

## تحلیل تغییرات زمانی و مکانی آب موردنیاز گلخراپی در اراضی شالیزاری شبکه

### آبیاری سپیدرود با استفاده از اطلاعات رطوبت خاک ماهواره SMAP

محمدرضا یزدانی، ابراهیم اسعدی اسکویی\*، اصغر رحمانی، ناصر دواتگر و بهاره دلسوزخاکی

استادیار پژوهشی، موسسه تحقیقات برنج کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، رشت، ایران.

[smryazdany@yahoo.ca](mailto:smryazdany@yahoo.ca)

استادیار پژوهشی، پژوهشکده اقلیم‌شناسی و تغییر اقلیم، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، مشهد، ایران.

[e.asadi.o@gmail.com](mailto:e.asadi.o@gmail.com)

دانشجوی دکتری، دانشگاه تهران، گروه علوم خاک، کرج، ایران.

[a.rahmani@ut.ac.ir](mailto:a.rahmani@ut.ac.ir)

دانشیار پژوهشی، موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

[n.davatgar@areeo.ac.ir](mailto:n.davatgar@areeo.ac.ir)

محقق، موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

[b\\_delsooz@yahoo.com](mailto:b_delsooz@yahoo.com)

دریافت: آبان ۱۴۰۱ و پذیرش: خرداد ۱۴۰۲

#### چکیده

به منظور تحلیل تغییرات زمانی و مکانی مقدار آب موردنیاز برای گلخراپی (خاک‌ورزی خاک اشباع) در سطح اراضی شبکه آبیاری سپیدرود، داده‌های روزانه رطوبت خاک ماهواره SMAP در دوره هفت ساله (۲۰۱۵ تا ۲۰۲۱) استفاده شد. مرحله گلخراپی اراضی شالیزار از ۲۰ فروردین تا ۱۰ خرداد در نظر گرفته شد و پس از دسته‌بندی براساس احتمال وقوع مختلف (۱، ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۹۰ و ۹۹ درصد) بررسی گردید و با استفاده از محاسبات رستری مورد تحلیل قرار گرفت. به منظور صحت‌سنجی محاسبات، مقادیر پیش‌بینی شده با استفاده از آماره‌های ارزیابی میانگین خطای مطلق (MAE)، میانگین اریب خطا (MBE) و ریشه میانگین نرمال شده مربعات خطا (NRMSE)، با مقادیر رطوبت اشباع خاک ۳۲۱ نمونه با مختصات جغرافیایی معین، که قبلاً اندازه‌گیری شده بود، مقایسه شد. نتایج نشان داد که در تمام سناریوهای رطوبتی (از مرطوب‌ترین تا خشک‌ترین)، مناطق کوهپایه‌ای، رطوبت کمتری نسبت به اراضی جلگه‌ای و خصوصاً مناطق پست داشتند و رطوبت خاک در طول دوره رشد روندی کاهشی نشان می‌داد. سرعت این کاهش به تدریج بیشتر شده و در مناطقی مشاهده شد که در انتهای فصل گلخراپی (دهه اول خرداد) به ۲٪ در روز رسید. حجم آب ناخالص موردنیاز گلخراپی از مرطوب‌ترین به خشک‌ترین سال روند افزایشی داشت و در میانه فصل (۱۳ تا ۱۵ اردیبهشت) به ترتیب از ۱۶۹۳ تا ۲۹۸۳ مترمکعب در هکتار و در انتهای فصل گلخراپی به ترتیب از ۲۴۹۶ تا ۳۶۰۲ مترمکعب در هکتار به دست آمد. نتایج صحت‌سنجی نشان داد که مقادیر MAE، MBE و NRMSE به ترتیب ۰/۲۶٪، ۱/۵۹٪ و ۱۵٪ بود که برآوردی مناسب را نشان می‌داد. یافته‌ها نشان داد که تاخیر در انجام گلخراپی، میزان آب مصرفی موردنیاز گلخراپی را افزایش می‌دهد (۳۴/۱ متر مکعب بر هکتار به ازای هر روز تاخیر در سال نرمال). بنابراین، در تمامی شرایط به‌ویژه در سال‌های خشک، برای صرفه جویی در آب برای عملیات گلخراپی در شالیزارهای این شبکه بهتر است رهاسازی و تامین آب موردنیاز از منابع آبی محلی (آب-بندان و چاه) یا از سد سپیدرود در اوایل اردیبهشت انجام شود.

واژه‌های کلیدی: نیاز آبی گلخراپی، خاک‌ورزی خاک اشباع، تحلیل‌های احتمالاتی، صرفه جویی در آب

\*- آدرس ایمیل نویسنده مسئول: [e.asadi.o@gmail.com](mailto:e.asadi.o@gmail.com)



## مقدمه

در ایران برنج یک محصول راهبردی است که نیاز آبی زیادی دارد. افزایش قیمت محصول و تمایل کشاورزان به توسعه کشت آن از یک طرف و از طرف دیگر، محدود بودن منابع آبی، اهمیت بررسی مقدار آب مصرفی را نشان می‌دهد. موسسه جهانی تحقیقات برنج (موسسه بین‌المللی تحقیقات برنج<sup>۱</sup>، ۲۰۲۰) گزارش نمود که برای نرم‌سازی و شخم اولیه شالیزار در شرایط خیس بهتر است از دو تا سه سانتی‌متر آب در حدود سه تا هفت روز استفاده شود که می‌تواند در یک دوره ۴۰ روزه، به مقدار ۱۹۰ میلی‌متر برسد. توصیه بر این است که با کاهش دوره آماده‌سازی این مقدار کاهش داده شود؛ بنابراین در شالیزارها جهت مرطوب نمودن خاک و تسهیل در عملیات شخم یک تا دو روز پیش از زمان شخم، به زمین آب داده می‌شود. هدف از آبیاری در مرحله تهیه زمین، تأمین رطوبت لازم برای بهم‌زدن خاک و ایجاد مخلوط خاک و آب<sup>۲</sup> است (طالب‌پور، ۱۳۹۷)؛ بنابراین شخم و آماده‌سازی اراضی شالیزاری نیازمند شرایط خاص رطوبتی برای عملیات گلخراپی و تسطیح کرت‌ها است و مقدار آب مصرفی در خاک‌های مختلف و در شرایط استفاده از ادوات مختلف یکسان نیست (طالب‌پور، ۱۳۹۷). در مطالعات پیشین از جمله دهقانی و همکاران (۲۰۲۲) برای بررسی آب مصرفی محصولات کشاورزی و به‌ویژه برنج، تنها نیاز آبی آن‌ها در دوره رشد در نظر گرفته شده و نیاز آبی خاک‌ورزی مورد بررسی قرار نگرفته است. همچنین پژوهش‌های بسیار محدودی به‌منظور تعیین مقدار آب موردنیاز گلخراپی صورت گرفته است. بر اساس اطلاعات پایه، بسته به تخلخل خاک و ظرفیت اشباع آن، مقادیر متفاوتی از سوی محققین و نیز بعضی سازمان‌های مربوطه برای رطوبت گلخراپی گزارش شده است (پیرمادیان و همکاران، ۲۰۰۴؛ فلاح، ۱۳۴۸) که تعیین مقدار دقیق آن در خاک‌های مختلف و در شرایط متفاوت رطوبتی و روش‌های آماده‌سازی، بر پایه تحقیقات علمی، لازم و

ضروری است. همچنین با توجه به تقارن مراحل آماده‌سازی زمین با ماه‌های پرباران در استان‌های شمالی ایران، چگونگی استفاده بهینه از آب به‌منظور آماده‌سازی زمین باید مورد تحقیق و توجه قرار گیرد (طالب‌پور، ۱۳۹۷). بر اساس پژوهش‌های متعددی که در زمینه ارزیابی رطوبت گلخراپی انجام شده‌است آب (ناخالص) موردنیاز برای آماده‌سازی زمین و غرقاب اولیه، در کشورهای مختلف متفاوت است؛ به‌طوری‌که در چین، ژاپن، کره، تایوان، بنگلادش، تایلند، مالزی، فیلیپین و هندوستان به‌ترتیب ۳۰۰، ۱۲۰، ۱۲۲، ۱۷۵، ۱۸۰، ۳۵۰، ۱۸۰، ۲۵۰ و ۲۹۸ میلی‌متر گزارش شده است (موسسه بین‌المللی تحقیقات برنج<sup>۳</sup>، ۲۰۲۰). همچنین (هندریکس و همکاران، ۱۹۸۶) نیاز گلخراپی شالیزارهای تسطیح شده و نشده را به‌ترتیب ۱۷۰ و ۲۵۵ میلی‌متر برآورد کرده‌اند. در پژوهشی دیگر طالب‌پور (۱۳۹۷) بیان داشت که در فرآیند گلخراپی خاک‌های غالب استان گیلان با افزایش مقدار رطوبت اولیه خاک، بر اساس تابع لگاریتمی، آب مصرفی کاهش می‌یابد و همچنین میزان آب مصرفی برای گلخراپی در شرایط رطوبت اولیه خاک با ۹۵ و ۱۰۰ درصد اشباع از نظر آماری بدون اختلاف و در رطوبت‌های اولیه ۹۰ و ۸۵ درصد اشباع این اختلاف معنادار است. همچنین یوسفی و همکاران (۱۳۸۷) اثر شدت‌های مختلف گلخراپی بر نفوذ آب به خاک، نگهداشت آب توسط خاک و تعیین میزان آب مصرفی برای انجام گلخراپی در سه کلاس بافت خاک غالب رس سیلتی، لوم رسی و لوم در اراضی شالیزاری استان گیلان را بررسی و بیان کردند که عملیات گلخراپی قابلیت نگهداشت آب خاک را افزایش می‌دهد. ایشان گزارش نمودند که با افزایش شدت گلخراپی، نگهداشت آب خاک در کلاس بافت رس سیلتی بیشتر از دو بافت دیگر بود و افزایش شدت گلخراپی از سطح کم به زیاد سبب افزایش میزان آب مصرفی به‌طور معنی‌دار شد.

<sup>۱</sup> -International rice research institute (IRRI)

<sup>۲</sup> -pudding

<sup>۳</sup> -International rice research institute (IRRI)

در ایران و از جمله اراضی شالیکاری گیلان شبکه سراسری پایش رطوبت خاک وجود نداشته و اندازه‌گیری‌های رطوبت خاک محدود به مراکز تحقیقات هواشناسی کشاورزی سازمان هواشناسی کشور است. اندازه‌گیری‌های این ایستگاه‌ها نیز معمولاً در داخل شالیزار نبوده و منحصر به داخل پلاتفرم (سکو) هواشناسی و مناطق پشته (غیر شالیزاری) است. همچنین پراکندگی این ایستگاه‌ها در کشور نامنظم بوده و حتی برخی از استان‌ها فاقد ایستگاه اندازه‌گیری می‌باشند (اسعدی اسکویی و همکاران، ۱۴۰۰). از این رو در حال حاضر امکان بررسی توزیع زمانی-مکانی داده‌های رطوبت خاک با هدف مدیریت منابع آب و خاک، به‌ویژه در مباحث شالیکاری بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده زمینی مشکل بوده و دسترسی به نقشه‌های رطوبت خاک و تغییرات مکانی-زمانی منطقه‌ای آن مهیا نیست. برای رفع این مسئله، در سال‌های اخیر روش‌های مختلفی مبتنی بر داده‌های ماهواره‌ای و سنسور از دور برای برآورد و مدل‌سازی رطوبت خاک توسعه داده شده است.

