




Estimation of Soil Water Stress During the Growth Period of Rainfed Wheat Based on SMAP Satellite Data

Asadi Oskouei, E.¹  | Mohamad Bygi, R.²  | Kouhi, M.^{3✉}  | Nourozi, H.²
| Abbasi, F.⁴ | Mohammadian, A.⁴

1. RIMAS,CRI,Mashhad, Iran.
2. Qazvin Meteorology Province, Qazvin, Iran.
3. Corresponding Author, RIMAS,CRI, Mashhad, Iran.
4. Expert,RIMAS,CRI, Mashhad, Iran.

Corresponding Author E-mail: man_koohi@yahoo.com

(Received: 26 Jan 2025, Revised: 29 Apr 2025, Accepted: 10 May 2025, Published online: 18 Aug 2025)

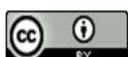
Abstract

Rainfed agriculture is a fundamental pillar of crop production, particularly in arid and semi-arid regions. In these areas, the yield of rainfed crops is highly dependent on soil moisture, with water stress identified as the primary limiting factor for plant growth and productivity. Therefore, analyzing the temporal and spatial distribution of soil moisture—especially within the root zone during the growing season—is a key strategy for planning and managing rainfed farming systems. This study aims to investigate fluctuations in surface and root-zone soil moisture for rainfed wheat and to generate soil moisture stress maps under various wet and dry year scenarios in Qazvin Province. It is the first research in the country to utilize Level-4 soil moisture products from the Soil Moisture Active Passive (SMAP) satellite for this purpose. A total of 22,800 raster images from SMAP hourly data spanning a seven-year period (2015–2021) were analyzed. The extracted surface soil moisture values from these images were compared against field-measured soil moisture data at depths of 0–5 cm and 5–10 cm. To generate soil moisture stress layers for each 10-day period during the rainfed wheat growing season, 10-day average soil moisture maps derived from SMAP data were integrated with raster layers representing wilting point moisture content. This process produced layers for plant-available water and readily available water. By subtracting the readily available water from the net irrigation requirement table for rainfed wheat, soil moisture stress layers were calculated for 26 ten-day periods in each year of the study (2015–2021). The standardized soil moisture stress index identified the years 2017–2018 and 2019–2020 as the driest and wettest years, respectively. The spatial extent of soil moisture stress across the study years fluctuated between a minimum of 5.9% and a maximum of 43.3% of the province's total area during wet and dry periods. The maximum area affected by moderate to extreme soil moisture stress was calculated to be 27.7% of the province during dry years, with the highest intensity observed in the central, southern, and western regions. One of the key limitations of this study is the relatively short duration of available SMAP satellite data and the lack of ground-based soil moisture monitoring stations at various depths, which could impact the accuracy of the results. These findings can be utilized to optimize water resource management, determine the appropriate timing for supplementary irrigation, and mitigate soil moisture stress to enhance the productivity of rainfed crops.

Keywords: Rainfed Wheat, Soil Moisture Stress, SMAP Satellite, Qazvin, Remote Sensing

Cite this article: Asadi Oskouei, E. , Mohamad Bygi Salkhori, M. , Kouhi, M. , Nourozi, H. , Abbasi, F. and Mohammadian, A. (2025). Estimation of Soil Water Stress During the Growth Period of Rainfed Wheat Based on SMAP Satellite Data. Journal of the Nivar, 49(128-129), 195-219. DOI: <https://doi.org/10.30467/nivar.2025.502222.1320>

E-mail: (1) e.asadi.o@gmail.com (2) meta-gazvin@irimo.ir | hasannourozi1980@gmail.com (4) abbasi@gmail.com | amohammadian@gmail.com



برآورد تنش رطوبتی خاک طی دوره رشد گندم دیم بر مبنای داده‌های ماهواره SMAP

ابراهیم اسعدی اسکویی^۱ | رامین محمد بیگی^۲ | منصوره کوهی^۳ | حسن نوروزی^۴ | فاطمه عباسی^۴ | آزاده محمدیان^۴

۱. پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، پژوهشکده اقلیم شناسی و تغییر اقلیم، مشهد، ایران.
۲. اداره کل هواشناسی قزوین، قزوین، ایران.
۳. پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، پژوهشکده اقلیم شناسی و تغییر اقلیم، مشهد، ایران.
۴. پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، پژوهشکده اقلیم شناسی و تغییر اقلیم، مشهد، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: man_koochi@yahoo.com

(دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۰۷، بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۰۹، پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۰، انتشار آنلاین: ۱۴۰۴/۰۵/۲۷)

چکیده

زراعت دیم یکی از پایه‌های اساسی تولید محصول به ویژه در مناطق نیمه خشک است. در این نواحی، تولید محصول دیم به شدت وابسته به رطوبت خاک بوده و تنش رطوبتی مهمترین عامل محدودکننده رشد و کاهش عملکرد این نوع محصول محسوب می‌شود. بنابراین، بررسی توزیع زمانی و مکانی محتوای رطوبتی خاک بویژه در محدوده‌ی ریشه‌ی گیاه طی فصل رشد یکی از مهمترین راهکارهای برنامه ریزی و مدیریت کشت دیم می‌باشد. در این راستا، هدف این پژوهش، بررسی نوسان محتوای رطوبت سطح خاک و عمق محدوده ریشه گندم دیم و ارایه نقشه‌های پهنه‌بندی تنش آبی برای این محصول در سناریوهای مختلف سال‌های تر و خشک در محدوده استان قزوین می‌باشد که با استفاده از محصول سطح ۴ رطوبت خاک ماهواره SMAP^۱ برای اولین بار در کشور انجام شد. برای این منظور، تعداد ۲۲۸۰۰ تصویر رستری از داده‌های ساعتی این ماهواره طی دوره ۷ ساله (۱۳۹۴ تا ۱۴۰۰) مورد استفاده قرار گرفت. ارزیابی مقادیر رطوبت سطحی مستخرج از این تصاویر با نقاط نمونه‌برداری میدانی رطوبت خاک در دو عمق ۵-۰ cm و ۱۰-۵ cm نشان از همخوانی دو سری این متغیر با مقدار RMSE ($m^3 \cdot m^{-3}$) به ترتیب ۰/۰۹ و ۰/۰۸ داشت. به منظور تهیه لایه تنش رطوبتی برای هر دهه طی فصل رشد گندم دیم، ابتدا نقشه‌های میانگین ۱۰ روزه رطوبت خاک منطقه ریشه بدست آمده از SMAP با لایه رستری رطوبت نقطه پژمردگی ترکیب و لایه‌های رطوبت آب قابل دسترس و نهایتاً آب سهل الوصول بدست آمد. با کسر لایه آب سهل الوصول از جدول نیاز آبی خالص گیاه دیم، لایه تنش آبی در ۲۶ دهه برای هر سال طی دوره آماری ۱۳۹۴-۱۴۰۰ محاسبه شد. با بررسی نمره استاندارد شده‌ی تنش آبی، سال‌های ۱۳۹۶-۱۳۹۷ و ۱۳۹۹-۱۳۹۸ به ترتیب به عنوان خشک‌ترین و مرطوب‌ترین سال آبی شناسایی شدند. تغییرات وسعت تنش رطوبت خاک در سال‌های مورد بررسی، بین کمینه ۵/۹ تا بیشینه ۴۳/۳ درصد از مساحت استان بین دوره‌های تر و خشک نوسان داشت. بیشینه وسعت تنش نسبتاً شدید، شدید و بسیار شدید مجموعاً به میزان ۲۷/۷ درصد از مساحت استان، در دوره خشک محاسبه شد. بالاترین مقادیر شدت تنش در بخش‌های مرکزی، جنوبی و غرب استان بدست آمد. از جمله محدودیت‌های مهم این پژوهش، دوره آماری کوتاه مدت داده‌های ماهواره SMAP و عدم امکان مقایسه و ارزیابی دقیق این محصولات به دلیل عدم وجود ایستگاه‌های زمینی ثبت داده‌های رطوبت خاک در اعماق مختلف بود که می‌تواند بر دقت نتایج تاثیرگذار باشد. از این یافته‌ها می‌توان در مدیریت دقیق منابع آبی و زمان استفاده از آبیاری تکمیلی برای کاهش تنش آبی و بهبود عملکرد محصولات دیم استفاده کرد.

کلیدواژه‌ها: گندم دیم، تنش رطوبتی خاک، استان قزوین، ماهواره SMAP، سنجش از دور

^۱. Soil Moisture Active Passive

استناد: اسعدی اسکویی، ابراهیم؛ محمد بیگی سلخوری، میلاد؛ کوهی، منصوره؛ نوروزی، حسن؛ عباسی، فاطمه و محمدیان، آزاده. (۱۴۰۴). برآورد تنش رطوبتی خاک طی دوره رشد گندم دیم بر مبنای داده‌های ماهواره SMAP. مجله نیوار، ۴۹ (۱۲۸-۱۲۹)، ۲۱۹-۱۹۵. DOI: <https://doi.org/10.30467/nivar.2025.502222.1320>

رایانامه: (۱) e.asadi.o@gmail.com (۲) meta-gazvin@irimo.ir | hasannourozi1980@gmail.com (۴) abbasi@gmail.com

amohammadian@gmail.com



۱. مقدمه

آب مهمترین و اساسی‌ترین عامل تولید محصول در شرایط دیم است. از طرفی رطوبت خاک سطحی متغیری کلیدی در کنترل تبادل آب و انرژی بین زمین و جو محسوب می‌شود. بنابراین، رطوبت خاک در سال ۲۰۱۰ به عنوان یک متغیر اساسی اقلیمی^۱ (ECV) از سوی سازمان جهانی هواشناسی^۲ (WMO)، سامانه اقلیمی مشاهدات جهانی^۳ (GCOS) و کمیته ماهواره‌های مشاهداتی زمین^۴ (CEOS) معرفی شده است. این متغیر، از نظر زمانی و مکانی بسیار تغییرپذیر می‌باشد به طوری که توزیع مکانی-زمانی آن به عوامل و فاکتورهای مختلفی مانند الگوهای بارش و تبخیر، بافت خاک، پوشش گیاهی، شیب و توپوگرافی منطقه بستگی دارد. همچنین طی ماه‌ها و فصل‌های مختلف میزان رطوبت خاک بسیار متغیر است.

تاکنون شاخص‌های هواشناسی و هواشناسی کشاورزی متعددی از جمله متغیر بارش و یا نمایه‌های خشکسالی جهت تعیین رطوبت موجود در خاک ارائه شده است که عمدتاً مبتنی بر اندازه‌گیری‌های میدانی و مستقیم می‌باشد. استفاده از این روش‌ها در مقیاس گسترده علاوه بر اینکه کاری بسیار دشوار، پرهزینه و وقت‌گیر است، برای دوره‌های طولانی مدت قابل اجرا نمی‌باشد (اسعدی اسکویی و جامعی، ۱۴۰۰). بنابراین در پهنه جغرافیایی ایران، شبکه سراسری پایش رطوبت خاک وجود نداشته و اندازه‌گیری‌ها، محدود به ایستگاه‌های هواشناسی کشاورزی سازمان هواشناسی کشور است. این سازمان، در مجموع دارای ۴۵ ایستگاه هواشناسی کشاورزی در سراسر کشور است که در بیشتر آن‌ها، داده‌های رطوبت خاک برای دوره‌های طولانی مدت و به صورت کامل وجود ندارد. همچنین پراکنش جغرافیایی و اقلیمی این ایستگاه‌ها در کشور نامنظم بوده و حتی بعضی از استان‌ها مانند استان قزوین، فاقد ایستگاه اندازه‌گیری این متغیر می‌باشند.

تخمین رطوبت خاک نقش مهمی در مدل‌سازی هیدرولوژیکی، برنامه‌ریزی صحیح آبیاری و مدیریت منابع آب و خاک و تعیین الگوهای کشت بویژه کشت‌های دیم دارد. در سال‌های اخیر روش‌های مختلفی مبتنی بر داده‌های ماهواره‌ای برای برآورد و مدل‌سازی رطوبت خاک توسعه داده شده است. از این‌رو، در سال‌های اخیر روش‌های نوین متعددی مبتنی بر داده‌های ماهواره‌ای برای برآورد و مدل‌سازی رطوبت خاک توسعه داده شده‌اند (محرابی و همکاران، ۱۳۹۸). روش‌های سنجش از دور، با فراهم کردن اطلاعات دقیق از تغییرات رطوبت خاک در لایه‌های سطحی و محدوده ریشه گیاه، نقش مهمی در مدیریت کشت و برنامه‌ریزی آبیاری دارند. این تکنیک‌ها امکان ارزیابی دقیق و کارآمد نیازهای آبی گیاهان را فراهم می‌کنند و بهینه‌سازی مصرف آب را تسهیل می‌کنند (لی^۵ و همکاران، ۲۰۲۳، محمد^۶ و همکاران، ۲۰۲۳).

با توسعه فناوری سنجش از دور، نقشه‌های رطوبت خاک تهیه شده توسط ماهواره‌ها می‌تواند به عنوان یک منبع داده با ارزش مورد استفاده قرار گیرد. امروزه برآورد رطوبت خاک به دست آمده از روش‌های سنجش از دور ریزموج^۷، اطلاعات منطقه‌ای گسترده‌ای در مورد رطوبت خاک در مقیاس‌های مختلف ارائه داده است (اسکویی و همکاران، ۱۴۰۱). سنجش از دور ریزموج، قابلیت منحصر به فردی برای برآورد جهانی رطوبت خاک در سطوح گسترده در مقیاس جهانی و منطقه‌ای دارد (سو^۸ و همکاران، ۲۰۱۳). تصاویر مبتنی بر ریزموج‌ها، دیدی متفاوت و منحصر به فرد فراهم کرده و اطلاعات جدیدی در مورد شرایط محیطی زمین ارائه می‌دهد که اغلب این اطلاعات از هیچ روش دیگری بدست نمی‌آیند (وانگ^۹ و همکاران، ۲۰۱۶). در دهه‌های اخیر، امکان برآورد رطوبت خاک از طریق سنجنده‌های ریزموج در شرایط محیطی مختلف و با پوشش گیاهی متفاوت فراهم آمده است (داس^{۱۰} و همکاران، ۲۰۱۸).

