Iranian Journal of
Rainwater Catchment Systems

مجله علمی سامانه‌های سطوح آبگیر باران

شاپا الکترونیکی: ۲۷۸۳-۱۵۲۱ شاپا چاپی: ۲۴۲۳-۵۹۷۰

بررسی تغییرات مکانی رطوبت خاک پس از بارش‌های سنگین بهاره، استان فارس

محمود احمدی[۱]، محمد کمانگر[۲*]، زینب حزباوی[۳]

۱. دانشیار گروه آب و هواشناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

۲. محقق پسادکتری، گروه آب و هواشناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

۳. استادیار، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، پژوهشکده مدیریت آب، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱

صفحات: ۵۶-۴۳

نوع مقاله: علمی- پژوهشی

چکیده

رطوبت خاک، متغیر مهمی در سیستم‌های اقلیمی، هیدرولوژیکی و اکولوژیکی است که فرآیندهای جوی را به سطح زمین پیوند می‌دهد. سامانه‌های بارشی سال آبی ۹۸-۱۳۹۷به‌طور ناهنجاری باعث بارش‌های بیش‌ازحد نرمال در استان فارس شده و تغییرات عمده در رطوبت سطحی خاک را ایجاد کردند. هدف از این پژوهش تحلیل مکانی تغییرات رطوبت خاک قبل و پس از بارش‌های سنگین بهاره در استان فارس با استفاده از تصاویر ریزمقیاس‌سازی شده راداری است. با استفاده از باندهای پس پراکنش پلاریزاسیون‌های VV و VH و نیز باند زاویه برخورد (θ) مستخرج از تصاویر راداری Sentinel_1 و کاربری اراضی مستخرج از سنجنده مادیس یک‌لایه آموزشی ایجاد شده و با استفاده از الگوریتم ماشین بردار پشتیبان نقشه ریزمقیاس‌سازی رطوبت خاک به‌دست آمد. نتایج نشان داد که رطوبت حجمی خاک با قدرت تفکیک بالا بین ۰/۱۸ تا ۰/۳۸ در سال پر بارش و بین ۰/۱۲ تا ۰/۲۴ برای بلندمدت است. نقشه ناهنجاری نشان داد که بین ۰/۱۴ و ۰/۱۸ مترمکعب بر رطوبت خاک افزوده شده است. ناهنجاری مثبت بیش‌تر در شرق و جنوب استان بوده و مناطق کم رطوبت‌تر سهم ناهنجاری مثبت بیش‌تری را تجربه کرده‌اند. آماره شاخص موران با مقدار ۰/۹۹ خودهمبستگی مکانی ناهنجاری رطوبت خاک و خوشه‌ای بودن افزایش رطوبت را نیز مورد تأیید قرار داده است. در مجموع می‌توان نتیجه‌گیری کرد که با استفاده از نتایج این روش می‌توان نسبت به پایش مناطق با ناهنجاری کم یا زیاد از نظر رطوبت خاک را پس از بارش‌های مختلف اقدام کرد و از نتایج آن در بهبود فرآیند تصمیم‌گیری‌ها استفاده کرد.

کلمات کلیدی: تفکیک مکانی، رادار، شاخص موران، طبقه‌بندی بردار پشتیبان، فرآیند جوی.

مقدمه

رطوبت خاک متغیر اساسی در چرخه‌های آب و اقلیم است (Morbidelli et al., 2016) که نقش مهمی در درک ما از تعامل جو و سطح زمین دارد (Chul et al., 2020). رطوبت سطحی خاک با وجود سهم اندک آن در چرخه هیدرولوژی (۰/۱۵ درصد) یکی از اجزاء مهم اثرگذار پوسته زمین محسوب می‌شود زیرا نقش کنترل‌کننده بین سطح و اتمسفر زمین و نیز گردش آب، انرژی و کربن در طبیعت را ایفا می‌کند (بابائیان و همکاران، ۱۳۹۲). هم‌چنین، رطوبت خاک یک متغیر مهم چرخه هیدرولوژیکی است که با خطرات طبیعی مرتبط بوده و برای درک فرآیندهای حدی اقلیمی از جمله سیل و خشک‌سالی مورد توجه محققان و نیز بهره‌برداران عملی مانند کشاورزان یا مؤسسات حفاظت مدنی قرار گرفته است (Jason et al. 2016). هم‌چنین رطوبت خاک نقش کلیدی در چرخه جهانی انرژی دارد و کنترل‌کننده فرایند تبدیل انرژی در دسترسی به گرمای نهان و گرمای محسوس است (Vereecken et al., 2014). رطوبت خاک در فصل‌های بارانی تقریباً دارای

* Email: mohamad.kamangar63@gmail.com نویسنده مسئول: محمد کمانگر

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1401.10.4.4.9]

مقدار ثابتی است اما طی دوره رشد و با کاهش بارندگی، تفاوت نسبی در مقادیر رطوبت مشاهده می‌شود. Xu و همکاران (۲۰۱۶) تراکم ریشه را عامل اصلی این تفاوت دانسته‌اند. رطوبت و دمای خاک نیز با یک‌دیگر ارتباط داشته و متأثر از آب نفوذ یافته باران است (Yoshioka et al., 2015) پایش توزیع مکانی و زمانی رطوبت سطحی یکی از اقدامات اثربخش در مدیریت آب‌وخاک است (کوه‌بنانی و یزدانی، ۱۳۹۷). در نتیجه تهیه نقشه‌های رطوبت خاک با دقت بالا درک ما را از آب‌وهوای منطقه بهبود می‌بخشد (Tabatabaeenejad et al., 2014).

تغییرات مکانی و زمانی رطوبت خاک بسیار متنوع است، در حال حاضر (سال ۱۴۰۱) هیچ شبکه جهانی از داده‌های زمینی برای نظارت بر رطوبت خاک وجود ندارد. دمای سطحی خاک، میزان بارندگی و دمای هوا از جمله خصوصیات مؤثر و مورد بررسی در روش‌های برآورد رطوبت خاک هستند. روش‌های میدانی برآورد رطوبت خاک مانند روش وزنی و انعکاس‌سنجی حوزه زمانی در سطح محلی دقت بالایی دارند؛ اما برای یک منطقه بزرگ، بسیار پرهزینه و زمان‌بر هستند. روش‌های معمول اندازه‌گیری رطوبت خاک در مقیاس زمانی و مکانی مناسب نیستند (Mekonnen et al., 2009). جهت پایش سراسری رطوبت خاک در محدوده‌های وسیع و با هدف کاهش هزینه و زمان، می‌توان از مدل‌ها و تصاویر سنجش‌ازدور استفاده کرد. با استفاده از باندهای مختلف تصاویر سنجش‌ازدور و الگوریتم‌های متنوع می‌توان میزان رطوبت سطحی و زیرسطحی خاک را به‌طور مکرر در بازه‌های زمانی متفاوت پایش و اندازه‌گیری کرد. برآورد رطوبت خاک نیز با استفاده از سنجش‌ازدور در محدوده‌های نوری، مادون‌قرمز و کهموج فعال و غیرفعال انجام می‌گیرد که هر کدام مزایا و معایب خاص خود را دارند (خانمحمدی و همکاران، ۱۳۹۳).

