



Assessment of Soybean Applied Water and Water Productivity (a case study: Tail End Region of Moghan Irrigation and Drainage Network, Ardabil Province, Iran)

Farzin Parchami-Araghi^{1*}, Fariborz Abbasi², Keramat Akhavan³

1. Corresponding Author, Agricultural Engineering Research Department, Ardabil Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Ardabil, Iran. Email: f.parchamiaraghi@areeo.ac.ir
2. Agricultural Engineering Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran. Email: fariborzabbasi@ymail.com
3. Agricultural Engineering Research Department, Ardabil Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Ardabil, Iran. Email: akhavang120@gmail.com

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: March. 22, 2022

Revised: June. 10, 2022

Accepted: June. 12, 2022

Published online: Aug. 23, 2022

Keywords:

Application Efficiency,
Drought Stress,
FAO Penman-Monteith,
Planting Date,
Wet Planting.

ABSTRACT

Due to limitation of available water resources, improving agricultural water productivity has become an inevitable necessity. Therefore, it is important to have reliable estimates of the seasonal applied water and water productivity under current irrigation and farm management. In this paper, the seasonal applied water and physical and economic water productivity of soybean were studied through monitoring 29 farms under actual conditions located at the tail end region of Moghan irrigation and drainage network, Ardabil Province, Iran, during the growing season 2020-2021. The net water requirement estimates of soybean during the growing season 2020-2021 and its 10-year average ranged from 417-719 mm and 457-797 mm with a mean of 539 and 581 mm, respectively, over the studied farms. The total applied water (irrigation + effective precipitation, $I + P_e$) and the grain yield ranged from 3859-7105 $m^3 ha^{-1}$ and 1.30-2.80 $ton ha^{-1}$, with a mean of 5664 $m^3 ha^{-1}$ and 2.35 $ton ha^{-1}$, respectively. The lack of flexibility in water allocations led irrigation schedule to be not adapted with the crop water requirement. The limiting factors of soybean production in the study area caused the observed maximum grain yield to be significantly lower than the potential level of soybean yield in Moghan plain (4.00 $ton ha^{-1}$). The soybean grain yield exhibited a quadratic correlation with $I + P_e$. Total water productivity (WP_{I+P_e}) and economic water productivity (WP_s) ranged from 0.33 to 0.47 $kg m^{-3}$ and 21.18×10^3 to 48.29×10^3 Rials m^{-3} with a mean of 0.42 $kg m^{-3}$ and 39.89×10^3 Rials m^{-3} , respectively. The mean Israelsen's application efficiency (AE) over initial, development, and mid-season plant growth stages in the study fields were obtained 19, 95, and 100%, respectively.

Cite this article: Parchami-Araghi, F., Abbasi, F., & Akhavan, K. (2022) Assessment of Soybean Applied Water and Water Productivity (a case study: Tail End Region of Moghan Irrigation and Drainage Network, Ardabil Province, Iran). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53 (6), 1243-1257.

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.340768.669235>



ارزیابی راندمان کاربرد و نمایه‌های بهره‌وری آب در سویا تابستانه (مطالعه موردی: پایین دست شبکه آبیاری و زهکشی مغان، استان اردبیل)

فرزین پرچمی عراقی^۱، فریبرز عباسی^۲ و کرامت اخوان^۳

۱. نویسنده مسئول، بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل (مغان)، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اردبیل، ایران. ایمیل: f.parchamiaraghi@areeo.ac.ir
۲. موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران. ایمیل: fariborzabbasi@gmail.com
۳. بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل (مغان)، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اردبیل، ایران. ایمیل: akhavang120@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	در شرایط کنونی محدودیت منابع آب، بهبود بهره‌وری آب کشاورزی ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است. بنابراین، در دست داشتن برآوردهایی معتبر از مقادیر فصلی آب آبیاری و بهره‌وری آب در شرایط فعلی مدیریت آبیاری و بهره‌برداری اعمال شده در مزارع حایز اهمیت است. در پژوهش حاضر، آب کاربردی فصلی و بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب سویا در ۲۹ مزرعه تحت مدیریت زارعین واقع در بخش پایین‌دست شبکه آبیاری و زهکشی مغان، استان اردبیل، در فصل زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ مورد مطالعه قرار گرفت. نیاز آبی خالص سویا در مزارع مطالعاتی در فصل زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ و میانگین ۱۰ ساله آن به ترتیب، در دامنه ۴۱۷ تا ۷۱۹ و ۴۵۷ تا ۷۹۷ میلی‌متر برآورد شد (به ترتیب، با میانگین ۵۳۹ و ۵۸۱ میلی‌متر). مجموع بارش موثر و آب کاربردی فصلی ($I + P_e$) و عملکرد دانه سویا به ترتیب، بین ۳۸۵۹ تا ۷۱۰۵ مترمکعب بر هکتار و ۱/۳۰ تا ۲/۸۰ تن بر هکتار اندازه‌گیری شد (به ترتیب، با میانگین ۵۶۶۴ مترمکعب بر هکتار و ۲/۳۵ تن بر هکتار). محدودیت انعطاف‌پذیری در تحویل آب به مزارع موجب اعمال یک برنامه‌ریزی آبیاری غیرمنطبق با نیاز آبی گیاه گردید. برآیند اثر عوامل محدود کننده تولید سویا در منطقه مطالعاتی موجب شد حداکثر عملکرد مشاهداتی دانه سویا به‌طور قابل توجهی پایین‌تر از عملکرد پتانسیل سویا در دشت مغان (۴/۰۰ تن بر هکتار) باشد. عملکرد دانه سویا یک همبستگی درجه دوم با $I + P_e$ را نشان داد. نمایه‌های بهره‌وری مجموع آب کاربردی و بارش موثر (WP_{I+P_e}) و بهره‌وری اقتصادی آب آبیاری (WP_s) در مزارع مطالعاتی به ترتیب، بین ۰/۳۳ تا ۰/۴۷ کیلوگرم بر مترمکعب و ۲۱/۱۸ تا ۴۸/۲۹ هزار ریال بر مترمکعب متغیر بود (به ترتیب، با میانگین ۰/۴۲ کیلوگرم بر مترمکعب و ۳۹/۸۹ هزار ریال بر مترمکعب). میانگین راندمان کاربرد اسرائیلسن (AE) در مزارع مطالعاتی برای مراحل ابتدایی، توسعه‌ای و میانی رشد گیاه به ترتیب، برابر با ۱۹، ۹۵ و ۱۰۰ درصد به‌دست آمد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱/۲	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۳/۲۰	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۳/۲۲	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۶/۱	
واژه‌های کلیدی:	
تاریخ کشت،	
تنش خشکی،	
راندمان کاربرد،	
فائو پنمن-مانتیت،	
هیبرم‌کاری.	

استناد: پرچمی عراقی، فرزین؛ عباسی، فریبرز؛ اخوان، کرامت (۱۴۰۱). ارزیابی راندمان کاربرد و نمایه‌های بهره‌وری آب در سویا تابستانه (مطالعه موردی: پایین دست شبکه آبیاری و زهکشی مغان، استان اردبیل). *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۳ (۶)، ۱۲۵۷-۱۲۴۳.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.340768.669235>



© نویسندگان

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

مقدمه

گیاه سویا (*Glycine max* [L.] Merrill) با سطح زیرکشت تقریبی ۱۲۸/۹۳ میلیون هکتار و تولید سالانه ۳۴۹/۴۰ میلیون تن دانه سویا در سطح جهان، از مهمترین منابع تولید روغن و پروتئین محسوب می‌شود (FAO, 2020). این گیاه در اقلیم‌های گرمسیری، نیمه گرمسیری و معتدل و دامنه وسیعی از کلاس‌های بافتی خاک قابل کشت است (Qiu and Chang, 2010). در کشور ما، حدود ۹۴ درصد از کل سطح زیرکشت آبی سویا در استان‌های گلستان و اردبیل تمرکز یافته است. به‌گونه‌ای که این دو استان، به‌ترتیب، سهمی ۵۳ و ۴۱ درصدی از کل سطح زیرکشت سویا (حدود ۲۹/۳ هزار هکتار) و سهمی ۵۲ و ۳۹ درصدی از کل تولید دانه سویا در کشور (حدود ۶۸/۲ هزار تن) را به‌خود اختصاص داده‌اند (Ahmadi et al., 2020). بر اساس آمار سازمان فائو در سال ۲۰۱۹، میانگین عملکرد سویا بر واحد سطح در کشور (۲/۱۷ تن بر هکتار) بالاتر از میانگین جهانی آن (۱/۷۵ تن بر هکتار) بوده است (FAOSTAT, 2021). از سوی دیگر، ضریب تغییرات داده‌های درازمدت عملکرد سویا بر واحد سطح در کشور حدود ۱۳ درصد بوده و این مقدار از اختلافی اندک (حداکثر دو درصد بالاتر) نسبت به سه کشور نخست تولید کننده سویا در جهان (آمریکا، برزیل و آرژانتین) برخوردار است (FAOSTAT, 2021). یکی از مهمترین دلایل این امر را می‌توان به شرایط مطلوب دسترسی به منابع آب آبیاری در این دو استان طی سالیان گذشته و در نتیجه، امکان کاهش نوسانات عملکرد محصول در اثر تنش خشکی و تضمین سطح اقتصادی تولید سویا از طریق آبیاری نسبت داد. تاکنون، مطالعات متعددی در مقیاس کرت‌های آزمایشی و به‌منظور بررسی عکس‌العمل ارقام مختلف سویا نسبت به رژیم‌های مختلف آبیاری صورت گرفته و بسته به درجه تفصیل این بررسی‌ها، مقادیر برخی اجزای بیلان آب و نمایه‌های بهره‌وری آب نیز کمی‌سازی شده است. نتایج مربوط به برخی از این دسته پژوهش‌ها در جدول ۱ ارائه گردیده است.