ماهواره پایش رطوبت خاک به‌صورت فعال و غیرفعال (SMAP<sup>1</sup>)، یکی از جدیدترین ماهواره‌هایی است که با مأموریت پایش جهانی رطوبت خاک توسط ناسا در سال ۲۰۱۵ به فضا ارسال شده و هدف اصلی آن پایش و نقشه‌برداری جهانی رطوبت خاک با درجه وضوح بالا و دقیق در دوره‌های زمانی کوتاه است. تاکنون تحقیقات متعددی در خصوص اعتبارسنجی محصولات رطوبت خاک این ماهواره و بررسی دقت و کیفیت داده‌ها و همچنین بررسی وجود خطاهای احتمالی در آن‌ها در مناطق مختلف دنیا شامل (ولپوری و همکاران، ۲۰۱۶) در ایالات متحده؛ ملادنوا و همکاران، (۲۰۲۰) در آفریقای جنوبی و استرالیا؛ الحاج و همکاران (۲۰۱۸) در فرانسه و لی و همکاران (۲۰۱۸) در فلات تبت انجام شده است. یافته‌های این پژوهش‌ها نشان داده که داده‌های رطوبت خاک SMAP ابزار قدرتمندی برای تهیه نقشه‌های

رطوبت خاک در مناطق مختلف جهان است. اگرچه در استفاده از این داده‌ها باید توجه داشت که قدرت تفکیک مکانی آن سبب محدودیت در کاربردهای علمی و کاهش مقیاس مطالعه می‌شود. علاوه بر آن هنوز نیاز به صحت-سنجی برای مناطقی با تنوع پوشش گیاهی، کاربری اراضی، خاک و خصوصیات اقلیمی که پارامترهای مؤثر بر تغییرپذیری رطوبت خاک در حوضه مورد مطالعه می‌باشند، وجود دارد. مطالعات انجام شده در مورد ماهواره SMAP در ایران در قالب اهداف متنوعی بوده است. اسعدی اسکویی و همکاران (۱۴۰۱) به‌منظور بررسی زمانی-مکانی رطوبت خاک در پهنه ایران از داده‌های SMAP استفاده نمودند و گزارش نمودند که استفاده از این داده‌ها در محاسبه نوسانات مختلف ماهانه و سالانه رطوبت مفید بوده و از آنجا که این ماهواره امکان استفاده از داده‌های پیوسته با روش اندازه‌گیری یکنواخت را فراهم آورده است می‌توان گفت که انجام این محاسبات با استفاده از داده‌های زمینی با این کیفیت ممکن نبوده است. در مطالعات دیگری از ماهواره SMAP با هدف ارزیابی وضعیت خشکسالی (سوزا و همکاران، ۲۰۱۸؛ ملادنوا و همکاران، ۲۰۲۰) و برآورد مقدار رواناب (اکبر و همکاران، ۲۰۱۹؛ کرو و همکاران، ۲۰۱۹)، شبیه‌سازی‌های هیدرولوژیکی (شیونگ و زنگ، ۲۰۱۹؛ کستر و همکاران، ۲۰۱۸)، تعیین شاخص خطر ریسک آتش‌سوزی (توماس و همکاران، ۲۰۲۰) و برنامه‌ریزی و مدیریت آبیاری (ژو و همکاران، ۲۰۲۱) نیز استفاده شده است. در پژوهشی حاجی ملکی و همکاران (۱۳۹۹) به اعتبارسنجی داده‌های رطوبت خاک سطحی ماهواره SMAP در کاربری‌های مختلف در حوضه سیمینه-زربینه پرداخته و نشان دادند که با توجه به عملکرد مناسب داده‌های رطوبت خاک در ماهواره SMAP، این داده‌ها می‌توانند در مطالعات هیدرولوژی و پیش‌بینی رواناب در اراضی مختلف استفاده شود. همچنین کرمی و همکاران (۱۳۹۹) به‌منظور بهبود وضوح مکانی داده‌های رطوبت خاک در ماهواره SMAP

<sup>1</sup>-Soil Moisture Active Passive

از روش تلفیق رادار- تابش‌سنج<sup>۱</sup> در حوضه آبخیز فیروزآباد استان اردبیل استفاده کردند. در یک مطالعه غفاری و همکاران (۱۳۹۹) به توسعه الگوریتم‌های بهبودیافته برای ریزمقیاس‌سازی رطوبت خاک سطحی ماهواره SMAP با استفاده از داده ماهواره‌های نوری/حرارتی<sup>۲</sup> پرداختند. نتیجه نهایی تحقیقات انجام‌شده در ایران نشان می‌دهد که روش‌های به‌کار گرفته شده به‌خوبی مقیاس مکانی گسترده رطوبت خاک ماهواره SMAP را بهبود می‌بخشد. در مطالعه‌ای دیگر صبوری نوقابی و همکاران (۱۴۰۰) در یک دوره شش‌ماهه هم‌زمان با گذر ماهواره سنتینل یک<sup>۳</sup> و SMAP به اندازه‌گیری میدانی رطوبت خاک حدود هزار نمونه رطوبت خاک و اعتبارسنجی اندازه‌گیری‌های ماهواره SMAP پرداختند.

مدیریت کلان آبیاری در استان گیلان به دلیل کاهش شدید حجم آب سد سپیدرود به‌ویژه در سال‌های کم‌آبی، بر مبنای استفاده حداکثری از آب موجود در سطح استان متمرکز شده است (اسعدی اسکویی و همکاران، ۱۳۹۶). وضعیت آب و هوایی استان به‌گونه‌ای است که کشت زود هنگام به دلیل سرمای دیررس بهاره ممکن است خساراتی برای گیاه به‌بار آورد. از طرف دیگر کشت دیر هنگام و گرم شدن هوا ضمن خروج آب‌های سطحی به سمت دریا، موجب کاهش رطوبت خاک و افزایش آب مصرفی برای گلخراپی می‌شود. بر این اساس هر ساله تقویم زراعی برای تعیین شروع نشاکاری با بررسی پیش-بینی‌های هواشناسی توسط سازمان جهاد کشاورزی و شرکت آب منطقه‌ای استان گیلان با کمک موسسه تحقیقات برنج کشور و با توجه به وضعیت هیدرولوژیک هر سال، تهیه و اعلام می‌شود (اسعدی اسکویی و همکاران، ۱۴۰۰). این تاریخ عموماً از اوایل تا اواسط دهه سوم اردیبهشت بوده است. با این شرایط در بازه زمانی مورد اشاره برای بسیاری از کشاورزانی که منبع آب دیگری در اختیار ندارند تاریخ رهاسازی آب، تعیین‌کننده

زمان ورود آب به مزرعه است. آب موجود در استان شامل آب‌های جاری در رودخانه، نهرهای محلی و مهم‌تر از آن رطوبت موجود در خاک‌های سطحی شالیزارها است. در مورد آب‌های جاری، به دلیل کاهش دبی آن‌ها با گذشت زمان، مطالعه هیدرولوژی دیگری برای تعیین بهترین زمان شخم لازم است؛ اما در این پژوهش، موضوع استفاده حداکثری از آب موجود در خاک سطحی مزرعه با مطالعه رطوبت خاک مزارع و روند کم‌شدن آن با گذشت زمان مورد توجه قرار گرفته است. ازین‌رو پژوهش حاضر برای اولین بار در ایران با هدف استفاده مطلوب از داده‌های رطوبت خاک ماهواره SMAP در شالیزارهای استان گیلان در پایین‌دست سد سپیدرود برای تعیین روند تغییرات رطوبت خاک‌های شالیزاری و تعیین مقدار نیاز آبی برای مرحله گلخراپی در دوره آماری هفت ساله از زمان پرتاب ماهواره براساس محاسبه سطوح احتمال وقوع بررسی شده توسط اسعدی اسکویی و همکاران (۱۴۰۰)، برای سال‌های مختلف خشک، نرمال و مرطوب و همچنین پهنه‌بندی تغییرات مکانی پیوسته آن اجرا شد.

### مواد و روش‌ها

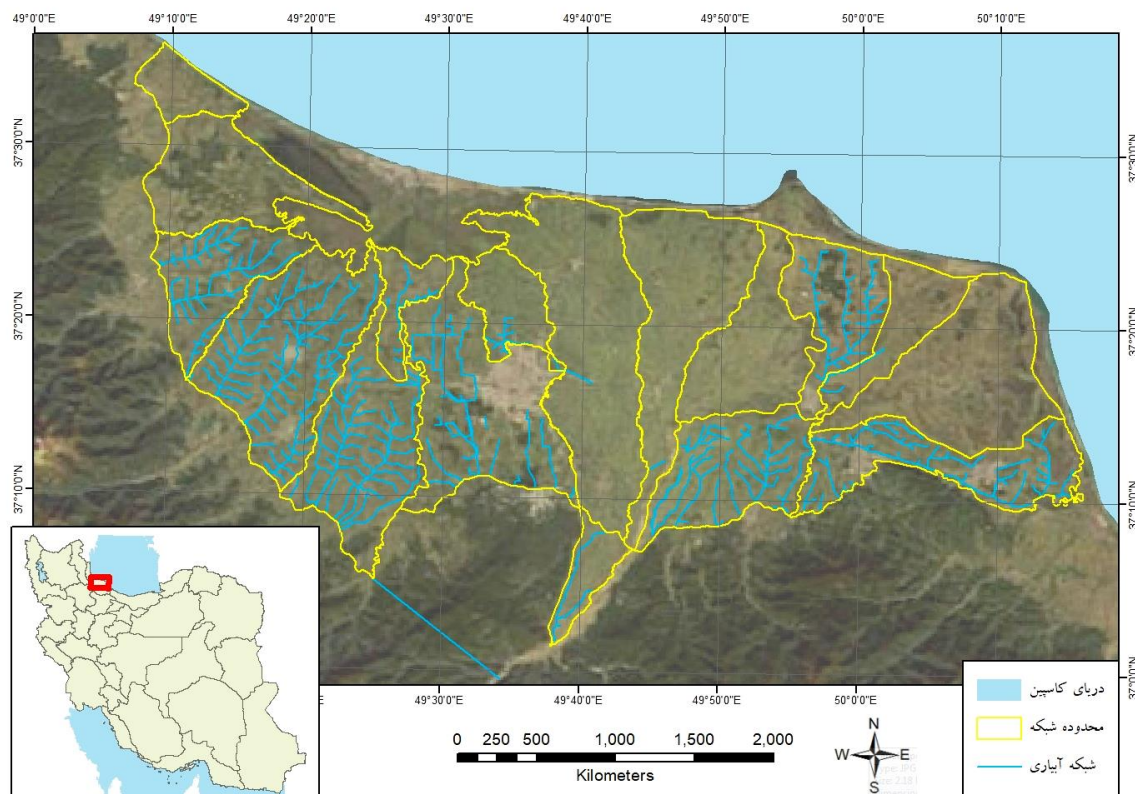
#### منطقه مطالعه شده

این پژوهش در محدوده اراضی جلگه مرکزی گیلان انجام شده است که بیشتر مناطق شالیکاری آن به وسعت ۱۷۱ هزار هکتار تحت شبکه آبیاری رودخانه سپیدرود قرار دارد (شکل ۱). این منطقه یکی از مناطق مهم شالیکاری کشور است و سهم بسیاری در مقدار برنج تولیدی کشور دارد (اسعدی اسکویی و همکاران، ۱۳۹۶). شالیزارهای این منطقه را می‌توان به سه دسته کوهپایه‌ای، جلگه‌ای و پست تقسیم کرد. در محدوده مورد مطالعه، دوره گلخراپی از نیمه دوم فروردین تا دهه اول خرداد است و فصل رشد برنج در شالیزار از ۲۰ فروردین هم-زمان با نشاکاری شروع شده و در هفته دوم خرداد با برداشت محصول خاتمه می‌یابد.

<sup>1</sup> -Synergy of Radar-Microwave Observations

<sup>2</sup> -Visible/Inferred satellite

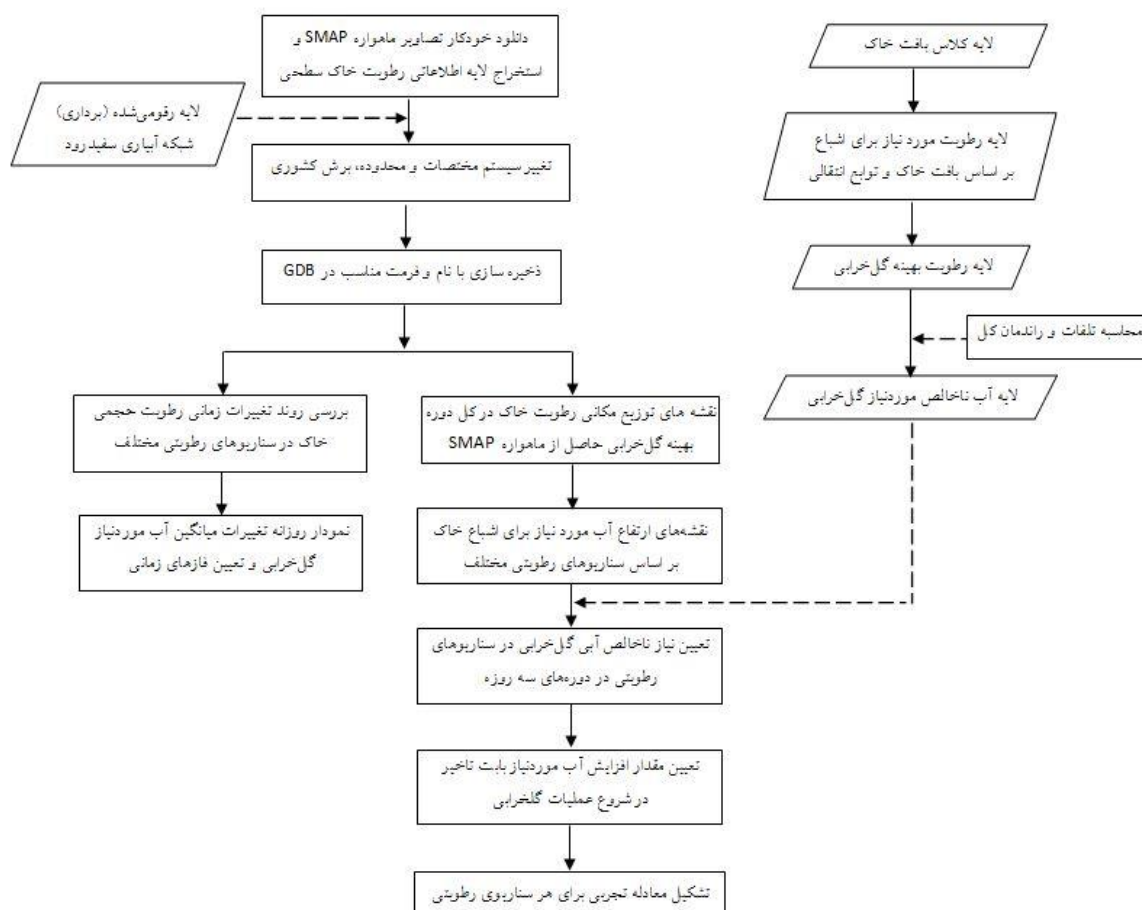
<sup>3</sup>-Sentinel-1



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه و موقعیت جغرافیایی آن در ایران

جمله محاسبه لایه و نمودارهای کمینه، بیشینه و میانگین روزانه ژئولیوسی برای دوره گلخراپی (اواخر فروردین تا اواسط خرداد) و سرانجام استخراج اطلاعات نیازمند این تحقیق در زبان برنامه‌نویسی آر (R) انجام شد. براین اساس برای یک دوره هفت‌ساله تعداد ۳۷۱ تصویر رستری از داده‌های روزانه رطوبت خاک با قدرت تفکیک نه کیلومتر مربع ذخیره‌سازی شدند. اگرچه این دوره آماری برای مطالعات اقلیمی کم است اما وجود سال‌های حدی بارشی ترسالی شدید (۲۰۱۹-۲۰۱۸) و کم بارشی شدید (۲۰۲۰-۲۰۲۱) در این سال‌ها باعث شد که حدود آستانه-های کم و زیاد مورد انتظار در دوره‌های آماری طولانی‌تر تا حد قابل اطمینان‌تری در نتایج این تحلیل آشکار شوند. روندنمای شیوه انجام مطالعه در شکل ۲ نشان داده شده است.

