



Maintaining Yield and Improving Water Use Efficiency of Soybean (*Glycine max*) with Wheat (*Triticum* spp.) Straw Mulch: An Assessment Based on Field Experiment and Modeling

Effat Paravar¹, Afshin Soltani^{1*}, Seyed Reza Amiri², Ebrahim Zeinali¹ and Farshid Ghaderi Far¹

1- Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

2- Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, University of Jiroft, Jiroft, Iran

(*- Corresponding author's Email: Afshin.Soltani@gau.ac.ir, Afshin.Soltani@gmail.com)

Received: 13-11-2025

Revised: 23-05-2026

Accepted: 01-06-2026

Available Online: 22-06-2026

How to cite this article:

Paravar, E., Soltani, A., Amiri, S. R., Zeinali, E., & Ghaderi Far, F. (2026). Maintaining yield and improving water use efficiency of soybean (*Glycine max*) with wheat (*Triticum* spp.) straw mulch: an assessment based on field experiment and modeling. *Journal of Agroecology*, 18(2), 165-182. (In Persian)
[https:// doi.org/10.22067/AGRY.2026.96489.1260](https://doi.org/10.22067/AGRY.2026.96489.1260)

Introduction

Freshwater scarcity and the increasing demand from the agricultural sector, which consumes approximately 70% of global freshwater, have posed serious challenges to global food security. This pressure is particularly severe in arid and semi-arid regions like Iran, where high evaporation rates and irregular rainfall threaten crop production sustainability. Conservation agriculture, particularly the retention of crop residues (straw mulch) on the soil surface, is an effective strategy to manage soil and water resources. Mulch conserves soil moisture by physically reducing the solar radiation reaching the soil, thus directly decreasing soil evaporation, especially during the early stages of crop growth. In Golestan province, Iran's primary soybean (*Glycine max* L.) production hub, soybean is mostly cultivated in rotation with wheat (*Triticum aestivum* L.). However, farmers commonly burn or remove wheat residues to accelerate land preparation, exposing the soil to severe evaporation. Despite the importance of residue retention, there is a lack of quantitative knowledge regarding the effects of different mulch rates on soybean water-saving in this region. Therefore, this study aimed to quantitatively evaluate the impact of various rates of wheat straw mulch on soil evaporation, irrigation requirements, and the water use efficiency (WUE) of soybean using an integrated field experiment and simulation modeling approach.

Materials and Methods

This study utilized a two-step integrated approach comprising a field experiment and long-term simulation modeling. First, a field experiment was conducted at the research farm of Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran, to quantify the effect of mulch on soybean phenology. The experiment was laid out in a randomized complete block design with four replications. Treatments consisted of six levels of wheat straw mulch: 0 (control), 750, 1500, 2250, 3000, and 3750 kg ha⁻¹. Soybean (cv. DPX) was sown on July 1. Phenological stages, particularly days to emergence and flowering, were meticulously recorded to extract



Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

 [https:// doi.org/10.22067/AGRY.2026.96489.1260](https://doi.org/10.22067/AGRY.2026.96489.1260)

linear correction factors. In the second step, the SSM-iLegume model was employed for long-term simulations (2000-2020) across two distinct climates in Golestan province: Gorgan and Minodasht. The model's genetic coefficients for the DPX cultivar had been previously parameterized and evaluated for the region in previous studies. The primary novelty in the modeling phase was incorporating the mulch effect. Using the field data, correction factors were applied to simulate the delay in phenology caused by mulch. Furthermore, the physical effect of mulch on reducing potential soil evaporation (E_p) was dynamically simulated based on the soil cover fraction. The model simulated crop responses, water balance components, and WUE under the specified mulch treatments and automated irrigation scenarios. Output data were statistically analyzed using Analysis of Variance (ANOVA) and Duncan's multiple range test ($p < 0.05$) in SAS 9.4 software.

Results and Discussion

Field observations indicated that wheat straw mulch significantly delayed soybean phenology by shading the soil and reducing received thermal time. Specifically, for every one ton per hectare of applied mulch, emergence and flowering were delayed by 0.7 and 1.03 days, respectively. These correction factors were successfully integrated into the SSM-iLegume model. Long-term simulation results revealed that while straw mulch did not significantly alter the total above-ground dry matter and grain yield in either Gorgan or Minodasht, it profoundly impacted the soil water balance. Mulch cover significantly reduced cumulative evaporation (CE) from the soil surface, especially during the early growth stages before canopy closure. The application of 3.75 t ha^{-1} of mulch decreased CE by 51% (equivalent to 68 mm) in Gorgan and by 50% (equivalent to 92 mm) in Minodasht over the growing season. Consequently, the ratio of soil evaporation to total evapotranspiration (E/ET) decreased to its lowest levels (0.16 and 0.18 in Gorgan and Minodasht, respectively). The significant reduction in non-productive evaporation translated directly into decreased irrigation water requirements. Applying 3.75 t ha^{-1} of mulch reduced the required irrigation volume by 15% (from 329 mm to 280 mm) in Gorgan and by 21% (from 366 mm to 288 mm) in Minodasht, eliminating the need for approximately one irrigation event per season. Because grain yield was maintained while water consumption decreased, Water Use Efficiency (WUE) improved significantly, reaching maximum values of 14.9 and $16.8 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ in Gorgan and Minodasht, respectively, under the highest mulch rate. Furthermore, scaling these findings to the 57,462 hectares of soybean cultivated area in Golestan province demonstrated that implementing this residue management strategy could potentially save up to 34.41 million cubic meters of agricultural water annually.

Conclusion

In conclusion, the integrated field and modeling assessment demonstrated that utilizing wheat straw mulch is a highly efficient agronomic strategy for soybean production in semi-arid regions. Retaining up to 3.75 t ha^{-1} of crop residues significantly suppresses soil evaporation and improves water use efficiency without incurring any yield penalty. This practice not only ensures the sustainability of crop production but also plays a vital role in conserving scarce regional freshwater resources. Transitioning from the conventional practice of residue burning to conservation agriculture is strongly recommended to optimize water footprints and mitigate the impacts of climate change on agricultural ecosystems.

Keywords: Mulch, Soil evaporation, Water productivity, Water saving

مقاله پژوهشی

جلد ۱۸، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۵، ص ۱۸۲-۱۶۵

حفظ عملکرد و بهبود کارایی مصرف آب سویا (*Glycine max* L.) با استفاده از مالچ کلش گندم (*Triticum aestivum* L.): ارزیابی مبتنی بر آزمایش مزرعه‌ای و مدل‌سازی

عفت پراور^۱، افشین سلطانی^{۲*}، سید رضا امیری^۳، ابراهیم زینلی^۱ و فرشید قادری فر^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۱۱

چکیده

محدودیت منابع آب شیرین و تقاضای بالای بخش کشاورزی، ضرورت به‌کارگیری راهکارهای مدیریتی برای بهینه‌سازی مصرف آب را دوچندان کرده است. کشاورزی حفاظتی و حفظ بقایای گیاهی بر سطح خاک از جمله روش‌های مؤثری هستند که با کاهش تبخیر و حفظ رطوبت، به پایداری تولید کمک می‌کنند. این پژوهش با هدف ارزیابی کمی تأثیر مقادیر مختلف مالچ کلش بر تبخیر از سطح خاک، نیاز آبی و کارایی مصرف آب سویا (*Glycine max* L.) طراحی و اجرا گردید. مطالعه به‌صورت تلفیقی از آزمایش مزرعه‌ای و شبیه‌سازی در دو منطقه با اقلیم متفاوت، گرگان و مینودشت انجام شد. تیمارهای آزمایشی شامل شش سطح مالچ کلش گندم (*Triticum aestivum* L.) شامل شاهد (بدون مالچ)، ۷۵۰، ۱۵۰۰، ۲۲۵۰، ۳۰۰۰ و ۳۷۵۰ کیلوگرم در هکتار بودند. نتایج نشان داد که پوشش مالچ به‌طور معنی‌داری تبخیر از سطح خاک را به‌ویژه در مراحل اولیه رشد که پوشش گیاهی کامل نیست، کاهش داد. کاربرد ۳/۷۵ تن مالچ در هکتار، تبخیر تجمعی را در گرگان به‌میزان ۵۱ درصد (معادل ۶۸ میلی‌متر) و در مینودشت به‌میزان ۵۰ درصد (معادل ۹۲ میلی‌متر) در طول فصل رشد کاهش داد. این کاهش تبخیر منجر به کاهش نیاز به آب آبیاری به‌ترتیب به‌میزان ۱۵ درصد در گرگان و ۲۱ درصد در مینودشت شد؛ به‌طوری که حجم آب آبیاری در مینودشت از ۳۶۶ میلی‌متر در شاهد به ۲۸۸ میلی‌متر در تیمار ۳/۷۵ تن مالچ رسید. نتایج حاصل از تعمیم این یافته‌ها به کل اراضی زیرکشت سویا در استان گلستان نشان داد که با اجرای این روش مدیریتی، پتانسیل صرفه‌جویی سالانه حدود ۳۴/۴۱ میلیون مترمکعب آب وجود دارد. بنابراین، استفاده از مالچ کلش یک راهکار مدیریتی کارآمد برای افزایش پایداری تولید و حفظ منابع ارزشمند آب در منطقه است.

واژه‌های کلیدی: بهره‌وری آب، تبخیر از سطح خاک، صرفه‌جویی آب، مالچ

مقدمه

مصرف حدود ۷۰ درصد از کل برداشت جهانی، در کانون این چالش قرار دارد (Musie & Gonfa, 2023). این فشار به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، از جمله ایران که تبخیر بالا و بارش نامنظم پایداری تولید را تهدید می‌کند، دوچندان است. بنابراین، به‌کارگیری راهکارهای مدیریتی کارآمد برای بهینه‌سازی مصرف آب در کشاورزی، یک ضرورت انکارناپذیر است (Davis et al., 2024).

در این راستا، اصول کشاورزی حفاظتی و به‌طور خاص، حفظ بقایای گیاهی (مالچ کلش) بر سطح خاک، به‌عنوان یک راهبرد مؤثر برای مدیریت پایدار آب و خاک شناخته می‌شود. مالچ با ایجاد یک

محدودیت منابع آب شیرین در کنار افزایش تقاضا ناشی از رشد جمعیت، امنیت غذایی جهانی را با چالش‌های جدی مواجه کرده است. بخش کشاورزی به‌عنوان بزرگ‌ترین مصرف‌کننده منابع آب شیرین، با

۱- دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

۲- گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه جیرفت، جیرفت، ایران
(*)- نویسنده مسئول: (Email: afshin.soltani@gmail.com)

<https://doi.org/10.22067/AGRY.2026.96489.1260>

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، از یک رویکرد تلفیقی شامل آزمایش مزرعه‌ای و مدل‌سازی شبیه‌سازی استفاده شد تا تأثیر مقادیر مختلف مالچ کلش گندم بر عملکرد و کارایی مصرف آب سویا ارزیابی شود.