جدول ۱- نتایج گزارش شده مربوط به نمایه‌های بهره‌وری آب سویا (*)

منبع	Aminifar et al., 2011	Babazadeh and (Saraeetabrizi, 2013)	Rostami-Ajirloo (et al., 2017)	Vahdi et al., (2019)	(Garcia et al., 2010)	(Irmak et al., 2014)
منطقه مطالعاتی	ایران، رشت	ایران، کرج	ایران، دشت مغان، استان اردبیل	ایران، ارومیه	آمریکا، ایالت جورجیا	آمریکا، ایالت نبراسکا
مدت زمان مطالعه (سال)	۱	۲	۲	۲	۱	۲
P	۲۰۰	-	-	۵۳	۳۰۵	۵۳۴ تا ۴۴۷
I	۱۶۱ تا ۲۴۶	۲۰۶ تا ۸۶۳	۲۰۰ تا ۴۱۸	-	۳۶۹ تا ۴۹۳	۰ تا ۱۰۸
ET _a	-	-	-	-	۳۰۶ تا ۵۶۶	۴۵۲ تا ۶۰۱
Y	۰/۴۸ تا ۱/۳۸	۳/۱۹ تا ۴/۱۷	۰/۵۶ تا ۴/۰۰	۰/۸۲ تا ۳/۶۴	۲/۷۲ تا ۳/۵۲	۴/۰۴ تا ۴/۹۷
WP _{ET}	-	-	-	-	۰/۴۸ تا ۱/۱۴	۰/۷۷ تا ۱/۰۲
WP _I	۰/۵۶ تا ۰/۷۱	۰/۴۲ تا ۱/۴۹	۰/۲۸ تا ۰/۹۵	-	۲/۵۷ تا ۳/۷۹	۴/۲۵ تا ۲۱/۱۳
WP _{I+P}	۰/۱۹ تا ۰/۲۸	-	-	-	۰/۷۲ تا ۰/۷۹	۰/۷۲ تا ۱/۰۸

منبع	Sincik et al., (2008)	(Gerçek et al., 2009)	Demirtas et al., (2010)	Wei et al., (2015)	(Gajić et al., 2018)	Arora et al., (2011)
منطقه مطالعاتی	ترکیه، بورسا	ترکیه، شانلی‌اورفه	ترکیه، بورسا	چین، جنوب پکن	صربستان، وژودینا	هندوستان، ایالت پنجاب
مدت زمان مطالعه (سال)	۲	۲	۲	۴	۳	۳
P	۱۹۶ تا ۲۱۵	-	۱۵۰ تا ۱۵۶	۲۱۲ تا ۳۲۸	۲۲۵ تا ۴۱۷	۴۰۷ تا ۵۹۶
I	۸ تا ۶۱۶	۴۸۵ تا ۱۱۷۳	۲۱۱ تا ۴۵۳	۰ تا ۱۱۰	۰ تا ۱۴۳	۰ تا ۱۱۷۳
ET _a	۳۷۳ تا ۸۲۱	۵۱۳ تا ۱۲۶۱	۳۴۶ تا ۷۷۱	۲۸۳ تا ۳۴۷	۳۲۵ تا ۴۶۱	-
Y	۲/۰۷ تا ۳/۷۶	۱/۳۵ تا ۲/۲۸	۲/۰۷ تا ۴/۰۰	۳/۲۲ تا ۴/۲۳	۲/۵۹ تا ۳/۶۹	۰/۵۵ تا ۳/۰۰
WP _{ET}	۰/۴۶ تا ۰/۵۸	۱/۶۰ تا ۲/۹۰	۰/۴۱ تا ۰/۶۴	۰/۹۵ تا ۱/۴۶	۰/۷۹ تا ۰/۹۰	-
WP _I	۰/۶۱ تا ۱/۷۱	۱/۷۳ تا ۳/۱۰	۰/۷۹ تا ۱/۴۳	۳/۸۵ تا ۱۱/۵۲	۲/۳۲ تا ۶/۰۶	-
WP _{I+P}	۰/۴۶ تا ۰/۹۷	۱/۷۳ تا ۳/۱۰	۰/۵۹ تا ۱/۵۵	۰/۹۶ تا ۱/۳۱	۰/۷۴ تا ۰/۹۲	۰/۱۶ تا ۰/۳۷

(*) در این جدول، I، P، و ET_a به‌ترتیب، بیانگر مقادیر فصلی بارش، آب کاربردی و تبخیر-تعرق واقعی سویا (میلی‌متر) و نمایه‌های WP_{ET}، WP_I و WP_{I+P} به‌ترتیب، بیانگر بهره‌وری آب صرف شده در فرآیند تبخیر-تعرق سویا، بهره‌وری آب کاربردی و بهره‌وری مجموع آب کاربردی و بارندگی (کیلوگرم بر مترمکعب) است. به‌طور کلی، پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه برآورد آب کاربردی سویا در شرایط واقعی بهره‌برداری مزارع بسیار محدود است. در این رابطه، در مطالعه‌ای در استان گلستان، (Kiani et al. (2022) آب کاربردی فصلی و بهره‌وری آب سویا در شهرستان‌های گرگان،

علی آباد و کردکوی-بندرگز را مورد بررسی قرار دادند. میانگین نیاز آبی خالص سویا در مناطق فوق در فصل زراعی مطالعاتی (۱۴۰۰-۱۳۹۹) به ترتیب، ۵۲۵، ۳۹۸ و ۴۸۶ میلی متر گزارش شد. میانگین آب کاربردی فصلی و مجموع آب کاربردی و بارش موثر فصلی در مزارع مطالعاتی به ترتیب، ۳۹۷ میلی متر (بین ۴۷ تا ۷۲۳ میلی متر) و ۴۹۷ میلی متر (بین ۱۱۰ تا ۸۴۶ میلی متر) برآورد شد. همچنین، میانگین و عملکرد دانه سویا و نمایه های بهره‌وری آب کاربردی (WP_I) و بهره‌وری مجموع آب آبیاری و بارش موثر (WP_{I+Pe}) به ترتیب، ۲/۶۴ تن بر هکتار (بین ۱/۷۰ تا ۳/۹۸ تن بر هکتار)، ۱/۰۲ کیلوگرم بر مترمکعب (بین ۰/۲۶ تا ۶/۹۹ کیلوگرم بر مترمکعب) و ۰/۶۹ کیلوگرم بر مترمکعب (بین ۰/۲۲ تا ۲/۹۹ کیلوگرم بر مترمکعب) گزارش شد. در مطالعه‌ای مشابه در دره رودخانه میسیسیپی امریکا، Massey et al. (2017) میانگین آب کاربردی فصلی در ۵۱۲ مزرعه کشت سویا در یک دوره ۱۲ ساله (سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۳) را 280 ± 190 میلی متر (بین ۳۰/۵ تا ۱۴۷۱/۶ میلی متر) گزارش کردند. همچنین، میانگین آب کاربردی فصلی سویا در شیوه آبیاری جویچه ای، غرقابی (نواری و کنتوری) و بارانی سنتریوت به ترتیب، برابر با $331/6 \pm 204/0$ ، $222/9 \pm 155/2$ و $163/6 \pm 91/3$ میلی متر و با دامنه تغییراتی به ترتیب، بین ۳۰/۹ تا ۱۴۷۱/۶، ۳۰/۵ تا ۱۴۶۵/۱ و ۶۰/۹ تا ۵۱۷/۹ میلی متر گزارش شد.

در استان اردبیل، بخش عمده نواحی کشت سویا در دشت مغان و بخش‌های پایین دست شبکه آبیاری و زهکشی مغان تمرکز یافته است. در این محدوده، کشت سویا عمدتاً در تناوب با گندم و به صورت تابستانه (کشت دوم) انجام می‌شود. با این حال، افزایش سطح زیرکشت بهاره و تابستانه، ضعف مدیریت آبیاری در بخش‌های بالادستی شبکه و از دسترس خارج شدن بخش قابل توجه جریان برگشتی آبیاری این اراضی از طریق تخلیه مستقیم به رود ارس و خروج آن از مرز کشور، موجب محدودیت دسترسی به آب در بخش‌های انتهایی شبکه گردیده است. از سوی دیگر، کاهش جریان ورودی به شبکه آبیاری و زهکشی مغان در نتیجه بروز خشک‌سالی‌های اخیر و افزایش سطح زیرکشت در حوضه آبریز ارس، محدودیت دسترسی به آب آبیاری برای کشت‌های تابستانه در بخش‌های پایین دست شبکه آبیاری و زهکشی مغان را شدت بخشیده است. به گونه‌ای که این عامل در ترکیب با سایر محدودیت‌های فراروی کشت سویا در شرایط واقعی مزارع سویا (به‌ویژه کشت دیرهنگام سویا و خسارت آفات، بیماری‌ها و علف‌های هرز) مانع از دستیابی به سطوح پتانسیل عملکرد در واحد سطح شده است. با توجه به تغییرات زمانی و مکانی این محدودیت‌ها، پایش و ارزیابی مدیریت آبیاری، کمی‌سازی آب کاربردی و بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب در شرایط واقعی مزارع، پیش‌نیاز برنامه‌ریزی برای تخصیص بهینه منابع آب و بهبود بهره‌وری آب کشاورزی در سطح شبکه است. این در حالی است که اکثر برآوردهای گزارش شده بر اساس مطالعات صورت گرفته در کرت‌های آزمایشی و بدون توجه به اثر محدودیت‌های تولید در شرایط واقعی بوده است. بنابراین، هدف از این پژوهش، برآورد آب کاربردی فصلی و ارزیابی راندمان کاربرد و نمایه‌های بهره‌وری آب سویا از طریق اندازه‌گیری مستقیم و میدانی حجم آب کاربردی می‌باشد. لازم به ذکر است این تحقیق در شرایط واقعی مدیریت بهره‌برداری مزارع واقع در بخش پایین دست شبکه آبیاری و زهکشی مغان انجام شد که به عنوان قطب اصلی کشت سویا در دشت مغان شناخته می‌شود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

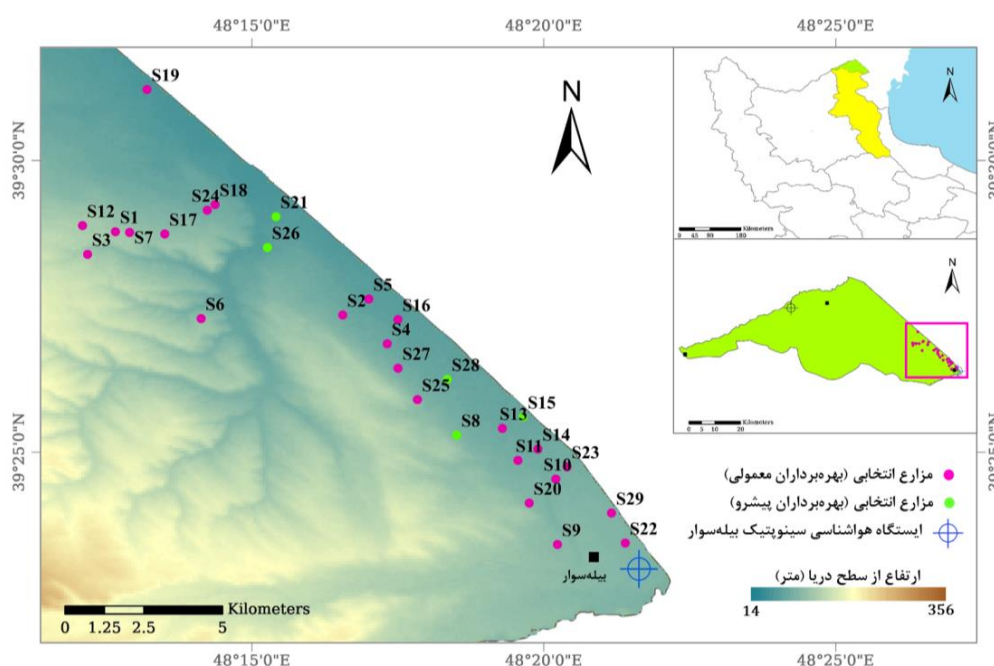
پژوهش حاضر، در فصل زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ در مزارع منتخب سویا واقع در بخش پایین دست شبکه آبیاری و زهکشی مغان در شهرستان بيله‌سوار انجام شد. مزارع مطالعاتی (در مجموع، ۲۹ مزرعه) از طریق مشاوره با مراکز خدمات و مدیریت جهاد کشاورزی به گونه‌ای انتخاب شد که حتی‌الامکان، دامنه تغییرات ویژگی‌های مزارع سویا در سطح منطقه مطالعاتی به لحاظ ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی خاک و آب آبیاری، وضعیت زهکشی داخلی خاک، تاریخ کشت، آرایش کشت، شیوه آبیاری، رقم سویا و سطح تحسیلات و مهارت بهره‌برداران (پیشرو/ معمولی) را پوشش دهند (شکل ۱). سطح تحسیلات بهره‌برداران مزارع منتخب بین ابتدایی تا دکتری متغیر بوده و بخش عمده آنها (۷۶ درصد) دارای سطح تحسیلات دیپلم و پایین تر از آن بودند. همچنین، ۱۷ درصد از کل مزارع مطالعاتی تحت مدیریت کشاورزان پیشرو بود و مابقی توسط کشاورزان معمولی مدیریت می‌شد (شکل ۱). آب مورد نیاز تمامی مزارع مطالعاتی از رود ارس و از طریق شبکه آبیاری و زهکشی مغان تامین می‌شد. مساحت ناخالص مزارع منتخب با میانگین ۵/۷ هکتار بین ۱/۰ تا ۷/۰ هکتار متغیر بود و بخش عمده‌ای از مزارع مطالعاتی (۷۱ درصد) دارای مساحتی بیشتر از ۵/۰ هکتار بودند. در تمامی مزارع مطالعاتی، سویا (رقم کنترل) در تناوب با گندم (کشت تابستانه)، به شیوه هیرم کاری و با استفاده از ردیف‌کار (فواصل ردیف ۲۵ سانتی متر) کشت شد. ازت و کود کامل ۲۰-۲۰-۲۰ از رایج‌ترین کودهای مورد استفاده در مزارع مطالعاتی بود. در مطالعات مزرعه‌ای، ویژگی‌هایی از جمله مراحل مختلف