داده‌های رطوبت خاک در طی یک دوره زمانی هفت ساله از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۱ مستخرج از اطلاعات روزانه رطوبت خاک ماهواره SMAP برای دوره گلخراپی در منطقه (از ۲۰ فروردین تا ۱۰ خرداد) بررسی شدند. مأموریت اختصاصی SMAP بر اساس رادیومترهای مایکروویو باند L باهدف برآورد کمی رطوبت خاک در مقیاس جهانی طراحی شده است. در پژوهش حاضر از داده‌های سطح چهار رطوبت خاک (SMAP L4-SM) استفاده شد که هر سه ساعت یکبار و با قدرت تفکیک مکانی نه کیلومتر مربع در نتیجه درون‌یابی زمانی و مکانی داده‌های بزرگ‌مقیاس ۴۰ کیلومتری (به‌صورت افقی و عمودی) در دسترس است. تمامی فرایندهای دریافت اطلاعات رطوبت خاک، تبدیل سیستم مختصات، تغییر محدوده جغرافیایی و برش زدن داده‌ها در محدوده شبکه آبیاری سپیدرود و همچنین پردازش‌های بعدی داده‌ها از



شکل ۲- الگوریتم تولید نقشه های رطوبت خاک از محصولات SMAP و محاسبه مقدار آب موردنیاز بهینه گلخراپی

بررسی تغییرات زمانی رطوبت خاک در اراضی شالیزاری شبکه آبیاری سپیدرود در ابتدای فصل (۲۰ تا ۲۲ فروردین)

ابتدا روند تغییرات زمانی (روزانه) رطوبت خاک در طول دوره گلخراپی برای سال های ترسالی (مرطوب-ترین سال)، نرمال (متوسط) و خشکسالی (خشک ترین سال) مورد انتظار برای کل اراضی شبکه بررسی شد. همچنین تغییرات رطوبت خاک، دمای هوا و رطوبت نسبی اتمسفر با هم مقایسه شد و بر اساس افزایش نرخ کاهش رطوبت و نیز افزایش توان تبخیری اتمسفر، تعداد فازهای زمانی برای تحلیل میزان آب موردنیاز گلخراپی بر مبنای رطوبت خاک در سال نرمال معین شد.

همان گونه که در شکل ۲ نیز مشاهده می شود ابتدا فازهای زمانی تعیین شد. همچنین نقشه رطوبت موردنیاز برای اشباع سازی خاک با توجه به بافت خاک تهیه شد. سپس با استفاده از این اطلاعات تغییرات مکانی-زمانی آب موردنیاز برای عملیات گلخراپی مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه مقدار افزایش آب موردنیاز برای گلخراپی (در هر کدام از فازهای زمانی) به ازای تأخیر در شروع عملیات گلخراپی محاسبه و سپس معادله تجربی محاسبه میزان آب موردنیاز گلخراپی تهیه شد. این مراحل در ادامه به شرح توضیح داده خواهد شد:

(MAE)<sup>۱</sup>، میانگین اریب خطا (MBE)<sup>۲</sup> و ریشه میانگین نرمال شده مربعات خطا (NRMSE)<sup>۳</sup> با مقادیر پیش‌بینی- شده مقایسه شد (رابطه‌های ۱، ۲ و ۳):

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |P_i - O_i|}{n} \quad (1)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{n} \quad (2)$$

$$NRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}} \times \frac{100}{\bar{O}} \quad (3)$$

که در آن‌ها:  $O_i$  مقدار مشاهده،  $P_i$  مقدار برآورد شده،  $\bar{O}$  میانگین مقادیر مشاهده و  $n$  تعداد مشاهدات است. شاخص‌های  $MAE$  و  $MBE$  معیاری از خطا هستند و هر اندازه به صفر نزدیک‌تر باشند، نشان‌دهنده بالا بودن دقت برآورد می‌باشند (لی و هیپ، ۲۰۱۴).  $NRMSE$  به صورت درصد ارائه می‌شود و نشان‌دهنده تفاوت نسبی مقادیر واقعی و برآورد شده است. بر اساس نظر جامیسون و همکاران (۱۹۹۱) اگر مقدار  $NRMSE$  کمتر از ۱۰٪ باشد، مدل عالی، بین ۱۰ تا ۲۰ درصد خوب، بین ۲۰ تا ۳۰ درصد نسبتاً خوب و بیش از ۳۰٪ ضعیف محسوب می‌شود.

## تهیه نقشه درصد حجمی رطوبت اشباع خاک (رطوبت موردنیاز برای اشباع‌سازی خاک)

به منظور تهیه نقشه درصد حجمی رطوبت اشباع خاک در این تحقیق از نقشه‌های پیوسته (رستری) اندازه ذرات بافت خاک که توسط ملاح و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از ۴۶۶۵ نمونه سطحی از اراضی زراعی و باغی استان گیلان (که بیشتر در دشت‌های ساحلی و اراضی پست واقع شده‌اند) تهیه شده، استفاده شد. نقشه‌های پیوسته درصد رس و شن به ترتیب با ضریب تبیین ۰/۶۴ و ۰/۶۷ با استفاده از روش درون‌یابی وزن‌دهی عکس فاصله تهیه شده بودند. این نقشه‌ها در محیط نرم‌افزار SAGA GIS نسخه ۷/۹/۱ با استفاده از تابع Soil Texture Classification بر مبنای روش طبقه‌بندی ۱۲ کلاس آمریکایی به صورت کلاس‌های بافت خاک طبقه‌بندی شده‌اند. یافته‌ها نشان داده‌اند که در محدوده اراضی تحت پوشش شبکه، خاک‌های با بافت سنگین و سپس متوسط غالب بودند؛ بنابراین انتظار بر این است که این خاک‌ها با دارا بودن رس و سیلت بیشتر نسبت به شن، توانایی زیادی برای نگهداشت آب داشته باشند.

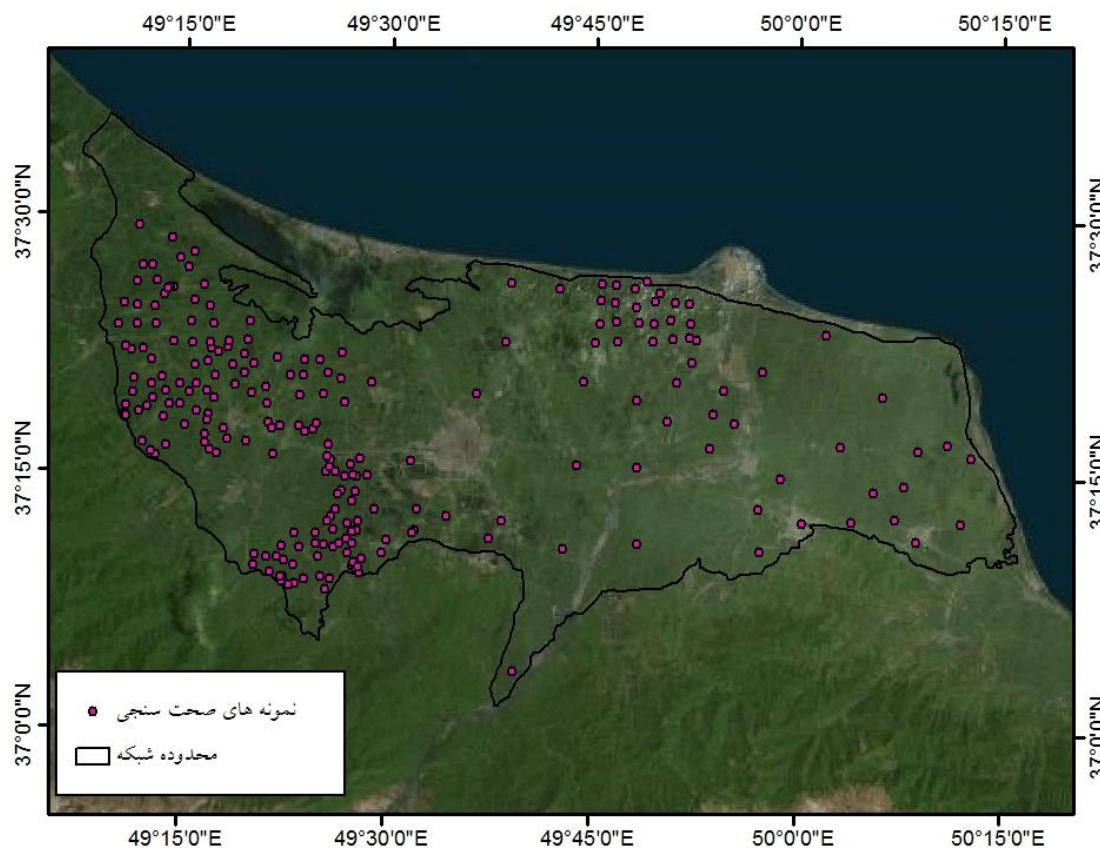
در پژوهش حاضر نقشه‌های رستری کلاس بافت خاک در محیط نرم‌افزار ArcGIS نسخه ۱۰/۷ با استفاده از دستورالعمل Raster to Polygon به فایل برداری تبدیل شد و بر اساس توابع انتقالی خاک تعریف شده در نرم‌افزار SPAW-USDA نسخه ۶/۰۲/۷۵ درصد حجمی رطوبت اشباع در هر کلاس بافتی محاسبه و در پایگاه داده نقشه‌های وکتوری به صورت یک‌لایه اضافه شد. در پایان لایه‌های وکتوری کلاس بافت خاک بر اساس لایه درصد حجمی رطوبت اشباع خاک طبقه‌بندی شده و با استفاده از دستور Feature to Raster به فایل رستری با قدرت تفکیک مکانی ۶۰۰ مترمربع تبدیل شدند. به منظور صحت‌سنجی محاسبات، مقادیر اندازه‌گیری شده رطوبت اشباع ۳۲۱ نمونه خاک با مختصات جغرافیایی معین، از موسسه تحقیقات برنج کشور اخذ شد (شکل ۳) و با استفاده از آماره‌های ارزیابی میانگین خطای مطلق

<sup>۱</sup>-Mean Absolute Error

<sup>۲</sup>-Mean Bias Error

<sup>۳</sup>-Normalized Root Mean Square Error





شکل ۳- منطقه مورد مطالعه و موقعیت جغرافیایی نقاط استفاده شده برای صحت‌سنجی محاسبات

خاک به مرحله گلخراپی بر اساس بافت خاک تعیین و از تفاضل آن با مقدار رطوبت خاک مورد انتظار برای هر یک از سناریوهای رطوبتی، مقدار آب موردنیاز برای رساندن خاک به مرحله گلخراپی برای آن سناریوی رطوبتی محاسبه شد. تمامی محاسبات به‌روش محاسبات رستری و با استفاده از داده‌های ماهواره SMAP برای سال‌های ۲۰۱۵-۲۰۲۱ انجام شد. شایان ذکر است که در محاسبات رستری، با توجه به اینکه برای انجام عملیات گلخراپی در هر هکتار حدود سه روز زمان لازم است و به ازای هر پیکسل، اطلاعات هفت سال موجود بود، بنابراین برای مناطقی که بازه سه روزه برای پر شدن آن‌ها موردنیاز است، ۲۷ مقدار رطوبتی برای هر پیکسل در نظر گرفته شد. سپس با توجه به این ۲۷ عدد، برای هر سناریو، مقدار رطوبت خاک مورد انتظار آن سناریو در نظر گرفته شد. در این پژوهش محاسبه مقدار رطوبت بهینه موردنیاز برای رساندن خاک به مرحله گلخراپی به ترتیب زیر انجام شد:

### تغییرات مکانی-زمانی رطوبت خاک (آب موردنیاز برای عملیات گلخراپی)

به‌طورکلی در این مرحله ابتدا بر اساس دامنه و میزان رطوبت خاک مشاهده شده در سال‌های مختلف، هفت سناریوی رطوبتی تعریف شد. به این معنی که به‌جای ارزیابی خشکی بر اساس بارندگی، تبخیر و یا سایر پارامترهای هواشناسی، میزان رطوبت خاک مبنای تقسیم‌بندی سال‌های خشک و تر قرار گرفت. این سناریوها عبارتند از: سناریوهای خشک‌ترین سال (احتمال وقوع ۹۹ درصد)، سال بسیار خشک (احتمال وقوع ۹۰ درصد)، سال خشک (احتمال وقوع ۷۵ درصد)، سال نرمال (احتمال وقوع ۵۰ درصد)، سال مرطوب (احتمال وقوع ۲۵ درصد)، سال بسیار مرطوب (احتمال وقوع ۱۰ درصد) و مرطوب‌ترین سال (احتمال وقوع یک درصد) که به ترتیب معادل صدک‌های ۱، ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۹۰ و ۹۹ می‌باشند. سپس مقدار رطوبت بهینه موردنیاز برای رساندن



که در آن  $y$  مقدار آب خالص مازاد بر اشباع برای گلخرابی،  $D$  نفوذ عمقی  $L$  نفوذ جانبی و  $Y$  آب ناخالص موردنیاز داخل مزرعه برای گلخرابی است.