⁶ Mohamed

⁷ Microwave

⁸ Su

⁹ Wang

¹⁰ Das

¹ Essential Climate Variables

² World Meteorological Organization

³ Global Climate Observing System

⁴ Committee on Earth Observation Satellite

⁵ Li

با توسعه فناوری سنجش از راه دور، نقشه‌های رطوبت خاک تهیه شده از تصاویر ماهواره‌ها می‌تواند به عنوان یک منبع داده با ارزش زیاد مورد استفاده قرار گیرد. امروزه محصولات رطوبت خاک حاصل از روش‌های سنجش از دور ریز موج، اطلاعات گسترده‌ای در مورد رطوبت خاک در مقیاس‌های مختلف ارائه داده است. رادیومتری میکروویو باند-L مناسب‌ترین روش برای برآورد رطوبت سطح خاک است زیرا امواج ریز موج به دلیل قابلیت نفوذ به داخل خاک و اثرپذیری مستقیم از رطوبت خاک و همچنین به دلیل داشتن قابلیت داده‌برداری در روزهای ابری به دلیل امکان نفوذ این امواج از توده‌های ابر، نسبت به روش‌های نوری صحت و کارایی بالاتری در اندازه‌گیری رطوبت خاک نشان داده‌اند (هین^۱ و همکاران، ۲۰۱۱). SMAP^۲ ماهواره تحقیقات زیست محیطی ایالت متحده آمریکا، از این فناوری استفاده می‌کند. این ماهواره اولین مأموریت مشاهداتی زمین است که ناسا برای اندازه‌گیری جهانی رطوبت خاک با دقت هدف $RMSE = 0.04 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ در عمق ۵ سانتی‌متری خاک راه اندازی نموده است. این ماهواره، رطوبت خاک و وضعیت یخ‌زدگی را اندازه‌گیری می‌کند. SMAP در ۳۱ ژانویه ۲۰۱۵ با راکت دلتا ۲ از پایگاه هوایی وندنبرگ کالیفرنیا به فضا پرتاب شد و در حال حاضر، در ارتفاع ۶۷۰ کیلومتری از سطح زمین به صورت خورشید آهنگ با پهنای نوارهای ۱۰۰۰ کیلومتر در حال داده‌برداری است. هدف اصلی ماهواره SMAP، پایش و نقشه‌برداری جهانی رطوبت خاک در مقیاس کوچک با درجه وضوح بالا، دقت و حساسیت در برداشت و اندازه‌گیری پوشش کره زمین در دوره‌های زمانی کوتاه است (انتخابی و همکاران، ۲۰۱۰)، حاجی ملکی و همکاران، ۱۳۹۹).

تاکنون تحقیقات متعددی در خصوص اعتبارسنجی محصولات رطوبت خاک SMAP جهت بررسی دقت و کیفیت داده‌ها و همچنین بررسی وجود خطاهای احتمالی در آن‌ها در مناطق مختلف دنیا صورت گرفته است. در این

ارتباط، ولپوری^۳ و همکاران (۲۰۱۶) کارایی داده‌های رطوبت خاک SMAP را برای پایش خشکسالی در مراتع دشت‌های مرتفع آمریکا (ایالت‌های تگزاس و اوکلاهما) ارزیابی کردند. بر اساس نتایج، این داده‌ها، بالاترین همبستگی را با رطوبت خاک سطحی (۰-۵ سانتی‌متر) داشته و همچنین همبستگی قوی‌تری تا عمق‌های ۲۰ سانتی‌متر نشان دادند. علاوه بر این، این داده‌ها پاسخ‌های قابل اعتمادی به دینامیک‌های فصلی مرتبط با بارش، دمای سطح زمین و تبخیر-تعرق ارائه نمودند. ال‌ه‌ج^۴ و همکاران (۲۰۱۸) به ارزیابی دقت چندین محصول رطوبت سطح خاک سنجش از دور اخیر (شامل "SMAP" و "ASCAT" "SMOS") در جنوب غربی فرانسه پرداختند. نتایج مطالعه آنها نشان داد که برای محصولات SMAP، ASCAT و S1 SSM مقدار بایاس حدود ۳/۲-، RMSD حدود ۶/۷mm و مقدار R حدود ۰/۵۷ می‌باشد. هنگامی که آمار برای هر ایستگاه به‌طور جداگانه مورد بررسی قرار گرفت، محصولات Sentinel-1 دقیق‌ترین برآوردهای رطوبت خاک را ارائه داده‌اند. آنها متذکر شدند که این نتایج قابل تعمیم به سایر مناطق جهان نیست. پیش‌بینی عملکرد محصولات رطوبت سطح خاک در یک منطقه، بدون ارزیابی کیفیت با استفاده از اندازه‌گیری‌ها در آن منطقه دشوار است. در واقع، عملکرد هر محصول به عوامل متعددی از جمله نوع خاک، اقلیم، وجود نویز و پوشش زمین بستگی دارد. از اینرو، مطالعات بیشتری باید عملکرد این محصولات را در مناطق دیگر با شرایط اقلیمی و پوشش گیاهی متفاوت ارزیابی کنند. داس و همکاران (۲۰۱۸) در پژوهشی به بررسی داده‌های حاصل از پروژه SMAP با قدرت تفکیک مکانی ۳ و ۹ کیلومتر با چندین الگوریتم جایگزین و داده‌های برداشت‌شده از هسته سایت‌های اعتبارسنجی (Core validation site) و کالیبراسیون زمینی پرداختند. نتایج آنها نشان داد که الگوریتم‌های جایگزین نسبت به CVS نتایج آماری مناسب‌تری را ارائه کرده‌اند و مقدار کلی شاخص ناریب اختلاف ریشه مربعات

³ Velpuri

⁴ El Hajj

¹ Hain

² Soil Moisture Active Passive

برای بهبود اطلاعات رطوبت خاک ناحیه ریشه‌ای تولید شده توسط مدل پالمرد. ژانگ^۷ و همکاران (۲۰۱۹) در پژوهش خود نشان دادند داده‌های رطوبت خاک برآوردی توسط ماهواره SMAP برای انواع کاربردهای مختلف کشاورزی و زیست محیطی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. وانگ^۸ و همکاران (۲۰۱۸) برای لس پلاتیو چین نشان دادند تغییرات فضایی در محتوای رطوبت خاک با تغییرات فضایی در پوشش گیاهی همبستگی مثبت دارد. تفاوت در چرخه تغییر آن‌ها نشان دهنده تعامل متفاوت بین محتوای رطوبت خاک و پوشش گیاهی در طول زمان است. نتایج نشان داد که محتوای رطوبت خاک و پوشش گیاهی از سال ۲۰۱۵ شروع به کاهش کرده‌اند. کیم^۹ و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از ترکیب داده‌های رطوبت خاک اندازه گیری شده با ماهواره SMAP، محصولات بارش در دسترس و همچنین اطلاعات مربوط به ویژگی‌های خاک و توپوگرافی منطقه در مقیاس مکانی بزرگ، روشی را برای شناسایی خطر سیل در حوزه آبریز موری-دارلینگ (Murry-Darling) در استرلیا ارائه دادند. ژائو^{۱۰} و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از داده‌های ماهواره SMAP به طور موثری شرایط خشک و مرطوب را متمایز و برآوردهای خوبی با ریزمقیاس‌نمایی داده‌ها در جزیره ایبری طی بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۶ تولید کردند. این مطالعه نشان داد که روش ریزمقیاس محصولات رطوبت سطح خاک مبتنی بر رگرسیون تصادفی (RF) پیشنهادی بهتر از رگرسیون چند جمله‌ای است و می‌تواند تغییرات رطوبتی سطح خاک را به خوبی ثبت کند. هائو^{۱۱} و همکاران (۲۰۱۸) طی پژوهشی در بخش جنوبی استان هبی چین، از داده‌های سری زمانی رطوبت خاک SMAP، شاخص تفاوت نرمال شده پوشش گیاهی MODIS (NDVI) و داده‌های تبخیر و تعرق برای تعیین سیگنال‌های آبیاری گندم زمستانی استفاده کردند و اثر سه زمان آبیاری تکمیلی (در مراحل ساقه‌دهی و دانه‌بندی) بر

برای داده‌های SMAP حدود $0.04 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ است. سینک^۱ و همکاران (۲۰۱۹) اقدام به ارزیابی محصولات رطوبت خاک برای شرایط گرمسیری هند با نوسان‌پذیری فصلی شدید که منجر به تغییرات از شرایط خیلی مرطوب به خشک می‌شود (به ویژه برای مناطق شالیکاری) کردند. آنها نشان دادند که مدل اصلاح‌شده تخمینی خوبی از رطوبت خاک در منطقه‌ای با پوشش زمین ناهمگن ارائه می‌دهد ($R^2 = 0.75$). رطوبت خاک مدل‌سازی شده تحت تأثیر خطاهایی ناشی از مدل (خطاهای سیستماتیک) و همچنین نمونه‌گیری (خطاهای تصادفی) قرار دارد. خطای سیستماتیک می‌تواند به طور قابل توجهی با تکنیک تطابق تابع توزیع تجمعی و خطاهای تصادفی می‌تواند با افزایش اندازه نمونه کاهش پیدا کنند. یافته‌های این پژوهش‌ها نشان داد داده‌های رطوبت خاک SMAP می‌تواند ابزار مناسبی برای تهیه نقشه‌های رطوبت خاک در مناطق مختلف با تنوع جغرافیایی و اقلیمی باشد.

از محصولات رطوبت خاک SMAP با هدف ارزیابی وضعیت خشکسالی (دسوزو مجادو^۲ و همکاران، ۲۰۱۹)، برآورد میزان رواناب (رایکل^۳ و همکاران، ۲۰۱۹)، برنامه‌ریزی و مدیریت آبیاری (زو^۴ و همکاران، ۲۰۲۱) نیز استفاده شده است. ملدنووا^۵ و همکاران (۲۰۲۰) در مطالعه خود به ارزیابی وضعیت خشکسالی کشاورزی در سه منطقه کشاورزی در کالیفرنیا، ایالات متحده، آفریقای جنوبی و استرلیا که در اوایل سال ۲۰۱۵ با خشکسالی‌های شدیدی مواجه شده‌اند، پرداختند. در این تحقیق، داده‌های رطوبت خاک مدل پالمرد تقویت‌شده با SMAP (PM+SMAP) با مجموعه داده بارش^۶ CHIRPS و محصولات شاخص اختلاف نرمال پوشش گیاهی (NDVI) مقایسه شدند. نتایج نشان‌دهنده سودمندی داده‌های SMAP و تأیید پتانسیل آن

7. Zhang

8. Wang

9. Kim

10. Zhao

11. Hao

1. Singh

2 de Souza Machado et al

3 Reichle

4 Zhu

5 Mladenova

6 The Climate Hazards group Infrared Precipitation with Stations (CHIRPS) rainfall dataset

های مختلف در حوضه سیمینه-زرنه رود پرداختند. آنها دریافتند که داده‌های رطوبت خاک ماهواره SMAP با مقدار RMSD بین ۰/۱۸ تا $۰/۳۳ \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ و ubRMSE بین ۰/۱۷ تا $۰/۳۳ \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ کارایی بهتری را در تطابق با داده‌های زمینی نشان می‌دهند. در بین کاربرهای مورد بررسی، کاربری دیم دارای بیشترین مقدار همبستگی بود. آنها نشان دادند که با توجه به عملکرد مناسب داده‌های رطوبت خاک ماهواره SMAP، این داده‌ها می‌تواند در مطالعات هیدرولوژی و پیش بینی روان آب در اراضی مختلف مورد استفاده قرار گیرند. تقی‌زاده و گیوی (۱۳۹۷) به ارزیابی محصولات بارش GPM^2 و رطوبت خاک SMAP در شمال غرب ایران در طی دوره آوریل ۲۰۱۶ تا فوریه ۲۰۱۷ با استفاده از داده‌های بارش ۲۲ ایستگاه همدیدی پرداختند. نتایج، فروبرآورد این محصولات را برای بارش‌های بیشتر از 5 mm/day و برتری محصول IMERG-F نسبت دو محصول دیگر (IMERG-F, JIMERG-F) دیگر نشان داد. نتایج نشان داد استفاده ترکیبی از SMAP و GPM می‌تواند به‌عنوان ابزاری کلیدی برای ارزیابی و پایش سیل در نظر گرفته شود. کرمی و همکاران (۱۳۹۹) به منظور بهبود تفکیک مکانی داده‌های رطوبت خاک ماهواره SMAP، از روش تلفیق رادار-تابش سنج در حوضه آبریز فیروزآباد استان اردبیل استفاده کردند. در مقایسه با اندازه‌گیری‌های زمینی مقادیر آماره‌های خطا (ریشه میانگین مربعات خطا برابر $۰/۰۴۳$) نشان دهنده صحت زیاد نتایج ریزمقیاس سازی داده رطوبت خاک و تغییرات رطوبت خاک بود. این نتایج بیانگر توانایی الگوریتم پیشنهادی در ریزمقیاس سازی رطوبت خاک SMAP با داده‌های رادار سنتینل-۱ با قدرت تفکیک مکانی زیاد است. غفاری و همکاران (۱۳۹۹) به توسعه یک الگوریتم فیزیکی به منظور بهبود مقیاس مکانی رطوبت خاک سطحی ماهواره SMAP با استفاده از داده‌های ماهواره MODIS در منطقه خشک و نیمه خشک آریزونا

روی گندم زمستانی را بررسی نمودند. نتایج نشان داد داده‌های SMAP می‌تواند به بهبود مدیریت آبیاری و حفظ منابع آب این منطقه که با چالش کاهش آب‌های زیرزمینی مواجه است، کمک کنند. کیم^۱ و همکاران (۲۰۲۳) با استفاده از رطوبت خاک سطحی و عمق ریشه این ماهواره به برآورد تبخیر-تعرق روزانه در سطح جهان پرداختند. نتایج نشان داد مدل‌های برآورد تبخیر-تعرق با استفاده از داده‌های SMAP بهبود می‌یابند.

استفاده از این محصولات در ایران در پژوهش‌های متعددی بیشتر با تمرکز بر اعتبارسنجی داده‌های SMAP و مقایسه آن با سایر محصولات رطوبتی سنجش از دور انجام شده است. به عنوان نمونه، فرخی و همکاران (۱۳۹۷) رطوبت خاک را با تلفیق روش ریزمقیاس‌نمایی داده‌های سنجنده مایکروویو و مدل SMAR در دشت رفسنجان برآورد نمودند. مقایسه داده‌های معمولی و ریزمقیاس شده رطوبت خاک سطحی با داده‌های اندازه‌گیری نشان داد در اکثر ایستگاه‌ها مدل توانسته با دقت بالایی رطوبت منطقه ریشه را تخمین بزند و تغییرات آن را نشان دهد. حسن‌زاده و همکاران (۱۳۹۸) در پژوهشی تحت عنوان اعتبارسنجی محصولات رطوبت خاک سطحی ماهواره‌ای، به واسنجی محصولات رطوبت خاک سطحی سنجنده‌های AMSR^2 ، SMAP و SMOS در استان‌های ساحلی شمال کشور (استان‌های گلستان (هاشم آباد)، مازندران (قراخیل) و گیلان (لاهیجان، رشت و منجیل) پرداختند. با ارزیابی مقادیر آماری ریشه میانگین مربعات خطا، ضریب همبستگی و اریبی این نتیجه حاصل شد که ماهواره SMAP با میانگین ریشه مربعات خطا (RMSE) $۰/۰۹۱۷$ نسبت به دیگر محصولات از دقت بیشتری برخوردار بوده است. این سنجنده بهترین عملکرد را در ایستگاه هاشم آباد و ضعیف‌ترین عملکرد را نیز در ایستگاه لاهیجان نشان داد. حاجی‌ملکی و همکاران (۱۳۹۹) در تحقیقی به اعتبارسنجی داده‌های رطوبت خاک سطحی ماهواره SMAP در کاربری

۲. ماموریت جهانی اندازه‌گیری بارش (Global Precipitation Measurement) یک شبکه بین‌المللی ماهواره‌ها است که مشاهدات جهانی نسل بعدی باران و برف را ارائه می‌کند.