رشد گیاه، بافت و شوری خاک، شوری آب آبیاری تحویلی، عمق آب کاربردی در هر واقعه آبیاری و عملکرد محصول در واحد سطح تعیین شد. تمامی مزارع مطالعاتی به‌شيوه نواری آبیاری می‌شدند. حین واقعه‌های آبیاری، دبی جریان تحویلی به مزارع با استفاده از فلوم و مطابق با رهنمودهای (Eslami, 2016) اندازه‌گیری شد. متعاقباً، مقادیر عمق آبیاری با در دست داشتن سطح زیر کشت واقعی مزرعه، دبی ورودی و مدت زمان تحویل آب به مزرعه برآورد گردید. در اندازه‌گیری دبی ورودی به مزارع، بسته به شرایط مزرعه، فلوم‌های تیپ ۴ و ۵ مورد استفاده قرار گرفت که روابط دبی-اشل فلوم‌های تیپ ۴ و ۵ به‌ترتیب، در روابط رابطه (۱) و رابطه (۲) ارائه شده است (Eslami, 2016):

$$Q = \text{Min}(\text{Max}(1.0, 0.00294H^{2.102}), 60.0) \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$Q = \text{Min}(\text{Max}(5.0, 0.0232H^{2.196}), 70.0) \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن‌ها: Q شدت جریان آب عبوری از فلوم (لیتر بر ثانیه) و H اشل قرائت شده فلوم (سانتی‌متر) است.



شکل ۱- پراکنش جغرافیایی مزارع مطالعاتی در دشت مغان

نمایه‌های بهره‌وری آب آبیاری (WP_I ، کیلوگرم بر مترمکعب)، بهره‌وری مجموع آب آبیاری و بارش موثر (WP_{I+P_e} ، کیلوگرم بر مترمکعب)، بهره‌وری اقتصادی آب (WP_S ، هزارریال بر مترمکعب) و راندمان کاربرد آب اسرائیلسن (AE، درصد) (Israelsen, 1932) به‌شرح زیر محاسبه شد (Molden et al., 2003):

$$WP_I = kY/I \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$WP_{I+P_e} = kY/(I + P_e) \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$WP_S = k q_n/I \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$AE = 100 I_n/I \quad \text{رابطه (۶)}$$

که در آن: Y عملکرد دانه سویا (کیلوگرم بر هکتار)، I عمق آب آبیاری کاربردی (میلی‌متر)، P_e بارش موثر (میلی‌متر)، q_n سود اقتصادی خالص حاصل از کشت سویا، I_n نیاز آبی خالص سویا (میلی‌متر) و $k = 0.1$ ضریب تبدیل واحد است. مقدار q_n برای هر یک از مزارع مطالعاتی از تفاضل مجموع هزینه‌های تولید (هزینه‌های عملیات کاشت، داشت، برداشت، هزینه زمین و سایر هزینه‌های تولید) از درآمد حاصل از تولید سویا به‌دست آمد.

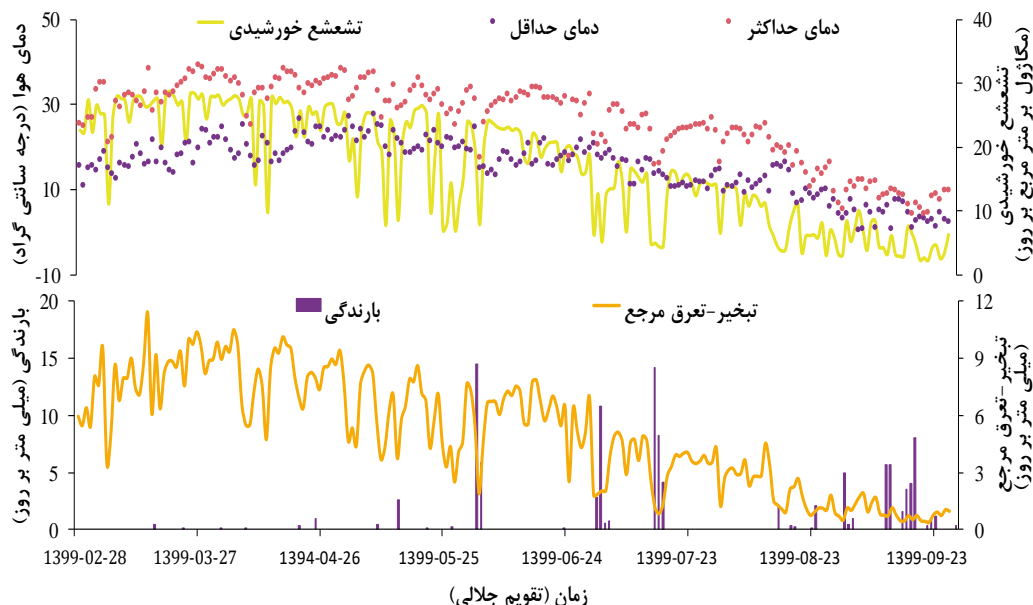
نیاز آبی خالص سویا در هر یک از مزارع مطالعاتی به‌عنوان تابعی از تبخیر-تعرق گیاه و بارش موثر با استفاده از داده‌های ثبت شده در ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک همجوار مزارع مطالعاتی محاسبه گردید (شکل ۱). صحت داده‌های هواشناسی اندازه‌گیری شده با

استفاده از معیارهای پیشنهادی توسط Allen et al. (1998) مورد ارزیابی قرار گرفت. به منظور برآورد داده‌های هواشناسی گم شده از یک الگوریتم مبتنی بر جستجو-بهبوده‌سازی (Parchami-Araghi et al., 2016) استفاده شد. به دلیل غیرمرجع بودن ایستگاه‌های هواشناسی مطالعاتی، مقادیر داده‌های دمای نقطه شبنم با استفاده از یک روش مبتنی بر نمایه خشکی (Todorovic et al., 2013) تصحیح گردید. مقادیر روزانه تشعشع خورشیدی در سطح زمین از طریق مدل عددی (Yang and Koike (2005) برآورد شد. تبخیر-تعرق روزانه سویا (ET_c) میلی‌متر بر روز) در هریک از مزارع مطالعاتی به‌عنوان تابعی از تقویم فنولوژیکی مشاهداتی سویا در هر مزرعه و با استفاده از داده‌های هواشناسی روزانه ایستگاه هواشناسی سینوپتیک بیل‌سوار (با طول و عرض جغرافیایی به ترتیب، $39^{\circ} 23'$ و $48^{\circ} 19'$ و ارتفاع $101/4$ متر از سطح دریا) از طریق رابطه زیر محاسبه شد:

$$ET_c = K_c ET_o \quad (\text{رابطه ۷})$$

که در آن: K_c : ضریب گیاهی (بدون بعد) و ET_o : تبخیر-تعرق روزانه چمن مرجع (میلی‌متر بر روز) می‌باشد.

تبخیر-تعرق روزانه چمن مرجع از طریق مدل فائو پنمن-مانتیت (Allen et al., 1998) محاسبه شد. تبخیر-تعرق سویا با استفاده از تبخیر-تعرق چمن مرجع محاسباتی و ضرایب گیاهی منفرد برای گیاه سویا (به ترتیب، $0/50$ ، $1/15$ و $0/50$ برای مراحل ابتدایی، میانی و انتهایی رشد گیاه) برآورد گردید (Allen et al., 1998). بارندگی موثر در هر واقعه بارندگی از طریق روش USDA-SCS (Bos et al., 2008) برآورد شد. متعاقباً، مقادیر فصلی بارندگی، بارش موثر، تبخیر-تعرق چمن مرجع و نیاز آبی خالص سویا محاسبه شده بر اساس مراحل مشاهداتی رشد گیاه در هریک از مزارع مورد مطالعه برای (۱) فصل زراعی مطالعاتی، (۲) میانگین ۱۰ سال اخیر و (۳) سطح احتمال وقوع ۷۵ درصد برای خشکی اقلیمی (با استفاده از داده‌های هواشناسی درازمدت) برآورد گردید. بدین ترتیب، هریک از مزارع مطالعاتی دارای مقادیری منحصر به فرد از برآوردهای فوق بود. برآوردهای مربوط به سطح احتمال وقوع ۷۵ درصد برای خشکی اقلیمی بر اساس تحلیل فراوانی تجربی برای برآوردهای درازمدت ET_c ، P_e و I_n محاسبه شد (USDA-NRCS, 1993). الگوی تغییرات روزانه متغیرهای هواشناسی ثبت شده در ایستگاه هواشناسی سینوپتیک بیل‌سوار در طول دوره مطالعاتی در شکل ۲ نشان داده شده است. در این دوره، میانگین دمای متوسط هوا و تبخیر-تعرق مرجع روزانه به ترتیب، برابر با ۲۱ درجه سانتی‌گراد و ۵ میلی‌متر بر روز بود. بارندگی فصلی در دوره مطالعاتی تحقیق حاضر برابر با ۱۱۱ میلی‌متر بود.



