	۱۳۵۰

- شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال شده (NDVI)

سنجنده مودیس، به دلیل سابقه استفاده از آن در مطالعات پیش‌بینی رطوبت خاک، لحاظ نمودن ابعاد اقتصادی، در دسترس بودن تصاویر برای محدوده مطالعاتی و قدرت تفکیک مکانی، رادیومتری و طیفی بالا، برای انجام این تحقیق مناسب تشخیص داده شد. تصاویر سنجنده مودیس ماهواره‌ترا با قدرت تفکیک مکانی ۲۵۰ متر برای روزهایی که رطوبت خاک اندازه‌گیری شده بود، از سازمان فضایی ایران تهیه شد. دوره رویش حداکثر پوشش گیاهی، یعنی دوره ۵ ماهه از فروردین تا مرداد، برای بررسی انتخاب شد. این انتخاب در کاهش حجم عملیات و افزایش دقت، تأثیر بسزایی داشت. پس از حذف تصاویر ابرناک و مشکل دار، نهایتاً ۲۳ تصویر انتخاب شد.

NDVI متداول‌ترین شاخص پوشش گیاهی است که از تقسیم اختلاف مقادیر باندهای قرمز (Red) و مادون قرمز نزدیک (NIR) بر مجموع آن‌ها به دست می‌آید (Rouse et al., 1973):



شکل ۲- رابطه شاخص NDVI با رطوبت مشاهده شده لایه سطحی خاک

اندیس‌ها؛ زمان‌های تأخیر NDVI را نسبت به رطوبت لایه سطحی خاک نشان می‌دهند؛ مانند: $VSM_{(0-5)\%}$ که نشان دهنده درصد رطوبت حجمی خاک، پنج روز قبل از تاریخ تصویر (NDVI) می‌باشد.

به مقایسه داده‌های رطوبت تخمین زده شده توسط مدل‌ها در مقابل خطای برآورد در جدول ۴ مشاهده می‌شود.

برای تخمین دقیق‌تر رطوبت خاک، از برخی داده‌های روزانه هواشناسی شامل سرعت باد (Wind)، دمای هوا (Tem)، بارندگی (Rain)، تبخیر (Ev) و ... که هر یک به نحوی در تغییرات رطوبت لایه سطحی خاک منطقه مؤثر می‌باشند، بهره گرفته شد. خلاصه مشخصات مدل‌های به دست آمده در جدول ۵ ارائه شده است.

نتایج و خصوصیات آماری مدل‌های برازش داده شده (شکل ۲) را می‌توان در جدول ۲ مشاهده نمود. این جدول بیانگر مدل‌هایی است که برای برآورد رطوبت خاک با استفاده از NDVI، تولید شده‌اند.

ضرایب همبستگی و میانگین مربعات خطا^۲ (MSE) در همه مدل‌ها تقریباً یکسان و یا نزدیک به هم بود، لذا اقدام به بررسی خطا در مدل‌ها گردید که نتایج این بررسی را می‌توان در جدول ۳ مشاهده نمود.

در ادامه با استفاده از هر یک از مدل‌های برازش داده شده (جدول ۲)، اقدام به برآورد رطوبت خاک گردید. پارامترهای آماری مربوط

جدول ۲- مدل‌های برآورد رطوبت لایه سطحی خاک با استفاده از NDVI

خلاصه مدل‌ها

مدل	معادله	R	R ²	R ² -adj	RMSE
۱	SM ₀ = -4.896 + 42.735 NDVI	-/۷۳	-/۵۴	-/۵۳	۳/۶۰
۲	SM ₍₀₋₅₎ = -4.292 + 41.675 NDVI	-/۷۵	-/۵۶	-/۵۵	۴/۱۲
۳	SM ₍₀₋₁₀₎ = -5.704 + 50.588 NDVI	-/۷۴	-/۵۵	-/۵۴	۴/۲
۴	SM ₍₀₋₁₅₎ = -7.236 + 62.843 NDVI	-/۷۶	-/۵۷	-/۵۶	۴/۵
۵	SM ₍₀₋₂₀₎ = -5.219 + 55.164 NDVI	-/۷۳	-/۵۴	-/۵۳	۴/۶۶
۶	SM ₍₀₋₂₅₎ = -5.236 + 58.074 NDVI	-/۶۸	-/۴۷	-/۴۶	۵/۶۴

