



Print ISSN: 2251-7480
Online ISSN: 2251-7400

Journal of
Water and Soil
Resources Conservation
(WSRCJ)

Web site:

<https://wsrcj.srbiau.ac.ir>

Email:

iawwsrj@srbiau.ac.ir
iawwsrj@gmail.com

**Vol. 14
No. 2 (54)**

Received:
2024-03-07

Accepted:
2024-08-16

Pages: 39-48

Evaluation of GLDAS Model Soil Moisture Using Observational Data, VHI Index and Precipitation

Sahar Rezaei Kojani¹, Seyd Abaa Hisseini^{2*} and Ahmad Sharafati³

1) PhD student, Department of Water Engineering, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran.

2) Associate Professor, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

3) Associate Professor, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

* Corresponding author email: abbas_hoseyni@srbiau.ac.ir

Abstract:

Background and Aim: Soil moisture data obtained from satellites play an important role in the effective management of water resources, especially in areas susceptible to dehydration and drought. By monitoring soil moisture dynamics over time, water policymakers can develop sustainable water allocation strategies, implement water conservation measures, and reduce the adverse effects of drought on agriculture. Satellite data facilitates the identification of potential water stress points. The purpose of this study is to evaluate the accuracy of soil moisture in the GLDAS model with observational data in areas with dry, humid, and semi-humid climates, Agricultural drought monitoring using the GLDAS model and the VHI drought index and annual precipitation.

Method: In this study, soil moisture from the GLDAS model from 2003 to 2020 in 6 agricultural areas of Oklahoma was extracted daily and with observational data recorded in 6 agricultural areas located in Oklahoma compared. To better understand the degree of difference between the GLDAS model soil moisture data with observational data, agricultural areas are divided into three dry, humid, and semi-humid areas, they were split and finally evaluated on a daily, seasonal, and annual basis with the used of two indicators of correlation coefficient CC and average RMSE root mean squares error.

Results: The results showed that the highest average correlation of seasonal soil moisture is related to winter and autumn, and one of the reasons is more precipitation in these seasons. The highest correlation of average areas with 0/64 belonged to humid areas and the lowest average correlation of 0.47 was related to dry areas. Humid areas usually have vegetation cover more than dry areas. Vegetation cover due to the impact on microwave signals received by satellite sensors affects the accuracy of satellite soil moisture estimates. Also, the presence of dense vegetation improves the soil moisture recovery of satellite data, especially in areas with abundant vegetation. The results of RMSE (cm³/cm³) of the GLDAS model and observation data in 6 agricultural areas of Oklahoma showed the good performance of the GLDAS model. The correlation of GLDAS model data with VHI drought index and precipitation was further investigated, which correlated GLDAS model soil moisture with 17-year precipitation data equal to 0.68 the correlation of the model GLDAS and VHI was equal to 0.2. One of the reasons for the variation in the correlation between precipitation, VHI, and soil moisture of the GLDAS model is the changes in hydrological parameters such as groundwater feeding, evaporation and transpiration rates, and surface runoff, it is in different years.

Conclusion: According to the results, soil moisture serves as a critical intermediary between precipitation and vegetation health. While precipitation directly influences soil moisture dynamics, soil moisture, in turn, regulates plant water uptake, transpiration, and physiological processes that contribute to VHI. GLDAS model soil moisture data can be used to monitor and assess drought. GLDAS data are available at regular intervals (e.g., daily, monthly), allowing monitoring of soil moisture dynamics over time. This time resolution is crucial for tracking the start, duration, and severity of drought events. The results of this study show that GLDAS model soil moisture data can be used with confidence in monitoring agricultural drought.

Keywords: Drought, Soil Moisture, Precipitation, GLDAS, Remote Sensing, VHI



شاپا چاپی: ۷۴۸۰-۲۲۵۱
شاپا الکترونیکی: ۷۴۰۰-۲۲۵۰

نشریه حفاظت منابع آب و خاک

آدرس تارنما:

<https://wsrj.srbiau.ac.ir>

پست الکترونیک:

iauwsrj@srbiau.ac.ir
iauwsrj@gmail.com

سال چهاردهم

شماره ۲ (۵۴)

تاریخ دریافت:

۱۴۰۲/۱۲/۱۷

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۳/۰۵/۲۶

صفحات: ۴۸-۳۹

ارزیابی رطوبت خاک مدل GLDAS با استفاده از داده‌های مشاهداتی، شاخص VHI و بارش

سحر رضائی کوچانی^۱، سید عباس حسینی^{۲*} و احمد شرافتی^۳

(۱) دانشجوی دکتری، گروه مدیریت ساخت و آب، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

(۲) دانشیار، دانشکده عمران، هنر و معماری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

(۳) دانشیار، دانشکده عمران، هنر و معماری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

* ایمیل نویسنده مسئول: abbas_hoseyni@srbiau.ac.ir

چکیده:

زمینه و هدف: داده‌های رطوبت خاک به دست آمده از ماهواره‌ها نقش مهمی در مدیریت موثر منابع آب، به ویژه در مناطق مستعد کم آبی و خشکسالی ایفا می‌کند. با نظارت بر پویایی رطوبت خاک در طول زمان، سیاست‌گذاران آب می‌توانند استراتژی‌های تخصیص پایدار آب را توسعه دهند، اقدامات حفاظت از آب را اجرا کنند و اثرات نامطلوب خشکسالی بر کشاورزی را کاهش دهند. داده‌های ماهواره‌ای شناسایی نقاط بالقوه تنش آبی را تسهیل می‌کند. داده‌های ماهواره‌ای شناسایی نقاط تنش آبی بالقوه را تسهیل می‌کند هدف از این پژوهش ارزیابی دقت رطوبت خاک مدل GLDAS با داده‌های مشاهداتی در مناطق با آب و هوای مرطوب، نیمه مرطوب، خشک و پایش خشکسالی کشاورزی با استفاده از مدل GLDAS، شاخص خشکسالی VHI و بارش سالیانه است.

روش پژوهش: در این پژوهش رطوبت خاک مدل GLDAS از سال ۲۰۰۳ تا سال ۲۰۲۰ در ۶ منطقه کشاورزی اکلاهما به صورت روزانه استخراج و با داده‌های مشاهداتی ثبت شده در ۶ منطقه کشاورزی واقع در اکلاهما مقایسه شد. برای درک بهتر از میزان اختلاف میان داده‌های رطوبت خاک مدل GLDAS با داده‌های مشاهداتی، مناطق کشاورزی به سه منطقه مرطوب، نیمه مرطوب، خشک تقسیم شدند و نهایتاً به کمک دو شاخص ضریب همبستگی CC و خطای جذر میانگین مربعات RMSE، به صورت روزانه، فصلی و سالانه مورد ارزیابی قرار گرفتند.