^۱ Kim

یزد) کمترین میزان رطوبت خاک سطحی را دارند. این مطالعه نشان داد که می‌توان تغییرات بلندمدت رطوبت خاک را با این ماهواره پایش نمود که تاکیدی بر مطالعه انجام شده صبوری نوقابی و همکاران (۱۴۰۰) است. یافته‌های این پژوهش‌ها نشان می‌دهد داده‌های رطوبت خاک SMAP می‌تواند ابزار مناسبی برای تهیه نقشه‌های رطوبت خاک در مناطق مختلف جهان با تنوع جغرافیایی و اقلیمی باشد. همچنین مطالعات نشان می‌دهند که شاخص‌های گیاهی به دست آمده از داده‌های سنسور از دور نیز با تغییرات رطوبت سطحی خاک (به خصوص عمق ۵ سانتیمتری) ارتباط دارند (فشانی و همکاران، ۱۳۹۴).

زراعت دیم یکی از پایه‌های اساسی تولید محصول به ویژه در مناطق نیمه‌خشک است. در این نواحی تولید محصول دیم به شدت وابسته به رطوبت خاک است و تنش رطوبتی مهمترین عامل محدود کننده رشد گیاه محسوب می‌شود. یکی از راهکارهای مهم کاهش تنش رطوبتی و در نتیجه بهبود عملکرد محصول در کشاورزی دیم، اندازه‌گیری تغییرات محتوای رطوبتی خاک بوژه در محدوده ریشه گیاه طی دوره رشد می‌باشد.

استان قزوین با دارا بودن یک درصد خاک ایران همواره چهار درصد تولیدات کشور را به خود اختصاص داده است و با توجه به وجود دشت قزوین، کشت گندم از اهمیت بسزایی برخوردار است به طوری که طرح‌هایی مانند طرح جهش تولید به منظور افزایش عملکرد گندم و توسعه دیم‌زارها در استان در دست انجام می‌باشد. این استان، دارای ۴۸۹ هزار هکتار اراضی کشاورزی است که در برنامه طرح جهش تولید سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۱، ۷۲ هزار هکتار از اراضی کشاورزی برای کشت دیم در نظر گرفته شده است. بیشترین میزان محصول زیرکشت در این طرح با ۵۲ هزار هکتار به گندم اختصاص دارد. (سازمان جهاد کشاورزی استان قزوین، ۱۴۰۳). بررسی سوابق تحقیقاتی در ایران نشان می‌دهد که تاکنون پژوهشی در راستای تحلیل توزیع مکانی و زمانی رطوبت خاک و پایش تنش رطوبت خاک با استفاده

پرداختند. نتایج حاصل از کاربرد این الگوریتم فیزیکی برای تهیه نقشه‌های ریزمقیاس شده رطوبت خاک SMAP نشان‌دهنده عملکرد خوب الگوریتم و توانایی آن در ریزمقیاس‌سازی رطوبت خاک بود. همچنین نتایج حاکی از عملکرد بهتر الگوریتم فیزیکی نسبت به الگوریتم تجربی می‌باشد. صبوری نوقابی و همکاران (۱۴۰۰) نیز در مطالعه خود، اعتبارسنجی و ریزمقیاس‌نمایی داده‌های رطوبت خاک ماهواره SMAP به روش^۱ SMBDA را با استفاده از محصولات رادار Sentinel^۱ و داده‌های زمینی در منطقه صالح‌آباد ایلام انجام دادند. نتایج نشان داد که ارزیابی و مقایسه مقادیر رطوبت خاک ریزمقیاس شده با مشاهدات زمینی مطابقت خوبی داشته که در مقایسه با سایر مطالعات در مناطق آگروکلیمایی مشابه از صحت خوبی برخوردار است. این مطالعه نشان داد تطویل زمانی-مکانی اندازه‌گیری‌های میدانی به دلیل تنوع و پراکنش بیشتر مقادیر اندازه‌گیری شده و پیاده‌سازی الگوریتم با محاسبات نرم موجب بهبود نتایج ریزمقیاس‌نمایی می‌گردد. صمدی و همکاران (۱۳۹۹) در مطالعه‌ی خود به پایش رطوبت خاک در مراحل رشد گندم دیم به کمک نمایه‌های هواشناسی و سنسور از دور در مراحل رشد گندم دیم (جوانه‌زنی تا ۴ برگی، ساقه‌دهی و پرشدگی تا رسیدگی کامل) در شهرستان نیشابور پرداختند. در مطالعه آنها گرچه تغییرات عملکرد گندم دیم با رطوبت اعماق خاک رابطه معنی‌داری نشان نداد، اما نتایج بیانگر اهمیت بارش‌های فروردین ماه در نوسانات رطوبت خاک و متعاقب آن عملکرد گندم دیم در نیشابور بود. اسعدی اسکویی و همکاران (۱۴۰۱) نیز در مطالعه‌ای خود تغییرات مکانی و زمانی رطوبت خاک سطحی در ایران را با استفاده از محصول SMAP L4 بررسی کردند. تحلیل مکانی میزان رطوبت خاک سطحی بیانگر آن است که در مناطق شمالی و غربی کشور (استان‌های گیلان، مازندران، کهگیلویه و بویراحمد و البرز) میانگین سالانه رطوبت خاک نسبت به سایر مناطق کشور بیشتر بوده و مناطق مرکزی و جنوب شرقی کشور (استان‌های سیستان و بلوچستان، خراسان جنوبی و

³ Soil Moisture-Based Downscaling Algorithm

کوه‌های شمالی سیاهلان ۴۱۷۵ متر از سطح دریا می‌باشد. محدوده‌ی مرکزی و شرق استان را دشت تشکیل می‌دهد. حداقل ارتفاع استان در شمال غرب (بخش طارم سفلی) در کناره‌های دریاچه سفیدرود با ارتفاع ۳۰۰ متر از سطح دریاست.

میانگین بارش سالانه استان از ۲۱۰ میلیمتر در مناطق شرقی تا بیش از ۷۰۰ میلیمتر در ارتفاعات شمال شرقی متغیر است. حداکثر بارش استان (ایستگاهی) در دامنه‌های شمال شرقی الموت و با بارش بیش از ۵۵۰ میلی‌متر است. همچنین ارتفاعات آوج (جنوب غرب استان) بیش از ۴۵۰ میلی‌متر بارش دارد. متوسط دمای استان قزوین بین ۱۲ تا ۱۴ درجه سلسیوس می‌باشد. بیشینه دمای متوسط سالانه طی دوره آماری ۷/۱۵ درجه سلسیوس و کمینه آن ۳/۱۲ درجه سلسیوس بوده است. میانگین رطوبت سالانه ۵۳ درصد و میانگین تبخیر سالانه ۱۵۷۲/۴ میلیمتر می‌باشد. کاربری‌های متفاوت اراضی شامل مراتع، مزارع دیم و آبی، اراضی بسیار شور (فاقد پوشش گیاهی) و باغات در این استان وجود دارد (شکل ۲).



شکل ۲. کاربری اراضی استان قزوین (سازمان جهاد کشاورزی، ۱۴۰۱)

رطوبتی در شکل ۳ آورده شده است. در این مطالعه تمامی فرآیندهای بارگیری تصاویر، تبدیل سیستم مختصات، تغییر

از داده‌های رطوبت خاک ماهواره SMAP در استان قزوین انجام نشده است. لذا با توجه به ضرورت موجود، هدف از این پژوهش، بررسی و پهنه‌بندی تنش رطوبت خاک در عمق ریشه طی دوره رشد گندم دیم در سناریوهای مختلف سال-های تر و خشک در استان قزوین است که می‌تواند کمک شایانی به مدیریت منابع آب و خاک و کشاورزی پایدار در این استان نماید.

۲. مواد و روش‌ها

روش تحقیق

استان قزوین در حوضه مرکزی ایران در دامنه جنوبی رشته کوه‌های البرز مرکزی بین ۴۸ درجه و ۴۳ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۵۲ دقیقه طول شرقی از نصف النهار گرینویچ و ۳۵ درجه و ۲۴ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۴۸ دقیقه عرض شمالی نسبت به خط استوا قرار دارد. بر اساس آخرین تقسیمات سیاسی استان قزوین با مساحت ۱۵۶۲۶ کیلومتر مربع از ۶ شهرستان، ۱۹ بخش، ۲۵ شهر و ۴۶ دهستان تشکیل گردیده است (شکل ۱). استان قزوین متشکل از سه منطقه متمایز و مشخص کوهستانی، کوهپایه‌ای و دشتی است. حداکثر ارتفاع



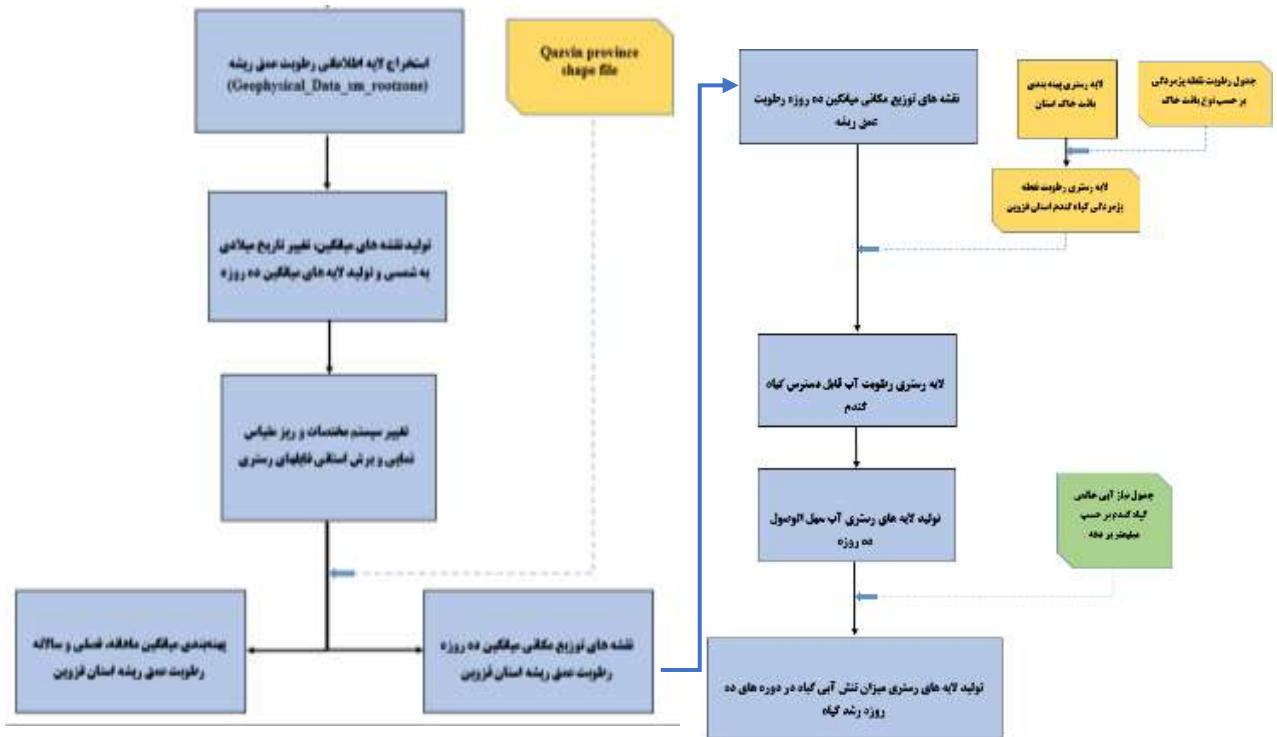
شکل ۱. نقشه تقسیمات سیاسی استان قزوین (دفتر امور اجتماعی و انتخابات

استاندارد قزوین، ۱۴۰۱)

فرآیند پژوهش شامل بارگذاری خودکار تصاویر SMAP از سایت مربوطه و انجام فرآیندهای منجر به تهیه نقشه‌های تنش

روزانه ژئولوسی، ماهانه، سالانه و برش‌های استانی و در نهایت استخراج اطلاعات مورد نیاز در محیط برنامه‌نویسی پایتون و R و با بهره‌گیری از نرم‌افزار GIS انجام شده است.

محدوده جغرافیایی و برش زدن داده‌ها در محدوده استان قزوین، ریزمقیاس‌نمایی و همچنین پردازش‌های بعدی داده‌ها از جمله محاسبه لایه و نمودارهای کمینه، بیشینه و میانگین



شکل ۳. الگوریتم تولید نقشه‌های آب سهل الوصول و تنش رطوبتی در منطقه توسعه ریشه گندم دیم طی فصل رشد

رطوبتی خاک در محدوده ریشه شامل ظرفیت زراعی مزرعه، نقطه پژمردگی، آب قابل دسترس و آب سهل‌الوصول با استفاده از لایه بافت خاک و بر اساس دستورالعمل محاسبه آب مورد نیاز گیاهان در نشریه ۵۶ فائو شد (آلن^۳ و همکاران، ۱۹۹۸). در این مطالعه یک دوره ۷ ساله (۱۳۹۴ تا ۱۴۰۰) با تعداد ۲۲۸۰۰ تصویر رستری از داده‌های ۳ ساعته رطوبت محدوده ریشه خاک با قدرت تفکیک مکانی ۹ کیلومتر از سایت ناسا دریافت شد. سپس از تصاویر رطوبت خاک منطقه ریشه، نقشه‌های میانگین در مقیاس‌های روزانه، دهه، ماهانه، فصلی و سالانه شمسی تولید شد. برای افزایش دقت و کیفیت نقشه‌های تولید شده با استفاده از ابزار Resample و تنظیمات

اندازه‌گیری، مشاهده، محاسبه

محصول رطوبت خاک SMAP

داده‌های رطوبت خاک سنجنش از دور ریزموج به دلیل پیوستگی زمانی-مکانی، توانایی بالایی برای فراهم نمودن اطلاعات رطوبتی خاک دارند. ماهواره SMAP ناسا در محدوده طیف مایکروویو (باند L) و تفکیک مکانی حدود ۴۰ کیلومتر از جمله مهم‌ترین منابع تهیه داده‌های رطوبت خاک است که از ۳۱ مارس ۲۰۱۵ در دسترس می‌باشد. محصولات SMAP را دو مرکز مختص داده ناسا به نام‌های تسهیلات ماهواره‌ای ناسا (ASF)^۱ و مرکز ملی داده‌های برف و یخ آمریکا (NSIDC)^۲ در دسترس عموم قرار می‌دهند. در این مطالعه، در اولین گام، اقدام به تهیه نقشه‌های پایه محتوای

³ Allen

¹ Alaska Satellite Facility
² National Snow and Ice Data Center

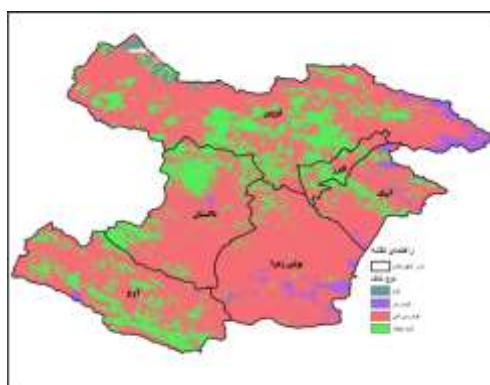
نقشه بافت خاک استان

مرکز بین‌المللی اطلاعات و منابع خاک دانشگاه واگنینگن هلند (ISRIC)^۱ با استفاده از مدل SoilGrids که سیستمی برای نقشه‌برداری دیجیتالی خاک است، اقدام به ترسیم توزیع مکانی خواص خاک در سراسر جهان نموده است. مدل‌های پیش‌بینی SoilGrids با بهره‌گیری بیش از ۲۳۰۰۰۰ مشاهدات نمایه خاک از پایگاه داده WoSIS^۲ و مجموعه‌ای از متغیرهای محیطی برازش می‌شوند. خروجی‌های SoilGrids نقشه‌های جهانی خواص خاک از جمله بافت خاک در شش بازه عمق استاندارد صفر تا ۵، ۵ تا ۱۵، ۱۵ تا ۳۰، ۳۰ تا ۶۰، ۶۰ تا ۱۰۰ و ۱۰۰ تا ۲۰۰ سانتی متر ارائه می‌شوند (www.isric.org). در این پژوهش، با توجه به داده‌های رطوبت خاک در منطقه ریشه که برای عمق متوسط صفر تا ۱۰۰ سانتیمتر محاسبه شده است از لایه رستری بافت خاک در عمق ۳۰ تا ۶۰ سانتیمتر استفاده شد (شکل ۴). این لایه اطلاعاتی برای محاسبات محتوای رطوبتی خاک در نقطه ظرفیت مزرعه، نقطه پژمردگی، آب قابل دسترس و آب سهل‌الوصول استفاده شده است. مقایسه نقشه پهنه‌بندی بافت خاک و با نقشه کاربری اراضی استان (شکل ۴) نشان می‌دهد که بخش اعظمی از کشت دیم استان در خاک‌هایی با بافت لوم سیلتی قرار دارند.