جدول ۳- خلاصه نتایج آماری خطای برآورد مدل‌های برآورد رطوبت خاک

مدل	آماره‌های خطای مطلق				
	حداکثر	حداقل	انحراف معیار	میانگین	دامنه تغییرات
۱	۸/۵۴	-/۴۲	۲/۳	۲/۵۵	۸/۱۲
۲	۱۳/۱۶	-/۳۸	۳/۷۵	۳/۵۶	۱۲/۷۸
۳	۸/۹۸	-/۳۴	۳/۰۶	۳/۴۵	۸/۶۴
۴	۸/۳۸	-/۲	۲/۳۱	۲/۶۱	۸/۱۸
۵	۱۳/۸۲	-/۳۸	۳/۹۱	۳/۷۴	۱۳/۴۴
۶	۱۳/۶۲	-/۰۲	۴/۴۷	۳/۸۴	۱۳/۶

جدول ۴- مقایسه داده‌های رطوبت تخمین زده شده توسط مدل‌ها با خطای برآورد

مدل	R	R ²	R ² -adj	RMSE
۱	-/۶۰	-/۳۶	-/۳۲	۳/۱۳
۲	-/۳۳	-/۱۱	-/۰۵	۳/۶۹
۳	-/۳۴	-/۱۲	-/۰۶	۴/۴۱
۴	-/۱۷	-/۰۳	-/۰۱	۵/۷۸
۵	-/۲۰	-/۰۴	-/۰۲	۵/۲۶
۶	-/۲۲	-/۰۵	-/۰۳	۵/۵۸

جدول ۵- ضرایب همبستگی حاصل از رابطه NDVI، پارامترهای هواشناسی و SM بدون تأخیر

مدل	معادله	R ² -adj	RMSE
۱	SM ₀ = -2.76 + 42.639 NDVI - 0.875 Wind	-/۶۰	۳/۳۳
۲	SM ₀ = 6.715 + 30.799 NDVI - 1.025 Wind - 0.128 Ev ₅	-/۶۶	۳/۰۹
۳	SM ₀ = 7.713 + 27.917 NDVI - Wind - 0.07 Ev ₁₀	-/۶۶	۳/۰۷
۴	SM ₀ = 3.279 + 30.905 NDVI - 0.056 Ev ₁₀	-/۵۷	۳/۴۷