یافته‌ها: نتایج نشان داد بیشترین متوسط همبستگی رطوبت خاک فصلی مربوط به فصل زمستان و پاییز است و یکی از دلایل آن بارندگی بیشتر در این فصول است. بیشترین همبستگی متوسط مناطق با ۰/۶۴ متعلق به مناطق مرطوب و کمترین متوسط همبستگی ۰/۴۷ مربوط به مناطق خشک بود. مناطق مرطوب معمولاً پوشش گیاهی بیشتری نسبت به مناطق خشک دارند. پوشش گیاهی به دلیل تأثیر بر سیگنال‌های مایکروویو دریافتی توسط سنسورهای ماهواره‌ای بر دقت تخمین‌های رطوبت خاک ماهواره تأثیر می‌گذارد. همچنین وجود پوشش گیاهی متراکم، بازیابی رطوبت خاک داده‌های ماهواره‌ای را بهبود می‌بخشد، به ویژه مناطقی که پوشش گیاهی فراوان دارند. نتایج بررسی RMSE (cm³/cm³) مدل GLDAS و داده‌های مشاهداتی در ۶ منطقه کشاورزی اکلاهما نشان دهنده عملکرد خوب مدل GLDAS بود. در ادامه همبستگی داده‌های مدل GLDAS با شاخص خشکسالی VHI و بارش مورد بررسی قرار گرفت که همبستگی رطوبت خاک مدل GLDAS با داده‌های بارش ۱۷ ساله برابر با ۰/۶۸ و همبستگی مدل GLDAS و VHI برابر با ۰/۲ بود. یکی از دلایل تغییرات همبستگی بین بارش، VHI و رطوبت خاک مدل GLDAS، تغییرات پارامترهای هیدرولوژیکی مانند تغذیه آب زیرزمینی، نرخ تبخیر و تعرق، و رواناب سطحی، در سال‌های مختلف است.

نتایج: با توجه به نتایج به دست آمده رطوبت خاک به عنوان یک واسطه حیاتی بین بارش و VHI عمل می‌کند. در حالی که بارش به طور مستقیم بر دینامیک‌های رطوبت خاک تأثیر می‌گذارد، رطوبت خاک، به نوبه خود، جذب آب گیاه، تعرق و فرآیندهای فیزیولوژیکی را کنترل می‌کند که به VHI منجر می‌شود. داده‌های رطوبت خاک مدل GLDAS را می‌توان برای پایش و ارزیابی خشکسالی استفاده کرد. داده‌های GLDAS در فواصل زمانی منظم (به عنوان مثال، روزانه، ماهانه) در دسترس هستند، که امکان نظارت بر پویایی رطوبت خاک را در طول زمان فراهم می‌کند. این وضوح زمانی برای ردیابی شروع، مدت و شدت رویدادهای خشکسالی بسیار مهم است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که می‌توان از داده‌های رطوبت خاک مدل GLDAS با اطمینان خاطر در پایش خشکسالی کشاورزی استفاده کرد.

کلید واژه: خشکسالی، رطوبت خاک، GLDAS، سنجش از دور، شاخص سلامت گیاه

مقدمه

رطوبت خاک یکی از پارامترهای مهم محیطی بوده که در بررسی خشکسالی کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش‌های سنتی اندازه‌گیری میدانی رطوبت خاک نمی‌توانند تغییرات مکانی رطوبت را به نحو مطلوب نشان دهند. بنابراین بکارگیری فن‌آوری سنسجش از دور می‌تواند نقش مؤثری در تعیین رطوبت سطحی خاک و تغییرات مکانی آن ایفا کند. تغییرات رطوبت خاک در اعماق مختلف به عوامل گوناگونی چون نوع خاک، کاربری اراضی، شرایط اقلیمی و تغییرات درجه حرارت در سطح خاک بستگی دارد. برای برآورد تغییرات روزانه، ماهانه و فصلی نیز، پژوهشگران مدل‌های گوناگونی پیشنهاد کرده اند که با تلفیق اطلاعات برآورد شده و استفاده از این مدل‌ها می‌توان به تغییرات مکانی و زمانی دست یافت (Bagheri & Bagheri, 2019). داده‌های ماهواره‌ای به دلیل داشتن دقت مکانی بالا، امکان نمایش دقیق‌تر و جزئی‌تر اطلاعات را فراهم می‌کنند که در مقایسه با داده‌های مشاهداتی، این ویژگی به عنوان یکی از مزایای اصلی مطرح می‌شود. داده‌های ماهواره‌ای پوشش گسترده‌ای از سطح زمین را فراهم می‌کنند که این امر در برخی از تحقیقات محیطی که نیاز به پوشش گسترده جغرافیایی دارند، بسیار حیاتی است. توانایی بهبود داده‌های ماهواره‌ای در طول زمان، امکان ایجاد سری زمانی طولانی و پایدار را فراهم می‌کنند که در مطالعه تغییرات آب و هوا و محیط زیست بسیار ارزشمند است. داده‌های ماهواره‌ای به راحتی قابل دسترسی هستند و امکان استفاده از آنها برای تحقیقات علمی و تصمیم‌گیری‌های مدیریتی را سهل می‌کنند. سازمان ناسا ماهواره ایی با عنوان رطوبت خاک غیر فعال^۱ SMAP با مأموریت تخمین رطوبت خاک است را به فضا پرتاب کرد که تکفیک مکانی آن ۱۰ کیلومتر است. یکی از مأموریت‌های SMAP اندازه‌گیری رطوبت خاک سطح زمین و ذوب یخ‌های کل کره زمین با دوره بازگشت تقریباً ۲ تا ۳ روز است و همچنین رطوبت سطحی خاک را بر اساس مدل‌های هیدرولوژیکی که قادر به برآورد رطوبت خاک در منطقه ریشه هستند، اندازه‌گیری می‌کند. ابزارهای دیده بانی SMAP شامل فضاپیما و تجهیزاتی است که توسط راکت دلتا ۲ در مدار قطبی خورشید قرار داده شده است. سامانه اندازه‌گیری SMAP شامل رادیومتر (غیرفعال) و رادار دهانه ترکیبی (فعال) است که در بازه باند L (۱/۲ تا ۱/۴۱ گیگاهرتز) فعالیت می‌کنند (Entekhabi et al., 2010). یکی دیگر از ابزارهای سنسجش از دور برای سنسجش رطوبت خاک مدل سیستم جهانی همسان‌سازی داده‌های زمین^۲ GLDAS است. مدل GLDAS داده‌های مورد نیاز برای پایش خشکسالی از سال ۲۰۰۰ تا کنون به صورت روزانه و سه ساعته در دسترس دارد. پوشش جهانی، قدرت تفکیک مکانی و زمانی بالا به همراه سیستم