شکل ۲- الگوی تغییرات روزانه متغیرهای هواشناسی در طول دوره مطالعاتی

نتایج و بحث

آماره‌های توصیفی برخی از ویژگی‌های فیزیکی و مدیریتی مزارع مطالعاتی در جدول ۲ ارائه شده است. بر اساس این جدول، سطح زیر کشت واقعی سویا در مزارع مطالعاتی با میانگین $5/63$ هکتار بین $1/00$ تا $7/00$ هکتار متغیر و مقدار آن در بخش عمده‌ای از مزارع مطالعاتی (۷۵ درصد) بزرگتر یا مساوی با $5/00$ هکتار بود (جدول ۲). میانگین فصلی دبی ورودی به مزارع مطالعاتی با میانگین $41/24$

لیتر بر ثانیه در دامنه ۱۲/۵۷ تا ۶۰/۰۰ لیتر بر ثانیه قرار داشت و مقدار آن در ۹۳ درصد از مزارع مطالعاتی بیشتر از ۳۰ لیتر بر ثانیه بود. هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک سطحی با میانگین ۱/۳۳ دسی‌زیمنس بر متر بین ۱/۰۰ تا ۱/۹۰ دسی‌زیمنس بر متر متغیر بود (جدول ۲). بر اساس مقایسه مقادیر شوری عصاره اشباع خاک سطحی با معیارهای توصیه شده در این رابطه (USSLS, 1954)، خاک سطحی مزارع مطالعاتی در کلاس "بدون مشکل شوری" قرار گرفت. با توجه به آستانه شوری عصاره اشباع خاک برای کاهش عملکرد محصول سویا (۵ دسی‌زیمنس بر متر) (FAO, 2020)، می‌توان گفت که شوری خاک عامل محدود کننده عملکرد محصول سویا در منطقه مطالعاتی محسوب نمی‌شود. شوری آب آبیاری تحویلی به مزارع مطالعاتی با میانگین ۱/۰۷ دسی‌زیمنس بر متر، بین ۰/۸۳ تا ۱/۱۰ دسی‌زیمنس بر متر متغیر بود (جدول ۲). بر اساس نمودار ویلکاکس (Wilcox, 1955)، آب تحویلی به تمامی مزارع مطالعاتی در کلاس C3 (شوری بالا) قرار دارد. تاریخ کشت بذر سویا در مزارع مطالعاتی، با میانگین ۱۳۹۹/۰۴/۰۹ بین اواسط خرداد تا اواخر تیرماه و تاریخ برداشت با میانگین ۱۳۹۹/۰۹/۰۴ بین دهه سوم آبان تا اواسط آذرماه متغیر بود (جدول ۲). بر این اساس، طول دوره رشد ارقام مختلف سویا کشت شده در مزارع مطالعاتی با میانگین ۱۴۸ روز در دامنه ۱۲۸ تا ۱۷۹ روز قرار داشته (جدول ۲) و مقدار آن در ۶۹ درصد از مزارع مطالعاتی بیشتر از ۱۴۰ روز بود. همین‌طور، به دلیل اتخاذ شیوه هیرم‌کاری سویا در تمامی مزارع مورد مطالعه، اولین آبیاری بین چهار تا هشت روز قبل از کشت بذرها صورت گرفت (جدول ۲).

جدول ۲- آماره‌های توصیفی برخی از ویژگی‌های فیزیکی و مدیریتی در مزارع مطالعاتی (۲۹ مزرعه)

ویژگی	حدافل	حداکثر	میانگین	ضریب تغییرات (درصد)
سطح زیر کشت واقعی مزرعه (هکتار)	۱/۰۰	۷/۰۰	۵/۶۳	۳۶
میانگین شدت جریان تحویلی به مزرعه (لیتر بر ثانیه)	۱۲/۵۷	۶۰/۰۰	۴۱/۲۴	۲۳
شوری خاک سطحی (دسی‌زیمنس بر متر)	۱/۰۰	۱/۹۰	۱/۳۳	۱۵
شوری آب آبیاری (دسی‌زیمنس بر متر)	۰/۸۳	۱/۱۰	۱/۰۷	۷
تاریخ کشت بذر	۱۳۹۹/۰۳/۱۳	۱۳۹۹/۰۴/۲۷	۱۳۹۹/۰۴/۰۹	۲۲
تاریخ برداشت	۱۳۹۹/۰۸/۲۰	۱۳۹۹/۰۹/۱۶	۱۳۹۹/۰۹/۰۴	۲۰
طول دوره رشد (روز)	۱۲۸	۱۷۹	۱۴۸	۸
تاریخ اولین آبیاری	۱۳۹۹/۰۳/۰۶	۱۳۹۹/۰۴/۲۳	۱۳۹۹/۰۴/۰۳	۲۲
تاریخ آخرین آبیاری	۱۳۹۹/۰۶/۰۶	۱۳۹۹/۰۷/۱۴	۱۳۹۹/۰۶/۲۶	۲۰
فاصله تاریخ کاشت تا آبیاری اول (روز)	-۸	-۴	-۶	-۱۹
فاصله اولین و آخرین آبیاری (روز)	۵۲	۱۱۷	۸۵	۱۹
تعداد واقعه‌های آبیاری اعمال شده	۲	۴	۳	۱۶
میانگین دور آبیاری (روز)	۲۶	۵۷	۳۸	۲۰
فاصله آخرین آبیاری تا برداشت (روز)	۴۱	۱۰۱	۶۹	۲۰
تعداد دفعات کوددهی	۱	۳	۲	۲۹

سویای کشت شده در تمامی مزارع مطالعاتی (رقم کتول) دارای تیپ رشد نامحدود است (Farahani-Pad et al., 2012). برآیند عواملی نظیر کشت دیر هنگام سویا، عدم دسترسی به موقع به آب و سایر عوامل محدود کننده رشد گیاه سویا سبب به تعویق افتادن تکمیل دوره رشد گیاه تا انتهای پاییز می‌شود. در این شرایط و به‌ویژه مزارعی که تنش آبی شدیدی را تجربه کرده‌اند، بارش‌های محقق شده در شهریورماه و فصل پاییز (شکل ۲) از نقش مهمی در برآورده ساختن تمام یا بخشی از نیاز آبی گیاه و بهبود عملکرد دانه سویا برخوردار است. از این‌رو، به تعویق انداختن زمان برداشت سویا در منطقه مطالعاتی شیوه‌ای رایج در جهت بهبود عملکرد سویا دانه محسوب می‌شود. این امر در برخی مزارع موجب گردید که فاصله آخرین آبیاری تا زمان برداشت محصول به‌طور قابل توجهی طولانی باشد. به‌گونه‌ای که زمان آخرین آبیاری بین ۴۱ تا ۱۰۱ روز قبل از زمان برداشت متغیر بود (جدول ۲). همچنین، آخرین واقعه آبیاری در اغلب مزارع مطالعاتی (۸۶ درصد) به فاصله بیشتر از ۶۰ روز از زمان برداشت محصول اعمال شد. تعداد واقعه‌های آبیاری اعمال شده در مزارع مطالعاتی با میانگین سه نوبت بین دو تا چهار نوبت متغیر بوده و ۶۹ درصد از مزارع مطالعاتی، سه نوبت آبیاری را تجربه کردند. میانگین دور آبیاری اعمال شده در مزارع مطالعاتی با میانگین ۳۸ روز بین ۲۶ تا ۵۷ روز متغیر بوده (جدول ۲) و مقدار آن در ۸۶ درصد از مزارع مطالعاتی بیشتر از ۳۰ روز بود. همچنین، تعداد دفعات کوددهی در مزارع مطالعاتی بین یک تا سه نوبت متغیر بوده است. مطابق با جدول ۲ و بر اساس آماره ضریب تغییرات، در مقایسه با سایر ویژگی‌های مدیریتی مزارع مطالعاتی، فاصله تاریخ کاشت تا آبیاری اول و تعداد دفعات کوددهی از بالاترین تغییرپذیری برخوردار بوده‌اند. بررسی‌ها حاکی از آن بود که این تغییرپذیری بالا در وهله نخست نه به دلیل عدم



آگاهی کشاورزان از بهترین شیوه‌های مدیریتی کشت سویا، بلکه به دلیل محدودیت‌های تحمیلی به‌ویژه به‌لحاظ سرمایه در گردش و دسترسی به آب و ادوات مکانیزاسیون و نیز دیگر ویژگی‌های مزرعه (به‌ویژه سطح زیر کشت واقعی سویا در مزرعه و نوع گیاه در کشت قبلی) است.

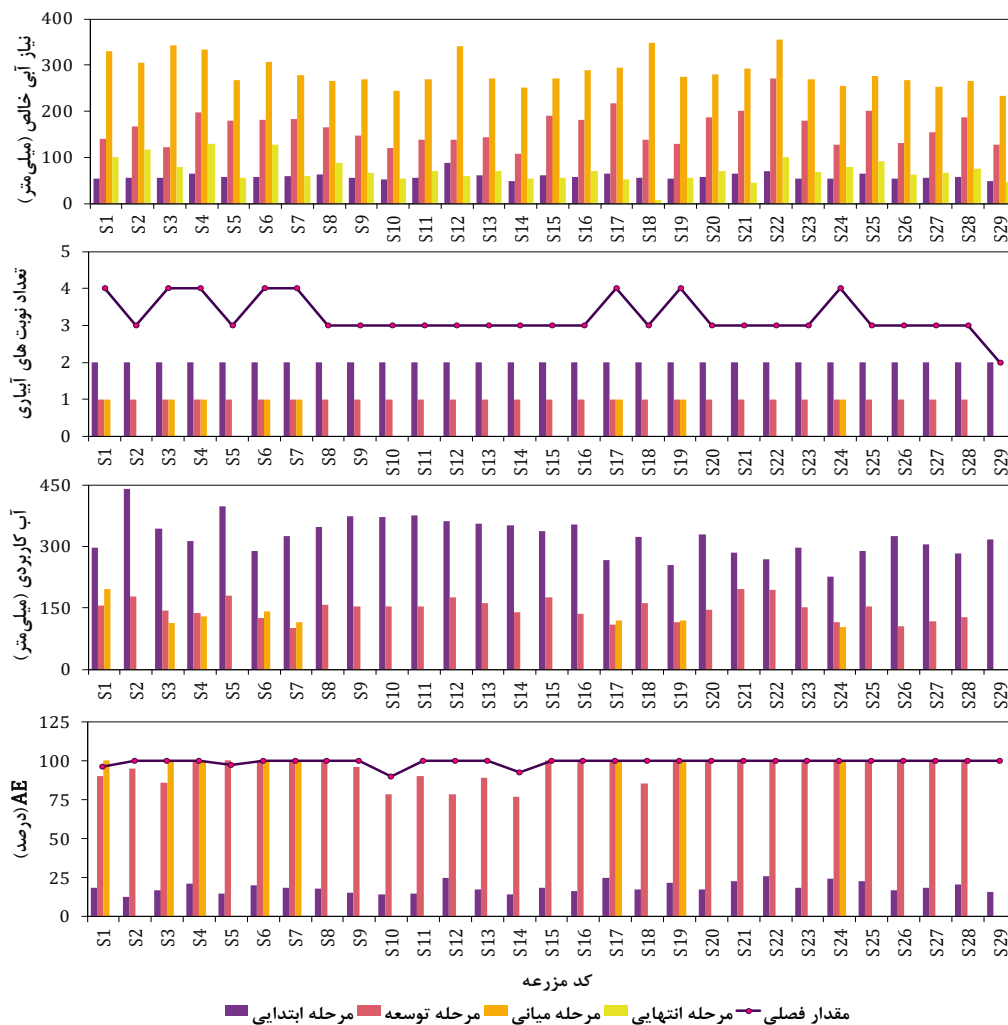
آماره‌های توصیفی مقادیر فصلی بارندگی، بارش موثر، تخییر-تعرق چمن مرجع، نیاز آبی و نیاز آبی خالص سویا محاسبه شده بر اساس تقویم فنولوژیکی مشاهداتی در هریک از مزارع مورد مطالعه در جدول ۳ ارائه شده است. بر اساس مقادیر ضریب تغییرات ارائه شده در این جدول، تمامی برآوردهای فوق در بین مزارع مطالعاتی از تغییرپذیری اندکی برخوردار بوده‌اند. این تغییرپذیری ناشی از متفاوت بودن تقویم فنولوژیکی گیاه سویا در بین مزارع مطالعاتی است. این امر از شکل ۳ و شکل ۴ که به ترتیب، برآوردهای In برای مراحل چهارگانه رشد گیاه بر اساس منحنی ضریب گیاهی (مراحل ابتدایی، میانی، توسعه‌ای و انتهایی) و سراسر فصل رشد به تفکیک مزارع مطالعاتی را نشان می‌دهند نیز قابل استنباط می‌باشد. بر اساس جدول ۳، مقادیر حداقلی و حداکثری برآوردهای ETC و In از اختلافی ۵۹ تا ۷۴ درصدی با یکدیگر برخوردار بوده‌اند. همان‌طور که در شکل ۳ نیز مشاهده می‌شود، الگوی توزیع برآوردهای In در مراحل مختلف رشد سویا در مزارع مطالعاتی متفاوت است. این امر بیانگر اثر عوامل مختلف بر تقویم فنولوژیکی سویا در هریک از مزارع مطالعاتی (نظیر تاریخ کشت، رقم، مدیریت آبیاری، مدیریت آفات و بیماری‌ها و مدیریت کاربرد کود در مزرعه) و به تبع آن بر تغییرات نیاز آبی خالص در مراحل مختلف رشد گیاه است.