در مرحله بعد با در نظر گرفتن این حقیقت که آب از سمت سد به سمت مزارع روانه می‌شود و در این انتقال مقادیری از آن هدر می‌رود، آب ناخالص برای برداشت از سد، به ترتیب زیر محاسبه شد:

راندمان کاربرد در مرحله گلخرابی از نسبت مقدار خالص به ناخالص داخل مزرعه محاسبه شد. راندمان انتقال و راندمان توزیع با توجه به نتایج طالب‌پور (۱۳۹۷) به ترتیب ۹۵ و ۷۲ درصد در نظر گرفته شد و راندمان کل از حاصل ضرب سه راندمان کاربرد، انتقال و توزیع به دست آمد. سپس از تقسیم نیاز ناخالص داخل مزرعه گلخرابی بر راندمان کل، مقدار کل آب ناخالص موردنیاز برای برداشت از سد برای گلخرابی در هر سناریوی رطوبتی محاسبه شد (در این پژوهش برای محاسبه حجم آب ناخالص موردنیاز برای هر هکتار، عمق رایج خاک‌ورزی در شالیزارهای تحت شبکه آبیاری سپیدرود ۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد). در ادامه مقادیر نیاز ناخالص برداشت از سد برای گلخرابی با عنوان نیاز ناخالص آبی برای مرحله گلخرابی یا آب موردنیاز برای گلخرابی مورد بررسی قرار گرفت.

برای استفاده کاربردی از داده‌های یاد شده، تعیین روند تغییرات مصرف توسط کشاورزان در بازه‌های کاری ابتدای فصل بر اساس رهاسازی آب از سد سپیدرود و رطوبت خاک‌ها ضروری است. همان‌گونه که قبلاً اشاره شد در شبکه آبیاری سپیدرود طول دوره گلخرابی از نیمه دوم فروردین تا دهه اول خرداد است. در این فاصله کشاورزان متناسب با وجود آب و همچنین سایر امکانات موردنیاز به‌طور تدریجی شروع به عملیات گلخرابی نموده و به‌طور تدریجی نیز با پایان گلخرابی اقدام به نشاکاری می‌کنند؛ بنابراین با توجه به این‌که زمان لازم برای انجام عملیات گلخرابی در هر هکتار حدوداً سه روز است، نتایج برای بازه‌های سه‌روزه محاسبه و ارائه شد. در این

نیاز آبی خالص برای مرحله خاک‌ورزی شامل آب لازم برای اشباع خاک (بر اساس بافت خاک) و آب لازم مازاد برای عملیات گلخرابی است. برای محاسبه آب موردنیاز خالص بعد از اشباع شدن خاک (مقدار آب مازاد خالص بر اشباع برای گلخرابی) از رابطه (۴) استفاده شد (طالب‌پور، ۱۳۹۷).

$$y = -142.87\theta_i + 95.949 \quad (4)$$

که در آن:  $\theta_i$  رطوبت خاک (درصد حجمی) قبل از گلخرابی و  $y$  (mm) مقدار آب خالص مازاد بر اشباع برای گلخرابی کامل است.

آب ناخالص موردنیاز داخل مزرعه برای گلخرابی شامل نیاز بخش‌های خالص، تبخیر در هنگام عملیات خاک‌ورزی، نفوذ عمقی، نفوذ جانبی و رواناب خروجی است. در این رابطه طول دوره خاک‌ورزی برای محاسبه مقادیر فوق بر اساس مشاهدات تجربی متناسب با رطوبت خاک از شش روز برای خاک‌های مرطوب تا ۱۱ روز برای خاک‌های خشک در نظر گرفته شد.

برای محاسبه نفوذ عمقی ( $D$ ) و جانبی ( $L$ ) بر حسب میلی‌متر از روابط (۵ و ۶) استفاده شد (طالب‌پور، ۱۳۹۷).

$$D = -16.385\theta_i + 8.312 \quad (5)$$

$$L = -2.6795\theta_i + 1.2931 \quad (6)$$

برای در نظر گرفتن حجم تلفات نفوذ عمقی و جانبی، مجموع آن‌ها به مقدار آب مازاد بر اشباع برای گلخرابی ( $Y$ ) اضافه شد. مقدار رواناب خروجی نیز بر اساس مشاهدات تجربی در سیستم آبیاری کرت به کرت که در آن وجود رواناب خروجی غیرقابل اجتناب است، از شش تا ۱۵ درصد (به‌طور متوسط ۱۰ درصد) نیاز خالص متناسب با رطوبت خاک قبل از گلخرابی در نظر گرفته شد (طالب‌پور، ۱۳۹۷). بنابراین آنچه توضیح داده شد، آب ناخالص موردنیاز داخل مزرعه برای گلخرابی از رابطه (۷) به دست آمد.

$$Y = (y + D + L) * 1.1 \quad (7)$$

### معادله تجربی محاسبه میزان آب موردنیاز گُلخراپی

در انتها معادله تجربی محاسبه میزان آب موردنیاز گُلخراپی به تفکیک فازهای زمانی برای هر یک از سناریوهای رطوبتی تهیه شد.

### نتایج و بحث

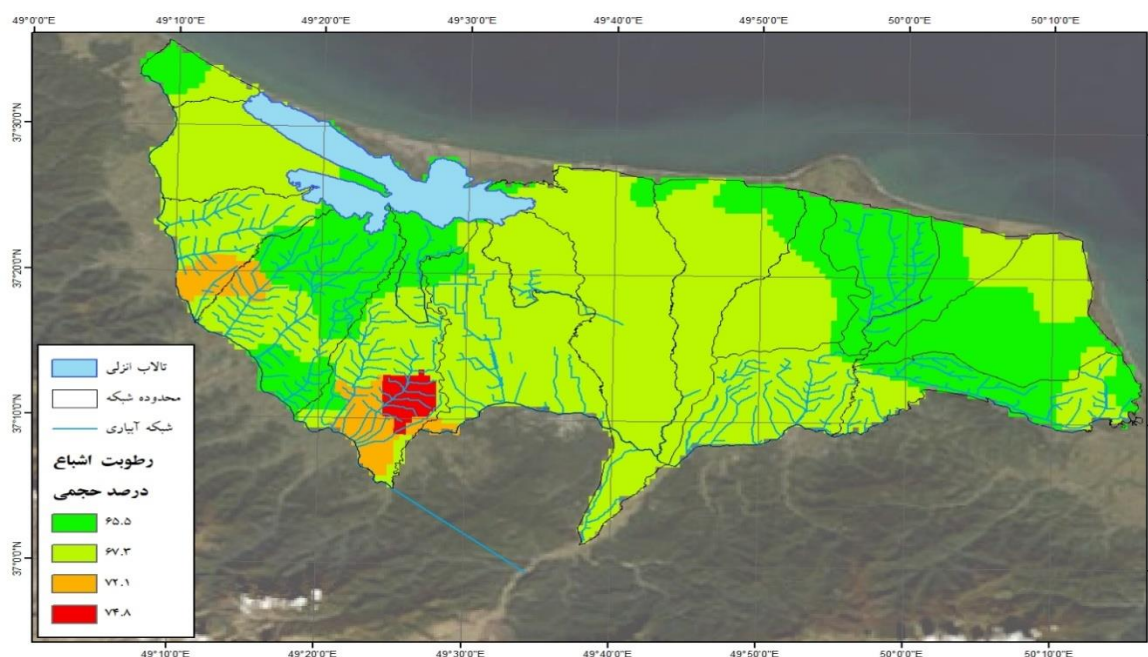
رطوبت موردنیاز برای اشباع سازی خاک در خاک‌های شالیزاری شبکه آبیاری سپیدرود

نقشه درصد حجمی رطوبت اشباع خاک (شکل ۴) و جدول ۱ نشان‌دهنده این است که بر پایه توزیع بافت خاک در مناطق مختلف شبکه، آب موردنیاز برای اشباع خاک (نیاز خالص) به‌طور میانگین ۶۶ درصد حجمی است. این مقدار در دشت صومعه‌سرا و همچنین مناطق شرقی نزدیک ۶۵ درصد و در جنوب غربی (چوبر شفت) و غرب (گوراب زرمیخ) به ۷۴ درصد حجمی می‌رسد. به‌طور کلی اراضی دشت مرکزی کمترین و مناطق شرقی و میانه بخش غربی بیشترین نیاز خالص آبی برای گُلخراپی و رساندن رطوبت به حالت اشباع دارند.

رابطه یکی از مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده، تاریخ رهاسازی آب از سد سپیدرود است. بر این مبنا درصد کشاورزانی که در طی بازه کاری ابتدای فصل به‌طور روزانه عملیات گُلخراپی را متناسب با تاریخ‌های مختلف رهاسازی آب از سد و همچنین رطوبت موجود در خاک مزرعه آغاز می‌نمایند، بر اساس آمار پیشرفت کاری تهیه‌شده توسط کارشناسان جهاد کشاورزی استان گیلان در سال‌های مختلف در نظر گرفته شد.

### محاسبه مقدار افزایش آب موردنیاز برای گُلخراپی برای تأخیر در شروع عملیات گُلخراپی

در مرحله بعد، برای هر سناریوی رطوبتی، به تفکیک فاز زمانی، از مقادیر نیاز ناخالص آبی برای مرحله گُلخراپی، میانگین (جمع نیاز ناخالص آبی برای مرحله گُلخراپی در هر کدام از فازهای زمانی هر سناریو تقسیم بر تعداد روزهای آن فاز) گرفته شد و پس از در نظر گرفتن مساحت شبکه، به‌عنوان میانگین مقدار افزایش آب موردنیاز برای گُلخراپی، در شرایط مختلف رطوبتی، در هر فاز زمانی، به ازای هر روز تأخیر در شروع عملیات گُلخراپی ارائه شد.