۱- رویکرد تلفیقی آزمایش مزرعه‌ای و مدل‌سازی

این مطالعه بر یک راهبرد دو مرحله‌ای استوار بود:

مرحله اول (آزمایش مزرعه‌ای برای کالیبراسیون مدل): آزمایش مزرعه‌ای با یک هدف مشخص و محدود طراحی گردید: کمی‌سازی اثر مقادیر مختلف مالچ کلش گندم بر مراحل فنولوژیکی سویا (روز تا سبز شدن و روز تا گل‌دهی). از آنجایی که مدل SSM-iLegume فاقد تابعی برای شبیه‌سازی مستقیم اثر فیزیکی مالچ بر دمای خاک و تأخیر ناشی از آن در رشد اولیه گیاه است، داده‌های این آزمایش برای استخراج یک ضریب تصحیح جهت وارد کردن این پدیده به مدل، ضروری بود. لازم به ذکر است که در این آزمایش مزرعه‌ای، صفاتی نظیر عملکرد دانه، زیست‌توده، تبخیر و یا رطوبت خاک اندازه‌گیری نشد و تمرکز کامل بر ثبت دقیق داده‌های فنولوژیکی بود.

مرحله دوم (شبیه‌سازی بلندمدت برای ارزیابی سناریوها): پس از کالیبره کردن مدل برای اثر مالچ بر فنولوژی، از مدل به‌عنوان ابزاری برای ارزیابی سناریوهای مدیریتی در مقیاس زمانی بلندمدت (۲۰ ساله) و در دو اقلیم متفاوت (گرگان و مینودشت) استفاده شد. این رویکرد اجازه داد تا اثرات تجمعی و بلندمدت مالچ بر تبخیر، نیاز آبی، عملکرد و کارایی مصرف آب که اندازه‌گیری آن‌ها در یک آزمایش مزرعه‌ای کوتاه‌مدت دشوار و پرهزینه است، ارزیابی شود.

۲- آزمایش مزرعه‌ای

آزمایش مزرعه‌ای در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان با عرض جغرافیایی ۳۷ درجه و ۴۵ دقیقه شمالی، طول جغرافیایی ۵۴ درجه و ۳۰ دقیقه شرقی و ارتفاع ۱۲ متر از سطح دریا با میانگین دمای ۱۳ درجه و نوسانات دمایی ۱۰ درجه انجام شد. تیمارهای مورد مطالعه در آزمایش، شش مقدار مختلف مالچ کلش گندم شامل ۰ (بدون مالچ کلش)، ۷۵۰، ۱۵۰۰، ۲۲۵۰، ۳۰۰۰ و ۳۷۵۰ کیلوگرم در هکتار بود که در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار در مزرعه اجرا گردید. کشت در تاریخ دهم تیر ماه انجام شد. رقم سویا مورد کشت در این آزمایش، رقم متداول

لایه پوششی، از دو طریق اصلی به حفظ رطوبت خاک کمک می‌کند: اولاً، با کاهش رسیدن انرژی تابشی خورشید به سطح خاک، به‌طور مستقیم تبخیر را که عامل اصلی اتلاف آب در مراحل اولیه رشد است، کاهش می‌دهد. ثانیاً، با کاهش رواناب سطحی، فرصت نفوذ آب باران و آبیاری به داخل خاک را افزایش می‌دهد (Grover et al., 2024; Baloch et al., 2025).

مطالعات متعدد در سراسر جهان، اثرات مثبت کاربرد مالچ کلش را بر بهبود شرایط فیزیکی خاک و رشد گیاه تأیید کرده‌اند. این اثرات شامل تعدیل دمای خاک (کاهش دمای حداکثری در تابستان)، افزایش مواد آلی و بهبود عملکرد محصولات مختلف مانند ذرت (*Zea mays* L.) و گندم (*Triticum aestivum* L.) است (Imran, 2024; Liang et al., 2025). به‌طور خاص، پژوهش‌ها نشان داده‌اند که مالچ می‌تواند به‌طور چشمگیری ذخیره رطوبتی خاک را افزایش داده و بهره‌وری آب را به‌ویژه در شرایط دیم و یا آبیاری محدود بهبود بخشد (Demo & Asefa Bogale, 2024; Zhang et al., 2024). سویا (*Glycine max* L.) یکی از مهم‌ترین دانه‌های روغنی در ایران است و استان گلستان با بیشترین سطح زیرکشت، قطب اصلی تولید این محصول در کشور محسوب می‌شود (FAO, 2022). در این منطقه، سویا عمدتاً در تناوب با گندم کشت می‌شود. با این حال، یک چالش مدیریتی رایج، سوزاندن یا حذف کامل بقایای گندم پس از برداشت برای تسریع عملیات آماده‌سازی زمین است. این عمل، خاک را در برابر تبخیر شدید و فرسایش آسیب‌پذیر کرده و مزایای بالقوه حفظ بقایا را از بین می‌برد. با وجود اهمیت این موضوع، دانش کمی در مورد تأثیر کمی مقادیر مختلف مالچ بر صرفه‌جویی در مصرف آب آبیاری سویا در این منطقه وجود دارد.

بنابراین، این پژوهش با هدف ارزیابی کمی اثر مقادیر مختلف مالچ کلش گندم بر عملکرد و کارایی مصرف آب سویا طراحی شد. برای دستیابی به این هدف، از یک رویکرد تلفیقی شامل آزمایش مزرعه‌ای (برای کالیبراسیون مدل) و شبیه‌سازی بلندمدت (۲۰ ساله) با مدل SSM-iLegume برای دو منطقه گرگان و مینودشت استفاده گردید. به‌طور مشخص، این تحقیق به دنبال پاسخ به این پرسش کلیدی بود که آیا و به چه میزان، کاربرد مالچ بقایا می‌تواند به کاهش نیاز آبی و افزایش بهره‌وری آب در تولید پایدار سویا منجر شود.

مدل SSM به دلیل استفاده از روش‌ها و الگوریتم‌های متفاوت و جدید در ساختار مدل برای بیان گسترش و پیر شدن برگ‌ها و همچنین توزیع ماده خشک، نسبت به سایر مدل‌ها ساده‌تر بوده و نیاز به پارامترهای ورودی کمتری دارد.

شبیه‌سازی رشد و عملکرد سویا

اعتبار و کالیبراسیون مدل برای شرایط آزمایش

اعتبار مدل SSM-iLegume برای پیش‌بینی رشد و عملکرد سویا در شرایط منطقه گرگان (بدون مالچ) قبلاً در مطالعه سلطانی و همکاران (Soltani et al., 2020) به اثبات رسیده است. در این پژوهش، نوآوری اصلی، افزودن اثر مالچ بر فنولوژی به مدل بود. بدین منظور، با استفاده از داده‌های حاصل از آزمایش مزرعه‌ای، نمودار تغییرات روز تا سبز شدن و روز تا گل‌دهی در برابر افزایش مقدار مالچ کلش گندم رسم شد و معادله خط رگرسیون به‌عنوان ضریب تصحیح استخراج گردید. این معادله‌ها برای اصلاح پویای روز تا سبز شدن و روز تا گل‌دهی به‌عنوان تابعی از مقدار مالچ کلش در تمامی شبیه‌سازی‌ها استفاده شد.

پارامتریایی و ارزیابی مدل iLegume-SSM برای پیش‌بینی رشد و عملکرد سویا در شرایط گرگان قبلاً توسط سلطانی و همکاران (Soltani et al., 2020) انجام شده است. برای برآورد ضرایب و ارزیابی مدل از داده‌های آزمایش‌های مزرعه‌ای مختلف استفاده گردید. بعد از برآورد پارامترهای ژنتیکی، مدل با استفاده از داده‌های مستقل مورد آزمایش قرار گرفت و نتایج حاکی از کارایی قابل قبول آن برای جنبه‌های مهم گیاه زراعی در مقابل آزمایش‌های مشاهده شده شامل روز تا گل‌دهی ($RMSE=5.8$, $CV=11$)، روز تا رسیدگی ($RMSE=8.7$, $CV=6$)، تعداد گره روی ساقه اصلی ($CV=13$)، $RMSE=1.7$) و عملکرد دانه ($RMSE=48$, $CV=15$) بود. بنابراین، این مدل می‌تواند در مطالعات شبیه‌سازی عملکرد سویا و محدودیت‌های آن در واکنش به شرایط زیست محیطی، ورودی‌های مدیریتی و عوامل ژنتیکی استفاده شود. بنابراین جهت شبیه‌سازی رشد و عملکرد سویا در این آزمایش از این مدل استفاده شد.

گام اول در بخش شبیه‌سازی وارد کردن اثر مالچ بر فنولوژی سویا در مدل SSM-iLegume بود. بدین منظور، با استفاده از داده‌های حاصل از آزمایش مزرعه‌ای، نمودار تغییرات روز تا سبز شدن و نیز روز تا گل‌دهی در برابر افزایش مقدار مالچ کلش گندم رسم شد.

منطقه یعنی کتول (DPX) بود. فاصله بین بلوک‌ها دو متر و فاصله بین کرت‌ها داخل هر بلوک یک متر در نظر گرفته شد. هر کرت شامل هفت ردیف کاشت به طول پنج متر با فاصله بین ردیف ۰/۵ متر بود. در طول آزمایش، مراحل فنولوژی سویا براساس روش فهر و کاونیس به‌دقت ثبت گردید و کلیه مراقبت‌های زراعی نیز برحسب نیاز انجام گرفت. هدف از انجام این آزمایش مزرعه‌ای، بررسی کمی اثر مقادیر مختلف مالچ کلش گندم بر تأخیر در مراحل فنولوژی سویا (به‌ویژه روز تا سبز شدن و گل‌دهی) و استخراج توابع خطی (ضرایب تأخیر) جهت واسنجی زیرمدل فنولوژی در مدل SSM-iLegume بود.

لازم به ذکر است که این ارزیابی میدانی، یک آزمایش مقطعی با تمرکز انحصاری بر مراحل فنولوژیک اولیه گیاه بود و به دلیل محدودیت‌های اجرایی، اندازه‌گیری صفات زراعی انتهای فصل نظیر ماده خشک کل و عملکرد دانه در آن صورت نگرفت. لذا داده‌های حاصل از این بخش، منحصرأً جهت واسنجی زیرمدل فنولوژی در شبیه‌سازی‌ها مورد استفاده قرار گرفتند.

۳- شبیه‌سازی

توضیح مدل SSM-iLegume

جهت شبیه‌سازی از مدل SSM-iLegume که توسط سلطانی و سینکلر (Soltani & Sinclair, 2012) برای شبیه‌سازی گیاهان زراعی مختلف تهیه شده است، استفاده شد. این مدل دارای کد باز بوده و چون دارای ساختار ساده است برای اهداف آموزشی نیز قابل استفاده است. از آن جایی که مدل از صفحه گسترده اکسل برای ورودی و خروجی استفاده می‌کند کار با آن ساده است. از این مدل می‌توان در موارد متعددی نظیر کاربردهای تحقیقاتی، مدیریت زراعی و آموزشی استفاده نمود. مدل iLegume-SSM مراحل فنولوژیک را به‌عنوان تابعی از دما و طول روز پیش‌بینی می‌کند. محاسبه مراحل فنولوژی در مدل براساس مفهوم روز بیولوژیک (حداقل تعداد روز لازم برای تکمیل مرحله نمو معین در دما، طول روز و رطوبت مطلوب) می‌باشد. گسترش و پیر شدن سطح برگ تابعی از دما، نیتروژن فراهم برای رشد برگ، تراکم بوته و انتقال مجدد نیتروژن می‌باشد. برای شبیه‌سازی گسترش سطح برگ، گام اول تعیین افزایش تعداد برگ در ساقه اصلی در هر روز با استفاده از مفهوم فیلوکرون (واحد دمایی بین ظهور برگ متوالی) است. شبیه‌سازی فنولوژی و تولید ماده خشک در

شبیه‌سازی اثر مالچ بر تبخیر و تراز آب خاک

علاوه بر تأثیر بر فنولوژی، سازوکار اصلی که مدل SSM-iLegume از طریق آن اثر مالچ را بر تراز آب شبیه‌سازی می‌کند، کاهش مستقیم تبخیر از سطح خاک (E) است. این فرآیند از طریق یک رویکرد مبتنی بر فیزیک و به‌صورت روزانه انجام می‌شود:

۱- محاسبه کسر پوشش خاک: در گام اول، مدل براساس مقدار مالچ ورودی (کیلوگرم در هکتار) و یک ضریب مربوط به نوع بقایا، کسری از سطح خاک را که توسط مالچ پوشانده شده است (Soil Cover Fraction by Residue)، محاسبه می‌کند.

