فصلنامه

نشریه علمی

پژوهش آب در کشاورزی

Wra.areeo.ac.ir

ب/ جلد ۳۸ / شمار۴/ سال ۱۴۰۳

ISSN: 2228-7140

عنوان | صفحه

فصلنامه

نشریه علمی
پژوهش آب در کشاورزی
صاحب امتیاز: مؤسسه تحقیقات خاک و آب

جلد ۳۸ شماره (۴)
۱۴۰۳

تعداد انتشار در سال: **چهار شماره**
ویراستار انگلیسی: **دکتر حمید سیادت**
صفحه آرایی: **مهندس فاطمه آقاجانی**

پایگاه الکترونیکی نشریه پژوهش آب در کشاورزی: http://www.wra.areo.ir
پایگاه الکترونیکی موسسه تحقیقات خاک و آب: www.swri.ir
آدرس الکترونیکی مجله: journalwater@yahoo.com

این نشریه در پایگاه‌های علمی زیر نمایه می شود:
پایگاه اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی: www.sid.ir
پایگاه استنادی علوم جهان اسلام (ISC): www.isc.gov.ir
پایگاه سیویلیکا: https://civilica.com
پایگاه بانک اطلاعات نشریات کشور(Magiran): https://www.magiran.com

آدرس: کرج - میدان استاندارد، جاده مشکین دشت، بعد از رزکان نو، بلوار امام خمینی - کد پستی ۳۱۷۷۹۹۳۵۴۵
تلفن و نمابر ۳۶۲۲۰۱۶۰ (۰۲۶) آدرس پایگاه الکترونیکی مجله: http://www.wra.areo.ir

بسم الله الرحمن الرحیم

عنوان **صفحه**

راهنمای تهیه مقاله برای انتشار در مجله علمی پژوهش آب در کشاورزی

مجله علمی پژوهش آب در کشاورزی به منظور افزایش آگاهی محققان و پژوهشگران آبیاری و علوم خاک و آب، ایجاد زمینه ارتقای سطح دانش و پژوهش، شناخت و معرفی اندیشه‌ها، نوآوریها و خلاقیتهای علمی- پژوهشی در سطح ملی و بین‌المللی، ایجاد ارتباط بین مراکز آموزشی، علمی - پژوهشی و انتقال و تبادل نتایج یافته‌های مربوط به بهره‌برداری پایدار از منابع آب و خاک در کشاورزی را منتشر می‌نماید.

الف) اصول کلی

۱-این مجله صرفا مقالات پژوهشی منتج از پژوهش‌های نویسنده و یا نویسندگان در زمینه علوم آب و خاک در کشاورزی را منتشر می نماید.

۲- مقاله باید به زبان فارسی روان و پیراسته از غلطهای نگارشی و نوشتاری باشد. از آوردن واژه‌های بیگانه که معادل شناخته شده فارسی دارند جداً خودداری گردد.

۳- مسئولیت صحت و سقم مطالب، نظرات و عقاید مندرج در مقالات به عهده نویسندگان مقاله می‌باشد. حقوق معنوی مقالات برای نویسندگان محفوظ می‌باشد.

۴- مقاله نباید در هیچ یک از نشریات کشور به چاپ رسیده یا همزمان برای مجلات دیگر ارسال شده باشد این مسئله باید با تأیید و تعهد کتبی نویسنده مسئول باشد.

ب) نحوه تهیه و ارسال مقاله

نحوۀ نگارش مقاله

۱- مقاله حداکثر در ۱۵ صفحه **A4** با فاصله خطوط ۱/۵ و حاشیه‌های ۳ سانتی‌متر از هر طرف و به صورت تک ستونی تایپ شود.

۲- نوع قلم فارسی و انگلیسی و اندازۀ آنها مطابق جدول(۱) استفاده شود.

۳- پیش از نقطه (.) و کاما (،) گذاشتن فاصله لازم نیست، لیکن پس از آنها، یک فاصله لازم است.

۴- اصول نگارش زبان فارسی به طور کامل رعایت شده و از به کاربردن اصطلاحات انگلیسی که معادل فارسی آنها در فرهنگستان زبان فارسی تعریف شده‌اند، حتی الامکان پرهیز گردد.

جدول ۱- نوع قلم و اندازه

موقعیت استفاده	نام قلم	اندازه قلم
عنوان مقاله	B Lotus پر رنگ	14
متن مقاله	B Lotus	12
عناوین بخش های مقاله	B Lotus پر رنگ	12
نام مؤلفان	B Lotus پر رنگ	12
کلمه چکیده و کلمات کلیدی	B Lotus پر رنگ	12
عناوین جداول و اشکال	B Lotus پر رنگ	11
متن جداول و شکل ها و منابع	B Lotus	11
متن انگلیسی	Times New Roman	یک واحد کمتر از اندازۀ فارسی در هر موقعیت

نویسنده(گان) موظف هستند حداکثر ۱۵ روز پس از دریافت نظرات داوران اصلاحات لازم و یا پاسخ را ارسال نمایند. ضمناً ارسال چکیده لاتین مقاله به همراه مقاله الزامی است.

ارسال نامه درخواست چاپ مقاله در مجله پژوهش آب در کشاورزی به همراه فرم تعهد نامه الزامی است.

کلیه مقالات پس از دریافت اعلام وصول گردیده و جهت ارزیابی برای داوران مجله ارسال خواهد شد و پس از اتخاذ رأی داوران و تأیید هیئت تحریریه، مقاله در نوبت چاپ قرار خواهد گرفت.

شناسنامه مقاله

مقالات باید شامل عنوان، چکیده فارسی و انگلیسی (حداکثر تا ۳۰۰ کلمه)، واژه‌های کلیدی (Keywords)، مقدمه، مواد و روش‌ها، نتایج، بحث و نتیجه‌گیری، تشکر و قدردانی (در صورت نیاز) و فهرست منابع باشد.

برگ شناسه

عنوان مقاله، نام، نام خانوادگی، موقعیت شغلی نگارنده(گان)، نام دانشگاه یا مؤسسه پژوهشی که نگارنده(گان) در آن اشتغال دارند، نشانی کامل نگارنده(گان) و نام و مشخصات نگارنده مسئول مکاتبات (به هر دو زبان فارسی و انگلیسی)، در یک صفحه جداگانه تایپ شود.

*** نگارنده مسئول باید فرم تعهدنامه را که به امضای کلیه نگارندگان رسیده به همراه مقاله ارسال کند.**

عنوان مقاله

عنوان مقاله باید روان، گویا، مختصر و مفید بوده و در برگیرنده محتوای تحقیق انجام شده باشد. عنوان مقاله نباید بیش از ۲۰ کلمه باشد. در زیر عنوان نام و نام خانوادگی نویسندگان، مرتبه علمی و یا تحصیلات و وابستگی سازمانی، تاریخ، آدرس کامل پستی، شماره تلفن همراه و پست الکترونیک نویسندگان مقاله درج گردد.

دقت شود کلمه‌های تشکیل دهنده عنوان مقاله با کلمه‌های کلیدی مقاله متفاوت باشد.

چکیده

چکیده بایستی شامل حداکثر ۳۰۰ کلمه بوده و بیانگر زمینه و هدف، تحقیق روش بررسی، یافته‌ها، نتیجه‌گیری و ترجیحاً در یک پارگراف باشد. چکیده انگلیسی باید ترجمه کامل چکیده فارسی باشد

واژه‌های کلیدی

واژه های کلیدی بایستی ۶-۳ کلمه باشد. واژه‌های کلیدی چکیده انگلیسی نیز بایستی ترجمه دقیق واژه‌های چکیده فارسی باشد.

در انتخاب واژه‌های کلیدی از تکرار واژه‌هایی که در عنوان مقاله آمده است خودداری فرمایید

مقدمه

مقدمه باید دربرگیرندهٔ اهمیت پژوهش انجام شده باشد و به بیان مسئله با مروری بر مطالعات و مشاهدات مرتبط با تحقیق که در گذشته انجام شده بپردازد و به منابع معتبری که در انتهای مقاله ذکر شده، استناد کند. در ادامه مطالب، وجه تمایز پژوهش حاضر نسبت به مطالعات قبلی و لزوم و وجوب آن و در انتهای مقدمه هدف اصلی پژوهش

نگاشته شود. مقالاتی که موضوع آن تکراری بوده و در گذشته به کرات در داخل و خارج از ایران در مورد آن مطالعاتی انجام شده، در صورتی که وجه تمایز قانع کننده‌ای نداشته باشد چاپ نخواهد شد.

مواد و روشها

در این قسمت باید شرح مواد و روشهای مورد استفاده در تحقیق، جامعه آماری، روشهای نمونه‌گیری، اندازه‌گیریهای آزمایشی و نحوه تجزیه و تحلیل آماری آورده شود. در صورتی که از روشهای متداول یا قبلا منتشر شده استفاده شده باشد، از شرح جزئیات خودداری و فقط به ارائه اصول و ذکر مأخذ اکتفا شود.

نتایج

در این بخش، نتایج بدست آمده از تحقیق به صورت نوشتار همراه شکل و جدول و بدون بحث بیان گردد. از بکار بردن عنوان هایی مانند نمودار، عکس و نقشه خودداری و کلیه آنها با عنوان " شکل" درج شوند. نتایج ارائه شده در جداول یا شکلها نباید به صورت دیگری مانند منحنی و یا متن نوشتاری در مقاله تکرار گردد. هر جدول از شماره، عنوان، سرستون ها و متن جدول تشکیل می‌شود. یک جدول باید با خطی افقی از شماره و عنوان جدول متمایز شود. همچنین سر جدول با یک خط افقی از متن جدول جدا و در زیر متن جدول نیز یک خط افقی رسم شود. عنوان جدول در بالای آن جدول درج و پس از کلمه جدول و شماره آن، خط تیره و سپس عنوان ذکر شود. در متن جدول تا جایی که ممکن است نباید از خطوط افقی و عمودی استفاده کرد. هر ستون جدول باید دارای عنوان و واحد مربوط به کمیَت آن ستون باشد. اگر همۀ ارقام جدول دارای یک واحد مشترک باشند، آن واحد در عنوان اصلی جدول ذکر شود. توضیحات اضافی عنوان و متن جدول به صورت زیرنویس ارائه شوند.

در نمودارها از نشانه‌های○□∆●■▲ به صورت توپر و توخالی استفاده شود. برای درج عنوان هر شکل، پس از کلمۀ شکل و شماره آن، نقطه و سپس عنوان ذکر شود. فایل **Excel** مربوط به نمودارها ارسال شود. اختصارات موجود در شکلها و جداول باید در زیرنویس توضیح داده شوند. تمام اعداد متن و توضیحات جداول و شکلها باید به زبان فارسی ارائه گردد. از ارسال نمودارهای رنگی جداً اجتناب نموده و از رنگهای سفید، سیاه و هاشورهای کاملاً متفاوت استفاده شود. اندازه فونت توضیحات محورهای نمودارها و اعداد به اندازه کافی بزرگ باشد تا در صورت کوچک کردن نیز خوانا باشد. جداول و نمودارها حتی المقدور در متن مقاله جاسازی شوند.

بحث

یافته‌های جدید و مهم باید با یافته‌های موجود در منابع مقایسه شود و دلایل قبول و رد آنها مورد بحث قرار گیرد، از تکرار یافته‌ها خودداری شود. مروری بر مقالات گذشته در این بخش گنجانده شود، محدودیت‌های مطالعه باید مورد توجه قرار گیرد. راهکارهای جدید و فرضیه‌های جدید پیشنهاد گردد، یافته‌های جدید و یافته‌های پیش بینی شده مقایسه شود. در پایان باید موارد کاربردهای عملی و تئوری نتایج حاصل از تحقیق و نتیجه کلی پژوهش بیان گردد.

تشکر و قدردانی

در این بخش نویسنده (گان) می توانند از اشخاص، سازمانها و افراد ذیربطی که در اجرای تحقیق همکاری داشته اند، تشکر و قدر دانی نمایند. این قسمت باید کوتاه و در حدود ۵۰ کلمه باشد.

فهرست منابع

شیوه ارجاع در تمام متن مقاله بایستی به صورتی باشد که منبع مورد ارجاع در پایان جمله در داخل پرانتز به فارسی برای منابع انگلیسی و فارسی ارائه شود. برای منابع دارای دو نویسنده، نام هر دو نویسنده و منابعی که بیش از دو نویسنده دارند، نخست نام نفر اول و سپس " همکاران" و تاریخ بیان شود. مثال:

- نتایج مشابهی توسط برخی پژوهشگران نیز گزارش شده است (کریمی و احمدی ، ۱۳۸۹)
- نتایج مشابهی توسط سایر محققان گزارش شده است (آلوی و همکاران، ۲۰۱۰)

فهرست منابع مورد استفاده در پایان متن به صورت پیوسته و به ترتیب منابع فارسی و انگلیسی ارائه شوند. منابع مورد استفاده به ترتیب حروف الفبای نام خانوادگی نگارنده، (یا اولین نگارنده برای منابعی که بیش از یک نگارنده دارند) زیر هم آورده شوند. چنانچه از یک نگارنده چندین منبع ذکر شود، ترتیب درج آن‌ها بر حسب سال انتشار، از جدید به قدیم است. اگر از نگارنده‌ای چندین منبع همسال وجود داشته باشد، با گذاشتن حروف a، b و c پس از سال انتشار منابع از یکدیگر متمایز شوند. چنانچه مقالات منفرد و مشترک از یک نگارنده ارائه شود، نخست مقالات منفرد و سپس مقاله‌های مشترک به ترتیب حروف الفبای نام نگارندگان بعدی مرتب شوند.

برای یک مقاله به ترتیب نام خانوادگی نگارنده، حرف اول اسم کوچک نگارنده، تاریخ انتشار، عنوان مقاله عنوان کامل مجله، شماره جلد، و اولین و آخرین صفحه مقاله ارائه شود. برای یک کتاب به ترتیب نام خانوادگی و سپس حرف اول نام کوچک نگارنده، تاریخ انتشار، عنوان کامل کتاب، شماره جلد، نام ناشر، محل انتشار و تعداد کل صفحات ارائه شود. در مورد مقاله یا کتاب‌هایی که بیش از یک نویسنده دارند به ترتیب نام خانوادگی و حرف اوّل نام اوّلین نویسنده و سپس اوّل نام نویسندگان بعدی و پس از آن نام خانوادگی آن‌ها ذکر شود.

در مورد مرجعی که نویسنده آن مشخص نیست به جای نام نگارنده از "**Anonymous**" برای منابع انگلیسی و (بی نام) برای منابع فارسی استفاده شود.

چنانچه منبع ترجمه شده باشد، در فهرست منابع باید نخست نام نویسنده(گان) کتاب اصلی، عنوان مشخصات آن (به زبان انگلیسی) و سپس نام مترجم (مترجمان) ذکر شود.

مثال‌های برای تنظیم منابع

مقاله از مجله

Brennan, E.W. and Lindsay, W.L., 1998. Reduction and oxidation effect on the solubility and transformation of iron oxides. Soil Sci. Soc. Am. J. 62: pp.930–937.

مقاله از کارگاه آموزشی یا علمی

Hanbury, A., 2002. The taming of the hue, saturation and brightness colour Space, 7th Computer Vision Winter Workshop, February 2002, Bad Aussee, Austria.

مطلب از کتاب

Lindsay, W.L., 1979. Chemical equilibrium in soils. John Wiley & Sons, New York.

مطلب نقل شده یک نویسنده در یک مجموعه مقالات

Logsdon, S.D. and Laird, D.A., 2003. Ranges of bound water properties associated with a smectite clay. p. 101–108. In Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substance. Proc. of Conf., Rotorua, New Zealand. 23–26 Mar. 2003. Industrial Research, Auckland, New Zealand.

ذکر مطلب از نویسنده‌ای در یک کتاب که نام ویراستاران روی جلد آن است

Olsen, S.R. and Sommers, L.E., 1982. Phosphorus. p. 403–427. In A.L. Page et al. (ed.) Methods of soil analysis. Part 2. 2nd ed. Agron. Monogr. No. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.

ذکر مطلب از اینترنت

Soil Survey Staff. 2004. NRCS soils [Online]. Available at http://soils. usda.gov [verified 23 Mar. 2005]. USDA-NRCS, Washington, DC.

مقاله با یک نویسنده

Fukugawa, N., 2022. Effects of the quality of science on the initial public offering of university spinoffs: evidence from japan. *Scientometrics, 127(8)*, pp.4439-4455

مقاله با دو نویسنده

Haunschild, R. and Bornmann, L., 2022. Relevance of document type in the scores calculation of a specific field- normalized indicator:Are the scores strongly depent on or nearly independent of the document type handing?. *Scientometrics*, 127(8), pp.4419-4438

مقاله با سه نویسنده

Vakkari, P., Chang, Y.W. and Jarvelin, K., 2022. Largest contribution to LIS by external disciplines as measured by the characteristics of research articles. *Scientometrics*, 127(8), pp.4419-4438

مقاله با بیش از سه نویسنده

Wheeler, J., Pham, N.M., Arlitsch, K. and Shanks, J.D., 2022. Impact factions: assessing the citation impact of different type of open access repositories. *Scientometrics*, 127(8), pp.4419-4438

ضروری است شناسه منحصر به فرد DOI در انتهای ارجاعات هر مقاله درج گردد.

منابع مورد استفاده در متن بدین صورت نگاشته شوند:

بای بوردی و همکاران (۱۳۸۲) گزارش کردند...

اسمیت (۲۰۰۲) گزارش کرد ...

اسمیت و جونز (۲۰۰۲) گزارش کردند...

اسمیت و همکاران (۲۰۰۲) گزارش کردند...

- در صورت عدم رعایت دقیق مطالب فوق‌الذکر، مقاله پذیرفته نمی‌شود و پیش از بررسی به اطلاع نویسنده مسئول می‌رسد. بدیهی است چنانچه مقاله ارسالی با شرایط ذکر شده تهیه و عودت داده شود مجدداً از زمان برگشت که تاریخ واقعی مقاله منظور می‌شود مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

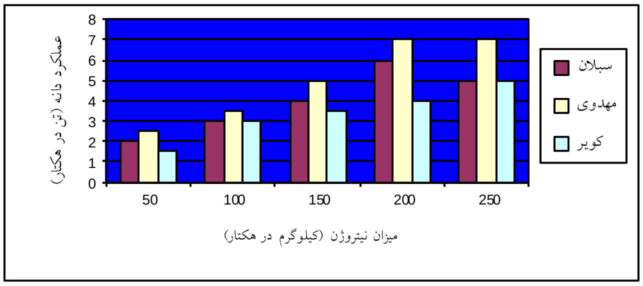
جدول نامناسب

بافت	Mgex ch	Kavail.	Pavail	OC (%)	TNV (%)	EC (dS. m-1)	pH	عمق (cm)
	(Mg.kg-1)							
لومی رسی	300	290	3/6	0/62	28	7/6	8/2	0-30
لومی رسی	305	295	0/6	0/50	30	7/2	8/2	30-60
لومی شنی	286	332	0/5	0/21	33	9/5	7/8	60-90

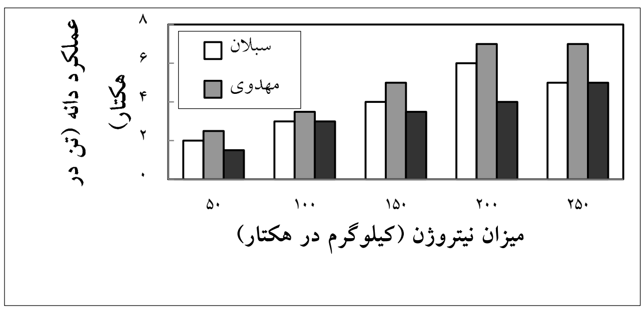
جدول مناسب

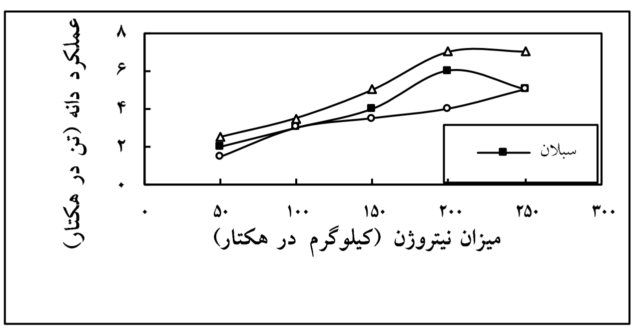
بافت	Mgex	Kav	Pav	OC (%)	TNV (%)	EC ($dS.m^{-1}$)	pH	عمق (cm)
	($mg.kg^{-1}$)							
لومی رسی	300	290	3/6	0/62	28	7/6	8/3	0-30
لومی رسی	305	295	0/60	0/50	30	7/2	8/2	30-60
لومی شنی	286	232	0/50	0/21	33	9/5	7/8	60-90

شکل نامناسب



شکل مناسب





اسامی داوران مقالات جلد ۳۸ شماره۴ سال ۱۴۰۳ دفتر مجله پژوهش آب در کشاورزی

دکتر نیازعلی ابراهیمی‌پاک...۱ داوری

دکتر هرمز اسدی...۳ داوری

دکتر محمدرضا امداد...۲ داوری

دکتر مهدی پناهی...۲ داوری

دکتر آرش تافته...۴ داوری

دکتر آناهیتا جباری...۲ داوری

دکتر محمدحسین رحیمیان...۱ داوری

دکتر علی اصغر فرشی...۱ داوری

دکتر عبدالمجید لیاقت...۲ داوری

دکتر فاطمه مسکینی ویشکایی...۲ داوری

دکتر فرهاد موسوی...۱ داوری

دکتر علی مومن‌پور...۲ داوری

دکتر میلاد نوری...۴ داوری

دکتر شادمان ویسی...۱ داوری

فرم تعهد نامه

نشریه پژوهش‌های آب در کشاورزی

اینجانب .... نویسنده <u>مسئول</u> مقاله زیر:

- **سال‌های اجراء آزمایش ذکر شود**

موارد زیر را به آگاهی می رسانم:

1. **کلیه تهیه کنندگان مقاله از ارسال آن به دفتر مجله شما آگاهند**
2. **مقاله قبلاً در هیچ مجله داخلی و خارجی منتشر نشده است**
3. **مقاله تا زمان پایان بررسی در آن مجله به مجله دیگری ارسال نخواهد شد.**
4. **<u>هیچگونه تغییری در تعداد نویسندگان یا ترتیب ذکر اسامی انجام نخواهد شد.</u>**

نام نام خانوادگی نویسنده اول:	**امضاء نویسنده اول مقاله**
نام نام خانوادگی نویسنده دوم:	**امضاء نویسنده دوم مقاله**
نام نام خانوادگی نویسنده سوم:	**امضاء نویسنده سوم مقاله**
نام نام خانوادگی نویسنده چهارم:	**امضاء نویسنده چهارم‌مقاله**

مقاله پژوهشی

نشریه پژوهش آب در کشاورزی / ب / جلد ۳۸ / شماره ۴/ ۱۴۰۳.ص۲۹۳-۳۱۰

https://doi.org/10.22092/jwra.2025.366390.1048

ارزیابی اثر روش‌های آبیاری بر عملکرد گیلاس در باغ‌های منتخب استان اردبیل

فرزین پرچمی‌عراقی* و محمد جلینی

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.**f.parchamiaraghi@areeo.ac.ir**

بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران.**mjolainire@gmail.com**

دریافت: تیر ۱۴۰۳ و پذیرش: آذر ۱۴۰۳

چکیده

در دست داشتن برآوردهایی معتبر از آب کاربردی فصلی و نمایه‌های عملکرد آبیاری در شرایط واقعی و بهره‌برداری اعمال شده در باغ‌ها، پیش‌نیاز بهبود مدیریت منابع آب کشاورزی است. در پژوهش حاضر، آب کاربردی فصلی و نمایه‌های ارزیابی عملکرد آبیاری گیلاس در ۲۲ باغ با مدیریت بهره‌برداران در استان اردبیل (شهرستان‌های پارس‌آباد و مشگین‌شهر) در سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۰ بررسی شد. نیاز آبی خالص گیلاس (I_n) در فصل زراعی مطالعاتی در دامنه ۴۶۰ (آبیاری قطره‌ای بدون پوشش گیاهی فعال در سطح خاک) تا ۷۲۹ میلی‌متر (آبیاری سطحی با پوشش گیاهی فعال در سطح خاک) برآورد شد. برآوردهای تعدیل شده I_n برای آبیاری قطره‌ای به‌میزان ۱۹٪ تا ۲۹٪ پایین‌تر از مقادیر نظیر آن‌ها برای آبیاری سطحی بود و وجود پوشش گیاهی فعال در سطح خاک موجب افزایش ۳۱٪ تا ۳۵٪ I_n شد. در این باغ‌ها، مجموع آب کاربردی و بارش مؤثر فصلی ($I + P_e$) و عملکرد میوه به‌ترتیب، بین ۴۳۶ تا ۱۴۵۷ میلی‌متر و ۱/۶۰ تا ۱۶/۶۷ تن بر هکتار متغیر بود (به‌ترتیب، با میانگین وزنی ۵۸۳ میلی‌متر و ۹/۰۳ تن در هکتار). آبیاری بی‌رویه در مراحل ابتدایی و توسعه‌ای رشد گیاه نسبت به مراحل میانی و انتهایی شایع‌تر بود. اکثر باغ‌های مزبور طی دوره‌های قبل و پس از برداشت میوه (به‌ترتیب، در ۱۳ و ۲۱ باغ)، درجات مختلفی از کم‌آبیاری را تجربه کردند. به‌طور میانگین، ۶۰٪ از آب کاربردی به دوره پس از برداشت میوه اختصاص یافت. اختلاف بین مقادیر نمایه تأمین نسبی آبیاری ($RIS = I / I_n$) باغ‌ها در دوره‌های قبل و پس از برداشت میوه در سطح پنج درصد معنی‌دار بود. اثر منطقه مطالعاتی، سطح تحصیلات و مهارت بهره‌برداران، سطح زیرکشت باغ، سن درختان باغ، سامانه‌های آبیاری و خسارت سرمازدگی بر نمایه‌های بهره‌وری آب در سطح پنج درصد معنی‌دار بود. خسارت سرمازدگی موجب کاهش ۶۱٪ عملکرد میوه و کاهش ۷۲٪ نمایه بهره‌وری آب (WP_{I+Pe}) آن در مقایسه با باغ‌های فاقد خسارت شدید شد. نتایج حاکی از ضعف شدید در مدیریت آبیاری در باغ‌های مزبور بود. به‌نظر می‌رسد که کنترل خسارت سرمازدگی و اعمال مدیریت کم‌آبیاری تنظیم‌شده در دوره پس از برداشت میوه، بارزترین راهکارهای مؤثر در بهبود نمایه‌های عملکرد آبیاری در این منطقه باشد.

واژه‌های کلیدی: آبیاری سطحی، آبیاری قطره‌ای، خسارت سرمازدگی

* - آدرس ایمیل نویسنده مسئول: **f.parchamiaraghi@areeo.ac.ir**

مقدمه

گیلاس (*Prunus avium* L.) با سطح زیر کشت تقریبی ۴۸۷ هزار هکتار و تولید سالانه ۳/۰۶ میلیون تن در جهان، یکی از گونه‌های درختان میوه هسته‌دار است (فائواستات، ۲۰۲۴). میوه گیلاس از ارزش اقتصادی قابل توجهی برخوردار بوده و کشش بازار برای این محصول از شرایط مطلوبی برخوردار است (بلانکو و همکاران، ۲۰۱۹). بر اساس آمار فائو و آمارنامه کشاورزی وزارت جهاد کشاورزی در سال زراعی ۱۴۰۱–۱۴۰۰ (بی‌نام، ۱۴۰۲)، ایران از نظر سطح زیر کشت (۳۸/۹۵ هزار هکتار) و محصول تولیدی گیلاس (۳۶۵/۶۶ هزار تن) پس از کشورهای ترکیه و شیلی، سومین تولیدکننده عمده این محصول محسوب می‌شود (فائواستات، ۲۰۲۴). بر اساس آمارنامه کشاورزی وزارت جهاد کشاورزی در سال زراعی ۱۴۰۱–۱۴۰۰ (بی‌نام، ۱۴۰۲)، استان اردبیل به لحاظ سطح زیر کشت درختان بارور گیلاس (۹۸۷ هکتار) در رتبه نهم و از نظر تولید سالانه (۵/۳۶ هزار تن) در رتبه سیزدهم استان‌های عمده تولیدکننده گیلاس در کشور قرار دارد. شهرستان‌های پارس‌آباد و مشگین‌شهر، کانون‌های اصلی تولید گیلاس در استان محسوب می‌شود. بااین‌حال، خشک‌سالی‌های اخیر، محدودیت دسترسی به منابع آب در هر دو منطقه را به‌دنبال داشته است. از سوی دیگر، اعمال برنامه‌ریزی آبیاری محتاطانه در باغ‌ها در دوره‌های قبل از برداشت میوه (به‌منظور تضمین بازارپسندی و سطح اقتصادی عملکرد میوه گیلاس) و پس از آن (به‌منظور تضمین تشکیل جوانه‌های زایشی و ذخیره کربوهیدرات کافی که عملکرد میوه در سال آتی را تعیین می‌کند) موجب وارد شدن فشاری مضاعف به منابع آب در این مناطق گردیده است. این امر بیانگر اهمیت بهبود مدیریت آبیاری باغ‌های گیلاس در راستای پایداری تولید این محصول در استان اردبیل است. عمده مطالعات مرتبط با مدیریت آبیاری گیلاس در مقیاس کرت‌های آزمایشی و از دیدگاه بررسی سطح بهینه تراکم میوه (تعداد میوه‌های درخت) و/یا مدیریت آبیاری بهینه با هدف بیشینه‌سازی تعداد میوه‌های درشت درخت در مقیاس کرت‌های آزمایشی متمرکز بوده است (بلانکو و همکاران، ۲۰۱۹؛ لیائو و همکاران، ۲۰۱۹؛ کاراسکو–بناویدس و همکاران، ۲۰۲۰؛ لی و همکاران، ۲۰۲۰). بنابراین، در این دسته پژوهش‌ها، از اثر محدودیت‌های تولید در شرایط واقعی بهره‌برداری باغ‌ها (از جمله، ضعف دانشی بهره‌برداران، محدودیت انعطاف‌پذیری خدمات تحویل آب در شبکه آبیاری، محدودیت دسترسی به کودها و سموم مؤثر و وقوع رویدادهای اقلیمی فرین مانند خشک‌سالی، موج‌های گرما و سرمازدگی) بر مدیریت آب در باغ صرف‌نظر شده است. بر اساس تعریف، آب کاربردی عبارت از مقدار آب تحویلی به مزرعه/باغ (بدون احتساب بارندگی و تلفات توزیع آب در شبکه آبیاری) است (لوریت و همکاران، ۲۰۱۳؛ ناشناس، ۲۰۱۶). پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه برآورد آب کاربردی و کمی‌سازی نمایه‌های ارزیابی عملکرد آبیاری در شرایط واقعی بهره‌برداری باغ‌های گیلاس محدود است. این در حالی است که گردآوری چنین داده‌هایی نخستین گام در جهت بهبود مدیریت منابع آب محسوب می‌شود (سالوادور و همکاران، ۲۰۱۱). علت اصلی این کاستی، ناشی از هزینه‌بری و طاقت‌فرسا بودن انجام این‌گونه مطالعات است؛ زیرا لازمه انجام چنین بررسی‌هایی، عملیات پایش مدیریت آبیاری و نیز کمی‌سازی عکس‌العمل گیاه به مدیریت آبیاری اعمال‌شده در مجموعه‌ای نماینده از باغ‌های بهره‌برداران است. همچنین، به‌دلیل تعدد باغ‌های مورد پایش، عملاً، تعیین تمامی اجزای بیلان آب در باغ‌های مورد بررسی امکان‌پذیر نیست. به‌عنوان یک راهکار، تعاریفی از نمایه‌های ارزیابی عملکرد آبیاری توسعه یافته است که کمی‌سازی آن‌ها نیازمند در دست داشتن مقادیر تمامی اجزای بیلان آب مزرعه نیست (جدول ۱). از این رو، معدود مطالعات مشابه صورت گرفته در این زمینه، عمدتاً بر ارزیابی عملکرد آبیاری از طریق برخی نمایه‌های ارزیابی فصلی مدیریت آبیاری ارائه‌شده در جدول ۱ متمرکز بوده‌اند (سالوادور و همکاران، ۲۰۱۱؛

استامبولی و همکاران، ۲۰۱۲؛ مورنو-پرز و رولدان-کاناس، ۲۰۱۳؛ آندرس و کوچی، ۲۰۱۴).