جهت استخراج رطوبت خاک از تصاویر ماهواره‌ای شاخص رطوبت خاک مثلثی با استفاده از باند قرمز و مادون‌قرمز نزدیک تصاویر لندست همبستگی ۰/۶۷ و ۰/۶۱ با مقادیر واقعی محاسبه شده است (کوه‌بنانی و یزدانی، ۱۳۹۷). هم‌چنین با اضافه نمودن شاخص تفاضلی نرمال شده گیاهی، ضریب تبیین ۰/۷۸ در مدل رگرسیونی شاخص مناسبی برای پهنه‌بندی رطوبت خاک در مناطق خشک و بیابانی معرفی شده است. اگر چه در حال حاضر سنجنده‌هایی از جمله SMOS، ماهواره‌های Fengyun 3B، Fengyun 3C[1]، AMSR2[2] و SMAP[3]، رطوبت خاک در سراسر سطح زمین را برآورد می‌کنند اما به‌علت قدرت تفکیک مکانی پایین این سنجنده‌ها برای مطالعات منطقه‌ای دقت کافی را ندارند. در برابر الگوریتم‌های خطی و غیرخطی مستخرج از باندهای مختلف تصاویر ماهواره‌ای اخیراً تکنیک‌های یادگیری پشتیبان ماشین برای بهبود داده‌های رطوبت خاک با تفکیک مکانی پایین ماهواره‌های مختلف معرفی شده است (Bai et al., 2019). ریزمقیاس‌سازی رطوبت خاک با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای مادیس[4]، ماهواره اسمپ[5]، دمای سطح زمین و شاخص پوشش گیاهی و روش رگرسیون چندمتغیره را بررسی کردند که بر اساس اعتبارسنجی صورت گرفته ریزمقیاس‌سازی داده‌های سنجش‌ازدور رطوبت خاک با این روش فقط جهت ارزیابی‌های کلی تحقیقاتی و نه عملیاتی کاربرد دارد (Tu, 2019). دقت برآورد رطوبت حجمی خاک با استفاده از روش‌های رگرسیون بردار پشتیبان و شبکه عصبی مصنوعی بر تصاویر Sentinel_1 محاسبه شده است که نتایج بهترین ضریب همبستگی ۰/۶۹ برای تصاویر Sentinel_1 یک با روش رگرسیون بردار پشتیبان و کم‌دقت‌ترین ضریب همبستگی ۰/۴۹ با روش شبکه عصبی مصنوعی چندلایه پرسپترون به‌دست آمده است (رنجبر و آخوندزاده، ۱۳۹۸). استخراج ناهنجاری‌های رطوبت خاک از سامانه جهانی ادغام داده‌های زمین (GLDAS) با استفاده از تصاویر راداری Sentinel_1 ریزمقیاس‌سازی شد که نتایج آن‌ها همبستگی ۰/۷ را با داده‌های زمینی نشان داد (Greifeneder et al., 2019).

[1] Feng-Yun means “Wind and Cloud”.
[2] Advanced Microwave Scanning Radiometer 2
[3] Soil Moisture Active Passive
[4] MODIS- Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
[5] SMAP- Soil Moisture Active Passive

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-23]

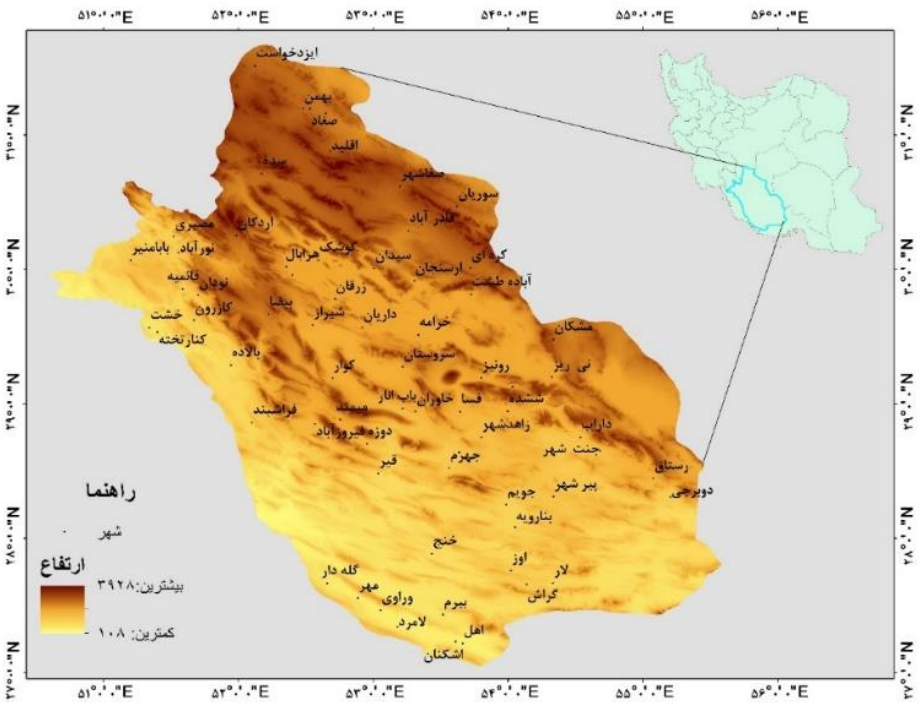
[DOR: 20.1001.1.24235970.1401.10.4.4.9]

با بررسی تحقیقات گذشته، اهمیت سنجش از دور در استخراج رطوبت خاک آشکار است اما در مطالعات پیشین، بیش‌تر به بررسی تک‌بعدی و مدل‌های استخراج رطوبت خاک پرداخته شده و کم‌تر تحلیل مکانی و تغییرات زمانی آن بررسی شده است. از آن‌جا که متغیرهای مکانی اقلیمی و محیطی نقش مؤثری در تغییرات مکانی رطوبت خاک دارند، مطالعه حاضر با هدف شناخت تغییر رفتار رطوبت خاک در استان فارس در سال پربارش ۹۸-۱۳۹۷ برنامه‌ریزی شد که در این راستا، نسبت به نرمال رطوبت خاک با استفاده از ریزمقیاس‌سازی لایه رطوبت خاک سامانه جهانی ادغام داده‌های زمین و تحلیل مکانی تاثیر عوامل مختلف مؤثر بر این پدیده نیز پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه

استان فارس در جنوب منطقه مرکزی ایران بین عرض‌های جغرافیایی "۴۲ '۳۱ °۲۷ تا "۲۳ '۳۷ °۳۱ شمالی تا "۱۴ '۳۲ °۵۵ تا "۴۱ '۳۰ °۵۰ شرقی با وسعت ۱۲۲/۷۹۹ کیلومترمربع قرار گرفته است (شکل ۱). این استان از شمال با استان اصفهان و یزد، از مغرب با استان‌های کهگیلویه و بویراحمد و بوشهر، از جنوب با استان هرمزگان و از شرق با استان کرمان همسایه است. بر طبق آخرین تقسیمات کشوری سال ۱۴۰۰ خورشیدی، استان فارس دارای ۳۷ شهرستان، ۹۷ بخش و ۱۲۰ شهر است. کوه‌های زاگرس با جهت شمال غربی-جنوب شرقی استان فارس است. قسمت عمده این ناهمواری‌ها بر اثر یک سلسله حرکات شدید کوهزایی ایجاد شده و تحت تأثیر عوامل فرسایشی نظیر بادهای تند و آب‌های روان به‌صورت کنونی درآمده است. استان فارس را می‌توان به دو ناحیه مشخص طبیعی تقسیم کرد: الف- ناحیه شمالی و شمال غربی که از ارتفاعات به هم پیوسته‌ای تشکیل شده و ب- ناحیه جنوب و جنوب شرقی که در فاصله میان رشته‌کوه‌های فرعی قرار گرفته و شامل دشت‌های حاصل‌خیز است. بر اساس تقسیم‌بندی به روش تحلیل عاملی که حاتمی بهمن بیگلو و خوشحال دستجردی (۱۳۸۹) انجام داده چهار ناحیه اقلیمی در این استان قرار گرفته که ناحیه سرد و خشک شمالی، ناحیه معتدل و مرطوب مرکزی، ناحیه گرم و نیمه مرطوب غربی و ناحیه گرم و خشک جنوبی را در بر می‌گیرد.



شکل (۱): موقعیت و ارتفاعات محدوده مورد مطالعه در ایران

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1401.10.4.4.9]

روش تحقیق

- ریزمقیاس‌گردانی

شرط اصلی برای ریزمقیاس‌سازی و بازیابی رطوبت خاک، استخراج رابطه بین شدت بازگشت باند c رادار (σ^0) و رطوبت خاک بزرگ‌مقیاس است (Ulaby & Batlivala, 1978). بر همین اساس، در تحقیق حاضر ابتدا جهت استخراج و ریزمقیاس‌سازی لایه رطوبت حجمی و تبیین بهتر توزیع پراکندگی رطوبت، ابتدا لایه رطوبت خاک با قدرت تفکیک مکانی ۰/۲۵ درجه از سامانه جهانی ادغام داده‌های زمین[1] استخراج شد. این سامانه محصولات داده‌های مشاهده‌ای و زمینی و ماهواره‌ای را با استفاده از روش‌های پیشرفته مدل‌سازی سطح زمین و روش‌های ادغام پیشرفته داده، تولید می‌کند. پوشش جهانی، قدرت تفکیک مکانی و زمانی بالا به همراه سیستم مدل‌سازی ترکیبی داده‌های سنجش‌ازدوری و مشاهدات زمینی، ویژگی منحصربه‌فرد این مدل است (Liu et al., 2009). این مدل به‌طور مشترک توسط دانشمندان سازمان ملی هوانوردی و فضا (ناسا) مرکز فضایی پروازهای گودارد، سازمان ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی و مرکز بین‌المللی پیش‌بینی محیط‌زیست به‌منظور تولید محصولات مختلف توسعه داده شده است (Rodell et al., 2004). با توجه به طول دوره آماری مناسب و نیز به‌روز بودن این داده‌ها می‌توان با اطمینان از این داده‌ها در کنار داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی برای مطالعات مختلف اقلیم‌شناسی، آب‌شناسی و محیطی در مناطق مختلف کشور استفاده نمود (میری و همکاران، ۱۳۹۶). نسخه ۲/۱ سامانه جهانی ادغام داده‌های زمین در تاریخ یک ژانویه ۲۰۰۰ شبیه‌سازی‌شده و از تاریخ ۱ مارس ۲۰۰۱ به بعد با قدرت تفکیک مکانی ۰/۲۵ درجه در دسترس عموم قرار گرفته است.