شکل ۴- نقشه درصد حجمی رطوبت بهینه اشباع سازی خاک در قسمت‌های مختلف شبکه آبیاری و زهکشی سپیدرود استان گیلان

جدول ۱- مساحت، درصد و مقدار رطوبت اشباع (درصد) در خاک‌های مختلف

رنگ خاک در نقشه	مساحت (هکتار)	درصد از کل اراضی	رطوبت اشباع
سبز پررنگ	۵۴۷۲۰	۳۲	۶۵/۵
سبز کم‌رنگ	۱۰۸۹۲۷	۶۳/۷	۶۷/۳
نارنجی	۳۵۹۱	۲/۱	۷۲/۱
قرمز	۱۸۸۱	۱/۱	۷۴/۸
میانگین	-	-	۶۶/۱

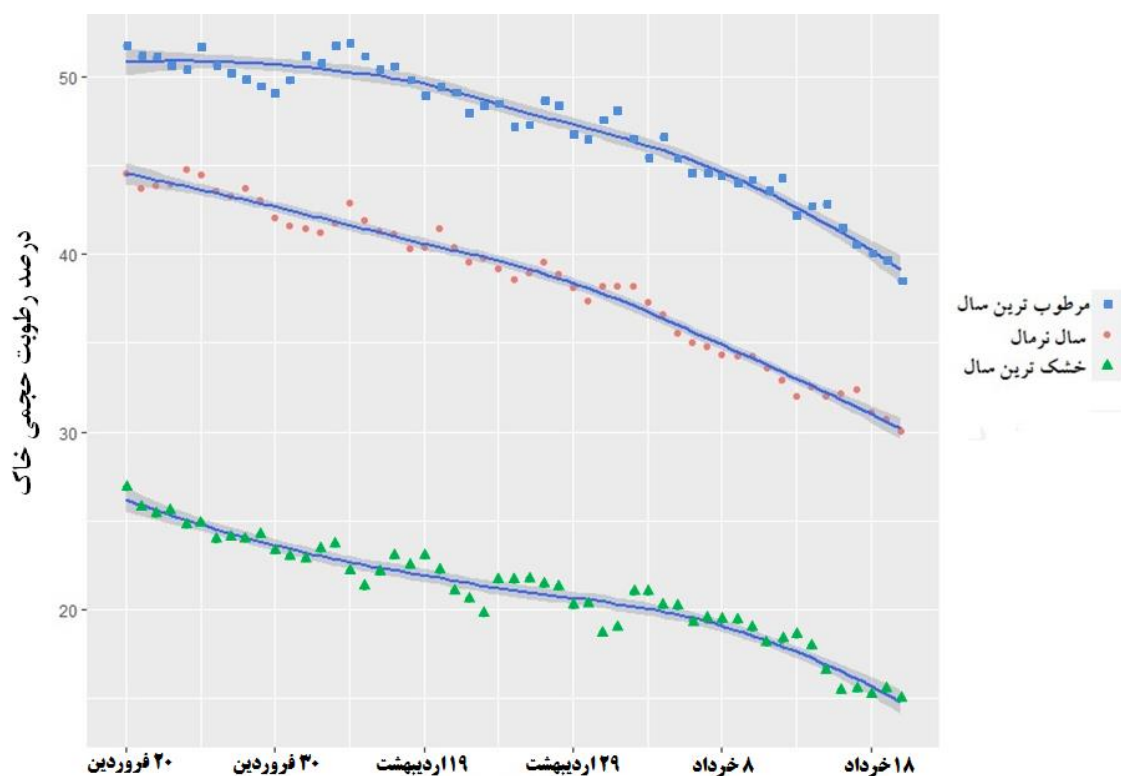
### نتایج صحت‌سنجی

با توجه به این‌که مقادیر برآورد شده رطوبت اشباع برای ۳۲۱ نمونه خاک بررسی‌شده بین ۶۵/۵ تا ۷۴/۸ و مقادیر اندازه‌گیری شده توسط موسسه تحقیقات برنج کشور برای این خاک‌ها بین ۶۴/۴ و ۷۵/۵ بود، مقادیر MAE، MBE و NRMSE محاسبه‌شده برای ارزیابی صحت برآورد رطوبت اشباع، به ترتیب ۴/۲۶، ۱/۵۹ و ۱۵٪ بودند که گویای قابل قبول بودن مقادیر محاسبه‌شده می‌باشند.

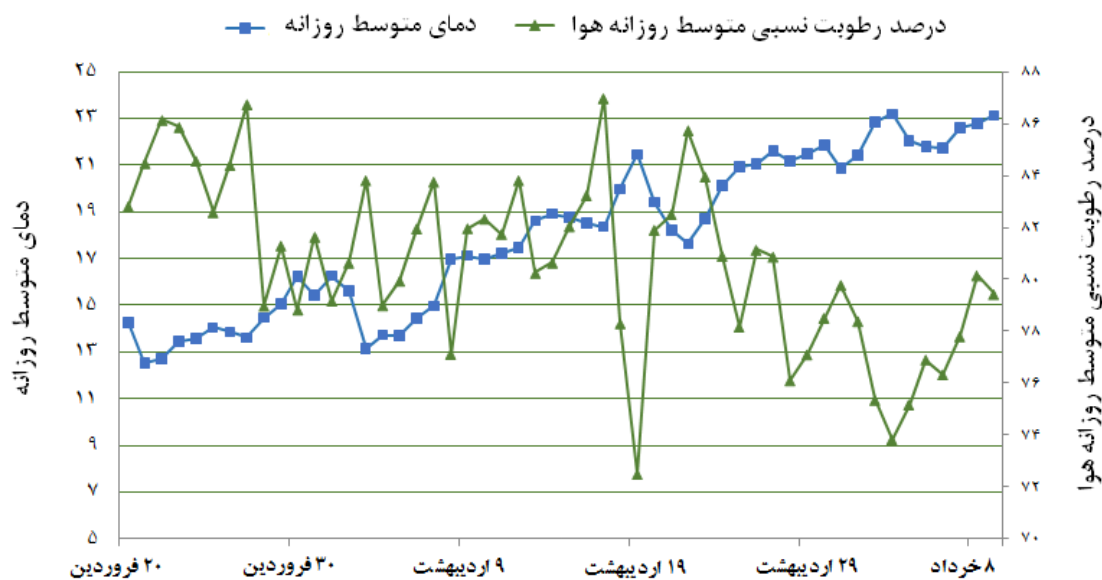
### تغییرات زمانی رطوبت خاک در اراضی شالیزاری شبکه آبیاری سپیدرود

روند تغییرات زمانی (روزانه) رطوبت خاک در طول دوره گل‌خراپی برای مرطوب‌ترین سال (ترسالی)، سال نرمال و خشک‌ترین سال (خشکسالی) مورد انتظار برای کل اراضی شبکه در شکل ۵ نمایش داده شدند. همچنین شکل ۶ نشان می‌دهد که کاهش تدریجی رطوبت خاک در طول فصل با افزایش تدریجی دمای هوا و کاهش رطوبت نسبی اتمسفر هماهنگی دارد. در پژوهشی اسعدی اسکویی و همکاران (۱۳۹۶) نشان دادند که تا زمانی که گیاه برنج به رشد کامل نرسیده می‌توان از دمای ایستگاه برای دمای مزرعه استفاده نمود؛ بنابراین در این

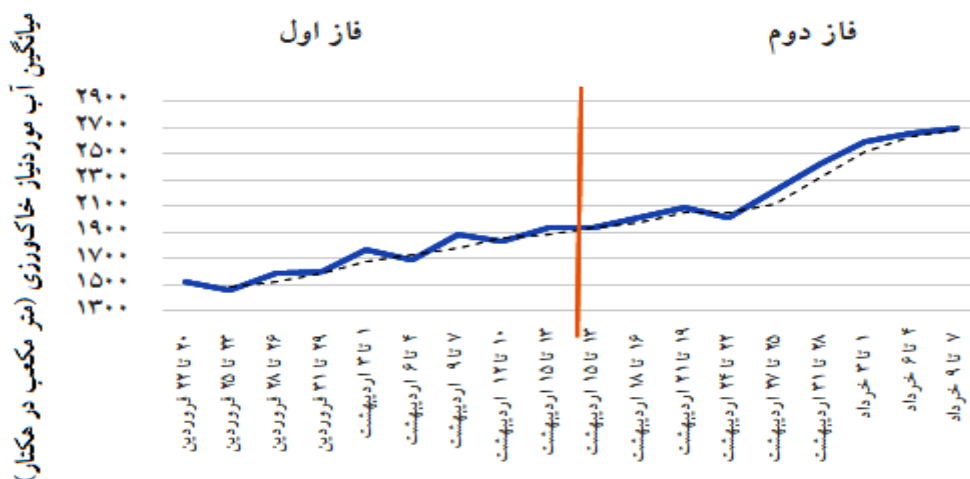
نمودار از اطلاعات دمایی ایستگاه هواشناسی کشاورزی رشت استفاده شده‌است. از نقطه‌نظر زمانی در دهه پایانی فروردین و در سال‌های خشک، شاهد افزایش ۳۵ درصدی شیب کاهش رطوبت حجمی خاک نسبت به سال‌های مرطوب و حدود ۲۵ درصدی نسبت به سال‌های نرمال هستیم. به‌بیان‌دیگر در سال‌های خشک علی‌رغم اینکه رطوبت خاک کمتر است به‌ازای هر روز تأخیر در شروع عملیات در ابتدای فصل هم مقدار بیشتری از رطوبت خاک از دسترس خارج می‌شود که نشان‌دهنده تفاوت قابل توجه در سال‌های ترسالی و خشکسالی محتوای رطوبتی خاک در اراضی منطقه است. میانگین نرخ کاهش روزانه رطوبت حجمی خاک در این دوره در سال‌های ترسالی، نرمال و خشکسالی به‌ترتیب ۰/۲۷، ۰/۲۴ و ۰/۲۲ درصد در روز است اما نرخ کاهش رطوبت از دهه دوم اردیبهشت به بعد که منطبق با دما و ساعت آفتابی بیشتر و در نتیجه توان تبخیری اتمسفر زیاد بود، افزایش یافت و به بیشینه دو درصد در روز نیز رسید؛ بنابراین تحلیل میزان آب موردنیاز گل‌خراپی (برمبنای رطوبت خاک در سال نرمال) در دو فاز ۱) محدوده زمانی ۲۰ فروردین تا ۱۴ اردیبهشت و ۲) ۱۵ اردیبهشت تا ۱۰ خرداد قابل تفکیک است (شکل ۷).



شکل ۵- روند تغییرات زمانی درصد رطوبت حجمی خاک کل محدوده برای دوره بهینه گلخراپی در مرطوب‌ترین سال، سال نرمال و خشک‌ترین سال



شکل ۶- روند تغییرات میانگین دما و درصد رطوبت نسبی متوسط روزانه هوا در بازه زمانی مورد مطالعه (۲۰ فروردین تا ۱۰ خرداد)

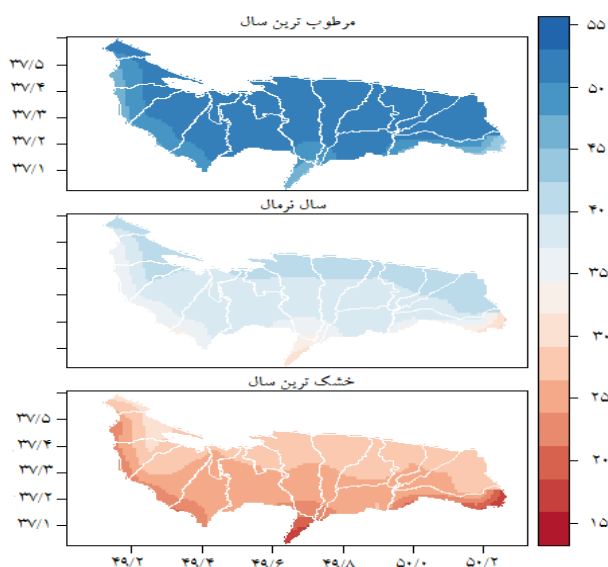


شکل ۷- روند تغییرات میانگین آب موردنیاز خاک‌ورزی (متر مکعب در هکتار) در بازه زمانی مورد مطالعه

با رطوبت متوسط به حدود ۴۰ و در سال‌های خشک‌سالی (خشک‌ترین سال) به حدود ۲۵ درصد حجمی رسید. مناطق نوار ساحلی و به‌ویژه اراضی پیرامون تالاب انزلی و دشت صومعه‌سرا مرطوب‌ترین مناطق و اراضی مجاور مناطق کوهپایه‌ای به‌ویژه دهانه دره سپیدرود (به‌علت ارتفاع بیشتر) و منتهی‌الیه شرقی محدوده (به‌علت کلاس بافت خاک سبک‌تر) دارای خشک‌ترین وضعیت بودند. مناطق مرکزی نیز در سال‌های خشک، افت ۲۰ تا ۲۵ درصدی نسبت به وضعیت مرطوب نشان دادند.

### تغییرات مکانی-زمانی رطوبت خاک در اراضی شالیزاری سپیدرود در ابتدای فصل

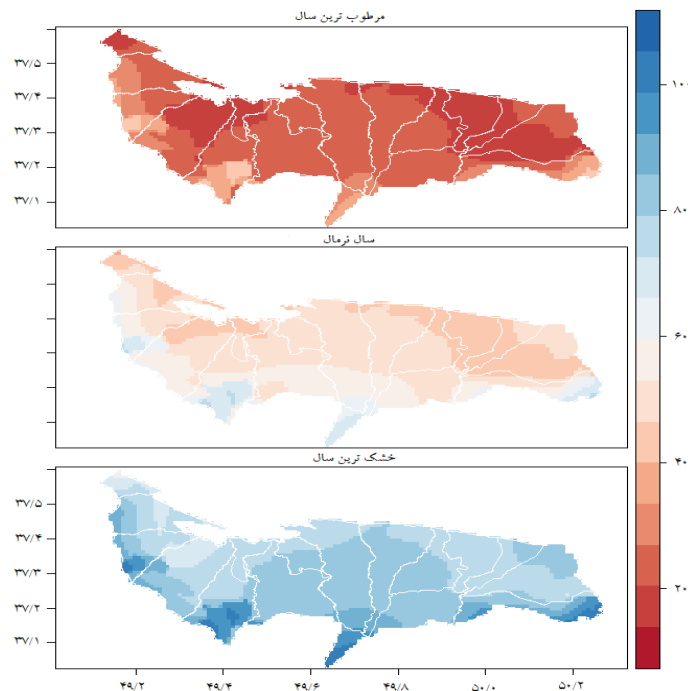
شکل ۸ نقشه‌های تغییرات مکانی مقدار رطوبت خاک، در سه سناریوی خشک‌ترین سال (۹۹ درصد)، نرمال (۵۰ درصد) و مرطوب‌ترین سال (یک درصد) بر اساس مشاهدات هفت‌ساله ماهواره SMAP برای دوره گلخراپی شالیزار در استان گیلان (۲۰ فروردین تا ۱۰ خرداد) را نشان می‌دهد. بر اساس این شکل در مرطوب‌ترین سال، رطوبت خاک بیشتر مناطق مورد مطالعه بیش از ۵۰ درصد حجمی بود. در سال‌های نرمال



شکل ۸- الگوی توزیع مکانی خشک‌ترین سال، سال نرمال و مرطوب‌ترین سال (سال ۲۰۲۱-۲۰۱۵) درصد حجمی رطوبت خاک حاصل از ماهواره SMAP در کل دوره بهینه گلخراپی

نیاز دارند. همان‌طور که طالب‌پور (۱۳۹۷) و اسعدی اسکویی و همکاران (۱۴۰۰) با بررسی نتایج مطالعات خود گزارش کرده‌اند، این امر به دلیل رطوبت خاک کمتر و همچنین راندمان کاربرد پایین‌تر، بافت خاک سبک‌تر و نشت جانبی بیشتر به دلیل شیب زیادتر اراضی و تأخیر در زمان شروع گلخراپی به دلیل اطمینان از وجود آب در این نواحی است. با این حال به دلیل محدود بودن سطح این اراضی نسبت به اراضی جلگه‌ای و پست، سهم کلی این اراضی از آب موردنیاز گلخراپی، کمتر از اراضی جلگه‌ای و پست شبکه است (شکل ۹).