۲- کاهش پتانسیل تبخیر: سپس، این کسر پوشش به‌طور مستقیم پتانسیل تبخیر از سطح خاک^۱ را کاهش می‌دهد. این کاهش به این دلیل است که بقایای گیاهی مانع از رسیدن بخش قابل توجهی از تابش خورشیدی به سطح خاک می‌شوند و انرژی مورد نیاز برای فرآیند تبخیر را محدود می‌کنند. این رابطه را می‌توان به‌صورت مفهومی به شکل معادله ۱ نشان داد:

$$E_p(\text{mulched}) = E_p(\text{bare}) \times (1 - \text{Cover_Fraction}) \quad (1)$$

۳- تأثیر بر تراز آب: این کاهش روزانه در E_p منجر به کاهش تبخیر واقعی و تجمعی (CE) در طول فصل رشد می‌شود. در نتیجه، رطوبت در لایه سطحی خاک برای مدت طولانی‌تری حفظ شده و نیاز گیاه به آب آبیاری (CIRGW) کاهش می‌یابد. این صرفه‌جویی در آب، درحالی‌که عملکرد دانه (WGRN) تغییر معنی‌داری نمی‌کند، به‌طور مستقیم منجر به افزایش کارایی مصرف آب (WUE) می‌شود. لازم به ذکر است که پارامترهای ذاتی و هیدرولیکی خاک (مانند شماره منحنی، ظرفیت مزرعه و نقطه پژمردگی) در بین تیمارها ثابت فرض شدند و اثر مالچ صرفاً از طریق تأثیر پویا بر تراز انرژی سطح خاک و فنولوژی گیاه در مدل اعمال گردید.

تحلیل آماری

داده‌های خروجی حاصل از شبیه‌سازی بلندمدت (۲۰ ساله) برای هر تیمار، مورد تحلیل آماری قرار گرفت. برای مقایسه میانگین صفات مورد ارزیابی (شامل عملکرد دانه، کارایی مصرف آب، تبخیر تجمعی و غیره) بین تیمارهای مختلف مالچ، از تحلیل واریانس یک‌طرفه استفاده شد. مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای

سپس یک خط رگرسیونی از بین نقاط عبور داده‌شده و معادله خط به دست آمد. از این معادله‌ها برای تصحیح روز تا سبز شدن و روز تا گل‌دهی به‌عنوان تابعی از مقدار مالچ کلش در مدل استفاده شد. سپس با رسم نمودار، معادله خط رابطه مقدار مالچ کلش با روز تا سبز شدن و روز تا گل‌دهی به دست آمد.

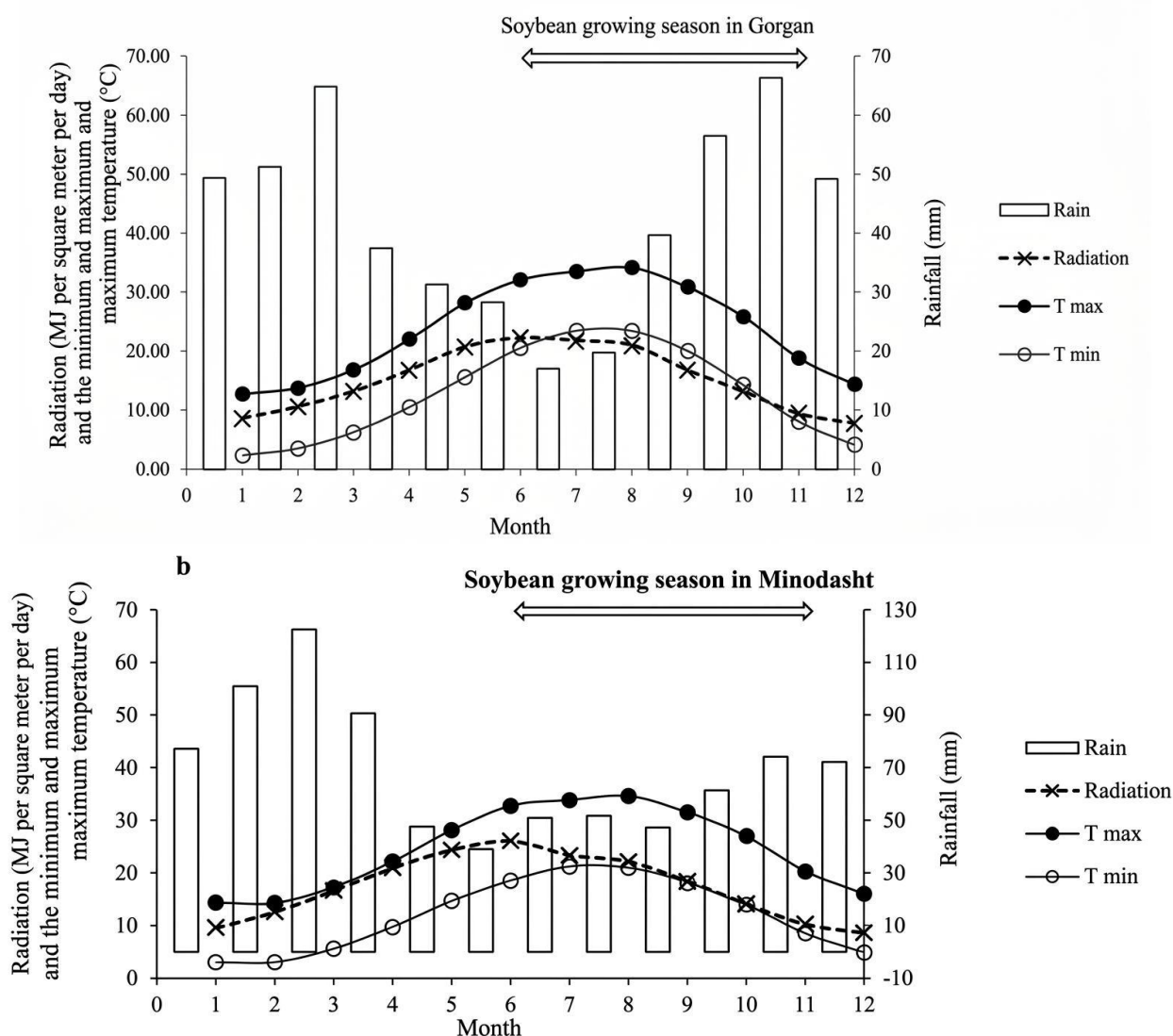
در این تحقیق، آزمایش شبیه‌سازی به‌عنوان مکمل آزمایش مزرعه‌ای برای دو شهرستان گرگان و مینودشت برای دوره ۲۰ ساله ۲۰۲۰-۲۰۲۰ انجام شد. مدل SSM-iLegume برای شرایط آبی و تحت تیمارهای مختلف مالچ کلش شامل شاهد (بدون مالچ کلش)، ۲۰/۷۵، ۱۵/۵، ۲۰/۲۵، ۳ و ۳/۷۵ تن در هکتار اجرا گردید. تراکم بوته ۲۷ بوته در مترمربع منظور شد. همچنین تاریخ کاشت برای تمام سناریوها ۵ تیرماه در نظر گرفته شد و از پارامترهای رقم DPX، که رقم محلی خود منطقه می‌باشد، استفاده گردید. این رقم، یکی از ارقام تجاری، پرمحصول و کاملاً سازگار با اقلیم استان گلستان جهت کشت تابستانه است که در گروه رسیدگی متوسط تا دیررس طبقه‌بندی شده و دارای تیپ رشد نامحدود می‌باشد. ضرایب ژنتیکی مربوط به رقم DPX (از جمله ضرایب نیاز حرارتی مراحل فنولوژیک و پارامترهای رشد سطح برگ) براساس مقادیر واسنجی‌شده در مطالعات پیشین برای این منطقه (Soltani et al., 2020) استخراج و در مدل اعمال گردید. وقتی کسر آب قابل تعرق خاک به کمتر از ۰/۵ کاهش می‌یافت، آبیاری انجام می‌شد. نوع خاک سیلنتی رسی لوم با عمق ۱۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. آلبدو ۰/۱۱ فاکتور زهکشی ۰/۵ و شماره منحنی خاک ۸۵ در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که داده‌های مربوط به ایستگاه هم‌دیدگی گرگان و مینودشت برای دوره آماری ۲۰۲۰-۲۰۲۰ از اداره کل هواشناسی استان گلستان تهیه گردید. برای اجرای مدل آب‌وهوایی محصول سویا به داده‌های هواشناسی دمای حداقل و حداکثر، بارش و تابش در مقیاس روزانه نیاز است. تابش خورشیدی یکی از مهم‌ترین متغیرهای هواشناسی است که در مدل‌سازی گیاهان زراعی مورد استفاده قرار می‌گیرد. دمای هوا نیز بر سرعت بیش‌تر فرآیندهای فیزیولوژیکی مؤثر است، حداکثر و حداقل دما مورد استفاده قرار نمی‌گیرند، بلکه از آن‌ها برای محاسبه دمای مؤثر استفاده می‌شود. بارش نیز در تأمین نیاز آبی مورد نیاز است. اطلاعات خاک و پارامترهای مورد نیاز جهت شبیه‌سازی نیز از پژوهش سلطانی و سینکلر (Soltani & Sinclair, 2011) جمع‌آوری شد.

جغرافیایی ۳۷ درجه و ۱۳ دقیقه شمالی، طول جغرافیایی ۵۵ درجه و ۲۲ دقیقه شرقی و ارتفاع ۹۰ متر از سطح دریا) انتخاب شد. قابل ذکر است که شهرستان گرگان و علی آباد در مجموع ۷۰ درصد از کل سویای استان گلستان را در بر می گیرند، اما این دو شهرستان براساس نقشه تقسیم بندی اقلیمی کشور براساس GYGA-ED در یک اقلیم قرار می گیرند. اما شهرستان مینودشت اقلیم متفاوتی دارد (دمای کمتر و بارندگی بیشتر نسبت به گرگان و علی آباد کتول) (شکل ۱).

دانکن در سطح احتمال پنج درصد ($p < 0.05$) انجام پذیرفت. تمامی تحلیل های آماری با استفاده از نرم افزار SAS 9.4 انجام گردید.