باندهای موجود در تصاویر راداری حساسیت زیادی به رطوبت حجمی سطح خاک دارند. در نتیجه می‌توان از آن‌ها در شناسایی رطوبت خاک استفاده نمود. مأموریت Sentinel_1 مجموعه کوپرنیکوس شامل دو ماهواره اس یک و اس دو با اختلاف‌فاز ۱۸۰ درجه نسبت به هم و مجهز به سیستم که موج فعال در باند C است که در سال ۲۰۱۴ جهت پایش سطح زمین از طرف اتحادیه اروپا بیان شده است. به‌علت استفاده سیستم فعال کهموج با روزنه مصنوعی حساسیت آن نسبت به شرایط بد جوی و حتی ابرها کم است و قادر به دریافت تصاویر مستقل از خورشید به‌عنوان منبع نور است. این سنجنده قابلیت دریافت تصویر به‌صورت قطبش‌های دوگانه HH، HV، VV و VH را دارد. قدرت تفکیک مکانی ۵ تا ۲۰ متر بازه زمانی برداشت ۶ روزه، پوششی در عرض ۲۵۰ تا ۴۰۰ کیلومتر از دیگر خصوصیات این سنجنده است.

ماهواره Sentinel-1 داده‌ها را از یک دستگاه رادار دیافراگم مصنوعی (SAR) با باند C دو قطبی در فرکانس ۵.۴۰۵ گیگاهرتز (باند C) جمع آوری می‌کند. این مجموعه شامل تمام فریم های GRD است. هر فریم دارای یکی از ۳ وضوح (۱۰، ۲۵ یا ۴۰ متر)، ۴ ترکیب باند (مرتبط با قطبش صحنه) و ۳ حالت‌ساز است. استفاده از مجموعه در زمینه موزاییک احتمالاً نیازمند فیلتر کردن به مجموعه ای همگن از باندها و پارامترها است. بسته به تنظیمات پلاریزاسیون دستگاه، هر فریم شامل ۱ یا ۲ باند از ۴ باند پلاریزاسیون ممکن است. ترکیبات ممکن عبارتند از تک باند VV یا HH و دو باند VV+VH و HH+HV:

VV: تک قطبی شدن، انتقال عمودی/دریافت عمودی

HH: تک قطبی شدن، ارسال افقی/دریافت افقی

VV + VH: قطبش متقابل دو باند، انتقال عمودی / دریافت افقی

HH + HV: قطبش متقاطع دو باند، انتقال افقی / دریافت عمودی

هر فریم شامل یک باند «زاویه» اضافی است که شامل زاویه تقریبی فرود از بیضی بر حسب درجه در هر نقطه است. این باند با درون یابی ویژگی "incidenceAngle" فیلد شبکه بندی شده "geolocationGridPoint" ارائه شده ایجاد می‌شود. دو پارامتر دیگر نیز یعنی پوشش سطح و پوشش گیاهی که در ریزمقیاس‌سازی تأثیرگذار هستند، از تصاویر کاربری اراضی

[1] https://ldas.gsfc.nasa.gov/gldas

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1401.10.4.4.9]

سنجنده مادیس استخراج شدند. سنجنده MODIS در هر دو فضاپیمای Terra و Aqua کار می‌کند. وسعت دید آن ۲۳۳۰ کیلومتر است و هر یک تا دو روز یک‌بار کل سطح زمین را مشاهده می‌کند. آشکارسازهای آن ۳۶ باند طیفی بین ۰.۴۰۵ و ۱۴.۳۸۵ میکرومتر را اندازه‌گیری می‌کنند و داده‌ها را در سه وضوح فضایی - ۲۵۰ متر، ۵۰۰ متر و ۱۰۰۰ متر به دست می‌آورند. بسیاری از محصولات داده‌ای که از مشاهدات MODIS به دست می‌آیند، ویژگی‌های زمین، اقیانوس‌ها و جو را توصیف می‌کنند که می‌توانند برای مطالعات فرآیندها و روندها در مقیاس محلی تا جهانی مورد استفاده قرار گیرند. محصول کاربری زمین ترکیبی MODIS Terra+Aqua دارای پنج طرح برای طبقه‌بندی کاربری های زمین است که از طریق روش طبقه‌بندی درخت تصمیم نظارت شده به دست می آید. طرح اولیه پوشش زمین، ۱۷ طبقه تعریف شده توسط IGBP، شامل ۱۱ طبقه پوشش گیاهی ، سه طبقه تغییر یافته توسط انسان، و سه طبقه بدون پوشش گیاهی را ارائه می‌کند. با ترکیب لایه‌های مذبور یک‌لایه آموزشی به‌دست آمد در نتیجه می‌توان برای رطوبت خاک یک رابطه غیرخطی با پارامترهای ذکر شده ایجاد کرد (Greifeneder et al., 2016) و با روش طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان لایه‌ریز مقیاس‌گردانی شده را از لایه با قدرت تفکیک بالا استخراج شد.

روش ماشین بردار پشتیبان یک طبقه‌بندی کننده دودویی غیر پارامتریک است که پیکسل‌ها در تصویر با هر نمونه آموزشی مقایسه شده و به کلاس‌های پوشش زمین بر اساس الگوریتم‌های معین تخصیص داده می‌شوند. مبنای کاری دسته‌بندی‌کنندهٔ ماشین بردار پشتیبان دسته‌بندی خطی داده‌هاست و تلاش می‌کند تا با جستجوی مستقیم برای یافتن مرزهای مناسب (فرا صفحه‌های جداکننده) بین کلاس‌های مختلف آن‌ها را از هم جدا کند. راستای فرا صفحه‌ها جایی است که بیش‌ترین فاصله (جدایی) بین دو کلاس وجود دارد. در واقع در تقسیم خطی داده‌ها سعی می‌کنیم خطی را انتخاب کنیم که حاشیه اطمینان بیش‌تری داشته باشد. مشخص است که در بین نمونه‌های آموزشی همواره زیرمجموعه‌ای وجود دارد که بتواند بهترین مرز تصمیم‌گیری را تعریف کند (Foody et al., 2006). برای محاسبه مرز تصمیم‌گیری دو کلاس کاملاً جدا از هم از روش حاشیه بهینه استفاده می‌شود. در این روش مرز خطی بین دو کلاس به‌گونه‌ای محاسبه می‌شود که:۱- تمام نمونه‌های کلاس ۱+ در یک‌طرف مرز و تمام نمونه‌های کلاس الف- در طرف دیگر مرز واقع شوند. ب- مرز تصمیم‌گیری به‌گونه‌ای باشد که فاصله نزدیک‌ترین نمونه‌های آموزشی هر دو کلاس از یکدیگر در راستای عمود بر مرز تصمیم‌گیری تا جایی‌که ممکن است حداکثر شود (Taruvinga, 2008).