جدول ۱- توصیف ریاضی برخی نمایه‌های ارزیابی عملکرد آبیاری (*)

نمایه	توصیف ریاضی	منبع
تأمین نسبی آبیاری (-)	$RIS = I/I_n$	(مالانو و برتون، ۲۰۰۱)
تأمین نسبی بارش (-)	$RRS = P_e/ET_c$	(لوریت و همکاران، ۲۰۰۴)
نسبت عملکرد محصول (-)	$CYR = Y\ /\ \hat{Y}$	(بوس و همکاران، ۱۹۹۴)
بهره‌وری آب کاربردی (کیلوگرم بر مترمکعب)	$WP_I = k\,Y/I$	(مولدن و همکاران، ۲۰۰۳)
بهره‌وری آب (کیلوگرم بر مترمکعب)	$WP_{I+P_e} = k\,Y/(I + P_e)$	(مولدن و همکاران، ۲۰۰۳)
بهره‌وری اقتصادی آب (واحد پولی بر مترمکعب)	$WP_\$ = k\,q_n/I$	(مولدن و همکاران، ۲۰۰۳)

(*) در این جدول، P_e، I، I_n و ET_c به‌ترتیب، بارش مؤثر، آب کاربردی، نیاز آبی خالص ($I_n = ET_c - P_e$) و تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه (میلی‌متر)، Y و $\hat{Y}$ به‌ترتیب، عملکرد محصول واقعی و مورد انتظار (تن بر هکتار)، q_n سود اقتصادی خالص حاصل از تولید محصول و $k = ۰/۱$ ضریب تبدیل واحد است

محدودیت دسترسی به‌داده‌های مورد نیاز در مطالعات مشابه، پژوهشگران را ناگزیر به اتخاذ برخی فرضیات ساده‌سازی نیز نموده است. به‌عنوان‌مثال، در مطالعه مسی و همکاران (۲۰۱۷) در دره رودخانه میسیسیپی آمریکا، مقادیر آب کاربردی از طریق برق مصرفی سامانه‌های آبیاری مزارع برآورد شد. همچنین، محدودیت های فراوری گردآوری داده‌های مورد نیاز، برخی پژوهشگران را بر آن داشته که چنین بررسی‌هایی را از طریق گردآوری داده‌های مطالعات پیشین صورت دهند (بولاند و همکاران، ۲۰۰۶؛ سالوادور و همکاران، ۲۰۱۱). در این رابطه، طی مطالعه‌ای در حوضه ابرو[1] در کشور اسپانیا، سالوادور و همکاران (۲۰۱۱) با استفاده از یک بانک اطلاعاتی حاوی داده‌های مدیریت آبیاری ثبت‌شده در سال‌های ۱۹۸۲ تا ۲۰۰۵ میلادی برای ۱۵۵۰ مزرعه/باغ، مدیریت آبیاری اعمال‌شده در آن‌ها را مورد بررسی قرار دادند. بانک اطلاعات گردآوری‌شده مشتمل بر هشت باغ گیلاس با مدیریت رایج آبیاری در منطقه و هشت باغ با مدیریت کم‌آبیاری تنظیم‌شده[2] (RDI) بود. همه باغ‌های مطالعاتی به‌روش قطره‌ای آبیاری می‌شدند. میانگین نیاز آبی خالص فصلی طی سال‌های آبی مطالعاتی در باغ‌های با مدیریت رایج آبیاری و RDI به‌ترتیب، ۵۵۳ (بین ۴۶۶ تا ۶۲۴ میلی‌متر) و ۴۶۰ میلی‌متر (بین ۳۸۶ تا ۵۱۶ میلی‌متر) به‌دست آمد. میانگین آب کاربردی فصلی ۱۶۱±۶۰۱ میلی‌متر گزارش شد. میانگین نمایه RIS (جدول ۱) در باغ های با برنامه‌ریزی آبیاری رایج و RDI به‌ترتیب، ۰/۲۰±۱/۰۸ و ۰/۲۴±۱/۳۰ به‌دست آمد. به‌طورکلی، ماهیت و شدت محدودیت‌های تحمیلی به کشاورزان در فرآیند تولید محصولات کشاورزی نسبت به زمان و مکان متغیر است و برآیند اثرات این محدودیت‌ها، تصمیمات اتخاذی کشاورزان در خصوص نحوه مدیریت آب در مزرعه/باغ را متأثر می‌سازد؛ بنابراین، منطقاً، اعتبار نتایج مطالعاتی که در آن‌ها از داده‌های مزرعه‌ای مربوط به سالیان گذشته جهت استنتاج راهکاری برای مدیریت بهینه منابع آب در شرایط فعلی استفاده می‌شود، با محدودیت مواجه خواهد بود. همین‌طور، طی مطالعه‌ای پنج‌ساله در باغ‌های گیلاس (با سامانه‌های آبیاری قطره‌ای) واقع در ایستگاه‌های تحقیقاتی موسسه تحقیقات علوم باغبانی در استان البرز، محمودی و همکاران (۱۴۰۱) میانگین آب کاربردی فصلی، عملکرد میوه و نمایه WP_I (جدول ۱) را به‌ترتیب، ۷۱۳ میلی‌متر (بین ۵۵۰ تا ۸۰۰ میلی‌متر)، ۷/۱۳ تن بر هکتار (بین پنج تا نه تن بر هکتار) و ۰/۹۹ کیلوگرم بر مترمکعب (بین ۰/۹۱ تا ۱/۱۳ کیلوگرم بر مترمکعب) گزارش دادند. میانگین پنج‌ساله نمایه $WP_\$$ (جدول ۱) برای محصولات آلبالو، گیلاس، هلو و سیب (به‌ترتیب، ۱۰۶/۱۷، ۹۵/۱۳، ۲۵/۲۴ و

1- Ebro Basin

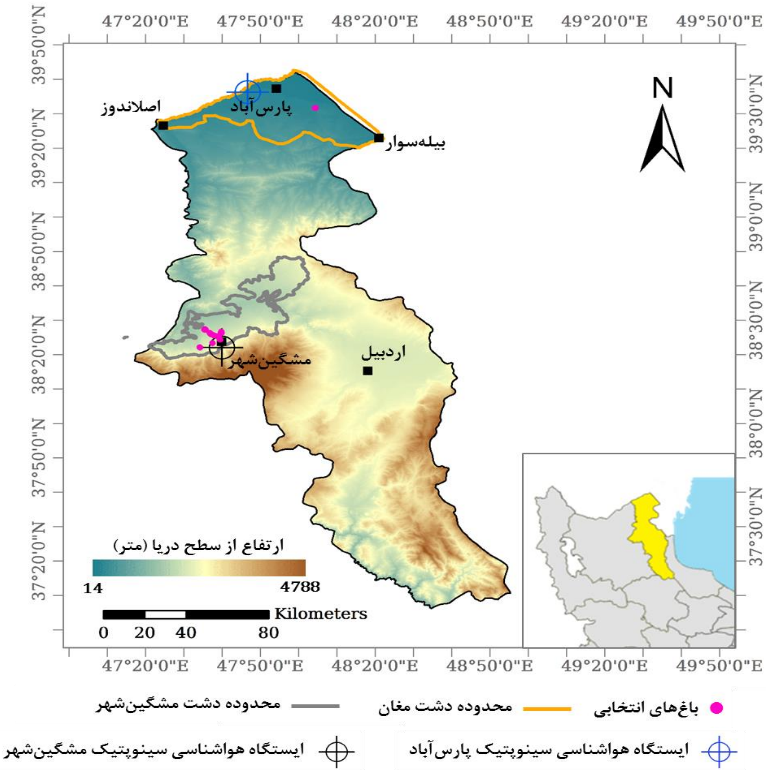
2- Regulated Deficit Irrigation

۲۳/۰۱ هزار ریال بر مترمکعب) حاکی از مزیت تولید آلبالو و گیلاس نسبت به هلو و سیب بود. در پژوهش فوق، به کمی‌سازی سایر نمایه‌های ارزیابی عملکرد آبیاری، ارزیابی درجه انطباق آب کاربردی با نیاز گیاه و بررسی راهکارهای صرفه‌جویی آب پرداخته نشده است. این در حالی است که ارزیابی عملکرد آبیاری در شرایط واقعی باغ‌های بهره‌برداران باید بتواند به ارائه تصویری هرچه واقع‌بینانه‌تر از نحوه مصرف منابع آب کشاورزی و ارائه راهکارهایی در جهت بهبود عملکرد آبیاری ختم شود؛ بنابراین، هدف از این پژوهش، برآورد آب کاربردی فصلی و ارزیابی مدیریت آبیاری اعمال‌شده در باغ‌های گیلاس از طریق اندازه‌گیری مستقیم و میدانی آب کاربردی و عملکرد محصول است. این پژوهش در شرایط واقعی مدیریت بهره‌برداری باغ‌های واقع در شهرستان‌های پارس‌آباد و مشگین‌شهر به‌عنوان قطب‌های اصلی تولید گیلاس در استان اردبیل صورت گرفت.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه و گزینش باغ‌های مطالعاتی

پژوهش حاضر، در سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ در باغ‌های منتخب گیلاس واقع در شهرستان‌های پارس‌آباد و مشگین‌شهر در استان اردبیل انجام شد (شکل ۱). در حال حاضر، تولید تجاری گیلاس در دشت مغان به اراضی شرکت کشت و صنعت و دامپروری مغان محدود می‌شود. بااین‌حال، برخی مزایای تولید گیلاس نسبت به شلیل (که یکی از گیاهان باغی عمده در الگوی کشت دشت مغان است)، توسعه تولید این محصول در دشت مغان را مطرح کرده است. از جمله این مزایا می‌توان به امکان عرضه زودهنگام‌تر محصول به بازار و ریسک بسیار پایین‌تر خسارت سرمازدگی و تگرگ در دشت مغان نسبت به دشت مشگین‌شهر و نیز خسارت و هزینه قابل‌توجه کنترل بیماری های قارچی شلیل در دشت مغان اشاره کرد. از این رو، در این پژوهش، چهار قطعه باغ تجاری گیلاس در دشت مغان مورد بررسی قرار گرفت. باغ‌های مطالعاتی در دشت مشگین‌شهر به‌گونه‌ای انتخاب شد که حتی‌الامکان، دامنه تغییرات ویژگی‌های فیزیکی و مدیریتی باغ‌های گیلاس در سطح مناطق مطالعاتی را پوشش دهند (جدول ۲). برای این منظور، با دریافت مشاوره از مراکز خدمات جهاد کشاورزی واقع در کانون‌های تولید گیلاس یک بانک اطلاعاتی اولیه از باغ‌های گیلاس منطقه (مشتمل بر ۷۳ باغ) گردآوری شد. این بانک اطلاعاتی در برگیرنده برخی ویژگی‌های باغ‌های گیلاس در منطقه مطالعاتی (شامل ویژگی‌های ذکر شده در جدول ۲، به‌جز فواصل کشت درختان) بود. این ویژگی‌ها به‌منظور گروه‌بندی داده‌ها در بانک اطلاعاتی فوق مورد استفاده قرار گرفت. متعاقباً، باغ‌های مطالعاتی از طریق انجام یک نمونه‌گیری تصادفی طبقه‌بندی‌شده (داتالو، ۲۰۰۸) از بانک اطلاعاتی گردآوری‌شده گزینش شدند. با توجه به محدودیت‌های عملی اجرای پژوهش، حجم نمونه مطالعاتی در دشت مشگین‌شهر برابر با ۱۸ در نظر گرفته شد.



شکل ۱- پراکنش جغرافیایی باغ‌های مطالعاتی

جدول ۲- فراوانی نسبی برخی ویژگی‌های فیزیکی و مدیریتی در باغ‌های مطالعاتی

ویژگی	شرح	فراوانی مطلق
سطح تحصیلات بهره‌برداران	زیر دیپلم	10
	دیپلم و بالاتر	12
سطح مهارت بهره‌برداران	معمولی	17
	پیشرو	5
پوشش سطح خاک	خاک لخت	18
	پوشش گیاهی فعال	4
مساحت باغ	کوچک‌تر از ۲ هکتار	18
	بزرگ‌تر از ۲ هکتار	4
سن درختان	پایین‌تر از ۵ سال	2
	۵ تا ۱۰ سال	10
	بالاتر از ۱۰ سال	10

ویژگی	شرح	فراوانی مطلق
فواصل کشت درختان	۴×۵	12
	۴×۶	4
	۵×۵	3
	۵×۶	3
منبع تأمین آب آبیاری	سطحی	8
	زیرزمینی	3
	ترکیبی	11
سامانه آبیاری	سطحی	15
	قطره‌ای	6
	ترکیبی (قطره‌ای-سطحی)	1
خسارت سرمازدگی	بدون خسارت شدید	18
	خسارت شدید	4

جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز

در این مطالعه، ویژگی‌هایی از جمله مراحل مختلف رشد گیاه، بافت و شوری خاک، شوری آب آبیاری تحویلی، عمق آب کاربردی در هر نوبت آبیاری و عملکرد میوه گیلاس (تن بر هکتار) تعیین شد. عمق آب کاربردی در هریک از نوبت‌های آبیاری از طریق سطح زیر کشت واقعی باغ، دبی جریان تحویلی به باغ و مدت‌زمان تحویل آب برآورد شد. بسته به شرایط باغ، دبی جریان تحویلی در سامانه‌های آبیاری سطحی با استفاده از تیپ‌های چهار یا پنج فلوم WSC اندازه‌گیری شد (اسلامی، ۱۳۹۵). در مورد

باغ‌های مطالعاتی با سامانه‌های آبیاری قطره‌ای، تلفات نشت از سامانه آبیاری قابل اغماض بود. از این‌رو، دبی جریان تحویلی در این گروه از باغ‌ها از طریق اندازه‌گیری دبی متوسط قطره‌چکان‌ها (به‌روش حجمی) و مطابق با رهنمودهای مریام و کلر (۱۹۷۸) برآورد شد.

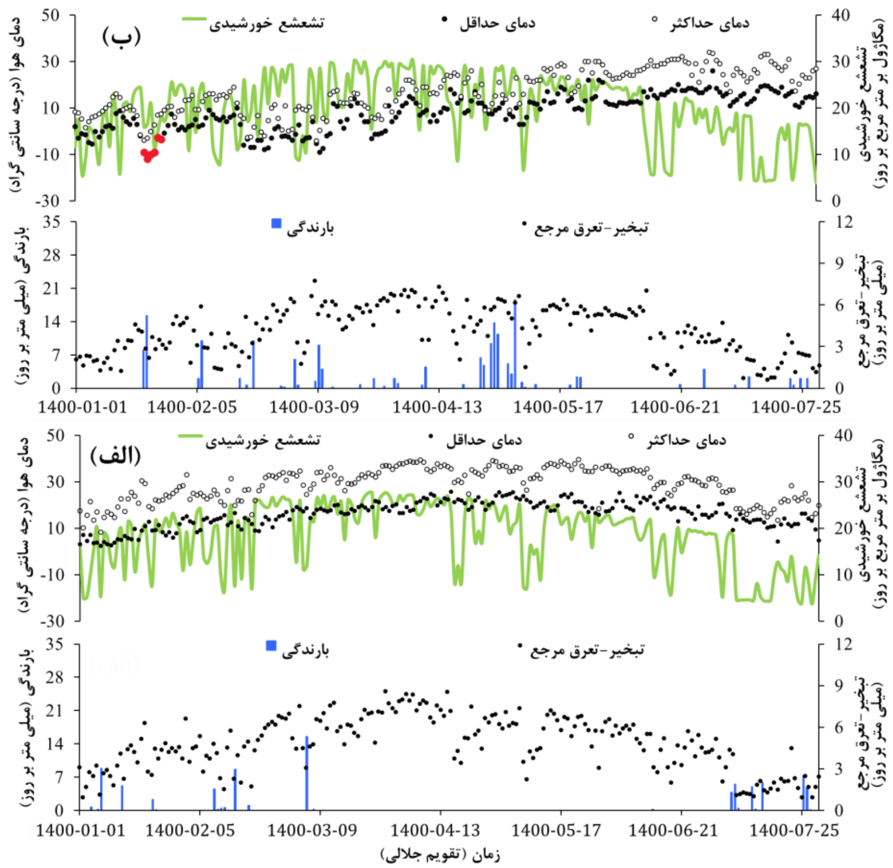
ارزیابی فصلی عملکرد آبیاری

ارزیابی فصلی عملکرد آبیاری در باغ‌های مطالعاتی با استفاده از نمایه‌های ارائه شده در جدول ۱ انجام شد. به‌منظور تعیین نمایه CYR (جدول ۱)، سطح قابل انتظار عملکرد میوه در هریک از باغ‌های مطالعاتی معادل با چارک سوم عملکرد محصول در پنج سال اخیر در نظر گرفته شد. از سوی دیگر، کمی‌سازی نمایه‌های RIS و RRS (جدول ۱) نیازمند در دست داشتن برآوردهای نیاز آبی خالص گیلاس (و لذا، برآوردهای نیاز آبی گیاه و بارش مؤثر) در باغ‌های مطالعاتی است. از این‌رو، تبخیر–تعرق گیاه مرجع (ET_o، میلی‌متر بر روز) با استفاده از داده‌های هواشناسی روزانه ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک پارس‌آباد و مشگین‌شهر (شکل ۱) و از طریق مدل فائو پنمن–مانتیث (آلن و همکاران، ۱۹۹۸) برآورد شد. ارزیابی صحت داده‌های هواشناسی اندازه‌گیری شده و برآورد داده‌های گم‌شده با استفاده از الگوریتم پیشنهادی توسط پرچمی عراقی و همکاران (۱۳۹۵) صورت گرفت. به‌دلیل غیر مرجع بودن ایستگاه‌های هواشناسی مطالعاتی، داده‌های دمای نقطه شبنم از طریق روش پیشنهادی توسط تودوروویچ و همکاران (۲۰۱۳) تصحیح شد. بارش مؤثر (P_e) از طریق روش USDA-SCS (بوس و همکاران، ۲۰۰۸) و مقادیر روزانه تشعشع خورشیدی در سطح زمین از طریق مدل عددی یانگ و کوئیکه (۲۰۰۵) برآورد شد. در فصل زراعی مطالعاتی، میانگین دمای متوسط روزانه در ایستگاه‌های پارس‌آباد و مشگین‌شهر به‌ترتیب، برابر ۲۲/۴ و ۱۲/۶ درجه سانتی‌گراد، میانگین ET_o روزانه به‌ترتیب، برابر با ۴/۸ و ۴/۱ میلی‌متر بر روز و بارش فصلی به‌ترتیب، ۶۲ و ۷۹ میلی‌متر است (شکل ۲). تبخیر–تعرق روزانه گیاه (ET_c) با استفاده از ET_o محاسباتی و ضرایب گیاهی منفرد برای باغ‌های گیلاس با پوشش گیاهی فعال بر روی سطح خاک (به‌ترتیب، ۰/۳۸، ۱/۲۰ و ۰/۸۵ برای مراحل ابتدایی، میانی و انتهایی رشد گیاه) و بدون پوشش گیاهی فعال (به‌ترتیب، ۰/۳۸، ۰/۹۵ و ۰/۷۵ برای مراحل ابتدایی، میانی و انتهایی رشد گیاه) به‌طور جداگانه محاسبه شد (آلن و همکاران، ۱۹۹۸؛ تافته و همکاران، ۱۴۰۲). نیاز آبی خالص گیلاس (I_n) با استفاده از برآوردهای ET_c و P_e برای باغ‌های مطالعاتی محاسبه شد. در مورد باغ‌های با سامانه‌های آبیاری قطره‌ای، نیاز آبی خالص با صرف‌نظر از سهم تغییرات فصلی ذخیره رطوبتی خاک ناحیه توسعه ریشه از طریق رابطه زیر محاسبه شد (کلر و بلیسنر، ۱۹۹۰):

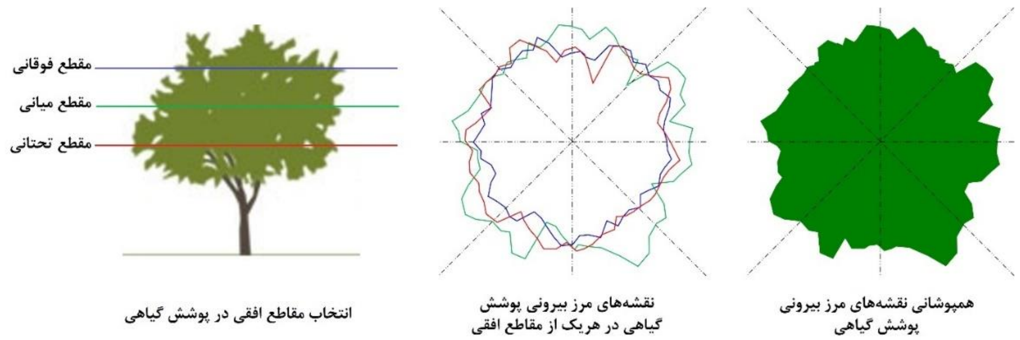
$$I_{\mathrm{n}} = 0.1(ET_{\mathrm{c}} - P_{\mathrm{e}})\sqrt{P_{\mathrm{s}}} \qquad (۱)$$

$$P_{\mathrm{s}} = 100\ \mathrm{A}_s/(S_b\ S_i) \qquad (۲)$$

که در آن: P_s درصد سطح سایه‌انداز (درصد)، A_s سطح سایه‌انداز (مترمربع) و S_b و S_i به‌ترتیب، فواصل بین و روی ردیف کاشت (متر) است. مقدار A_s در اواسط تابستان با سه تکرار و به‌روش قطعه‌بندی افقی پوشش گیاهی (وانگ و همکاران، ۲۰۲۲) برآورد شد. بدین منظور، با انتخاب سه مقطع افقی در بخش‌های فوقانی، میانی و تحتانی پوشش گیاهی، نقشه‌های مرز بیرونی پوشش گیاهی با استفاده از سیم مفتول فلزی، ترازسنج، متر و زاویه‌سنج دیجیتال تهیه شد (شکل ۳). سپس، سطح سایه‌انداز درخت از طریق محاسبه مساحت نقشه حاصل از همپوشانی سه نقشه فوق برآورد شد (شکل ۳).



شکل ۲- مقادیر روزانه متغیرهای هواشناسی در دوره مطالعاتی در ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک پارس‌آباد (الف) و مشگین‌شهر (ب). نقاط قرمزرنگ بیانگر روزهای با دمای حداقل روزانه پایین‌تر از ۲- درجه سانتی‌گراد در مراحل اولیه تشکیل میوه و با پتانسیل ایجاد خسارت سرمازدگی گیلاس است



شکل ۳- برآورد سطح سایه‌انداز درخت از طریق قطعه‌بندی افقی پوشش گیاهی

نتایج و بحث

برآوردهای فصلی P_e، ET_c و I_n در مناطق مورد مطالعه در جدول ۳ ارائه شده است. مقادیر I_n برآورد شده برای سامانه‌های آبیاری قطره‌ای به‌میزان ۱۹ تا ۲۹ درصد پایین‌تر از مقادیر نظیر آن‌ها برای سامانه‌های آبیاری سطحی بوده و وجود پوشش گیاهی فعال در سطح خاک موجب افزایش ۳۱ تا ۳۵ درصدی برآوردهای I_n شد. در مورد منطقه پارس‌آباد، تمامی برآوردهای به‌دست آمده برای ET_c و I_n همواره پایین‌تر (بین ۱ تا ۱۴ درصد) از برآوردهای نظیر ارائه‌شده در نرم‌افزار نت‌وات[1] بود. همچنین، برآوردهای I_n برای فصل زراعی مطالعاتی در مناطق پارس آباد و مشگین‌شهر به‌ترتیب، یک درصد پایین‌تر و پنج

1 -NETWAT

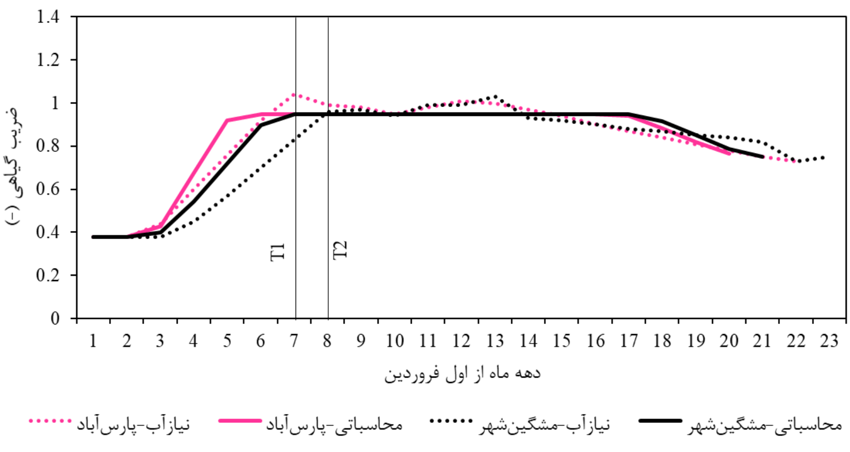
درصد بالاتر از برآوردهای متناظر به‌دست آمده از سامانه نیاز آب (http://niwr.ir) بود. از دلایل اختلاف برآوردهای فوق، می‌توان به تفاوت در تقویم فنولوژیکی لحاظ شده در محاسبات ET_c (شکل ۴) و نیز وجود برخی تفاوت‌ها در جزئیات روش‌شناسی اصلاح داده‌های هواشناسی غیرمرجع و محاسبات تشعشع خورشیدی طول موج کوتاه در سطح زمین (R_s)، ET_c و P_e اشاره کرد. از سوی دیگر، برآوردهای I_n در منطقه پارس‌آباد بالاتر از مقادیر نظیر آن در منطقه مشگین‌شهر بود (بین ۲۰ تا ۲۴ درصد). این امر بیانگر اقلیم خشک‌تر منطقه پارس‌آباد در مقایسه با منطقه مشگین‌شهر است. بر اساس جدول ۳ مقدار برآوردی I_n در فصل زراعی مورد مطالعه برای هر دو منطقه مطالعاتی بالاتر از مقدار نظیر آن به‌ازای سطح احتمال وقوع ۷۵ درصد بود؛ بنابراین، می‌توان گفت که فصل زراعی مطالعاتی یکی از فصول خشک مناطق مطالعاتی بوده است. چراکه بر اساس تحلیل احتمالاتی I_n در شرایط اقلیمی مناطق مطالعاتی، انتظار می‌رود که طی یک دوره ۱۰۰ ساله، مقدار فصلی I_n در ۷۵ درصد از سال‌های این دوره در منطقه پارس‌آباد پایین‌تر از ۶۴۳ میلی‌متر و در مشگین‌شهر پایین‌تر از ۷۰۷ و ۵۳۵ میلی‌متر (به‌ترتیب، در شرایط وجود و عدم وجود پوشش گیاهی فعال بر روی سطح خاک) باشد.