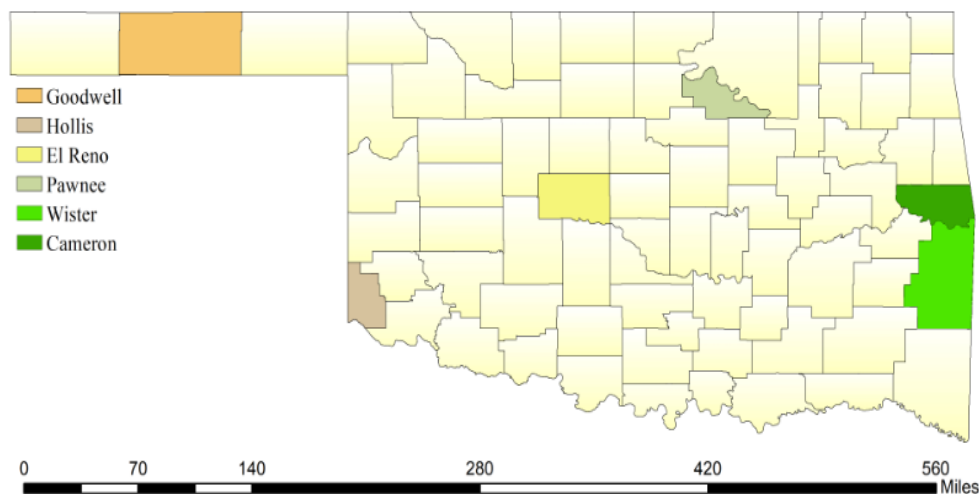
مدلسازی ترکیبی داده‌های سنسجش از دور و مشاهدات زمینی از ویژگی‌های منحصر بفرد این مدل است. این مدل متغیرهای سیستم جو - زمین را در مقیاس زمانی ۳ ساعته با قدرت تفکیک مکانی ۱ و ۰/۲۵ درجه جغرافیایی با قدرت تفکیک مکانی ۲۷ کیلومتر برآورد می‌کند، که خروجی آن نتیجه شبیه سازی چهار مدل سطحی نوآ^۳، موزاییک^۴، مدل زمین انجمن^۵ CLM و مدل ظرفیت نفوذ متغیر^۶ VIC می‌باشد (Rodell et al., 2004). تا کنون تحقیقات گسترده‌ای در خصوص استفاده از داده‌های ماهواره ای SMAP و مقایسه با داده‌های GLDAS در مطالعات هیدرولوژیکی و پایش خشکسالی در مناطق مختلف دنیا انجام شده است. در بررسی رطوبت خاک با استفاده از SMAP و پایش خشکسالی کشاورزی، رطوبت خاک، SMAP در اکثر موارد دارای دقت قابل قبول و عملکرد نسبتاً خوبی بود (Zhu et al., 2019). در مقایسه داده‌های SMAP و GLDAS برآورد بیش از حد رطوبت خاک محصولات SMAP و GLDAS نسبت به داده‌های درجا مشاهده شد، اگرچه دقت هر دو محصول GLDAS و SMAP مشابه هستند لیکن GLDAS اندکی دقت بهتر نشان داد (Das et al., 2019). استفاده از محصولات SMAP برای پایش بینی رطوبت سطحی خاک توسط مدل ELM^۷ و شاخص خشکسالی کشاورزی نشان داد که مدل ELM در پایش بینی رطوبت خاک عملکرد بهتری نسبت به سایر مدل‌ها دارد و پایش‌بینی سری‌های زمانی رطوبت خاک توسط پوشش گیاهی و بارش و دما با در نظر گرفتن سایر پارامترهای موثر مانند شرایط بافت خاک، روزهای آفتابی، باد و تبخیر و تعرق ممکن است در الگوی پایش بینی رطوبت خاک موثر باشند (Karamvand et al., 2023). تحقیقات گذشته در زمینه ارزیابی رطوبت خاک با استفاده از مدل GLDAS بیشتر بر روی اعتبارسنجی خروجی‌های مدل با داده‌های مشاهداتی زمینی و داده‌های سنسجش از دور تمرکز داشته‌اند. این مطالعه اهمیت رطوبت خاک را در تولیدات کشاورزی، پایش خشکسالی و مدل‌سازی اقلیم به خوبی نشان داده است. در حالی که داده‌های GLDAS اطلاعات گسترده‌ای در مورد رطوبت خاک ارائه می‌دهند، بسیاری از مطالعات ادغام دیگر شاخص‌های مهم مانند شاخص سلامت گیاهان^۸ VHI و داده‌های بارش را به طور جامع بررسی نکرده‌اند. بیشتر مطالعات یا بر سنسجش از دور یا داده‌های زمینی تمرکز داشته‌اند، اما به ترکیب آن‌ها نپرداخته‌اند. بسیاری از مطالعاتی که داده‌های GLDAS را با داده‌های مشاهداتی اعتبارسنجی می‌کنند، بر روی مناطق یا دوره‌های خاصی تمرکز دارند که این امر منجر به عدم تعمیم‌پذیری در مناطق مختلف اقلیمی یا دوره‌های زمانی متفاوت می‌شود و نیاز به تحقیقاتی است که عملکرد GLDAS را در شرایط اقلیمی مختلف و در دوره‌های زمانی طولانی‌تر

تحلیل فصلی ما را قادر می‌سازد تا پایداری و ثبات همبستگی‌ها را در طول زمان ارزیابی کنیم و بینش‌های ارزشمندی را در مورد پویایی رطوبت خاک و روابط آب و هوایی طولانی مدت ارائه دهیم. با اعتبارسنجی داده‌های GLDAS با استفاده از هر دو داده‌های زمینی VHI، در این تحقیق یک چارچوب اعتبارسنجی جدید ارائه می‌دهد که می‌تواند در سایر مدل‌های سطح زمین استفاده شود. این رویکرد می‌تواند به عنوان پیش‌زمینه‌ای برای مطالعات آینده که هدف بهبود سنجش از دور و ارزیابی رطوبت خاک مبتنی بر مدل‌ها را دارند، قرار گیرد.

منطقه مورد مطالعه

اکلاهما^{۱۲} ایالتی است که در جنوب مرکزی قرار دارد و دارای رشته کوه‌های کوچک، دشت‌ها و جنگل‌های شرقی است و در یک منطقه نیمه گرمسیر مرطوب است. اوکلاهما نهفته در یک منطقه ای بین آب و هوای قاره ای مرطوب به شمال، آب و هوای نیمه خشک به غرب و آب و هوای نیمه گرمسیر مرطوب در بخش‌های مرکزی، جنوبی و شرقی قرار گرفته است. منطقه اکلاهما به علت در بر داشتن آب و هوای مرطوب، نیمه مرطوب، خشک و همچنین وجود داده‌های مشاهداتی با سری زمانی طولانی در این پژوهش انتخاب شده است. موقعیت جغرافیایی آن از ۹۴ درجه و ۲۹ دقیقه تا ۱۰۳ درجه غربی، ۳۳ درجه و ۳۵ دقیقه تا ۳۷ درجه شمالی است. (شکل ۱). منطقه مورد مطالعاتی در این پژوهش به علت دارا بودن تنوع آب و هوایی و همچنین وجود داده‌های مشاهداتی WVC در عمق ۵ سانتیمتر از سال ۱۹۹۶ تا کنون به صورت روزانه انتخاب شده است. رطوبت خاک ۶ منطقه کشاورزی اکلاهما، ارائه شده در جدول ۱، بین سالهای ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۰ که در نزدیکی شهرهای ویستر، ال رنو، پانی، گودول، هالیس، کمرون به صورت روزانه برداشت شده است.