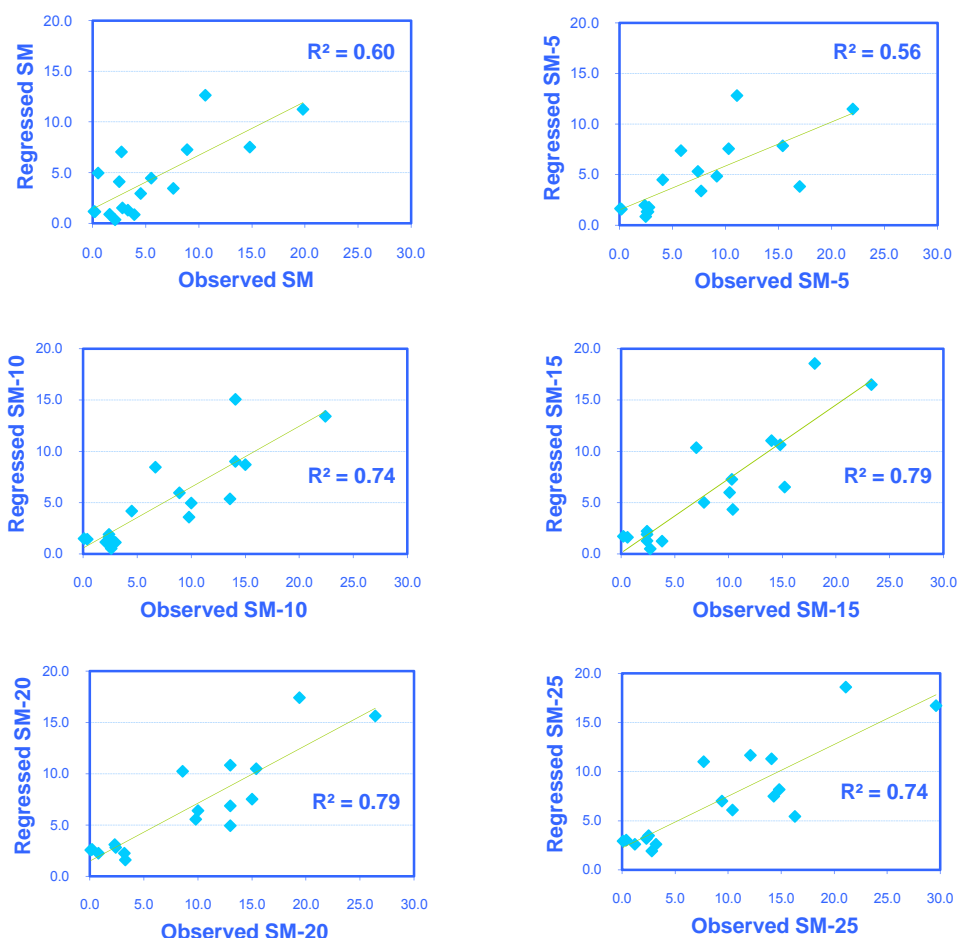
۴- نتایج و بحث

تحقیق حاضر تلاشی بود برای امکان‌سنجی تعیین رطوبت لایه سطحی خاک با استفاده از NDVI و پارامترهای روزانه هواشناسی در محدوده‌ای خشک و نیمه خشک طی سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵.

بررسی مدل‌های ارائه شده در جدول ۲ بیانگر وجود همبستگی مثبت بین رطوبت حجمی لایه سطحی خاک و متوسط شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال شده (NDVI-mean) در طول دوره مطالعاتی می‌باشد. مقایسه ضرایب همبستگی مدل‌های ارائه شده نشان می‌دهد که ضرایب همبستگی در این مدل‌ها یکسان یا نزدیک به هم است و میانگین مربعات خطا (MSE) در همه مدل‌ها در مقایسه با مقادیر به دست آمده برای رگرسیون ناچیز است.

طبق نتایج تحلیل رگرسیون ارائه شده در جدول ۲، مقدار ضریب همبستگی (R)، ضریب تبیین (R^2) و ضریب تبیین تصحیح شده^۷ (R^2 -adj) در مدل تأخیری ۱۵ روزه بالاتر از سایر مدل‌ها است. آماره‌های خطای برآورد (جدول (۳)) در این مدل کمتر از سایر مدل‌های ارائه شده (به جز مدل ۱) می‌باشد.

مقادیر ضریب همبستگی و ضریب تبیین در رابطه رطوبت برآورد شده لایه سطحی خاک (Regressed SM) با مقدار خطای برآورد (Estimated error) (جدول (۴)) در مدل ۴ به ترتیب معادل ۰/۱۷ و ۰/۰۳ بدست آمده است؛ که نشان می‌دهد مقادیر خطای موجود در رطوبت برآورد شده از مدل ۴، از روند معینی تبعیت نمی‌کند و توزیع خطا در آن تصادفی است. در بررسی روابط همبستگی بین رطوبت خاک برآورد و اندازه‌گیری شده (شکل (۳))، مدل تأخیری ۱۵ روزه بالاترین ضریب تبیین (۰/۷۹) را دارد.



شکل ۳- مقایسه نتایج مدل‌های برآورد رطوبت خاک با مقادیر اندازه‌گیری شده

مدل تأخیری ۱۵ روزه (جدول ۲، مدل ۴)، با توجه به تجزیه و تحلیل‌های آماری فوق، به منظور برآورد رطوبت لایه سطحی خاک در این تحقیق مناسب‌تر تشخیص داده شد (رابطه ۲).

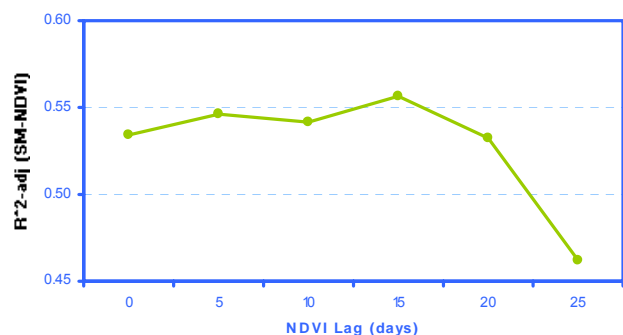
$$SM_{(0-15)} = -7.236 + 62.843NDVI \quad (2)$$

از سایر دلایلی که صحت این انتخاب را تأیید می‌کند، می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود:

مطالعات محققین نشان داده‌اند که به دلیل عکس‌العمل تأخیری گیاه به بارندگی با توجه به ذخیره رطوبتی خاک، NDVI نیز عکس‌العمل تأخیری نسبت به رطوبت خاک دارد. زمان تأخیر NDVI به بارندگی در جنگل‌ها و اراضی کشاورزی دو تا سه ماه به دست آمد. هر چه وابستگی به بارندگی بیشتر باشد، زمان تأخیر کوتاه‌تر خواهد بود (Adegok and Carleton, 2002; Wang, 2000; Farrar et al., 1994).