بر اساس نتایج ارائه شده در جدول ۳، تمامی برآوردهای به‌دست آمده در این پژوهش برای ETC و In به‌طور معنی‌داری پایین‌تر از برآوردهای نظیر ارائه شده در سند ملی آب کشور است که عدم انطباق تقویم فنولوژیکی لحاظ شده در این سند برای گیاه سویا با شرایط واقعی منطقه مطالعاتی یکی از دلایل اصلی این امر است. چراکه در سند ملی آب کشور، برآوردهای ETC و In برای کشت بهاره سویا در منطقه مطالعاتی ارائه شده است. این در حالیست که در تمامی مزارع مطالعاتی، کشت سویا در قالب کشت تابستانه انجام شده بود. این امر بیانگر اهمیت توجه به الگوی واقع‌بینانه تقویم فنولوژیکی رشد گیاه در هر منطقه به‌منظور دستیابی به برآوردهای هرچه معتبرتر از ETC و In است.

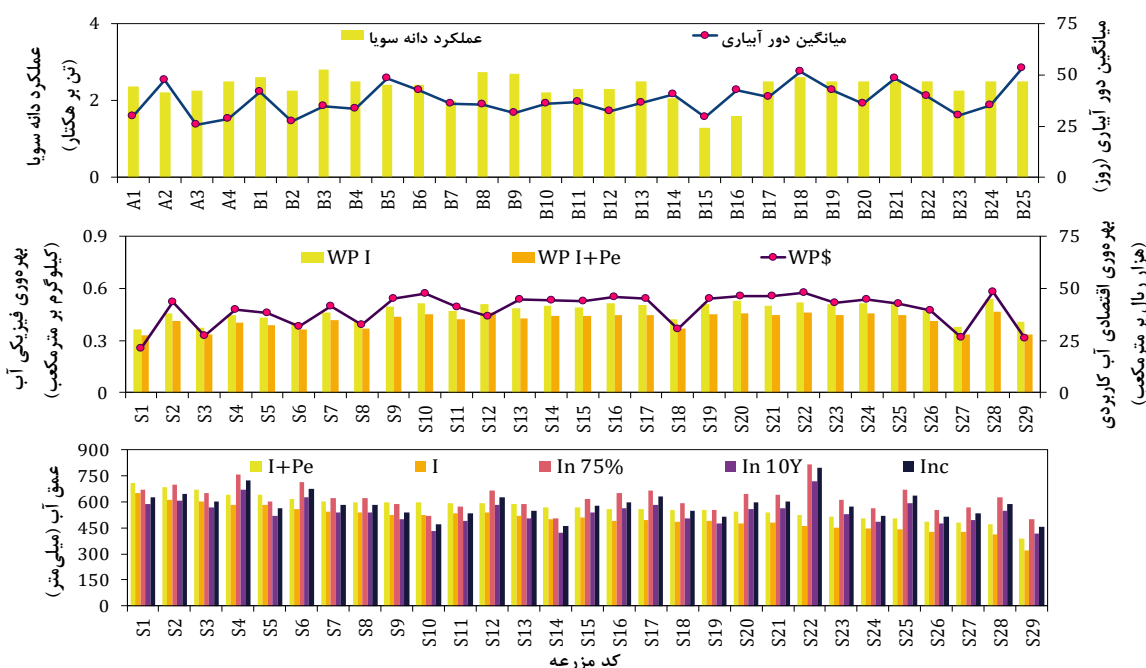
جدول ۳- آماره‌های توصیفی برآوردهای مختلف (میلی‌متر) بارندگی و نیاز آبی سویا محاسبه شده بر اساس مراحل رشد گیاه مشاهداتی در هریک از مزارع مورد مطالعه به‌همراه برآوردهای سند ملی آب کشور

آماره	سطح احتمال وقوع ۷۵ درصد (با استفاده از داده‌های هواشناسی درازمدت)					میانگین ۱۰ سال اخیر					فصل زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹				
	I _n	ET _c	ET _o	P _e	P	I _n	ET _c	ET _o	P _e	P	I _n	ET _c	ET _o	P _e	P
حداقل	۴۹۸	۵۳۹	۵۹۴	۳۰	۴۴	۴۱۷	۵۰۵	۵۷۷	۷۲	۱۲۵	۴۵۷	۵۲۵	۵۸۲	۵۵	۷۰
حداکثر	۸۱۵	۸۵۵	۸۶۵	۴۱	۶۰	۷۱۹	۸۱۶	۸۹۰	۹۸	۱۶۷	۷۹۷	۸۵۸	۹۶۱	۷۱	۱۰۷
میانگین	۶۲۲	۶۶۰	۷۱۲	۳۸	۵۵	۵۳۹	۶۲۵	۶۹۴	۸۶	۱۴۷	۵۸۱	۶۴۴	۷۱۸	۶۳	۸۳
ضریب تغییرات (درصد)	۱۱	۱۱	۹	۱۰	۱۰	۱۳	۱۱	۱۰	۷	۸	۱۳	۱۱	۱۱	۸	۱۳
برآورد سند ملی آب کشور	۶۵۸**	۶۹۶**	-	۳۸ ^{ns}	-	۶۵۸**	۶۹۶**	-	۳۸**	-	۶۵۸**	۶۹۶**	-	۳۸**	-

^(a) در این جدول، بالانویس‌های ** و ^{ns} به ترتیب، بیانگر وجود اختلاف معنی‌دار در سطح $P < 0.01$ و عدم وجود اختلاف معنی‌دار بین کمیت‌های مورد مقایسه است.



شکل ۳- مقایسه مقادیر نیاز آبی خالص، آب کاربردی و نمایه AE به‌عنوان تابعی از مرحله رشد گیاه بر اساس چهار مقطع منحنی ضریب گیاهی به‌همراه تعداد نوبت‌های آبیاری در هریک از مزارع مطالعاتی



شکل ۴- مقادیر فصلی I، I+Pe، برآوردهای I_n به‌ازای سطح احتمال وقوع ۷۵ درصد، میانگین ۱۰ سال اخیر و فصل زراعی مطالعاتی (به‌ترتیب، I_{nc} و I_{n10Y}، I_{n75%})، نمایه‌های بهره‌وری آب، میانگین دور آبیاری و عملکرد دانه سویا در مزارع مطالعاتی

از سوی دیگر، عدم قطعیت ضرایب گیاهی مورد استفاده نیز برآوردهای ETC و In را متاثر خواهد ساخت. در این رابطه، da Silva et al. (2019) در یک مطالعه دوساله در سائو پائولو (کشور برزیل) با تعیین تبخیر-تعرق واقعی سویا از طریق اندازه‌گیری فلاکس حرارتی مصرفی در فرآیند تبخیر-تعرق، نشان دادند میانگین ضریب گیاهی محاسباتی سویا در طول فصل حدود ۲۰ درصد کمتر از مقدار پیشنهادی در نشریه فائو-۵۶ (Allen et al., 1998) بود. از این رو، در پژوهش حاضر، بیش‌برآوردگری ETC و In محتمل است. میانگین برآوردهای In اشتقاقی بر اساس تحلیل فراوانی تجربی داده‌های درازمدت هواشناسی به‌ازای سطح احتمال وقوع خشکی اقلیمی ۷۵ درصد بالاتر از مقادیر نظیر محاسباتی بر اساس میانگین ۱۰ سال اخیر و نیز برآوردهای مربوط به فصل زراعی مطالعاتی است (به‌ترتیب، به‌میزان ۱۵ و ۷ درصد، سویای کشت شده در تمامی مزارع مطالعاتی (رقم کنترل) دارای تیپ رشد نامحدود است (Farahani-Pad et al., 2012)). برآیند عواملی نظیر کشت دیر هنگام سویا، عدم دسترسی به موقع به آب و سایر عوامل محدود کننده رشد گیاه سویا سبب به‌تعویق افتادن تکمیل دوره رشد گیاه تا انتهای پاییز می‌شود. در این شرایط و به‌ویژه مزارعی که تنش آبی شدیدی را تجربه کرده‌اند، بارش‌های محقق شده در شهریورماه و فصل پاییز (شکل ۲) از نقش مهمی در برآورده ساختن تمام یا بخشی از نیاز آبی گیاه و بهبود عملکرد دانه سویا برخوردار است. از این رو، به‌تعویق انداختن زمان برداشت سویا در منطقه مطالعاتی شیوه‌ای رایج در جهت بهبود عملکرد سویا دانه محسوب می‌شود. این امر در برخی مزارع موجب گردید که فاصله آخرین آبیاری تا زمان برداشت محصول به‌طور قابل توجهی طولانی باشد. به‌گونه‌ای که زمان آخرین آبیاری بین ۴۱ تا ۱۰۱ روز قبل از زمان برداشت متغیر بود (جدول ۲). همچنین، آخرین واقعه آبیاری در اغلب مزارع مطالعاتی (۸۶ درصد) به‌فاصله بیشتر از ۶۰ روز از زمان برداشت محصول اعمال شد. تعداد واقعه‌های آبیاری اعمال شده در مزارع مطالعاتی با میانگین سه نوبت بین دو تا چهار نوبت متغیر بوده و ۶۹ درصد از مزارع مطالعاتی، سه نوبت آبیاری را تجربه کردند. میانگین دور آبیاری اعمال شده در مزارع مطالعاتی با میانگین ۳۸ روز بین ۲۶ تا ۵۷ روز متغیر بوده (جدول ۲) و مقدار آن در ۸۶ درصد از مزارع مطالعاتی بیشتر از ۳۰ روز بود. همچنین، تعداد دفعات کوددهی در مزارع مطالعاتی بین یک تا سه نوبت متغیر بوده است. مطابق با جدول ۲ و بر اساس آماره ضریب تغییرات، در مقایسه با سایر ویژگی‌های مدیریتی مزارع مطالعاتی، فاصله تاریخ کاشت تا آبیاری اول و تعداد دفعات کوددهی از بالاترین تغییرپذیری برخوردار بوده‌اند. بررسی‌ها حاکی از آن بود که این تغییرپذیری بالا در وهله نخست نه به‌دلیل عدم آگاهی کشاورزان از بهترین شیوه‌های مدیریتی کشت سویا، بلکه به‌دلیل محدودیت‌های تحمیلی به‌ویژه به‌لحاظ سرمایه در گردش و دسترسی به آب و ادوات مکانیزاسیون و نیز دیگر ویژگی‌های مزرعه (به‌ویژه سطح زیر کشت واقعی سویا در مزرعه و نوع گیاه در کشت قبلی) است.