"Bilinear" و کدنویسی پایتون در محیط ArcMap فایل‌های رستری به ابعاد ۹۰۰ متری ریزمقیاس شد.

داده‌های زمینی رطوبت خاک

برداشت نمونه‌های رطوبت عمق ۵، ۱۰ و ۱۵ سانتی متری خاک به روش ترموگراویمتری در ۲۰ نقطه انجام شد. انتخاب نقاط در مزارع گندم بر اساس اقلیم منطقه و در سطوح مسطح و به صورت تصادفی صورت گرفت. هر نقطه برداشت، مربعی ۴×۴ متر را شامل بود که از هر نقطه، ۵ نمونه در عمق ۵، ۱۰ و ۱۵ سانتیمتری برداشت شد. نمونه‌برداری به شرط عدم رخداد بارش در روز قبل انجام گرفت. برداشت نمونه در یک دوره زمانی حدوداً ۷ ماهه انجام شد. نمونه‌های خاک پس از برداشت از محل مورد مطالعه به آزمایشگاه جهاد کشاورزی استان قزوین انتقال داده شد. این نمونه‌ها به منظور اندازه‌گیری درصد رطوبت پس از توزین داخل دستگاه آون در دمای ۱۰۵ °C قرار گرفتند. پس از گذشت ۲۴ ساعت، نمونه‌های خشک از داخل دستگاه آون به جهت توزین مجدد بیرون آورده شدند. پس از نمونه‌برداری از منطقه مورد مطالعه و محاسبه درصد وزنی رطوبت، درصد رطوبت حجمی محاسبه شد (سینگ و همکاران، ۲۰۲۰). این داده‌ها برای اعتبارسنجی صحت داده‌های SMAP بکار رفت.



شکل ۴. نقشه پهنه‌بندی بافت خاک استان قزوین

داده‌های نیاز آبی محصولات دیم

با عنایت به سهم قابل توجه محصول گندم در سبد تولیدات کشاورزی استان قزوین، در این پژوهش اطلاعات گندم دیم

^۲. The World Soil Information Service (WoSIS)

^۱. International Soil Reference and Information Centre

که در راهنمای برنامه‌ریزی آبیاری گندم در نشریه ۵۷۱ موسسه تحقیقات آب و خاک وابسته به سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، وزارت جهاد کشاورزی ارائه شده است (جدول ۱) (جعفری و غالبی، ۱۳۹۸).

بعنوان مبنای عمومی داده‌های مورد نیاز برای محاسبات آبی محصولات دیم مورد استفاده قرار گرفته است. از مهمترین داده‌های مورد استفاده این طرح، داده‌های نیاز آبی خالص گندم استان بر حسب میلی‌متر بر دهه در طول فصل رشد است

جدول ۱. نیاز آبی خالص گیاه گندم بر حسب میلی‌متر بر دهه طی دوره رویشی

ماه	دهه	نیاز خالص (mm)	ماه	دهه	نیاز خالص (mm)
مهر	۳	۱۳/۵	اسفند	۱	۱۱/۴۵
آبان	۱	۱۱/۵	اسفند	۲	۱۷/۵
آبان	۲	۹/۱	اسفند	۳	۲۴/۷
آبان	۳	۷	فروردین	۱	۳۳/۴
آذر	۱	۶/۲	فروردین	۲	۴۰/۱
آذر	۲	۵/۵	فروردین	۳	۴۵/۵
آذر	۳	۰	اردیبهشت	۱	۵۱/۵۵
دی	۱	۰	اردیبهشت	۲	۵۷/۵۵
دی	۲	۰	اردیبهشت	۳	۶۳/۶
دی	۳	۰	خرداد	۱	۶۹/۲۵
بهمن	۱	۲/۵۵	خرداد	۲	۶۷/۶۵
بهمن	۲	۲/۸۵	خرداد	۳	۴۷/۹
بهمن	۳	۷/۲۵	تیر	۲	۳۱/۲

برای تعیین مقادیر آب سهل‌الوصول برای هر دهه از دوره رشد محصول دیم، نقشه‌های میانگین ۱۰ روزه رطوبت خاک منطقه ریشه با لایه رستری رطوبت نقطه پژمردگی ترکیب و ابتدا لایه رستری رطوبت آب قابل دسترس و نهایتاً آب سهل‌الوصول بدست آمد. برای ۲۶ دهه (دهه سوم مهرماه بعنوان دهه نخست و دهه اول تیر ماه بعنوان دهه پایانی در نظر گرفته شد) طی ۷ سال دوره آماری، مجموعاً ۱۸۲ نقشه تهیه شد. در ادامه متوسط داده هر نقشه جهت تعیین و بررسی برخی از شاخص‌های آماری مورد استفاده قرار گرفت.

شاخص‌های ارزیابی

به منظور اعتبارسنجی محصولات SMAP، از سه معیار آماری رایج استفاده شد. میانگین خطای مطلق یا $(MAE)^1$

در سیکل رویشی گندم، ۷ دوره فنولوژیکی در سه دوره عمده رویشی دوره فصل پاییز شامل جوانه زدن، سبز کردن و پنجه زدن، دوره فصل زمستان و دوره تجدید رویش در فصل بهار تا مرحله رسیدن محصول شامل پنجه‌زنی کامل و ساقه رفتن، خوشه دادن، گل دادن و رسیدن (شیری شدن، خمیری شدن و رسیدن کامل) مشخص شده است (کوانتا، ۱۳۵۳). بخش قابل توجهی از نیاز آبی خالص گندم دیم عمدتاً متوجه دوره رویشی فصل بهار از دهه سوم اسفند تا دهه سوم خرداد ماه می‌باشد که مجموعاً حدود ۵۰۰ میلی‌متر می‌باشد. در دوره رویشی فصل پاییز نیز مجموعاً حدود ۵۰ میلی‌متر نیاز آبی خالص گندم برآورد شده است (گیوی، ۱۳۷۶).

¹ Mean Absolute Error

$$\text{RMSE} = \sqrt{\left(n^{(-1)} \sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2 \right)} \quad (2)$$

$$\text{MSE} = n^{(-1)} \sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2 \quad (3)$$

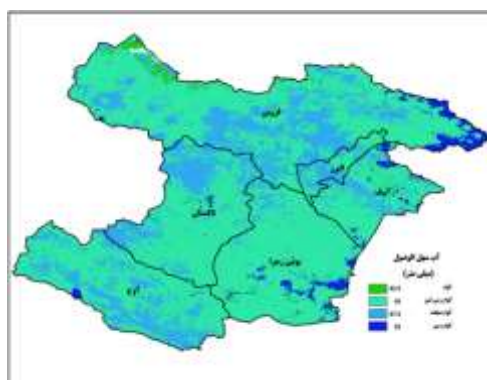
۳. بحث

تهیه نقشه های پایه محتوای رطوبتی خاک

در شکل ۵، نقشه پهنه بندی آب سهل الوصول ارائه شده است. با توجه به نوع بافت خاک استان در عمق ۳۰ تا ۶۰ سانتی متری، همانطور که مشاهده می شود با توجه به اینکه ۹۵/۷ درصد از مساحت استان را خاک لوم رس شنی و لوم سیلتی تشکیل می دهد آب سهل الوصول بین ۴۵ تا ۴۷/۵ میلیمتر در عمق توسعه ریشه (۰/۵ متر) بدست آمد.

(معادله ۱)، میانگین ریشه مربعات خطا^۱ (RMSE) (معادله ۲) و میانگین مربعات خطا^۲ (MSE) بیانگر میانگین خطا در واحد متغیر مورد نظر است، با این تفاوت که RMSE به خطاهای بزرگ، وزن نسبتاً بالایی می دهد. هر سه معیار می توانند از ۰ تا ∞ تغییر کنند، مقادیر کمتر نشان دهنده خطای کمتر پایگاه داده در پیش بینی مقادیر مشاهده ای است (رابطه های ۱ تا ۳). میانگین مربعات خطا یکی از پرکاربردترین معیارهای آماری برای اندازه گیری دقت برآوردها است. این معیار، میانگین مربع اختلاف بین مقادیر واقعی و مقادیر برآورد شده را محاسبه می کند. در روابط ۱ تا ۳، O_i مقدار مشاهداتی و E_i مقدار برآورد شده است (واکرلی^۳ و همکاران، ۲۰۰۸).

$$\text{MAE} = n^{(-1)} \sum_{i=1}^n |E_i - O_i|, \quad (1)$$



شکل ۵. نقشه پهنه بندی آب سهل الوصول استان قزوین

هوانوردی و فضایی آمریکا به آدرس www.earthdata.nasa.gov دریافت شد. قبل از هر گونه کاربرد این محصول نیاز است تا از میزان صحت آن اطلاع حاصل شود. برای این منظور، اعتبارسنجی محصول داده های رطوبت خاک این ماهواره با استفاده از ۲۰ نمونه زمینی رطوبت خاک در دو عمق ۰-۵ و ۵-۱۰ سانتیمتر انجام شد. نمونه ها از مزارع دیم کاری شهرستان های آوج، تاکستان و قزوین طی فصل رشد جمع آوری شد. شرط جمع آوری

در ادامه به منظور تهیه نقشه های رطوبت خاک، داده های سطح ۴ رطوبت خاک ماهواره SMAP برای یک دوره ۷ ساله (۱۳۹۴ تا ۱۴۰۰) طبق فرآیند پژوهش (شکل ۳) استخراج و نقشه های رطوبت خاک تهیه شد. همانطور که قبلاً ذکر شد از داده های ریزمقیاس سطح چهار رطوبت خاک (SMAP\8L4- SM) با قدرت تفکیک ۹ کیلومتر استفاده شد. برای این منظور تعداد ۲۲۸۰۰ تصویر رستری از داده های ساعتی رطوبت محدوده ریشه خاک از سایت سازمان ملی

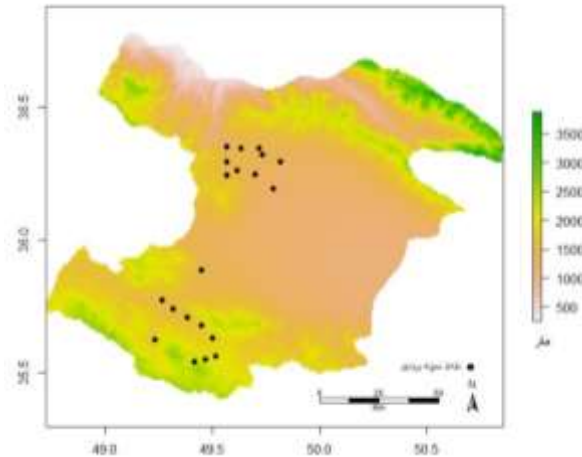
³ Wackerly

¹ Root Mean Square Error

² Mean Squared Error

متناظر از داده‌های ماهواره در تاریخ مربوطه استخراج و مقایسه دو سری زمانی با استفاده از آماره‌های اعتبارسنجی انجام شد.

نمونه، عدم رخداد بارش در روز قبل از نمونه‌برداری بود. توزیع مکانی و پراکنش نقاط نمونه‌برداری واقع در مناطق کشت دیم استان در شکل ۶ نشان داده شده است. مقادیر



شکل ۶. توزیع مکانی نقاط نمونه‌برداری رطوبت خاک از مناطق دیم خیز استان قزوین

نتیجه می‌باشد. به عنوان مثال، در پژوهش صبوری نوقابی و همکاران (۱۴۰۰) در مقایسه مقادیر میدانی رطوبت خاک با مقادیر مستخرج از ماهواره SMAP، مقدار RMSE به میزان $\frac{m^3}{m^3}$ ۰/۰۸۵ بدست آمد. در پژوهشی دیگر (جامعی و همکاران، ۲۰۲۰) محدوده خطای RMSE بین اندازه‌گیری میدانی و سنجش از دور رطوبت خاک $\frac{m^3}{m^3}$ ۰/۰۴ تا $\frac{m^3}{m^3}$ ۰/۰۸ بدست آمد و اعتبارسنجی آن موفق نتیجه‌گیری شد. مقدار میانگین RMSE پژوهش کرموند و همکاران (۱۴۰۱) $\frac{m^3}{m^3}$ ۰/۰۵ محاسبه شد. با مقایسه با یافته پژوهش‌های قبلی، نتایج بدست آمده در این طرح نیز در محدوده قابل قبول قرار دارد.