منطقه مورد مطالعه

به منظور بررسی اثر مالچ گندم بر رشد، عملکرد و مصرف آب در مزارع سویا در اقلیم های متفاوتی از استان گلستان، گرگان (با عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۵۰ دقیقه شمالی، طول جغرافیایی ۵۴ درجه و ۲۶ دقیقه شرقی و ارتفاع ۱۳ متر از سطح دریا) و مینودشت (با عرض



شکل ۱- میانگین ماهانه داده های آب و هوایی شامل دمای بیشینه (T_{max})، دمای کمینه (T_{min})، بارندگی (Rain) و تابش برای گرگان (a) و مینودشت (b)

Fig. 1- The average monthly weather data of maximum air temperature (Max T), minimum air temperature (Min T), and rainfall (Prec.) and radiation for Gorgan(a) and Minodasht (b)

نتایج و بحث

آزمایش مزرعه‌ای

اثر مالچ کلش گندم بر فنولوژی

نتایج حاصل از آزمایش مزرعه‌ای نشان داد که مالچ کلش گندم بر سبز شدن بذر سویا اثر می‌گذارد. به‌طوری که به‌ازای هر تن مالچ کلش گندم روز تا سبز شدن به‌میزان ۰/۷ روز افزایش یافت. همچنین گل‌دهی نیز با افزایش مقدار مالچ کلش به‌ازای هر تن مالچ به‌میزان ۱/۰۳ روز به تأخیر افتاد. همچنین سایر مراحل فنولوژی نیز با افزایش مالچ کلش به تأخیر افتاد، به‌طوری که با افزایش هر تن مالچ کلش گندم، روز تا رسیدگی برداشت سویا به‌میزان ۰/۸۴ روز افزایش یافت. می‌توان گفت که پوشش مالچ بر خاک باعث سایه‌اندازی و کاهش دمای خاک شده و بنابراین میزان GDD دریافتی روزانه توسط بذرها را کاهش داده و باعث تأخیر در سبز شدن آن‌ها شد. مطالعات زیادی نیز نشان داده‌اند که مالچ موجب کاهش دمای خاک و تأخیر در سبز شدن بذرها می‌شود. در آزمایشی در شمال آمریکا، اثر بقایای گیاهی بر رشد و نمو ذرت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در صورت عدم خاک‌ورزی و باقی گذاشتن بقایای گیاهی در سطح خاک در مقایسه با خاک ورزی مرسوم، درصد سبز شدن را کاهش داد و همچنین باعث تأخیر (تا پنج روز) در سبز شدن بذور ذرت شد (Mingotte et al., 2020). خاک‌ورزی حفاظتی و حفظ بقایای گیاهی در سطح خاک، نوسانات دمای خاک را کاهش می‌دهد. وجود

بقایا در سطح خاک باعث می‌شود که در سطح خاک حالت عایق‌شدگی به وجود آید و نوسانات دمای آن کمتر شود. یعنی خاک در زمستان مقداری گرم‌تر و در تابستان مقداری خنک‌تر شود. گزارش شده است که در تابستان، خاک‌های دارای بقایا تا پنج درجه سانتی‌گراد خنک‌تر هستند. در اقلیم‌های گرم به‌ویژه در جنوب کشور این مزیت می‌تواند علاوه بر کاهش دمای خاک، سرعت تجزیه مواد آلی را کاهش دهد و در نتیجه آب کمتری از دست برود که برای گیاه و خاک مفید است. اما این حالت در اقلیم‌های سرد می‌تواند مضر باشد، یعنی خنک بودن خاک در اثر وجود بقایا و مالچ کلش باعث می‌شود که گیاه دیرتر جوانه بزند و در نتیجه رشد اولیه آن با تأخیر صورت گیرد (Mirzaei et al., 2021).

استخراج توابع خطی (ضرایب تأخیر) جهت واسنجی

با توجه به آنچه که در بخش مواد و روش‌ها توضیح داده شد، نتایج آزمایش مزرعه‌ای نشان داد که مالچ کلش فنولوژی را به تأخیر انداخت. به‌طوری که به‌ازای باقی گذاشتن هر تن مالچ کلش بر سطح خاک، روز تا سبز شدن و روز تا گل‌دهی به‌ترتیب به‌میزان ۰/۷ و ۱/۰۳ روز به تأخیر افتاد. بنابراین از این معادله‌ها برای تصحیح روز تا سبز شدن و روز تا گل‌دهی به‌عنوان تابعی از مقدار مالچ کلش در مدل استفاده شد (شکل ۳).

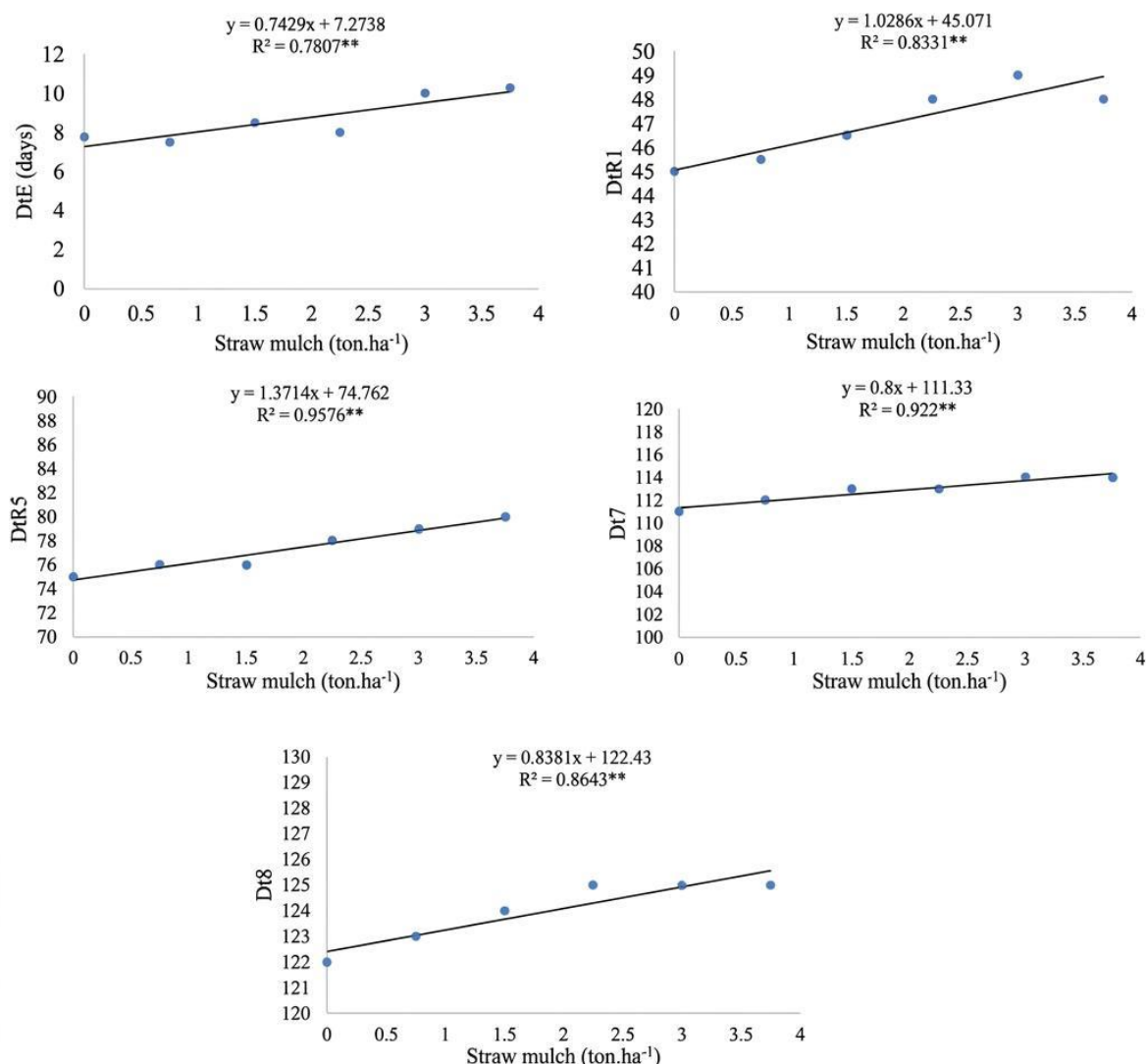
جدول ۱- مقایسه میانگین اثر مقادیر مختلف مالچ کلش گندم بر صفات مورد ارزیابی در کشت سویا

Table 1- Mean comparison of the effect of different levels of wheat straw mulch on the evaluated traits in soybean

Irrigation number (دفعات آبیاری (تعداد)	Irrig. water requirement (mm) نیاز آب آبیاری (میلی‌متر)	Water use efficiency (kg ha ⁻¹ mm ⁻¹) کارایی مصرف آب (کیلوگرم بر هکتار بر میلی‌متر)	Soil evaporation (mm) تبخیر از خاک (میلی‌متر)	Evapotranspiration (mm) تبخیر و تعرق (میلی‌متر)	Grain yield (g m ⁻²) عملکرد دانه (گرم در متر مربع)	Biomass (g m ⁻²) زیست‌توده هوایی (گرم در متر مربع)	Straw mulch (t ha ⁻¹) مالش کلش (تن در هکتار)
IRGNO	CIRGW (mm)	WUE (kg ha ⁻¹ mm ⁻¹)	CE (mm)	ET (mm)	WGRN (g m ⁻²)	WTOP (g m ⁻²)	Straw mulch (t ha ⁻¹)
5:00AM	329a	11f	132a	481a	373a	890a*	0
5b	311b	12e	110b	458b	373a	888a	0.75
4bc	300bc	12d	89c	437c	372a	886a	1.5
4cd	287bc	13c	79d	426d	372a	888a	2.25
4d	280d	13b	70e	418e	373a	888a	3
4d	280d	13a	64f	412f	372a	886a	3.75

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون، تفاوت معنی‌داری با یکدیگر در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون دانکن ندارند.

.Means followed by the same letter(s) in each column are not significantly different at the 5% probability level



شکل ۲- اثر سطوح مالچ کلش بر فنولوژی سویا (آزمایش مزرعه‌ای)
 Fig. 2- Effect of straw mulch on soybean phenology (field experiment)

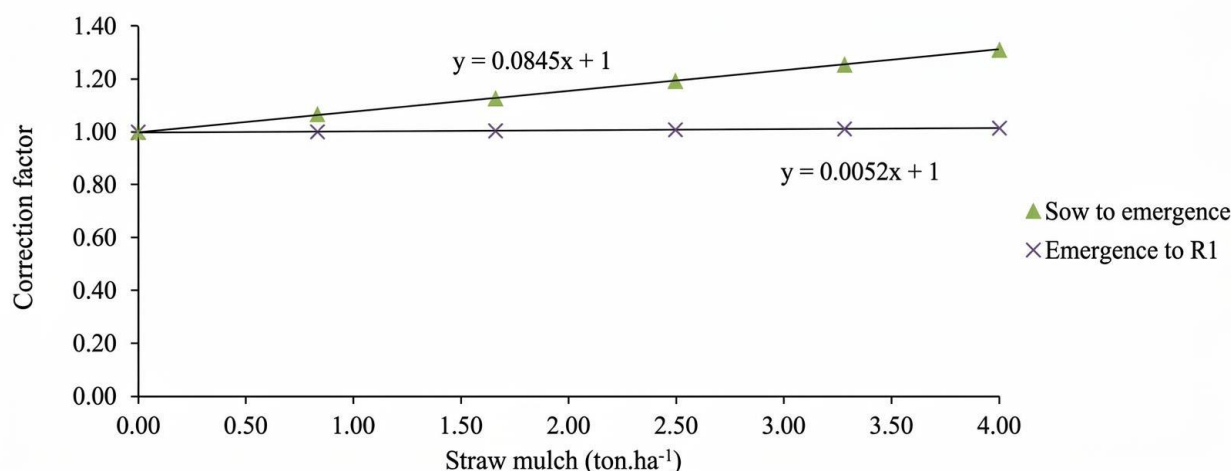
اندام هوایی نشان داد که مالچ کلش اثر معنی‌داری بر ماده خشک کل اندام‌های هوایی نداشت (جدول ۱). این امر می‌تواند به این علت باشد که بقایا هنوز پوسیده نشده و عناصر غذایی آن‌ها به خاک اضافه نشده تا مورد استفاده گیاه قرار گیرد. در واقع، به علت عدم پوسیدگی بقایا در طی زمان کوتاه، تنها اثر فیزیکی آن‌ها در سطح خاک، سایه‌اندازی، کاهش دما و تبخیر از سطح خاک مشهود است (Liebhard et al., 2022). بنابراین در کشت آبی که آبیاری به‌طور مرتب صورت می‌گیرد، وجود بقایا بر سطح خاک در کوتاه‌مدت اثر معنی‌داری بر عملکرد بیولوژیک ندارد و بیشترین نقش آن کاهش تبخیر و افزایش بهره‌وری آب می‌باشد.