آماره‌های توصیفی مقادیر فصلی بارندگی، بارش موثر، تبخیر-تعرق چمن مرجع، نیاز آبی و نیاز آبی خالص سویا محاسبه شده بر اساس تقویم فنولوژیکی مشاهداتی در هریک از مزارع مورد مطالعه در جدول ۳ ارائه شده است. بر اساس مقادیر آماره ضریب تغییرات ارائه شده در این جدول، تمامی برآوردهای فوق در بین مزارع مطالعاتی از تغییرپذیری اندکی برخوردار بوده‌اند. این تغییرپذیری ناشی از متفاوت بودن تقویم فنولوژیکی گیاه سویا در بین مزارع مطالعاتی است. این امر از شکل ۳ و شکل ۴ که به‌ترتیب، برآوردهای In برای مراحل چهارگانه رشد گیاه بر اساس منحنی ضریب گیاهی (مراحل ابتدایی، میانی، توسعه‌ای و انتهایی) و سراسر فصل رشد به‌تفکیک مزارع مطالعاتی را نشان می‌دهند نیز قابل استنباط می‌باشد. بر اساس جدول ۳، مقادیر حداقلی و حداکثری برآوردهای ETC و In از اختلافی ۵۹ تا ۷۴ درصدی با یکدیگر برخوردار بوده‌اند. همان‌طور که در شکل ۳ نیز مشاهده می‌شود، الگوی توزیع برآوردهای In در مراحل مختلف رشد سویا در مزارع مطالعاتی متفاوت است. این امر بیانگر اثر عوامل مختلف بر تقویم فنولوژیکی سویا در هریک از مزارع مطالعاتی (نظیر تاریخ کشت، رقم، مدیریت آبیاری، مدیریت آفات و بیماری‌ها و مدیریت کاربرد کود در مزرعه) و به‌تبع آن بر تغییرات نیاز آبی خالص در مراحل مختلف رشد گیاه است.

بر اساس نتایج ارائه شده در جدول ۳، تمامی برآوردهای به‌دست آمده در این پژوهش برای ETC و In به‌طور معنی‌داری پایین‌تر از برآوردهای نظیر ارائه شده در سند ملی آب کشور است که عدم انطباق تقویم فنولوژیکی لحاظ شده در این سند برای گیاه سویا با شرایط واقعی منطقه مطالعاتی یکی از دلایل اصلی این امر است. چراکه در سند ملی آب کشور، برآوردهای ETC و In برای کشت بهاره سویا در منطقه مطالعاتی ارائه شده است. این در حالیست که در تمامی مزارع مطالعاتی، کشت سویا در قالب کشت تابستانه انجام شده بود. این امر بیانگر اهمیت توجه به الگوی واقع‌بینانه تقویم فنولوژیکی رشد گیاه در هر منطقه به‌منظور دستیابی به برآوردهای هرچه معتبرتر از ETC و In است.

جدول ۳.

آماره‌های توصیفی مربوط به مقادیر اندازه‌گیری شده حجم آب کاربردی فصلی و عملکرد محصول در فصل زراعی ۱۳۹۹-۱۴۰۰ به‌همراه نمایه‌های راندمان کاربرد آب آبیاری، بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب در جدول ۴ ارائه گردیده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، میانگین حسابی و میانگین وزنی کمیت‌های فوق از اختلاف اندکی با یکدیگر برخوردار بوده‌اند (حداکثر دو درصد). بر اساس جدول ۴، مقادیر $I + P_e$ و I در مزارع مطالعاتی به‌ترتیب، با میانگین ۵۰۳۶ و ۵۶۶۴ مترمکعب بر هکتار، بین ۳۱۸۰ تا ۶۴۹۵ و ۳۸۵۹ تا ۷۱۰۵ مترمکعب بر هکتار متغیر بوده است.

جدول ۴- آماره‌های توصیفی مقادیر اندازه‌گیری شده طول دوره رشد، حجم آب آبیاری، عملکرد محصول و نمایه‌های راندمان کاربرد آب آبیاری و بهره‌وری آب به‌عنوان تابعی از زمان کشت سویا

شرح	حداقل	حداکثر	میانگین حسابی	ضریب تغییرات (درصد)	میانگین وزنی ^(*)
I ($m^3 ha^{-1}$)	۳۱۸۰	۶۴۹۵	۵۰۳۶	۱۴	۴۹۹۲
$I + P_e$ ($m^3 ha^{-1}$)	۳۸۵۹	۷۱۰۵	۵۶۶۴	۱۲	۵۶۲۳
AE (درصد)	۹۰	۱۰۰	۹۹	۲	۹۹
Y ($ton ha^{-1}$)	۱/۳۰	۲/۸۰	۲/۳۵	۱۳	۲/۳۶
WP_I ($kg m^{-3}$)	-/۳۶	-/۵۴	-/۴۷	۱۱	-/۴۷
WP_{I+P_e} ($kg m^{-3}$)	-/۳۳	-/۴۷	-/۴۲	۱۱	-/۴۲
$WP_s \times 10^3$ ($Rials m^{-3}$)	۲۱/۱۸	۴۸/۲۹	۳۹/۸۹	۱۹	۴۰/۶۳

^(*) در این جدول از سطح زیرکشت واقعی مزارع به‌عنوان عامل وزن‌دهی در محاسبات میانگین وزنی استفاده شده است.

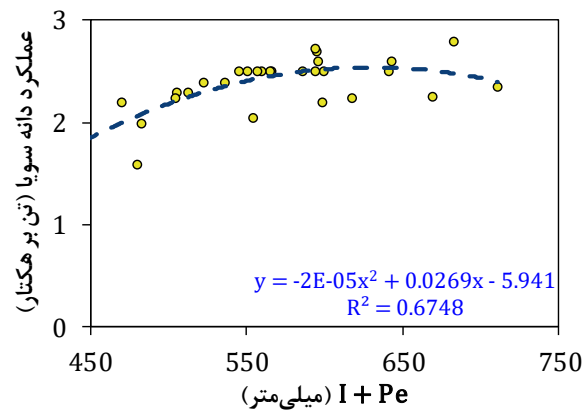
دامنه تغییرات مقادیر فصلی I در مزارع مطالعاتی در دامنه مقادیر گزارش شده توسط Massey et al. (2017) برای کشت سویا قرار دارد. با این حال، میانگین مقادیر فصلی I در مزارع مطالعاتی به‌طور معنی‌داری ($p < 0.01$) بیشتر از برآورد نظیر گزارش شده توسط Farahza et al. (2020) برای دشت مغان (۳۸۸۸ مترمکعب بر هکتار) است. آماره ضریب تغییرات حاکی از تغییرپذیری اندک مقادیر فصلی I ، $I + P_e$ و عملکرد دانه سویا در مزارع مطالعاتی است (جدول ۴) که این امر از شکل ۴ نیز قابل استنباط می‌باشد. بر اساس جدول ۴، نمایه AE در مزارع مطالعاتی با میانگین ۹۹ درصد، بین ۹۰ تا ۱۰۰ درصد متغیر بوده است. مقدار این نمایه در ۸۶ درصد از مزارع مطالعاتی برابر با ۱۰۰ درصد بود (شکل ۴).

با توجه به کراندار بودن نمایه راندمان کاربرد در بازه $0 \leq AE \leq 100$ و با توجه به لحاظ نشدن سهم جریان‌های برگشتی از آب کاربردی در محاسبه آن (رابطه ۴)، می‌توان گفت که مقادیر محاسباتی نمایه AE حاکی از وقوع کم‌آبیاری در اکثر مزارع مطالعاتی است. با مقایسه تعداد نوبت‌های آبیاری و عمق آب کاربردی در مراحل مختلف رشد گیاه (شکل ۳) می‌توان گفت این کم‌آبیاری نه از طریق کاهش آب کاربردی در هریک از نوبت‌های آبیاری، بلکه از طریق کاهش تعداد نوبت‌های آبیاری به‌مقداری کمتر از نیاز گیاه در مراحل مختلف رشد محقق شده است. بنابراین، $AE = 100\%$ در مزارع مطالعاتی به‌معنای اعمال یک مدیریت آبیاری با جریان برگشتی صفر نیست. با این وجود، کاستی نمایه راندمان کلاسیک اسرائیلسن (رابطه رابطه ۶)) به‌لحاظ مغفول ماندن سهم جریان‌های برگشتی در تعریف آن (Molden et al., 2010) مانع از انعکاس این حقیقت در مقدار محاسباتی AE گردیده است. همان‌طور که از بیان ریاضی این نمایه (رابطه رابطه ۶)) نیز قابل استنباط است، در شرایطی که مقدار کل آب کاربردی فصلی کوچک‌تر یا مساوی با مقدار نیاز آبی خالص فصلی باشد، مقدار این نمایه برابر با ۱۰۰ درصد خواهد بود. این امر از شکل ۳ که در آن مقادیر نمایه AE به‌عنوان تابعی از مرحله رشد گیاه بر اساس چهار مقطع منحنی ضریب گیاهی ارائه شده است نیز قابل استنباط می‌باشد. بر اساس این شکل، میانگین نمایه AE در مزارع مطالعاتی برای مراحل ابتدایی، توسعه‌ای و میانی رشد گیاه با تبعیت از یک روند افزایشی، به‌ترتیب، برابر با ۱۹، ۹۵ و ۱۰۰ درصد بوده است. سطح پایین نمایه AE در مراحل اولیه رشد گیاه و روند افزایشی آن با رشد و توسعه گیاه توسط Mokari-Ghahroodi et al. (2015) نیز گزارش شده است.

شکل ۳ به‌وضوح اثر محدودیت انعطاف‌پذیری خدمات تحویل آب به مزارع در بخش‌های پایین‌دست شبکه آبیاری بر محقق شدن یک برنامه‌ریزی آبیاری غیرمنطبق با نیاز آبی گیاه را نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، تمامی مزارع مطالعاتی دو نوبت در مرحله اولیه رشد گیاه و یک نوبت در مرحله توسعه گیاه (به‌جز مزرعه S29) آبیاری شده‌اند. با این حال، در مرحله میانی رشد گیاه، محدودیت

دسترسی به آب در بخش عمده‌ای از مزارع مطالعاتی (۷۲ درصد) موجب شد که در این مرحله، امکان آبیاری مزرعه وجود نداشته باشد (شکل ۳). این درحالیست که این دوره حساس رشد گیاه مقارن با مرحله تشکیل غلاف و پرشدن دانه بوده و علی‌رغم بارش‌های محقق شده در فصل رشد (شکل ۲)، میزان I_n مربوط به این مرحله از رشد گیاه در تمامی مزارع مطالعاتی به حداکثر مقدار خود رسیده است (شکل ۳). هیچ‌یک از مزارع مطالعاتی در مرحله پایانی رشد گیاه آبیاری نشده‌اند (شکل ۳).