بعد از نمونه‌برداری و توزین دقیق نمونه‌های رطوبت خاک، مقایسه دو سری زمانی نمونه میدانی و مقادیر مستخرج از لایه‌های رستری ماهواره SMAP در نقاط نمونه‌برداری انجام شد. اندازه‌گیری‌های رطوبت سطحی SMAP برای عمق ۵-۰ سانتیمتر انجام شد. رطوبت خاک میدانی از نمونه‌های عمق ۵-۰ و ۵-۱۰ سانتیمتر به دست آمد. نتایج مربوط به آماره‌های اعتبارسنجی در جدول ۲ آورده شده است. با در نظر گرفتن ابعاد پیکسل‌های تصویر ماهواره SMAP مورد استفاده که ۹ کیلومتر مربع می‌باشد، نمی‌توان انتظار داشت برداشت‌های میدانی و ماهواره‌ای دقیقاً بر هم منطبق شوند. ولی با توجه به آماره‌های اعتبارسنجی مندرج در جدول ۲، مقادیر مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای همخوانی مناسبی با داده‌های برداشت شده زمینی دارند. بررسی پژوهش‌های مشابه نیز همسو با این

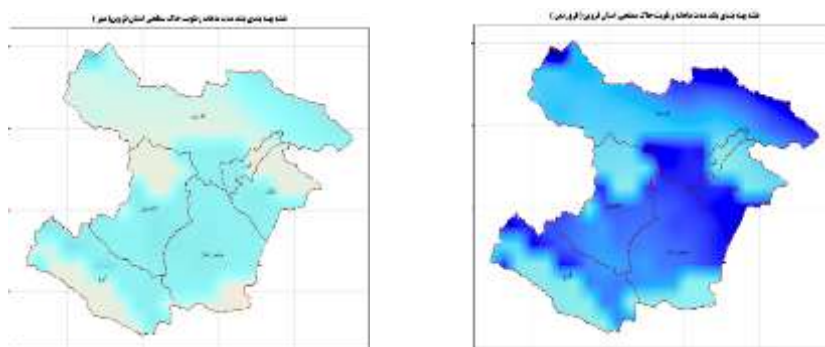
جدول ۲. جدول آماره‌های اعتبارسنجی مربوط به مقایسه نقاط نمونه برداری و مقادیر مستخرج از داده‌های رطوبت خاک ماهواره

معیار ارزیابی	۰-۵ cm	۵-۱۰ cm
MAE	۰/۰۸	۰/۰۷
RMSE	۰/۰۹	۰/۰۸
MSE	۰/۰۱	۰/۰۱

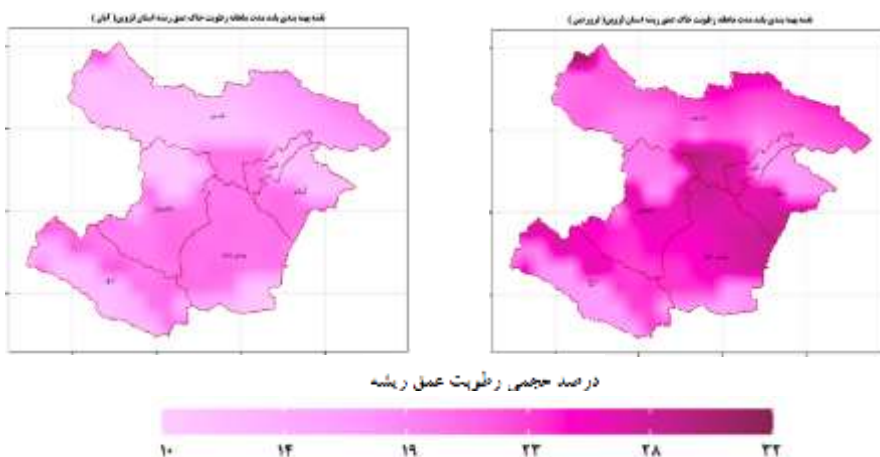
نقشه‌های رطوبت خاک سطحی و عمق توسعه ریشه

در ادامه، نقشه‌های رطوبت سطحی و در عمق توسعه ریشه برای گندم از داده‌های محصول سطح ۴ SMAP در مقیاس‌های ده روزه، ماهانه، سالانه، بلند مدت برای پهنه استان تولید شد. در مقیاس ماهانه، پهنه‌بندی رطوبت سطح خاک نشان داد مقادیر بیشینه در تمامی ماه‌ها مربوط به پهنه دشتی استان که عمدتاً کشت آبی در آن صورت می‌گیرد می‌باشد. البته پهنه‌های آبی نیز مانند دریاچه سد منجیل (گوشه شمال غرب استان) مقادیر بیشینه را نشان می‌دهند. کمینه مقادیر نیز عمدتاً منطبق بر محدوده‌های کشت دیم، اراضی شیبدار و

کوهستانی می‌باشد. تمایز رطوبتی در ماه‌های فصول بارشی و غیر بارشی کاملاً مشهود می‌باشد. بیشترین رطوبت سطحی به میزان متوسط ۲۵/۶ درصد در فروردین ماه و کمترین رطوبت سطحی به میزان متوسط ۱۳/۱ درصد در مهر ماه دیده می‌شود (شکل ۷). از ابتدای سال زراعی تا فروردین ماه، روند رطوبت سطحی افزایشی و از فروردین تا مهر روند کاهشی می‌باشد. بیشینه و کمینه مطلق ماهانه رطوبت خاک در کل دوره آماری برابر ۳۷ و ۶ درصد حجمی با بیشینه دامنه تغییرات ماهانه به میزان ۳۱ درصد حجمی بین ماه‌های خشک و مرطوب برآورد شد. در شکل ۷ به عنوان نمونه، نقشه میانگین دوره آماری رطوبت خاک در سطح خاک برای دو ماه فروردین (بیشینه) و مهر ماه (کمینه) آورده شده است.



شکل ۷. نقشه پهنه بندی بلندمدت ماهانه فروردین (راست) و مهر ماه (چپ) رطوبت سطحی خاک با استفاده از داده های ماهواره SMAP

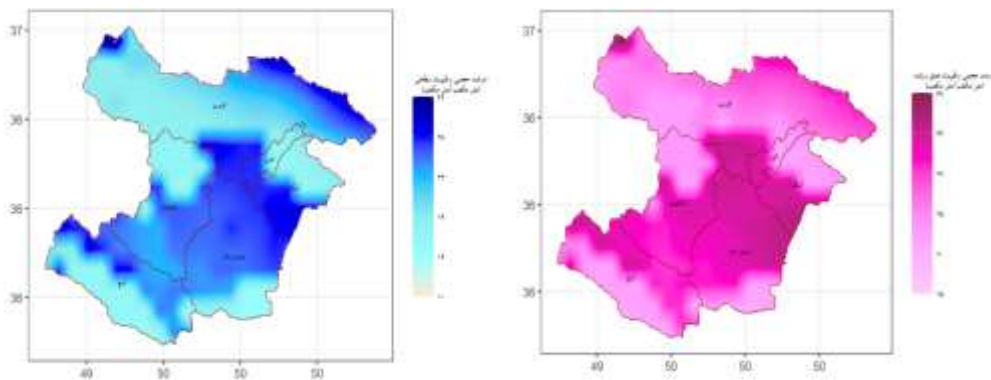


شکل ۸. نقشه پهنه بندی بلندمدت ماهانه فروردین (راست) و آبان ماه (چپ) رطوبت عمق توسعه ریشه گندم با استفاده از داده های ماهواره SMAP

رطوبتی بین ۱۴/۵ تا ۲۹/۷ و میانگین ۲۱/۶ درصد مرطوب-ترین سال و سال ۱۳۹۷-۱۳۹۶ با نوسان رطوبتی بین ۱۰/۵ تا ۲۳ و میانگین ۱۶/۷ درصد خشک‌ترین سال در دوره آماری بودند. رطوبت سالانه سطح خاک در کل دوره آماری بین کمینه ۱۰/۴ تا بیشینه ۳۱/۳ درصد در پهنه استان نوسان داشته است. به عنوان نمونه، در شکل ۹ نقشه میانگین بلندمدت سالانه رطوبت سطح خاک نشان داده شده است که به خوبی نحوه توزیع مکانی رطوبت را نمایش می‌دهد. کمینه مقادیر کاملاً منطبق بر نواحی شیدار و کوهستانی و محدوده‌های کشت دیم می‌باشد. نواحی پست دشت مرکزی قزوین و مناطقی که عمدتاً کشت آبی دارند کاملاً نسبت به سایر نقاط قابل تفکیک می‌باشند. البته بیشینه رطوبت در منتهی‌الیه شمال غربی استان مربوط به پهنه آبی دریاچه سد منجیل قابل مشاهده است. فارغ از محدوده‌های کشت آبی و پهنه‌های آبی، در برخی نقاط مانند شهرستان قزوین، افزایش رطوبت نسبت به ارتفاع نیز ملاحظه می‌شود. میانگین بلندمدت سالانه رطوبت خاک سطحی در پهنه استان ۱۹/۵ درصد می‌باشد. دامنه تغییرات رطوبت خاک سطحی نیز بین ۱۲/۲ تا ۲۷/۸ درصد در نقاط مختلف نوسان دارد.

بررسی الگوی مکانی توزیع رطوبت خاک در عمق ریشه در مقیاس ماهانه نشان داد توزیع مکانی و زمانی این متغیر نیز در سطح استان همانند الگوی توزیع مکانی رطوبت سطح خاک می‌باشد. بیشینه رطوبت ماهانه برای این متغیر برای ماه‌های فروردین، اردیبهشت و خرداد تقریباً یکسان و بطور متوسط برابر ۲۲ درصد حجمی بدست آمد. از تیر ماه، رطوبت خاک روند کاهشی نشان داد و به تدریج به کمترین میزان خود در آبان ماه به میزان ۱۶/۳ درصد رسید. از آذر ماه، روند رطوبت خاک افزایشی شده و تا بیشینه مقدار خود در اردیبهشت ادامه یافت. بیشینه و کمینه مطلق ماهانه رطوبت خاک در عمق ریشه، در کل دوره آماری برابر ۳۲ و ۱۰ درصد حجمی با بیشینه دامنه تغییرات ماهانه به میزان ۲۲ درصد حجمی بین ماه‌های خشک و مرطوب برآورد شد. در شکل ۸ به عنوان نمونه، نقشه میانگین دوره آماری رطوبت خاک در عمق ریشه برای دو ماه فروردین (بیشینه) و آبان ماه (کمینه) آورده شده است.

بررسی نقشه‌های سالانه رطوبت سطح خاک برای دوره ۱۳۹۴-۱۴۰۱ نشان داد سال زراعی ۱۳۹۹-۱۳۹۸ با نوسان



شکل ۹. نقشه پهنه‌بندی سالانه رطوبت خاک سطحی (چپ) و عمق ریشه (راست) استان قزوین (۱۳۹۴-۱۴۰۱)

بین ۱۹/۶ تا ۳۶/۳ و با میانگین ۲۹/۶ درصد، مرطوب‌ترین سال و سال ۱۳۹۷-۱۳۹۶ با نوسان رطوبتی بین ۱۵/۲ تا ۲۸/۶ و میانگین ۲۲ درصد خشک‌ترین سال در دوره آماری بودند. طی دوره آماری، رطوبت سالانه خاک عمق ریشه در کل

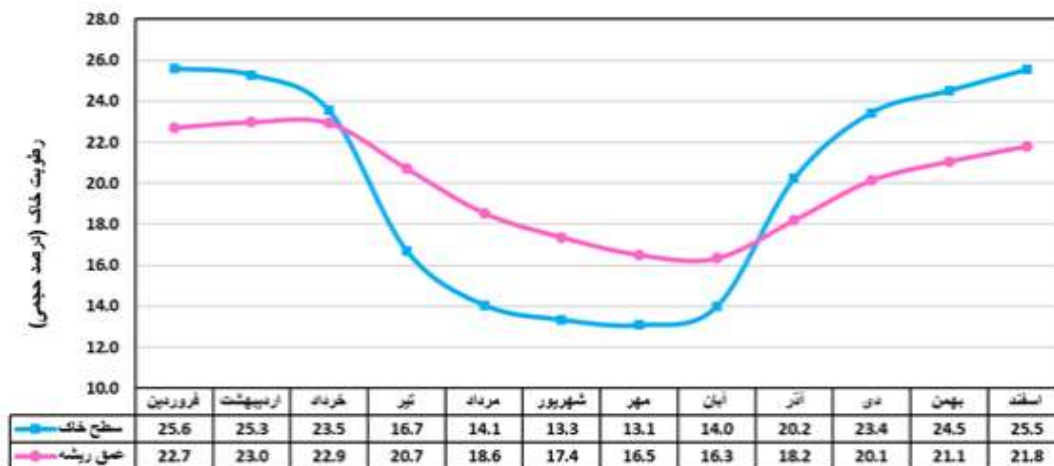
بررسی نقشه‌های تولید شده رطوبت عمق خاک در محدوده توسعه ریشه گندم دیم برای دوره ۱۳۹۴-۱۴۰۱ نیز نشان داد به لحاظ توزیع مکانی مقادیر کمینه و بیشینه رطوبت، در تمامی سال‌ها الگوی مشابهی مانند نقشه‌های سطح خاک دارند. از نظر زمانی سال زراعی ۱۳۹۹-۱۳۹۸ با نوسان رطوبتی

برای درک بهتر نحوه تغییرات رطوبت خاک در لایه سطحی و عمق توسعه ریشه، میانگین داده‌های بلندمدت هر دو لایه در مقیاس ماهانه محاسبه شد. بررسی نحوه تغییرات ماهانه رطوبت خاک در لایه سطحی و عمق ریشه نشان داد در مقیاس ماهانه دامنه تغییرات رطوبت سطح خاک تقریباً ۲ برابر مقادیر عمق ریشه می‌باشد (۱۲/۵ درصد در برابر ۶/۷ درصد). ضریب همبستگی داده‌ها به میزان ۰/۸۷ برآورد شد که بیانگر همبستگی مثبت معنی‌دار بین داده‌های رطوبت سطح خاک و عمق توسعه ریشه می‌باشد. روند تغییرات زمانی رطوبت خاک در هر دو لایه با یک ماه اختلاف فاز، تقریباً یکسان می‌باشد. در لایه سطحی از آبان تا فروردین و در عمق ریشه از آذر تا اردیبهشت روند تغییرات رطوبت صعودی و بالعکس در لایه سطحی از اردیبهشت تا مهر و در عمق ریشه از خرداد تا آبان روند تغییرات رطوبت نزولی می‌باشد. مقادیر رطوبت سطح خاک در ماه‌های پر بارش فصل بهار و زمستان به انضمام آذر بیشتر از رطوبت عمق ریشه بوده در حالیکه در ماه‌های خشک تابستان و مهر و آبان بالعکس لایه سطح خاک کمتر از رطوبت عمق ریشه است. کمترین اختلاف رطوبت خاک بین دو لایه در خرداد ماه به میزان ۰/۶ و بیشترین اختلاف رطوبتی در مرداد ماه به میزان ۴/۵ درصد می‌باشد (شکل ۱۰).

دوره آماری بین کمینه ۱۵ تا بیشینه ۳۹ درصد در پهنه استان نوسان داشته است.

نقشه میانگین بلندمدت سالانه رطوبت خاک در عمق ریشه (شکل ۹) نیز به خوبی نحوه توزیع مکانی رطوبت را نمایش می‌دهد. همانند نقشه میانگین بلندمدت رطوبت سطحی خاک، نواحی شیب‌دار و کوهستانی و محدوده‌های کشت دیم کمینه مقادیر را نشان می‌دهند. مناطق کشت آبی که عمدتاً در نواحی پست دشت مرکزی قزوین واقع شده‌اند کاملاً نسبت به سایر نقاط قابل تفکیک می‌باشند. وجود پهنه آبی دریاچه سد منجیل منجر به ارایه بیشینه رطوبت در منتهی‌الیه شمال غربی استان شده است. در برخی نقاط مانند شهرستان قزوین، همبستگی مثبت رطوبت عمق ریشه با ارتفاع همانند رطوبت سطحی خاک مشاهده می‌شود. میانگین بلندمدت سالانه رطوبت در پهنه استان ۲۸/۲ درصد برای رطوبت خاک در عمق ریشه بدست آمد. دامنه تغییرات رطوبت نیز بین ۱۹/۸ تا ۳۵/۶ درصد در نقاط مختلف نوسان دارد.