جدول ۳- میانگین برآوردهای مختلف (میلی‌متر) بارش مؤثر و نیاز آبی گیلاس در باغ‌های مطالعاتی

منطقه	پوشش گیاهی فعال	P_s (درصد)	سطح احتمال وقوع ۷۵ درصد[+]				میانگین ۱۰ سال اخیر				فصل زراعی ۱۳۹۹-۱۴۰۰				نرم‌افزار نت‌وات		سامانه نیاز آب (فصل زراعی ۱۳۹۹-۱۴۰۰)		
			P	P_e	ET_c	I_n[++]	P	P_e	ET_c	I_n[++]	P	P_e	ET_c	I_n[++]	ET_c	I_n[++]	P_e	ET_c	I_n[++]
پارس‌آباد	ندارد	61	62	42	685	643(501)	135	91	679	588(458)	59	42	722	680(529)	744	687(535)	24	706	684(533)
مشگین‌شهر	ندارد	71	79	49	584	535(450)	202	127	599	472(397)	118	76	632	556(467)	-	-	71	557	529(445)
	دارد	-	79	50	757	707	202	134	770	636	118	80	809	729	-	-	-	-	-

[+] محاسبه‌شده بر اساس بانک اطلاعاتی نیاز آب

[++] مقادیر ذکرشده در داخل پرانتز، بیانگر میانگین برآوردهای اصلاح‌شده I_n برای باغ‌های با سامانه‌های آبیاری قطره‌ای است

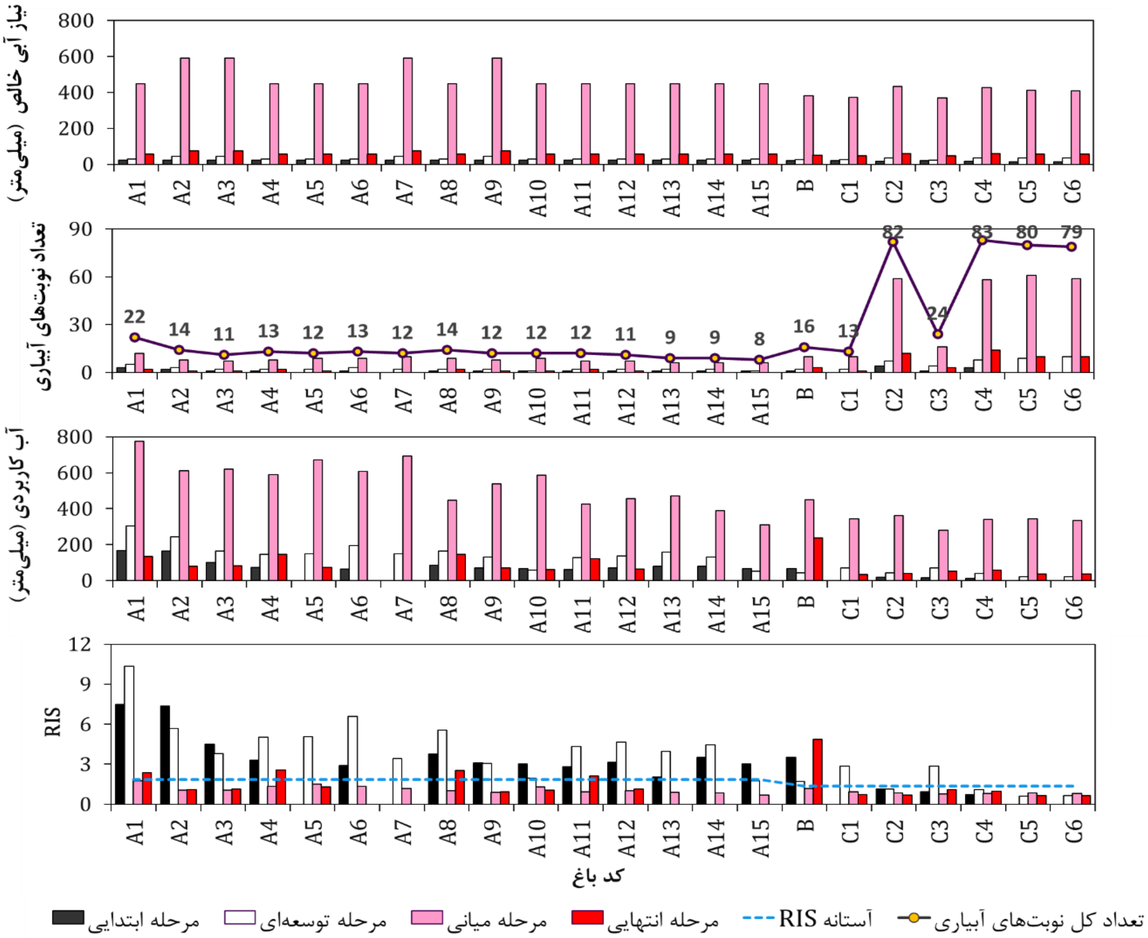


شکل ۴- مقایسه سری زمانی‌های ضریب گیاهی محاسباتی در پژوهش حاضر با مقادیر نظیر مورد استفاده در سامانه نیاز آب. مقاطع زمانی T1 و T2 به‌ترتیب، بیانگر میانگین زمان آغاز برداشت میوه در باغ‌های مطالعاتی در مناطق پارس‌آباد و مشگین‌شهر است

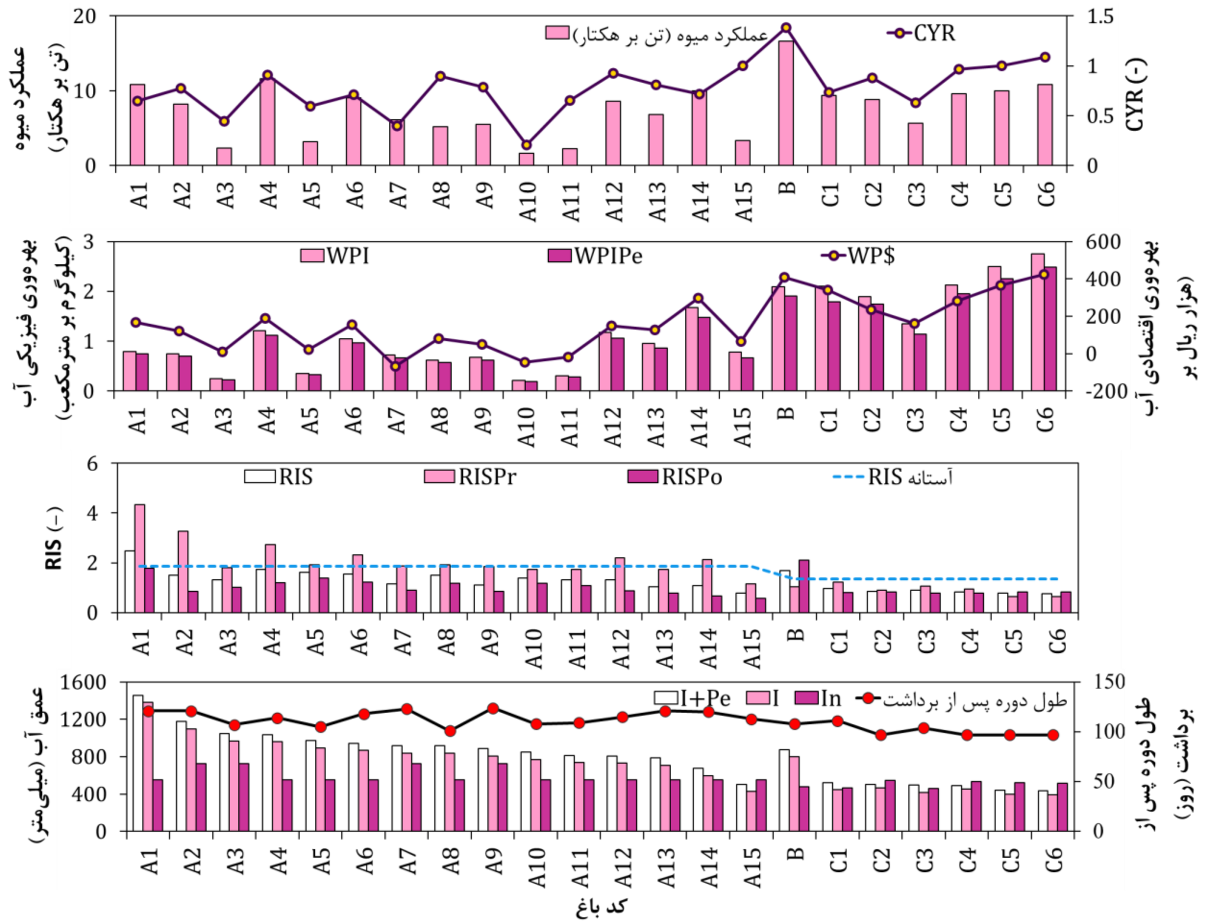
مقادیر I_n، I (جدول ۱) و تعداد نوبت‌های آبیاری به‌عنوان تابعی از مراحل چهارگانه رشد گیاه (آلن و همکاران، ۱۹۹۸) به‌تفکیک باغ‌های مطالعاتی در شکل ۵ و مقادیر فصلی I و نمایه‌های ارزیابی عملکرد آبیاری در شکل ۶ نشان داده شده است. بر اساس شکل ۵ ، برآوردهای I_n در طول مرحله میانی رشد گیاه به حداکثر مقدار خود رسیده و اساساً، این مرحله بخش عمده (با میانگین ۸۰ درصد) مقدار فصلی I_n را خود اختصاص داده است. این امر موجب گردیده است که بخش عمده تعداد نوبت‌های آبیاری اعمال‌شده (۵۵ تا ۸۳ درصد) و آب کاربردی فصلی (۵۳ تا

۸۶ درصد) به این مرحله اختصاص یابد (شکل ۵). به‌طور میانگین، مراحل اول تا چهارم رشد گیاه به‌ترتیب، ۷، ۱۵، ۶۹ و ۹ درصد از آب کاربردی فصلی در باغ‌های مطالعاتی را به‌خود اختصاص دادند. همچنین، ۱۰ باغ از ۲۲ باغ مطالعاتی در مرحله اول یا چهارم رشد گیاه آبیاری نشدند (شکل ۵).

مشابه دیگر درختان میوه هسته‌دار، مرحله گلدهی درختان گیلاس بلافاصله پس از آغاز رشد رویشی گیاه در اوایل بهار واقع می‌شود (فلور، ۱۹۹۴). معمولاً، در این مرحله، خاک از سطح مطلوبی از ذخیره رطوبتی برخوردار است و بروز درجه‌ای از تنش آبی که رشد اولیه میوه و پوشش گیاهی را متأثر کند، شایع نیست؛ بنابراین، در شرایط خاک‌های عمیق و در دوره‌هایی با سطح پایین تبخیر-تعرق گیاه، امکان اعمال کم‌آبیاری بدون وارد شدن تنش آبی وجود دارد (مارسال، ۲۰۱۲). بر این اساس، اعمال نوبت‌های آبیاری معدود به‌ویژه در مرحله نخست رشد گیاه در باغ‌های مطالعاتی (شکل ۵) منطقی به‌نظر می‌رسد. ضریب تغییرات مربوط به تعداد کل نوبت‌های آبیاری اعمال‌شده در باغ‌های با سامانه آبیاری قطره‌ای (۵۴ درصد) به‌طور قابل توجهی بالاتر از باغ‌های با سامانه آبیاری سطحی (۲۶ درصد) بود. این امر بیانگر مشهودتر بودن تفاوت در مدیریت آبیاری اعمال شده در باغ‌های با سامانه آبیاری قطره‌ای نسبت به باغ‌های با سامانه‌های آبیاری سطحی است. از سوی دیگر، افزایش تعداد نوبت‌های آبیاری قطره‌ای لزوماً، به افزایش آب کاربردی فصلی منجر نشده است (شکل ۵). این امر بیانگر قابلیت انعطاف‌پذیری سامانه‌های آبیاری قطره‌ای به‌لحاظ انطباق هرچه بیشتر مدیریت آبیاری با شرایط فیزیکی و مدیریتی مختص به باغ است.



شکل ۵- مقایسه مقادیر نیاز آبی خالص، نمایه RIS، آب کاربردی و تعداد نوبت‌های آبیاری در هریک از باغ‌های مطالعاتی به‌عنوان تابعی از مرحله رشد گیاه. باغ‌های با سامانه‌های آبیاری سطحی، ترکیبی سطحی-قطره‌ای و قطره‌ای به‌ترتیب، با کدهای A، B و C مشخص شده است. باغ‌های A3، A5، A7 و A10 متحمل خسارت شدید سرمازدگی بودند



شکل ۶- مقادیر فصلی I، I+Pe و In، عملکرد میوه و نمایه‌های ارزیابی عملکرد آبیاری در باغ‌های مطالعاتی. باغ‌های با سامانه‌های آبیاری سطحی، ترکیبی سطحی-قطره‌ای و قطره‌ای به‌ترتیب، با کدهای A، B و C مشخص شده است. باغ‌های A3، A5، A7 و A10 متحمل خسارت شدید سرمازدگی بودند

میانگین مقادیر فصلی I، $I + P_e$ و عملکرد میوه به‌همراه نمایه‌های ارزیابی عملکرد آبیاری به‌عنوان تابعی از معیارهای مختلف گروه‌بندی داده‌ها در جدول ۴ ارائه شده است. نمایه RRS بیانگر سهم بارش مؤثر در برآورده ساختن نیاز آبی گیاه است (جدول ۱). بر اساس این نمایه، سهم بارش مؤثر در تأمین نیاز آبی درختان گیلاس در منطقه مشگین‌شهر (۰/۱۲) به‌طور معنی‌داری بالاتر از مقدار نظیر آن در منطقه پارس‌آباد (۰/۰۶) بود (جدول ۴). با استفاده از نمایه RIS، درجه انطباق آب آبیاری کاربردی با نیاز آبی خالص مورد ارزیابی قرار می‌گیرد (جدول ۱). مقدار نمایه RIS با میانگین وزنی ۰/۹۷، بین ۰/۷۶ تا ۲/۴۹ متغیر بود (جدول ۴). از سوی دیگر، اختلاف میانگین نمایه RIS در باغ‌های مطالعاتی با مقدار میانگین گزارش‌شده برای این نمایه در باغ‌های گیلاس واقع در حوضه ابرو در کشور اسپانیا (سالوادور و همکاران، ۲۰۱۱) (به‌ترتیب، ۱/۲۶ و ۱/۰۸) به‌لحاظ آماری معنی‌دار نبود. این نتیجه بیانگر، تناسب نسبتاً مشابه بین مقادیر فصلی I و I_n در این دو منطقه است.

جدول ۴- مقایسه میانگین نمایه‌های ارزیابی عملکرد آبیاری به‌عنوان تابعی از معیارهای مختلف گروه‌بندی داده‌ها [*]

معیار گروه‌بندی داده‌ها	شرح	I (mm)	$I + P_e$ (mm)	RRS (-)	RIS (-)	RIS_{Pr} (-)	RIS_{Po} (-)	Y (ton ha^{-1})	CYR (–)	WP_I (kg m^{-3})	WP_{I+Pe} (kg m^{-3})	$WP_\$ \times 10^3$ (Rial m^{-3})
منطقه	پارس‌آباد	427^a	469^a	0.06^b	0.81^a	0.78^a	0.82^a	9.81^a	0.98^a	2.32^a	2.11^a	326.36^a
	مشگین‌شهر	794^b	871^b	0.12^a	1.36^b	2.00^b	1.07^a	7.02^a	0.73^b	0.95^b	0.85^b	123.11^b
سطح تحصیلات بهره‌برداران	زیر دیپلم	855^b	932^b	0.12^a	1.46^a	2.28^a	1.08^a	6.24^a	0.68^a	0.74^b	0.67^b	81.37^b
	دیپلم و بالاتر	621^a	687^a	0.09^b	1.09^a	1.36^a	0.98^a	8.61^a	0.86^a	1.58^a	1.42^a	225.64^a
سطح مهارت بهره‌برداران	معمولی	814^b	892^b	0.11^a	1.38^a	2.05^a	1.08^a	6.89^a	0.73^a	0.88^b	0.80^b	110.34^b
	پیشرو	431^a	480^a	0.07^b	0.84^a	0.87^a	0.82^a	9.72^a	0.93^a	2.27^a	2.04^a	329.13^a
سطح زیر کشت باغ	کوچک‌تر از ۲ هکتار	794^b	871^b	0.12^a	1.36^a	2.00^a	1.07^a	7.02^a	0.73^a	0.95^b	0.85^b	123.11^b
	بزرگ‌تر از ۲ هکتار	427^a	469^a	0.06^b	0.81^a	0.78^a	0.82^a	9.81^a	0.98^a	2.32^a	2.11^a	326.36^a
سن درختان	کمتر از ۵ سال	754^a	831^a	0.12^a	1.36^a	1.73^a	1.12^a	1.93^b	0.43^b	0.26^b	0.23^b	-32.02^b
	۵ تا ۱۰ سال	748^a	826^a	0.11^a	1.19^a	1.82^a	0.92^a	5.97^b	0.69^b	0.90^b	0.80^b	98.41^b
	بیش از ۱۰ سال	701^a	764^a	0.1^a	1.3^a	1.75^a	1.11^a	1.22^a	0.94^a	1.68^a	1.53^a	260.14^a
منبع تأمین آب آبیاری	سطحی	548^a	608^a	0.08^b	0.92^a	1.27^a	0.78^a	8.03^a	0.85^a	1.64^a	1.48^a	206.43^a
	زیرزمینی	587^a	663^a	0.12^a	1.16^a	1.40^{ab}	1.00^a	6.08^a	0.65^a	1.27^{ab}	1.09^{ab}	174.26^a
	ترکیبی	896^b	973^b	0.12^a	1.53^b	2.25^b	1.21^a	7.57^a	0.76^a	0.85^b	0.78^b	122.48^a
سامانه آبیاری	سطحی	836^b	913^b	0.11^a	1.36^b	2.19^b	0.99^a	6.34^a	0.71^a	0.78^b	0.71^b	86.79^b
	قطره‌ای	542^a	601^a	0.09^b	1.03^a	1.21^a	0.94^a	8.32^a	0.83^a	1.77^a	1.58^a	248.02^a
	ترکیبی	798	874	0.12	1.68	1.04	2.10^a	1.67	1.38	2.09	1.91	408.99
خسارت سرمازدگی	بدون خسارت شدید	696^a	765^a	0.1^a	1.23^a	1.77^a	1.00^a	8.47^a	0.86^a	1.38^a	1.24^a	200.26^a
	خسارت شدید	868^a	946^a	0.11^a	1.37^a	1.83^a	1.12^a	3.32^b	0.41^b	0.38^b	0.35^b	-20.79^b
کل مجموعه داده	حداقل	394	436	0.06	0.76	0.64	0.56	1.60	0.21	0.21	0.19	-68.46
	حداکثر	1381	1457	0.12	2.49	4.33	2.10	1.67	1.38	2.75	2.49	423.43
	میانگین حسابی	727	798	0.1	1.26	1.78	1.02	7.53	0.78	1.20	1.08	160.07
	میانگین وزنی	531	583	0.08	0.97	1.10	0.91	9.03	0.92	1.94	1.76	274.38
	CV	36	33	23	33	49	35	49	32	64	63	91

[*] در این جدول، میانگین‌های با حروف مشابه در هر گروه داده، فاقد تفاوت معنی‌دار آماری (بر اساس آزمون LSD در سطح $P < 0.05$) می‌باشند. CV بیانگر ضریب تغییرات (درصد) و RIS_{Po} و RIS_{Pr} به‌ترتیب، بیانگر مقدار نمایه RIS در دوره قبل و پس از برداشت میوه است. در این جدول از سطح زیر کشت واقعی باغ‌های مطالعاتی به‌عنوان عامل وزن‌دهی در محاسبات میانگین وزنی استفاده شده است

ازآنجاکه مقدار راندمان آبیاری (نسبت عمق آب افزوده‌شده به ذخیره ناحیه ریشه در اثر آبیاری به عمق آب کاربردی) در شرایط واقعی همواره پایین‌تر از ۱۰۰ درصد است، RIS = ۱ نمی‌تواند مؤید برآورده ساختن کامل I_n در باغ باشد. چراکه در شرایط واقعی، سهم جریان برگشتی از آب کاربردی همواره یک مقدار غیرصفر است؛ بنابراین، با لحاظ کردن راندمان آبیاری در تحلیل مقادیر نمایه RIS می‌توان درجه انطباق I با I_n را به‌طور واقع‌بینانه‌تری مورد بررسی قرار داد. عباسی و همکاران (۱۳۹۵) میانگین راندمان آبیاری در روش‌های آبیاری سطحی و قطره‌ای در ایران را به‌ترتیب، ۵۳/۶ و ۷۴/۲ درصد گزارش کردند. بر این اساس، می‌توان گفت که حصول مقادیر بزرگ‌تر از ۱/۸۷ و ۱/۳۵ برای نمایه RIS به‌ترتیب، در روش‌های آبیاری سطحی و قطره‌ای می‌تواند بیانگر وقوع آبیاری بیش از حد نیاز گیاه باشد و بالعکس.

بر این اساس و با توجه به شکل ۵، می‌توان گفت که طی ابتدایی، توسعه‌ای، میانی و انتهایی رشد گیاه به‌ترتیب، در ۸، ۵، ۲۲ و ۱۷ باغ درجات مختلفی از

کم‌آبیاری اعمال شده و سایر باغ‌ها طی مراحل چهارگانه فوق بیش‌آبیاری را تجربه کرده‌اند؛ بنابراین، در اکثر باغ‌های مطالعاتی، وقوع بیش‌آبیاری در مراحل اول و دوم رشد گیاه تجربه‌شده و علی‌رغم تمرکز رویدادهای آبیاری در مرحله میانی رشد گیاه، تمامی باغ‌های مطالعاتی در این مرحله، درجات مختلفی از کم‌آبیاری را تجربه کرده‌اند. بر اساس نمایه‌های RIS_{Pr} و RIS_{Po} (شکل ۶) که طی دوره‌های قبل و پس از برداشت میوه به‌ترتیب، در ۱۳ و ۲۱ باغ درجات مختلفی از کم‌آبیاری تجربه شده است. دوره پس از برداشت میوه در باغ‌های مطالعاتی، بین ۵۲ تا ۶۳ درصد از طول دوره رشد گیاه را به خود اختصاص داد (شکل ۶). طولانی بودن دوره پس از برداشت میوه و مقارن شدن بخش عمده این دوره با مرحله سوم رشد گیاه موجب شد که بخش بیشتری از آب کاربردی فصلی در باغ‌های مطالعاتی به این دوره اختصاص یابد. به‌گونه‌ای که میانگین سهم آب کاربردی طی دوره‌های قبل و پس از برداشت میوه در باغ‌های مطالعاتی به‌ترتیب، معادل با ۴۰ و ۶۰ درصد از کل آب کاربردی فصلی بود.

بر اساس میانگین نمایه‌های RIS_{Pr} و RIS_{Po} (به‌ترتیب، ۱/۷۸ و ۱/۰۲)، باغ‌های مطالعاتی طی دوره پس از برداشت میوه، به‌طور معنی‌داری ($P < 0.05$) درجه بالاتری از کم‌آبیاری را نسبت به دوره قبل از برداشت میوه تجربه کرده‌اند. به‌عبارت‌دیگر، از دیدگاه درجه انطباق آب کاربردی با نیاز آبی خالص، مدیریت آبیاری اعمال‌شده در باغ‌های مطالعاتی، طی دوره‌های قبل و پس از برداشت میوه از تفاوت معنی‌داری با یکدیگر برخوردار بوده است.

اساساً، هر سه مرحله رشد میوه گیلاس (شامل تشکیل سلول‌های میوه، سفت شدن هسته و آماس سلول‌های میوه از طریق جذب آب) از حساسیت بالایی نسبت به تنش آبی برخوردار هستند و بنابراین، اعمال تنش آبی طی این سه مرحله توصیه نشده است (مارسال و همکاران، ۲۰۰۹). از این‌رو، در عمل، کم‌آبیاری در دوره قبل از برداشت میوه گیلاس به‌ندرت اعمال می‌شود. چراکه این امر، علاوه بر کاهش اندازه میوه (بلانکو و همکاران، ۲۰۱۹)، می‌تواند موجب افزایش ترک‌خوردگی پوسته میوه (در صورت کاهش تنش آبی در مراحل انتهایی رشد میوه) نیز بشود (سکسه، ۱۹۹۵).

از این رو، اعمال مدیریت کم‌آبیاری تنظیم‌شده در دوره پس از برداشت میوه گیلاس نسبت به دوره قبل از برداشت رایج‌تر بوده و اعمال آن، راهکاری مؤثر برای کنترل رشد رویشی مفرط درخت (به‌دلیل کاهش تبخیر-تعرق واقعی در اثر تنش آبی وارده به گیاه) محسوب می‌شود (مارسال، ۲۰۱۲). چراکه درختان گیلاس از رشد رویشی سالانه قابل‌توجهی برخوردار بوده و میزان رشد سالانه شاخه‌ها در درختان جوان می‌تواند از یک متر نیز فراتر رود (فلور، ۱۹۹۴). تا جایی که به‌منظور توزیع مناسب نور خورشید در سرتاسر شاخ و برگ درخت، هرس دوره‌ای درختان ضرورت می‌یابد. از سوی دیگر، این دوره مقارن با تشکیل جوانه‌های زایشی و ذخیره کربوهیدراتی گیاه است که تشکیل میوه در فصل آتی به آن وابسته است (مارسال، ۲۰۱۲). درجه این وابستگی در درختان میوه‌ای نظیر گیلاس که در آن جوانه‌های زایشی زودتر از جوانه‌های رویشی رشد می‌کنند، بیشتر است (بلانکو و همکاران، ۲۰۱۹).

در این رابطه، نتایج یک مطالعه سه‌ساله در منطقه توررنته د سینکا[1] در کشور اسپانیا (مارسال و همکاران، ۲۰۱۰) نشان داد درصورتی‌که تنش آبی وارده به درخت طی دوره پس از برداشت به‌گونه‌ای مدیریت شود که پتانسیل آب تنه درخت در میانه روز، بالای ۱/۵- مگاپاسکال حفظ شود، بدون اثرات منفی معنی‌دار بر کمیت و کیفیت میوه، به مقدار قابل‌توجهی (تا ۴۵ درصد) در آب آبیاری کاربردی در دوره پس از برداشت صرفه‌جویی خواهد شد. نتایج مطالعه‌ای دیگر در منطقه خومییا، مورسیا در کشور اسپانیا، نشان داد که اعمال کم‌آبیاری در دوره پس برداشت میوه، کاهش ۱۶ تا ۳۰ درصدی آب کاربردی نسبت به تیمار شاهد را به‌دنبال داشت (بلانکو و همکاران، ۲۰۱۹). همین‌طور، نتایج یک پژوهش دوساله در منطقه تنو[2]

1- Torrente de Cinca

2- Teno

در کشور شیلی (کاراسکو-بناویدس و همکاران، ۲۰۲۰) نشان داد که کاهش ۵۰ درصدی آب کاربردی طی دوره پس از برداشت نسبت به تیمار شاهد، بدون متأثر ساختن معنی‌دار کمیت و کیفیت میوه گیلاس، کاهش ۲۰ درصدی مقدار فصلی آب کاربردی را به‌همراه خواهد داشت.

بر اساس جدول ۴، میانگین آب کاربردی فصلی در سامانه‌های آبیاری قطره‌ای به‌طور معنی‌داری پایین‌تر از مقدار نظیر آن در سامانه‌های آبیاری سطحی بوده و درعین‌حال، باغ‌های با روش آبیاری قطره‌ای (با میانگین نمایه RIS برابر با ۱/۰۳) به‌طور غیرمعنی‌داری، درجه بالاتری از کم‌آبیاری را نسبت به باغ‌های با روش آبیاری سطحی (با میانگین نمایه RIS برابر با ۱/۳۶) تجربه کرده‌اند. همچنین، کاربرد سامانه‌های آبیاری قطره‌ای موجب افزایش معنی‌دار نمایه‌های بهره‌وری آب نسبت به سامانه‌های آبیاری سطحی شد. از سوی دیگر، فراوانی بیشتر کاربرد سامانه‌های آبیاری قطره‌ای در منطقه پارس‌آباد (در مقایسه با منطقه مشگین‌شهر)، باغ‌های با مساحت بزرگ‌تر از دو هکتار، باغ‌های با منبع آب سطحی/زیرزمینی (نسبت به باغ‌های با منبع تأمین آب ترکیبی) و رواج بیشتر به‌کارگیری این سامانه‌های آبیاری در بین بهره‌برداران با سطح تحصیلات بالاتر و بهره‌برداران پیشرو موجب شد که این روند در مورد گروه داده‌های فوق نیز صادق باشد (جدول ۴). همچنین، سطح حداکثری نمایه‌های بهره‌وری آب به باغ‌های با سامانه‌های آبیاری قطره‌ای تعلق داشت (باغ C6،شکل ۶). این نتایج بیانگر قابلیت روش‌های نوین آبیاری در بهبود نمایه‌های WP_I و WP_{I+Pe} است که در پژوهش‌های مشابه پیشین نیز مورد اشاره قرار گرفته است (سالوادور و همکاران، ۲۰۱۱؛ مورنو-پرز و رولدان کاناس، ۲۰۱۳؛ لیائو و همکاران، ۲۰۱۹). همچنین، مقدار نمایه WP_I در باغ‌های مطالعاتی به‌طور معنی‌داری ($P < 0.01$) بالاتر از مقدار نظیر گزارش شده توسط محمودی و همکاران (۱۴۰۱) (۰/۹۹ کیلوگرم بر مترمکعب) بود.

طی سال‌های اخیر، محدودیت دسترسی به آب در منطقه مشگین‌شهر، موجب عدم کفایت آب تحویلی برای آبیاری سطحی برخی باغ‌ها شده است که درختان آن‌ها بر اساس روش آبیاری سطحی رشد و توسعه‌یافته‌اند. در سازگاری با این شرایط، برخی بهره‌برداران، کاربرد روش آبیاری ترکیبی سطحی-قطره‌ای را مد نظر قرار داده‌اند. به‌گونه‌ای که در دوره‌های مصادف با محدودیت دسترسی به آب (که از اواسط بهار تا اواخر فصل رشد درختان را در برمی‌گیرد)، آبیاری باغ به‌روش قطره‌ای انجام‌شده و در صورت کفایت آب تحویلی، باغ به روش سطحی آبیاری می‌شود. بااین‌حال، نگرانی از وارد شدن تنش آبی به درختان باغ به‌دلیل خیس شدن جزئی سطح باغ در آبیاری قطره‌ای، موجب تمایل بهره‌برداران این باغ‌ها به اعمال آبیاری بی‌رویه گردیده است. اثر این امر بر مقادیر نمایه RIS مربوط به باغ B (با روش آبیاری ترکیبی سطحی-قطره‌ای) در شکل ۵ و شکل ۶ مشهود است. مقادیر این نمایه، حاکی از ضعفی مشهود در مدیریت آبیاری این باغ به‌لحاظ درجه تناسب آب کاربردی با نیاز آبی خالص است. در مقایسه با باغ‌های خردمقیاس (مساحت کم‌تر از دو هکتار)، باغ‌های با مساحت بیش از دو هکتار، دارای سطح پایین‌تری از نمایه های RIS، RIS_{Pr}، RIS_{Po} و سطح بالاتری از نمایه‌های بهره‌وری آب بودند (جدول ۴). در این رابطه، نتایج مشابهی توسط مورنو-پرز و رولدان کاناس (۲۰۱۳) گزارش شده است. دلیل این امر را می‌توان به اهمیت کاربرد روش‌های نوین آبیاری و مدیریت بهینه آب آبیاری در باغ‌های وسیع در مدیریت حجم عملیات بهره‌برداری و اقتصاد تولید نسبت داد.

بر اساس جدول ۴، اثر منطقه، منبع تأمین آب آبیاری و روش آبیاری بر نمایه‌های RIS و RIS_{Pr} معنی‌دار بوده و اثر هیچ‌یک از عوامل مورد استفاده در گروه‌بندی داده‌ها بر نمایه RIS_{Po} معنی‌دار نبوده است. همان‌طور که در این جدول ملاحظه می‌شود، علی‌رغم بالاتر بودن نیاز آبی خالص گیلاس در منطقه پارس‌آباد نسبت به منطقه مشگین‌شهر، مقادیر نمایه‌های RIS و RIS_{Pr} در منطقه پارس‌آباد به‌طور معنی‌داری پایین‌تر از مقدار آن‌ها در منطقه مشگین‌شهر بوده است. دلیل این امر، ناشی از زه‌دار بودن

اراضی باغ‌های مطالعاتی در منطقه پارس‌آباد (به‌دلیل نشت از کانال آبیاری درجه یک واقع در مجاورت این باغ‌ها) و لزوم انطباق مدیریت آبیاری با این شرایط است.

همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، مقادیر نمایه RIS_{Pr} در باغ‌های با منبع تأمین آب ترکیبی (سطحی و زیرزمینی) به‌طور معنی‌داری بالاتر از مقدار آن در باغ‌های با منبع تأمین آب زیرزمینی بوده است. دلیل اصلی این امر، ناشی از محدودیت این باغ‌ها به‌لحاظ دسترسی به یک منبع تأمین آب مطمئن در طول فصل بود. به‌گونه‌ای که این محدودیت موجب اعمال آبیاری با عمق آب کاربردی حداکثری به‌منظور حفاظت از باغ در برابر دوره‌های کم‌آبی غیرقابل پیش‌بینی آتی شد.