ارزیابی کند. در بسیاری از مطالعات، استفاده از داده‌های رطوبت خاک با وضوح بالا، به خصوص در مناطقی که این داده‌ها کمیاب است، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. این امر درک عملکرد GLDAS در آن مناطق را محدود می‌کند. تعداد کمی از مطالعات به طور جامع به عدم قطعیت در تخمین‌های رطوبت خاک GLDAS پرداخته‌اند، به ویژه زمانی که این عدم قطعیت‌ها با شاخص‌هایی مانند VHI یا داده‌های بارش ترکیب می‌شوند. هدف از این پژوهش مقایسه دقت اندازه‌گیری مدل GLDAS با داده‌های مشاهداتی و پایش خشکسالی، بررسی همبستگی رطوبت خاک مدل GLDAS منطقه اکلاهما با شاخص خشکسالی، شاخص سلامت گیاه VHI و بارش سالیانه است. در نهایت رطوبت خاک مدل GLDAS با داده‌های مشاهداتی رطوبت خاک، محتوای آب حجمی^۱ WVC که توسط ایستگاه‌های مختلف توسط سنسورهای موجود در خاک در مناطق مختلف شهر اکلاهما به صورت روزانه برای ۱۷ سال اندازه‌گیری شده مقایسه شد و خطای جذر میانگین مربعات^{۱۰} RMSE و ضریب همبستگی^{۱۱} CC بین داده‌های مشاهداتی و رطوبت خاک مدل GLDAS محاسبه شد. می‌توان با تجزیه و تحلیل چند بعدی رطوبت خاک با استفاده از منابع و ابعاد مختلف، از جمله رطوبت خاک مدل GLDAS، داده‌های مشاهده‌ای، بارش و VHI، با در نظر گرفتن عوامل مختلف به طور همزمان، درک جامع تری از دینامیک رطوبت خاک و ارتباط آن با سایر متغیرهای محیطی ارائه داد. همچنین با بررسی همبستگی‌ها در فصول و مناطق مختلف می‌توان تنوع مکانی و زمانی رطوبت خاک را بررسی کرد و به بینش هدفمندتری در مورد نحوه تعامل آن با شرایط مختلف آب و هوایی و جغرافیایی دست یافت. با مطالعه همبستگی‌ها در طول چندین سال، روندها و الگوهایی را که ممکن است در تحلیل‌های کوتاه مدت مشهود نباشند، به تصویر کشید. تجزیه و



شکل ۱. محدوده ایالت اکلاهما و شش منطقه کشاورزی مورد مطالعه

جدول ۱. مختصات جغرافیایی ۶ ایستگاه زمینی در اکلاهما

ایستگاه ها	عرض جغرافیایی (° N)	طول جغرافیایی (° E)
گودول	-۱۰۱/۶۰۵۳	۳۶/۵۸۴۳
هالیس	-۹۹/۸۸۱۳	۳۴/۶۸۵۴
ال رنو	-۹۷/۹۲۱۴	۳۵/۵۳۰۴
پانی	-۹۶/۷۹۲۱	۳۶/۳۳۶۱
ویستر	-۹۴/۷۱۷۷	۳۴/۹۶۱۵
کمرن	-۹۴/۵۳۶۰	۳۵/۱۱۸۳

مواد و روش‌ها

روش شناسی این تحقیق شامل ۴ مرحله است که در مرحله ۱ (جمع آوری داده ها) محصولات مدل GLDAS و داده‌های رطوبت خاک روزانه مناطق اکلاهما به صورت روزانه جمع آوری شد. جمع آوری داده‌ها که شامل داده‌های رطوبت خاک سطحی، مدل GLDAS-2.2، منطقه اکلاهما در ۶ ایستگاه کشاورزی ویستر، ال رنو، پانی، گودول، هالیس، کمرن از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۰ به صورت روزانه از سامانه GEE^{۱۳} برداشت شد. در این پژوهش از مدل GLDAS، رطوبت خاک سطحی (kg/m^2) استفاده شده است. داده‌های مشاهداتی روزانه رطوبت خاک از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۰ از سایت <http://soilmoisture.okstate.edu> برداشت شد. در مرحله ۲ (تحلیل زمانی) علاوه بر داده‌های روزانه مدل GLDAS و داده‌های مشاهداتی (مناطق کمرن و ویستر به عنوان مناطقی با آب و هوای مرطوب، ال رنو و پانی با آب و هوای نیمه مرطوب، هالیس و گودول به آب و هوای خشک طبقه شدند)، داده‌های ماهیانه و سالانه فصلی نیز محاسبه شد. در این تحقیق داده‌های زمانی رطوبت خاک به صورت روزانه، ماهانه، فصلی و سالیانه مورد توجه است. مرحله ۳ (ارزیابی دقت) برای ارزیابی دقت از مقادیر رطوبت خاک GLDAS و رطوبت خاک مشاهداتی استفاده شد. این داده‌های مشاهداتی (VWC (cm^3/cm^3) روزانه از سال ۱۹۹۶ میلادی تا کنون در دسترس عموم قرار داده شده است. محاسبه معیارهای دقت استاندارد و همبستگی، رطوبت خاک داده‌های مشاهداتی و رطوبت خاک مدل GLDAS با استفاده از زبان برنامه نویسی پایتون انجام شد. برای مقایسه شاخص‌های آماری داده‌های رطوبت خاک (kg/m^2) GLDAS (به cm^3/cm^3) تبدیل شد (Entekhabi et al., 1996; Hossain & Anagnostou, 2004; Rodell et al., 2004). در ادامه خطای جذر میانگین مربعات و ضریب همبستگی بین داده‌های مشاهداتی و رطوبت خاک مدل GLDAS محاسبه شد. مرحله ۴ (پایش خشکسالی کشاورزی) محاسبه شاخص خشکسالی VHI، بارش و مقایسه همبستگی این دو با رطوبت خاک مدل GLDAS است. شاخص خشکسالی VHI و بارش به صورت روزانه از

سامانه GEE برداشت شد و همبستگی رطوبت خاک مدل GLDAS با شاخص خشکسالی VHI و بارش به صورت سالیانه مورد بررسی قرار گرفت. شاخص سلامت گیاه VHI که ترکیبی از شاخص‌های شاخص وضعیت گیاه VCI^۴ و شاخص وضعیت دما TCI^{۱۵} است که برای نمایش تنش خشکسالی، بصورت تابعی از تازگی پوشش گیاهی و درجه حرارت، استخراج می‌شود.

$$VHI = a * VCI + b * TCI \quad (1)$$

در رابطه (۱)، a و b ضرایبی هستند که سهم شاخص‌های VCI و TCI را بصورت کمی درمی‌آورند، ضرایب a و b، ۰/۵ در نظر گرفته شد (Kogan, 2001). شاخص وضعیت گیاه VCI برای حذف اثر تفاوت آب و هوایی و توپوگرافی از روی نتایج شاخص پوشش گیاهی نرمال NDVI^{۱۶} طراحی شده است. این شاخص طبق رابطه (۲) محاسبه گردید (Kogan, 1995).

$$VCI_{ijk} = \frac{NDVI_{ijk} - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \times 100$$

شاخص TCI نیز توسط الگوریتم محاسباتی آن شبیه شاخص VCI است، ولی معادله ی آن برای انعکاس پاسخ حرارتی پوشش گیاهی تعریف شده است (Kogan, 1995). که در رابطه (۳)، مقادیر کمینه و بیشینه دمای کل دوره زمانی مورد مطالعه است و با استفاده از داده‌های سری زمانی استخراج شده LST، داده‌های سری زمانی شاخص وضعیت دما TCI محاسبه گردید.