مقایسه میانگین بلند مدت ماهانه رطوبت سطح خاک و عمق ریشه



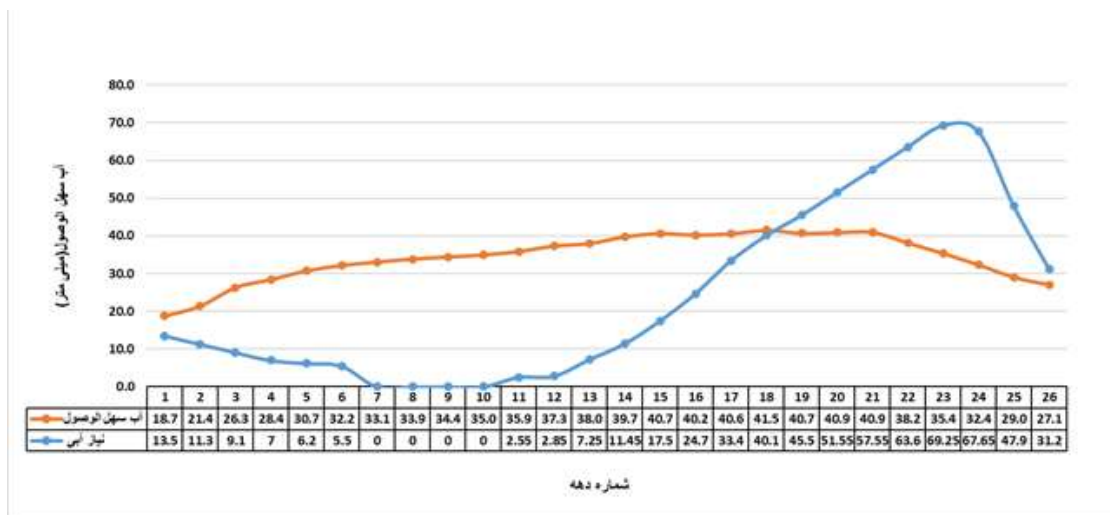
شکل ۱۰. مقایسه میانگین بلند مدت ماهانه رطوبت سطح خاک و عمق ریشه (۱۴۰۱-۱۳۹۴)

دهه ۱۸ ام (دهه دوم فروردین ماه) روند افزایشی (۱/۲ میلی‌متر در هر دهه)، دهه‌های ۱۹ ام، ۲۰ ام و ۲۱ ام تقریباً ثابت (۴۰ میلی‌متر)، و از دهه ۲۲ ام تا ۲۶ ام (دهه سوم اردیبهشت تا دهه دوم تیر) روند کاهشی (۲/۸ میلی‌متر در هر دهه) دیده می‌شود که در نهایت به ۳۰ میلی‌متر می‌رسد. مقادیر متوسط آب سهل‌الوصول بلندمدت از دهه نخست تا دهه ۱۸ ام (نیمه فروردین ماه) بیش از مقادیر نیاز آبی و از دهه ۱۹ ام تا ۲۶ ام (دهه پایانی فروردین تا دهه نخست تیر ماه) کمتر از آن می‌باشد. بنابراین در یک جمع‌بندی کلی می‌توان گفت در دوره‌های رویشی فصول پاییز و زمستان آب مورد نیاز گندم دریم تقریباً تأمین می‌شود و عمده تنش آبی متوجه دوره رویشی مجدد فصل بهار تا رسیدن کامل محصول بویژه در دهه‌های ۲۳ ام تا ۲۴ ام است که در آن نیاز آبی تا ۷۰ میلی‌متر برآورد شده است. بنابراین بیشینه تنش آبی به میزان حدود ۳۵ میلی‌متر می‌رسد. در نهایت نتایج نشان می‌دهد به طور میانگین، در دهه دوم فروردین ماه، نیاز آبی برابر با مقدار آب سهل‌الوصول به میزان ۴۰ میلی‌متر خواهد بود.

تحلیل مقادیر آب سهل‌الوصول محدودده ریشه طی فصل رشد

بر اساس نتایج محاسبه شده، برای دوره بلندمدت، کمیته مقدار آب سهل‌الوصول در دهه نخست (دهه سوم مهر ماه) و بیشینه مقدار در دهه ۲۰ ام (دهه نخست اردیبهشت) به میزان ۱۶/۳ و ۵۵/۴ میلی‌متر به دست آمد. از نظر میانگین نیز کمترین و بیشترین مقادیر در دهه نخست و ۲۰ ام به میزان ۱۸/۷ و ۴۰/۹ میلی‌متر به دست آمد. بیشینه دامنه تغییرات، انحراف از میانگین (MAD^1) و انحراف از معیار (SD^2) داده‌ها نیز در دهه ۱۹ ام (دهه آخر فروردین ماه) به میزان ۲۵/۹، ۸/۴ و ۱۰ میلی‌متر بوده است. بیشینه ضریب تغییرات (CV^3) داده‌ها نیز به میزان ۲۸/۴ درصد در دهه هشتم (دهه اول دی ماه) محاسبه شد.

در شکل ۱۱، تغییرات میانگین بلندمدت آب سهل‌الوصول عمق ریشه و نیاز آبی گندم (میلی‌متر) در هر دهه طی دوره رشد گندم دریم مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، تغییرات متوسط آب سهل‌الوصول از دهه نخست تا



شکل ۱۱. مقایسه تغییرات میانگین بلندمدت آب سهل‌الوصول عمق ریشه و نیاز آبی گندم در هر دهه طی دوره رشد (میلی‌متر)

با کسر لایه آب سهل‌الوصول از جدول نیاز آبی خالص گیاه دریم (جدول ۱) که از دهه سوم مهر تا دهه اول تیر ماه مجموعاً

تحلیل نقشه‌های تنش رطوبتی محدودده ریشه طی دوره رشد

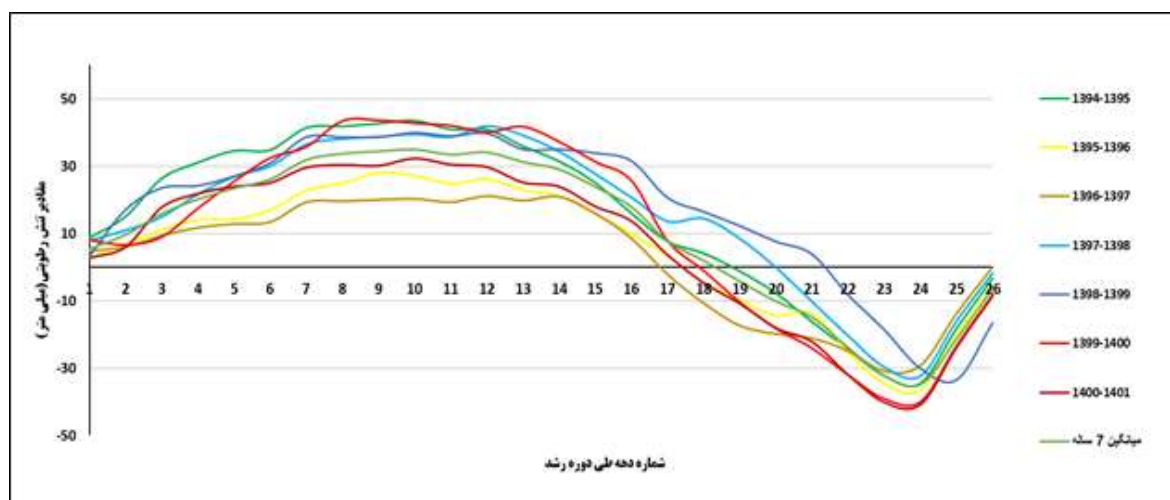
³ Coefficient of variation

¹ Mean Absolute Deviation

² standard deviation

تنش را نسبت به سایر مقاطع زمانی داشت. در حالیکه دهه ۱۹ ام با متوسط تنش ۴/۲- میلیمتری کمترین تنش را نشان داد. بیشینه دامنه تغییرات و انحراف معیار نیز در دهه ۱۹ ام به میزان ۲۹/۷ و ۱۱ میلی متر دیده شد که به دلیل نوسانات زیاد تنشی بین دوره‌های خشک و مرطوب این دهه می‌باشد.

برای ۲۶ دهه اطلاعات نیاز آبی در دسترس است، لایه تنش آبی برای هر دهه طی فصل رشد محاسبه شد (۱۸۲ نقشه). بررسی شاخص‌های آماری هر سال نشان داد بیشینه مقادیر تنش رطوبتی خاک به میزان ۴۰/۸- میلیمتر در دهه ۲۴ ام رخ داده است. کمینه تنش نیز در دهه ۱۷ ام به میزان ۲/۳- میلی متر بوده است. دهه ۲۴ ام با متوسط تنش ۳۴/۸- میلی متر بیشترین



شکل ۱۲. میانگین تنش رطوبتی هر دهه طی دوره رشد گندم به تفکیک سال زراعی (۱۴۰۱-۱۳۹۴)

تنش رطوبتی در دهه دوم خرداد ماه به میزان ۴۰/۸- میلی متر بوده است. همچنین در دوره بلندمدت داده‌های متوسط تنش رطوبتی فاز منفی، بین ۴/۲- تا ۳۴/۸- میلی متر نوسان داشته است.

به منظور مقایسه شدت تنش رطوبتی خاک و همچنین تعیین دوره‌های خشک و مرطوب طی دوره آماری، نمره استاندارد داده‌های میانگین سالانه تنش رطوبتی به تفکیک سال محاسبه شد. در این مطالعه، بدلیل اینکه داده‌های نقشه تنش رطوبتی خاک در عمق ریشه شامل مقادیر مثبت (پهنه فاقد تنش) و منفی می‌باشد، برای استاندارد سازی صرفاً از داده‌های منفی نسبت به نقطه صفر، نقطه معیار تمایز پهنه تنشی و فاقد تنش استفاده گردید. بنابراین در فرمول محاسبه نمره استاندارد داده‌های منفی بعنوان داده خام و عدد صفر بعنوان نقطه میانگین در نظر گرفته شد. البته انحراف معیار نیز بر مبنای نقطه

نتایج بدست آمده در شکل ۱۲ نشان می‌دهد از دهه نخست تا دهه ۱۸ ام (دهه‌ی پایانی مهر ماه تا دهه دوم فروردین ماه) میانگین داده‌های تنش رطوبتی پهنه استان تقریباً در اکثر سال‌ها مثبت و از دهه ۱۹ ام تا ۲۶ ام (دهه‌ی سوم فروردین تا پایان دوره رشد) در فاز منفی قرار دارد. در دهه‌های ۱۸ ام تا ۲۰ ام (از نیمه فروردین دهه نخست اردیبهشت) مقادیر داده‌ها با توجه به سال‌های خشک و مرطوب در فازهای مثبت و منفی نوسان دارد. بنابراین در فصول پاییز و زمستان غالباً تنش رطوبتی خاک یا وجود ندارد و یا بسیار ناچیز می‌باشد اما در تمامی سال‌ها حتی دوره‌های مرطوب نیز اثر تنش رطوبتی در مراحل پایانی دوره رویشی گندم دیده می‌شود. در مراحل آغازین دوره رویشی مجدد فصل بهار نیز نوسان تنش رطوبتی خاک متأثر از نزولات جوی دوره‌های خشک و مرطوب می‌باشد. با توجه به داده‌ها، بیشینه مقادیر میانگین

استفاده قرار گرفت. بر این اساس پهنه استان به شش طبقه تنش با درجات مختلف طبقه بندی شد (جدول ۳). سپس نقشه‌های تنش آبی استاندارد شده برای دوره بلندمدت ترسیم و نهایتاً محدوده‌ها و مساحت‌های تحت تأثیر درجات مختلف تنش آبی تعیین شد.

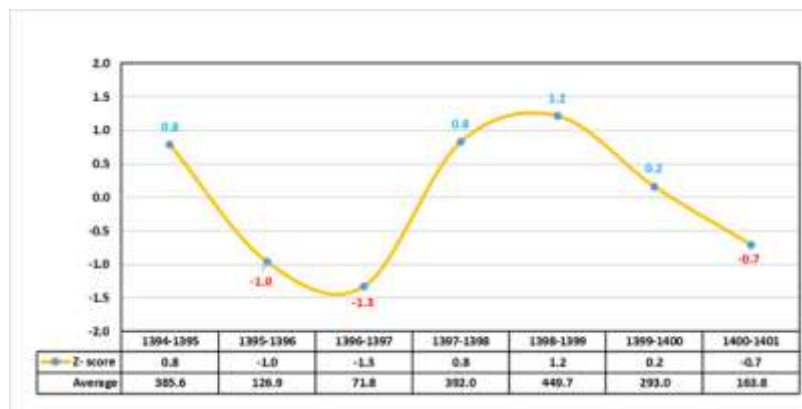
صفر محاسبه شد. بر این اساس نمره استاندارد داده‌های هر پیکسل برای تمامی سال‌های مورد مطالعه برآورد شد. نتایج بدست آمده دامنه تغییرات داده‌های استاندارد شده را بین ۰ تا ۳/۳- نشان می‌داد. یعنی در شدیدترین حالت، مقدار نمره استاندارد تنش آبی برابر ۳/۳- بود. در ادامه مقادیر نمره استاندارد بعنوان معیار درجه‌بندی شدت تنش آبی مورد

جدول ۳. طبقه‌بندی شدت تنش آبی بر اساس نمره تنش آبی استاندارد شده (مک کی^۱، ۱۹۹۳)

شدت تنش آبی	نمره استاندارد تنش آبی (Z)	طبقه رنگی
فاقد تنش	*****	
تنش خفیف	$-0.5 < Z < 0$	
تنش متوسط	$-1.0 < Z \leq -0.5$	
تنش نسبتاً شدید	$-2.0 < Z \leq -1.0$	
تنش شدید	$-2.5 < Z \leq -2.0$	
تنش بسیار شدید	$Z \leq -2.5$	

با توجه به نتایج بدست آمده، طی دوره آماری ۱۴۰۱-۱۳۹۴، سه سال در فاز خشک (۱۳۹۶-۱۳۹۷، ۱۳۹۶-۱۳۹۷ و ۱۴۰۱-۱۴۰۰)، یک سال در محدوده نرمال (۱۴۰۰-۱۳۹۹) و سه سال نیز در فاز مرطوب (۱۳۹۵-۱۳۹۴، ۱۳۹۸-۱۳۹۷ و ۱۳۹۹-۱۳۹۸) قرار دارد. سال زراعی ۱۳۹۷-۱۳۹۶ با نمره استاندارد ۱/۳- بعنوان خشک‌ترین و سال ۱۳۹۸-۱۳۹۹ با ۱/۲ مرطوب‌ترین سال آبی بوده‌اند (اعداد مثبت نمره استاندارد بیانگر دوره تر و اعداد منفی دوره خشک می‌باشد).