به‌جز در مورد معیارهای گروه‌بندی داده‌ها بر اساس منطقه، سن درختان و خسارت سرمازدگی، اثر هیچ یک از معیارهای دیگر بر عملکرد میوه معنی‌دار نبود (جدول ۴). در خصوص عدم اثر معنی‌دار سامانه‌های آبیاری بر عملکرد میوه، نتایج مشابهی نیز توسط بولاند و همکاران (۲۰۰۶) در ارزیابی مدیریت آبیاری اعمال‌شده در شرایط واقعی بهره‌برداری از باغ‌های میوه استرالیا گزارش شده است. به‌نظر می‌رسد که دلیل این امر ناشی از الگوی مشابه مدیریت آبیاری اعمال‌شده در باغ‌های مطالعاتی باشد؛ زیرا همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، به‌نظر می‌رسد که با متمرکز شدن نوبت‌های آبیاری در مرحله میانی رشد گیاه در تمامی باغ‌های مطالعاتی، عملکرد میوه فاقد حساسیتی معنی‌دار نسبت به نوع سامانه آبیاری شده است. بر اساس شکل ۶، حداکثر عملکرد میوه مشاهداتی در بین باغ‌های مورد مطالعه به باغ‌های با آبیاری ترکیبی سطحی–قطره‌ای (باغ B با عملکرد میوه ۱۶/۶۷ تن بر هکتار) و آبیاری سطحی (باغ A4 با عملکرد میوه ۱۱/۶۰ تن بر هکتار) تعلق داشت.

بر اساس جدول ۴، سن درختان باغ دارای اثری معنی‌دار بر عملکرد میوه، نمایه CYR و نمایه‌های بهره‌وری آب بوده است. باغ‌های مطالعاتی با درختان مسن‌تر (در مقایسه با باغ‌های با درختان جوان‌تر) دارای درختان تنومندتر و شاخه‌های توسعه یافته‌تری بودند. طبعاً، این امر موجب افزایش فراوانی شاخه‌های بارور و لذا، عملکرد میوه خواهد شد. از سوی دیگر، میانگین عملکرد میوه در باغ‌های مطالعاتی در منطقه مشگین‌شهر (۷/۰۲ تن بر هکتار) به‌طور معنی‌داری ($P < 0.05$) پایین‌تر از میانگین عملکرد گیلاس در سطح کشور (۹/۳۶ تن بر هکتار) (بی‌نام، ۱۴۰۲) و به‌طور غیرمعنی‌داری بالاتر از مقدار میانگین جهانی آن (۶/۰۸ تن بر هکتار) (فائواستات، ۲۰۲۴) است. میانگین عملکرد میوه در باغ‌های مطالعاتی در منطقه پارس‌آباد (۹/۸۱ تن بر هکتار) به‌طور غیرمعنی‌داری بالاتر از میانگین عملکرد گیلاس در سطح کشور و به‌طور معنی‌داری بالاتر از مقدار میانگین جهانی آن است. بااین‌حال، عملکرد مورد انتظار میوه گیلاس (ترم $\hat{Y}$ در جدول ۱) در مناطق پارس‌آباد و مشگین‌شهر (به‌ترتیب، ۹/۹۸ و ۹/۵۴ تن بر هکتار) از اختلاف معنی‌داری با یکدیگر برخوردار نبودند. بر اساس جدول ۴، میانگین نمایه CYR در باغ‌های منطقه مشگین‌شهر به‌طور معنی‌داری پایین‌تر از مقدار آن در منطقه پارس‌آباد بوده است. همین‌طور، عملکرد میوه در باغ‌های منطقه مشگین‌شهر در سال زراعی مطالعاتی به‌طور معنی‌داری ($P < 0.05$) پایین‌تر از سطح مورد انتظار آن (ترم $\hat{Y}$ در جدول ۱) بود. دلیل اصلی این امر ناشی بروز درجات مختلفی از خسارت سرمازدگی در باغ‌های مطالعاتی در منطقه مشگین‌شهر طی دوره مطالعاتی بود. بر اساس شکل ۲–ب، دمای حداقل روزانه در منطقه مشگین‌شهر در روزهای ۲۱ تا ۲۶ فروردین‌ماه (مصادف با مراحل اولیه تشکیل میوه) در دامنه ۱۲– تا ۲/۸– درجه سانتی‌گراد قرار داشته است. کاهش دمای هوا به پایین‌تر از ۲– درجه سانتی‌گراد، طی مراحل اولیه تشکیل میوه گیلاس، موجب خسارت سرمازدگی و افت عملکرد میوه به‌دلیل ریزش شکوفه‌ها و/یا ریزش میوه‌ها قبل از مرحله رسیدگی خواهد شد (وندن و همکاران، ۲۰۱۷). بالطبع، بسته به خرداقلیم حاکم بر هریک از باغ‌های مطالعاتی، رقم درخت و تمهیدات اتخاذی بهره‌بردار در حفاظت از درختان در برابر سرمازدگی، درجات مختلفی از خسارت سرمازدگی

بروز کرده است. این امر، علاوه بر افت عملکرد میوه، موجب شدت یافتن تغییرپذیری آن در بین باغ‌های مطالعاتی در منطقه مشگین‌شهر (با ضریب تغییرات ۵۶ درصدی) نسبت به منطقه پارس‌آباد (با ضریب تغییرات نه درصدی) شد. همان‌طور که در جدول ۴ نیز مشاهده می‌شود، بروز خسارت شدید سرمازدگی موجب کاهش ۶۱ درصدی عملکرد میوه و کاهش ۷۲ درصدی نمایه‌های WP_I و WP_{I+Pe} در مقایسه با باغ‌های فاقد خسارت شدید و تحمیل زیان اقتصادی به بهره‌برداران این گروه از باغ‌ها شده است. همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، اثر بروز خسارت شدید سرمازدگی بر آب کاربردی و نمایه RIS معنی‌دار نبوده است. به‌عبارت‌دیگر، مدیریت آبیاری اعمال‌شده در باغ‌های با خسارت شدید سرمازدگی از اختلاف معنی‌داری با باغ‌های فاقد خسارت شدید برخوردار نبوده است. از میان نمایه‌های ارزیابی مدیریت آبیاری مورد بررسی در این پژوهش (جدول ۴)، نمایه‌های بهره‌وری آب دارای بالاترین تغییرپذیری بودند که این نتیجه با یافته‌های پژوهش‌های پیشین (سالوادور و همکاران، ۲۰۱۱) مطابقت دارد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، آب کاربردی و نمایه‌های ارزیابی عملکرد آبیاری گیلاس در شهرستان‌های پارس‌آباد و مشگین‌شهر واقع در استان اردبیل از طریق پایش مدیریت بهره‌برداری در ۲۲ باغ منتخب در فصل زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ مورد ارزیابی قرار گرفت. وقوع آبیاری بی‌رویه در مراحل ابتدایی و توسعه‌ای رشد گیاه نسبت به مراحل میانی و انتهایی شایع‌تر بود و اکثر باغ‌های مطالعاتی در مراحل میانی و پایانی رشد گیاه، درجات مختلفی از کم‌آبیاری را تجربه کردند. این نتایج حاکی از وجود ضعف در انطباق مدیریت آبیاری اعمال‌شده در باغ‌های مطالعاتی با نیاز آبی خالص گیاه است.

بررسی پژوهش‌های مرتبط گذشته حاکی آن بود که اعمال مدیریت کم‌آبیاری تنظیم‌شده در دوره پس برداشت میوه گیلاس، بدون متأثر ساختن معنی‌دار کمیت و کیفیت میوه و ضمن کاهش آب کاربردی، موجب صرفه‌جویی واقعی در مصرف آب، صرفه‌جویی در مصرف انرژی (در مورد سامانه‌های آبیاری تحت‌فشار) و کاهش هزینه‌های تولید خواهد شد؛ بنابراین، اعمال مدیریت کم‌آبیاری تنظیم‌شده در دوره پس از برداشت میوه گیلاس راهکاری مؤثر در بهبود مدیریت آبیاری گیلاس در منطقه مطالعاتی به‌نظر می‌رسد. نتایج نشان داد که مدیریت آبیاری اعمال‌شده در باغ‌های مطالعاتی، طی دوره‌های قبل و پس از برداشت میوه از تفاوت معنی‌داری با یکدیگر برخوردار بود. با این وجود، اثر هیچ‌یک از عوامل مورد بررسی در این پژوهش (شامل منطقه، سطح تحصیلات و مهارت بهره‌بردار، سطح زیر کشت باغ، نوع منبع تأمین آب آبیاری، سن درختان، نوع سامانه آبیاری، خسارت سرمازدگی) منجر به یک بهبود معنی‌دار در انطباق مدیریت آبیاری اعمال‌شده در باغ‌های مطالعاتی با نیاز گیاه طی دوره پس از برداشت میوه نشد. در این رابطه، تقویت دانش فنی بهره‌برداران از طریق فعالیت‌های ترویجی و نیز پشتیبانی آن‌ها از طریق گونه‌های ساده و کارآمدی از فن‌آوری آبیاری هوشمند در بهبود مدیریت آبیاری گیلاس در منطقه مطالعاتی حائز اهمیت است. بروز درجات مختلفی از خسارت سرمازدگی در منطقه مشگین‌شهر موجب تفاوت معنی‌دار عملکرد میوه در فصل زراعی مورد بررسی با مقدار مورد انتظار آن و نیز شدت یافتن تغییرپذیری عملکرد میوه در بین باغ‌های مطالعاتی شد؛ بنابراین، در دسترس قرار گرفتن یک سامانه هشدار سرمازدگی کارآمد و آشنایی بهره‌برداران با روش‌های مدیریت سرمازدگی از اهمیت قابل توجهی در کاهش خسارات ناشی از سرمازدگی و بهبود نمایه‌های بهره‌وری آب در این منطقه برخوردار است. نتایج این پژوهش حاکی از عدم وجود تفاوت معنی‌دار بین سطح مورد انتظار عملکرد میوه گیلاس در مناطق پارس‌آباد و مشگین‌شهر و همچنین، پایین‌تر بودن نیاز آبی خالص گیلاس در منطقه مشگین‌شهر نسبت به منطقه پارس‌آباد بود؛ بنابراین، از دیدگاه میزان آب مصرفی فصلی، تولید گیلاس

در منطقه مشگین‌شهر از مزیت نسبی برخوردار است. تفاوت در جزئیات روش‌شناسی محاسبات نیاز آبی خالص و بارش مؤثر یکی از منابع بروز اختلاف در تحلیل‌های ارزیابی مدیریت آبیاری است. نظر به قابلیت سامانه نیاز آب در ارائه برآوردهای بارش مؤثر و نیاز آبی خالص گیاهان مختلف بر اساس یک روش‌شناسی استاندارد، مبنا قرار دادن برآوردهای این سامانه برای کمی‌سازی نمایه‌های ارزیابی عملکرد آبیاری در کشور راهکاری مؤثر در جهت اجتناب از بروز تناقض‌های احتمالی است. افزودن قابلیت‌های اضافی در این سامانه، برای برآورد نیاز آبی گیاهان در شرایط وقوع سرمازدگی کشنده و وجود پوشش گیاهی فعال بر روی سطح خاک در باغ‌ها قابل پیشنهاد است. همین‌طور، ارائه جزئیات کامل از روش‌شناسی لحاظ شده در این سامانه، موجب تسهیل در سازگاری یافتن روش‌شناسی اتخاذی پژوهشگران برای برآورد نیاز آبی گیاهان در کاربردهای مختلف خواهد شد.

تشکر و قدردانی

پژوهش حاضر بر اساس نتایج پروژه پژوهشی موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی در استان اردبیل (با شماره مصوب ۰۱۴-۴۳-۱۴-۰۵۷-۹۵۰۴۶-۹۹۰۹۵۳) تدوین شده است. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از بهره‌برداران باغ‌های مطالعاتی و کارشناسان محترم مدیریت جهاد کشاورزی در شهرستان‌های پارس‌آباد و مشگین‌شهر که در اجرای این پژوهش همکاری و مساعدت نمودند، صمیمانه تشکر و قدردانی کنند.

تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافعی وجود ندارد و این مسئله مورد تأیید نویسندگان مقاله است.

فهرست منابع

۱. اسلامی، امیر، ۱۳۹۵. ابزار اندازه‌گیری آب آبیاری در روش‌های آبیاری سطحی، نشریه فنی شماره ۴۴. موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی. ۲۴ ص.

۲. پرچمی عراقی، فرزین، میرلطیفی، سیدمجید، قربانی دشتکی، شجاع، وظیفه‌دوست، مجید، و صادقی لاری، عدنان. ۱۳۹۵. توسعه یک چارچوب ریزمقیاس‌سازی به‌منظور برآورد تبخیر-تعرق مرجع زیرروزانه: ۱- مقایسه عملکرد برخی مدل‌های ریزمقیاس‌سازی داده‌های هواشناسی روزانه. آب‌وخاک، ۳۰(۲)، صص. ۳۳۴-۳۵۴. **doi: 10.22067/jsw.v30i2.30628**

۳. تافته، آرش، و ابراهیمی پاک، نیازعلی و صمصامی پور، میترا. ۱۴۰۲. راهنمای استفاده از سامانه نیاز آب. موسسه تحقیقات خاک و آب کشور. نشریه فنی ۶۲۹. موسسه تحقیقات خاک و آب، کرج. ۶۰ ص.

۴. عباسی، فریبرز، سهراب، فرحناز، و عباسی، نادر، ۱۳۹۵. ارزیابی وضعیت راندمان آب آبیاری در ایران. تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی، ۱۷(۶۷)، صص. ۱۱۳-۱۲۰. **doi: 10.22092/aridse.2017.109617**

۵. محمودی، مریم ، اسدی، هرمز، زارع، شجاعت، زندی‌فر، کورش، و رسولی، ولی‌اله، ۱۴۰۱. تعیین بازدهی و بهره‌وری آب در تولید محصولات باغی در سامانه آبیاری قطره‌ای (مورد مطالعه: ایستگاه‌های تحقیقات باغبانی استان البرز). مجله تحقیقات آب‌وخاک ایران، ۵۳(۹)، صص. ۲۰۶۳-۲۰۷۱. **doi: 10.22059/ijswr.2022.336699.669171**

۶. بی‌نام. ۱۴۰۲. آمارنامه کشاورزی سال ۱۴۰۱-۱۴۰۰، جلد سوم: محصولات باغی، قارچ و گلخانه‌ای. وزارت جهاد کشاورزی، معاونت برنامه‌ریزی و اقتصادی، دفتر فناوری اطلاعات و ارتباطات، ۴۰۱ ص.

7. 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.

8. Anonymous, 2016. 2015 Agricultural Water Management Plan, Prepared for Nevada Irrigation District. Brown And Caldwell (Corporation), Rancho Cordova, CA, USA, 446 pp. (Available at: https://nidwater.specialdistrict.org/files/7c564e070/FINAL2015_Agricultural_Water_Mgmt_Plan_012916.pdf)
9. Andrés, R. and Cuchí, J.A., 2014. Analysis of sprinkler irrigation management in the LASESA district, Monegros (Spain). Agricultural Water Management, 131, pp. 95-107. **doi: 10.1016/j.agwat.2013.09.016**
10. Blanco, V., Torres-Sánchez, R., Blaya-Ros, P.J., Pérez-Pastor, A. and Domingo, R., 2019. Vegetative and reproductive response of 'Prime Giant'sweet cherry trees to regulated deficit irrigation. Scientia Horticulturae, 249, pp. 478-489. **doi: 10.1016/j.scienta.2019.02.016**
11. Boland, A.-M., Bewsell, D. and Kaine, G., 2006. Adoption of sustainable irrigation management practices by stone and pome fruit growers in the Goulburn/Murray Valleys, Australia. Irrigation Science, 24, pp. 137-145. **doi: 10.1007/s00271-005-0017-5**
12. Bos, M.G., Kselik, R.A.L., Allen, R.G. and Molden, D., 2008. Water requirements for irrigation and the environment. Springer, New York, USA.
13. Bos, M.G., Murray-Rust, D.H., Merrey, D.J., Johnson, H.G. and Snellen, W.B., 1994. Methodologies for assessing performance of irrigation and drainage management. Irrigation and drainage systems, 7, pp. 231-261. **doi: 10.1007/BF00881553**
14. Carrasco-Benavides, M., Espinoza Meza, S., Olguín-Cáceres, J., Muñoz-Concha, D., von Bennewitz, E., Ávila-Sánchez, C. and Ortega-Farías, S., 2020. Effects of regulated post-harvest irrigation strategies on yield, fruit quality and water productivity in a drip-irrigated cherry orchard. New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science, 48(2), pp. 97-116. **doi: 10.1080/01140671.2020.1721544**
15. Dattalo, P., 2008. Determining sample size: Balancing power, precision, and practicality. Oxford university press, New York, USA, 167 pp. **doi: 10.1093/acprof:oso/9780195315493.001.0001**
16. Food and Agriculture Organization Statistical Data (FAOSTAT). 2023. FAO Statistical Data. (Available at: http://faostat3.fao.org/faostat-gateway/go/to/home/E)
17. Flore, J.A., 1994. Stone fruit. In: Schaffer, B. and Andersen, P.C. (Eds.), Handbook of environmental physiology of fruit crops. Boca Raton, FL, USA, Boca Raton, FL, USA, pp. 233-270. **doi: 10.1201/9780203719299**
18. Keller, J. and Bliesner, R.D., 1990. Sprinkle and trickle irrigation. van Nostrand Reinhold, New York, USA, 652 pp.
19. Li, P., Cao, X., Tan, H., Wang, J., Ren, S. and Yang, P., 2020. Studies on water uptake and heat status of cherry root under water-saving measures. Agricultural Water Management, 242, pp. 106359. **doi: 10.1016/j.agwat.2020.106359**
20. Liao, R., Wu, W., Hu, Y., Xu, D., Huang, Q. and Wang, S., 2019. Micro-irrigation strategies to improve water-use efficiency of cherry trees in Northern China. Agricultural Water Management, 221, pp. 388-396. **doi: 10.1016/j.agwat.2019.05.017**
21. Loreti, F. and Massai, R., 2005. ´Castore´ And ´Polluce´: two new hybrid rootstocks for peach and nectarine. In: Infante, R. (Ed.), VI International Peach Symposium, 30 July 2006, Santiago, Chile. Acta Horticulturae, pp. 275-278. **doi: 10.17660/ActaHortic.2006.713.39**
22. Lorite, I.J., Mateos, L. and Fereres, E., 2004. Evaluating irrigation performance in a Mediterranean environment: II. Variability among crops and farmers. Irrigation Science, 23, pp. 85-92. **doi: 10.1007/s00271-004-0096-8**
23. Lorite, I.J., Santos, C., García-Vila, M., Carmona, M. and Fereres, E., 2013. Assessing irrigation scheme water use and farmers' performance using wireless telemetry systems. Computers and electronics in agriculture, 98, pp. 193-204. **doi: 10.1016/j.compag.2013.08.007**

24. Malano, H.M. and Burton, M., 2001. Guidelines for benchmarking performance in the irrigation and drainage sector. (International Programme for Technology and Research in Irrigation and Drainage). FAO, Rome, Italy, 44 pp.
25. Marsal, J., 2012. Sweet cherry. In: Steduto, P., Hsiao, T.C., Fereres, E. and Raes, D. (Eds.), Crop yield response to water. FAO Irrigation and drainage paper 66, Rome, Italy, pp. 450-456.
26. Marsal, J., Lopez, G., Arbones, A., Mata, M., Vallverdu, X. and Girona, J., 2009. Influence of post-harvest deficit irrigation and pre-harvest fruit thinning on sweet cherry (cv. New Star) fruit firmness and quality. The Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 84(3), pp. 273-278. **doi: 10.1080/14620316.2009.11512516**
27. Marsal, J., Lopez, G., Del Campo, J., Mata, M., Arbones, A. and Girona, J., 2010. Postharvest regulated deficit irrigation in ‘Summit’sweet cherry: fruit yield and quality in the following season. Irrigation science, 28, pp. 181-189. **doi: 10.1007/s00271-009-0174-z**
28. 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), pp. 297-313. **doi: 10.1007/s00271-017-0543-y**
29. Merriam, J.L. and Keller, J., 1978. Farm irrigation system evaluation: a guide for management, 3rd edition. Utah State University, Logan, Utah, USA, 271 pp.
30. Molden, D., Murray-Rust, H., Sakthivadivel, R. and Makin, I., 2003. A water-productivity framework for understanding and action. In: Kijne, W., Barkers, R. and Molden, D. (Eds.), Water Productivity in Agriculture: Limits and Opportunities for Improvements. CAB International, Wallingford, United Kingdom.
31. Moreno-Pérez, M.F. and Roldán-Cañas, J., 2013. Assessment of irrigation water management in the Genil-Cabra (Córdoba, Spain) irrigation district using irrigation indicators. Agricultural water management, 120, pp. 98-106. **doi: 10.1016/j.agwat.2012.06.020**
32. Salvador, R., Martínez-Cob, A., Cavero, J. and Playán, E., 2011. Seasonal on-farm irrigation performance in the Ebro basin (Spain): Crops and irrigation systems. Agricultural Water Management, 98(4), pp. 577-587. **doi: 10.1016/j.agwat.2010.10.003**
33. Sekse, L., 1995. Cuticular fracturing in fruits of sweet cherry (Prunus avium L.) resulting from changing soil water contents. Journal of Horticultural Science, 70(4), pp. 631-635. **doi: 10.1080/14620316.1995.11515336**
34. Stambouli, T., Zapata, N. and Faci, J.M., 2012. Irrigation patterns and scheduling of a telecontrolled irrigation district in northeastern Spain. Journal of irrigation and drainage engineering, 138(6), pp. 503-516. **doi: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000429**
35. 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, pp. 166-176. **doi: 10.1016/j.jhydrol.2012.12.034**
36. Wang, S., Wang, W., Lei, X., Wang, S., Li, X. and Norton, T., 2022. Canopy Segmentation Method for Determining the Spray Deposition Rate in Orchards. Agronomy, 12(5), pp. 1195. **doi: 10.3390/agronomy12051195**
37. Wenden, B., Campoy, J.A., Jensen, M. and Lopez-Ortega, G., 2017. Climatic limiting factors: temperature. In: Quero-García, L., Iezzoni, A., Puławska, J. and Lang, G. (Eds.), Cherries: botany, production and uses. CABI, Wallingford, UK, pp. 166-188.
38. Yang, K. and Koike, T., 2005. A general model to estimate hourly and daily solar radiation for hydrological studies. Water Resources Research, 41, W10403. **doi: 10.1029/2005WR003976**

مقاله پژوهشی

نشریه پژوهش آب در کشاورزی / ب / جلد ۳۸ / شماره ۴/ ۱۴۰۳.ص۳۱۱-۳۳۹

https://doi.org/10.22092/jwra.2024.367168.1057

تهیه نقشه‌های بهره‌وری آب مصرفی برنج با روش‌های سنجش از دور در حوضه‌های آبریز خوزستان

علی‌مختاران*، مریم محمدی و حسین دهقانی‌سانیج

استادیار پژوهشی بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اهواز، ایران. **alimokhtaran@gmail.com**

دانش آموخته کارشناسی‌ارشد سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

mohammady_maryam@yahoo.com

استاد پژوهشی مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.**dehghanisanij@yahoo.com**

دریافت: مهر ۱۴۰۳ و پذیرش: آذر ۱۴۰۳

چکیده

کشت گسترده برنج در استان خوزستان تأثیر بسیاری بر ایجاد تنش آبی در زیرحوضه‌های آبریز استان دارد. برای برنامه‌ریزی دقیق مدیریت آب در سطح کلان برای ایجاد فرصت‌های صرفه‌جویی واقعی آب، این پژوهش با هدف تعیین نقشه پراکنش کشت برنج (RCM) برای روش‌های مختلف مدیریتی کاشت و آبیاری (کشت سنتی با غرقاب دائم و خشکه‌کاری با تناوب آبیاری) از خرداد تا آبان ماه ۱۴۰۲ با استفاده از شاخص‌های گیاهی، دما، خاک و داده‌های سنجش از دور در خوزستان انجام شد. در این پژوهش، تغییرات زمانی-مکانی مصارف آب برنج براساس میزان آب مصرفی واقعی (ETa) و بهره‌وری واقعی آب (WP_{ET}) ارزیابی و تحلیل شد. به‌منظور اجرای طبقه‌بندی برای تهیهٔ نقشه پراکنش کشت برنج و دستیابی به سطح زیرکشت محصول، از الگوریتم جنگل تصادفی با تکنیک یادگیری ماشین استفاده شد. در محاسبهٔ شاخص‌ها از باندهای ماهواره سنتینل۲، لندست۹ و پروداکت WAPOR بهره‌برداری گردید و برای تعیین ETa و WP_{ET} از پایگاه داده‌ای WAPOR در محیط GEE استفاده گردید. بر پایه نتایج، سطح زیرکشت برنج برای سامانهٔ سنتی در کل استان، ۱۳۶۷۷۰ هکتار و برای روش خشکه‌کاری،۴۳۱۷۲ هکتار بود. در این شرایط، دقت کلی تفکیک مزارع برنج برحسب نوع کشت ۹۹/۶۵٪ و ضریب کاپای۰/۸۷ بود. در سال زراعی ۱۴۰۲، مجموع ETa برنج برای استان خوزستان بالغ بر ۱/۶۲ میلیاردمترمکعب برآورد شد، به‌طوری که میزان ETa کل برای کشت سنتی ۱/۲۷ میلیاردمترمکعب و در خشکه‌کاری حدود ۳۵۴ میلیون مترمکعب بدست آمد. نتایج نشان داد که با این‌که کشاورزان با مدیریت آبیاری روزانه در روش خشکه‌کاری تلاش کردند که عملکرد کاهش نیابد، با این‌حال میزان میانگین وزنی کاهش ETa و ارتقا WP_{ET} در این فناوری نسبت به روش سنتی به‌ترتیب، ۱۳٪ و ۸٪ برآورد شد. این در حالی است که تا زمانی‌که تناوب آبیاری (دور آبیاری دو تا چهار روزه) در روش خشکه‌کاری رعایت می‌شد، میزان کاهش ETa و ارتقا WP_{ET} در این فناوری به‌ترتیب ۲۴٪ و ۱۶٪ بود. نتایج حاصل از این پژوهش در مقایسه با داده‌های صحرایی منتج از کارهای تحقیقات کاربردی استان، راندمان کاربرد آب در مزارع برنج با کشت سنتی را ۲۷٪ و برای روش خشکه‌کاری ۳۴٪ برآورد کرد. بنابراین، در صورت ضرورت، کشت برنج باید به روش خشکه‌کاری با مدیریت متناوب آبیاری و در مناطقی که از نظر خاک، آب، سطح آب زیرزمینی و مهندسی زهکشی در وضعیت مناسبی باشند، انجام گردد.