وجود مالچ کلش در سطح خاک از تابش خورشید به خاک ممانعت کرده و با سایه‌اندازی موجب کاهش دمای خاک می‌شود. بنابراین این مسئله باعث تأخیر در سبز شدن و نیز سایر مراحل فنولوژی خواهد شد. بیالایس و همکاران (Bilalis et al., 2003) در آزمایش خود گزارش کردند که استفاده از مالچ گندم منجر به کاهش درجه حرارت خاک شد.

آزمایش مدل‌سازی

اثر مالچ کلش گندم بر ماده خشک اندام‌های هوایی

نتایج حاصل از شبیه‌سازی اثر مالچ کلش گندم بر ماده خشک کل



شکل ۳- ضریب اصلاحی مالچ کلش
Fig. 3- Correction factor of straw mulch

خاک بدون مالچ، افزایش یافته و غالب مواد مالچی در افزایش عملکرد مؤثر بوده‌اند (Gebeyhu & Markos, 2023). افزایش عملکرد در واحد سطح به‌خصوص در شرایط آبی عموماً زیاد نبوده است، ولی برخی از پژوهشگران آن را قابل توجه گزارش کرده‌اند. افزایش عملکرد در این مطالعات حداقل ۵۰ و حداکثر ۳۰۰ درصد بوده است (Thind et al., 2023). تاینند و همکاران (Thind et al., 2023) مشاهده کردند که عملکرد گندم با کاربرد مالچ ۱۵ درصد افزایش یافت. همچنین مخلوط شدن بقایا با خاک در نظام‌های خاک‌ورزی حداقل و بدون خاک‌ورزی، سبب بهبود خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک، حفظ حاصلخیزی و رطوبت خاک، کاهش فرسایش و تبخیر بیش از اندازه می‌شود.

اثر مالچ کلش بر تبخیر و تعرق (ET)

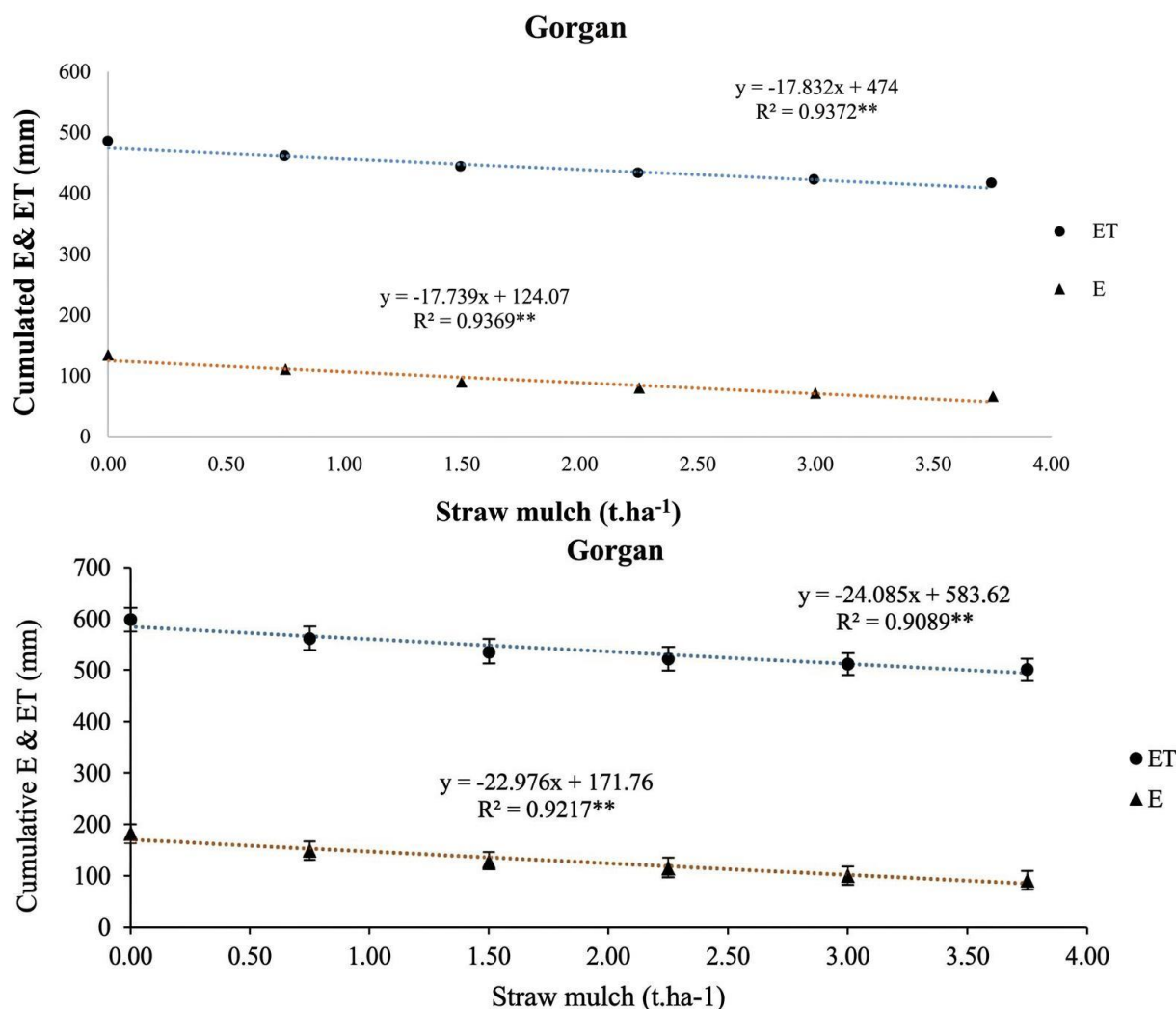
نتایج شبیه‌سازی نشان داد که مالچ کلش در هر دو شهرستان گرگان و مینودشت، مقدار تبخیر و تعرق را کاهش داد. همچنین بین مقادیر مختلف مالچ کلش از نظر میزان تبخیر و تعرق اختلاف معنی‌داری وجود داشت (جدول ۱). به‌طوری‌که با افزایش مقدار مالچ کلش گندم از ۰ به ۳/۷۵ تن در هکتار، میزان تبخیر و تعرق در گرگان و مینودشت به‌ترتیب ۱۴ و ۱۶ درصد کاهش یافت. همچنین بین مقادیر مختلف مالچ کلش از نظر میزان تبخیر و تعرق اختلاف معنی‌داری وجود داشت (جدول ۱). بیشترین میزان تبخیر و تعرق در

اثر مالچ کلش گندم بر عملکرد دانه

نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داد که مالچ کلش گندم بر عملکرد دانه اثر معنی‌داری در هیچ‌کدام از شهرستان‌های گرگان و مینودشت نداشت. به عبارتی، هرچند وجود مالچ کلش، عملکرد دانه سویا را افزایش نداد، اما باعث کاهش عملکرد نیز نشد که این خود می‌تواند این اطمینان را در کشاورز ایجاد کند که کاربرد مالچ عملکرد محصول را کاهش نخواهد داد. در آزمایشی در استرالیا، روش‌های مختلف مدیریت بقایای گیاهی گندم، در مقادیر مختلف بذر و در کشت گندم بعد از گندم مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مخلوط کردن و نگهداری بقایای گیاهی گندم باعث کاهش عملکرد محصول نسبت به سوزاندن بقایای گیاهی شد (Singh et al., 2025). اما اکثر گزارش‌ها حاکی از نقش مثبت بقایای گیاهی بر عملکرد به‌خصوص در گیاهان تابستانه می‌باشد. نتایج بررسی بازک و همکاران (Buczek et al., 2021) نشان داد که در تیمارهای خاک‌ورزی کاهش‌یافته و خاک‌ورزی مرسوم بیش‌ترین عملکرد دانه و ارتفاع بوته به دست آمد و مقدار پروتئین دانه، مواد آلی، پتاسیم و فسفر خاک پس از برداشت در تیمار حداقل خاک‌ورزی بیش از سایر تیمارها بود. در تیمار حفظ بقایا، عملکرد دانه، وزن ۱۰۰۰ دانه، پروتئین دانه و مواد آلی بیشتری حاصل شد (Klopp & Blanco-Canqui, 2022). اکثر گزارش‌ها مؤید این است که عملکرد گیاهان به‌خصوص در شرایط دیم به علت استفاده از مالچ در مقایسه با

افزایش نگهداشت رطوبت و کاهش تبخیر از سطح خاک مزرعه می گردد (Liu & Lobb, 2021). استفاده از بقایای گیاهی در اراضی کشاورزی، ساختمان و ظرفیت نگهداری آب در خاک را بهبود بخشیده و همچنین میزان نفوذپذیری را افزایش می دهد (Klopp & Blanco-Canqui, 2022). کاسکی و همکاران (Koskei et al., 2021) گزارش کردند که رابطه معنی داری بین محتوای رطوبتی خاک و مقدار مالچ در شرایط دیم وجود داشت و کاربرد مالچ اثر مثبتی بر ظرفیت نگهداری آب خاک داشت.