در شکل ۹ نقشه‌های تغییرات مکانی آب موردنیاز تا رسیدن به مرحله اشباع، در سه سناریوی خشک-ترین سال (۹۹ درصد)، نرمال (۵۰ درصد) و مرطوب‌ترین سال (یک درصد) بر اساس مشاهدات هفت‌ساله ماهواره SMAP برای دوره گلخراپی شالیزار در استان گیلان (۲۰ فروردین تا ۱۰ خرداد) نمایش داده شدند. در واقع این نقشه‌ها از تفاضل رطوبت خاک (بر اساس داده‌های ماهواره SMAP) و مقدار آب لازم برای اشباع به دست آمده است. بر اساس این نقشه‌ها در خصوص مقدار آب موردنیاز در واحد سطح، نواحی کوهپایه‌ای شبکه به آب بیشتری برای انجام عملیات شخم و گلخراپی



شکل ۹- نقشه‌های الگوی مکانی نسبت متوسط دوره‌ای ارتفاع آب (میلی‌متر) موردنیاز برای رساندن خاک به حد اشباع در خشک‌ترین سال، سال نرمال و مرطوب‌ترین سال

میلیون مترمکعب در اراضی شبکه) محاسبه و در جدول ۲ ارائه شده است. در سال‌های با وضعیت نرمال آب موردنیاز برای خاک‌ورزی در پهنه استان در تاریخ ۲۲ و ۳۱ فروردین و ۶، ۱۲، ۲۱ و ۲۷ اردیبهشت و ۱۰ خرداد به ترتیب حدود ۱۵۱۷، ۱۵۹۴، ۱۶۸۵، ۱۸۲۷، ۲۰۷۸، ۲۲۲۳ و ۲۷۰۰ مترمکعب بر هکتار بود. همچنین در مرطوب‌ترین سال آب موردنیاز برای خاک‌ورزی در پهنه استان در این

با احتساب میانگین عمق ۲۰ سانتی‌متر برای گلخراپی و برآورد مقادیر مختلف تلفات نفوذ عمقی، جانبی و رواناب خروجی، و راندمان کل و سپس ترکیب آن با آب موردنیاز تا رسیدن به مرحله اشباع، حجم آب ناخالص موردنیاز برای مرحله گلخراپی با احتمالات مختلف در دوره‌های سه‌روزه از بیستم فروردین تا ۱۰ خرداد در اراضی زیر پوشش شبکه سپیدرود (بر حسب

۱۰ و ۱ درصد رطوبت خاک، افزایش مقدار آب لازم برای خاک‌ورزی در سال‌های خشک، بسیار خشک و خشک-ترین، به ترتیب برابر ۴، ۱۸ و ۵۳ درصد نسبت به رطوبت میانگین بود. کاهش آب موردنیاز برای خاک‌ورزی در سال‌های مرطوب، بسیار مرطوب و مرطوب‌ترین (احتمالات ۷۵ و ۹۰ درصد و ۹۹ رطوبت خاک) نیز به-ترتیب برابر ۴، ۶ و ۱۰ درصد نسبت به رطوبت میانگین بوده که نشان‌دهنده افزایش شدید نیاز آبی برای گل‌خرابی در سال‌های خشک است. نیز در سال‌های خشک کاهش میزان آب لازم در تاریخ ۲۲ و ۳۱ فروردین و شش اردیبهشت نسبت به تاریخ ۱۲ اردیبهشت به ترتیب برابر ۱۶، ۱۰ و هشت درصد و افزایش میزان آب لازم برای گل‌خرابی در تاریخ ۲۱ و ۲۷ اردیبهشت و ۱۰ خرداد به-ترتیب برابر ۱۳، ۲۲ و ۴۵ درصد است که نشان‌دهنده افزایش بسیار شدید آب موردنیاز برای گل‌خرابی در این مرحله با تأخیر در شروع عملیات گل‌خرابی است.

#### مقدار افزایش آب موردنیاز برای گل‌خرابی در نتیجه تأخیر در شروع عملیات گل‌خرابی

جدول ۳ نشان‌دهنده میزان افزایش آب موردنیاز گل‌خرابی به ازای هر روز تأخیر در شروع این عملیات در سناریوهای مختلف رطوبتی است. به‌عنوان مثال در یک سال نرمال به ازای هر روز تأخیر در شروع عملیات گل‌خرابی در فاز اول (تا قبل از ۲۴ فروردین) ۱۹/۱ مترمکعب معادل ۳/۳ میلیون مترمکعب در کل شبکه به نیاز آبی ناخالص گل‌خرابی افزوده می‌شود. این افزایش در روز برای فاز دوم ۳۴/۱ مترمکعب معادل ۵/۸ میلیون مترمکعب خواهد بود.

تاریخ‌ها (۲۲ و ۳۱ فروردین و شش، ۱۲، ۲۱ و ۲۷ اردیبهشت و ۱۰ خرداد) به ترتیب حدود ۱۳۸۸، ۱۴۹۰، ۱۵۰۰، ۱۶۴۰، ۱۸۳۸، ۲۰۰۲ و ۲۴۹۶ مترمکعب بر هکتار است. در خشک‌ترین سال‌ها نیز متوسط آب موردنیاز برای خاک‌ورزی در پهنه استان در تاریخ‌های یادشده (۲۲ و ۳۱ فروردین و شش، ۱۲، ۲۱ و ۲۷ اردیبهشت و ۱۰ خرداد) به ترتیب حدود ۲۴۵۹، ۲۶۲۸، ۲۶۷۶، ۲۸۳۷، ۳۰۹۸، ۳۲۰۴، ۳۶۰۲ مترمکعب بر هکتار است. این مقادیر در همه سال‌های خشکسالی و نرمال و ترسالی در مناطق کوهپایه‌ای شبکه بیش از اراضی جلگه‌ای و پست شبکه است. با توجه به ارقام یادشده از جدول ۲، در همه شرایط افزایش شدید مقدار آب خاک‌ورزی با درنگ در شروع عملیات خاک‌ورزی مشهود است.

همچنین حجم آب ناخالص موردنیاز گل‌خرابی در میانه فصل (۱۳ تا ۱۵ اردیبهشت) برای مرطوب‌ترین سال، سال بسیار مرطوب، سال مرطوب، سال نرمال، سال خشک، سال بسیار خشک و خشک‌ترین سال به ترتیب ۱۶۹۳، ۱۸۰۰، ۱۸۵۴، ۱۹۳۶، ۲۰۴۵، ۲۲۶۷ و ۲۹۸۳ مترمکعب در هکتار است. این مقادیر در انتهای فصل گل‌خرابی (هفته دوم خرداد) به ترتیب ۲۴۹۶، ۲۵۸۳، ۲۶۱۲، ۲۷۰۰، ۲۸۱۷، ۳۰۵۵ و ۳۶۰۲ مترمکعب در هکتار بود؛ بنابراین تأخیر در شروع عملیات گل‌خرابی در سال‌های خشک، مصرف آب موردنیاز گل‌خرابی را تا ۵۰۰ مترمکعب در هکتار نسبت به شروع به موقع عملیات و تا ۱۰۰۰ مترمکعب در هکتار نسبت به کاشت زودهنگام افزایش می‌دهد.

نگاهی دقیق‌تر به جدول ۲ نشان می‌دهد که اثر تأخیر بر افزایش نیاز آبی گل‌خرابی از ۲۴ اردیبهشت به بعد افزایش می‌یابد و به‌طور متوسط به ۵/۹ میلیون مترمکعب در سطح شبکه می‌رسد. بر مبنای احتمالات ۲۵،



جدول ۲- نیاز ناخالص آبی برای مرحله گلخراپی در سناریوهای رطوبتی (با سطوح مختلف احتمال وقوع) در دوره‌های سه‌روزه از ۲۰ فروردین در اراضی زیر پوشش شبکه سپیدرود (مترمکعب در هکتار)

بازه زمانی	خشک‌ترین سال	سال بسیار خشک	سال خشک	سال نرمال	سال مرطوب	سال بسیار مرطوب	مرطوب‌ترین سال
۲۰ تا ۲۲ فروردین	۲۵۴۹	۱۸۶۰	۱۵۱۷	۱۵۱۷	۱۴۳۹	۱۴۳۹	۱۳۸۸
۲۳ تا ۲۵ فروردین	۲۵۴۹	۱۸۰۷	۱۵۱۶	۱۴۶۵	۱۴۱۳	۱۳۸۸	۱۳۶۱
۲۶ تا ۲۸ فروردین	۲۶۷۲	۱۹۷۰	۱۶۲۰	۱۵۹۳	۱۵۴۰	۱۵۱۴	۱۴۳۵
۲۹ تا ۳۱ فروردین	۲۶۲۸	۱۹۹۲	۱۶۷۳	۱۵۹۴	۱۵۶۸	۱۴۹۰	۱۴۹۰
۱ تا ۳ اردیبهشت	۲۸۶۷	۲۲۱۰	۱۸۲۴	۱۷۷۰	۱۶۸۹	۱۶۶۳	۱۶۰۹
۴ تا ۶ اردیبهشت	۲۶۷۶	۲۰۰۶	۱۷۱۱	۱۶۸۵	۱۶۰۵	۱۵۵۳	۱۵۰۰
۷ تا ۹ اردیبهشت	۲۹۴۶	۲۲۴۹	۱۹۶۹	۱۸۸۶	۱۸۳۰	۱۷۴۹	۱۷۲۲
۱۰ تا ۱۲ اردیبهشت	۲۸۳۷	۲۱۵۵	۱۹۰۸	۱۸۲۷	۱۷۴۶	۱۷۲۰	۱۶۴۰
۱۳ تا ۱۵ اردیبهشت	۲۹۸۳	۲۲۶۷	۲۰۴۵	۱۹۳۶	۱۸۵۴	۱۸۰۰	۱۶۹۳
۱۶ تا ۱۸ اردیبهشت	۲۹۸۷	۲۲۶۵	۲۰۶۹	۲۰۱۴	۱۹۳۱	۱۸۷۶	۱۷۶۷
۱۹ تا ۲۱ اردیبهشت	۳۰۹۸	۲۴۲۶	۲۱۹۹	۲۰۸۷	۲۰۰۴	۱۹۷۶	۱۸۳۸
۲۲ تا ۲۴ اردیبهشت	۲۹۴۰	۲۳۳۹	۲۱۱۷	۲۰۰۷	۱۹۲۵	۱۹۲۵	۱۸۱۷
۲۵ تا ۲۷ اردیبهشت	۳۲۰۴	۲۵۶۲	۲۳۳۵	۲۲۲۳	۲۱۴۰	۲۰۸۴	۲۰۰۲
۲۸ تا ۳۱ اردیبهشت	۳۴۲۰	۲۷۷۰	۲۵۷۳	۲۴۲۲	۲۳۱۵	۲۲۵۱	۲۲۰۸
۱ تا ۳ خرداد	۳۶۱۶	۲۹۱۹	۲۷۱۲	۲۵۹۵	۲۴۷۹	۲۴۵۰	۲۳۰۶
۴ تا ۶ خرداد	۳۶۸۲	۲۹۸۲	۲۷۱۵	۲۶۵۶	۲۵۴۰	۲۵۱۰	۲۴۲۴
۷ تا ۱۰ خرداد	۳۶۰۲	۳۰۵۵	۲۸۱۷	۲۷۰۰	۲۶۱۲	۲۵۸۳	۲۴۹۶