واژه‌های کلیدی: آب مصرفی‌واقعی برنج (ETa)، خشکه‌کاری برنج، کشت غرقاب برنج، مدیریت متناوب آبیاری

---

* – آدرس ایمیل نویسنده مسئول: **alimokhtaran@gmail.com**

مقدمه

برنج چهارمین غلهٔ پرمصرف جهان و غذای بیشتر از نصف مردم، به‌خصوص در کشورهای در حال توسعه است (فائو، ۲۰۱۹؛ درویش‌زاده و همکاران، ۲۰۱۱؛ توربیک و همکاران، ۲۰۱۷). تولید پایدار برنج، چالشی بزرگ برای سیاست‌گذاران به‌حساب می‌آید (روی و همکاران، ۲۰۱۶)، ازاین‌رو نظارت بر تغییرات فصلی سطوح کشت در مناطق اختصاص داده شده به اکوسیستم‌های محصول برنج برای تضمین امنیت غذایی و توسعه پایدار ضروری است (توره‌ی و همکاران، ۲۰۲۱). در ایران بیشتر زمین‌های زیر کشت برنج در استان‌های شمالی قرار دارند. به‌طوری‌که استان مازندران، ۳۸/۵ درصد، استان گیلان، ۳۱/۹ درصد و استان گلستان، ۹/۹ درصد از کل اراضی شالیزار را به خود اختصاص داده‌اند. همچنین خوزستان با ۹/۲ درصد و فارس با ۳/۹ درصد در رده‌های بعدی قرار دارند (ایزددوست و همکاران، ۲۰۱۳)؛ اما شرایط خاص اقلیمی، خشکی و پراکنش نامناسب زمانی-مکانی بارندگی کشورمان ایران، واقعیت گریزناپذیری است که هرگونه تولید پایدار مواد غذایی و کشاورزی را منوط به استفاده صحیح و منطقی از منابع محدود آب کشور نموده است (دهقانی‌سانیج، ۲۰۱۲). بر این اساس علاوه بر نظارت بر سطوح کشت برای محصولی با نیاز آبی بالا مانند برنج، تعیین آب مصرفی و بهره‌وری آب این محصول، جواب دقیق‌تری در بخش کشاورزی آن‌هم در سطح یک زیر حوضه و یا حوضه آبریز از نظر عرضه و تقاضا خواهد داد. این گام، راهنمایی برای تصمیم‌گیران و مدیران آب بخش کشاورزی خواهد بود که با استفاده صحیح و اقدامات پایدار برای تعیین الگوی کشت بهینه، تطبیق عرضه و تقاضا، حفظ زیست‌بوم و تعادل‌بخشی به آب‌های زیرزمینی و سطحی در یک منطقه با هدف تأمین امنیت غذایی حرکت کنند. برنامه‌ریزی و مدیریت مصرف آب در سطح یک حوضه، مستلزم آگاهی از رفتار هیدرولوژیکی از جمله تغییرات زمانی-مکانی مؤلفه‌های مهم آن مانند تبخیر-تعرق واقعی[1] (ETa) است (جوادیان و همکاران، ۲۰۱۹). بر اساس تعاریف حسابداری آب، تبخیر-تعرق واقعی (آب مصرفی واقعی) بخشی از آب برداشتی برای بخش کشاورزی است که به‌صورت سودمند مصرف و البته از دسترس خارج‌شده و دیگر قابل بازیافت نیست (کریمی و همکاران، ۲۰۱۲). برآورد تبخیر-تعرق با روش سنجش‌ازدور در مناطق کم‌آب می‌تواند به تصمیم‌گیری در مورد بهبود مدیریت آب آبیاری و افزایش بهره‌وری اقتصادی آب کمک کند (فائو و بانک جهانی، ۲۰۲۲). در ایران، تعیین سطح زیر کشت محصولات معمولاً با سه روش کارشناسی، فهرست‌برداری و استفاده از فناوری های نوین چون سنجش‌ازدور و سامانهٔ اطلاعات جغرافیایی است (ضیاییان فیروزآبادی و همکاران، ۲۰۰۹). فناوری‌های سنجش‌ازدور دقت بالایی از اطلاعات زمانی-مکانی در مورد سطح زیر کشت وسیع و انواع محصولات کشاورزی فراهم می‌کند. همچنین فناوری سنجش‌ازدور، یک سامانه پایش واقعی برای محصول و مراحل توسعه آن در طول فصل رشد، از طریق شاخص‌های مختلف پوشش گیاهی است. مبنای این دسته از روش‌ها، برقراری ارتباط رگرسیونی بین شاخص‌های مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای نظیر شاخص نرمال تفاوت پوشش گیاهی[2](NDVI) با شاخص‌های گیاهی و یا آبی نظیر شاخص سطح برگ و یا زیست‌توده سطوح گیاهی است. چنانچه بتوان ارتباطی بین شاخص‌های مورد اشاره با آب برداشت‌شده و محصول تولیدی برقرار نمود، امکان برآورد بهره‌وری آب با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای با هزینه‌ای بسیار کمتر مالی و زمانی از شرایط مزرعه‌ای میسر می‌شود (آداملا و همکاران، ۲۰۱۶). بر این اساس در سال‌های اخیر برآورد ETa، تعیین زیست‌توده[3] (Bio) و میزان بهره‌وری واقعی آب[4] (WP_{ET}) با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای، با وضوح زمانی-مکانی بالا که می‌توانند در مقیاس‌های میدانی و همچنین مقیاس جهانی استفاده شوند، به‌طورگسترده مورد استفاده قرارگرفته است (بیسپو و همکاران، ۲۰۲۲). مزارع برنج قبل از زمان کاشت، غرقابی می‌شوند و مقادیر شاخص پوشش گیاهی

1 -Actual Evapotranspiration
2 -Normalized Difference Vegetation Index
3 -Biomass
4 -Evapotranspiration Water Productivity

در این زمان در کمترین مقدار خود قرار دارند. با رشد و افزایش ارتفاع محصول، مقادیر شاخص پوشش گیاهی افزایش می‌یابند. در این شرایط، با توجه به فنولوژی (طول زمان مدت رشد) و بیشترین مقدار شاخص پوشش گیاهی به کمک نقشه‌های سری زمانی، مقادیر استخراج‌شده از تصاویر اپتیکی تخمین زده می‌شوند (وانگ و همکاران، ۲۰۱۵). اینوی و همکاران (۲۰۲۰) برای شناسایی مزارع برنج با استفاده از تصاویر راداری سنتینل [1] و اپتیکی سنتینل ۲، روش طبقه‌بندی جنگل‌های تصادفی[2](RF) را پیشنهاد دادند. در ابتدا نقشهٔ اولیهٔ مزارع برنج به کمک طبقه‌بندی تصاویر سنتینل ۱ با الگوریتم جنگل‌های تصادفی تهیه گردید. پس از آن تولید نقشهٔ نهایی مزارع برنج با حذف مزارع غیر برنج از نقشهٔ اولیه و با استفاده از شاخص‌های تفاضلی پوشش گیاهی، حد آستانهٔ شاخص رطوبت خاک[3] (LSWI) و پوشش گیاهی بهبودیافته[4](EVI) از تصاویر سنتینل ۲ به‌دست آمد. در مطالعه‌ای دیگر، لی‌یو و همکاران (۲۰۲۰) برای شناسایی مزارع برنج ضمن استفاده از فنولوژی محصول، از شاخص LSWI، شاخص EVI، شاخص زرد[5](YI) و شیب منطقه استفاده کردند. در همین زمینه، ژان و همکاران (۲۰۲۱) برای شناسایی مزارع برنج، استفاده از الگوریتم درخت تصمیم‌گیری[6] (DTA) را به کمک ویژگی‌های فنولوژیکی استخراج‌شده از تصاویر سنتینل ۱ پیشنهاد دادند. در مطالعه‌ای توسط (فتحی و شاه‌حسینی، ۱۴۰۲) با بررسی قابلیت‌های نقشه‌های سری زمانی شاخص دمای سطح زمین[7] (LST) در کنار نقشه‌های سری زمانی شاخص NDVI با استفاده از الگوریتم ماشین‌بردار پشتیبان[8](SVM) در ایالت کالیفرنیا آمریکا، مزارع برنج با بالاترین دقت کلی[9]، ۹۴/۲۸ درصد و ضریب کاپای[10]، ۸۸/۲۹ درصد نسبت به سایر مزارع کشاورزی در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها شناسایی شدند. نتایج این تحقیق، کارآیی پایین الگوریتم درخت تصمیم‌گیری را در شناسایی لبه‌های مزارع برنج را نشان داد. در مطالعه‌ای دیگر در چین، از طبقه‌بندی جنگل تصادفی (RF) و طبقه‌بندیDCC[11] (شاخص‌های طیفی مشتق‌شده از ماهواره مادیس[12]، متغیرهای آب و هوایی و توپوگرافی) برای تولید نقشه‌های آبیاری هر استان در محیط گوگل ارث انجین[13](GEE) استفاده شد. نتایج نشان داد که نقشهٔ حاصل از دیگر نقشه های آبیاری فعلی با دقت کلی ۷۹/۲ درصد بهتر عمل کرد (ژانگ و همکاران ۲۰۲۲). الگوریتم‌های سنجش‌ازدور بر اساس شاخص‌های تعریف‌شدهٔ گیاهی، دما و رطوبت، دیدگاه زمانی-مکانی را در سطح حوضه آبریز و یا منطقه ارائه می‌دهند که می‌تواند علاوه بر تهیهٔ نقشهٔ گیاهی[14]، در تعیین میزان عملکرد محصول و برنامه‌ریزی آب از نظر مصرف در پایین‌دست بسیار مؤثر باشد. بر همین اساس، الگوریتم‌های متعددی برای استخراج تبخیر-تعرق واقعی (ET_a) سطوح گیاهی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای توسعه‌یافته‌اند که از آن جمله می‌توان به SEBAL (باستیان‌سن و همکاران، ۲۰۱۲)، SEBS و METRIC (آلن و همکاران، ۲۰۰۷) اشاره کرد. امروزه سازمان FAO، سامانه دسترسی آزاد به بهره‌وری آب را با هدف پوشش دادن کشورهای دچار بحران آب در آفریقا و خاورمیانه ایجاد کرده است که برآورد ETa در پایگاه داده‌ای WAPORیکی از مهم‌ترین محصولات این سامانه است (جوادیان و همکاران، ۲۰۱۹). پایگاه WAPOR، میزان تعرق (T) و تبخیر (E) را به‌صورت جداگانه بر اساس الگوریتم ETLook برای آفریقا و خاورمیانه به‌صورت ۱۰ روزه، ماهانه، فصلی و سالانه با قدرت تفکیک مکانی ۲۵۰ متری برآورد می‌کند و مقدار آب مصرفی واقعی را به-صورت مجموع مقادیر تبخیر و تعرق در نظر می‌گیرد (باستیانسن و همکاران، ۲۰۱۲؛ جوادیان و همکاران، ۲۰۱۹؛

1- Sentinel1
2 - Random Forest Classification
3 - Land Surface Water Index
4 -Enhanced Vegetation Index
5 - Yellowness Index
6 - Decision Tree Algorithm
7 - Land Surface Temperature
8- Support Vector Machine
9- Overall Accuracy
10 - Kappa Coefficient
11 - Data Cubes Classification
12 - Modis
13 - Google Earth Engine
14 -Crop Mapping

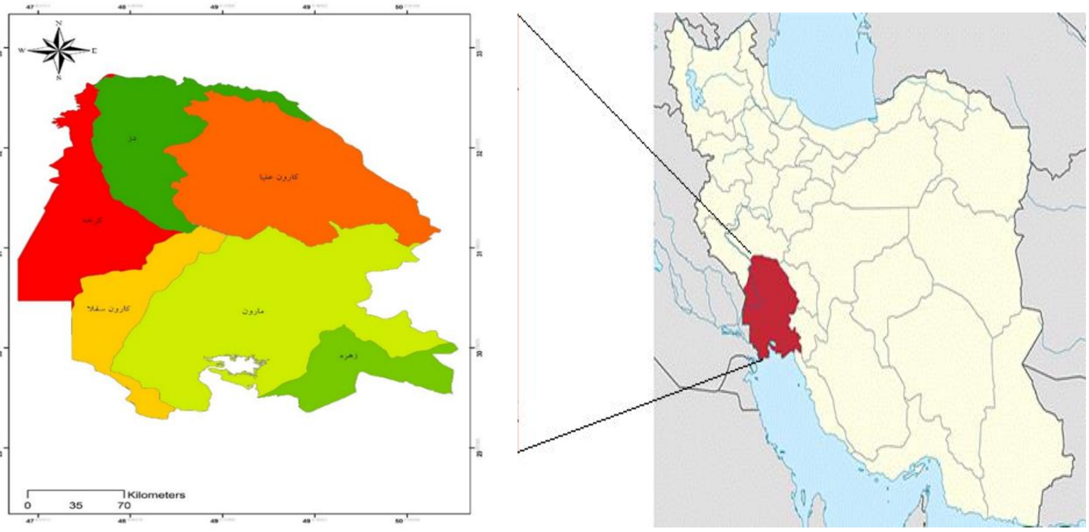
سامین و همکاران، ۲۰۱۲؛ فائو، ۲۰۱۸ و ۲۰۲۰). بلاچفورد و همکاران (۲۰۲۰b)، طی پژوهشی در مناطق کشاورزی کوچک و متوسط مقیاس، تأثیر مقیاس استفاده شده در ارزیابی‌های مکانی بر شاخص‌های عملکرد آبیاری را با روش‌های سنجش‌ازدور را از طریق پایگاه داده‌ای WAPOR بررسی کردند. در مطالعهٔ مذکور برای پنج دشت مجهز به شبکه آبیاری، سه شاخص زیست‌توده، آب مصرفی و بهره‌وری آب با تفکیک مکانی ۲۵۰، ۱۰۰ و ۳۰ متر ارزیابی شد. نتایج اهمیت انتخاب پیکسل مناسب توسط پایگاه داده‌ای WAPOR را نشان داد. بلاچفورد و همکاران (۲۰۲۰a) در تحقیقی دیگر، مقادیر ETa حاصل از پایگاه داده‌ای WAPOR را با تبخیر–تعرق حاصل از ۱۴ ایستگاه هواشناسی برای مناطق کشت آبی و دیم در منطقه آفریقا مقایسه کردند. همبستگی کلی ETa حاصل از WAPOR با مقیاس نقطه‌ای در مقایسه با اطلاعات حاصل از ایستگاه ها، ۰/۷۱ و میانگین ریشه مربع خطا، ۱/۲ میلی‌متر در روز گزارش شد. کائونه و اوپستال (۲۰۲۰)، گزارشی در مورد بهره‌وری آب کشاورزی برای محصولات ذرت، سورگوم، لوبیا، برنج، گوجه‌فرنگی، سیب‌زمینی، کلم و پیاز در سه مکان مختلف در موزامبیک (نماتاندا، مواتیزه و بارو) صورت گرفت. در این پژوهش، مدل رشد محصول FAO AquaCrop برای مناطق مورد نظر کالیبره و نتایج شبیه سازی بهره‌وری آب برای هر محصول در هر مکان به‌دست آمد. همچنین، در مقیاس زیر حوضه و حوضه برای محاسبه مقادیر پایه بهره‌وری آب با توجه به زیست‌توده از داده‌های پایگاه WaPOR استفاده شد. نتایج به‌دست آمده نشان داد که مطالعه‌ی انجام‌شده با داده‌های WaPOR در استفاده از داده‌های میدانی برای بدست آوردن میزان بهره‌وری در یک زیر حوضه و یا حوضه برای هر محصول یا محصولات مختلف می‌تواند قابل تعمیم و استفاده باشد. یوسفی و همکاران (۱۴۰۰)، پژوهشی را تحت عنوان برآورد آب مصرفی واقعی (ETa) بخش کشاورزی کشور ایران و ارزیابی نتایج به‌دست آمده از سامانه WAPOR با داده‌های زمینی انجام دادند. نتایج بررسی دوره آماری هفت‌ساله (۲۰۱۶–۲۰۱۰)، بیانگر آن بود که مصرف واقعی آب کشاورزی در سطح کشور و حجم آب آبیاری از سال‌های ۲۰۱۳ به بعد روند افزایشی داشته است. به‌طوری‌که حجم آب مصرفی واقعی بخش کشاورزی در استان‌های خوزستان، تهران، گیلان به‌ترتیب در این دوره آماری بیشترین روند افزایشی را داشتند. برای بررسی دقت سامانه WAPOR، مقادیر آن با تبخیر–تعرق حاصل از الگوریتم SEBAL و آمار ایستگاه لایسیمتری در دشت میاندوآب مقایسه شد. نتایج بیانگر آن بود که در غالب مناطق، مقادیر تبخیر–تعرق الگوریتم SEBAL نسبت به سامانه WAPOR بیشتر بود که با حرکت به‌سمت ارتفاع ۲ هزار متر، این اختلاف به بیشترین مقدار خود می‌رسد. افشاری‌پور و همکاران (۱۳۹۸)، تحقیقی را تحت عنوان ارزیابی میزان بهره‌وری آب کشاورزی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ی و مدل WATPRO برای حوضه آبریز دشت جیرفت به انجام رساندند. در این پژوهش ابتدا تصاویر ماهواره‌ای Landsat 8 در زمان کشت تا برداشت گندم برای سال زراعی (۱۳۹۶–۱۳۹۵) دریافت و پس از انجام پیش‌پردازش‌های لازم، مدل WATPRO اجرا شد. زمان استقرار، اوج رشد و برداشت محصول از طریق سری زمانی NDVIدر ۶ منطقه تقسیم‌بندی شده، مشخص گردید و بهره‌وری آب گندم محاسبه و نتایج با نقاط کنترل زمینی ارزیابی شد. نتایج این پژوهش نشان داد که بیشترین و کمترین میانگین بهره‌وری به‌ترتیب ۰/۸، ۰/۴ و ۰/۵ کیلوگرم در مترمکعب بود. همچنین ضریب تعیین ۷۶/۵ درصد در بررسی رابطه بین میانگین NDVI و بهره‌وری آب به‌دست آمد. در استان خوزستان ۹۱ درصد از آب مورد نیاز کشاورزی توسط آب‌های سطحی تأمین‌شده و باقیمانده آن از منابع آب زیرزمینی برداشت می‌شود (مختاران و همکاران، ۱۴۰۳). وقوع خشک‌سالی در سال‌های اخیر و لزوم افزایش حق‌آبه محیط‌زیست، باعث شده که شناخت از شرایط فعلی نمایه بهره‌وری آب کشاورزی و چالش‌های موجود در آن بسیار مهم و حائز اهمیت باشد. یکی از این چالش‌ها در استان خوزستان کشت برنج است. در

خوزستان، "برنج" یکی از مهم‌ترین محصولات تابستانه است که کشت گستردهٔ آن (از ۸۰ هزار هکتار در سال‌هایی با محدودیت آبی تا ۲۰۰ هزار هکتار در سال‌های پرآبی)، به‌خصوص در مناطق مرکزی و جنوبی این استان تأثیر بسیاری در ایجاد تنش آبی بر زیر حوضه‌های آبریز جلگه خوزستان دارد (مختاران و همکاران، ۱۴۰۲). در سال‌های اخیر تلاش‌های بسیاری توسط محققین در جهت کاهش آب آبیاری و آب مصرفی برنج شده است. استفاده از روش آبیاری متناوب به‌صورت خشک و مرطوب کردن در روش کشت مستقیم برنج هوازی یا خشکه‌کاری برنج (بومان و همکاران، ۲۰۰۲) که به‌منظور جایگزینی با سامانه مرسوم (نشاکاری با غرقاب دائم در محیط گلخرابی) در دنیا ارائه شده، ازجمله فناوری‌هایی است که اخیراً در استان خوزستان استفاده گردیده و توانسته بر کاهش مصرف آب برنج اثرگذار باشد (گیلانی و همکاران، ۱۳۹۵). در این راستا به‌نظر می‌رسد روش کشت مستقیم بذر در بستر خشک (خشکه‌کاری) نسبت به دو شیوه رایج در استان خوزستان (کشت نشاء و کشت مستقیم بذر در محیط مرطوب) می‌تواند به‌عنوان یکی از راهبردهای بالقوه برای کاهش و مصرف بهینه آب مورد استفاده قرار گیرد. بااین‌حال تفاوت بین این روش‌های کاشت و مدیریت آبیاری برنج از نظر آب مصرفی و بهره‌وری آب در سطح یک زیرحوضه برای مدیران آب و بهره‌برداران محسوس نیست. لذا این پژوهش با هدف تعیین نقشه پراکنش کشت محصول برنج[1] (RCM) برای شیوه‌های مختلف مدیریتی کاشت و آبیاری در زیرحوضه‌های آبریز استان خوزستان با استفاده از شاخص‌های گیاهی، دما، خاک و داده‌های سنجش‌ازدور، از خرداد تا آبان ماه ۱۴۰۲ انجام شد. در این پژوهش، میزان آب مصرفی واقعی، زیست‌توده و بهره‌وری واقعی آب و در نهایت تعیین الگوی تغییرات زمانی-مکانی مصارف آب برنج، نیز ارزیابی و تحلیل خواهد شد. انجام این پروژه می‌تواند گامی مفید برای برنامه‌ریزی دقیق در جهت مدیریت صحیح آب توسط توزیع‌کنندگان و مصرف‌کنندگان آب کشاورزی باشد.

مواد و روش‌ها

استان خوزستان با مساحت ۶۴۰۵۷ کیلومترمربع بین ۲۹ درجه و ۵۷ دقیقه تا ۳۳ درجه و صفر دقیقه عرض شمالی از خط استوا و ۴۷ درجه و ۴۰ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۳۳ دقیقه طول شرقی و در جنوب غربی ایران قرار دارد. زیرحوضه‌های پنج حوضهٔ آبریز (کارون، کرخه، دز، زهره و مارون-جراحی) و ۳۰ دشت در استان خوزستان قرار دارد (شکل ۱). انطباق محدودهٔ اراضی آبی و دیم با دشت‌های خوزستان نشان می‌دهد که بیشتر اراضی آبی در نیمهٔ غربی، جنوب و جنوب شرق استان واقع شده است (مختاران و همکاران، ۱۴۰۳).

1 -Rice Cultivation Map



شکل ۱- موقعیت استان خوزستان در کشور و نقشهٔ زیرحوضه‌های آبریز استان

روش شناسایی مزارع برنج در مدیریت‌های مختلف کاشت و آبیاری

در این پژوهش، به‌منظور اجرای طبقه‌بندی برای تهیهٔ نقشهٔ گیاهی برنج (RCM) و دستیابی به سطح زیر کشت محصول از الگوریتم جنگل تصادفی (RF) با تکنیک یادگیری ماشین[1] (MLT) استفاده شد. تکنیک MLT زیرمجموعه‌ای از هوش مصنوعی بوده که در کاربرد آن از الگوریتم‌های مختلفی برای طبقه‌بندی استفاده می‌شود. در مورد طبقه‌بندی در حوزه کشاورزی و منابع طبیعی، الگوریتم RF، عملکرد خوبی از خود نشان داده است که می‌تواند مقادیر از دست‌رفته و داده‌های با اختلال‌های زیاد را مدیریت کند (مختاران و همکاران، ۱۴۰۳). الگوریتم RF ترکیبی از پیش‌بینی‌کننده‌های درختی هستند به‌طوری‌که هر درخت به مقادیر یک بردار تصادفی بستگی دارد که به‌طور مستقل و با توزیع یکسان برای همهٔ درختان جنگل، نمونه‌برداری شده است (مجیدی و همکاران، ۲۰۲۱). علاوه بر این، با ادغام الگوریتم RF و پلتفرم‌های مدیریت‌شده داده‌های بزرگ مانند گوگل ارث انجین (GEE)، پردازش مجموعه داده‌ها با متغیرهای متعدد در مدت‌زمانی کوتاه تسهیل می‌شود (اشمیت و همکاران، ۲۰۱۹). کاتالوگ دیتاهای عمومی GEE، بخش عمده‌ای از تصاویر سنجش‌ازدور رصدی زمین، شامل آرشیو لندست و همچنین آرشیو کامل داده‌های سنتینل ۱ و سنتینل ۲ که شامل پیش‌بینی‌های آب‌وهوا و داده‌های پوشش زمین بوده، تشکیل شده است (گورلیک و همکاران، ۲۰۱۷). روند طبقه بندی، شناسایی و تفکیک مزارع برنج استان خوزستان با توجه به نوع مدیریت کاشت و آبیاری، در دو گام به انجام رسید. گام اول شامل تفکیک مزارع برنج به‌عنوان یک کلاس (طبقه) از محصولات زراعی غیربرنج (در کلاسی دیگر) و گام دوم تفکیک فقط مزارع برنج به دو کلاس برحسب سامانه (روش) کشت و مدیریت آبیاری (کشت سنتی برنج با غرقاب دائم و سامانهٔ کشت مستقیم بذر در بستر خشک "خشکه‌کاری" با مدیریت متناوب آبیاری) بود؛ بنابراین در گام دوم، طبقه‌بندی روی خروجی کلاس برنج از گام اول، صورت گرفت. این بدین معنی است که از گام دوم، اجرای الگوریتم RF محدود به ناحیه‌ای بود که منحصراً برنج در آنجا موجود بود. بخشی از خطای موجود در طبقه‌بندی مزارع برنج نسبت به دیگر محصولات (گام اول)، ناشی از پوشش‌هایی است که در منطقه وجود دارد و هم‌زمان با برنج در تیرماه تا شهریورماه به اوج سبزینگی می‌رسند. تاریخ کشت برنج در خوزستان از دههٔ اول خردادماه در شمال شرق استان تا ۲۵ خردادماه در مناطق

1 - Machine Learning Technique

مرکزی و جنوبی استان برای روش کشت سنتی با غرقاب دائم است. کشت مستقیم بذر در بستر خشک (خشکه‌کاری) معمولاً از دهۀ سوم خردادماه تا دهۀ اول تیرماه است. در این پژوهش، از تصاویر"سنتینل۲" و"لندست۹" از سایت https://earthexplorer.usgs.gov و ترکیب کیفی تصاویر این دو ماهواره برای وارد کردن نمونه‌هایی از اراضی برنج و سایر محصولات زراعی[1] (ذرت، یونجه، کنجد و محصولات جالیزی) استفاده شد. تاریخ دریافت تصاویر در یک بازه کشت برنج یعنی دهۀ اول خردادماه (ژوئن) تا اول آبان (اکتبر) ۱۴۰۲(۲۰۲۳) بود. با نمایش RGB[2] از باندهای‌ 'B4', 'B8A', 'B12' به‌صورت ترکیب باندی، امکان تشخیص هر چه بهتر اراضی با حوضچه‌های پرورش ماهی و تالاب‌ها فراهم شد. با وارد کردن نمونه‌هایی از کشت‌های زراعی غیربرنج (ذرت، یونجه، کنجد و محصولات جالیزی) در دشت‌هایی که کشت برنج رواج ندارد، مانند دشت بهبهان در زیرحوضۀ مارون–جراحی (۱۰۸ نمونه)، دشت بنه‌باشت در زیرحوضۀ زهره (۵۰ نمونه)، دشت‌های دزفول در زیرحوضۀ دز (۳۰۰ نمونه) و پشمینه‌زار اندیمشک در زیرحوضۀ کرخه (۵۴ نمونه)، برداشت صحرایی انجام شد و کلاسی به نام محصولات غیربرنج در محیط نرم‌افزار ENVI به‌عنوان ROI ذخیره گردید. در محیطArc Map، این نمونه‌ها به فرمت شیپ فایل درآمدند و در محیط GEE به‌عنوان نمونه‌های زمینی وارد شدند. در مقابل، نمونه‌هایی هم از محصول برنج به‌همین روال برداشت و در سه کلاس خشکه‌کاری، کشت سنتی و مجموع این دو کلاس به‌عنوان "کلاس برنج" تهیه شد. نمونه‌های زمینی کشت برنج، ۲۰۹۴ نقطه با مختصات مشخص بودند که برای مزارع با روش کشت سنتی با غرقاب دائم، ۱۵۹۴ نقطه و برای روش خشکه‌کاری، ۵۰۰ نقطه را شامل شدند. همچنین نمونه‌های زمینی برای دیگر گیاهان (مانند ذرت، یونجه، کنجد و محصولات جالیزی) که تاریخ کشت منطبق با برنج را داشتند،۵۱۲ نقطه بودند. در این پژوهش، از پروداکت داینامیک ورد[3] (DW) کلاس ۴ استفاده شد که مربوط به زراعت است. پروداکت DW یک مجموعه داده از کاربری زمین/ پوشش زمین[4](LULC) با وضوح بالا در سطح جهانی است که از یادگیری یک سامانه پایه ابری در تصاویر ۱۰ متری سنتینل ۲ بهره می‌برد. این پروداکت که از سال ۲۰۱۵ تا به حال استفاده می‌شود، با توجه به عرض جغرافیایی، بین دو تا پنج روزبه‌روز می‌شود (کریستوفر و همکاران، ۲۰۲۲). کلاس‌هایی مانند باغ‌ها، پهنه‌های آبی، نواحی بایر، شهر و مواردی که نیاز نبودند حذف شدند. از طرفی دیگر، به‌دلیل اینکه مزارع نیشکر منحصراً درکشت و صنعت‌های شرکت توسعه نیشکر خوزستان و یا شرکت‌های کارون و میاناَب هستند و توجه به این موضوع مهم که نیشکر از منظر حجم آب آبیاری طیف بسیار مشابهی با برنج دارد، از این رو برای سهولت کار، مناطق کشت و صنعت‌های موجود از شیپ فایل اصلی استان خوزستان جدا شدند و در این شرایط، الگوریتم جنگل تصادفی به‌دقت بالایی از تفکیک مزارع برنج دست پیدا کرد. در این پژوهش برای تفکیک زمین‌های زراعی، تصویرهای ماهواره‌ای در برآورد میزان شاخص‌های گیاهی، رطوبت خاک، آب، میزان تراکم گیاهی، مقدار کلروفیل، زیست‌توده، شاخص سطح برگ و دیگر شاخص‌های مؤثر بررسی و تغییرات این شاخص‌ها برحسب نمونه‌های واقعی برداشت زمینی ارزیابی شد؛ بنابراین، در گام اول (تفکیک مزارع برنج از دیگر محصولات زراعی)، از بین ۱۵ شاخص مؤثر شش شاخص با توجه به ادغام آن‌ها و داشتن دقت کلی و ضریب کاپای بالا، انتخاب شد که در جدول (۱) آورده شده است.

در گام دوم (تفکیک محصول برنج برحسب نوع کشت و مدیریت آبیاری)، از بین شاخص‌های تشخیص، پنج شاخص با دقت کلی و ضریب کاپای بالاتر برای اجرای الگوریتم جنگل تصادفی انتخاب شد (جدول ۲).

---

1 - Other Crop
2 -Red-Green-Blue
3 -Dynamic World
4 - Land Use Land Cover

جدول ۱- شاخص‌های مورد استفاده در طبقه‌بندی و تشخیص محصول برنج از دیگر محصولات زراعی

تفکیک مکانی	باندها	نوع ماهواره	شاخص‌ها
10m	B8,B4,B2	Sentinel2	LAI [1]
10m	B8,B4,B2	Sentinel2	EVI
20m	B8A,B11	Sentinel2	LSWI
30m	B10	Landsat9	ST_B10
20m	B12	Sentinel2	SWIR2
10m	VV,VH	Sentinel1	Composite ‘VV’ &’VH’

جدول ۲- شاخص‌های مورد استفاده در تشخیص و تفکیک محصول برنج برحسب روش کشت و مدیریت آبیاری

تفکیک مکانی	باندها	نوع ماهواره	شاخص‌ها
20m	B8A,B11	Sentinel2	LSWI
10m,20m	B3,B8,B11,B12	Sentinel2	AWEInsh [2]
30m	B10	Landsat9	ST_B10
250m	-	WAPOR	NPP [3]
10m	VV,VH	Sentinel1	Composite ‘VV’ &’VH’

بر طبق جدول‌های (۱) و (۲) مشاهده شد که در محاسبهٔ شاخص‌ها از باندهای ماهواره سنتینل ۲، لندست ۹ و پروداکت WAPOR استفاده شده است. در این راستا، برای بالا بردن دقت طبقه‌بندی و کاهش تأثیر پوشش ابر در نتایج برآورد سطح زیر کشت برنج، از تصاویر راداری ماهواره سنتینل ۱ نیز استفاده شد. در جدول (۳)، تعاریف شاخص‌ها و مبانی محاسبات آن‌ها آورده شده است.

اعتبارسنجی، ارزیابی و صحت‌سنجی طبقه‌بندی‌ها

برای هریک از کلاس‌ها (برنج، غیر برنج و مدیریت‌های مختلف کاشت و آبیاری در محصول برنج)، ۷۰ درصد داده‌های زمینی که در بالا بیان شد، با هدف ارزیابی به‌عنوان نمونه‌های آموزشی[4] و ۳۰ درصد دیگر به‌صورت تصادفی برای اعتبارسنجی[5] در نظر گرفته شد. دقت کلی و ضریب کاپا با کدنویسی در محیط گوگل ارث انجین محاسبه گردید. الگوریتم طبقه‌بندیRF با۸۰ تعداد درخت تصمیم به تعداد گره‌های ۷۹۶ نود برای هر درخت به‌صورت تصادفی برای تفکیک مزارع برنج از مزارع غیر برنج با شش شاخص منتخب اجرا شد. پس از آن برای تفکیک سامانه‌های مختلف کشت و مدیریت آبیاری متفاوت برنج، با همین تعداد ۸۰ درخت تصمیم ولی تعداد گره‌های ۵۸۶ نود و با پنج شاخص منتخب انجام شد. در نهایت پس از تهیهٔ نقشهٔ برنج (RCM)، عملیات پایش با هدف صحت‌سنجی نقشه تهیه‌شده از پراکنش محصول برنج، در سطح استان انجام شد. برای این کار، نمونه‌هایی به‌صورت پراکنده از مزارع برنج با روش‌های کاشت مختلف (به‌جز مزارعی که قبل از تهیه نقشه گیاهی نمونه گرفته‌شده بود) انجام شد. نمونه‌های برداشت‌شده شامل ۴۲۵ مزرعه بود. سرانجام، نقاط مزارع نمونه‌برداری شده حاصل از عملیات پایش و نقشهٔ تفکیک محصول (CMR) در محیط ArcMap روی‌هم[6] قرار داده شد و مورد تطبیق و بررسی قرار گرفت.