با توجه به نتایج بدست آمده، طی دوره آماری ۱۴۰۱-۱۳۹۴، سه سال در فاز خشک (۱۳۹۶-۱۳۹۷، ۱۳۹۶-۱۳۹۷ و ۱۴۰۱-۱۴۰۰)، یک سال در محدوده نرمال (۱۴۰۰-۱۳۹۹) و سه سال نیز در فاز مرطوب (۱۳۹۵-۱۳۹۴، ۱۳۹۸-۱۳۹۷ و ۱۳۹۹-۱۳۹۸) قرار دارد. سال زراعی ۱۳۹۷-۱۳۹۶ با نمره استاندارد ۱/۳- بعنوان خشک‌ترین و سال ۱۳۹۸-۱۳۹۹ با ۱/۲ مرطوب‌ترین سال آبی بوده‌اند (اعداد مثبت نمره استاندارد بیانگر دوره تر و اعداد منفی دوره خشک می‌باشد).



شکل ۱۳. مقادیر تنش رطوبتی استاندارد شده سالانه

بررسی درصد مساحت متاثر استان در هر طبقه تنش طی میانگین دوره بلندمدت فصل رشد (۱۳۹۴-۱۴۰۱) نشان داد تنش آبی در تمام طبقات تنش مجموعاً به میزان ۲۴ درصد از مساحت استان را تحت تأثیر قرار داده است (جدول ۸). این تنش‌ها، عمدتاً در بخش‌های مرکزی آبیک، تاجستان و آوج، بخش کوهین و طارم سفلی، شهرستان قزوین، بخش محمدیه

بررسی درصد مساحت متاثر استان در هر طبقه تنش طی میانگین دوره بلندمدت فصل رشد (۱۳۹۴-۱۴۰۱) نشان داد تنش آبی در تمام طبقات تنش مجموعاً به میزان ۲۴ درصد از مساحت استان را تحت تأثیر قرار داده است (جدول ۸). این تنش‌ها، عمدتاً در بخش‌های مرکزی آبیک، تاجستان و آوج، بخش کوهین و طارم سفلی، شهرستان قزوین، بخش محمدیه

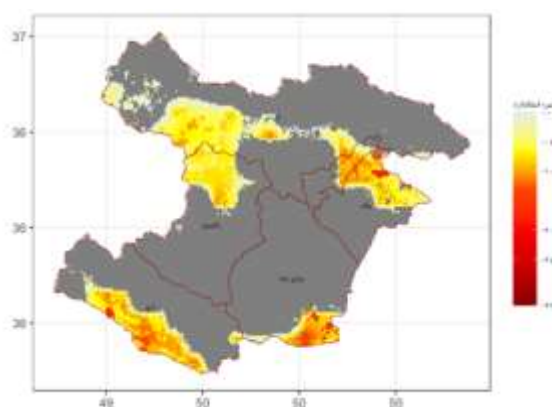
^۱ McKee

درصد از مساحت کل استان) با تنش شدید، بدترین وضعیت تنشی را داشته است. بطور کلی در دوره بلندمدت ۷۶ درصد از مساحت استان فاقد تنش، ۸/۸ درصد دچار تنش خفیف، ۱۱/۶ درصد تنش متوسط، ۳/۶ درصد تنش نسبتاً شدید و ۰/۳ درصد دچار تنش شدید بوده است (جدول ۸).

شهرستان البرز و منتهی‌الیه جنوب بخش مرکزی بوئین‌زهرا دیده می‌شود (شکل ۱۴). از نظر وسعت شهرستان قزوین مجموعاً با ۱۴۰۵/۲ کیلومتر مربع (۹ درصد از مساحت کل استان) بیشترین محدوده متأثر از تنش آبی را داراست. از نظر شدت نیز شهرستان بوئین‌زهرا با ۳ کیلومتر مربع (۰/۰۲

جدول ۴. درصد مساحت تحت تأثیر تنش آبی خاک در محدوده ریشه‌گندم برای دوره بلند مدت (۱۴۰۱-۱۳۹۴)

ردیف	شهرستان	مساحت (کیلومتر مربع)	فاقد تنش	تنش خفیف	تنش متوسط	تنش نسبتاً شدید	تنش شدید	تنش بسیار شدید	مجموع درصد های تنش
۱	قزوین	۵۶۸۹/۴	۷۵/۳	۱۳/۸	۱۰	۰/۹	۰	۰	۲۴/۷
۲	آبیک	۱۳۰۳/۹	۶۳/۱	۸/۷	۲۱	۷/۱	۰/۱	۰	۳۶/۹
۳	بوئین‌زهرا	۳۰۰۱	۸۸/۳	۲/۶	۵/۳	۳/۶	۰/۱	۰	۱۱/۷
۴	البرز	۴۰۳/۸	۶۳/۳	۱۱/۸	۱۴/۴	۱۰/۴	۰	۰	۳۶/۷
۵	تاکستان	۲۵۳۷/۷	۷۸/۲	۷/۵	۱۳/۸	۰/۵	۰	۰	۲۱/۸
۶	آوج	۲۶۹۲/۹	۷۰	۵/۹	۱۴/۸	۰/۳	۰	۰	۳۰
۷	کل استان قزوین	۱۵۶۲۸/۸	۷۶	۸/۸	۱۱/۶	۳/۶	۰	۰	۲۴

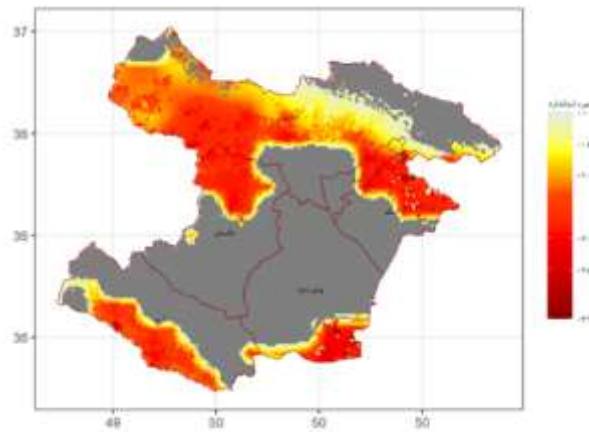


شکل ۱۴. نقشه پهنه‌بندی تنش آبی استاندارد استان قزوین میانگین بلند مدت ۱۴۰۱-۱۳۹۴

(۲۳/۶ درصد از مساحت کل استان) بیشترین محدوده متأثر از تنش آبی را داراست. از نظر شدت نیز شهرستان آبیک با ۲۸/۶ کیلومتر مربع (۰/۲ درصد از مساحت کل استان) با تنش بسیار شدید، بدترین وضعیت تنشی رطوبت خاک همراه بوده است. بطور کلی در این دوره ۵۶/۷ درصد از مساحت استان فاقد تنش، ۷ درصد دچار تنش خفیف، ۸/۶ درصد تنش متوسط، ۲۵/۹ درصد تنش نسبتاً شدید، ۱/۵ درصد تنش شدید و ۰/۳ درصد دچار تنش بسیار شدید بوده است (شکل ۱۵).

وضعیت تنش آبی سالانه دوره خشک از نظر شدت و وسعت

در خشک‌ترین دوره فصل رشد، سال آبی ۱۳۹۶-۱۳۹۷ (شکل ۱۵) تنش آبی در تمام طبقات تنشی مجموعاً به میزان ۴۳/۳ درصد از مساحت استان را تحت تأثیر قرار داده است. این تنش‌ها عمدتاً بصورت دو نوار تنشی در شمال و جنوب دشت قزوین از شرق تا غرب استان گسترش یافته است. از نظر وسعت، شهرستان قزوین مجموعاً با ۳۶۶۹/۶ کیلومتر مربع



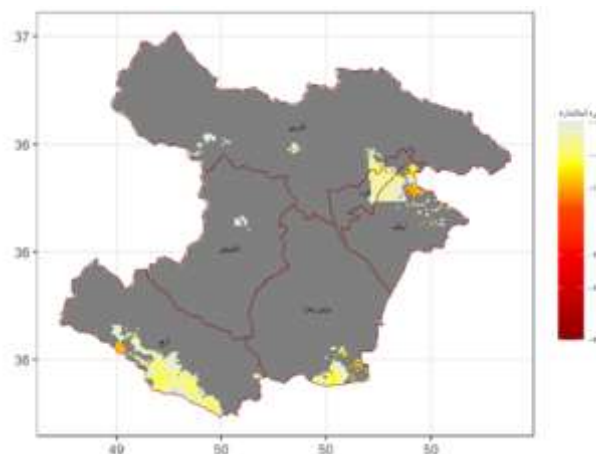
شکل ۱۵. نقشه پهنه‌بندی تنش آبی استاندارد استان قزوین دوره خشک

وسعت شهرستان آوج با ۴۴۱ کیلومتر مربع (۲/۸ درصد از مساحت کل استان) بیشترین محدوده متأثر از تنش آبی را داراست. از نظر شدت نیز شهرستان آبیگ با ۱۳ کیلومتر مربع (۰/۰۸ درصد از مساحت کل استان) تنش نسبتاً شدید، بدترین وضعیت تنشی را داشته است. بطور کلی در این دوره ۹۴/۱ درصد از مساحت استان فاقد تنش، ۴/۹ درصد دچار تنش خفیف، ۱ درصد تنش متوسط و ۰/۱ درصد دچار تنش نسبتاً شدید بوده است (شکل ۱۶).

وضعیت تنش آبی سالانه دوره مرطوب از نظر

شدت و وسعت

در مرطوب‌ترین دوره فصل رشد، سال آبی ۱۳۹۸-۱۳۹۹ (شکل ۱۴) تنش آبی در سه طبقه خفیف و متوسط و نسبتاً شدید مجموعاً به میزان ۵/۹ درصد از مساحت استان را تحت تاثیر قرار می‌دهد. این تنش‌ها عمدتاً محدود به نقاطی در شهرستان‌های البرز، آبیگ، آوج و بوئین زهرا می‌باشد، از نظر



شکل ۱۶. نقشه پهنه‌بندی تنش آبی استاندارد استان قزوین دوره مرطوب

دوره رشد گندم (جوانه‌زنی، پنجه‌زنی، ساقه‌دهی و دانه‌بندی) باعث کاهش فتوسنتز، کاهش توسعه ریشه و در نتیجه کاهش عملکرد نهایی محصول می‌شود. بارش ناکافی یا توزیع نامناسب آن طی فصل رشد نیز منجر به افزایش تنش رطوبتی

۴. نتیجه‌گیری

تولید گندم دیم در مناطق نیمه‌خشک به شدت به رطوبت خاک وابسته است. بنابراین رطوبت خاک عاملی کلیدی در رشد این محصول دیم محسوب می‌شود. تنش رطوبتی طی

(۱۳۹۷) مبنی بر توانمندی و امکان استفاده از داده‌های رطوبت خاک ماهواره SMAP در داخل کشور همخوانی دارد. بررسی‌ها نقشه‌های تنش آبی استاندارد تهیه شده در عمق ریشه با استفاده از داده‌های رطوبت خاک SMAP نشان داد در تمامی سال‌های مورد بررسی حتی دوره‌های مرطوب‌تر، برخی از نقاط استان، همواره با درجات متفاوت دچار تنش آبی روبرو بوده است. از نظر توزیع مکانی مقدار تنش، شهرستان قزوین بیشترین مساحت تحت تأثیر تنش آبی را داشت، اما از نظر شدت، شهرستان بوئین‌زهرابدترین وضعیت را نشان داد. در کل، نتایج نشان داد در استان قزوین، نواحی کشت گندم دیم، مناطق شیب‌دار، و مناطق کم‌بارش بیشتر تحت تأثیر تنش رطوبتی قرار دارند. یافته‌های این پژوهش همچنین نشان داد نقشه‌های استاندارد تنش رطوبتی تولید شده با استفاده از داده‌های SMAP به خوبی تغییرات تنش رطوبتی را از نظر شدت و وسعت در پهنه استان به تفکیک سال‌های خشک و مرطوب نشان می‌دهد که با نتایج بدست آمده از ژائو و همکاران (۲۰۱۸)، هائو و همکاران (۲۰۱۹) و کیم و همکاران (۲۰۲۳) مبنی بر امکان استفاده از این تصاویر در کاربردهای کشاورزی و توانمندی این تصاویر در تفکیک مناسب شرایط مرطوب و خشک همخوانی دارد و نشان می‌دهد که می‌توان از داده‌های این ماهواره به منظور مدیریت آبیاری در مزارع گندم دیم استفاده مطلوب نمود و روشی موثر برای مدیریت دقیق آبیاری کشاورزی برای مقابله با چالش‌هایی چون کاهش آب‌های زیرزمینی که دشت قزوین با آن دست به گریبان است را توسعه داد.

روش‌های سنجش از دور ابزاری قدرتمند برای پایش رطوبت خاک و مدیریت آبیاری به شمار می‌روند. با پیشرفت فناوری و توسعه الگوریتم‌های جدید، انتظار می‌رود که دقت و کارایی این روش‌ها در آینده افزایش یابد و نقش مهم‌تری در کشاورزی پایدار و مدیریت منابع آب ایفا کنند. از جمله محدودیت‌های این پژوهش می‌توان به دوره آماری کوتاه داده‌های ماهواره SMAP و نبود ایستگاه‌های زمینی ثبت

و کاهش تولید می‌شود. بیشترین تأثیر تنش آبی برای گندم در مراحل حساس رشد مانند خوشه‌دهی و دانه‌بندی مشاهده شده است (کوماری^۱ و همکاران، ۲۰۲۴). پژوهش‌ها نشان داده‌اند که روش‌های سنجش از دور، با فراهم کردن اطلاعات دقیق از تغییرات رطوبت خاک در لایه‌های سطحی و محدوده ریشه گیاه، نقش مهمی در مدیریت کشت و برنامه‌ریزی آبیاری دارند (لی و همکاران، ۲۰۲۳) و در میان محصولات ماهواره SMAP ابزار ارزشمندی برای پایش رطوبت خاک، مدیریت منابع آب و برنامه‌ریزی آبیاری محسوب می‌شود (سینک و همکاران، ۲۰۱۹، ملدنووا و همکاران، ۲۰۲۰، ژانگ و همکاران، ۲۰۱۹ و ژائو و همکاران، ۲۰۱۸). از آنجایی که تنش رطوبتی تأثیر عمیقی بر تولید گندم دیم در مناطق نیمه‌خشک دارد و از طرفی با توجه به عدم کفایت ایستگاه‌های پایش رطوبت خاک در کشور، در این پژوهش برای اولین بار در استان قزوین، به بررسی تغییرات مکانی و زمانی رطوبت خاک سطحی و عمق محدوده ریشه طی دوره رشد گندم دیم با استفاده از تصاویر ماهواره SMAP طی دوره آماری ۱۳۹۴-۱۴۰۱ پرداخته شد که تا کنون در این زمینه پژوهشی برای این منطقه انجام نشده است. با توجه به اینکه دقت تخمین رطوبت خاک با استفاده از سنجش از دور می‌تواند تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند نوع خاک، پوشش گیاهی، شرایط جوی و دقت حسگرها قرار گیرد (آکاش^۲ و همکاران، ۲۰۲۴، زو و همکاران، ۲۰۱۸)، اعتبار سنجی این داده‌ها با استفاده از نمونه‌های میدانی رطوبت خاک انجام شد که دقت بالای این داده‌ها در مقایسه با نمونه‌برداری زمینی همانند سایر پژوهش‌ها (سینک و همکاران، ۲۰۱۹، رایکل و همکاران، ۲۰۱۷، کوی^۳ و همکاران، ۲۰۱۷) تایید شد. همچنین نتایج مطالعه حاضر با مطالعات صبوری و همکاران (۱۴۰۰)، اسکویی و همکاران (۱۴۰۱)، حاجی ملکی و همکاران (۱۳۹۹)، فرخی و همکاران (۱۳۹۷)، حسن زاده و همکاران (۱۳۹۸) و تقی‌زاده و گیوی

³ Cui

¹ Kumari

² Akash

۴. فرخی، م.، انصاری، ح.، فریدحسینی، ع.، (۳۹۹). تخمین رطوبت خاک با تلفیق روش ریزمقیاس‌سازی داده‌های سنجنده مایکروویو و مدل SMAR مطالعه موردی: دشت رفسنجان. علوم آب و خاک. ۲۴ (۱): ۱۳۳-۱۴۴.