عملکرد دانه سویا در مزارع مطالعاتی با میانگین $2/35$ تن بر هکتار بین $1/30$ تا $2/80$ تن بر هکتار متغیر بوده است (جدول ۴). سطح قابل انتظار عملکرد دانه سویا در شرایط کشت آبی ارقام بهبود یافته سویا در دامنه $2/5$ تا $3/5$ تن دانه بر هکتار توصیه شده است (FAO, 2020). با این حال، محدودیت‌های تحمیلی به مزارع مطالعاتی در دوره رشد گیاه موجب شد که عملکرد دانه سویا در 48 درصد از مزارع مطالعاتی کمتر از $2/5$ تن بر هکتار باشد. همین‌طور، میانگین عملکرد دانه سویا در مزارع مطالعاتی به‌طور معنی‌داری ($P < 0.01$) کمتر از برآوردهای نظیر گزارش شده توسط Farahza et al. (2020) برای دشت مغان ($2/60$ تن بر هکتار) است. با این حال، محدودیت دسترسی به‌موقع و مطابق با نیاز مزرعه به آب آبیاری تنها یکی از موانع دستیابی به پتانسیل عملکرد سویا در مزارع مطالعاتی است. این امر از شکل ۵ نیز قابل استنباط است. بر اساس این شکل، وجود یک رابطه درجه دوم بین مقادیر فصلی $I + P_e$ و عملکرد دانه سویا در مزارع مطالعاتی مشهود است. وجود رابطه درجه دوم بین عملکرد دانه سویا و آب کاربردی فصلی توسط Gajić et al. (2018) نیز گزارش شده است.



شکل ۵- رابطه بین مقدار فصلی $I + P_e$ با عملکرد دانه سویا در مزارع مطالعاتی

بر اساس شکل ۵ نیز می‌توان گفت که بهبود دسترسی به آب آبیاری (به‌لحاظ توزیع زمانی واقعه‌های آبیاری و/یا حجم آب کاربردی) لزوماً، به بهبود عملکرد سویا منتهی نشده است. همان‌طور که در شکل ۴ نیز مشاهده می‌شود، مزارع S2، S12 و S10 با اعمال سه نوبت آبیاری، بالاترین عملکرد دانه سویا در میان مزارع مطالعاتی را به‌خود اختصاص داده‌اند (با عملکرد به‌ترتیب، $2/73$ ، $2/80$ ، $2/73$ تن بر هکتار). دلیل این امر را می‌توان به اثر سایر عوامل محدود کننده عملکرد پتانسیل قابل حصول سویا در شرایط واقعی بهره‌برداری از مزارع مطالعاتی نسبت داد. به‌گونه‌ای که برآیند اثر عوامل محدود کننده موجود سبب گردیده است که حداکثر سطح قابل حصول عملکرد سویا در مزارع مطالعاتی به‌طور قابل توجهی پایین‌تر (به‌میزان 43 درصد) از حداکثر سطح گزارش شده برای عملکرد دانه سویا در دشت مغان ($4/00$ تن بر هکتار، جدول ۱) باشد.

شکل ۵ به‌وضوح موید قانون بازده نزولی در تولید سویا در منطقه مطالعاتی است (Perry, 2011). بر اساس این قانون، افزایش فزاینده مصرف یکی از نهاده‌های یک فرآیند تولید در شرایط ثابت ماندن سایر نهاده‌ها موجب کاهش تدریجی آهنگ افزایش تولید و نهایتاً، کاهش تولید خواهد شد. از مهمترین عوامل محدود کننده عملکرد سویا در منطقه مطالعاتی می‌توان به تاخیر در عملیات کاشت، عدم استفاده از آرایش کشت‌های مناسب‌تر سویا (نظیر کشت تک‌ردیفه و دوردیفه یا کشت بر روی پشته‌های بلند)، خسارت ناشی از آفات (به‌ویژه آفت برگ‌خوار که عدم کنترل موثر آن از نقش مهمی در به‌تعویق افتادن مراحل مختلف رشد گیاه برخوردار است) و بیماری‌ها و نقصان مواد مغذی خاک در پی عدم وجود تنوع کافی گیاهان واقع در تناوب زراعی مزارع مطالعاتی و محدودیت دسترسی به کودهای شیمیایی اشاره کرد. دلایل اصلی تاخیر در عملیات کاشت سویا در مزارع مطالعاتی ناشی از موکول ماندن این عملیات به برداشت گندم (عمدتاً، به‌دلیل محدودیت دسترسی به‌موقع به ادوات برداشت)، دسترسی به آب جهت آبیاری اولیه مزرعه و نیز فراهم شدن ادوات

مکانیزاسیون برای انجام عملیات کاشت است.

سویا گیاهی روزکوتاه بوده و لذا، طول ساعات روز بر آهنگ توسعه گیاه موثر است و در نتیجه، افزایش طول ساعات روز می‌تواند موجب تأخیر در گلدهی شود (Qiu and Chang, 2010). بنابراین، با توجه به روند صعودی طول ساعات روز در فصول بهار و تابستان می‌توان گفت که تأخیر در عملیات کاشت موجب از دست رفتن زمان بهینه کشت تابستانه سویا، به تعویق افتادن مراحل مختلف رشد گیاه و افت عملکرد دانه سویا می‌شود (Abudulai, 2018). برآیند اثر محدودیت‌های فوق بر نمایه‌های WP_{I+Pe} و WP_I نیز منعکس گردیده است. بر اساس جدول ۴، نمایه‌های WP_{I+Pe} و WP_I در مزارع مطالعاتی به ترتیب، با میانگین ۰/۴۷ و ۰/۴۲ کیلوگرم بر مترمکعب، بین ۰/۳۶ تا ۰/۵۴ و ۰/۳۳ تا ۰/۴۷ کیلوگرم بر مترمکعب متغیر بوده‌اند. همین‌طور، نمایه WP_S با میانگین ۳۹/۸۹ هزار ریال بر مترمکعب، بین ۲۱/۱۸ تا ۴۸/۲۹ هزار ریال بر مترمکعب متغیر بود. میانگین عملکرد دانه سویا و نمایه WP_{I+Pe} در مزارع مطالعاتی به‌طور معنی‌داری ($P < 0.01$) پایین‌تر از مقدار نظیر گزارش شده توسط Kiani et al. (2022) برای استان گلستان (به ترتیب، ۲/۶۴ تن بر هکتار و ۰/۶۹ کیلوگرم بر مترمکعب) است. یکی از دلایل این امر را می‌توان به پایین‌تر بودن نیاز آبی خالص سویا در استان گلستان و لذا، شرایط اقلیمی مناسب‌تر تولید سویا در این استان نسبت به منطقه مطالعاتی پژوهش حاضر نسبت داد. مقایسه دامنه تغییرات نمایه WP_I در مزارع مطالعاتی با دامنه مقادیر نظیر گزارش شده توسط Rostami-Ajirloo et al. (2017) از مطالعات کرت‌های آزمایشی در دشت مغان (۰/۲۸ تا ۰/۹۵ کیلوگرم بر مترمکعب) حاکی از اثرات منفی عوامل محدود کننده تولید سویا در منطقه مطالعاتی بر نمایه‌های بهره‌وری آب است. همین‌طور، میانگین نمایه WP_I در مزارع مطالعاتی به‌طور معنی‌داری ($P < 0.01$) پایین‌تر از برآوردهای گزارش شده توسط Farahza et al. (2020) برای مقدار این نمایه در دشت مغان (۰/۶۷ کیلوگرم بر مترمکعب) است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت بدون بازنگری در مدیریت دیگر نهاده‌های تولید، صرف بهبود دسترسی به آب آبیاری در مزارع مطالعاتی لزوماً، نمی‌تواند موجب افزایش عملکرد سویا و بهبود نمایه‌های WP_I و WP_{I+Pe} شود.

در شرایط فعلی منطقه مطالعاتی، سطح تخصیلات و مهارت بهره‌برداران می‌تواند از نقش مهمی در تخفیف اثرات منفی عوامل محدود کننده موجود بر میزان تولید و بهره‌وری آب سویا برخوردار باشد. همان‌طور که در جدول ۵ نیز قابل مشاهده است، در مقایسه با بهره‌برداران معمولی، مزارع تحت مدیریت بهره‌برداران پیشرو از میانگین آب کاربردی پایین‌تر و میانگین عملکرد محصول بالاتری برخوردار بوده‌اند. همچنین، بهره‌برداران پیشرو به سطح بالاتری از میانگین نمایه‌های بهره‌وری آب دست یافته‌اند. بر اساس مشاهدات مزرعه‌ای، یکی از دلایل این امر را می‌توان به توجه بیشتر کشاورزان پیشرو نسبت به توزیع هرچه یکنواخت‌تر آب در سطح مزرعه و کمینه‌سازی آبشویی کودهای کاربردی از طریق طرح‌ریزی مناسب قطعات آبیاری در سطح مزرعه و قطع به‌موقع جریان ورودی به قطعات آبیاری نسبت داد. با این حال، این روند در خصوص سطح تخصیلات بهره‌برداران صادق نبوده است. به‌گونه‌ای که مزارع تحت مدیریت بهره‌برداران با سطح تخصیلات دیپلم و پایین‌تر به سطح بالاتری از عملکرد و نمایه‌های بهره‌وری آب دست یافته‌اند. با این حال، هیچ‌یک از اختلاف‌های موجود بین گروه داده‌های مورد بررسی در جدول ۵ به لحاظ آماری معنی‌دار نبود.

جدول ۵- مقایسه میانگین طول دوره رشد، حجم آب کاربردی فصلی، عملکرد محصول و نمایه‌های بهره‌وری آب به‌عنوان تابعی از سطح مهارت و

تخصیلات بهره‌برداران.

معیار گروه‌بندی داده‌ها	گروه داده	تاریخ کشت	طول دوره رشد (d)	I	I + P _e	Y	AE (درصد)	WP _I (kg m ⁻³)	WP _{I+Pe} (kg m ⁻³)	WP _S × 10 ³ (Rials m ⁻³)
سطح مهارت	معمولی	۱۳۹۹/۰۴/۱۰	۱۵۰	۵۱۰۰	۵۷۳۸	۲/۳۳	۹۸/۹۹	۰/۴۷	۰/۴۱	۳۹/۴۵
بهره‌برداران	پیشرو	۱۳۹۹/۰۴/۰۸	۱۴۲	۴۷۲۸	۵۳۰۶	۲/۴۶	۱۰۰/۰۰	۰/۵۳	۰/۴۷	۴۵/۴۷
سطح تخصیلات	دیپلم و پایین‌تر	۱۳۹۹/۰۴/۱۰	۱۴۶	۴۹۳۸	۵۵۵۴	۲/۳۸	۹۸/۹۰	۰/۴۹	۰/۴۴	۴۲/۴۷
بهره‌برداران	بالای دیپلم	۱۳۹۹/۰۴/۰۸	۱۵۵	۵۳۴۱	۶۰۰۷	۲/۲۶	۱۰۰/۰۰	۰/۴۳	۰/۳۸	۳۴/۲۴

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، راندمان کاربرد و بهره‌وری آب سویا در بخش پایین‌دست شبکه آبیاری و زهکشی مغان از طریق پایش مدیریت بهره‌برداران ۲۹ مزرعه سویای منتخب در این محدوده مورد بررسی قرار گرفت. اثر عوامل مختلف محدود کننده تولید سویا در منطقه مطالعاتی موجب شد که عملکرد دانه سویا در تنها ۵۲ درصد از مزارع مطالعاتی بیش از آستانه حداقلی عملکرد قابل قبول برای کشت آبی سویا (۲/۵ تن بر هکتار) قرار گیرد. تحلیل رگرسیونی رابطه بین مقدار فصلی I + P_e با عملکرد دانه سویا نشان داد که برآیند اثر عوامل