در تحقیق انجام شده توسط Wang (2005) در منطقه نیمه‌خشک نیومکزیکو در طول فصل رشد (می-اگوست)، در اعماق ۱۰ و ۲۰ سانتی‌متری پروفیل خاک، با افزایش زمان تأخیر (به ترتیب بیش از ۵۰ و ۳۰ روز)، ضریب همبستگی بین NDVI و رطوبت خاک کاهش یافت و در اعماق بیشتر خاک، برعکس این حالت اتفاق افتاد.

در تحقیق حاضر به دلیل مرتعی بودن منطقه و وجود گیاهان افرمال^۸ با دوره رشد کوتاه و همچنین بررسی رطوبت لایه سطحی خاک (۱۰-۰ سانتی متر)، حداکثر همبستگی در زمان تأخیر ۲ هفته مشاهده شد و با افزایش زمان تأخیر (بیش از ۱۵ روز) ضرایب همبستگی همان طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، کاهش یافت.



شکل ۴- ارتباط بین زمان‌های تأخیر NDVI و ضریب تبیین رابطه SM و NDVI

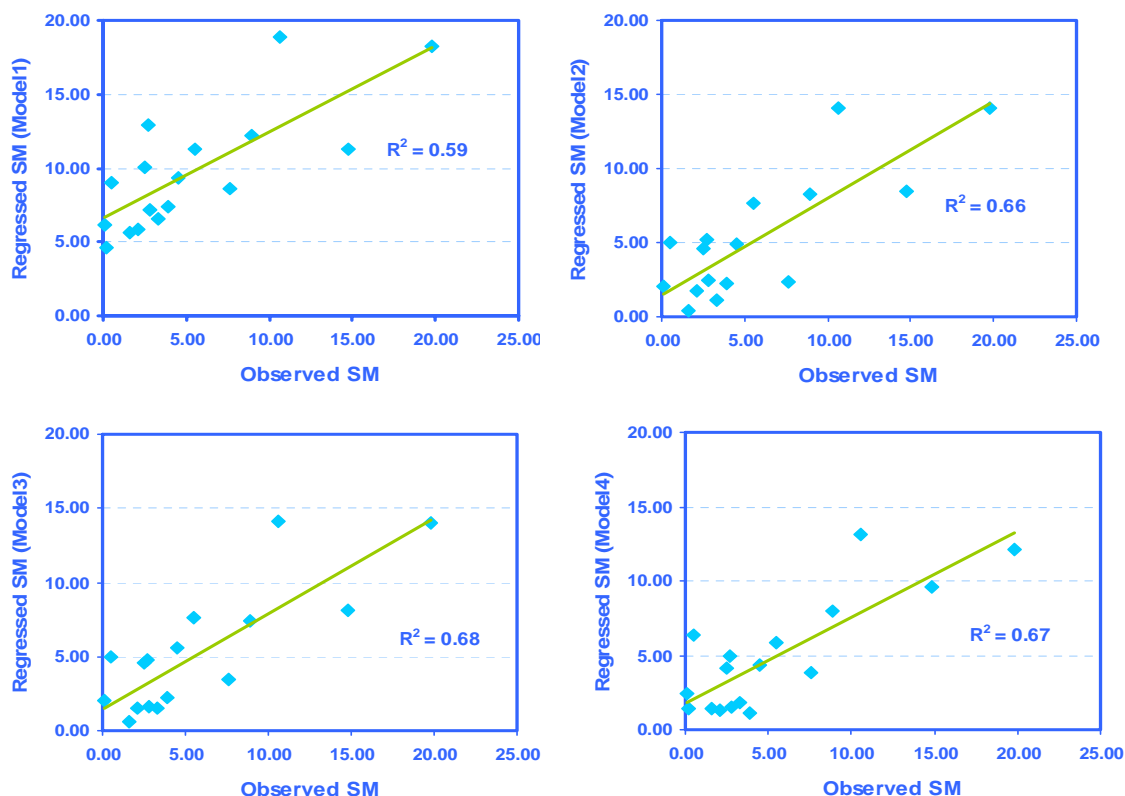
لذا طبق نتایج حاصل از این تحقیق مدل تأخیری ۱۵ روزه به عنوان بهترین مدل (رابطه ۲) برای تخمین رطوبت لایه سطحی خاک توسط NDVI تصاویر سنجنده مودیس انتخاب شد.