- بازه زمانی مورد انتخاب شده

سال آبی ۹۸-۱۳۹۷ با ورود سامانه‌های بارشی متعددی به ایران همراه بود و به‌طور ناهنجاری باعث بارش‌های بیش‌ازحد نرمال شدند. متغیر اقلیمی باران به‌عنوان مهم‌ترین متغیر اقلیمی مؤثر بر رطوبت خاک است (Falloon et al., 2015). از این‌رو این سال آبی به‌عنوان دوره پربارش و میانه تصاویر در بازه زمانی ۱۳۹۸-۱۳۹۲ که تصاویر راداری در دسترس بود به‌عنوان نرمال بودن رطوبت خاک جهت مطالعه انتخاب شدند. در این تحقیق از میانه مقادیر برآوردی تصاویر استفاده شد. مقادیر عددی پیکسل‌های تصاویر به دلیل شرایط ابری، شرایط متغیر پوشش زمین و یا خطاهای رادیومتریکی تحت تاثیر قرار می‌گیرند و شاخص میانگین ممکن است نتایجی دور از نقطه تمرکز واقعی را نشان دهد اما شاخص میانه کم‌تر تحت تأثیر عدم وجود داده در زمانی خاص و یا فرین‌های آب و هوایی قرار می‌گیرد. جهت استفاده در کارهای دیگران، الگوریتمی برای کاربران ثبت‌نام‌شده در سامانه Google Earth Engine آورده شده است[1].

- صحت‌سنجی

پس از اجرای روش طبقه‌بندی لازم است مدل به‌دست‌آمده صحت سنجی شود؛ جهت صحت‌سنجی خروجی از داده‌های میدانی برداشت شده از مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس که با استفاده از حس‌گرهایی که در عمق ۴۰، ۲۰، ۱۰، ۵ سانتی‌متری نصب‌کرده و هر ۳۰ دقیقه اطلاعات را از شش مزرعه نمونه ارسال می‌کنند دریافت کرده و

[1] https://code.earthengine.google.com/7d1b2fa43d046dcfe61dc53d45681396

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1401.10.4.4.9]

میانگین داده‌ها به‌عنوان نمونه زمینی برای ارزیابی این روش به‌کار گرفته شد که به‌منظور ارزیابی کارایی مدل به‌دست‌آمده از شاخص‌های R^2 و RMSE استفاده شد. RMSE ریشه متوسط مجذور خطاها، نیز توصیف‌کننده متوسط خطاها است (رابطه ۱). رابطه ولی چون قبل از میانگین‌گیری خطا را به توان می‌رساند، خطاها را وزن‌دهی می‌کند و خطاهای بزرگ وزن بیش‌تری می‌گیرند.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(Q_i - \hat{Q}_i)^2} \quad (۱)$$

در رابطه بالا شده Q_i و $\hat{Q}_i$ به‌ترتیب i امین داده واقعی و شبیه‌سازی‌شده و n تعداد کل نمونه‌های مورد ارزیابی است. RMSE مقادیری از صفر تا بی‌نهایت را دریافت می‌کنند و هر چه مقدار آن‌ها کم‌تر باشد بهتر است. یکی دیگر از معیارها R^2 است (رابطه ۲). این معیار هر چه به یک نزدیک‌تر باشد مناسب‌تر است (Adamowski & Chan, 2011).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(Q_i - \hat{Q}_i)^2}{\sum Q_i^2 - \frac{\sum \hat{Q}_i^{\,2}}{n}} \quad (۲)$$

در این تحقیق ریزمقیاس‌سازی رطوبت خاک بر اساس کار Pasolli و همکاران (۲۰۱۵) و Greifeneder و همکاران (۲۰۱۶) و در ایجاد یک لایه آموزشی بر اساس روش طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان و با تابع‌های موجود در سامانه Google Earth Engine اجرا شد.

- تحلیل مکانی

با استفاده از تحلیل مکانی در قالب علم زمین‌آمار می‌توان ساختارهای فضایی را شناسایی و برنامه‌ریزی‌های مکانی را انجام داد. فرآیند تحلیل فضایی توصیف چگونگی و استدلال چرایی پراکندگی‌ها را شامل می‌شود (علیجانی، ۱۳۹۴). نتیجه این فرآیند تولید دانش علمی مستند و نهایتاً تبیین پراکندگی است (Harvey, 1969). اندازه‌گیری توزیع مکانی داده‌ها این امکان را فراهم می‌کند تا تغییرات توزیع فضایی در راستای مولفه‌های مکانی یعنی طول، عرض و ارتفاع قابل بررسی و مقایسه باشد. برای محاسبه شاخص‌های مکانی گرانیگاه (مرکز میانگین، بیضوی انحراف استاندارد) از روش‌های مختصات طولی (x_c) و عرضی (y_c) آن‌ها از رابطه‌های (۳) و (۴) استفاده شد.

$$X_C = \frac{\sum_{i=1}^{n} T_i x_i}{\sum_{i=1}^{n} Ti} \quad (۳)$$

$$Y_C = \frac{\sum_{i=1}^{n} T_i y_i}{\sum_{i=1}^{n} T_i} \quad (۴)$$

در اینجا xi و yi مختصات عارضه i و $\bar{X}, Y$ به‌ترتیب میانگین مرکزی عوارض ، n برابر با تعداد کل عوارض و T_i وزن عارضه i ام در لایه مورد تحلیل است. برای به‌دست آوردن الگوی مکانی رطوبت خاک و این‌که آیا رطوبت خوشه‌ای است یا نه روش‌های مختلفی وجود دارد. با توجه به قانون جغرافیایی اصل نزدیکی- همانندی آزمون خودهمبستگی فضایی رویدادها و پدیده های آب و هوایی می‌تواند حاوی اطلاعات ارزشمندی باشد (عساکره و سیفی‌پور، ۱۳۹۱). برای مثال، رابطه فضایی معنی‌دار بیان‌گر ارتباط همسایگی معنی‌دار بین نواحی مجاور است. شناسایی این روابط می‌تواند در تشخیص مرزهای آب و هوایی و نیز تعیین اثر عوامل مکانی بر رفتار پدیده‌ها حائز اهمیت باشد. بررسی الگوی پراکندگی خوشه‌ای بودن مکانی رویدادها، در برابر «فرض مقابل» یعنی تصادفی بودن است (Haining, 2004). نمایه موران یکی از شاخص‌های برآورد تجمع مکانی پدیده‌هاست که با استفاده از رابطه (۵) قابل برآورد است (Dai et al., 2010).

$$I = \frac{n\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} w_{ij}(x_i - \bar{x})}{\left(\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} w_{ij}\right)\sum_{j=1}^{n} w_{ij}(x_i - \bar{x})^2} \quad (۵)$$

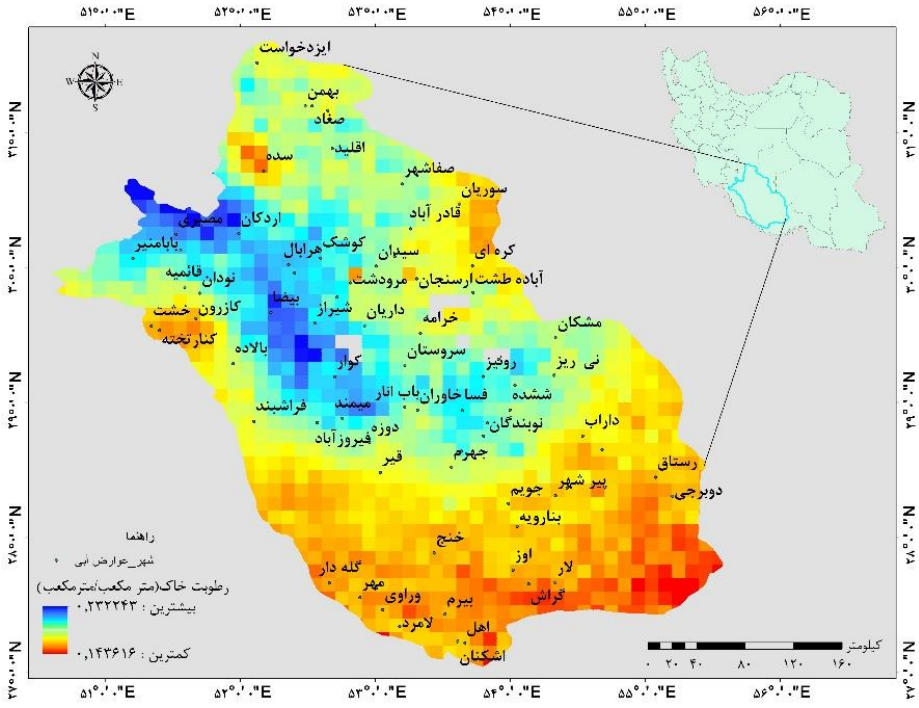
[Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1401.10.4.4.9]