هر دو شهرستان گرگان و مینودشت در تیمار شاهد (عدم کاربرد مالچ کلش) به ترتیب ۴۸۲ و ۵۹۸ میلی متر بهدست آمد (شکل ۴). با افزایش مقدار مالچ کلش گندم، نسبت E/ET کاهش یافت به طوری که کمترین مقدار E/ET در هر دو شهرستان گرگان و مینودشت در تیمار ۳/۷۵ مالچ کلش و به ترتیب ۰/۱۶ و ۰/۱۸ به دست آمد. طبق نتایج کالکارنی (Kulkarni, 2021)، بقایای گیاهی که روی سطح خاک پخش می شوند، باعث کاهش دمای خاک و کاهش بخار آب در اثر هدرروی آب می شود زیرا بقایای گیاهی باعث بازتاب نور خورشید شده و تبخیر را کاهش می دهد. علاوه بر این، کاربرد بقایا موجب

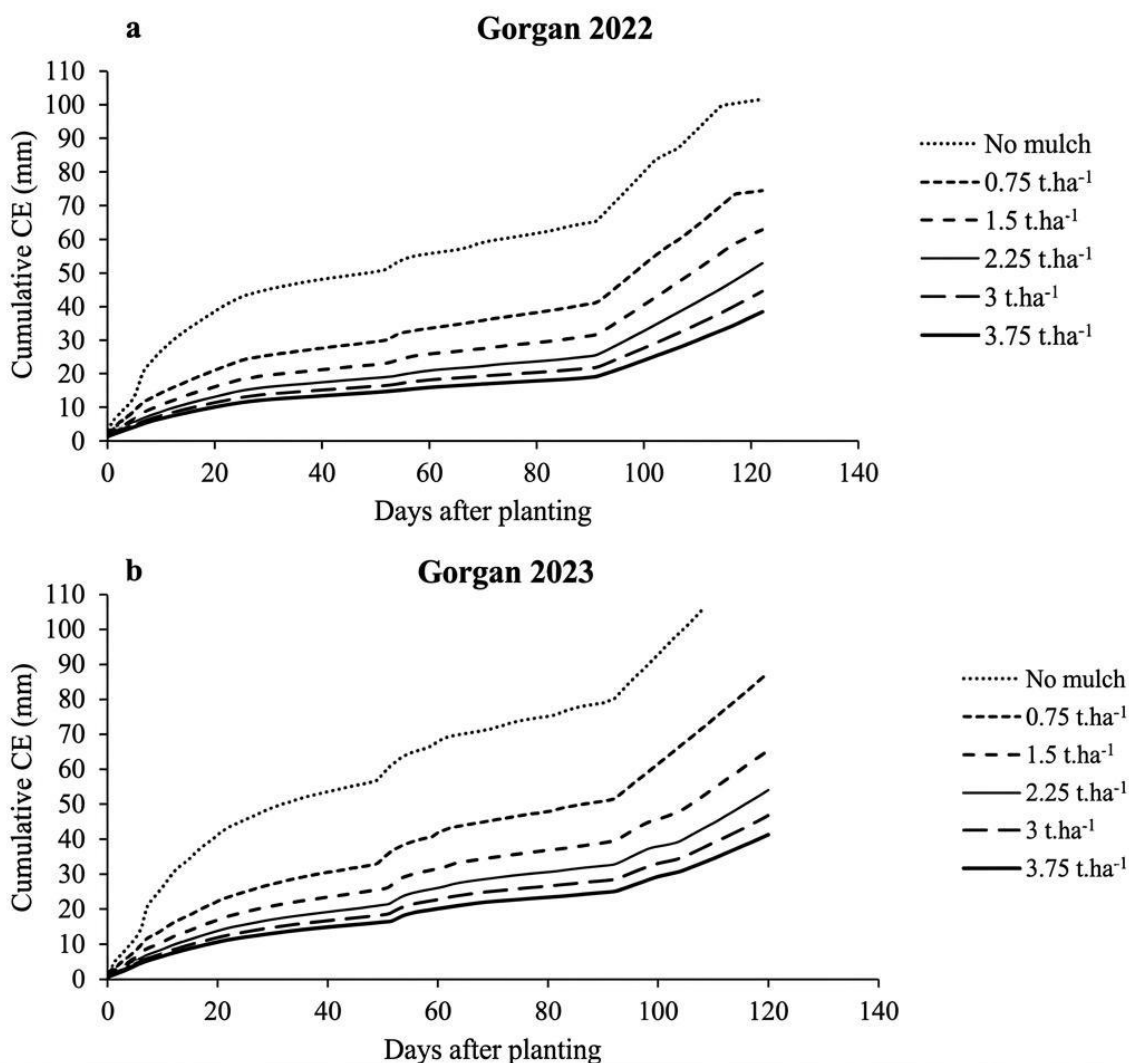


شکل ۴- تبخیر تجمعی شبیه سازی شده از سطح خاک (E، خط پیوسته) و تعرق و تبخیر (ET، خط چین) در شرایط استفاده از مالچ کلش برای گرگان و مینودشت

Fig. 4- Simulated cumulative soil evaporation (E, solid line) and evapotranspiration (ET, dashed line) plotted against straw mulch for Gorgan and Minodasht

مؤثرتری در کاهش تبخیر از سطح خاک و جلوگیری از تلفات آب داشته باشد. بیشترین کاهش در مقدار تبخیر از سطح خاک در روزهای اول پس از کاشت به دست آمد (نتایج نشان داده نشده‌اند). علت آن این است که در روزهای اول بعد از کاشت به‌علت کوچک بودن بوته‌ها و عدم بسته شدن تاج‌پوشش در مراحل ابتدایی رشد گیاه، قسمت بیشتری از سطح خاک در معرض تابش مستقیم آفتاب قرار دارد. بنابراین وجود مالچ بر سطح خاک با سایه‌اندازی و کاهش دما می‌تواند بطور مؤثری مقدار تبخیر از سطح خاک را کاهش دهد.

اثر مقادیر مختلف مالچ کلش بر تبخیر از سطح خاک (CE)
نتایج شبیه‌سازی نشان داد که مالچ کلش باعث کاهش میزان تبخیر از سطح خاک شد. به‌طوری که در شهرستان گرگان با افزایش مقدار مالچ از صفر به $3/75$ تن در هکتار، تبخیر از سطح خاک به‌میزان ۵۱ درصد (68 میلی‌متر) کاهش یافت (شکل ۶). همچنین در شهرستان مینودشت نیز به‌ازای باقی گذاشتن $3/75$ تن مالچ در هکتار، مقدار تبخیر از سطح خاک به‌میزان ۵۰ درصد (92 میلی‌متر) کاهش یافت (شکل ۵). بنابراین می‌توان گفت که در مناطقی که خشک‌تر بوده و پتانسیل تبخیر در آن‌ها بالاتر است، کاربرد مالچ می‌تواند نقش



شکل ۵- اثر سطوح مالچ کلش بر تبخیر از سطح خاک در گرگان (a) و مینودشت (b) در سال ۲۰۱۳

Fig. 5- Effect of straw mulch rates on CE in Gorgan(a) and Minodasht (b):2013

خاک و ذخیره آب را افزایش داده و با استفاده از کاه و کلش، تبخیر از خاک کاهش می‌یابد که مقدار آن بستگی به میزان بارش و شرایط اقلیمی دارد (Senge, 2022). همچنین مالچ کلش، عملکرد سویا را در تاریخ کشت‌های مختلف ۴/۴ تا ۶۸/۳ در صد افزایش داد. استفاده از مالچ و کاه، میزان تبخیر از سطح خاک را کاهش داده و باعث حفظ رطوبت خاک می‌شود (Zhao et al., 2023). محققان گزارش کردند که به‌طور میانگین کشت روی پشته به همراه کاربرد کلش، عملکرد و کارایی مصرف آب ذرت تابستانه را به‌ترتیب ۱۶/۹ و ۱۹/۴ درصد افزایش داد (Li et al., 2021). لی و همکاران (Li et al., 2013) در بررسی اثر مالچ پاشی بر رطوبت و دمای خاک و نیز کارایی مصرف آب سویا در شرایط دیم در چین به این نتیجه رسیدند که مالچ، دمای خاک را در لایه ۵-۰ سانتی‌متری، دو درجه سانتی‌گراد و در لایه ۲۵-۱۵ سانتی‌متری حدود پنج درجه کاهش داد. لیو و همکاران (Liao et al., 2025) در آزمایش خود، اثر سیستم بدون خاک‌ورزی و حفظ بقایا بر عملکرد سویا را بررسی کردند و گزارش کردند که سیستم بدون خاک‌ورزی و باقی گذاشتن بقایا در مقایسه با شخم رایج، عملکرد سویا را افزایش داد.

اثر مالچ بر تعداد و مقدار آب آبیاری (میلی‌متر)

نتایج نشان داد که مالچ کلش، تعداد آبیاری را در هر دو شهرستان گرگان و مینودشت کاهش داد. به‌طوری که با افزایش مقدار مالچ از ۰ به ۳/۷۵ تن در هکتار، تعداد آبیاری از ۴/۹۵ به ۴/۱۰ بار کاهش یافت. به عبارت دیگر، می‌توان گفت که وجود مالچ کلش توانست حدود یک آبیاری را در طول فصل رشد سویا کم کند. در شبیه‌سازی برای شهرستان مینودشت نیز نتایج مشابهی حاصل شد. به‌طوری که بیشترین تعداد آبیاری ۵/۶۵ و در شاهد (عدم وجود مالچ) و کمترین تعداد آبیاری ۴/۲۵ و در تیمار ۳/۷۵ تن در هکتار مالچ کلش به دست آمد. با این وجود بین تیمارهای ۳، ۳/۲۵ و ۳/۷۵ تن در هکتار مالچ کلش اختلاف معنی‌داری از نظر آماری وجود نداشت (شکل ۷). همچنین نتایج شبیه‌سازی نشان داد که مالچ کلش می‌تواند مقدار آب آبیاری را کاهش دهد. به‌طوری که در شهرستان گرگان بیشترین مقدار آب مصرفی (۳۲۹ میلی‌متر) در شاهد و کمترین مقدار آب آبیاری (۲۸۰ میلی‌متر) در تیمار ۳ و ۳/۷۵ تن مالچ کلش در هکتار به دست آمد. به عبارتی، با افزایش مقدار مالچ از ۰ به ۳/۷۵ تن در

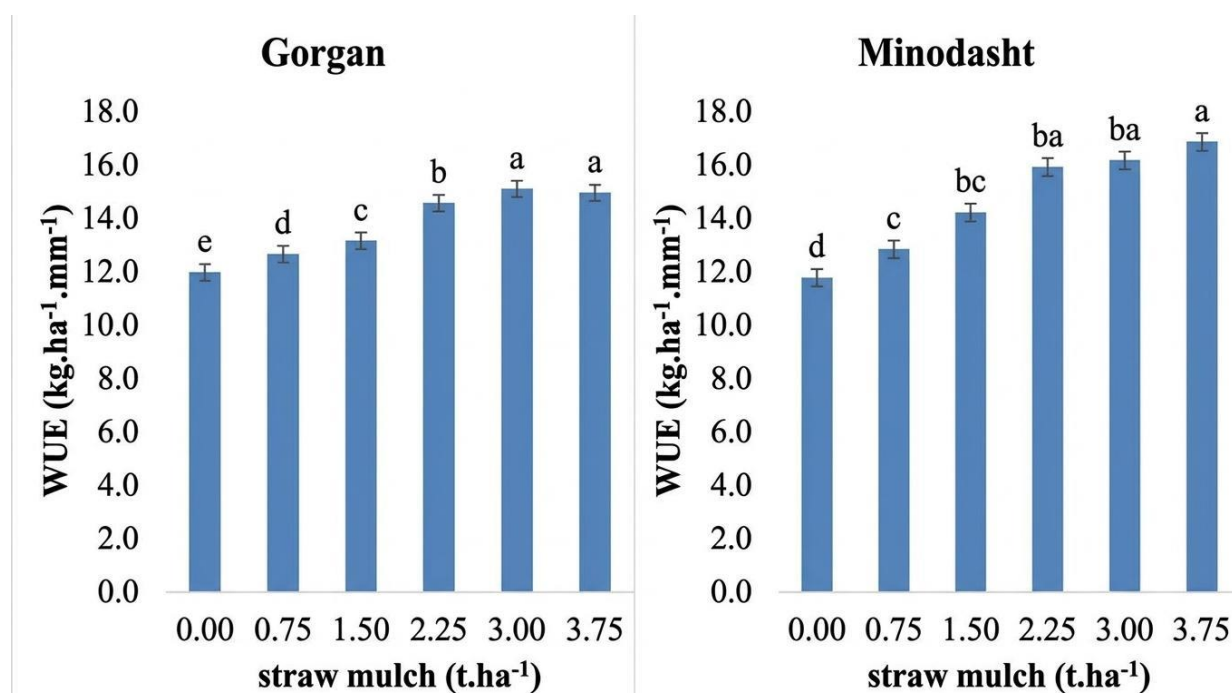
سنگ (Senge, 2022) در بررسی اثر مالچ‌پاشی بر رطوبت و دمای خاک و نیز کارایی مصرف آب سویا در شرایط دیم در ژاپن به این نتیجه رسیدند که مالچ دمای خاک را در لایه ۵-۰ سانتی‌متری، دو درجه سانتی‌گراد و در لایه ۲۵-۱۵ سانتی‌متری حدود پنج درجه کاهش داد. همچنین مالچ کلش و مالچ پلاستیکی، رطوبت قابل توجهی را در عمق ۱۵-۵ سانتی‌متری خاک ذخیره کرد و مقدار تبخیر آب از سطح خاک را کاهش داد. همچنین مالچ کلش باعث افزایش ذخیره رطوبت خاک و کاهش دمای خاک و افزایش عملکرد سویا شد. لی و همکاران (Li et al., 2021) در بررسی پاسخ سویا به مالچ کلش گندم در تاریخ کشت‌های مختلف در هند مشاهده کردند که دمای خاک بدون پوشش مالچ یک ماه پس از کاشت به‌طور میانگین ۳۰/۶-۴۸/۶ درجه بود و وجود مالچ کلش دمای خاک را ۱/۴ تا ۱۲/۷ درجه سانتی‌گراد کاهش داد. ریویر و همکاران (Rivier et al., 2022) نیز گزارش کردند که در مناطق خشک و نیمه‌خشک حدود ۴۰ تا ۷۰ درصد از اتلاف آب از سطح خاک به‌وسیله تبخیر می‌باشد که می‌توان به‌وسیله مواد پوشاننده خاک از آن جلوگیری نمود و این آب را در اختیار گیاه قرار داد. ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2023) در تحقیق خود در چین به این نتیجه رسیدند که خاک‌های دارای بقایای سطحی در مقایسه با خاک‌های فاقد بقایا، در درجه حرارت بالای محیطی دیرتر گرم شده و از سویی دیگر، در شب حرارت خود را دیرتر از دست می‌دهند.