۵. حاجی ملکی، خ.، واعظی، ع.، سرمیدان، ف.، کراو، و.، بروکا، ل. (۱۳۹۹). اعتبارسنجی داده‌های رطوبت خاک سطحی ماهواره SMAP در کاربری‌های مختلف در حوضه سیمینه-زرنه (بوکان). تحقیقات آب و خاک ایران، 51(5), 1317-1329. doi: 10.22059/ijswr.2020.291430.668371

۶. کرماند، ع.، حسینی، ع.، شرافتی، ا. (۱۴۰۱). بررسی کاربرد شاخص جدید خشکسالی کشاورزی بر مبنای رطوبت خاک و شاخص پوشش گیاهی اصلاح شده به کمک داده‌های سنجنش از دور ماهواره‌های SMAP و TERRA. حفاظت منابع آب و خاک، ۱۲ (۲) (پیاپی ۴۶) (۱۱۳-۹۷). <https://sid.ir/paper/1064718/fa>.

۷. صبوری نوقایی، م.، رجبی، م.، اسعدی اسکویی، ا. (۱۴۰۰). اعتبارسنجی و ریزمقیاس‌سازی داده‌های رطوبت خاک ماهواره SMAP به روش SMBDA با استفاده از محصولات رادار Sentinel 1 و داده‌های زمینی در منطقه صالح آباد ایلام. تحقیقات منابع آب ایران، 17(4), 144-160.

۸. صمدی، ا.، بازگیر، س.، خوش اخلاق، ف. (۱۴۰۰). پایش رطوبت خاک در مراحل رشد گندم دیم به کمک نمایه‌های هواشناسی و سنجنش از دور، پژوهش‌های دانش زمین، ۱۲ (۲): ۵۰-۶۳.

9. Akash, M., Kumar, P. M., Bhaskar, P., Deepthi, P. R., & Sukhdev, A. (2024). Review of estimation of soil moisture using active microwave remote sensing technique. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 33, 101118.
10. Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *FAO Irrigation and drainage paper No. 56*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 56(97), e156.
11. Cui, C., Xu, J., Zeng, J., Chen, K. S., Bai, X., Lu, H., ... & Zhao, T. (2017). Soil moisture mapping from satellites: An intercomparison

داده‌های رطوبت خاک در اعماق مختلف به منظور مقایسه و ارزیابی دقیق محصولات ماهواره SMAP در سطح و عمق ریشه اشاره کرد. با توجه به نتایج به دست آمده پیشنهاد می‌شود زیرساخت‌های پایش رطوبت خاک در مناطق دیم‌خیز برای تکمیل بانک داده‌های ماهواره‌ای توسعه یابد تا امکان انجام پژوهش‌های بیشتر در این زمینه میسر گردد. همچنین می‌توان برای افزایش دقت و قابلیت اطمینان این روش‌ها، داده‌های سنجنش از دور با داده‌های زمینی و مدل‌های شبیه‌سازی تلفیق کرد و الگوریتم‌های پردازش داده‌ها به طور مداوم بهبود بخشید که می‌تواند موضوع پژوهش‌های بعدی در این زمینه باشد.

۵. سپاسگزاری

این مقاله از طرح پژوهشی با عنوان "بهنه بندی تنش آبی مراحل رشد گیاه گندم با استفاده از رطوبت خاک محدوده عمق ریشه سامانه SMAP در سال‌های ۱۳۹۴-۱۴۰۲ در سطح استان قزوین" که به سفارش سازمان مدیریت و برنامه ریزی استان قزوین و اداره کل هواشناسی استان قزوین انجام شده استخراج شده است که بدینوسیله از حمایت مالی و معنوی انجام شده سپاسگزاری می‌شود.

منابع

۱. اسعدی اسکویی، ا.، گودرزی، ل.، هلالی، ج. (1401). بررسی تغییرات مکانی و زمانی رطوبت خاک سطحی در ایران با استفاده از محصول SMAP L4، نیوار، (۱۱۷-۱۱۶) (۱۱۶) ۴۶، ۲۷-۱۴. doi: 10.30467/nivar.2022.315991.1206
۲. محرابی، م.، حمزه، س.، علوی پناه، ک.، کیاورزمقدم، م.، ضیائی، ر. (۱۳۹۸). برآورد رطوبت خاک با استفاده از داده‌های سنجنش از دور و سامانه بیلان انرژی سطح. مهندسی و مدیریت آبخیز، ۱۱ (۳)، ۷۵۹-۷۷۰. SID. <https://sid.ir/paper/234773/fa>
۳. جعفری، ح.، غالبی، س. (۱۳۹۸). راهنمای برنامه ریزی آبیاری گندم با استفاده از نیاز آبی. موسسه تحقیقات آب و خاک. ص ۲۵.

- Northern Iran), The 18th national rice conference of the country, Sari, Iran. In Persian
21. <https://www.mehrnews.com/news/6248328>.
 22. Islamic Republic of Iran Meteorological Organization. (1975). A guide to the needs and limitations of agricultural meteorology of 15 essential plants of Iran, Quanta.
 23. Jamei, M., Baygi, M. M., Oskouei, E. A., & Lopez-Baeza, E. (2020). Validation of the SMOS level 1C brightness temperature and level 2 soil moisture data over the west and southwest of Iran. *Remote Sensing*, 12(17), 1–20. <https://doi.org/10.3390/rs12172819>.
 24. Kim, H., Lee, S., Cosh, M. H., Lakshmi, V., Kwon, Y., & McCarty, G. W. (2020). Assessment and combination of SMAP and Sentinel-1A/B-derived soil moisture estimates with land surface model outputs in the Mid-Atlantic Coastal Plain, USA. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 59(2), 991-1011.
 25. Kim, Y., Park, H., Kimball, J. S., Colliander, A., & McCabe, M. F. (2023). Global estimates of daily evapotranspiration using SMAP surface and root-zone soil moisture. *Remote Sensing of Environment*, 298, 113803.
 26. Kumari, A., Singh, D. K., Sarangi, A., Hasan, M., & Sehgal, V. K. (2024). Optimizing wheat supplementary irrigation: Integrating soil stress and crop water stress index for smart scheduling. *Agricultural Water Management*, 305, 109104.
 27. Li, M., Sun, H., & Zhao, R. (2023). A review of root zone soil moisture estimation methods based on remote sensing. *Remote Sensing*, 15(22), 5361.
 28. McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). "The relationship of drought frequency and duration to time scales." In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology* (pp. 179-184). American Meteorological Society.
 29. Mehrabi, Mohammad, Hamzeh, Saeid, Alavipanah, Seyed Kazem, Kiavarz, Majid, & Ziaee, Ruhollah. (2019). Estimating Soil Moisture Using Remotely Sensed Data And Surface Energy Balance System. *Watershed Engineering and Management*, 11(3), 759-770. Sid. <https://Sid.Ir/Paper/234773/En>
 30. Mladenova, I. E., Bolten, J. D., Crow, W., Sazib, N., & Reynolds, C. (2020). Agricultural drought monitoring via the of SMAP, SMOS, FY3B, AMSR2, and ESA CCI over two dense network regions at different spatial scales. *Remote Sensing*, 10(1), 33.
 12. Das, N. N., Entekhabi, D., Dunbar, R. S., Colliander, A., Chen, F., Crow, W., ... & Njoku, E. G. (2018). The SMAP mission combined active-passive soil moisture product at 9 km and 3 km spatial resolutions. *Remote sensing of environment*, 211, 204-217.
 13. de Souza Machado, A. A., Kloas, W., Zarfl, C., Hempel, S., & Rillig, M. C. (2018). Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems. *Global change biology*, 24(4), 1405-1416.
 14. El Hajj, M., Baghdadi, N., Zribi, M., Rodríguez-Fernández, N., Wigneron, J. P., Al-Yaari, A., ... & Calvet, J. C. (2018). Evaluation of SMOS, SMAP, ASCAT and Sentinel-1 soil moisture products at sites in Southwestern France. *Remote Sensing*, 10(4), 569.
 15. Entekhabi D, Njoku EG, O'Neill PE, Kellogg KH, Crow WT, Edelstein WN, Entin JK, Goodman SD, Jackson TJ, Johnson J, ..., and van Zyl J (2010) The Soil Moisture Active Passive (SMAP) mission. *Proceedings of the IEEE, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.* 98(5):704–716.
 16. Felfelani, F., Pokhrel, Y., Guan, K., & Lawrence, D. (2018). Utilizing SMAP Soil Moisture Data to Constrain Irrigation in the Community Land Model. *Geophysical Research Letters*, 45, 12,892 - 12,902. <https://doi.org/10.1029/2018GL080870>.
 17. Givi, J., 1997, *The Quality Assessment of lands analogy for crops* f'd,d, The water and Soil Research Institute, Journal, No. 1015.
 18. Hain, C. R., Crow, W. T., Anderson, M. C., & Mecikalski, J. R. (2012). An ensemble Kalman filter dual assimilation of thermal infrared and microwave satellite observations of soil moisture into the Noah land surface model. *Water Resources Research*, 48(11).
 19. Hao, Z., Zhao, H., Zhang, C., Wang, H., & Jiang, Y. (2019). Detecting winter wheat irrigation signals using SMAP gridded soil moisture data. *Remote Sensing*, 11(20), 2390.
 20. Hasan Zadeh, K., Farid Hosseini, A., Hasheminia, M., Faridani, F. (2018). Validation of Satellite Surface Soil Moisture Products (Case Study Coastal provinces of

- over the Murrumbidgee Basin, southeast Australia. *Remote Sensing of Environment*, 134: 1-11.
38. Tarek, M., Brissette, F.P. and Arsenault, R., 2020: Evaluation of the ERA5 reanalysis as a potential reference dataset for hydrological modelling over North America: *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(5), 2527-2544.
 39. Velpuri, N. M., Senay, G. B., & Morisette, J. T. (2016). Evaluating new SMAP soil moisture for drought monitoring in the rangelands of the US high plains. *Rangelands*, 38(4), 183-190.
 40. Wackerly, Dennis; Mendenhall, William; Scheaffer, Richard L. (2008). *Mathematical Statistics with Applications* (7 ed.). Belmont, CA, USA: Thomson Higher Education. ISBN 0-495-38508-5.
 41. Wang, J., Ling, Z., Wang, Y., & Zeng, H. (2016). Improving spatial representation of soil moisture by integration of microwave observations and the temperature-vegetation-drought index derived from MODIS products. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 113, 144-154.
 42. Wang, X., Wang, B., Xu, X., Liu, T., Duan, Y., & Zhao, Y. (2018). Spatial and temporal variations in surface soil moisture and vegetation cover in the Loess Plateau from 2000 to 2015. *Ecological indicators*, 95, 320-330
 43. Zhang, J., Zhou, L., Ma, R., Jia, Y., Yang, F., Zhou, H., & Cao, X. (2019). Influence of soil moisture content and soil and water conservation measures on time to runoff initiation under different rainfall intensities. *CATENA*, 182, 104172.
 44. Zhao, W. Sánchez, N. Lu, H. Li. A. 2018. A spatial downscaling approach for the SMAP passive surface soil moisture product using random forest regression. *Journal of hydrology*. 563(1): 1009-1024.
 45. Zhu, H., Zhao, H. L., Jiang, Y. Z., & Zang, W. B. (2018). Studies and application of remote sensing retrieval method of soil moisture content in land parcel units in irrigation area. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 2583-2589.
- assimilation of SMAP soil moisture retrievals into a global soil water balance model. *Frontiers in big Data*, 3, 10. Nogabni, masood saboori, Rajabi, M., & Oskouei, E. A. (2022). Validation and Downscaling of SMAP Satellite Soil Moisture Data by the SMBDA Method Using Sentinel 1 Radar Products and Ground Data in SalehAbad Region of Ilam. *Iran-Water Resources Research*, 17(4), 144-160[in Persian]. http://www.iwrr.ir/article_144201.html
31. Mohamed, E. S., Ali, A., El-Shirbeny, M., Abutaleb, K., & Shaddad, S. M. (2020). Mapping soil moisture and their correlation with crop pattern using remotely sensed data in arid region. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 23(3), 347-353.
 32. Qiu, J., Dong, J., Crow, W. T., Zhang, X., Reichle, R. H., & De Lannoy, G. J. (2021). The benefit of brightness temperature assimilation for the SMAP Level-4 surface and root-zone soil moisture analysis. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(3), 1569-1586.
 33. Reichle, R. H., De Lannoy, G. J., Liu, Q., Ardizzone, J. V., Colliander, A., Conaty, A., ... & Zeng, Y. (2017). Assessment of the SMAP level-4 surface and root-zone soil moisture product using in situ measurements. *Journal of hydrometeorology*, 18(10), 2621-2645.
 34. Reichle, R. H., Liu, Q., Koster, R. D., Crow, W. T., De Lannoy, G. J., Kimball, J. S., ... & Walker, J. P. (2019). Version 4 of the SMAP level-4 soil moisture algorithm and data product. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11(10), 3106-3130.
 35. Singh, A., Gaurav, K., Meena, G. K., & Kumar, S. (2020). Estimation of soil moisture applying modified dubois model to Sentinel-1; a regional study from central India. *Remote Sensing*, 12(14), 2266.
 36. Singh, G., Das, N. N., Panda, R. K., Colliander, A., Jackson, T. J., Mohanty, B. P., ... & Yueh, S. H. (2019). Validation of SMAP soil moisture products using ground-based observations for the paddy dominated tropical region of India. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57(11), 8479-8491.
 37. Su, C.H., D. Ryu, R.I. Young, A.W. Western and W. Wagner. 2013. Inter-comparison of microwave satellite soil moisture retrievals