با توجه به تأثیر غیر قابل انکار پارامترهای هواشناسی در میزان رطوبت لایه سطحی خاک، با افزودن این پارامترها، مدل‌هایی با دقت بالاتر برای تخمین رطوبت لایه سطحی خاک حاصل شدند. به دلیل عدم اطلاع کافی از زمان تأخیر و چگونگی تأثیر هر یک از عوامل به کار رفته در مدل‌ها (سرعت باد، دمای هوا، بارندگی و ...)، ضرایب رگرسیون نزدیک مدل همزمان و تأخیری ۱۵ روزه (مدل منتخب) و با توجه به کاربردی‌تر بودن مدل همزمان نسبت به مدل‌های تأخیری، ترجیحاً از NDVI همزمان برای به دست آوردن مدل‌های هواشناسی برآورد رطوبت لایه سطحی خاک (با استفاده از رگرسیون‌های چند متغیره خطی) استفاده شد.

همان‌طور که مدل‌های ارائه شده در جدول ۵ نشان می‌دهند، باد و تبخیر تجمعی (۵ و ۱۰ روزه) هر دو دارای همبستگی منفی و معنی‌داری با رطوبت لایه سطحی خاک می‌باشند. در این مدل‌ها وارد کردن عامل باد، به تنهایی، باعث افزایش ضریب تبیین به میزان قابل ملاحظه‌ای شد و با دخالت فاکتورهای باد و تبخیر تجمعی ۵ (EVS) و یا ۱۰ روزه (EV₁₀) مدل‌هایی با بالاترین R²-adj و کمترین میزان RMSE به دست آمد. شکل ۵، مقادیر رطوبت خاک به دست آمده از مدل‌های هواشناسی را با رطوبت خاک مشاهده شده مورد مقایسه قرار داده است.

لازم به ذکر است که آزمون t، فرض صفر (اختلاف معنی‌داری بین رطوبت خاک مشاهداتی و به دست آمده از تصاویر وجود ندارد) را برای کلیه مدل‌ها در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ تأیید کرد. تمامی مدل‌ها از لحاظ عامل تورم واریانس^۹ (VIF) نیز بررسی شد و هیچ‌گونه همراستایی بین متغیرهای مستقل به کار رفته در مدل‌ها دیده نشد.

با توجه به نتایج به دست آمده از این تحقیق، استفاده از تصاویر سنجنده مودیس برای آگاهی یافتن از رطوبت لایه سطحی خاک در مواقعی که نیاز به اطلاعات دقیق از رطوبت خاک نبوده و یا تغییرات رطوبت در سطوح کوچک مورد توجه نباشد، مناسب به نظر می‌رسد.



شکل ۵- مقایسه نتایج مدل‌های هواشناسی برآورد رطوبت خاک با مقادیر اندازه‌گیری شده

۵- نتیجه‌گیری

رطوبت خاک توسط سایر سنجنده‌ها و شاخص‌ها را مورد ارزیابی قرار داد.

مهمترین یافته‌های این تحقیق را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

پی‌نوشت‌ها

در محدوده زمانی و مکانی تحقیق:

- 1- Sensor
- 2- Normalized Difference Vegetation Index
- 3- Moderate Resolution Imaging Spectrometer
- 4- Dark Pixel
- 5- Volumetric Soil Moisture
- 6- Mean Squares Error
- 7- Adjusted Coefficient of Determination
- 8- Ephemeral
- 9- Variance Inflation Factor

- رابطه‌ای مثبت و معنی‌دار بین رطوبت خاک و شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال شده (NDVI) حاصل از تصاویر مودیس وجود دارد.

- همبستگی بالایی بین رطوبت لایه سطحی خاک و NDVI تأخیری ۱۵ روزه (در فصل رشد) مشاهده شد.