$$TCI_i = \frac{T_{max} - T_i}{T_{max} - T_{min}} \times$$

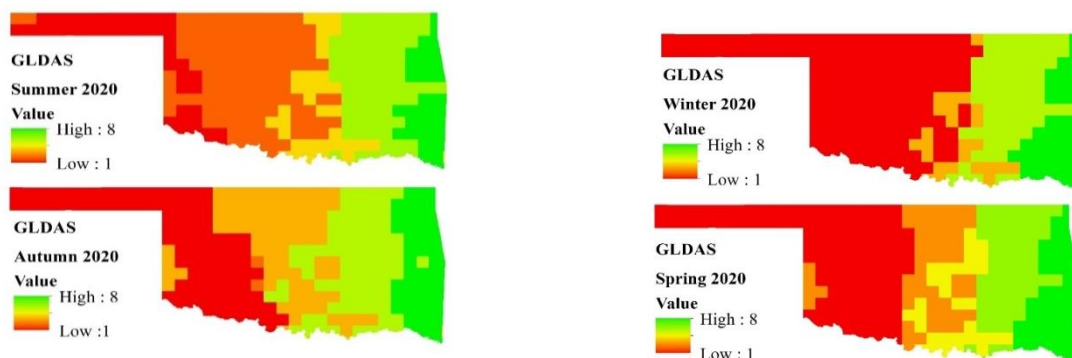
داده‌های TCI و VCI برای محاسبه VHI از سنجنده، طیف رادیومتر تصویربرداری با وضوح متوسط (MODIS^{۱۷}) از پلتفرم موتور جستجو زمین GEE استخراج شد. هدف از شاخص VHI، دخیل کردن شرایط رطوبت پوشش گیاهی و

نتایج و بحث

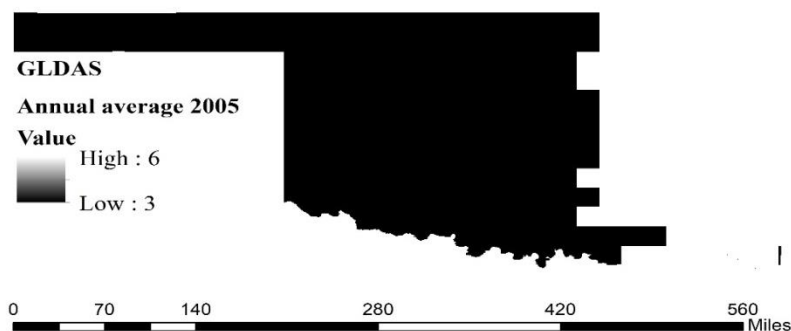
در این بخش، نتایج حاصل از روند تحلیل مکانی و زمانی رطوبت خاک ارائه شده است. داده‌های رطوبت خاک مدل GLDAS برای سال ۲۰۲۰ به صورت فصلی در شکل (۲) نشان داده شده است و رطوبت خاک مدل GLDAS برای سال ۲۰۰۵ به صورت نمونه و بدون تغییر در پالت رنگی در شکل (۳) ارائه شده است. همانطور که در شکل‌های شماره ۲ و ۳ مدل GLDAS تقریباً رطوبت متوسط یکسانی را در کل ناحیه اوکلاهما نشان می‌دهد اما استفاده از میانگین فصلی نشان می‌دهد مناطق شرقی رطوبت خاک بیشتری را در مقایسه با مناطق غربی از خود نشان می‌دهند این موضوع با واقعیت پوشش گیاهی منطقه نیز مطابقت بیشتری دارد.

خطای جذر میانگین مربعات و ضریب همبستگی دو معیار متفاوتی هستند که برای ارزیابی عملکرد مدل‌ها یا روش‌ها استفاده می‌شوند. در حالی که هر دو بینشی در مورد کیفیت پیش‌بینی‌ها ارائه می‌کنند، جنبه‌های مختلفی از رابطه بین مقادیر پیش‌بینی‌شده و مشاهده‌شده را نشان می‌دهند. خطای جذر میانگین مربعات، میانگین بزرگی خطاهای بین مقادیر پیش‌بینی‌شده و مشاهده‌شده را اندازه‌گیری می‌کند و نشانه‌ای از دقت مدل بر حسب تفاوت مطلق است. خطای جذر میانگین مربعات پایین‌تر نشان

درجه حرارت سطح زمین در یک شاخص مجموع است. با محاسبه شاخص‌های VCI و TCI مقادیر شاخص VHI برای ۱۷ سال از سال ۲۰۰۳ تا سال ۲۰۲۰ محاسبه شد. در ادامه بارش سالانه کل منطقه اکلاهما را به عنوان شاخصی برای پایش خشکسالی که یک رویکرد رایج در هیدرولوژی و اقلیم‌شناسی است، استفاده کردیم. مرکز ملی کاهش خشکسالی^{۱۸} NDMC مستقر در دانشگاه نبراسکا-لینکلن، منابع و راهنمایی‌های گسترده‌ای را در زمینه نظارت و مدیریت خشکسالی ارائه می‌دهد، اغلب داده‌های بارش را به عنوان یک شاخص اولیه برای ارزیابی شرایط خشکسالی در مقیاس‌های مکانی و زمانی مختلف ترکیب می‌کند. مطالعات علمی متعددی از داده‌های بارش به عنوان ورودی اولیه برای پایش و تجزیه و تحلیل خشکسالی استفاده کرده‌اند. به عنوان مثال (Sheffield & Wood, 2008) داده‌های بارش را در تلاش‌های پایش خشکسالی نشان می‌دهند و بر اهمیت آن به عنوان یک مؤلفه اساسی در درک تغییرپذیری و روند خشکسالی تأکید می‌کنند. برای بدست آوردن داده‌های بارش منطقه اکلاهما از مدل نسل پنجم ERA5^{۱۹}، تحلیل مجدد جوی آب و هوای جهانی ECMWF^{۲۰} از پلتفرم GEE استفاده شد. ERA5 تجزیه و تحلیل مجدد داده‌های مدل را با مشاهدات از سراسر جهان در یک مجموعه داده کامل و سازگار در سطح جهانی ترکیب می‌کند. داده‌های بارش برای ۱۷ سال از این مدل استخراج شد.



شکل ۲. توزیع مکانی رطوبت خاک مدل GLDAS در فصل‌های مختلف سال ۲۰۲۰



شکل ۳. مقایسه رطوبت خاک مدل GLDAS به صورت میانگین سالانه بدون استفاده از پالت رنگی

طریق ادغام فرآیندهای انجماد-ذوب خود ثبت می‌کند، در نتیجه توافق خود را با داده‌های مشاهده‌ای بهبود می‌بخشد، به‌ویژه در مناطقی که دینامیک انجماد و ذوب مشخصی دارند (Fang et al., 2018). همچنین برای فصل پاییز دما شروع به سرد شدن می‌کند و بر میزان تبخیر و تعرق و حفظ رطوبت خاک تأثیر می‌گذارد. GLDAS داده‌های دما را برای شبیه‌سازی فرآیندهای مبتنی بر دما یکپارچه می‌کند، که منجر به توافق بهبود یافته با داده‌های مشاهده‌ای در طول ماه‌های پاییز می‌شود (Reichle et al., 2011).

عملکرد مدل‌های هیدرولوژیکی مانند GLDAS می‌تواند در فصول و مناطق مختلف به دلیل تفاوت در شرایط آب و هوایی، ویژگی‌های سطح زمین و پویایی پوشش گیاهی متفاوت باشد. چندین مطالعه تغییرات فصلی و منطقه‌ای را در دقت مدل‌های هیدرولوژیکی مستند کرده‌اند. به عنوان مثال، (Sheffield et al., 2006) دریافتند که عملکرد مدل GLDAS در شبیه‌سازی رطوبت خاک از نظر مکانی و زمانی متفاوت است و دقت‌های بالاتری در مناطق و فصول خاص نسبت به سایرین مشاهده می‌شود. در مناطق خشک در طول تابستان و بهار، دینامیک رطوبت خاک عمدتاً تحت تأثیر رویدادهای بارش است. در طول این فصول، مدل GLDAS ممکن است در گرفتن پاسخ رطوبت خاک به رویدادهای بارش پراکنده بهتر عمل کند. مدل‌های هیدرولوژیکی مانند GLDAS بر پارامترها و فرضیات پیچیده در مورد خواص خاک، پوشش

دهنده تطابق بهتر بین مقادیر پیش بینی شده و مشاهده شده است. ضریب همبستگی، رابطه خطی بین دو متغیر را کمی می‌کند. از ۱- تا ۱+ متغیر است که ۱ نشان دهنده رابطه خطی مثبت کامل، ۱- نشان دهنده رابطه خطی منفی کامل و ۰ نشان دهنده عدم وجود رابطه خطی است.