محدود کننده تولید سویا در منطقه مطالعاتی، حداکثر سطح قابل حصول عملکرد سویا در این منطقه را محدود کرده است. به گونه‌ای که در این شرایط، بدون بازنگری در مدیریت سایر نهاده‌های تولید، صرف بهبود دسترسی به آب آبیاری نمی‌تواند موجب بهبود عملکرد سویا و نمایه‌های بهره‌وری آب شود. با این حال، باید اذعان نمود که بخش عمده عوامل محدوده کننده تولید سویا در منطقه مطالعاتی خود معلول محدودیت تحمیلی به کشاورزان این ناحیه به لحاظ دسترسی به سطحی مطمئن از خدمات انتقال و تحویل آب در شبکه آبیاری است. به گونه‌ای که این عامل موجب محدود شدن تناوب زارعی قابل اجرا در مزارع، تاخیر در کشت سویا و عدم توجیه اقتصادی جهت سرمایه‌گذاری بیشتر کشاورز برای کشت سویا گردیده است. با توجه به پتانسیل ذاتی دشت مغان برای دستیابی به سطح مطلوبی از عملکرد سویا، به نظر می‌رسد که بهبود انعطاف‌پذیری خدمات تحویل آب در سطح شبکه آبیاری و زهکشی مغان (از طریق بازسازی و بهسازی شبکه) به همراه کنترل تلفات غیرقابل بازیافت آب در شبکه (از طریق بهبود مدیریت آبیاری در مزارع بالادستی و بازچرخانی جریان‌های برگشتی) بتواند موجب ارتقای قابل توجه خدمات تحویل آب در بخش‌های پایین دست شبکه شود. سطوح بالای راندمان کاربرد اسرائیلنس در مزارع مطالعاتی (که مقدار آن در ۸۶ درصد مزارع مطالعاتی ۱۰۰ درصد بود) حاکی از وقوع کم‌آبیاری در اغلب مزارع مطالعاتی است. بررسی‌ها نشان داد که این کم‌آبیاری نه از طریق کاهش جریان برگشتی حین واقعه‌های آبیاری، بلکه از طریق کاهش نوبت‌های آبیاری محقق شد. با این حال، نارسایی مفهوم راندمان کاربرد اسرائیلنس به لحاظ عدم در نظر گرفتن اثر جریان‌های برگشتی، مانع از انعکاس این حقیقت در مقدار محاسباتی راندمان کاربرد گردید. از سوی دیگر، عدم دسترسی به داده‌های اجزای بیلان آب مزارع، کمی‌سازی جریان‌های برگشتی و دیگر تعاریف راندمان آبیاری را ناممکن ساخت. نظر به اهمیت در دست داشتن مجموعه داده‌هایی هرچه جامع‌تر از نحوه مصرف آب کشاورزی در نواحی آبیاری کشور، توجه به این مهم در مطالعات مشابه آتی ضروری به نظر می‌رسد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

- Abudulai, M. (2018). Influence of planting date and cultivar on pod-sucking bug infestation and yield of soybean in northern Ghana. *Annals of Agricultural Sciences*, 63(1), 77-81.
- Ahmadi, K., Ebadzadeh, H.R., Hatami, F., Abdshah, H. and Kazemian, A. (2020). Iran agricultural statistical yearbook (2017-2018), Volume I: Agricultural crops. Ministry of Agriculture Jihad, Tehran, Iran, 89 pp. (in Persian)
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO irrigation and drainage paper 56, FAO, Rome, Italy, 301 pp.
- Aminifar, J., Biglouei, M.H., Mohsenabad, G. and Samiezadeh, H. (2011). Effect of Deficit Irrigation on Yield and Water Productivity of Seven Soybean Cultivars in Rasht Region. *Water and Soil Science*, 21(4), 81-91. (in Persian with English abstract)
- Arora, V.K., Singh, C.B., Sidhu, A.S. and Thind, S.S. (2011). Irrigation, tillage and mulching effects on soybean yield and water productivity in relation to soil texture. *Agricultural Water Management*, 98(4), 563-568.
- Babazadeh, H. and Saraetabrizi, M. (2013). Calibration of SWAP Model for Simulating Crop Yield, Biological Yield and Soybean Water Use Efficiency. *Irrigation Sciences and Engineering*, 35(4), 83-96. (in Persian with English abstract)
- Bos, M.G., Kselik, R.A.L., Allen, R.G. and Molden, D. (2008). Water requirements for irrigation and the environment. Springer Science & Business Media.
- da Silva, E.H.F.M., Gonçalves, A.O., Pereira, R.A., Júnior, I.M.F., Sobenko, L.R. and Marin, F.R. (2019). Soybean irrigation requirements and canopy-atmosphere coupling in Southern Brazil. *Agricultural Water Management*, 218, 1-7.
- Demirtas, Ç., Yazgan, S., Candogan, B.N., Sincik, M., Büyükcangaz, H. and Göksoy, A.T. (2010). Quality and yield response of soybean (*Glycine max* L. Merrill) to drought stress in sub-humid environment. *African Journal of Biotechnology*, 9(41), 6873-6881.
- Eslami, A. (2016). Irrigation water measurement tools in surface irrigation methods. Agricultural Research, Training and Extension Organization, Fars Province Agricultural and Natural Resources Research and Training Center, Technical Journal, No. 44, Shiraz, Iran, 24 pp. (In Persian)
- Food and Agricultural Organisation of the United Nations (FAO). (2020). Crop Water Information: Soybean. (Available at: <http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/crop-information/soybean/en/>)
- Food and Agriculture Organization Statistical Data (FAOSTAT). (2021). FAO Statistical Data. (Available at: <http://faostat3.fao.org/faostat-gateway/go/to/home/E>)
- Farahani-Pad, P., Paknejad, F., Fazeli, F., Ilkaee, M.N. and Davoodi-Fard, M. (2012). Effect of planting date on dry matter and yield components in four soybean cultivars. *Journal of Agronomy and Plant Breeding*, 8(15), 1-10.
- Farahza, M.N., Nazari, B., Akbari, M.R., Naeini, M.S. and Liaghat, A. (2020). Assessing the Physical and

- Economic Water Productivity of Annual Crops in Moghan Plain and Analyzing the Relationship between Physical and Economic Water Productivity. *Irrigation and Water Engineering*, 11(2), 166-179. (in Persian with English abstract)
- Gajić, B., Kresović, B., Tapanarova, A., Životić, L. and Todorović, M. (2018). Effect of irrigation regime on yield, harvest index and water productivity of soybean grown under different precipitation conditions in a temperate environment. *Agricultural Water Management*, 210, 224-231.
- Garcia, A.G.y., Persson, T., Guerra, L. and Hoogenboom, G. (2010). Response of soybean genotypes to different irrigation regimes in a humid region of the southeastern USA. *Agricultural water management*, 97(7), 981-987.
- Gerçek, S., Boydak, E., Okant, M. and Dikilitaş, M. (2009). Water pillow irrigation compared to furrow irrigation for soybean production in a semi-arid area. *Agricultural water management*, 96(1), 87-92.
- Irmak, S., Specht, J.E., Odhiambo, L.O., Rees, J.M. and Cassman, K.G. (2014). Soybean yield, evapotranspiration, water productivity, and soil water extraction response to subsurface drip irrigation and fertigation. *Transactions of the ASABE*, 57(3), 729-748.
- Israelsen, O.W. (1932). *Irrigation Principles and Practices*. John Wiley and Sons, New York.
- Kiani, A.R., Kamali, M.I. and Abbasi, F. (2022). Investigation of Soybean Irrigation Water Productivity in Farms of Golestan Province. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 16(1), 69-82.
- Massey, J.H., Stiles, C.M., Epting, J.W., Powers, R.S., Kelly, D.B., Bowling, T.H., Janes, C.L. and Pennington, D.A. (2017). Long-term measurements of agronomic crop irrigation made in the Mississippi delta portion of the lower Mississippi River Valley. *Irrigation Science*, 35(4), 297-313.
- Mokari-Ghahroodi, E., Noory, H. and Liaghat, A. (2015). Performance evaluation study and hydrologic and productive analysis of irrigation systems at the Qazvin irrigation network (Iran). *Agricultural Water Management*, 148, 189-195.
- Molden, D., Murray-Rust, H., Sakthivadivel, R. and Makin, I. (2003). A water-productivity framework for understanding and action. In: Kijne, W., Baskers, R. and Molden, D. (Eds.), *Water Productivity in Agriculture: Limits and Opportunities for Improvements*. CAB International, Wallingford, United Kingdom.
- Molden, D., Oweis, T., Steduto, P., Bindraban, P., Hanjra, M.A. and Kijne, J. (2010). Improving agricultural water productivity: Between optimism and caution. *Agricultural water management*, 97(4), 528-535.
- Parchami-Araghi, F., Mirlatifi, S.M., Ghorbani Dashtaki, S., Vazifehdoust, M. and Sadeghi-Lari, A. (2016). Development of a Disaggregation Framework toward the Estimation of Subdaily Reference Evapotranspiration: 1- Performance Comparison of Some Daily-to-subdaily Weather Data Disaggregation Models. *Journal of Water and Soil*, 30(2), 334-354. (in Persian with English abstract)
- Perry, C. (2011). Accounting for water use: Terminology and implications for saving water and increasing production. *Agricultural Water Management*, 98(12), 1840-1846.
- Qiu, L.J. and Chang, R.Z. (2010). The Origin and History of Soybean. In: Singh, G. (Ed.), *The soybean: botany, production and uses*. CABI, Oxfordshire, UK, pp. 1-23.
- Rostami-Ajirloo, A., Asgharipour, M.R., Ghanbari, A., Joudi, M. and Khoramivafa, M. (2017). Study the effect of deficit irrigation on yield, quality characteristics and water use efficiency of three cultivars of soybean in Moghan plain. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 7(1), 113-125. (in Persian with English abstract)
- Sincik, M., Candogan, B.N., Demirtas, C., Büyükcangaz, H., Yazgan, S. and Göksoy, A.T. (2008). Deficit Irrigation of Soya Bean [*Glycine max* (L.) Merr.] in a Sub-humid Climate. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 194(3), 200-205.
- Todorovic, M., Karic, B. and Pereira, L.S. (2013). Reference evapotranspiration estimate with limited weather data across a range of Mediterranean climates. *Journal of Hydrology*, 481, 166-176.
- USDA-NRCS. (1993). Chapter 2: Irrigation water requirements, Part 623: Irrigation. National Engineering Handbook, United States Department of Agriculture Soil Conservation Service, Washington, DC. (Available at: <ftp://ftp.wcc.nrcs.usda.gov/wntsc/waterMgt/irrigation/NEH15/ch2.pdf>).
- United States Salinity Laboratory Staff (USSLS). (1954). *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*, Agriculture Handbook No 60, Washington DC, USA, pp. 160.
- Vahdi, N., Gholinezhad, E., Mansourifar, S., Geyrati Arani, L. and Rahimi, M. (2019). Effect of Water Stress on Yield and Yield Components of Three Soybean Cultivars. *Plant Production Technology*, 11(1), 103-113. (in Persian with English abstract)
- Wei, Z., Paredes, P., Liu, Y., Chi, W.W. and Pereira, L.S. (2015). Modelling transpiration, soil evaporation and yield prediction of soybean in North China Plain. *Agricultural water management*, 147, 43-53.
- Wilcox, L.V. (1955). *Classification and use of the irrigation waters*. US Department of Agriculture Circular No 969, Washington, DC, pp. 19.
- Yang, K. and Koike, T. (2005). A general model to estimate hourly and daily solar radiation for hydrological studies. *Water Resources Research*, 41, W10403.