اثر مالچ کلش بر کارایی مصرف آب

نتایج شبیه‌سازی درازمدت نشان داد که مالچ کلش می‌تواند اثر مثبتی بر افزایش کارایی مصرف آب سویا داشته باشد. بیشترین کارایی مصرف آب در شهرستان گرگان و مینودشت در تیمار ۳/۷۵ تن مالچ کلش در هکتار و به‌ترتیب ۱۴/۹ و ۱۶/۸ کیلوگرم در هکتار بر میلی‌متر به دست آمد. با این حال در شهرستان گرگان بین تیمار ۳/۷۵ و ۳ تن مالچ کلش از نظر آماری اختلاف معنی‌داری وجود نداشت (شکل ۶ و جدول ۱). همچنین در شهرستان مینودشت بین تیمارهای ۳/۷۵، ۳، ۲/۲۵ و ۱/۵ تن در هکتار مالچ کلش گندم اختلاف معنی‌داری وجود نداشت و کمترین کارایی مصرف آب (۱۱/۸ کیلوگرم در هکتار بر میلی‌متر) در شاهد (عدم وجود مالچ کلش) مشاهده شد. پوشش زمین به‌وسیله بقایای گیاه و کاه و کلش، ماده آلی

وجود مالچ در سطح خاک باعث کاهش میزان تبخیر از سطح خاک شده و از هدر رفتن آب جلوگیری می‌کند. بنابراین باعث حفظ رطوبت خاک شده و مقدار آب مورد نیاز جهت آبیاری را کاهش می‌دهد.

هکتار، مقدار آب آبیاری حدود ۱۵ درصد کاهش یافت. همچنین نتایج نشان داد که در شهرستان مینودشت نیز مقدار آب آبیاری از ۳۶۶ میلی‌متر در شاهد به ۲۸۸ میلی‌متر در تیمار ۳/۷۵ تن در هکتار مالچ کلش رسید (۲۱ درصد کاهش مقدار آب آبیاری). به عبارت دیگر،



شکل ۶- اثر سطوح مالچ کلش بر کارایی مصرف آب (WUE) در گرگان (a) و مینودشت (b)
Fig. 6- Effect of straw mulch levels on WUE in Gorgan (a) and Minodasht (b)

شده در استان به‌ازای مقادیر مختلف مالچ کلش گندم محاسبه شد. در ابتدا اختلاف مقدار آب مصرفی (CIRGW) در تیمارهای مختلف مالچ کلش با شاهد در هر دو شهرستان گرگان و مینودشت محاسبه گردید. سپس بین دو شهرستان میانگین وزنی گرفته شد. اختلاف میزان آب مصرفی در تیمارهای ۰/۷۵، ۱/۵، ۲/۲۵، ۳ و ۳/۷۵ تن مالچ کلش در هکتار با شاهد به‌ترتیب ۱۹۵، ۳۴۶/۲۵، ۴۹۲/۵، ۵۶۵ و ۵۹۸/۷۵ مترمکعب در هکتار به دست آمد. با ضرب کردن این مقادیر در مساحت زیرکشت سویا در استان، مقدار کل آب مصرفی در استان به‌ازای کاربرد مقادیر مختلف مالچ کلش به دست آمد. مقدار آب صرفه‌جویی‌شده در استان گلستان به‌ازای مقادیر مختلف مالچ کلش گندم در شکل ۸ نشان داده شده است. طبق گزارش وان وارت و همکاران (Van Wart et al., 2013)، چنانچه چند ایستگاه هواشناسی با شعاع ۱۰۰ کیلومتر وجود داشته باشند و این ایستگاه‌ها در مجموع حداقل ۴۰ درصد از مساحت زیرکشت را پوشش دهند، در

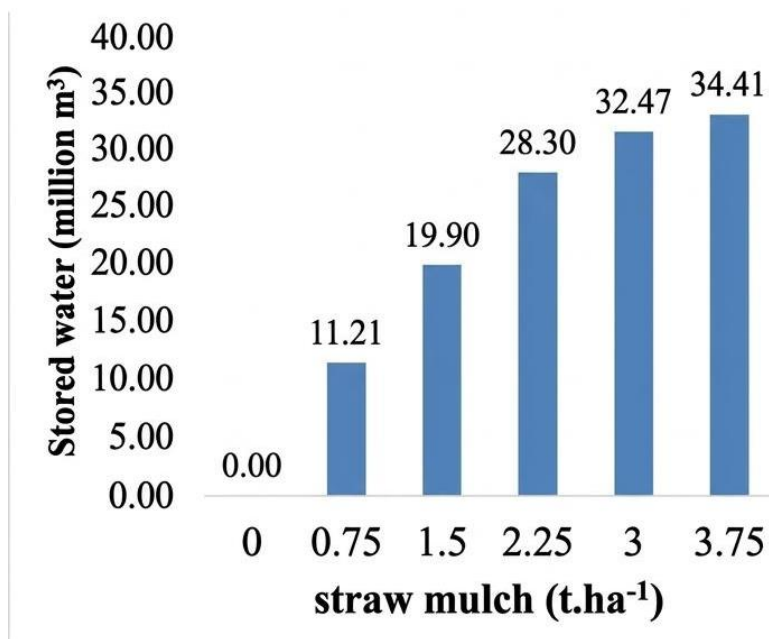
اهمیت مالچ در صرفه‌جویی منابع آب در استان فرضیات و محدودیت‌های تعمیم نتایج

لازم به ذکر است که تعمیم نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای دو نقطه به کل استان، با فرضیات و محدودیت‌هایی همراه است. این برآورد بر این فرض استوار است که شرایط مدیریتی، تاریخ کاشت و نوع خاک در عمده اراضی زیرکشت سویای استان، شباهت قابل قبولی با شرایط شبیه‌سازی‌شده دارد. همچنین تنوع اقلیمی در سایر نقاط استان در این تحلیل لحاظ نشده است. سطح زیرکشت مورد استفاده در این محاسبات ۵۷۴۶۲ هکتار براساس آمارنامه سال ۲۰۲۲ سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (FAO, 2022) می‌باشد. بنابراین، اعداد ارائه‌شده نه به‌عنوان یک مقدار قطعی، بلکه به‌عنوان یک «برآورد از پتانسیل صرفه‌جویی» در صورت اتخاذ گسترده این روش مدیریتی، باید تفسیر شوند.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی، مقدار آب صرفه‌جویی

تیمار ۳/۷۵ تن مالچ کلش به دست آمد. برداشت بیش از حد آب و کمبود آن و نیز خشک شدن تالاب‌ها و مراتع پایین‌دست باعث افزایش گرد و غبار می‌گردد. اگر برداشت آب از طریق چاه‌ها خیلی زیاد باشد، ممکن است که بعد از تخلیه آب از این سفره‌های آبی، نشست زمین روی دهد. در مراحل بعدی و با تداوم برداشت، علائم بیابانی شدن در دشت‌های پایین‌دست مشاهده خواهد شد. مسائل و مشکلات اضافه‌برداشت آب وقتی که در مراحل آخر خود تشدید می‌شوند، ممکن است که منازعات منطقه‌ای بر سر آب را به دنبال داشته باشند. همین اضافه‌برداشت آب و خشک شدن عمومی حوضه از طریق تأثیر بر خصوصیات تشعشعی زمین مثل آلیندو و تأثیر بر بودجه انرژی می‌تواند موجب تغییر اقلیم در حوضه گردد (Rahman et al., 2022).

آن صورت می‌توان نتایج به‌دست‌آمده برای این ایستگاه را به کل منطقه مورد مطالعه تعمیم داد. با توجه به اینکه گرگان ۳۰ درصد و مینودشت ۱۸ درصد از اراضی زیرکشت سویای استان گلستان را به خود اختصاص می‌دهد، سهم این دو ایستگاه در مجموع ۴۸ درصد از استان می‌شود. بنابراین براساس نتایج به‌دست‌آمده برای این دو شهرستان، میزان آب صرفه‌جویی‌شده برای کل استان در ازای مقادیر مختلف مالچ کلش محاسبه شد. با توجه به اینکه سطح زیرکشت سویا در استان در سال آزمایش ۵۷۴۶۲ هکتار بود (FAO, 2022). مقدار آب صرفه‌جویی‌شده به‌ازای مقادیر مختلف مالچ کلش گندم نسبت به شاهد در کل استان گلستان مطابق شکل ۷ به دست آمد. به‌طوری که بیشترین مقدار آب صرفه‌جویی‌شده (۳۴/۴۱ میلیون مترمکعب) در



شکل ۷- میزان آب ذخیره‌شده در سطوح مختلف مالچ کلش
Fig. 7- Amount of stored water in different straw mulch amount

دهد. این صرفه‌جویی در مصرف آب منجر به افزایش قابل توجه کارایی مصرف آب گردید، درحالی که عملکرد دانه تحت تیمارهای مختلف مالچ، کاهش معنی‌داری را نشان نداد. این امر مؤید آن است که می‌توان با مدیریت صحیح بقایا، مصرف آب را بدون به خطر انداختن پتانسیل عملکرد، بهینه کرد.