همانطور که در جدول (۲) ارائه شده است میانگین خطای جذر میانگین مربعات در ۶ منطقه برابر ۰/۲۹ است که نشان از تطابق بالا مدل GLDAS با داده‌های مشاهداتی دارد. همچنین بیشترین ضریب همبستگی میان رطوبت خاک مدل GLDAS با داده‌های رطوبت خاک مشاهداتی در مناطق مرطوب با میانگین ۰/۶۴ بوجود آمده است که می‌تواند دلیل آن پوشش گیاهی فعال تر که تأثیر بیشتری بر سیگنال‌های گرفته شده توسط ابزار سنجش از دور داشته باشد. این افزایش فعالیت پوشش گیاهی و دسترسی به آب می‌تواند تفاوت‌های بارزی بین انواع پوشش زمین داشته باشد و تشخیص و مدل سازی آن را آسان تر کند (Gao, 1996).

در بسیاری از مناطق، زمستان با تجمع برف مشخص می‌شود که به طور قابل توجهی بر ویژگی‌های سطح زمین تأثیر می‌گذارد. GLDAS داده‌های پوشش برف را از منابع مختلف جذب می‌کند و آن را قادر می‌سازد دینامیک برف را با دقت نشان دهد. این گنجاندن عملکرد مدل را در طول زمستان افزایش می‌دهد و منجر به همبستگی بالاتر با داده‌های مشاهداتی می‌شود (Rodell et al., 2004). ماه‌های زمستان اغلب شاهد چرخه‌های انجماد و ذوب هستند که بر پویایی رطوبت خاک تأثیر می‌گذارد. GLDAS این چرخه‌ها را از

جدول ۲. مقایسه شاخص‌های آماری ضریب همبستگی و خطای جذر میانگین مربعات (cm^3/cm^3)

روزانه از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۰ مدل GLDAS با داده‌های مشاهداتی در مناطق ۶ گانه با آب و هوای متفاوت در منطقه اکلاهما						
نام مناطق	گودول	هالیس	ال رنو	پانی	کمرن	ویستر
خطای جذر میانگین مربعات (cm^3/cm^3)	۰/۱۹	۰/۲۶	۰/۳۲	۰/۳۹	۰/۳۰	۰/۲۹
ضریب همبستگی	۰/۴۶	۰/۴۸	۰/۵۹	۰/۵۷	۰/۶۷	۰/۶۲
مناطق آب و هوایی	خشک	خشک	نیمه مرطوب	نیمه مرطوب	مرطوب	مرطوب

با بررسی همبستگی مدل GLDAS با داده‌های مشاهداتی در فصل‌های مختلف بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۷ جدول (۳) نتایج نشان داد که بیشترین میانگین همبستگی در بین فصل‌های مختلف، فصل‌های پاییز و زمستان است.

جدول ۳. مقایسه همبستگی فصلی مدل GLDAS با داده‌های مشاهداتی از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۰

در مناطق ۶ گانه با آب و هوای متفاوت در منطقه اکلاهما

نام مناطق	بهار	تابستان	پاییز	زمستان
گودول	۰/۵۱	۰/۳۵	۰/۴۴	۰/۵۷
هالیس	۰/۴۹	۰/۴۱	۰/۴۲	۰/۵۶
ال رنو	۰/۵۳	۰/۴۹	۰/۵۴	۰/۶۴
پانی	۰/۴۶	۰/۴۷	۰/۵۶	۰/۵۳
ویستر	۰/۴۹	۰/۵۶	۰/۵۸	۰/۴۰
کمرن	۰/۵۳	۰/۶۲	۰/۶۱	۰/۴۸
متوسط ضریب همبستگی	۰/۵۰	۰/۴۹	۰/۵۲	۰/۵۳

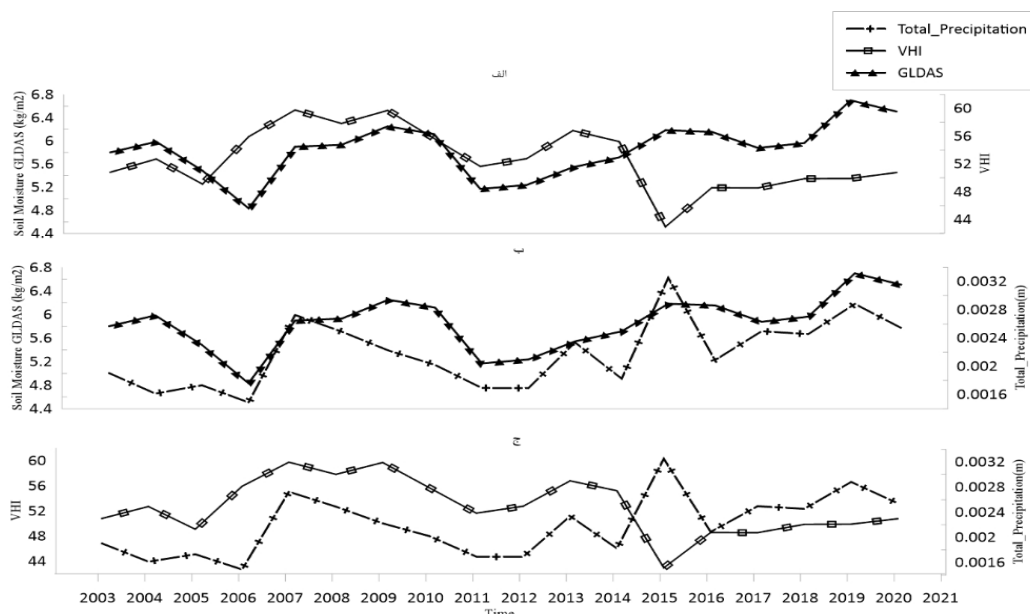
متوسط می‌تواند رشد و سلامت گیاهی را ترویج دهد، بارش بیش از حد یا ناکافی ممکن است اثرات مخربی داشته باشد که منجر به پاسخ‌های غیرخطی در VHI می‌شود. عواملی مانند دسترسی به رطوبت خاک، تنش آبی و فیزیولوژی گیاه می‌توانند بر رابطه غیرخطی بین بارش و VHI تأثیر بگذارند.

در شکل (۴) یکی از دلایل همبستگی متفاوت در سال‌های مختلف در هر سه نمودار می‌تواند تغییرات آب و هوایی سالانه، مانند رویدادهای نوسانات ال نینو-جنوبی (ENSO) و دیگر پدیده‌های آب و هوایی در مقیاس بزرگ، که به طور قابل توجهی بر الگوهای بارش و دینامیک رطوبت خاک تأثیر می‌گذارد.