در این رابطه، n تعداد پدیده‌ها، x_i اندازه مشاهده‌شده روی مکان پدیده i ام، $\overline{x}$ میانگین x_i هاست. y_{ij} اندازه وزن متعلق به i و j است که بر اساس مجاورت برآورد شده و نشان‌دهنده میزان وابستگی فضایی است. مجموع وزن‌ها در ماتریس وزن‌های $\{w_{ij}\}$ گویای اندازه مجموعه روابط فضایی مفروض بین نواحی است (Haining, 2004) که به روش‌های مختلفی قابل محاسبه‌اند. یکی از راه‌ها، به کارگیری وزن‌هایی با ارزش صفر و یک (دو دوئی) است. در این حالت، اگر نواحی i و j هم‌مرز باشند، $w_{ij} = 0$ خواهد بود. آماره موران کلی مانند ضریب خودهمبستگی بین ۱+ و ۱- بوده و تفسیر مشابهی دارد. مقادیر نزدیک به ۱+ گویای الگوی مکانی قوی است. مقادیر نزدیک به ۱- گواهی بر خودهمبستگی مکانی منفی بوده و گویای این است که مقادیر با ارزش بالا نزدیک مقادیر با ارزش کم هستند (وضعیت نادر) و در نهایت، مقدار نزدیک صفر، عدم الگوی مکانی (تصادفی مکانی) را نشان می‌دهد. بنابراین، اگر مقادیر آماره برای دونقطه مجاور مثبت یا منفی باشد، به معنی این است که مقادیر دو نقطه مذکور بالاتر از میانگین باشد، همبستگی مکانی منفی است (Gail et al., 2007)؛ سپس نمره Z، در یک سطح اطمینان دلخواه ارزیابی می‌شود. در سطح اطمینان ۹۵ درصد اگر قدر مطلق نمره Z مشاهده شده Z(I) بزرگ‌تر از نمره Z بحرانی (۱/۹۶±) باشد؛ فرض صفر در سطح اطمینان مذکور رد شده و معنی‌داری روابط قابل استنباط خواهد بود (عساکره و شادمان، ۱۳۹۴).

نتایج و بحث

نقشه رطوبت خاک مستخرج از سامانه جهانی ادغام داده‌های زمین رطوبت خاک استان فارس را بین ۰/۱۴ تا ۰/۲۲ مترمکعب بر مترمکعب که واحدی عمومی برای نشان دادن رطوبت خاک است تخمین زده است (شکل ۲) اختلاف بین بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار رطوبت خاک در محدوده مورد مطالعه تقریبا دو برابر است. بیش‌ترین مقدار رطوبت خاک مربوط به شمال غرب در حوالی مصیری و کم‌ترین مقدار جنوب شرق استان فارس است یعنی به‌طرف شرق کشور رطوبت خاک کم‌تر می‌شود.

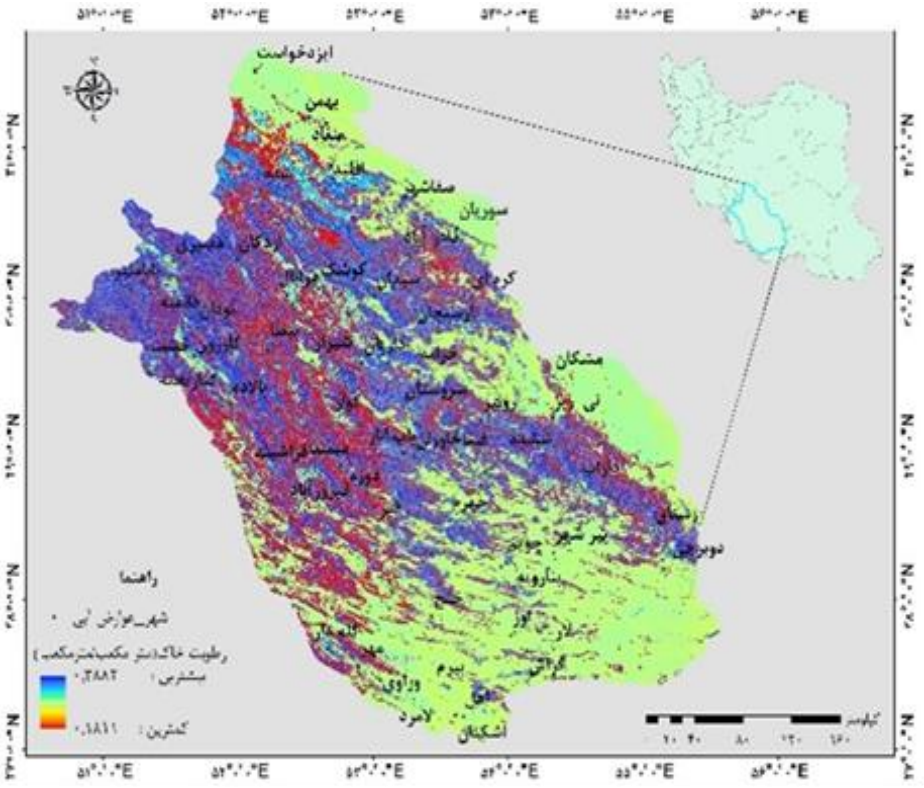


شکل (۲): پراکندگی رطوبت خاک شبیه‌سازی‌شده سامانه جهانی ادغام داده‌های زمین

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1401.10.4.4.9]

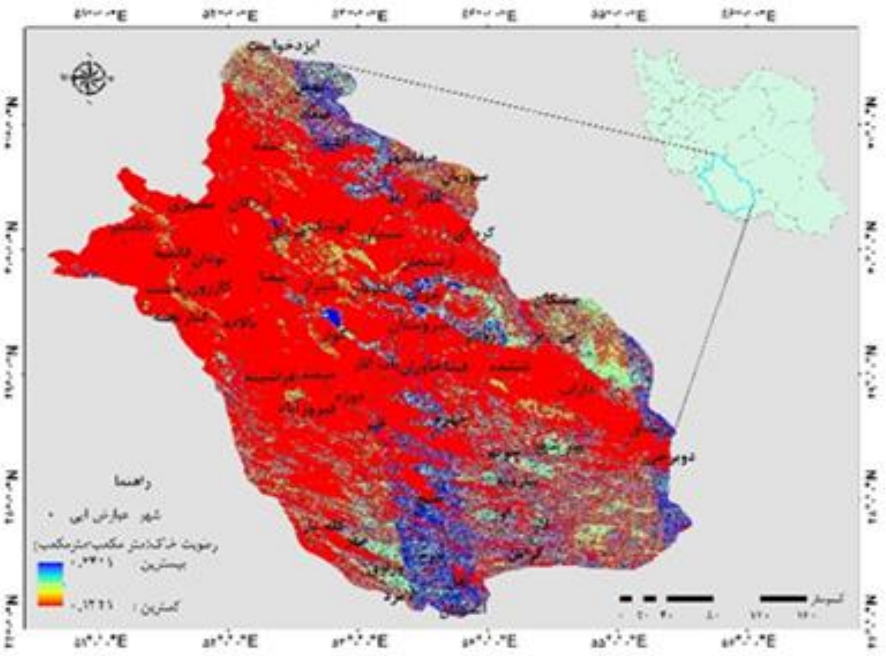
پس از اجرای الگوریتم پیاده‌سازی شده در Google Earth Engine لایه رطوبت خاک با قدرت تفکیک مکانی بالا (شکل ۳) بین ۰/۱۲ تا ۰/۱۴ مترمکعب بر مترمکعب در میانگین هشت ساله (۲۰۱۴-۲۰۱۸) به‌عنوان هنجار رطوبت خاک که داده در دسترس بود، به‌دست آمد. کم‌ترین پیکسل نقشه‌ای پایین‌ترین مقدار و بزرگ‌ترین پیکسل بیش‌ترین مقدار را به خود اختصاص دادند که نشان‌دهنده این واقعیت است نقشه‌های رطوبت در سامانه جهانی ادغام داده‌های زمین میانگین‌گیری از چندین پیکسل در محدوده‌های مطالعاتی را ارائه می‌دهند و برای کارهای در مقیاس مزرعه نمی‌تواند به‌کار گرفته شود. لایه رطوبت خاک با قدرت تفکیک مکانی بالا (شکل ۴) بین ۰/۱۸ تا ۰/۳۸ مترمکعب بر مترمکعب در سال آبی ۹۷-۹۸ که با ورود سامانه‌های بارشی متعددی به ایران همراه بود به‌دست آمد.