این یافته‌ها دارای پیامدهای کاربردی مهمی برای کشاورزی پایدار در منطقه گلستان و مناطق مشابه با چالش کم‌آبی است. حفظ بقایای گندم در سطح خاک، به‌جای سوزاندن یا حذف آن، نه‌تنها به

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش مبتنی بر رویکرد تلفیقی آزمایش مزرعه‌ای و مدل‌سازی، به‌وضوح نشان داد که استفاده از مالچ کلش گندم یک راهکار مدیریتی مؤثر برای بهبود تراز آب در زراعت سویا است. یافته اصلی این بود که پوشش مالچ با کاهش چشمگیر تبخیر از سطح خاک (تا ۵۱ درصد در گرگان و ۵۰ درصد در مینودشت) توانست نیاز به آب آبیاری را به‌ترتیب تا ۱۵ درصد و ۲۱ درصد کاهش

کالیبره کردن اثر مالچ بر فنولوژی را فراهم آورد، اما اعتبارسنجی مستقیم نتایج شبیه‌سازی (مانند تبخیر و عملکرد) با داده‌های مشاهده‌ای تحت تیمارهای مالچ انجام نشد. بنابراین، قویاً پیشنهاد می‌شود که در تحقیقات آتی، آزمایش‌های مزرعه‌ای جامعی طراحی شوند که در آن‌ها پارامترهایی نظیر رطوبت خاک، عملکرد و زیست‌توده تحت سطوح مختلف مالچ اندازه‌گیری شوند. چنین داده‌هایی برای اعتبارسنجی کامل مدل در شرایط کشاورزی حفاظتی ضروری بوده و می‌توانند یافته‌های حاصل از این مطالعه شبیه‌سازی را تقویت و تکمیل نمایند.

حفظ سلامت و رطوبت خاک کمک می‌کند، بلکه می‌تواند به‌طور مستقیم به صرفه‌جویی در منابع ارزشمند آب منجر شود. براساس نتایج این مطالعه، اجرای گسترده این روش مدیریتی با کاربرد ۳/۷۵ تن مالچ در هکتار، دارای پتانسیل صرفه‌جویی سالانه حدود ۳۴/۴۱ میلیون مترمکعب آب در سطح اراضی زیرکشت سویای استان گلستان است. این پتانسیل، اهمیت ترویج اصول کشاورزی حفاظتی و حمایت از کشاورزان برای اتخاذ این شیوه‌ها را دوچندان می‌سازد. با وجود نتایج روشن، لازم به ذکر است که این تحقیق دارای محدودیت‌هایی نیز بود. هرچند مدل SSM-iLegume قبلاً برای شرایط منطقه اعتبارسنجی شده بود و آزمایش مزرعه‌ای حاضر امکان

References

1. Abdul Kader, M., Mojid, M.A., & Nakamura, K. (2017). Mulching type-induced soil moisture and temperature regimes and water use efficiency of soybean under rain-fed condition in central Japan. *International Soil and Water Conservation Research*, 10(4), 570-580. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2017.08.001>
2. Baloch, S. B., Ali, S., Bernas, J., Konvalina, P., Naveed, M., Baloch, F. B., Jamali, Z. H., Lošák, T., Roubík, H., & Ghafoor, A. (2025). Crop residue management for soil health and environmental sustainability: A comprehensive review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 25, 1-21. <https://doi.org/10.1007/s42729-025-02633-3>
3. Buczek, J., Migut, D., & Jańczak-Pieniążek, M. (2021). Effect of soil tillage practice on photosynthesis, grain yield and quality of hybrid winter wheat. *Agriculture*, 11(6), 479. <https://doi.org/10.3390/agriculture11060479>
4. Davis, S. J., Alexander, K., Moreno-Cruz, J., Hong, C., Shaner, M., Caldeira, K., & McKay, I. (2024). Food without agriculture. *Nature Sustainability*, 7(1), 90-95. <https://doi.org/10.1038/s41893-023-01241-2>
5. Demo, A. H., & Asefa Bogale, G. (2024). Enhancing crop yield and conserving soil moisture through mulching practices in dryland agriculture. *Frontiers in Agronomy*, 6, 1361697. <https://doi.org/10.3389/fagro.2024.1361697>
6. FAO. (2022). Production Yearbook. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, Italy.
7. Gebeyhu, B., & Markos, G. (2023). Assessment of soil mulching field management, and deficit irrigation effect on productivity of watermelon varieties, and AquaCrop model validation. *Heliyon*, 9(11), e21824. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21824>
8. Grover, D., Mishra, A. K., Rani, P., Kalonia, N., Chaudhary, A., & Sharma, S. (2024). Soil management in sustainable agriculture: principles and techniques. In: Kumar, P., Aishwarya (eds.), *Technological Approaches for Climate Smart Agriculture* (pp. 41-77). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-52708-1_4
9. Imran. (2024). Integration of organic, inorganic and bio fertilizer, improve maize-wheat system productivity and soil nutrients. *Journal of Plant Nutrition*, 47(15), 2494-2510. <https://doi.org/10.1080/01904167.2024.2354190>
10. Klopp, H. W., & Blanco-Canqui, H. (2022). Implications of crop residue removal on soil physical properties: A review. *Soil Science Society of America Journal*, 86(4), 979-1001. <https://doi.org/10.1002/saj2.20418>
11. Koskei, K., Munyasya, A. N., Wang, Y. B., Zhao, Z. Y., Zhou, R., Indoshi, S. N., Wang, W., Cheruiyot, W. K., Mburu, D. M., & Nyende, A. B. (2021). Effects of increased plastic film residues on soil properties and crop productivity in agro-ecosystem. *Journal of Hazardous Materials*, 414, 125521. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125521>
12. Kulkarni, S. (2021). Sustainable soil conservation and management: Principles, issues, and strategies. In: Tripathi, V.K., & Goyal, M.R. (Eds.), *Field Practices for Wastewater Use in Agriculture* (pp. 133-178). Apple Academic Press. <https://doi.org/10.1201/9781003034506-11>
13. Li, R., Hou, X., Jia, Z., Han, Q., Ren, X., & Yang, B. (2013). Effects on soil temperature, moisture, and maize yield of cultivation with ridge and furrow mulching in the rainfed area of the Loess Plateau, China. *Agricultural*

- Water Management*, 116, 101–109. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.10.001>
14. Li, Y., Chai, S., Chai, Y., Li, R., Lan, X., Ma, J., Cheng, H., & Chang, L. (2021). Effects of mulching on soil temperature and yield of winter wheat in the semiarid rainfed area. *Field Crops Research*, 271, 108244. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108244>
15. Liang, M., Chen, L., Chen, G., Zhao, Y., Liu, G., Sun, E., Yong, C., Huang, H., Li, F., & Qu, P. (2025). Protective effects of straw mulching on soil health and function: A review. *Environmental Pollutants and Bioavailability*, 37(1), 2533900. <https://doi.org/10.1080/26395940.2025.2533900>
16. Liao, C., Tang, M., Zhang, C., Deng, M., Li, Y., & Feng, S. (2025). Impacts of various straw mulching strategies on soil water, nutrients, thermal regimes, and yield in wheat–soybean rotation systems. *Plants*, 14(14), 2233. <https://doi.org/10.3390/plants14142233>
17. Liebhard, G., Klik, A., Neugschwandtner, R. W., & Nolz, R. (2022). Effects of tillage systems on soil water distribution, crop development, and evaporation and transpiration rates of soybean. *Agricultural Water Management*, 269, 107719. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107719>
18. Liu, J., & Lobb, D. A. (2021). An overview of crop and crop residue management impacts on crop water use and runoff in the Canadian prairies. *Water*, 13(20), 2929. <https://doi.org/10.3390/w13202929>
19. Mingotte, F., Jardim, C., Yada, M., Amaral, C., Chiamolera, T., Coelho, A., Lemos, L., & Fornasieri Filho, D. (2020). Impact of crop management and no-tillage system on grain and straw yield of maize crop. *Cereal Research Communications*, 48, 399–407. <https://doi.org/10.1007/s42976-020-00051-y>
20. Mirzaei, M., Gorji Anari, M., Razavy-Toosi, E., Asadi, H., Moghiseh, E., Saronjic, N., & Rodrigo-Comino, J. (2021). Preliminary effects of crop residue management on soil quality and crop production under different soil management regimes in corn-wheat rotation systems. *Agronomy*, 11(2), 302. <https://doi.org/10.3390/agronomy11020302>
21. Musie, W., & Gonfa, G. (2023). Fresh water resource, scarcity, water salinity challenges and possible remedies: A review. *Heliyon*, 9(8), e18685. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18685>
22. Rahman, K. U., Hussain, A., Ejaz, N., Shahid, M., Duan, Z., Mohammadi, B., Hoai, P. N., Pham, Q. B., Khedher, K. M., & Anh, D. T. (2022). Evaluating the impact of the environment on depleting groundwater resources: A case study from a semi-arid and arid climatic region. *Hydrological Sciences Journal*, 67(5), 791–805. <https://doi.org/10.1080/02626667.2022.2044483>
23. Rivier, P. A., Jamniczky, D., Nemes, A., Makó, A., Barna, G., Uzinger, N., Rékási, M., & Farkas, C. (2022). Short-term effects of compost amendments to soil on soil structure, hydraulic properties, and water regime. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 70(1), 74–88. <https://doi.org/10.2478/johh-2022-0004>
24. Singh, R. J., Ward, P., & Oliver, Y. (2025). Modelling the long-term effects of wheat monoculture vs wheat in diversified crop sequences managed with varied crop residue amounts on water-use and grain yields in a Mediterranean dryland. *Plant and Soil*, 524, 17–36. <https://doi.org/10.1007/s11104-025-07682-2>
25. Soltani, A., Alimagham, S. M., Nehbandani, A., Torabi, B., Zeinali, E., Dadrasi, A., Zand, E., Ghassemi, S., Pourshirazi, S., Alasti, O., Hosseini, R. S., Zahed, M., Arabameri, R., Mohammadzadeh, Z., Rahban, S., Kamari, H., Fayazi, H., Mohammadi, S., Keramat, S., Meyari, A., & Sinclair, T. R. (2020). SSM-iCrop2: A simple model for diverse crop species over large areas. *Agricultural Systems*, 182, 102855. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2020.102855>
26. Soltani, A., & Sinclair, T. R. (2011). A simple model for chickpea development, growth and yield. *Field Crops Research*, 124(2), 252–260. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.06.021>
27. Soltani, A., & Sinclair, T. R. (2012). *Modeling Physiology of Crop Development, Growth and Yield*. CABi. <https://doi.org/10.1079/9781845939700.0000>
28. Thind, H., Sharma, S., Sidhu, H., & Singh, V. (2023). Tillage, crop establishment and residue retention methods for optimising productivity and profitability under rice–wheat system. *Crop and Pasture Science*, 74(9), 828–842. <https://doi.org/10.1071/CP21595>
29. Van Wart, J., Grassini, P., & Cassman, K. G. (2013). Impact of derived global weather data on simulated crop yields. *Global Change Biology*, 19(12), 3822–3834. <https://doi.org/10.1111/gcb.12302>
30. Zhang, P., Zhang, Z., Xiao, M., Chao, J., Dai, Y., Liu, G., & Senge, M. (2023). Effects of organic mulching on moisture and temperature of soil in greenhouse production of tomato under unheated greenhouse cultivation in the cold zone of China. *Food Science & Nutrition*, 11(8), 4829–4842. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3460>

31. Zhang, Y., Zhu, K., Tang, Y., & Feng, S. (2024). Rice cultivation under film mulching can improve soil environment and be beneficial for rice production in China. *Rice Science*, 31(5), 545–555. <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2024.06.009>
32. Zhao, X.-d., Qin, X.-r., Li, T.-L., Cao, H.-b., & Xie, Y.-h. (2023). Effects of planting patterns plastic film mulching on soil temperature, moisture, functional bacteria and yield of winter wheat in the Loess Plateau of China. *Journal of Integrative Agriculture*, 22(5), 1560-1573. <https://doi.10.1016/j.jia.2023.02.026>