سال‌هایی که با رویدادهای قوی ENSO یا سایر ناهنجاری‌های آب و هوایی مشخص می‌شوند ممکن است روابط متفاوتی بین رطوبت خاک مدل GLDAS، بارش و VHI در مقایسه با سال‌های معمولی نشان دهند. خطاها در داده‌های ورودی، پارامترسازی مدل، وضوح مکانی، زمانی می‌توانند عدم قطعیت‌هایی را ایجاد کنند که بر ثبات همبستگی‌ها در سال‌های مختلف تأثیر می‌گذارد (Mu et al., 2011). ادغام اطلاعات رطوبت خاک مدل GLDAS و داده‌های مشاهداتی با شاخص‌های خشکسالی VHI و بارش، درک جامعی از پویایی خشکسالی را فراهم می‌کند که برای پیش خشکسالی، سیستم‌های هشدار اولیه و تصمیم‌گیری در مدیریت منابع آب و بخش‌های کشاورزی ضروری است. این تحقیق می‌تواند با ارائه اطلاعات دقیق تر و قابل اعتمادتر در مورد شرایط رطوبت خاک، به بهبود ارزیابی خطر خشکسالی و برنامه ریزی تاب آوری کمک کند. درک ارتباط بین رطوبت خاک، سلامت پوشش گیاهی

گیاهی و فرآیندهای هیدرولوژیکی تکیه دارند. تعصبات مدل و عدم قطعیت در پارامترسازی می‌تواند منجر به اختلاف بین خروجی‌های مدل و داده‌های مشاهداتی شود که ممکن است در فصول و مناطق مختلف متفاوت باشد. مطالعات نشان داده‌اند که تعصبات مدل و خطاهای پارامترسازی می‌توانند در رژیم‌های آب و هوایی خاص و انواع سطح زمین آشکارتر باشند و به تغییرات مشاهده‌شده در عملکرد مدل کمک کنند (Beck et al., 2019; Hrachowitz et al., n.d.).

همبستگی میان شاخص خشکسالی VHI و رطوبت خاک مدل GLDAS نمودار (الف)، در بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۰، ۰/۲ و رطوبت خاک مدل GLDAS و بارش نمودار (ب)، ۰/۶۸ و در نمودار (ج)، همبستگی VHI و بارش برابر ۰/۲۵ بود. همبستگی بین شاخص سلامت گیاهی VHI و بارش، همچنین همبستگی بین VHI و رطوبت خاک، ممکن است بر اساس چندین عامل مرتبط با پویایی‌های فضایی و زمانی پاسخ گیاهی به شرایط زیست محیطی متغیر باشد. بارش و VHI ممکن است به دلیل تضادهای زمانی در زمان پاسخ آن‌ها، همبستگی قوی نداشته باشند. در حالی که رویدادهای بارش می‌تواند منجر به تغییرات فوری در سطوح رطوبت خاک شود، تأثیر بر سلامت گیاهی، که توسط VHI نشان داده می‌شود، ممکن است زمانی طول بکشد تا ظاهر شود. پاسخ گیاهی به بارش، مانند تغییرات در مساحت برگ، جرم خشکبار و چگالی پوشش، ممکن است اثرات تأخیری را نشان دهد که منجر به همبستگی‌های ضعیف تر بین بارش و VHI می‌شود. رابطه بین بارش و سلامت گیاهی ممکن است به صورت کاملاً خطی نباشد. در حالی که بارش



شکل ۴. پایش خشکسالی کشاورزی سالانه منطقه اکلاهما با مدل GLDAS و شاخص‌های VHI و بارش، الف- همبستگی سالانه مدل GLDAS با VHI ب- همبستگی سالانه مدل GLDAS و بارش ج- همبستگی شاخص VHI و بارش

توجه بین خروجی‌های GLDAS و داده‌های مشاهداتی در طول فصل‌های زمستان و پاییز را می‌توان به توانایی مدل در ثبت فرآیندها و پویایی‌های خاص فصل نسبت داد. از نمایش پویایی پوشش برف در زمستان گرفته تا شبیه‌سازی انتقال پوشش گیاهی و توزیع مجدد رطوبت در پاییز، GLDAS دارای متغیرها و فرآیندهای مهمی است که به عملکرد قوی آن در این فصول کمک می‌کند. مقایسه داده‌های مشاهداتی رطوبت خاک با رطوبت خاک مدل GLDAS می‌تواند به ارزیابی دقت مدل GLDAS کمک کند. مدل GLDAS در مناطق مرطوب به خوبی با داده‌های مشاهداتی هماهنگ بود و این نشان‌دهنده دقت بالا و قابلیت اعتماد به مدل GLDAS در مناطق مرطوب است. در نهایت به بررسی همبستگی سالیانه میان رطوبت خاک مدل GLDAS با VHI و بارش پرداختیم. نتایج نشان داد که همبستگی مدل GLDAS و شاخص VHI برابر با ۰/۲، همچنین همبستگی میان مدل GLDAS با بارش ۰/۶۸ بود. همبستگی بالا در بعضی از سال‌ها در شکل (۴) نشان از تأثیر متقابل پیچیده عوامل اقلیمی، هیدرولوژیکی و سطح زمین است. درک این عوامل برای تفسیر همبستگی‌های مشاهده شده و شناسایی مکانیسم‌های اساسی که دینامیک رطوبت خاک را در زمینه‌های زمانی و مکانی مختلف هدایت می‌کند، بسیار مهم است. مقایسه تغییرات مکانی داده‌های مشاهداتی و داده‌های ماهواره‌ای امکان شناسایی تغییرات در مکان‌های خاص را فراهم می‌کند. این اطلاعات می‌تواند برای مطالعه محیط زیست و منابع طبیعی استفاده شوند. براساس این مقایسه می‌توان بهبود پیش‌بینی رخدادها مانند بارش، دما، و شرایط جوی را بررسی کرد. در بسیاری از نقاط جهان به دلیل عدم وجود داده‌های مشاهداتی رطوبت خاک از شاخص خشکسالی رطوبت خاک برای پایش خشکسالی استفاده نمی‌شود. در این تحقیق با بررسی رطوبت خاک مدل GLDAS با سایر شاخص‌های خشکسالی VHI و بارش سالیانه به این نتیجه دست یافتیم که از داده‌های رطوبت خاک مدل GLDAS می‌توان برای پایش خشکسالی کشاورزی با دقت بالا استفاده کرد. به طور کلی، این تحقیق به پیشرفت درک ما از دینامیک رطوبت خاک، بهبود قابلیت‌های پایش خشکسالی و افزایش انعطاف‌پذیری در برابر خشکسالی کمک می‌کند.