شکل (۳): هنجار پراکندگی رطوبت خاک

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1401.10.4.4.9]

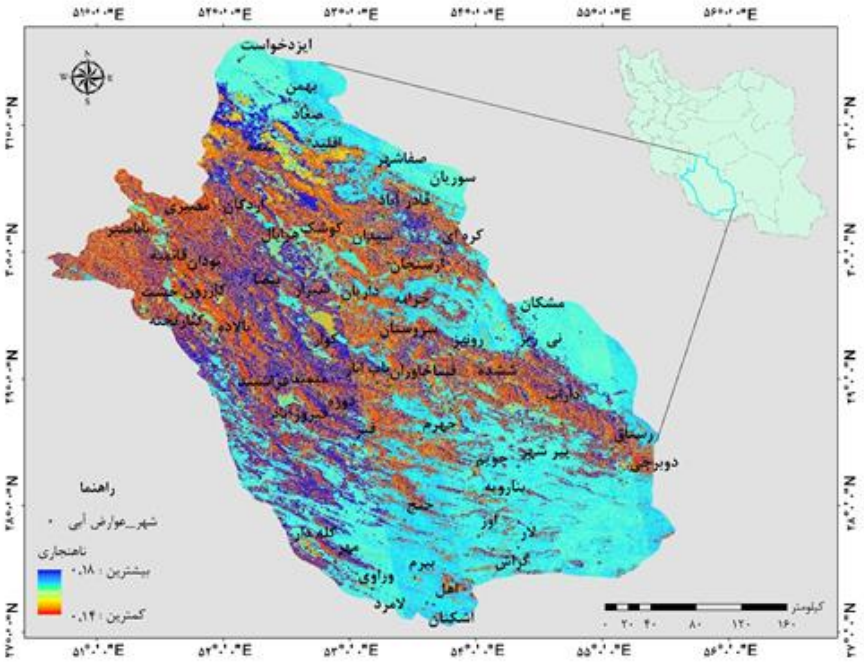


شکل (۴): پراکندگی رطوبت خاک در سال پربارش

با مقایسه نزدیک‌ترین پیکسل‌های لایه قدرت تفکیک بالا با داده‌های ایستگاهی مزارع نمونه استان واقعی جذرمربع خطا و ضریب همبستگی به‌ترتیب ۰/۱۳ و ۰/۶۳ برای میانگین نقشه نرمال و ۰/۱۷ و ۰/۵۷ برای سال پرآبی به‌دست آمد. سپس ناهنجاری رطوبت خاک مطابق شکل (۵) به‌دست آمده و تحلیل مکانی شد. اصطلاح ناهنجاری رطوبت خاک به معنای انحراف از مقدار مرجع یا میانگین بلندمدت است. یک ناهنجاری مثبت نشان می‌دهد که رطوبت خاک مشاهده شده بیش‌تر از مقدار مرجع بوده است، در حالی‌که یک ناهنجاری منفی نشان می‌دهد که رطوبت خاک مشاهده شده کم‌تر از مقدار مرجع بوده است. همان‌طور که در شکل (۶) نیز آورده شده، مقدار ناهنجاری مثبت و بین ۰/۱۴ و ۰/۱۸ و به‌طور متوسط ۰/۱۶ مترمکعب بر مترمکعب در استان افزایش یافته است. مناطق کم رطوبت‌تر سهم ناهنجاری مثبت بیش‌تری را تجربه کرده‌اند. ناهنجاری مثبت بیش‌تر در شرق و جنوب استان بوده است. مناطق شمال و غرب که رطوبت بیش‌تری داشته‌اند کم‌تر دچار افزایش رطوبت شده‌اند.

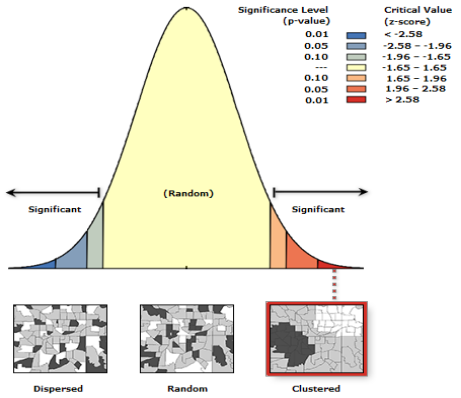
[Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1401.10.4.4.9]



شکل (۵): ناهنجاری رطوبت خاک پس از بارش‌های سنگین

مقدار شاخص ۰/۹۹ موران مکانی با p-value= ۰/۰۰ محاسبه شد (جدول ۱). با در نظر گرفتن مقادیر هر پیکسل و شاخص‌های جدول یک نشان داده شد که ناهنجاری پراکندگی رطوبت در سال پربارش الگوی خوشه‌ای دارد. با بررسی نقشه‌های موجود می‌توان بیان کرد که خوشه‌بندی‌های ناهنجاری مثبت خاک بیش‌تر در ارتفاعات کم‌تر از ۱۰۰۰ متر قرار گرفته‌اند و خوشه‌بندی کمی در ارتفاعات بالای محدوده مورد مطالعه وجود دارد.



شکل (۶): نحوه خوشه‌بندی ناهنجاری رطوبت

جدول (۱): خلاصه آماره کلی موران محاسبه‌شده

شاخص موران	شاخص مورد انتظار	واریانس	Z-score	P-value
۰/۹۹	۰/۰۰۰۰۸-	۰/۰۰۰۰۴	۲۹۴/۸۶	۰/۰۰۰

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1401.10.4.4.9]

پایش و تحلیل مکانی رطوبت خاک می‌تواند یکی از بررسی‌های مهم جهت برنامه‌ریزی‌های محیطی باشد. داده‌های شبیه‌سازی‌شده سیستم جهانی ادغام داده‌های زمین رطوبت سطحی خاک از سال ۱۹۵۴ در دسترس هستند اما ازآن‌جا که قدرت تفکیک مکانی این داده‌ها پایین است. قدرت تفکیک پایین داده‌های رطوبت سراسری سطح زمین، قدرت تفکیک مکانی پایین سنجنده‌ای ماهواره‌ای و عدم وجود ایستگاه‌های شبکه‌ای با پراکندگی مناسب، باعث ایجاد محدودیت‌هایی در کاربرد این داده‌ها در مسائل هیدرولوژیکی و کشاورزی می‌شود. در این تحقیق با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای راداری Sentinel_1 با قدرت تفکیک بالا و یک روش نوین و بهره بردن از الگوریتم‌ها و داده‌های باارزش موجود در Google Earth Engine رطوبت سطحی خاک ریزمقیاس‌سازی شده و نقشه رطوبت خاک با قدرت تفکیک بالا استخراج و سپس تحلیل مکانی شد. مقدار ناهنجاری رطوبت حجمی سطح خاک در محدوده مورد مطالعه مثبت و بین ۰/۵۸ و ۰/۱۴ و به‌طور متوسط ۰/۳ مترمکعب بر مترمکعب در استان افزایش یافته که کم‌ترین مقادیر مثبت در سمت شمال و غرب محدوده مورد مطالعه یعنی جایی‌که بیش‌تر سامانه‌های بارشی از آن سمت وارد کشور می‌شوند و می‌تواند نشان‌دهنده نقش بیش‌تر عوامل زمینی در جا به جایی رطوبت خاک محدوده مورد مطالعه باشد. با توجه به ضریب همبستگی نسبتاً بالا با داده‌های میدانی می‌توان نتیجه‌گیری کرد که اطلاعات موجود در تصاویر راداری به رطوبت حجمی خاک حساس هستند. البته باند حرارتی نیز در برآورد رطوبت خاک بسیار مهم است که سنجنده سنتیل یک فاقد این باند است. اگر سنجنده دیگری با قدرت تفکیک مکانی شبیه سنتیل هم‌زمان یا نزدیک به زمان برداشتی باشد، می‌توان در بهتر کردن الگوریتم از آن استفاده نمود.