1 - Leaf Area Index
2 - Automated Water Extraction Index no shadow
3 - Net Primary Production Index
4 - Training
5 -Testing
6 - Overlap

جدول ۳- فرمول محاسباتی و توضیحات شاخص‌های منتخب

شاخص‌های منتخب	روابط محاسباتی*	توضیحات	منبع
شاخص سطح برگ (LAI)	$$\text{LAI Index} = 3.618\left(\frac{2.5(\text{NIR}-\text{RED})}{(\text{NIR}+6\times\text{RED}-7.5\times\text{BLUE}+1)}\right)-0.118 \quad (1)$$	نمایانگر برگ‌هایی است که از نظر فتوسنتزی فعال هستند.	دلگیدو و همکاران، ۲۰۱۵
شاخص گیاهی بهبودیافته (EVI)	$$\text{EVI Index} = \frac{2.5(\text{NIR}-\text{RED})}{(\text{NIR}+6\times\text{RED}-7.5\times\text{BLUE}+1)} \quad (2)$$	برای تعیین کمیت سبزینگی پوشش گیاهی استفاده می‌شود. برخی از شرایط جوی و اختلالات پس‌زمینه را تصحیح می‌کند و در مناطقی با پوشش گیاهی متراکم حساس‌تر است	هیت و همکاران، ۲۰۰۲
شاخص رطوبت خاک (LSWI)	$$\text{LSWI Index} = \frac{B8A-B11}{B8A+B11} \quad (3)$$	این شاخص شامل بازتاب موج کوتاه است. نوار فروسرخ به رطوبت خاک و رطوبت پوشش گیاهی حساس است و می‌تواند برای پایش تغییرات رطوبت خاک استفاده شود.	اینوی و همکاران،۲۰۲۰
شاخص دمای سطح زمین (LST)	ST_B10 (4)	داده‌های LST بازیابی شده از تصاویر باند فروسرخ حرارتی (TIR) در تعیین دمای سطح محصولات و تفکیک برنج از دیگر محصولات استفاده شد. این موضوع با این فرضیه است که مزرعه برنج بدلیل وجود رطوبت بالا در سطح خاک در مقایسه با دیگر محصولات زراعی موجود در منطقه، دمای سطح کمتری دارد و تحت تأثیر رطوبت منطقه قرار می‌گیرد.	اصغری و همکاران، ۲۰۲۳ رونگلی و همکاران، ۲۰۱۸
شاخص (AWEInsh)	$$\text{AWEINH Index} = 4\times(\text{Green}-\text{SWIR1})-(0.25\times\text{NIR})-(2.75\times\text{SWIR2}) \quad (5)$$	این شاخص نشان‌دهنده میزان آب در شرایط انواع مختلف اختلالات محیطی است. هدف استفاده از این شاخص در پژوهش حاضر، بهبود دقت تفکیک سطح زیر کشت برنج سنتی به‌صورت غرقاب دائم از سامانه کشت خشکه‌کاری با روش مدیریت آبیاری متناوب به دلیل تفاوت در میزان آب آبیاری و رطوبت خاک در مزرعه است.	کاپلان و همکاران، ۲۰۱۷ فییسا و همکاران، ۲۰۲۱
شاخص NPP	پروداکت آماده الگوریتم WAPOR	این شاخص بیان‌کنندۀ آن است که فتوسنتز چگونه دی‌اکسیدکربن را به زیست‌توده (بیوماس) تبدیل می‌کند. تولید اولیهٔ خالص (NPP) با استفاده از الگوریتم WAPOR به‌صورت میانگین ۱۰ روزه با وضوح فضایی 248.2 متر موجود است. تفاوت بین زیست‌توده ناشی از روش خشکه‌کاری و کشت سنتی برنج به‌علت تفاوت در تاریخ کاشت و مدیریت آبیاری باعث شد تا از این شاخص به‌عنوان یک فرضیه مهم برای تفکیک این دو سامانهٔ کشت استفاده شود.	https://wapor.apps.fao.org/home/WAPOR_2/1

* NIR: Band 8A Sentinel-2, RED: Band 4 Sentinel-2, BLUE: Band 2 Sentinel-2, Green: Band 3 Sentinel-2, SWIR1: Short-Wavelength Infrared (Band11 Sentinel-2, 1610 nm), SWIR2: Short-Wavelength Infrared (Band12 Sentinel-2, 2190 nm)

روش تهیه نقشه‌های زمانی-مکانی ETa و WP_{ET} در مدیریت‌های مختلف کاشت و آبیاری

بعد از تهیه نقشه گیاهی برنج (RCM) به‌تفکیک روش‌های سنتی و خشکه‌کاری که در سطح زیر حوضه‌های آبریز استان انجام شد، در این مرحله برای تعیین ETa و WP_{ET} از پایگاه داده‌ای WAPOR در محیط پلتفرم GEE استفاده شد. نسخه WAPOR2.0در ژوئن ۲۰۱۹ راه اندازی شد و برای ایران در سطح ۱ ارائه شده است. پایگاه داده‌ای WAPOR در مورد کشور ایران از پشتیبانی داده‌های همچون مادیس[1]، سنتینل ۲، لندست، ERA5 برخوردار بوده و دارای تفکیک مکانی ۲۴۸/۲ متر است. برتری اصلی برآورد تبخیر (E)، تعرق (T)، تبخیر از سطح برگ (I)[2] و تبخیر-تعرق (ET) با استفاده از پایگاه WAPOR، فراهم ساختن امکان برآورد متغیرهای مورد نظر به‌صورت واقعی، مکانی و سری زمانی است. در این پژوهش، نقشه‌های زمانی (در ماه‌های مختلف رشد) و مکانی (در زیر حوضه‌های مختلف آبریز و همچنین وضعیت تغییرات در خود زیر حوضه‌ها) با هدف تشخیص نقاط بحرانی در سطح مورد مطالعه به تفکیک روش کشت و مدیریت آبیاری محصول برنج، ارزیابی و تحلیل شد؛ بنابراین خروجی‌ها الگوریتم شامل؛ تهیه نقشه‌های تبخیر-تعرق واقعی (ETa)، زیست‌توده (Bio) و بهره‌وری واقعی آب (WP_{ET}) بود. الگوریتم WAPOR، داده‌های ETa وWP_{ET} را بر اساس میانگین ده روزه ارائه می‌دهند که می‌توان به‌صورت میانگین ماهانه و در نهایت فصلی برآورد کرد. در این پژوهش نقشه‌های زمانی- مکانی WP_{ET} بر پایه زیست‌توده با کدنویسی در محیط GEE با استفاده از پورتال WAPOR و فرمول‌نویسی در محیط نرم‌افزار Arc Map برآورد شد. شاخص NPP بر اساس شاخص گیاهی NDVI، با دو منبع تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های هواشناسی برآورد می‌شود که معیاری برای رشد زیست‌توده در لایه‌های سطحی و زیرین خاک است (پن و همکاران، ۲۰۱۴؛ ویریستریتی و همکاران، ۲۰۰۲). از طرفی الگوریتم WAPORمقدار NPP را بر پایه مدل مانتیث (۱۹۷۲) که وجود یک رابطه خطی بین نرخ NPP و سرعت جذب انرژی خورشیدی توسط شاخ و برگ به‌عنوان راندمان تبدیل تابش جذب‌شده به ماده خشک است، نشان می‌دهد (مک‌کالوم و همکاران، ۲۰۰۹) (جدول ۴).

جدول ۴- مؤلفه‌ها، ماهواره‌های مورد استفاده برای بازیابی اطلاعات، دقت زمانی و مکانی داده‌های پرتال FAO-WAPOR

سطح پرتال در ایران	متغیرها	مؤلفه‌های ورودی	ماهواره‌ها	دقت زمانی و مکانی	توضیحات
L3	NPP	تابش خورشیدی	MSG, MERRA/ GEOS-5	1.67 دقیقه‌ای-15کیلومتر 25 کیلومتر- روزانه	-
		تنش رطوبتی خاک	Landsat, MERRA/ GEOS-5	30-60 متر -16-5 روز 25 کیلومتر- روزانه	کیفیت کم در شرایط ابری/ بارانی
		کاربری اراضی	Landsat	30-60 متر - 16-5 روز	-
		داده‌های هواشناسی	MERRA/ GEOS-5	25 کیلومتر- روزانه	-
		بارش	TRMM, GPM		-
		FAPAR	Landsat	30-60 متر - 16-5 روز	-
	ET_a	-	-	-	مجموع تبخیر (E)، تعرق (*T*) و برگاب (I) ا ست. رابطه پنمن مانتیث برای محاسبه تبخیر از روی خاک، تعرق با استفاده از تاج پوشش گیاهی و برگاب با پو شش گیاهی، شاخص سطح برگ و بارش استفاده می‌شود.

1 -Modis

2 -Evaporation from rainfall intercepted by leaves

رابطه (۶)، مبانی محاسبه زیست‌توده (B) از شاخص NPP را بیان می‌کند.

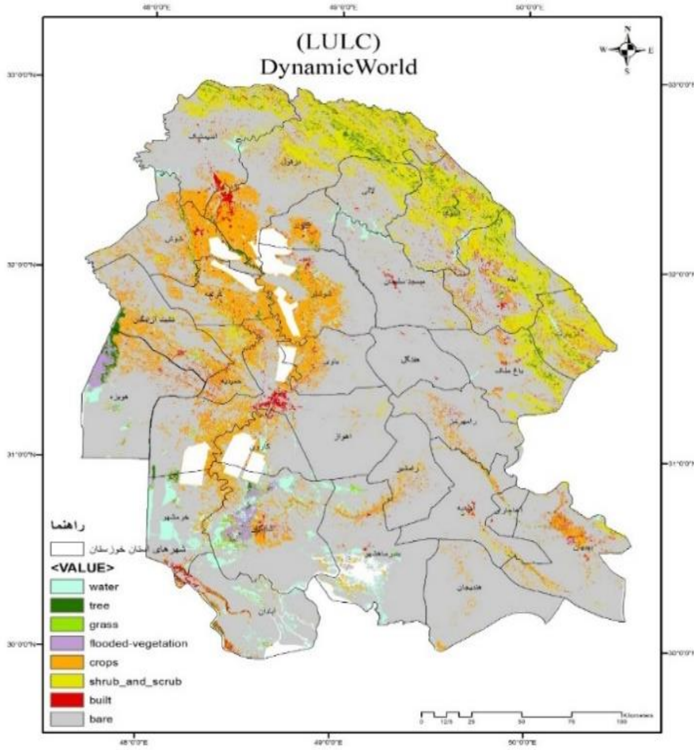
$$B = AOT \times f_c \times \frac{NPP}{(1-MC)} \times 22.2 \qquad (۶)$$

AOT؛ نسبت اندام هوایی به ریشه است؛ بنابراین برای حذف تأثیر ریشه از زیست‌توده کل، AOT استفاده می‌شود که این ضریب برای محصول برنج، یک است (آلمایهو و همکاران، ۲۰۲۰). MC ؛ ضریب رطوبت محصول است که برای برنج برابر ۰/۲ است (یلما و همکاران، ۲۰۱۷). Fc ، ضریب تصحیح نوری بوده که برای گیاهان C4 باید اعمال گردد. این مسئله به این دلیل است که شاخص NPP برای گیاهان C3 تعریف شده است. با توجه به گیاه برنج که گیاه C3 است نیاز به اعمال این ضریب نیست. همچنین برای تبدیل واحد NPP (گرم کربن بر مترمربع در روز) به واحد کیلوگرم ماده خشک بر هکتار در روز (واحد زیست‌توده)، رابطه فوق در عدد ۲۲/۲۲۲ ضرب خواهد شد (فائو،۲۰۲۰؛ آجور، ۲۰۲۱). بعد از خروجی داده‌های WAPOR برای تطبیق و تدقیق داده‌های این الگوریتم، نتایج را با داده‌های گزارش‌های تحقیقاتی و نتایج کارهای مشاهده‌ای مستند بر اساس خروجی‌های مزرعه‌ای که در خوزستان انجام شده است، مقایسه و تحلیل گردید.

نتایج و بحث

تعیین سطح زیر کشت برنج به تفکیک روش کاشت و مدیریت مختلف آبیاری

نقشهٔ کاربری زمین/ پوشش زمین (LULC) محدودهٔ استان خوزستان با استفاده از پروداکت DW برحسب طبقه‌بندی‌های مختلف با دقت تقریبی ۹۳ درصد در شکل (۲) آورده شده است. در گام اول که تفکیک مزارع برنج از محصولات زراعی غیر برنج بود (محصولاتی که دارای تاریخ کشت یا دوره رشد هم‌زمان با برنج داشتند)، میزان شاخص‌های مختلف با ترکیب باندهای متفاوت جهت تفکیک مکانی با تشخیص بهینه به‌شرح جدول (۵) ارائه شده است.



شکل ۲- نقشه کاربری زمین/ پوشش زمین استان خوزستان با استفاده از پروداکت داینامیک وورد (DW)

(Waterپهنه‌های آبی)؛ (tree باغات)؛(grass مراتع)؛(flooded-vegitation تالاب)؛(crops محصولات زراعی)؛(shrub&scrub بیشه‌زار)؛(built ساختمان و شهر)؛(bare بایر)

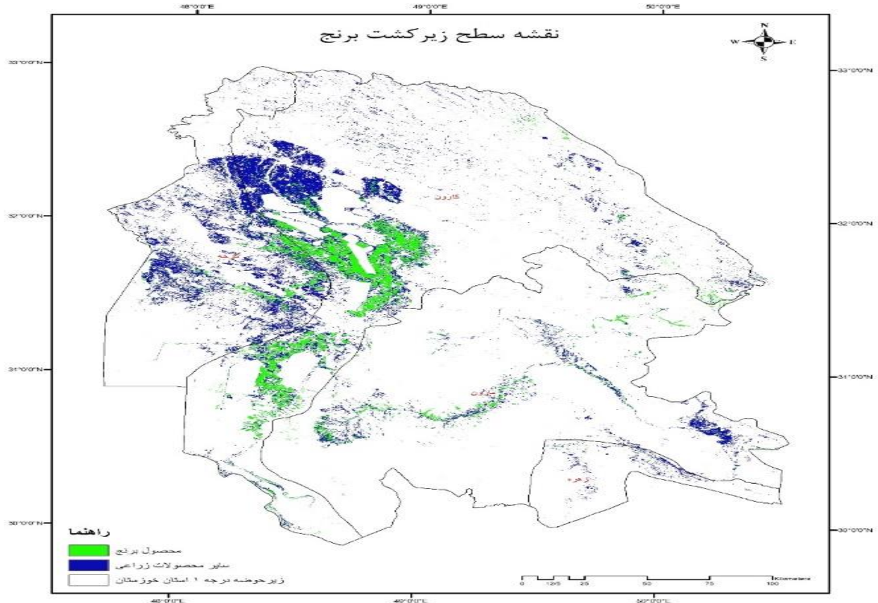
جدول ۵- مقایسه شاخص‌های مناسب در تفکیک سطح زیر کشت برنج و سایر محصولات زراعی

شاخص‌های منتخب	VV&VH		SWIR		ST_B10		LSWI		EVI		LAI	
	برنج	غیر برنج	برنج	غیر برنج	برنج	غیر برنج	برنج	غیر برنج	برنج	غیر برنج	برنج	غیر برنج
مقادیر تصادفی شاخص‌ها	310.396	1098.605	0.161	0.333	314.858	341.756	0.061	-0.125	0.512	0.215	1.734	0.659
	320.203	1005.583	0.141	0.361	314.377	341.993	0.061	-0.119	0.367	0.168	1.211	0.489
	499.823	856.978	0.147	0.328	313.858	340.127	0.030	-0.114	0.311	0.195	1.008	0.586
	694.666	977.234	0.149	0.353	313.921	340.433	0.028	-0.120	0.448	0.160	1.501	0.461
	400.374	1163.236	0.157	0.337	316.104	341.300	0.058	-0.126	0.350	0.230	1.148	0.715
	788.330	1013.038	0.180	0.369	314.830	341.216	0.050	-0.129	0.318	0.172	1.032	0.503
	518.585	956.413	0.099	0.354	314.357	341.135	0.166	-0.114	0.450	0.207	1.509	0.631
	484.594	905.711	0.106	0.347	314.032	341.084	0.276	-0.120	0.580	0.208	1.981	0.633
	562.158	978.046	0.106	0.330	314.877	341.703	0.289	-0.123	0.500	0.198	1.690	0.597
	516.626	737.983	0.109	0.295	317.134	332.848	0.264	-0.129	0.615	0.207	2.108	0.630
میانگین شاخص‌ها	**509.576**	**969.283**	**0.136**	**0.341**	**314.835**	**340.360**	**0.128**	**-0.122**	**0.445**	**0.196**	**1.492**	**0.590**

میزان شاخص‌ها در جدول ۵ به‌صورت تصادفی در مزارع برنج و زراعت‌های غیربرنج برداشته شد. بر اساس این جدول مشاهده می‌شود که شاخص‌های حساس در هر دو نوع زراعت، تفاوت‌های محسوسی داشته که عاملی صحیح در تشخیص مزارع برنج بود. شاخص LAI که نمایانگر سبزینگی برگ‌ها با فتوسنتز فعال است در محصول برنج با میزان متوسط ۱/۴۹ نسبت به سایر محصولات زراعی (با میانگین ۰/۵۹) تفاوت محسوسی داشت. این مهم در شاخص EVI هم بدین ترتیب بود (میزان متوسط ۰/۴۵ برنج در مقابل ۰/۱۹۶ محصولات زراعی غیر برنج). دلیل این مسئله متراکم بودن پوشش گیاهی برنج و سبزینگی بالا این محصول است که شاخص‌های مذکور به این موارد حساس هستند (توجه به جدول ۳). این در حالی است که کشت سایر محصولات زراعی غیر برنج در تابستان معمولاً به‌صورت ردیفی و با تراکم پایین است. لازم به ذکر است همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، اراضی نیشکر کاملاً تفکیک و حذف شدند. در بررسی شاخص LSWI (شاخصی که به رطوبت خاک حساس بوده و در پایش این نمایه استفاده می‌شود)، مشخص شد که مزارع برنج به دلیل بالا بودن رطوبت محیط با استفاده از این شاخص قابل‌تشخیص است. این مهم یعنی بالا بودن رطوبت محیط در مزارع برنج که کاهش دما محیطی را به‌همراه دارد باعث شد که شاخص دما (ST-B10 یا LST) عاملی مؤثر در شناخت این محصول باشد، به‌طوری‌که میزان متوسط شاخص ST-B10 در مزارع منتخب برنج ۳۱۴/۸۳ و در مزارع غیر برنج ۳۴۰/۳۶ بود. در بررسی شاخص ترکیبی VV, VH، این شاخص از باندهای ماهواره سنتینل ۱ هستند که نمایه‌ای مهم برای تشخیص پوشش گیاهی بوده و نسبت به رطوبت محیط حساس هستند. به‌همین دلیل مزارع برنج به‌علت رطوبت بسیار بالا نسبت به سایر محصولات زراعی منطقه در استفاده از این شاخص قابل تشخیص بوده و میانگین اعداد انتخابی شاخص در مزارع برنج تفاوت محسوسی با مزارع غیر برنج داشتند. از ماهواره سنتینل ۱ در پایش تغییرات مراحل رشد محصولات کشاورزی استفاده می‌شود به‌طوری‌که نتایج پروژه تحقیقاتی کوپرنیکاس[1] که برای تشخیص مزارع برنج ویتنام انجام شد، نشان داد که تصاویر ماهواره سنتینل ۱، پایش کاملی از مراحل رشد برنج را به تصویر می‌کشد. این نتایج مشخص کرد که حسگرهای راداری این ماهواره در شناسایی مزارع غرقاب شده و عبور از محیطی با رطوبت بالا در اطراف مزارع برنج بسیار مفید بودند (ESA, 2020). در نهایت بر طبق جدول ۵، شاخص SWIR باند ۱۲ ماهواره سنتینل ۲ نیز برای اندازه‌گیری رطوبت خاک و تشخیص پوشش گیاهی استفاده شد که تضاد خوبی بین انواع مختلف پوشش‌های گیاهی ایجاد کرد. در استفاده از شاخص‌های جدول ۵، نتیجهٔ طبقه‌بندی به‌صورت تفکیک مکانی در حدود ۱۰ متر با پیکسل‌هایی با

1 - Copernicus

مساحت ۰/۰۰۸۵ هکتار بدست آمد. به‌دلیل این تفکیک مکانی، احتمال وجود لکه‌هایی از کلاس‌های دیگر برای تشخیص بهینه، بالاتر رفت. نتایج نشان‌دهنده دقت بالای برآورد بود، به‌طوری‌که با دقت کلی ۹۴/۹۲ درصد در تفکیک برنج از دیگر محصولات زراعی و ضریب کاپای ۰/۸۵، سطح زیر کشت برنج در استان خوزستان حدود ۱۷۹۹۴۲ هکتار برآورد شد (شکل ۳).



شکل ۳- نقشهٔ موقعیت کشت برنج به تفکیک از سایر محصولات در زیر حوضه‌های آبریز استان خوزستان

همچنین میزان شاخص‌های مورد استفاده که به‌صورت تصادفی از مزارع برنج جهت تشخیص بهینه و تفکیک به دو کلاس برحسب سامانهٔ کشت و مدیریت آبیاری (کشت سنتی برنج با غرقاب دائم و سامانهٔ کشت مستقیم بذر در بستر خشک با مدیریت متناوب دو تا چهار روزه آبیاری)، انتخاب گردید در جدول ۶ آورده شده است.

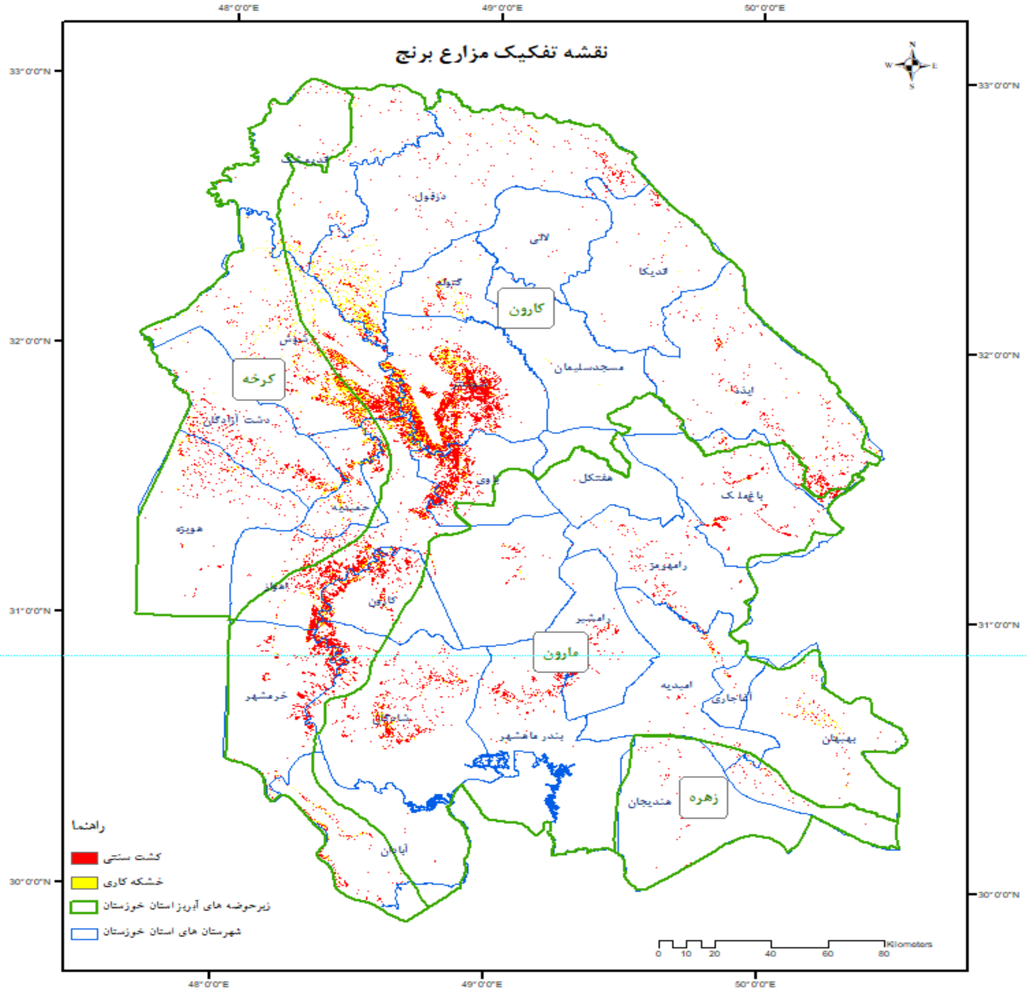
جدول ۶ -مقایسه شاخص‌های مناسب در تفکیک سطح زیر کشت سنتی برنج با غرقاب دائم از خشکه‌کاری

شاخص‌های منتخب	VV&VH		NPP		ST_B10		AWEInsh		LSWI	
	خشکه‌کاری	غرقاب‌سنتی	خشکه‌کاری	غرقاب‌سنتی	خشکه‌کاری	غرقاب‌سنتی	خشکه کاری	غرقاب سنتی	خشکه‌کاری	غرقاب‌سنتی
مقادیر تصادفی شاخص‌ها	608.874	632.531	137.36	239.12	312.508	310.657	-5036	-7374.88	0.386	0.455
	561.732	557.718	107.30	210.64	312.696	310.768	-7247.75	-8693	0.430	0.478
	338.545	480.125	74.05	243.44	313.878	310.002	-4706.75	-9416	0.381	0.405
	416.702	546.082	77.58	185.83	313.145	311.862	-6535.50	-7426	0.332	0.396
	553.286	535.796	80.62	191.90	312.245	311.583	-2752.25	-8510	0.393	0.479
	503.100	672.859	123.50	268.50	314.449	311.874	-9605.00	-9665	0.169	0.364
	442.320	500.465	102.36	457.33	313.461	312.764	-5347	-8257.5	0.177	0.353
	364.594	574.839	111.56	174.12	313.559	312.161	-8935.50	-8905	0.249	0.343
	691.156	574.274	103.60	272.96	315.967	313.165	-6310	-10369.25	0.369	0.317
	472.042	433.247	58.36	152.94	313.414	309.980	-9135.88	-9818	0.258	0.338
میانگین شاخص‌ها	**495.235**	**550.793**	**97.629**	**239.678**	**313.532**	**311.482**	**-6561.16**	**-8843.46**	**0.315**	**0.393**

آنچه از جدول ۶ قابل مشاهده این است که میزان متوسط شاخص LSWI، در مزارع خشکه‌کاری به‌میزان ۲۰ درصد نسبت به مزارع کشت سنتی با غرقاب دائم کمتر بود. این مهم به‌دلیل تفاوت رطوبت خاک ناشی از دور آبیاری سه تا پنج روز در مزارع خشکه‌کاری نسبت به مزارع سنتی است. بر این اساس می‌توان بیان کرد که شاخص LSWI به‌دلیل حساسیت به اختلاف رطوبت محیط، یکی از مهم‌ترین نمایه‌ها در تفکیک این دو روش در کاشت و

مدیریت آبیاری خواهد بود. در بررسی شاخص مهم AWEInsh (شاخصی که میزان آب و رطوبت محیط را در شرایط مختلف اختلالات محیطی نشان می‌دهد)، تفاوت محسوس اختلاف مزارع برنج در روش‌های خشکه‌کاری با مدیریت متناوب آبیاری و کشت سنتی با غرقاب دائم به علت تفاوت در میزان آب آبیاری در مزارع و موجودیت رطوبت خاک و محیط، مشاهده می‌شود. شاخص AWEInshبرای استخراج آب از تصاویر ماهواره‌ای استفاده می‌شود. در شرایط کشت برنج، مقادیر این شاخص منفی است. این مسئله به‌دلیل غرقاب بودن مزارع برنج است. در شرایط غرقابی، سطح آب به‌طور مداوم بالا است و ممکن است با پوشش گیاهی یا خاک مرطوب ترکیب شود. این وضعیت می‌تواند باعث شود که شاخص AWEInsh مقادیر منفی‌تری نشان دهد، زیرا بازتاب نوری آب و پوشش گیاهی با هم ترکیب می‌شوند و شاخص به درستی نمی‌تواند آب را از سایر عناصر تفکیک کند. تراکم بالای گیاهان برنج نیز بازتاب نوری را تغییر داده و بر کاهش مقدار این شاخص می‌افزاید. در شرایطی که از کشت برنج که غرقاب دائمی نبوده (مانند مدیریت خشکه کاری)، خاک مرطوب توسط این شاخص از آب قابل تفکیک است هرچند باز شاخص در شرایط منفی است اما میزان آن کمتر است (جدول ۶) (فییسا و همکاران، ۲۰۱۴). بر همین اساس افزایش درجه حرارت محیط در مزارع برنج خشکه‌کاری نسبت به روش کشت سنتی دور از انتظار نبود (شاخص ST_B10)؛ اما مهم‌ترین شاخص در شناخت مزارع برنج با روش خشکه‌کاری از کشت سنتی، NPP بود. این شاخص که مشخص‌کننده زیست‌توده محصول است، به دلیل تأخیر در زمان کاشت روش خشکه‌کاری نسبت به کشت سنتی که باعث کاهش میزان زیست‌توده محصول خواهد شد، می‌تواند نمایه‌ای مهم در تفکیک این دو روش کاشت باشد. بر این اساس، در جدول ۶ مشاهده می‌شود که میانگین میزان شاخص NPP در مزارع برنج با روش کشت خشکه‌کاری و مدیریت متناوب آبیاری به میزان ۵۹ درصد نسبت به روش کشت سنتی با غرقاب دائم کمتر بود.

در نهایت شاخصVV&VH ، همانطور که در جدول ۵ در مورد این شاخص توضیح داده شد، انتظار می‌رود که در روش خشکه‌کاری که آب موجود و رطوبت خاک کمتر است، میزان این شاخص هر چند نامحسوس اما کمتر باشد، اما این حقیقت در تمام نمونه‌ها صدق نمی‌کرد؛ بنابراین مناسب‌ترین شاخص‌ها در تفکیک مزارع برنج با مدیریت‌های مختلف کاشت و آبیاری، LSWI، AWEInsh، NPP بودند. در نهایت نتایج به‌دست آمده در استفاده از میزان شاخص‌های جدول ۶، سطح زیر کشت برنج برای سال ۱۴۰۲ در کل استان خوزستان با سامانهٔ سنتی و مدیریت آبیاری غرقاب دائم، ۱۳۶۷۷۰ هکتار و برای روش خشکه‌کاری با مدیریت متناوب آبیاری، ۴۳۱۷۲ هکتار نشان داد. در این شرایط، دقت کلی تفکیک مزارع برنج برحسب نوع کشت در حدود ۹۹/۶۵ % و ضریب کاپای ۰/۸۷ بود (شکل ۴). لازم به ذکر است که شکل (۴) در بازه زمانی مرداد تا نیمه شهریورماه تهیه شد که کشت برنج در استان تکمیل‌شده و دوره پیک مصرف نیاز آبی را طی می‌کند. محدوده زیرحوضه کارون شامل کارون علیا، کارون سفلی و دز (بر طبق شکل ۱) می‌باشد.