و وقوع خشکسالی، بارش فرآیندهای تصمیم‌گیری آگاهانه‌تری را با هدف کاهش اثرات خشکسالی بر بخش‌های مختلف، از جمله کشاورزی، جنگل‌داری و تامین آب، امکان‌پذیر می‌سازد. ارزیابی رطوبت خاک مدل GLDAS با استفاده از داده‌های مشاهداتی و شاخص VHI و بارش می‌تواند یک رویکرد بین رشته‌ای همکاری بین هیدرولوژیست‌ها، اقلیم‌شناسان و کارشناسان سنجش از دور را تقویت می‌کند و منجر به روش‌ها و تکنیک‌های نوآورانه برای تجزیه و تحلیل و تفسیر مجموعه داده‌های پیچیده می‌شود. داده‌های GLDAS سوابق ثابت و طولانی‌مدت رطوبت خاک را فراهم می‌کند و تجزیه و تحلیل رویدادها و روندهای خشکسالی تاریخی را تسهیل می‌کند. این تداوم برای درک تغییرپذیری و تداوم شرایط خشکسالی در مقیاس‌های زمانی مختلف ضروری است. داده‌های GLDAS به صورت رایگان در دسترس است و برای جامعه علمی و ذینفعان قابل دسترسی است. این دسترسی، استفاده گسترده را تشویق می‌کند و ترکیب داده‌های رطوبت خاک GLDAS را در سیستم‌های نظارت بر خشکسالی و فرآیندهای تصمیم‌گیری تسهیل می‌کند. به طور کلی، در حالی که داده‌های رطوبت خاک GLDAS دارای محدودیت‌ها و عدم قطعیت‌هایی هستند، اطلاعات ارزشمندی را برای پایش و ارزیابی خشکسالی ارائه می‌دهند و مکمل سایر شاخص‌های خشکسالی مانند بارش، دما و شاخص‌های پوشش گیاهی هستند. ادغام داده‌های رطوبت خاک GLDAS در چارچوب‌های پایش خشکسالی می‌تواند درک ما از دینامیک خشکسالی را افزایش دهد و آمادگی و تلاش‌های پاسخ را بهبود بخشد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق به ارزیابی دقت رطوبت خاک مدل GLDAS با رطوبت خاک مشاهدات زمینی پرداختیم و از دو شاخص ضریب همبستگی و خطای جذر میانگین مربعات استفاده شد. نتایج خطای جذر میانگین مربعات نشان از دقت قابل قبول مدل GLDAS با داده‌های مشاهداتی داشت. بیشترین متوسط همبستگی با ۰/۶۴ متعلق به مناطق مرطوب و کمترین متوسط همبستگی با ۰/۴۷ مربوط به مناطق خشک بود. همچنین مقایسه همبستگی فصلی میان داده‌های مشاهداتی و مدل GLDAS نشان از همبستگی بالای داده‌ها در فصل‌های زمستان و پاییز بود که یکی از دلایل آن افزایش بارندگی در این دو فصل است. همبستگی قابل

Reference:

- Bagheri, K., & Bagheri, M. (2019). Estimation of soil moisture using optical, thermal and radar Remote Sensing) Case Study: South of Tehran. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 13(47), 63–74[in persian].
- Beck, H. E., Wood, E. F., Pan, M., Fisher, C. K., Miralles, D. G., Van Dijk, A. I. J. M., McVicar, T. R., & Adler, R. F. (2019). MSWEP V2 global 3-hourly 0.1 precipitation: methodology and quantitative assessment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 100(3), 473–500.
- Das, K., Singh, J., & Hazra, J. (2019). Comparison of SMAP, GLDAS and simulated soil moisture datasets over a Malaysian region. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2019-July, 6298–6301.

- <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2019.8900589>
- Entekhabi, D., Njoku, E. G., O'Neill, P. E., Kellogg, K. H., Crow, W. T., Edelstein, W. N., Entin, J. K., Goodman, S. D., Jackson, T. J., Johnson, J., Kimball, J., Piepmeier, J. R., Koster, R. D., Martin, N., McDonald, K. C., Moghaddam, M., Moran, S., Reichle, R., Shi, J. C., ... Van Zyl, J. (2010). The soil moisture active passive (SMAP) mission. *Proceedings of the IEEE*, 98(5), 704–716. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2010.2043918>
- Entekhabi, D., Rodriguez-Iturbe, I., & Castelli, F. (1996). Mutual interaction of soil moisture state and atmospheric processes. *Journal of Hydrology*, 184(1–2), 3–17.
- Fang, B., Lakshmi, V., Bindlish, R., & Jackson, T. J. (2018). Downscaling of SMAP soil moisture using land surface temperature and vegetation data. *Vadose Zone Journal*, 17(1), 1–15.
- Gao, B.-C. (1996). NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 257–266.
- Hossain, F., & Anagnostou, E. N. (2004). Assessment of current passive-microwave-and infrared-based satellite rainfall remote sensing for flood prediction. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109(D7).
- Hrachowitz, M., Savenije, H. H. G., Blöschl, G., McDonnell, J. J., Sivapalan, M., Pomeroy, J. W., Arheimer, B., Blume, T., Clark, M. P., & Ehret, U. (n.d.). A decade of Predictions in Ungauged Basins. *Hydrolog. Sci. J., Online First, Doi*, 10(02626667.2013), 803183.
- Karamvand, A., Hosseini, S. A., & Sharafati, A. (2023). SMAP products for prediction of surface soil moisture by ELM network model and agricultural drought index. *Acta Geophysica*, 71(4), 1845–1856.
- Kogan, F. N. (1995). Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Advances in Space Research*, 15(11), 91–100.
- Kogan, F. N. (2001). Operational space technology for global vegetation assessment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82(9), 1949–1964. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(2001\)082<1949:OSTFGV>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(2001)082<1949:OSTFGV>2.3.CO;2)
- Mu, Q., Zhao, M., & Running, S. W. (2011). Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. *Remote Sensing of Environment*, 115(8), 1781–1800.
- Reichle, R. H., Koster, R. D., De Lannoy, G. J. M., Forman, B. A., Liu, Q., Mahanama, S. P. P., & Touré, A. (2011). Assessment and enhancement of MERRA land surface hydrology estimates. *Journal of Climate*, 24(24), 6322–6338.
- Rodell, M., Houser, P. R., Jambor, U., Gottschalck, J., Mitchell, K., Meng, C. J., Arsenault, K., Cosgrove, B., Radakovich, J., Bosilovich, M., Entin, J. K., Walker, J. P., Lohmann, D., & Toll, D. (2004). The Global Land Data Assimilation System. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 85(3), 381–394. <https://doi.org/10.1175/BAMS-85-3-381>
- Sheffield, J., Goteti, G., & Wood, E. F. (2006). Development of a 50-year high-resolution global dataset of meteorological forcings for land surface modeling. *Journal of Climate*, 19(13), 3088–3111.
- Sheffield, J., & Wood, E. F. (2008). Global trends and variability in soil moisture and drought characteristics, 1950–2000, from observation-driven simulations of the terrestrial hydrologic cycle. *Journal of Climate*, 21(3), 432–458.
- Zhu, Q., Luo, Y., Xu, Y. P., Tian, Y., & Yang, T. (2019). Satellite soil moisture for agricultural drought monitoring: Assessment of SMAP-derived soil water deficit index in Xiang River Basin, China. *Remote Sensing*, 11(3), 362. <https://doi.org/10.3390/rs11030362>

یادداشت‌ها

- ¹ Soil Moisture Active Passive
- ² Global Land Data Assimilation System
- ³ Noah
- ⁴ Mosaic
- ⁵ Community Land Model
- ⁶ Variable Infiltration Capacity
- ⁷ Extreme Learning Machine
- ⁸ Vegetation Health Index
- ⁹ Volumetric water content
- ¹⁰ Root mean square error
- ¹¹ Correlation coefficient
- ¹² Oklahoma
- ¹³ Google Earth Engine
- ¹⁴ Vegetation Condition index
- ¹⁵ Temperature Condition Index
- ¹⁶ Normalized Difference Vegetation Index
- ¹⁷ Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
- ¹⁸ National Drought Mitigation Center
- ¹⁹ The fifth generation ECMWF atmospheric reanalysis
- ²⁰ European Centre for Medium-Range Weather Forecasts