سیگنال‌های راداری فعال گرچه توانایی نفوذ به سطح را دارند اما نسبت به شرایط زبری سطح و زیست‌توده بسیار حساس هستند، به‌خصوص برای انواع پوشش اراضی ناهمگن زمین که باعث ایجاد پیچیدگی‌هایی برای بازیابی اطلاعات قابل‌اطمینان از رطوبت خاک هستند (Hornacek et al., 2012). علاوه بر این رادارهای با حس‌گر روزنه مصنوعی فقط می‌توانند در چند سانتی‌متر از سطح خاک (۴۰-۵ سانتی‌متر) نفوذ می‌کنند و ارزش آن‌ها برای برنامه‌های کاربردی کشاورزی (به‌عنوان‌مثال، منطقه ریشه‌ای) محدود است. توزیع‌های جغرافیایی می‌توانند مقایسه برخی ویژگی‌های مکانی رطوبت خاک را مشخص نمایند. در دست داشتن جهت انتشار رطوبت می‌تواند گامی مهم در مدیریت منابع باشد. جهت پراکنش مکانی رطوبت با در نظر گرفتن مقادیر خصیصه مورد نظر الگوی خوشه‌ای و یا پراکنده دارد آماره موران خودهمبستگی مکانی مورد بررسی قرار گرفت. مقدار ۰/۹۹ شاخص موران و p-value= ۰/۰۰۰ فرض صفر مبنی بر این‌که هیچ‌گونه خودهمبستگی فضایی بین مقادیر مرتبط با مکان وجود ندارد، در سطح معناداری ۹۹ درصد رد شده و وجود خودهمبستگی مکانی ناهنجاری رطوبت خاک را در استان فارس پذیرفته می‌شود. روابط همسایگی در مناطق کم ارتفاع بیشتر از مناطق پرارتفاع خود را نمایان کرده‌اند. هسته‌های بیشینه به شکل سه کانون جداگانه در شمال شهر لار، مشکان و بهمن قرار گرفته است. شکل‌گیری خوشه‌ها از جهت ناهمواری‌ها محدوده موردمطالعه پیروی نمی‌کند. باوجودآنکه سامانه‌های بارشی از سمت جنوب غرب و جنوب وارد استان می‌شوند ولی خوشه بندی رطوبت خاک بیش‌تر به سمت شرق محدوده مورد مطالعه گسترده شده که می‌تواند نشان‌دهنده نقش ناهمواری‌ها و ظرفیت نوع خاک برای نگهداشت رطوبت خاک باشد.

با توجه به مقدار خطای محاسبه‌شده که میزان خطای کمی است می‌توان گفت استفاده هم‌زمان داده‌های شبیه‌سازی‌شده سیستم جهانی ادغام داده‌های زمین و تصاویر راداری با الگوریتم پیاده‌سازی شده در این تحقیق می‌تواند نتایج قابل قبولی جهت شناسایی پراکندگی رطوبت خاک ارائه کند. این متغیر مقایسه سری‌های زمانی دادهای زمینی با خروجی‌های ریزمقیاس‌سازی شده روش آن‌ها به‌خوبی ناهنجاری‌های منفی و مثبت رطوبت خاک را نشان داد و بیان کرده‌اند که روش ارائه‌شده آن‌ها یکپارچه‌سازی داده‌های رطوبت خاک را برای برنامه‌های کنترل خشک‌سالی یا پیش‌بینی سیل امکان‌پذیر می‌کند. با بررسی تحقیقات گذشته می‌توان دریافت که رطوبت خاک به عوامل متعددی از جمله خصوصیات اقلیمی و خصوصیات اراضی و پراکندگی و آرایش ارتفاعات بستگی دارد که این خصوصیات در مکان بسیار متفاوت‌اند. سنجنده های جدید از جمله ماهواره‌های سری سنتیل علاوه بر برداشت سطح زمین در بازه‌های زمانی کم‌تر،

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1401.10.4.4.9]

استفاده از خصوصیات سنجش‌ازدور غیرفعال (راداری) به‌دلیل خصوصیات امواج ماکروویو و امکان نفوذ به سطح زمین، برداشت عمق تا ۱۰۰ سانتی‌متر را فراهم کرده‌اند. به‌دلیل رایگان بودن و قدرت تفکیک مکانی بالای این سنجنده استفاده از باندهای مختلف این تصاویر می‌تواند بسیار کارا باشد.

نتیجه‌گیری

با استفاده از داده‌های راداری رطوبت سطح خاک در استان فارس استخراج شد و نقشه‌های با قدرت تفکیک بالا استخراج شد. نتایج این تحقیق با جذرمربع خطا و ضریب همبستگی به‌ترتیب ۰/۱۳ و ۰/۶۳ برای میانگین نقشه نرمال و ۰/۱۷ و ۰/۵۷ با توجه به ضریب همبستگی بالا با داده‌های واقعی کارایی استفاده از باندهای مختلف تصاویر راداری در برآورد رطوبت سطح را نشان داد. نتایج نشان می‌دهد که سال پر بارش در استان فارس می تواند تا حدود ۰/۱۶ مترمکعب بر مترمکعب رطوبت خاک را افزایش دهد. الگوی فضایی، افزایش رطوبت سطحی خاک خوشه‌ای و عدم تصادفی بودن آن را ایجاد می‌کند. بررسی مزایا و معایب روش ریزمقیاس‌سازی با سنجنده‌های مختلف و اعتبارسنجی آن‌ها همچنان به تحقیقات بیشتر نیاز دارد. هم‌چنین، در کارهای آینده برای افزایش دقت نقشه رطوبت مستخرج از الگوریتم پیاده‌سازی شده در این تحقیق می‌توان از باندهای مادون‌قرمز جهت استخراج شاخص‌های پوشش گیاهی استفاده نمود و افزایش اطلاعات داده‌های آموزشی به الگوریتم استفاده نمود. هم‌چنین برای اطمینان از ارتباط باندهای تصاویر Sentinel و رطوبت خاک ضروری است که تعداد نمونه‌های زمینی با بازه زمانی متفاوت برداشت شده و دقت خروجی با آن‌ها مقایسه شود. از نتایج این تحقیق و خروجی‌های آن می‌توان در مطالعات محیطی و نیز پژوهش‌های کاربردی از جمله شناسایی ناهنجاری رطوبت خاک در برنامه‌ریزی‌های کشاورزی برای تخصیص منابع و امکانات استفاده نمود.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله نویسندگان این مقاله نهایت تشکر و سپاس‌گزاری را از مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس به‌ویژه دکتر افلاطون برزو کارشناس مسئول این مرکز اعلام می‌نمایند که بدون در اختیار قرار دادن نمونه‌های برداشتی آن‌ها انجام این تحقیق میسر نبود.

منابع

۱. بابایان، ا.، م. همایی و ع. ا. نوروزی (۱۳۹۲) برآورد رطوبت خاک سطحی با استفاده از تصاویر رادار ENVISAT/ASAR. پژوهش آب در کشاورزی، ۲۷(۴): ۶۲۲-۶۱۱.
۲. حاتمی بهمن بیگلو، خ. و ج. خوشحال دستجردی (۱۳۸۹) نواحی اقلیمی استان فارس به روش تحلیل عاملی. فضای جغرافیایی، ۱۰(۳۲): ۱۳۵-۱۵۰.
۳. خانمحمدی، ف.، م. همایی و ع. ا. نوروزی (۱۳۹۳) برآورد رطوبت خاک به کمک شاخص‌های پوشش گیاهی و دمای سطح خاک و شاخص نرمال شده رطوبت با استفاده از تصاویر MODIS. حفاظت منابع آب‌وخاک، ۴(۲): ۴۵-۳۷.
۴. رنجبر، ص. و م. آخوندزاده هنزائی (۱۳۹۸) برآورد رطوبت سطح خاک با استفاده از روش‌های رگرسیون بردار پشتیبان و شبکه عصبی مصنوعی. مهندسی فناوری اطلاعات مکانی، ۷ (۴): ۲۳۲-۲۱۵.
۵. عساکره، ح. و ح. شادمان (۱۳۹۴) شناسایی روابط فضایی روزهای گرم فراگیر در ایران‌زمین. تحقیقات جغرافیایی، ۳۰ (۱): ۶۹-۵۳.
۶. عساکره، ح. و ز. سیفی‌پور (۱۳۹۱) مدل‌سازی مکانی بارش سالانه ایران. فصلنامه جغرافیا و توسعه، ۱۰ (۲۹): ۳۰-۱۵.
۷. علیجانی، ب. (۱۳۹۴) تحلیل فضایی. تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، ۲(۳): ۱۴-۱.