- از میان پارامترهای هواشناسی، عامل باد و تبخیر تجمعی توانست مدل‌های بهتری برای تخمین رطوبت لایه سطحی خاک ارائه دهد.

- با استفاده از داده‌های برآورد شده رطوبت خاک حاصل از تصاویر سنجنده مودیس می‌توان توزیع مکانی و زمانی رطوبت خاک را مشخص نمود.

۶- مراجع

بای بوردی، م. (۱۳۸۰)، اصول مهندسی آبیاری، روابط آب و خاک، جلد اول، انتشارات دانشگاه تهران. ۷۰۹ ص.

بدایق جمالی، ج.، احمدیان، ج.، جوانمرد، س.، گلمکانی، ت. و ملکی‌زاده، ص. (۱۳۷۷)، ضرورت پایش وضعیت رطوبت خاک

با توجه به نتایج کسب شده در این مطالعه و احساس نیاز به تحقیق بیشتر در این زمینه، برای ادامه تحقیق می‌توان امکان تخمین

- Sandholt, I., Rasmussen, K. and Andersen, J. (2002), A simple interpretation of the surface temperature /vegetation index space for assessment of surface moisture. *Remote Sensing of Environment*, 79: pp. 213-224.
- Simpson, J. and Still, J. (1998), A procedure for the detection and removal of cloud shadow from AVHRR data over land, *IEEE transaction on geoscience and remote sensing* 36(3), pp. 880-897.
- Townshend, J.R.G. (1994), Global data sets for land application from the Advanced Very High Resolution Radiometer. *International Journal of Remote Sensing*, 15(17): pp. 3319-3332.
- Tucker, C.J. (1996), History of the use of AVHRR data for land applications. In: G. D'Souza, A. S. Selward and J-P. Malingreau, Editors, *Advances in use of NOAA AVHRR data for land applications*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht: pp. 1-19.
- Wang, J. (2000), Relations between productivity, climate, and Normalized Difference Vegetation Index in the central Great Plains. Lawrence: University of Kansas (PhD dissertation).
- 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, pp. 3827- 3844.
- Wang, X. (2005), Relation between ground- based soil moisture and satellite image – based NDVI.
- Wigneron, J.P., Schmugge, T., Chanzy, A., Calvet, J.C. and Kerr, Y. (1998), Use of passive microwave remote sensing to monitor soil moisture a review. *Agronomie: Agriculture and Environment* 18: pp. 27-43.
- Wilson, D., Western, A.W. et al. (2003), Spatial distribution of soil moisture over 6 and 30cm depth, Machurangi river catchment, New Zealand. *Journal of Hydrology*, 276: pp. 254-274.
- در افزایش بهره‌وری آب کشاورزی"، یازدهمین همایش کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران: صص. ۳۷۶-۳۹۰.
- بهبهانی، س. م. (۱۳۸۰)، هیدرولوژی آبهای سطحی، انتشارات دانشگاه تهران: ۴۸۵ص.
- Adegok, J. O. and Carleton, A. M. (2002), Relations between Soil Moisture and Satellite Vegetation Indices in the U.S. Corn Belt. *American Meteorological Society*, vol.3: pp. 395-405.
- Farrar, T. J., Nicholson, S. E. and Lare, A. R. (1994), The influence of soil type on the relationships between NDVI, rainfall, and soil moisture in semiarid Botswana. II. NDVI response to soil moisture. *Remote Sensing of Environment*, 50: pp. 121-133.
- Kogan, F. N. (2000), Contribution of remote sensing to drought early warning In D.A. Wilhite, & D.A. Wood(Eds), *Early warning systems for drought preparedness and drought management* (PP. 75-87). Geneva: World Meteorological Organization.
- Legates, D. R. (2000), remote sensing hydro climatology: An introduction. *The professional Geographer*, 52, pp. 233-234.
- Metternicht, G. I. and Zinck, J. A. (1996), Modeling salining-alkalinity classes for mapping salt-affected topsoils in the semi-arid valleys of Cochabama (Bolivia). *ITC Journal* 2, pp. 125-135.
- Nicholson, S. E. and Farrar, T. J. (1994), The influence of soil type on the relationships between NDVI, rainfall, and soil moisture in semiarid. Botswana: I. NDVI response to rainfall. *Remote Sensing of Environment*, 50, pp. 107- 120.
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A. and Deering, D. W. (1973), 'Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS', Third ERTS Symposium, NASA SP-351 I, pp. 309-317.