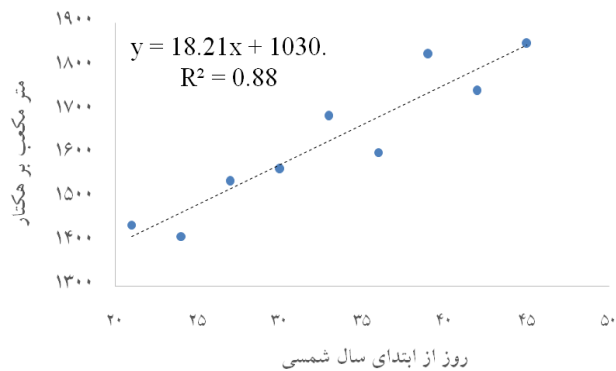
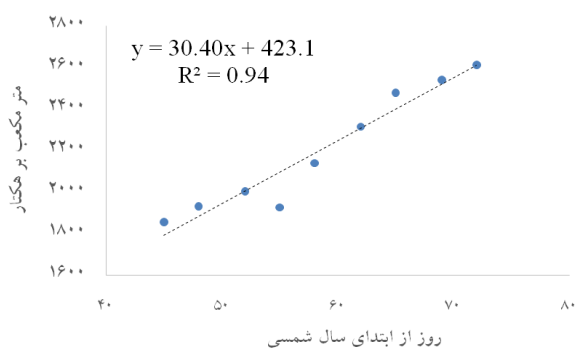
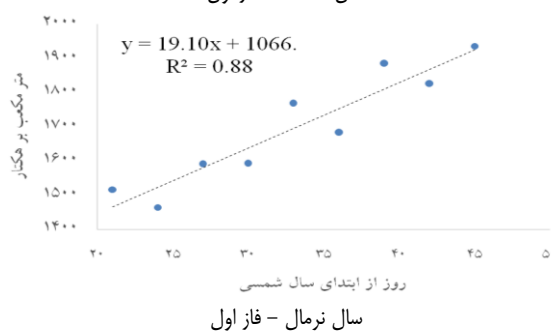
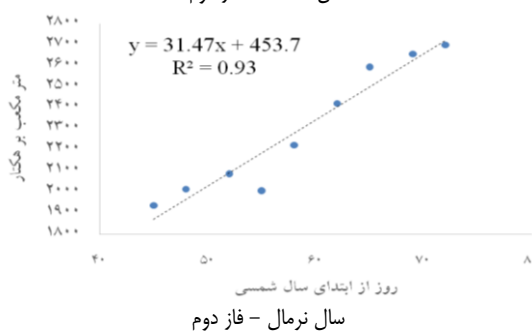
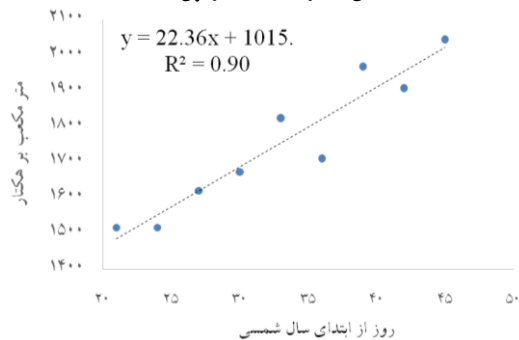
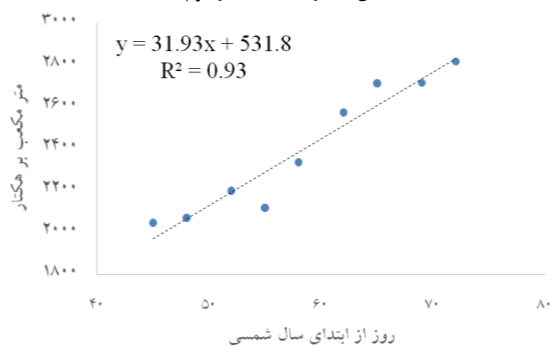
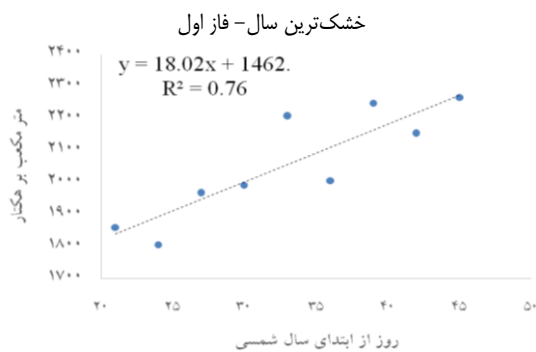
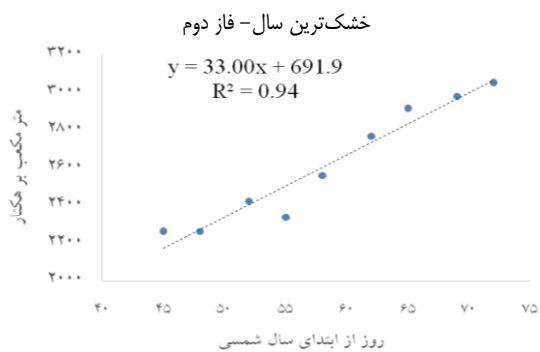
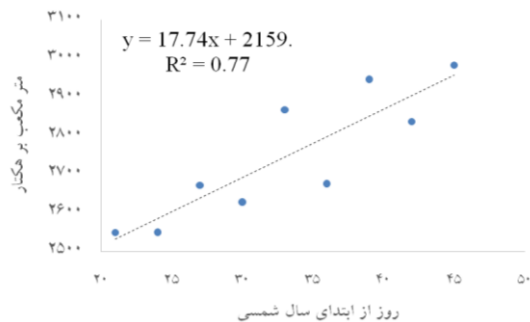
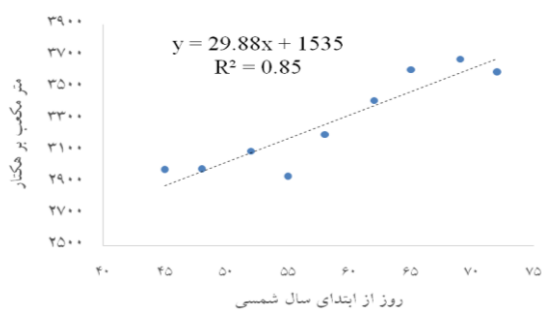
جدول ۳- میانگین مقدار افزایش آب موردنیاز برای گلخراپی در شرایط مختلف رطوبتی در فاز اول و دوم به ازای هر روز تأخیر در شروع عملیات گلخراپی

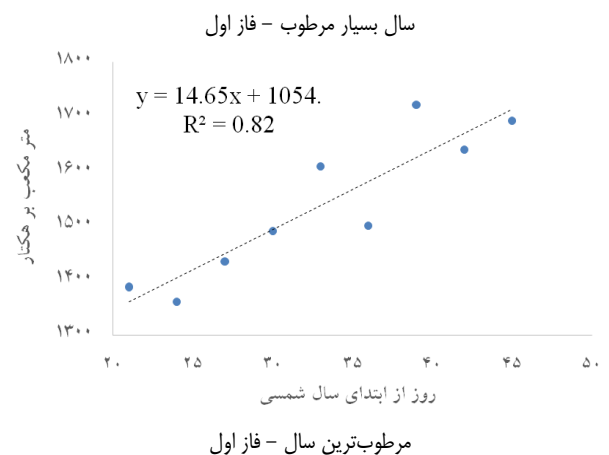
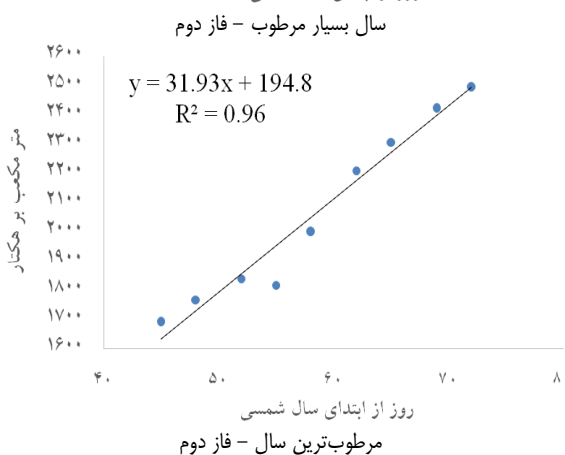
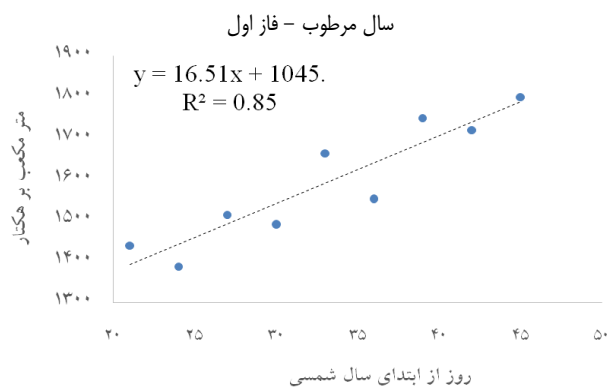
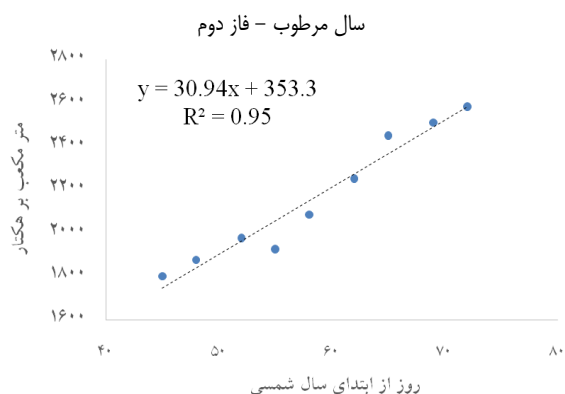
مقدار رطوبت	میزان افزایش در هکتار در فاز اول	میزان افزایش در شبکه در فاز اول	میزان افزایش در هکتار در فاز دوم	میزان افزایش در شبکه در فاز دوم
خشک‌ترین سال	۱۷/۷	۳/۰	۳۲/۳	۵/۵
سال بسیار خشک	۱۸/۱	۳/۱	۳۵/۸	۶/۱
سال خشک	۲۲/۴	۳/۸	۳۴/۶	۵/۹
سال نرمال	۱۹/۱	۳/۳	۳۴/۱	۵/۸
سال مرطوب	۱۸/۲	۳/۱	۳۲/۹	۵/۶
سال بسیار مرطوب	۱۶/۵	۲/۸	۳۵/۵	۶/۱
مرطوب‌ترین سال	۱۴/۶	۲/۵	۳۴/۶	۵/۹
میانگین	۱۸/۱	۳/۱	۳۴/۳	۵/۹

### معادله تجربی آب موردنیاز گلخراپی

روابط برای برآورد میزان آب موردنیاز گلخراپی برای سناریوهای مختلف رطوبتی در ابتدا و انتهای فصل قابل استفاده است.

معادله تجربی محاسبه میزان آب موردنیاز گلخراپی در دو فاز ابتدا و انتهای فصل برای سناریوهای مختلف رطوبتی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. این





شکل ۱۰- معادله تجربی محاسبه میزان آب موردنیاز گلخراپی در دو فاز ابتدا و انتهای فصل برای سناریوهای مختلف رطوبتی (روزهای ۲۰، ۴۰، ۵۰ و ۷۵ به ترتیب نمایش دهنده ۲۰ فروردین، نه اردیبهشت، ۱۹ اردیبهشت و ۱۳ خرداد است)

### نتیجه‌گیری

محاسبات انجام‌شده تأخیر در شروع عملیات گلخراپی در سال‌های خشک، مصرف آب موردنیاز گلخراپی را تا ۵۰۰ مترمکعب در هکتار نسبت به شروع به موقع عملیات و تا ۱۰۰۰ مترمکعب در هکتار نسبت به کاشت زود هنگام افزایش می‌دهد. همچنین در سال‌های نرمال در ازای هر روز تأخیر در عملیات گلخراپی، آب موردنیاز برای گلخراپی تا سقف ۳۴/۱ مترمکعب در هکتار افزایش می‌یابد. نیز از ۲۴ اردیبهشت به بعد اثر تأخیر بر افزایش نیاز آبی گلخراپی افزایش می‌یابد؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در همه شرایط (سناریوها) به‌ویژه در سال‌های خشک در صورت نبودن منبع آبی دیگر (مانند چاه یا بارش) برای گلخراپی، از نقطه نظر استفاده بهینه رطوبت موجود در خاک، بهتر است رهاسازی و تأمین آب موردنیاز از سد سپیدرود برای عملیات گلخراپی در اوایل اردیبهشت انجام شود. بدیهی است تعیین تاریخ دقیق شروع گلخراپی افزون بر تحلیل اطلاعات رطوبت خاک، به دیگر عوامل

در این تحقیق از داده‌های هفت‌سال اخیر رطوبت خاک ماهواره SMAP با قدرت تفکیک نه کیلومتر مربع برای ارزیابی روزانه رطوبت خاک اراضی زیر پوشش شبکه آبیاری سپیدرود استفاده شد. در تمام سناریوهای مطالعه‌شده، مناطق کوهپایه‌ای شبکه، رطوبت کمتری نسبت به اراضی جلگه‌ای و خصوصاً پست داشتند و رطوبت خاک در طول دوره ۵۳ روزه متعارف عملیات گلخراپی (۲۰ فروردین تا ۱۰ خرداد) روند کاهشی داشت. سرعت این کاهش به تدریج افزایش یافته که با احتساب میانگین عمق ۲۰ سانتی‌متر برای گلخراپی و برآورد مقادیر مختلف تلفات نفوذ عمقی، جانبی و رواناب خروجی و ترکیب آن با داده‌های رطوبت خاک برآورد شده از ماهواره SMAP، حجم آب ناخالص موردنیاز گلخراپی در میانه فصل (۱۳ تا ۱۵ اردیبهشت) تفاوت قابل‌توجهی با انتهای فصل گلخراپی (هفته دوم خرداد) نشان داد. بنابر

هیچ راه عملیاتی دیگری برای برآورد نیاز آبی وجود ندارد، بدون استفاده از داده‌های رطوبت خاک ماهواره‌ای محاسبه و برآورد مورد نیاز گلخراپی با این دقت غیرممکن است؛ بنابراین پیشنهاد می‌شود استفاده از داده‌های رطوبت خاک در چنین دست محاسباتی برای سایر محصولات باغی و زراعی (که نیاز به هیرم‌کاری و ماخار دارند) مورد توجه قرار گیرد. همچنین استفاده از الگوریتم‌های ریز مقیاس‌سازی به افزایش دقت و کیفیت محاسبات در مقیاس‌های مکانی کوچک سودمند خواهد بود.