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1401.10.4.4.9]

۸. کوه‌بنانی، ح. و م. یزدانی (۱۳۹۷) پهنه‌بندی رطوبت خاک سطحی با استفاده از تصاویر لندست ۸ مطالعه موردی حومه شهر سمنان. جغرافیا و پایداری محیط، ۲۸: ۷۷-۶۵.

۹. میری، م.، ق. عزیزی، ح. محمدی و م. پورهاشمی (۱۳۹۶) معرفی و ارزیابی مدل جهانی همسان‌سازی داده‌های زمینی با داده‌های مشاهده‌ای در ایران. سپهر، ۲۶ (۱۰۴): ۱۷-۵.

10. Adamowski J. and Chan H. F. (2011) *A wavelet neural network conjunction model for groundwater level forecasting*, Hydrology, *407(1–4): 28-40.*
11. Bai J., Cui Q., Zhang W. and Meng L. (2019) *An Approach for Downscaling SMAP Soil Moisture by Combining Sentinel-1 SAR and MODIS Data*, Remote Sensing, *11: 1-20.*
12. Chul Jung H., Kang D., Kim E., Getirana A., Yoon Y., Kumar S., Peters-lidard C. and Hwang E. (2020) *Towards a Soil Moisture Drought Monitoring System for South Korea*, Journal of Hydrology, *125176.*
13. Dai X., Guo Z. and Zhang L. D. (2010) *Spatio-temporal exploratory analysis of urban surface temperature field in Shanghai*, Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, *24: 247–257.*
14. Falloon P., Bebber D., Bryant J., Bushell M., Challinor A. J., Dessai S. and Koehler K. (2015) *Using climate information to support crop breeding decisions and adaptation in agriculture.* World Agriculture, *5(1): 25-43.*
15. Foody G. M., Mathur A., Sanchez-Hernandez C. and Boyd D. (2006) *Training set size requirements for the classification of a specific class*, Remote Sensing of Environment, *104(1): 1-14.*
16. Gail M., Krickeberg K., Samet J., Tsiatis A. and Wong W. (2007) *Statistics for Biology and Health*. USA: Springer.
17. Greifeneder F., Khamala E., Sendabo D., Wagner W., Zebisch M., Farah H. and Notarnicola C. (2019) *Detection of soil moisture anomalies based on Sentinel-1*, Physics and Chemistry of the Earth, *112: 75-82.*
18. Greifeneder F., Notarnicola C. and Wagner W. (2016) *Using machine learning and SAR data for the upscaling of large scale modelled soil moisture in the Alps*, in 11th European Conference on Synthetic Aperture Radar, *1108-1111.*
19. Haining R. (2004) *Spatial Data Analysis: Theory and Practice*. UK: Cambridge University Press.
20. Harvey D. (1969) *Explanation in Geography*, London: Arnold.340.
21. Hornacek M., Wagner W., Sabel D., Truong H., Snoeij P., Hahmann T., Diedrich E. and Doubkova M. (2012) *Potential for High Resolution Systematic Global Surface Soil Moisture Retrieval via Change Detection Using Sentinel-1*, IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, *5(4): 1303-1311.*
22. Jason A., Martha C., Hain T., Christopher S., Mark J., David M. and Richard R. (2016) *Assessing the evolution of soil moisture and vegetation conditions during the 2012 United States flash drought*, Agricultural and Forest Meteorology, *24, 218-229*, doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.12.065
23. Liu Y. Y., McCabe M.F., Evans J.P., Van Dijk A.I., de Jeu A.M. and Su H. (2009) *Comparison of soil moisture in GLDAS model simulations and satellite observations over the Murray Darling Basin*, Newham (eds) 18th World IMACS Congress and MODSIM09 International Congress on Modelling and Simulation, *12: 2798-2804.*
24. Mekonnen D. F. (2009) *Satellite remote sensing for soil moisture estimation: Gumara catchment. Ethiopia Satellite remote sensing for soil moisture estimation: Gumara catchment*, Ethiopia. Thesis of Geo-information Science and Earth Observation, Specialisation: (Integrated Watershed Modelling and Management). WREM Department of ITC the Netherlands.
25. Morbidelli R., Saltalippi C., Flammini A., Corradini C., Brocca L. and Govindaraju R.S. (2016) *An investigation of the effects of spatial heterogeneity of initial soil moisture content on surface runoff simulation at a small watershed scale*. Hydrology, *539: 589-598.*
26. Pasolli L., Notarnicola C., Bertoldi G., Bruzzone L., Remelgado R., Greifeneder F., Niedrist G., Della S. and Chiesa U. (2015) *Estimation of Soil Moisture in Mountain Areas Using SVR Technique Applied to Multiscale Active Radar Images at C-Band*, Earth Observation & Remote Sensing, *8(1): 262–283.*
27. 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. and Toll D. (2004) *The Global Land Data Assimilation System*. Bulletin of the American Meteorological Society. *85(3): 381-394.*
28. Tabatabaeenejad A., Burgin M., Duan X. and Moghaddam M. (2014) *P-band radar retrieval of subsurface soil moisture profile as a second-order polynomial: First AirMOSS results*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, *53(2): 645-658.*
29. Taruvinga k. (2008) *Gully mapping using Remote Sensing: Case Study in KwaZulu-Natal*, South Africa. M.Sc. Ontario Canada, University of Waterloo.

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1401.10.4.4.9]

30. Tu L. (2019). *Downscaling SMAP Soil Moisture Data Using MODIS Data*, Faculty of the Louisiana State University Department of Geography and Anthropology.
31. Ulaby s. and Batlivala P. (1978) *Microwave Backscatter Dependence on Surface 320 Roughness Soil Moisture and Soil Texture: Part 1I-Bare Soil. Geosci*, Electron, *16 (4): 286–295*.
32. Vereecken H., Huisman J. A., Pachepsky Y., Montzka C., Van Der Kruk J., Bogena H. and Vanderborght J. (2014) *On the spatio-temporal dynamics of soil moisture at the field scale*, Journal of Hydrology, *516: 76-96.*
33. Xu G., Zhang Y., Sun J. and Shao H. (2016) *Negative interactive effects between biochar and phosphorus fertilization on phosphorus availability and plant yield in saline sodic soil*, Science of Total Environment, *568: 910–915.*
34. Yoshioka M., Takakura S., Ishizawa T. and Sakai N. (2015) *Temporal changes of soil temperature with soil water content in an embankment slope during controlled artificial rainfall experiments*, Journal of Applied Geophysics, *114: 134-145.*

Investigating spatial changes of soil moisture after heavy spring rains, Fars province

Mahmod Ahmadi[1], Mohammad Kamangar[2*], Zeinab Hazbavi[3]

1. Associate Professor, Department of Climatology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
2. Postdoctoral Researcher, Department of Climatology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
3. Assistant Professor, Department of Rang and Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Water Management Research Center, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

Received: 2023/01
Accepted: 2023/02

Abstract

Soil moisture is an important variable in climatic, hydrological, and ecological systems that link atmospheric processes to the earth's surface. The rainfall systems of the water year 2017-2018 abnormally caused more than normal rainfall in Fars province and caused major changes in the surface moisture of the soil. The purpose of this research is to analyze the spatial changes of soil moisture before and after heavy spring rains in Fars province using Downscale RADAR images. Using the backscatter bands of VV and VH polarizations as well as the incident angle band (θ) extracted from Sentinel 1 radar images and land use extracted from the MODIS sensor, a training layer was created. Furthermore, using the support vector machine algorithm, the downscaling soil moisture map was obtained. The results showed that the volumetric soil moisture with high resolution is between 0.18 and 0.38 in the rainy year and between 0.12 and 0.24 in the long term. An anomaly map showed that between 0.14 and 0.18 m^3 increased soil moisture. The positive anomaly is more in the east and south of the province, and less humid areas have experienced a greater share of positive anomaly. Moran's index statistic with a value of 0.99 has also confirmed the spatial autocorrelation of soil moisture anomaly and clustering of moisture increase. In general, it can be concluded that by using the results of this method, it is possible to monitor areas with low or high soil moisture anomalies after different rainfalls and to improve the decision-making process.

Keywords: Atmospheric process, Moran index, RADAR, Spatial resolution. Support vector classification.

[*] Corresponding author: mohamad.kamangar63@gmail.com

[Downloaded from jircsa.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1401.10.4.4.9]