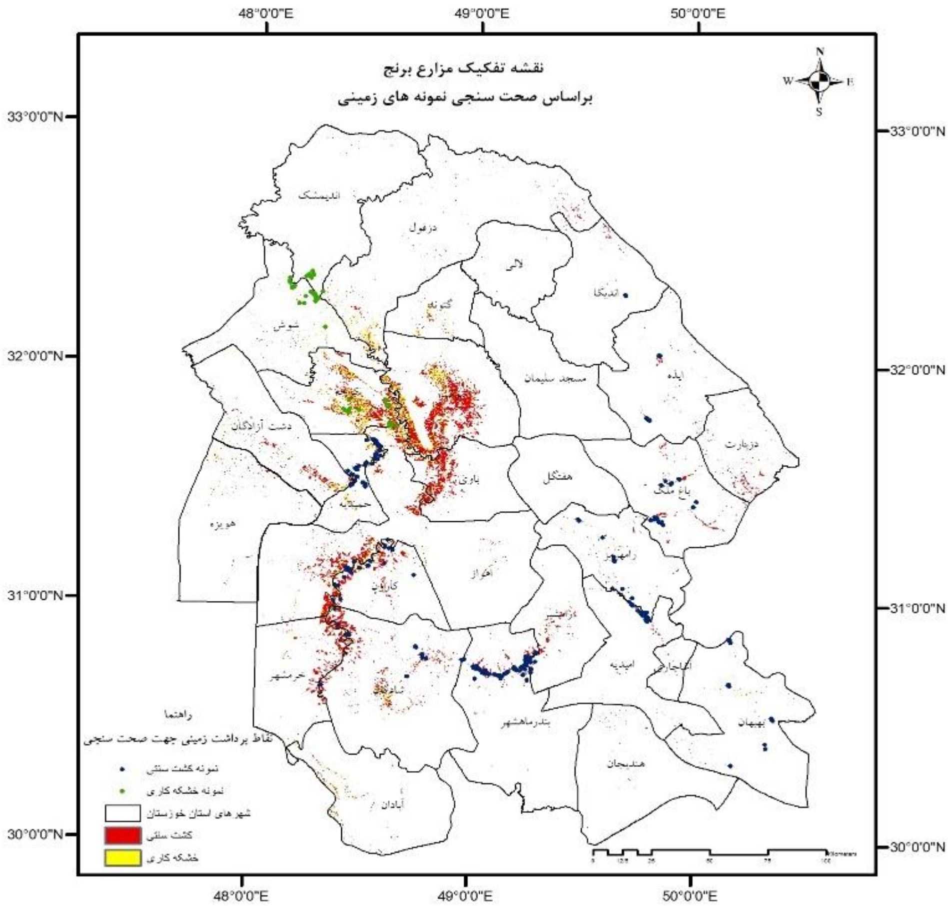
شکل ۴- نقشهٔ موقعیت برنج برحسب سامانهٔ کاشت و آبیاری در محدوده زیر حوضه‌های آبریز و شهرستان‌های خوزستان

با توجه به شکل (۴)، براساس برش در محدودهٔ زیر حوضه‌های آبریز، سطح زیر کشت برنج با توجه به روش کاشت و مدیریت آبیاری برای هر زیر حوضه در جدول (۷) آورده شده است. نتایج نشان داد که تمرکز کشت برنج در زیر حوضهٔ آبریز کارون با سطح زیر کشت بالغبر ۱۲۶۰۰۰ هکتار بود. بیشترین سطح زیر کشت در این زیرحوضه، از پایین‌دست سد گتوند (ورود به جلگه خوزستان) تا جنوب غرب استان (شهرستان خرمشهر) بود. در زیر حوضهٔ کارون، بالغبر ۹۵۰۰۰ هکتار کشت سنتی و ۳۰۶۰۲ هکتار خشکه‌کاری با آبیاری متناوب (دور آبیاری دو تا چهار روزه) اجرا شد که بیشترین سطح را در دو روش کاشت برنج در کل استان در برداشت.

جدول ۷- سطح زیر کشت برنج (هکتار) به تفکیک زیر حوضه‌های آبریز درجه یک خوزستان با توجه به سامانهٔ کشت و مدیریت آبیاری

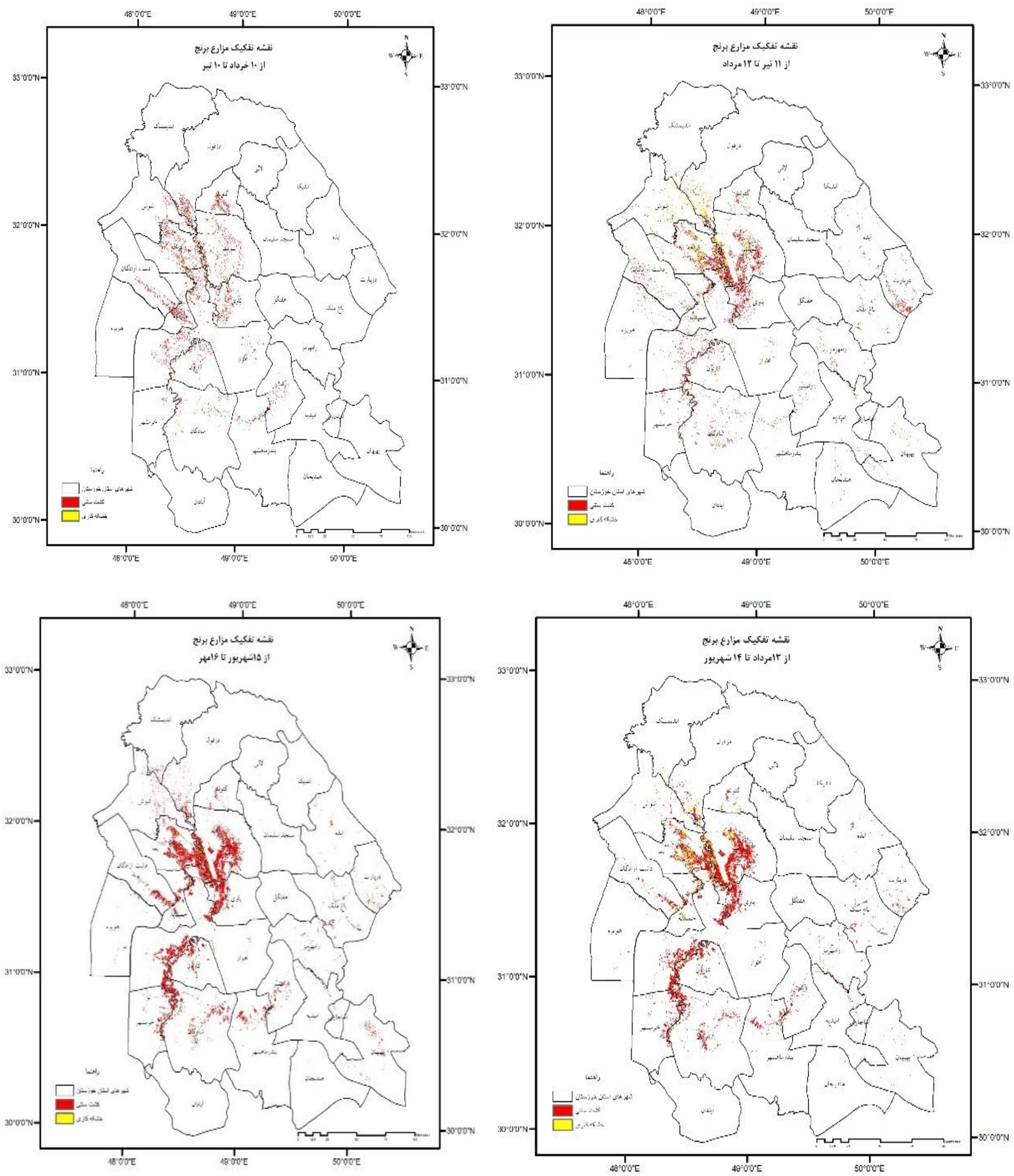
زیر حوضهٔ آبریز	سامانه کشت و مدیریت آبیاری		سطح زیر کشت
	کشت سنتی با غرقاب دائم	خشکه‌کاری با مدیریت متناوب آبیاری	مجموع سطوح با روش کشت‌های مختلف
کارون	95460	30602	126062
کرخه	24132	10613	34745
مارون-جراحی	17077	1910	18987
زهره-هندیجان	101	47	148
جمع نهایی	**136770**	**43172**	**179942**

در زیر حوضهٔ آبریز کرخه پایین‌دست سد که محدودیت منابع آب دارد، ۱۰۶۱۳ هکتار در محدوده زمانی مذکور (تابستان ۱۴۰۲)، کشت به روش خشکه‌کاری با مدیریت متناوب آبیاری اجرا شد. با توجه به شکل (۴)، در پایین‌دست زیر حوضه کرخه محدوده شهرستان‌های حمیدیه، دشت آزادگان و هویزه با وجود این‌که در انتهای حوضهٔ کرخه بزرگ قرار دارند، متاسفانه بیشترین سطح زیر کشت برنج با روش سنتی (کشت بذر جوانه‌دار در بستر مرطوب) همراه با غرقاب دائم را در این زیر حوضه به خود اختصاص داده‌اند (۸۶۲۳ هکتار کشت سنتی در مقابل ۶۰۶ هکتار خشکه‌کاری). این موضوع از نظر راهبردی می‌تواند تأثیر منفی بسیاری بر تالاب هورالعظیم به‌عنوان زیست‌بوم منطقه، تأمین آب برای کشت‌های پاییزه و مسائل شرب منطقه داشته باشد. این مسئله برای شهرستان‌های شادگان، خرمشهر و آبادان که محدودهٔ اراضی آن‌ها در انتهای حوضهٔ کارون بزرگ قرار دارند، نیز صادق است (۲۰۳۳۶ هکتار کشت سنتی در مقابل ۳۵۰۰ هکتار خشکه‌کاری). برداشت بی‌رویهٔ آب در زیر حوضهٔ کارون، به‌خصوص در نبود مدیریت آب در مزرعه در روش‌های کشت سنتی برنج و با تأمین آب برای نخیلات، کاهش کیفیت آب کارون و هجوم آب شور خلیج‌فارس و اروندرود (در اثر اختلاف چگالی آب بین آب شور و شیرین ناشی از کاهش حجم آب کارون در پایین‌دست) را به سمت شهرستان‌های آبادان و خرمشهر در پی خواهد داشت. زیر حوضهٔ آبریز مارون–جراحی از این بابت که منتهی‌الیه آن به تالاب شادگان ختم می‌شود، بسیار مهم است. بررسی شکل ۴ و جدول ۷ نشان می‌دهد که کشت سنتی برنج در این زیر حوضه بسیار رایج است، با این همه در قسمت‌هایی از آن به‌صورت پراکنده نیز مبادرت به کشت خشکه‌کاری کرده‌اند. در نهایت برای صحت‌سنجی نقشه‌های خروجی نسبت به واقعیت زمینی، از ۴۲۵ نمونه‌ی زمینی که به‌صورت پراکنده از مزارع برنج با روش‌های کاشت مختلف (به‌جز مزارعی که قبل از تهیه نقشه گیاهی نمونه گرفته شده بود) اخذ شده بود، استفاده گردید. نقاط مزارع نمونه‌برداری شده و نقشه تفکیک محصول در محیط Arc Map روی‌هم قرار داده شد (شکل ۵). تمام نمونه‌های زمینی در مزارع برنج که توسط الگوریتم یادگیری ماشین در محیط GEE تهیه شده بود، به تفکیک روش کاشت قرار گرفت که خود مؤید صحت بالای این روش در تشخیص محصول است.



شکل ۵- نقشهٔ صحت‌سنجی موقعیت کشت برنج مستخرج از روش سنجش‌ازدور با داده‌های زمینی

نتایج پایش سطح کشت برنج نشان می‌دهد که میزان سطح خشکه‌کاری برنج با مدیریت متناوب آبیاری تقریباً یک سوم میزان سطح روش کشت سنتی برنج با غرقاب دائم است (جدول ۷). هرچند ممکن است در سطح وسیع‌تری از استان به استفاده از روش کشت مستقیم بذر در بستر خشک (خشکه‌کاری) مبادرت داشته باشند؛ اما آنچه اهمیت دارد این است که سامانهٔ خشکه‌کاری یک روش کاشت است و سامانه کشت به‌تنهایی تأثیری در کاهش حجم آب آبیاری و آب مصرفی گیاه ندارد، بلکه این مدیریت آبیاری متناوب بر اساس میزان تخلیهٔ مجاز رطوبتی گیاه برنج است که در کنار سامانهٔ کاشت باعث کاهش محسوس آب آبیاری و آب مصرفی گیاه می‌شود. این موضوع روشن می‌سازد که در سطح استان با وجود استفاده از روش کشت خشکه‌کاری، متاسفانه در بعضی مناطق از تناوب آبیاری استفاده نمی‌شود و مانند روش‌های سنتی به‌صورت روزانه یا غرقاب دائم آبیاری می‌کنند. این مسئله در اواخر شهریور تا اواخر مهرماه (زمان پر شدن دانه) بسیار محسوس بود. شکل (۶)، تغییرات سطح زیر کشت برنج با روش‌های کاشت مختلف را از خردادماه (شروع کشت برنج در خوزستان) تا نیمهٔ مهرماه (پر شدن دانه و انتهای فصل کشت) نشان می‌دهد. همچنین جدول (۸) با اجرای برش برای طبقه‌بندی‌های مختلف سامانه کاشت در ماه‌های مختلف رشد محصول، سطح زیر کشت روش سنتی برنج با غرقاب دائم، نسبت به روش خشکه‌کاری با مدیریت متناوب آبیاری را نشان می‌دهد.



شکل ۶- نقشهٔ موقعیت کشت برنج به تفکیک سامانهٔ کشت و مدیریت آبیاری در بازه زمانی خرداد (شروع کشت) تا نیمه مهرماه

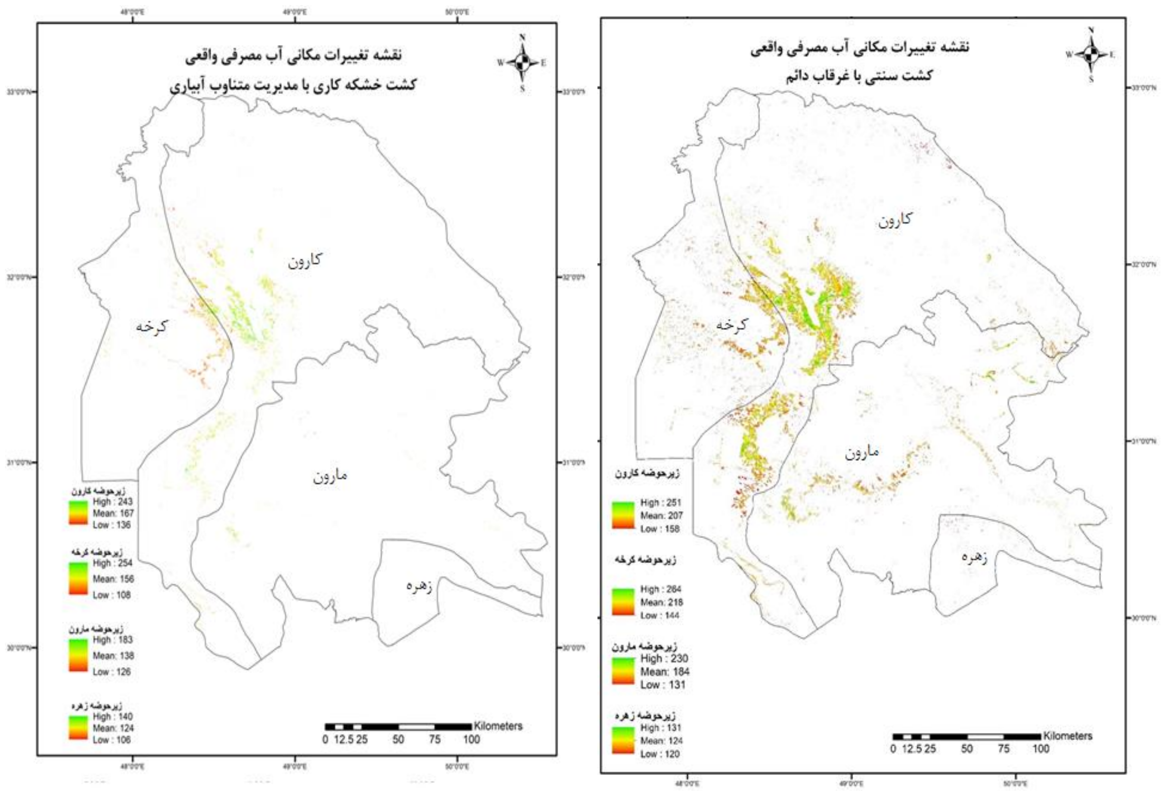
جدول ۸- سطح زیر کشت برنج (هکتار) خوزستان به تفکیک ماه‌های فصل کاشت و داشت با توجه به سامانهٔ کشت و مدیریت آبیاری

	سامانهٔ کشت و مدیریت آبیاری		سطح زیر کشت در هر زیر حوضه
بازه زمانی	کشت سنتی با غرقاب دائم	خشکه کاری با مدیریت متناوب آبیاری	مجموع سطوح با روش کشت‌های مختلف
۱۰ خرداد – ۱۰ تیر	84968	4003	88972
۱۱ تیر – ۱۲ مرداد	123649	31627	155276
۱۳ مرداد – ۱۴ شهریور	136770	43172	179942
۱۵ شهریور – ۱۶ مهر	174638	5304	179942

آنچه از جدول ۸ استنباط می‌شود این است که روش خشکه‌کاری از اواخر خردادماه آغاز می‌شود. این در حالی است که آغاز کشت سنتی برنج حدود یک‌ماه زودتر است. یکی از دلایل کاهش عملکرد روش خشکه‌کاری همین تاریخ کاشت و دوره رشد کوتاه‌تر است (گیلانی و همکاران، ۱۳۹۵). بر اساس جدول ۸، از اواخر تیرماه تقریباً سطح زیر کشت برنج در خوزستان تکمیل‌شده است؛ اما موضوع بسیار قابل توجه این است که از اواخر شهریورماه سطح زیر کشت برنج با روش خشکه‌کاری کاهش محسوس یافته است که بدان معنی نیست که برداشت مزارع آغاز شده است، بلکه همان‌طور که در پیش اشاره شد، کشاورزان از اواخر شهریورماه که مقارن با تشکیل گل‌دهی برنج است، مدیریت آبیاری را از تناوب خارج می‌کنند و به سمت آبیاری روزانه تغییر می‌دهند. این نوع مدیریت تا زمان برداشت محصول اتفاق خواهد افتاد. شاخص‌های مهم قابلیت تشخیص مزارع برنج با استفاده از روش سنجش‌ازدور با الگوریتم یادگیری ماشین بر اساس نوع روش کاشت نشان دادند که مزارع خشکه‌کاری با دور آبیاری روزانه به شرایط کشت سنتی با غرقاب دائم تبدیل شده‌اند. این موضوع می‌تواند تأثیر روش خشکه‌کاری بر کاهش آب آبیاری و آب مصرفی واقعی در سطح حوضه‌های آبریز را تقلیل دهد. از این رو باید به این موضوع مهم توجه داشت که ترویج روش نوین خشکه‌کاری در صورتی به‌عنوان یک فناوری به‌زراعی قابل قبول است که همراه با مدیریت صحیح آبیاری باشد. این مدیریت، رعایت تناوب آبیاری بر اساس تغییرات رطوبت خاک و نمایه گیاهی منطبق با تبخیر–تعرق گیاهی در فصل رشد است و باید تا پایان فصل رشد رعایت گردد. از این‌رو برنج‌کاران در استفاده از روش خشکه‌کاری، به‌منظور جلوگیری از کاهش سطح عملکرد محصول، باید روی تاریخ کاشت و مدیریت تغذیهٔ کودی در کنار مدیریت آبیاری توجه داشته باشند.

تغییرات زمانی-مکانی میزان ETa و WP_{ET} در مدیریت‌های مختلف کاشت و آبیاری

با توجه به اثر روش خشکه کاری با مدیریت متناوب آبیاری بر کاهش آب آبیاری در مزارع خوزستان (گیلانی و همکاران، ۱۳۹۵؛ گیلانی، ۱۳۹۸؛ مسکینی‌ویشکایی و همکاران، ۱۴۰۰ و مختاران و همکاران، ۱۴۰۲)، در این قسمت میزان آب مصرفی واقعی (ETa)، زیست‌توده محصول (Bio) و تغییرات بهره‌وری واقعی آب (WP_{ET}) محصول در مقایسه با روش کشت سنتی با غرقاب دائم برای زیر حوضه‌های مختلف با تغییرات مکانی نشان داده می‌شود تا اثر این فناوری بهتر مشهود گردد. لذا در ابتدا از مرحله کاشت تا زمان پرشدن دانه (نیمه شهریورماه) که تناوب آبیاری در این روش کشت توسط کشاورزان رعایت می‌شود، بررسی گردید (شکل ۷ و جدول‌های ۹ و ۱۰). سپس این نمایه‌ها برای کل دوره رشد بررسی و تحلیل شد.



شکل ۷- نقشه‌های آب مصرفی واقعی (ETa) برحسب میلی‌متر در زیر حوضه‌های آبریز خوزستان بعد از تکمیل عملیات کاشت تا قبل از زمان گلدهی

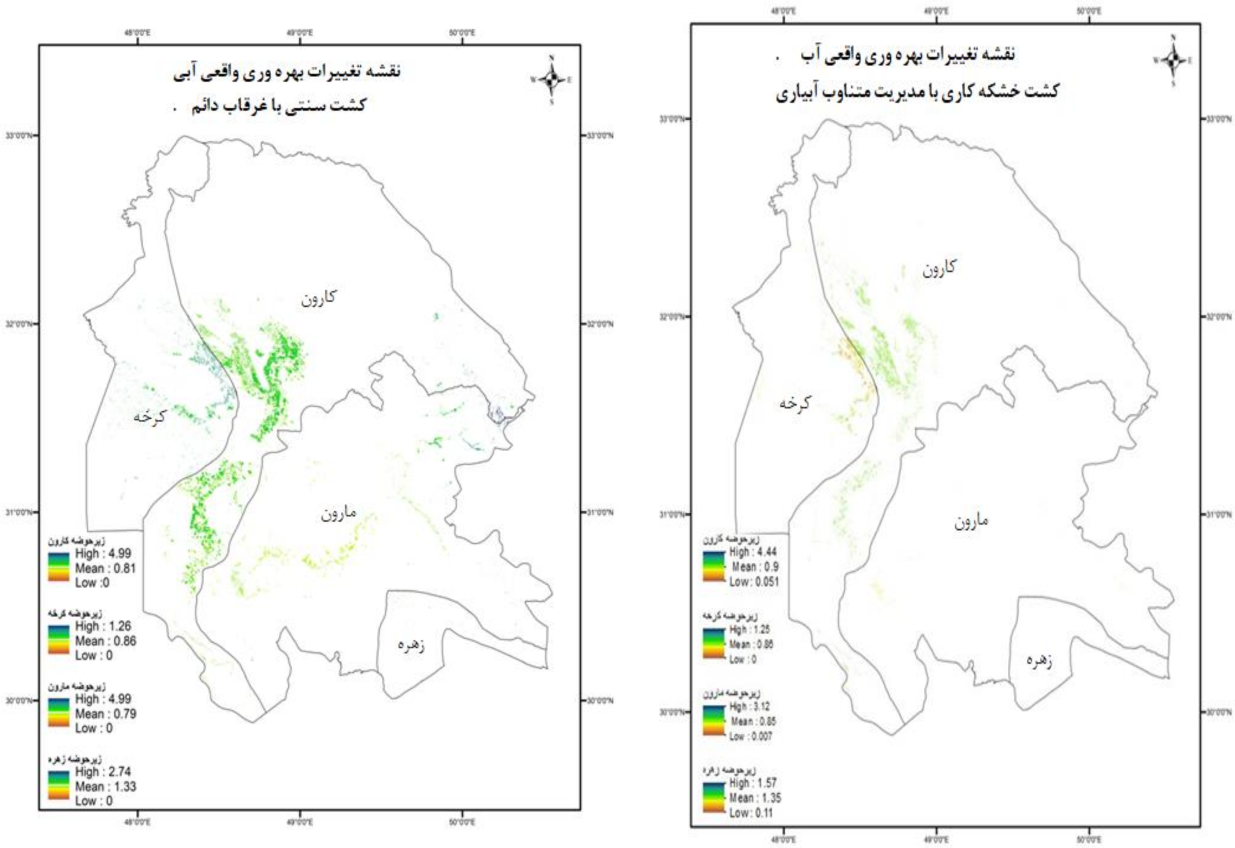
جدول ۹-میزان کاهش آب مصرفی واقعی (ETa) در پیک تراکم کشت با رعایت تناوب آبیاری در روش خشکه‌کاری

زیر حوضه‌های استان	ماه پیک تراکم کشت گیاه برنج (13 مرداد تا 16 شهریور)- دوره کاشت تا زمان گلدهی		
	ETa کشت سنتی با غرقاب دائم (مترمکعب در هکتار)	ETa فناوری خشکه‌کاری با تناوب آبیاری (مترمکعب در هکتار)	میزان کاهش ETa در فناوری خشکه‌کاری با تناوب آبیاری نسبت به کشت سنتی (درصد)
کارون	2070	1670	19
کرخه	2180	1560	28
مارون – جراحی	1840	1380	25
زهره - هندیجان	1650	1520	13

جدول ۱۰-میزان کاهش زیست‌توده و ارتقا بهره‌وری واقعی آب (WP_{ET}) در پیک تراکم کشت با رعایت تناوب آبیاری در روش خشکه کاری

زیر حوضه‌های استان	ماه پیک تراکم کشت گیاه برنج (13 مرداد تا 16 شهریور)- دوره کاشت تا زمان گلدهی			
	زیست‌توده کشت سنتی با غرقاب دائم (کیلوگرم ماده خشک در هکتار)	زیست‌توده روش خشکه‌کاری با تناوب آبیاری (کیلوگرم ماده خشک در هکتار)	میزان کاهش زیست‌توده در فناوری خشکه‌کاری با تناوب آبیاری نسبت به کشت سنتی (درصد)	ارتقا WP_{ET} در فناوری خشکه‌کاری با تناوب آبیاری نسبت به کشت سنتی (با توجه به جدول ۹)
کارون	2937.24	2803.75	4.5	20
کرخه	2565.19	2208.42	14	20
مارون – جراحی	3020.82	2454.98	18.7	8
زهره – هندیجان	1485.45	1393.02	6	1

بر اساس جدول‌های ۹ و ۱۰ منتج از شکل ۷ تا زمان رعایت تناوب آبیاری در خشکه کاری برنج، میزان میانگین وزنی کاهش ETa در کل استان، ۲۴ درصد بود. این در حالی است که بیشترین ارتقا WP_{ET} در این شرایط به زیر حوضه‌های کارون و کرخه برمی‌گردد (افزایشی ۲۰ درصدی). این مسئله به‌دلیل کاهش محسوس ETa (۲۸ درصد برای زیر حوضه کرخه) و یا تولید زیست‌توده مناسب و پایین بودن درصد کاهش زیست‌توده (۴/۵ درصد برای زیر حوضه کارون) در فناوری خشکه‌کاری با تناوب آبیاری نسبت به روش کشت سنتی با غرقاب دائم بود. کیفیت مناسب آب آبیاری و خاک مزارع در مناطق شمالی این زیر حوضه‌ها توانسته فناوری خشکه‌کاری با تناوب آبیاری را مؤثر جلوه دهد. این در حالی است که زیر حوضه های مارون-جراحی و یا زهره-هندیجان، کمترین میزان ارتقا WP_{ET} را در اجرای فناوری خشکه‌کاری با تناوب آبیاری نسبت به کشت سنتی با غرقاب دائم داشتند. این مسئله به‌دلیل کاهش شدید زیست‌توده در این فناوری نسبت به کشت سنتی (زیر حوضه مارون-جراحی) و یا میزان تولید پایین زیست‌توده محصول (زیر حوضه زهره-هندیجان) بود. دلیل این مهم در این دو زیر حوضه، شوری آب آبیاری (سه تا شش دسی‌زیمنس بر متر) و حساسیت برنج به شوری آب‌وخاک در مناطق جلگه‌ای (جنوب و جنوب‌شرق استان در این دو زیر حوضه) می‌توان عنوان کرد. این مسئله با اعمال تناوب آبیاری در روش خشکه کاری بیشتر اثرگذار بود. بر این اساس توصیه می‌شود در این مناطق خاص، کشت برنج متوقف شود و در صورت کشت، از فناوری‌های کاهش اثرات تجمع نمک اطراف ریشه گیاه مانند کشت با دستگاه‌های خطی‌کار کف‌کار، زهکشی اراضی و آبشویی پیوسته در مزرعه استفاده گردد. شکل ۸ تغییرات مکانی نمایه WP_{ET} را در زمان برای زیر حوضه‌های مختلف استان در هر دو نوع کشت و مدیریت آبیاری نشان می‌دهد. در نهایت جدول‌های ۱۱ و ۱۲، میزان ETa، WP_{ET}، Bio برای کل دوره رشد در زیر حوضه‌های مختلف به تفکیک بیان می‌کند.