هواشناسی به‌ویژه پیش‌بینی سرماهای دیررس بهاره بستگی دارد. با وجود راندمان کاربرد پایین‌تر به دلیل کمبود سطح اراضی کوهپایه‌ای، سهم کلی این اراضی از آب مورد نیاز گلخراپی کمتر از اراضی جلگه‌ای و پست شبکه است.

استفاده از داده‌های ماهواره SMAP به دلیل فراهم‌سازی اطلاعات سری زمانی رطوبت خاک با تراکم مکانی مناسب که دستیابی به آن‌ها در عمل با نمونه-برداری‌های زمینی غیرممکن است، امکان جدیدی را در پایش و محاسبه آب مورد نیاز گلخراپی فراهم می‌سازد و از آنجاکه در زمان گلخراپی و عدم حضور گیاه در محیط

### فهرست منابع

۱. اسعدی اسکویی، ا.، کوزه‌گران، س.، یزدانی، م. ر. و رحمانی، ا.، ۱۴۰۰. تأثیر سطوح احتمالات متفاوت در برآورد نیاز آبی خالص برنج در استان‌های شمالی ایران. آب‌و‌خاک، ۳۵(۵): ۶۷۱-۶۵۹.
۲. اسعدی اسکویی، ا.، گودرزی، س.، و هلالی، ج.، ۱۴۰۱. بررسی تغییرات مکانی و زمانی رطوبت خاک سطحی در ایران با استفاده از محصول SMAP L4. نیوار، ۴۶(۱۱۶-۱۱۷): ۱-۱۱.
۳. اسعدی اسکویی، ا.، موسوی بایگی، م.، یزدانی، م. ر.، و علیزاده، ا.، ۱۳۹۶. مقایسه فراسنج‌های دمایی اندازه-گیری شده در شالیزار و ایستگاه هواشناسی. پژوهش‌های حفاظت آب‌و‌خاک، ۲۴(۵): ۱۲۹-۱۴۵.
۴. حاجی ملکی، خ.، واعظی، ع. ر.، سرمیدیان، ف.، کراو و بروکال. (۱۳۹۹). اعتبارسنجی داده‌های رطوبت خاک سطحی ماهواره SMAP در کاربری‌های مختلف در حوضه سیمینه-زرنینه (بوکان). تحقیقات آب‌و‌خاک ایران، ۵۱(۵): ۱۳۱۷-۱۳۲۹.
۵. صبوری نوقابی، م.، رجبی، م. م.، و 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 صالح‌آباد ایلام. تحقیقات منابع آب ایران، ۱۷(۴): ۱۴۴-۱۶۰.
۶. طالب‌پور، ع.، ۱۳۹۷. اثر رطوبت اولیه و بافت خاک بر میزان آب و انرژی مصرفی و خصوصیات خاک شالیزاری در فرآیند گلخراپی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه گیلان.
۷. غفاری، ا.، داوری، ک. و حسینی، ف.، ۱۳۹۹. توسعه الگوریتم‌های بهبودیافته برای ریزمقیاس‌سازی رطوبت خاک سطحی ماهواره SMAP با استفاده از داده ماهواره‌های نوری/حرارتی. آبیاری و زهکشی ایران. ۱۴(۲): ۶۶۰-۶۵۰.
۸. فلاح، و.، ۱۳۴۸. احتیاجات آبی برنج و اندازه‌گیری آن. وزارت کشاورزی و منابع طبیعی، نشریه شماره ۴۳۳.
۹. کرمی، ا.، مرادی، ح. ر.، و موسیوند، ع. ج.، ۱۳۹۹. بهبود وضوح مکانی داده‌های رطوبت خاک ماهواره‌ای SMAP با روش تلفیق رادار-تابش‌سنج در آبخیز فیروزآباد اردبیل. پژوهش‌های آبخیزداری. ۳۳(۴): ۲۹-۱۷.

۱۰. ملاح، س.، دلسوز خاکی، ب.، دواتگر، ن.، بازرگان، ک.، نویدی، م. ن.، رضائی، ل.، شکوری کتیگری، م.، شکری واحد، ح.، شیخ‌الاسلام، ه.، شیرین‌فکر، ا.، و کهنه، ا.، ۱۳۹۸. مقایسه سه روش زمین‌آمار برای پیش‌بینی گروه‌های بافتی در اراضی زراعی و باغی استان گیلان. پژوهش‌های خاک، ۳۳(۲): ۲۱۳-۲۲۵.
۱۱. یوسفی مقدم، س.، موسوی؛ س. ف.، مصطفی‌زاده‌فر، ب.، یزدانی، م. ر.، و همت، ع.، ۱۳۹۱. تأثیر سطوح مختلف پادلینگ بر تغییرات رطوبت و چگالی حجمی سه بافت خاک غالب در اراضی شالیزاری استان گیلان. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب‌و خاک، ۱۶(۶۰): ۱-۱۲.
12. Akbar. R., Short Gianotti DJ, Salvucci GD and Entekhabi D, 2019. Mapped hydroclimatology of evapotranspiration and drainage runoff using SMAP brightness temperature observations and precipitation information. *Water Resources Research*, 55(4): 3391-3413.
13. Crow, WT., Chen, F., Reichle, RH., and Xia. Y., 2019. Diagnosing bias in modeled soil moisture/runoff coefficient correlation using the SMAP level 4 soil moisture product. *Water Resources Research*, 55(8): 7010-7026.
14. Dehghanisanij, H., Asadi Oskouei, E., and Taghizadehghasab, A., 2022. The interpretation of water consumption in the agricultural sector based on actual evapotranspiration. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 15(6): 1251-1262.
15. El Hajj, M., Baghdadi, N., Zribi, M., Rodríguez-Fernández, N., Wigneron, JP., Al-Yaari A and Calvet, JC., 2018. Evaluation of SMOS, SMAP, ASCAT and Sentinel-1 soil moisture products at sites in Southwestern France. *Remote Sensing*, 10(4): 569.
16. Hendrickx, JMH., Vink, NH., and Fayinke, T., 1986. Water requirement for irrigated rice in a semi-arid region in West Africa. *Agricultural water management*, 11(1): 75-90.
17. International rice research institute, 2020. Land preparation - IRRI Rice Knowledge Bank. Retrieved January 22, 2019, from <http://www.knowledgebank.irri.org/step-by-step-production/pre-planting/land-preparation>.
18. Jamieson, PD., Porter, JR., and Wilson, D. R., 1991. A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. *Field crops research*, 27(4): 337-350.
19. Koster, RD., Liu, Q., Mahanama, SP., and Reichle, RH., 2018. Improved hydrological simulation using SMAP data: Relative impacts of model calibration and data assimilation. *Journal of hydrometeorology*, 19(4): 727-741.
20. Li, C., Lu, H., Yang, K., Han, M., Wright, JS., Chen, Y., and Gong, W., 2018. The evaluation of SMAP enhanced soil moisture products using high-resolution model simulations and in-situ observations on the Tibetan Plateau. *Remote Sensing*, 10(4): 535.
21. Li, J., and Heap, AD., 2014. Spatial interpolation methods applied in the environmental sciences: A review. *Environmental Modelling and Software*, 53: 173-189.
22. Mladenova, IE., Bolten, JD., Crow, W., Sazib, N., and Reynolds, C., 2020. Agricultural drought monitoring via the assimilation of SMAP soil moisture retrievals into a global soil water balance model. *Frontiers in big Data* 3:10.
23. Pirmoradian, N., Kamgar-Haghighi, AA., and Sepaskhah, AR., 2004. Lateral seepage, deep percolation, runoff, and the efficiencies of water use and application in irrigation rice in Kooshkak region in Fars's province, I.R. of Iran. *Iran Agricultural Research* 23.24(1): 1-8.
24. Souza, AG., Neto, AR., Rossato, L., Alvalá, R., and Souza, LL., 2018. Use of SMOS L3 soil moisture data: Validation and drought assessment for Pernambuco State, Northeast Brazil. *Remote Sensing*, 10(8): 1314.
25. Thomas Ambadan, J., Oja, M., Gedalof, ZE., and Berg, AA., 2020. Satellite-Observed Soil Moisture as an Indicator of Wildfire Risk. *Remote Sensing*, 12(10): 1543.
26. Velpuri, NM., Senay, GB., and Morissette, JT., 2016. Evaluating new SMAP soil moisture for drought monitoring in the rangelands of the US high plains. *Rangelands*, 38(4): 183-190.

27. Xiong, L., and Zeng, L., 2019. Impacts of introducing remote sensing soil moisture in calibrating a distributed hydrological model for streamflow simulation. *Water*, 11(4): 666.
28. Zhu, L., and Zhu, A., 2021. Extraction of Irrigation Signals by Using SMAP Soil Moisture Data. *Remote Sensing*, 13(11): 2142.

# Analysis of Temporal and Spatial Variations of Water Requirement for Puddling in Paddy Fields of Sefidrood Irrigation Network Using SMAP Satellite Soil Moisture Information

**M. R. Yazdani, E. Asadi Oskouei\*, A. Rahmani, N. Davatgar, and B. Delsouz Khaki**

Assistant Prof., Rice Research Institute of Iran, Agricultural Research, Education, and Extension Organization, Rasht, Iran. [smryazdany@yahoo.ca](mailto:smryazdany@yahoo.ca)

Assistant Prof., Climatology and Climate Change Research Institute, Atmospheric Science and Meteorology Research Center, Mashhad, Iran. [e.asadi.o@gmail.com](mailto:e.asadi.o@gmail.com)

Ph.D. student, Tehran University, Soil Science group, Karaj, Iran. [a.rahmani@ut.ac.ir](mailto:a.rahmani@ut.ac.ir)

Associate Prof., Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran. [n.davatgar@areeo.ac.ir](mailto:n.davatgar@areeo.ac.ir)

Researcher, Soil and Water Research Institute, AREEO, Karaj, Iran. [b\\_delsouz@yahoo.com](mailto:b_delsouz@yahoo.com)

Received: October 2022 and Accepted: June 2023

## Abstract

In order to analyze the temporal and spatial changes in the amount of water required for puddling in rice fields of the Sapidroud Network, daily soil moisture data from the SMAP satellite was obtained and used in a seven-year period (2015 to 2021). The puddling stage (from April 20 to June 10) was analyzed after grouping based on different probability of occurrence (1%, 10%, 25%, 50%, 75%, 90% and 99%) and using raster calculations. In addition, in order to validate the calculations, the predicted values were compared with the saturated soil moisture values of 321 soil samples with specific geographic coordinates that had been measured by the Rice Research Institute of Iran. The comparison was conducted by using the mean absolute error (MAE), mean bias error (MBE), and normalized root mean square error (NRMSE). The results showed that in all moisture scenarios (from the wettest to driest), the foothills had less moisture than the plain and, especially, the low lands, and the soil moisture showed a decreasing trend during the growing period. The rate of this reduction increased gradually and in some areas it reached 2% per day at the end of the puddling period (May 22 to 31). The amount of gross water required for puddling increased from the wettest to the driest year and in the middle of the season (May 3 to 5) it was from 1693 to 2983 square meters per hectare and at the end of the season from 2496 to 3602 m<sup>3</sup>/ha, respectively. The validation results showed that the calculated MAE, MBE, and NRMSE values were 4.26%, 1.59%, and 15%, respectively, indicating that the accuracy is acceptable. The findings showed that the delay in the start of the puddling operation increases the water required for puddling operation (1.34 m<sup>3</sup>/ha for each day delay in a normal year). Therefore, in the lands of this network, in all circumstances, especially in dry years, to save water, it is better to release/supply water required for puddling from local reservoirs, wells, or from the Sepidroud Dam in early May.

**Keywords:** Water required for puddling, Plowing saturated soil, Probabilistic analysis, Water saving

---

\* - Corresponding author's email: [e.asadi.o@gmail.com](mailto:e.asadi.o@gmail.com)