شکل ۸- نقشه‌های بهره‌وری واقعی آب (WP_{ET}) برحسب کیلوگرم بر مترمکعب برای زیر حوضه‌های آبریز خوزستان در دوره رشد کامل برنج برای مدیریت‌های مختلف کاشت و آبیاری

جدول ۱۱-میزان آب مصرفی واقعی (ETa) برنج در استان خوزستان با توجه به مدیریت‌های مختلف کاشت و آبیاری

زیر حوضه‌های استان	سطح کشت سنتی با غرقاب دائم (هکتار)	ETa سنتی (مترمکعب در هکتار)	حجم آب مصرفی واقعی کشت‌های سنتی (مترمکعب)	سطح خشکه‌کاری با مدیریت متناوب (هکتار)	ETa خشکه کاری (مترمکعب در هکتار)	حجم آب مصرفی واقعی کشت‌های خشکه‌کاری (مترمکعب)	حجم آب مصرفی واقعی کل استان (مترمکعب)	میزان کاهش آب مصرفی واقعی به ازای هر هکتار در خشکه کاری نسبت به کشت سنتی (درصد)
کارون	95,460	9400	897,324,000	30,602	8350	255,526,700		11
کرخه	24,132	9090	219,359,880	10,613	7950	84,373,350		12.5
مارون – جراحی	17,077	8970	153,180,690	1910	7500	14,325,000		16
زهره – هندیجان	101	5290	534,290	47	4450	209,150		15.8
مجموع	**136,770**	–	**1,270,398,860**	**43,172**	-	**354,434,200**	1,624,833,060	

جدول ۱۲-تولید خالص (NPP) میزان زیست‌توده (Bio) و بهره‌وری واقعی آب (WP_{ET}) برنج در خوزستان با مدیریت‌های کاشت و آبیاری

زیرحوضه‌های استان	کشت سنتی با غرقاب دائم			خشکه‌کاری با مدیریت متناوب			میزان کاهش Bio در روش خشکه‌کاری نسبت به کشت سنتی (درصد)	میزان افزایش WP_{ET} در روش خشکه‌کاری نسبت به کشت سنتی (درصد)
	NPP (گرم کربن در مترمربع)	Bio (کیلوگرم ماده خشک در هکتار)	WP_{ET} کشت سنتی (کیلوگرم در مترمکعب)	NPP (گرم کربن در مترمربع)	Bio (کیلوگرم ماده خشک در هکتار)	WP_{ET} خشکه‌کاری (کیلوگرم در مترمکعب)		
کارون	1418.48	17716.82	0.81	1350.82	17479.61	0.9	1	11
کرخه	1497.42	18702.77	0.885	1252.74	16210.45	0.877	13	1
مارون – جراحی	1312	16386.88	0.786	1186.11	15348.26	0.88	6	12
زهره – هندیجان	1310.31	16365.77	1.330	1093.64	14151.7	1.367	13.5	3

بر اساس جدول ۱۱، مشاهده می‌شود که میزان میانگین وزنی کاهش ETa در فناوری خشکه‌کاری تا پایان دوره کاشت نسبت به روش کشت سنتی به ۱۳ درصد می‌رسد. این در حالی است که تا زمانی که تناوب آبیاری در روش خشکه‌کاری رعایت شد، میزان کاهش آب مصرفی واقعی بیشتر بود (۲۴ درصد برای کل استان با توجه به جدول ۹). بر اساس جدول ۱۱، میزان آب مصرفی واقعی در اثر کشت برنج در سال ۱۴۰۲ در استان خوزستان بالغ‌بر ۱/۶۲ میلیارد مترمکعب بود. این مقدار آب از دسترس خارج شده و به چرخه برنمی‌گردد. با توجه به جداول ۹ و ۱۱ می‌توان تفهیم شد که با توجه به اثربخشی محسوس فناوری خشکه‌کاری با مدیریت متناوب آبیاری (دور آبیاری دو تا چهار روزه) بر کاهش آب مصرفی واقعی (ETa)، متاسفانه سهم این فناوری در استان بسیار نامحسوس است. توجه به جدول ۱۲ نشان می‌دهد، با اینکه کشاورزان در ۴۵ روز آخر دوره رشد، با خارج شدن از تناوب آبیاری تلاش کرده‌اند که کاهش عملکرد در روش خشکه‌کاری متوجه محصول نشود (توجه به کاهش بسیار ناچیز در زیر حوضه کارون به‌عنوان بیشترین سطح زیر کشت است)، بااین‌حال فناوری خشکه‌کاری در این زیر حوضه توانسته تا ۱۱ درصد ارتقا بهره‌وری واقعی آب نسبت به کشت سنتی را به‌همراه داشته باشد. این در حالی است که در همین زیر حوضه، اگر تناوب آبیاری در فناوری خشکه‌کاری تا زمان برداشت محصول رعایت می‌شد، ارتقا بهره‌وری تا ۲۰ درصد نسبت به کشت سنتی افزایش داشت و میزان تولید محصول شاید کاهشی پنج درصدی را تجربه می‌کرد (توجه به جدول ۱۰). کابانگون و همکاران (۲۰۰۲) بیان می‌کنند که روش کشت مستقیم هوازی (خشکه‌کاری) هرچند آب آبیاری را کاهش می‌دهد اما نسبت به روش نشاکاری سنتی، میزان عملکرد را نیز کاهش می‌دهد. با این همه میزان بهره‌وری فیزیکی در این فناوری روندی افزایشی دارد. همچنین وانگ و همکاران (۲۰۰۲)، نشان دادند که شیوه‌ی کشت خشکه‌کاری در مقایسه با روش کشت مرسوم گلخرابی و بسته به نوع خاک، ۳۰ تا ۵۱ درصد آب کمتری برای تهیهٔ زمین نیاز دارد که باعث می‌شود بهره‌وری آب آبیاری را ۳۲ تا ۸۸ درصد افزایش دهد. دلیل این مهم تفاوت اساسی در فرآیند بسترسازی از جمله حذف گلخرابی، مدیریت کاشت، آبیاری پس از آن به‌خصوص از زمان کاشت تا پایان مرحلهٔ گیاهچه‌ای (۳۰-۲۵ روز)، تناوب آبیاری و دورهٔ رشد کوتاه‌تر است (گوپال و همکاران، ۲۰۱۰؛ گیلانی، ۱۳۹۸؛ یعقوبی و رجبیان، ۱۳۹۸ و کیانی و همکاران، ۱۳۹۹). از طرفی دیگر برای صحت‌سنجی خروجی‌های سنجش‌ازدور با داده‌های صحرایی و محاسباتی، جدول ۱۳ تهیه شد.

جدول ۱۳- صحت‌سنجی میزان آب مصرفی واقعی با نیاز آبی استاندارد و تعیین راندمان مزارع برنج در خوزستان

زیر حوضه‌های استان	متوسط ETa کشت سنتی بر اساس پیکسل‌های مناسب مزارع (مترمکعب در هکتار)	متوسط ETa فناوری خشکه‌کاری بر اساس پیکسل‌های مناسب مزارع (مترمکعب در هکتار)	نیاز آبی استاندارد بر اساس سند ملی سامانه نیاز آب*۱ (مترمکعب بر هکتار)	میزان متوسط حجم آب آبیاری در مزارع بر اساس گزارش های تحقیقاتی- ترویجی*۲ در کشت سنتی (مترمکعب در هکتار)	میزان متوسط حجم آب آبیاری در مزارع براساس گزارش‌های تحقیقاتی- ترویجی*۲ در فناوری خشکه‌کاری (مترمکعب در هکتار)	راندمان آبیاری مزارع در کشت سنتی (درصد)	راندمان آبیاری مزارع در فناوری خشکه کاری (درصد)
کارون	9400	8350	9800	34000	23000	27.6	36.3
کرخه	9090	7950	10500			26.7	34.5
مارون - جراحی	8970	7500	10000			26.3	32.6
زهره - هندیجان	5290	4450	12000			15.5	19.3

*۱: http://niwr.ir

*۲: (گیلانی و همکاران، ۱۳۹۵؛ گیلانی، ۱۳۹۸؛ مسکینی‌ویشکایی و همکاران، ۱۴۰۰؛ مختاران و همکاران،۱۴۰۱ و مختاران و همکاران، ۱۴۰۲)

بر اساس جدول ۱۳ مشاهده می‌شود که میزان آب مصرفی واقعی (ETa)، از نیاز آبی استاندارد (ETc) در همه زیر حوضه‌های آبریز مورد مطالعه کمتر بود. این مسئله به دلیل توزیع نامناسب آب آبیاری در زمان و عدم یکنواختی

توزیع آب در مزارع است. در زیر حوضه کارون به‌دلیل شرایط بهتر آب از نظر کمیت، کیفیت و دسترسی به آب، میزان ETa به نیاز آبی استاندارد نزدیک بود، اما این مسئله در زیر حوضه زهره- هندیجان بسیار متفاوت بود. کمبود و تنش آبی شدید در این زیر حوضه و کیفیت بسیار نامناسب آب در رودخانه زهره در کنار شوری و مستعد بودن خاک ها به سدیمی‌شدن از یک طرف و حساسیت برنج به شرایط کم‌آبی و شوری، باعث شد که اختلاف ETa و ETc تا ۱۴۰ درصد باشد. همچنین بخشی از کاهش عملکردی که در این زیر حوضه در روش خشکه‌کاری مشاهده شده است، ناشی از مدیریت آبیاری نامناسب در مزارعی است که خشکه‌کاری در آن‌ها صورت گرفته و مقدار آب مصرفی واقعی در این مزارع به‌شدت کمتر از نیاز واقعی گیاه بود که موجب بهره‌وری کم روش خشکه‌کاری در این زیر حوضه شده است. از مقایسه میزان آب مصرفی واقعی (ETa) و آب آبیاری در مزارع برنج، نتایج نشان داد که کشت برنج در خوزستان از راندمان آبی مطلوبی برخوردار نیست. میزان راندمان کاربرد آب در مزارع (جدول ۱۳ و شکل ۷) بیان می‌کند که در صورت ضرورت، کشت برنج باید به روش خشکه‌کاری با مدیریت متناوب آبیاری و در مناطقی که از نظر خاک، آب، سطح آب زیرزمینی و مهندسی زهکشی در وضعیت مناسبی باشند، انجام گردد. مختاران و همکاران (۱۳۹۲ و ۱۴۰۳) در همین زمینه گزارش کردند که بخشی از زمین‌های استان خوزستان در مرکز، غرب و جنوب غرب آن دارای منابع آب لب‌شور تا شور و بافت خاک سنگین با آب زیرزمینی شور و کم‌عمق است که با اجرای سامانهٔ زهکشی زیرزمینی و احیای اراضی، مناسب برای عملیات کشاورزی شده‌اند. وسعت این منطقه تقریباً ۶۵ درصد مساحت کل استان است، تجهیز و نوسازی زمین‌های کشاورزی در این مناطق و ارائه ندادن الگوی کشت اقتصادی و منطبق با وضعیت منابع آب استان باعث شده است کشاورزان به‌سمت کشت گیاهانی مانند برنج سوق داده شوند که از لحاظ آب پرمصرف‌اند. این در حالی است که در این پژوهش مشخص شد از تقریباً ۱۸۰۰۰۰ هزار هکتار سطح زیر کشت برنج در سال ۱۴۰۲، نزدیک به ۱۲۴۰۰۰ هکتار در مناطق جنوب، جنوب غرب و غرب استان (تمامی زیر حوضه زهره- هندیجان، پایین‌دست زیر حوضه‌های کارون، کرخه و مارون- جراحی) برنج کشت شده است. کشت برنج به روش کشت سنتی با غرقاب دائم در این مناطق به‌دلیل کیفیت نامناسب آب آبیاری و مستعد بودن خاک‌ها به شوری و سدیمی بودن باعث می‌شود که آب خارج شده از مزارع با راندمان آبیاری پایین (جدول ۱۳)، قابل بازیافت و استفاده مجدد در پایین‌دست نباشد که این مسئله یکی از دلایل پایین بوده بهره‌وری آب کشاورزی در سطح زیر حوضه‌های آبریز استان است.

نتیجه‌گیری

وجود متولیان و ذینفعان مختلف در اثرگذاری بر منابع و مصارف آب بخش کشاورزی، داشتن اطلاعات قابل‌اعتماد از تغییرات مؤلفه‌های بیلان منابع و مصارف جهت مدیریت یکپارچه در سطح حوضه است. صرفه‌جویی واقعی آب زمانی اتفاق می‌افتد که تمرکز آن روی کاهش مصرف آب بوده، لذا باید شاخص بهره‌وری آب باید مبتنی بر تبخیر-تعرق واقعی محصول (ETa) باشد. برنج در خوزستان یکی از مهم‌ترین محصولات تابستانه است که کشت گستردهٔ آن تأثیر بسیاری در ایجاد تنش آبی بر زیر حوضه‌های آبریز خوزستان دارد. در این استان، برنج به‌صورت کشت سنتی (نشاکاری و کشت مستقیم بذر در محیط مرطوب) با غرقاب دائم انجام می‌شود، اما در سال‌های اخیر استفاده از روش آبیاری متناوب به‌صورت خشک و مرطوب کردن در سامانه کشت مستقیم برنج هوازی یا خشکه‌کاری ازجمله فناوری‌هایی است که اخیراً متداول گردیده و توانسته بر کاهش مصرف آب برنج اثرگذار باشد. با این‌حال تفاوت بین روش‌های کاشت و مدیریت آبیاری برنج از نظر آب مصرفی و بهره‌وری آب در سطح استان برای مدیران آب و بهره‌برداران محسوس نیست. لذا این پژوهش با هدف تعیین نقشه پراکنش کشت

برنج (RCM) برای روش‌های مختلف مدیریتی کاشت و آبیاری (کشت سنتی با غرقاب دائم و خشکه‌کاری با تناوب آبیاری) از خرداد تا آبان ماه ۱۴۰۲ در خوزستان با استفاده از شاخص‌های گیاهی، دما، خاک و داده‌های سنجش‌ازدور انجام شد. در این پژوهش، همچنین تغییرات زمانی-مکانی مصارف آب برنج بر اساس میزان آب مصرفی واقعی (ETa) و بهره‌وری واقعی آب (WP_{ET}) ارزیابی و تحلیل شد. نتایج این پژوهش نشان داد که فناوری سنجش‌ازدور می‌تواند اطلاعات به‌موقع و دقیقی در مورد توزیع محصول، سطح کاشت و تولید بالقوه برای تصمیم‌گیرندگان در سطوح مختلف فراهم کند. نتایج به‌دست آمده از محاسبهٔ سطح زیر کشت برنج (۱۸۰ هزار هکتار)، تفکیک برنج برحسب نوع کشت (بالغ‌بر ۱۳۶ هزار هکتار برای کشت سنتی و حدود ۴۳ هزار هکتار برای سامانه خشکه‌کاری) و دقت طبقه‌بندی (حدود ۹۹ درصد) و ضریب کاپای بالا (۰/۸۷) در استان خوزستان، موید کارایی بالای استفاده از تصویرهای ماهواره‌ای و تکنیک‌های سنجش‌ازدور در برآورد دقیق سطح زیر کشت بود. نتایج نقشه‌های زمانی-مکانی ETa وWP_{ET} برنج در دوره رشد محصول برای تمامی زیر حوضه‌های آبریز استان نشان داد که مجموع ETa برنج در سال ۱۴۰۲ بالغ‌بر ۱/۶۲ میلیارد مترمکعب بود. این پژوهش میزان میانگین وزنی کاهش ETa و ارتقا WP_{ET} در فناوری خشکه‌کاری نسبت به روش کشت سنتی را به‌ترتیب ۱۳ و ۸ درصد نشان داد. همچنین نتایج صحت‌سنجی خروجی‌های سنجش‌ازدور با داده‌های صحرایی و محاسباتی، میزان ETa از نیاز آبی استاندارد(ETc) کمتر بود. این مسئله به‌دلیل کمبود و تنش آبی در زیر حوضه‌ها و نامناسب بودن کیفیت آب در بسیاری از مناطق کشت برنج بود. به‌طوری‌که از مقایسه میزان ETa حاصل از این پژوهش و آب آبیاری اندازه‌گیری شده در مزارع برنج منتج از تحقیقات کاربردی و مشاهده‌ای استان، میزان راندمان کاربرد آب در مزارع با کشت سنتی، ۲۷ درصد و برای روش خشکه‌کاری، ۳۴ درصد برآورد شد. این مهم نشان می‌دهد که کشت برنج در بسیاری از مناطق خوزستان که میزان مصرف آب را در حالت بحرانی قرار داده، توجیه نداشته و در صورت ضرورت، کشت برنج باید به روش خشکه‌کاری با مدیریت متناوب آبیاری و در مناطقی که از نظر خاک، آب، سطح آب زیرزمینی و مهندسی زهکشی در وضعیت مناسبی باشند، انجام گردد. در این شرایط پیشنهاد می‌شود که فناوری خشکه‌کاری با مدیریت متناوب به‌صورت خشک و مرطوب کردن در کنار سایر فناوری‌های نوین مانند آبیاری قطره‌ای نواری، کشت روی پشته‌های بلند و عریض و یا کشت با دستگاه‌های خطی کار کف کار در شرایط شور و استفاده از برنامه‌ریزی دقیق آبیاری طبق نمایه‌های خاک و گیاه بهره‌برداری شود که این مهم نیاز به تحقیق و ارائه ضوابط و دستورالعمل لازم را دارد.

تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافعی وجود ندارد و این مسئله مورد تأیید نویسندگان مقاله است.

تشکر و قدردانی

در این پژوهش لازم است از زحمات و پشتیبانی همکاران محترم جهاد کشاورزی خوزستان در شهرستان‌های مختلف و موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی تشکر و قدردانی بعمل آید.

فهرست منابع

۱. افشاری‌پور، سید کریم و حمزه، سعید، علوی پناه، سیدکاظم و مقبلی‌دامنه، اسماعیل.۱۳۹۸. ارزیابی میزان بهره وری آب کشاورزی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و مدل WATPRO (مطالعه موردی؛ اراضی تحت کشت گندم حوزه آبریز دشت جیرفت). تحقیقات منابع آب ایران. ۱۵(۱) ، صص. ۴۵–۵۸.

۲. سامانه نیاز آبی گیاهان زراعی و باغی کشور.http://niwr.ir

۳. گیلانی، عبدالعلی، آبسالان، شکراله و جلالی، سامی، ۱۳۹۵. مقایسه روش خشکه‌کاری با شیوه‌های رایج کاشت ارقام برنج از نظر میزان آب مصرفی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، گزارش نهایی پروژه تحقیقاتی، شماره ثبت: ۴۹۸۰۲. ۲۷ صص.

۴. گیلانی،عبدالعلی، ۱۳۹۸. مدیریت تولید برنج در روش خشکه‌کاری، موسسه تحقیقات برنج کشور، نشریه فنی، ش ۴۱، ۲۳ صص.

۵. فتحی، مهدیه و شاه‌حسینی، رضا، ۱۴۰۲. بهبود دقت شناسایی مزارع برنج با استفاده از تصاویر سری زمانی دمای سطح زمین ماهواره لندست۸ و الگوریتم‌های یادگیری ماشین، فصلنامه علمی- پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سپهر)،۱۲۵(۳۲)، صص.۵۳-۶۶. **doi: 10.22131/sepehr.2023.535693.2777**

۶. مختاران، علی، گیلانی، عبدالعلی، سپهری صادقیان، سالومه و ورجاوند، پیمان، ۱۴۰۱. بازچرخانی زهاب در مزارع کشت و صنعت نیشکر جنوب استان خوزستان برای کشت گیاهان زراعی (گندم و برنج) ، نشریه فنی، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی (AERI) ، شماره ثبت ۶۱۹۳۶، ۴۸ صص.

۷. مختاران، علی، گیلانی، عبدالعلی، جلالی، سامی، بهبهانی، لیلا، رضایی، مجتبی و تجددی طلب، کبری، ۱۴۰۲. بررسی تأثیر دور آبیاری در سامانه قطره‌ای نواری بر عملکرد برنج و تغییرات شوری خاک با روش کشت مستقیم در بستر خشک در دشت خوزستان، نشریه پژوهش آب در کشاورزی،۳۷ (۲) ، صص.۱۳۹-۱۵۸. **doi:10.22092/jwra.2023.359561.935**

۸. مختاران، علی، دهقانی‌سانیج، حسین و محمدی، مریم، ۱۴۰۳. تشخیص سطح سامانه‌های مختلف کشت مزارع برنج مبتنی بر مدیریت آبیاری با استفاده از تکنیک یادگیری ماشین، دستنامه فنی، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی (AERI) ، شماره ثبت ۶۵۲۴۲، ۷۰ صص.

۹. مختاران، علی، ناصری، عبدعلی و کشکولی. حیدرعلی، ۱۳۹۲. تعیین ضخامت فصل مشترک آب شور-شیرین در اراضی تحت آبیاری و آب زیرزمینی شور و کم عمق، دوازدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، تهران.

۱۰. مسکینی ویشکایی، فاطمه، گیلانی، عبدالعلی و مختاران، علی، ۱۴۰۰. بررسی تأثیر شیوه کاشت برنج بر روی پشته‌های بلند بر مصرف آب و شوری خاک سطحی در روش خشکه‌کاری، هفدهمین کنگره علوم خاک ایران و چهارمین همایش ملی مدیریت آب در مزرعه، کرج، ایران.

۱۱. یعقوبی، بیژن و رجبیان، مریم، ۱۳۹۸. مروری برکشت مستقیم برنج با تأکید بر مدیریت علف‌های هرز، موسسه تحقیقات برنج کشور، نشریه فنی، ش ۳۷، ۵۱ صص.

۱۲. یوسفی، حسین، کردی، فاطمه، محبتی، فرهاد و قاسمی، لیلا، ۱۴۰۰. برآورد آب مصرفی بخش کشاورزی کشور ایران و ارزیابی نتایج به‌دست آمده از سامانه WaPOR با داده‌های زمینی، اکوهیدرولوژی، ۸ (۳)، صص. ۸۲۵۹-۸۳۹. doi: 10.22059/ije.2021.324474.1512

13. Adamala, S., Rajwade, Y.A. and Reddy, Y.V.K., 2016. Estimation of wheat crop evapotranspiration using NDVI vegetation index. Journal of Applied and Natural Science, 8(1), PP. 159–166.

14. Allen, R. G., Tasumi, M. and Trezza, R., 2007. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)—Model. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 133(4), PP. 380-394.
15. Asghari Saraskanrood, S., Asadi, B. and Ghale, E., 2023. Caspian Journal of Environmental Sciences, 21(3), PP.725-735. **doi: 10.22124/CJES.2023.6959.**
16. Ajour, S. A. 2021. Evaluation of FAO’s Water Productivity Portal (WAPOR) Yield Over the Bequaa Valley, Lebanon (Thesis for the degree of Master of Science to the Department of Landscape Design and Ecosystem Management of the Faculty of Agricultural and Food Sciences at the American University of Beirut.
17. Alemayehu, T., Bastiaanssen, S., Bremer, K., Cherinet, Y., Chevalking, S. and Girma, M., 2020. Water Productivity Analyses Using WAPOR Database. A Case Study of Wonji, Ethiopia. Water-PIP technical report series. IHEDelft Institute for Water Education.
18. Bastiaanssen, W.G.M., Cheema, M.J.M., Immerzeel, W.W., Miltenburg, I.J. and Pelgrum, H., 2012. Surface energy balance and actual evapotranspiration of the transboundary Indus Basin estimated from satellite measurements and the ETLook model. Water Resources Research, 48, W11512.
19. Bispo. R.C., Hernandez. F.B.T., Gonçalves. I. Z., Neale. C.M.U. and Teixeira. A.H.C., 2022. Remote sensing based evapotranspiration modeling for sugarcane in Brazil using a hybrid approach. Agricultural Water Management. 271.107763. **doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107763.**
20. Blatchford, M.L., Mannaerts, C.M., Njuki, S. M., Nouri, H., Zeng, Y., Pelgrum, H. and Karimi, P., 2020a. Evaluation of WaPOR V2 evapotranspiration products across Africa. Hydrological Processes, 34(15), PP. 3200-3221.
21. Blatchford, M., M Mannaerts, C., Zeng, Y., Nouri, H. and Karimi, P., 2020b. Influence of spatial resolution on remote sensing-based irrigation performance assessment using WaPOR data. Remote Sensing, 12(18), 2949.
22. Bouman, B. A. M., Wang, H., Yang, X., Zhao, J. F. and Wang, C. G., 2002. Aerobic rice (Han Dao): a new way of growing rice in water-short areas, in Proceedings of the 12th InternationalSoil ConservationOrganization Conference (Beijing), PP. 175–181.
23. Cabangon, R. J. and Abdullah, N.B., 2002. Comparing water input and water productivity of transplanted and direct-seeded rice production systems.Agricultural Water Management, 57, PP. 11–31.
24. F. Brown, ch., P. Brumby, S., Guzder-Williams, B., Birch, T., Brooks Hyde, S., Mazzariello, J. and M.Tait, A., 2022. Dynamic World, near real-time global 10m land use land cover mapping. Scientific Data 9(1), 251PP. **doi: 10.1038/s41597-022-01307-4**.
25. Darvishzadeh, R., Matkan, A. A. and Eskandari, N., 2011. Evaluation of ALOS-AVNIR2 spectral indices for prediction of rice biomass. Journal of Geographical Landscape, 6, PP. 11-14. (In Persian).
26. Dehghanisanij, H., 2012. Current agricultural water and soil resources and productivity in the Iranian highlands: measures and Improvements. Journal of Agriculture, Biotechnology & Ecology. 5(1), PP.1-14.
27. Delegido, J., Verrelst, J., Rivera, J.P., Ruiz-Verdú, A. and Moreno, J., 2015. Brown and green LAI mapping through spectral indices. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 35, PP. 350–358. **doi: 10.1016/j.jag.2014.10.001.**
28. ESA .2020. https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2020/03/Rice_fields_Vietnam.
29. FAO. 2018. WaPOR Database Methodology: Level 1. Remote Sensing for Water Productivity Technical Report: Methodology Series. Rome, FAO. 72 P.
30. FAO. 2019. Food and agriculture organization of the United Nations. FAOSTAT: Crops. http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC.
31. FAO. and Delft, I., 2019. WaPOR quality assessment. Technical report on the data quality of the WaPOR FAO database version 1.0. Rome. 134P.
32. FAO. 2020. WaPOR database methodology: Version2 release, Rome.
33. FAO & World Bank. 2022. Irrigating from space–Using remote sensing for agricultural water management. Investment brief. Rome. **doi: 10.4060/cc3745en.**

34. Feyisa, G.L., Meilby, H., Fensholt, R. & Proud, S.R., 2014. AutomatedWater Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. Remote Sensing of Environment, 140, PP. 23–35. **doi:10.1016/j.rse.2013.08.029**.

35. Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D. and Moore, R., 2017. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. Remote Sensing of Environment. 202(1), PP.18-27.

36. Gopal, R., Jat, R.K., Kumar, V., Alam, M.M., Jat, M.L., Mazid, M.A., Saharawat, Y.S., Mcdonald, A. and Gupta, R., 2010. Direct dry seeded rice production technology and weed management in rice-based systems.

37. Huete, A., Didan, k., Miura, t., Rodriguez, E.P., Gao, X. and Ferreira. L.G., 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices.

38. Javadian, M., Behrangi, A., Gholizadeh, M. and Tajrishy, M., 2019. METRIC and WaPOR estimates of evapotranspiration over the Lake Urmia Basin: comparative analysis and composite assessment. Water, 11(8), 1647.

39. Inoue, S., Ito, A. and Yonezawa, C., 2020. Mapping Paddy fields in Japan by using Sentinel 1 SAR time series supplemented by Sentinel 2 images on Google Earth Engine, Remote Sensing. 12(10):1622.

40. Izaddoost, H., Samizadeh, H., Rabiei, B. and Abdollahi, S., 2013. Evaluation of salt tolerance in rice (Oryza sativa L.) cultivars and lines with emphasis on stress tolerance indices. Cereal Research, 3, PP.167-180. (In Persian). **doi.20.1001.1.22520163.1392.3.3.1.2.**

41. Karimi, P., Molden, D., Bastiaanssen, W.G.M. and Cai, X., 2012. Water accounting to assess use and productivity of water: evolution of a concept and new frontiers. In Godfrey, J. M.; Chalmers, K. (Eds). Water accounting: international approaches to policy and decision-making. Cheltenham, UK: Edward Elgar. PP. 76-88.

42. Kaplan, G. and Avdan, U., 2017. Water extraction technique in mountainous areas from satellite images, Journal of Applied Remote Sensing, 11(4), 046002. **doi: 10.1117/1.JRS.11.046002**.

43. Kaune, A. and Opstal, JV. 2020. Water Productivity Technical Report. Agência de desenvolvimento do Vale Zambeze (ADVZ). FutureWater, Report 195.

44. Liu, L., Huang, J., Xiong, Q., Zhang, H., Song, P., Huang, Y., Dou, Y. and Wang, X., 2020. Optimal MODIS data processing for accurate multi- year paddy rice area mapping in China. GIScience & Remote Sensing, 57(5), PP. 687-703.

45. Magidi, J., Nhamo, L., Mpandeli, S. and Mabhaudhi, T., 2021. Application of the Random Forest Classifier to Map Irrigated Areas Using Google Earth Engine. 13, 876. **doi: 10.3390/rs13050876.**

46. McCallum, I., Wagner, W., Schmullius, C., Shvidenko, A., Obersteiner, M., Fritz, S. and Nilsson, S., 2009. Satellite-based terrestrial production efficiency modeling. Carbon Balance and Management, 4(1), 8P.

47. Monteith, J., 1972. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems.Journal of applied ecology, 9(3), PP. 747-766.

48. Pan, S., Tian, H., Dangal, S. R. S., Ouyang, Z., Tao, B., Ren, W., Lu, C. and Running, S. W., 2014. Modeling and monitoring terrestrial primary production in a changing global environment: toward a multiscale synthesis of observation and simulation. Ecosystem and Conservation Sciences FacultyPublications. 45.https://scholarworks.umt.edu/decspubs/45. **doi: 10.1155/2014/965936.**

49. Roy, R., Chan, N.W. and Xenarios, S., 2016. Sustainability of rice production systems: an empirical evaluation to improve policy. Environ Dev Sustain 18: PP. 257–278. **doi:10.1007/s10668-015-9638-x.**

50. Rongali,G.,Keshari,A.K.,Gosain,A.K.andKhosa,R.,2018.SplitWindow Algorithm for Ret rieval of Land Surface Temperature Using Landsat8 Thermal Infrared Data. Journal of Geovisualization and Spatial Analysis. 14(2), PP. 1-19. **doi:10.1007/s41651-018-0021-y**

51. Schmidt, J., Marques, M.R., Botti, S. and Marques, M.A., 2019. Recent advances and applications of machine learning in solid-state materials science. NPJ Comput. Mater. 5, PP. 1–36.
52. Torbick, N., Chowdhury, D., Salas, W. and Qi, J., 2017. Monitoring rice agriculture across Myanmar using time series Sentinel-1 assisted by Landsat-8 and PALSAR-2. Remote Sensing. 9(2), 119P. **doi:10.3390/rs9020119**
53. Torre. D.M.G., Gao. J., Macinnis-Ng. C. and Shi. Y., 2021. Phenology-based delineation of irrigated and rain-fed paddy fields with Sentinel-2 imagery in Google Earth Engine. Geo-Spatial Information Scinece. **doi:10.1080/10095020.2021.1984183**
54. Veroustraete, F., Sabbe, H. and Eerens, H., 2002. Estimation of carbon mass fluxes over Europe using the C-Fix model and Euroflux data. Remote Sensing of Environment, 83(3), PP. 376-399.
55. Wang, J., Huang, J., Wang, X., Jin, M., Zhou, Z., Guo, Q., Zhao, Z., Huang, W., Zhang, Y. and Song, X., 2015. Estimation of rice phenology date using integrated HJ-1 CCD and Landsat8 OLI vegetation indices time- series images. Journal of Zhejiang University-Science B, 16 (10), PP. 832-844.
56. Wang, H., Boumam, B. A. M., Zhao, D., Wang, C. and Moya, P. F., 2002. “Aerobic rice in northern China: opportunities and challenges,” in Proceedings of the International Workshop on Water-Wise Rice Production, Water-Wise Rice Production, 8-11 April, eds B. A. M. Bouman, H. Hengsdijk, B. Hardy, P. S. Bindraban, T. P. Tuong, and J. K. Ladha (Los Baños: International Rice Research Institute), PP. 143–154.
57. Yilma, W. A., Opstal, J. V., Karimi, P. and Bastiaanssen, W. G. M., 2017. Computation and Spatial Observation of Water Productivity in Awash River Basin. UNESCO-IHE, Delft.
58. Zhan, P., Zhu, W. and Li, N., 2021. An automated rice mapping method based on flooding signals in synthetic aperture radar time series. Remote Sensing of Environment. 252:112112. **doi: 10.1016/j.rse.2020.112112**
59. Zhang. C., Dong. J., Xie. Y., Zhang. X. and Ge. Q., 2022. Mapping irrigated croplands in China using a synergetic training sample generating method, machine learning classifier, and Google Earth Engine. International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation, 112 (2022), 102888. **doi:10.1016/j.jag.2022.102888**
60. Ziaeian Firouzabadi, P., Sayad Bidhendi, L. and Eskandari Noudeh, M., 2009. Mapping and acreage estimating of rice agricultural land using radarsat a satellite images. Physical Geography Research Quarterly, 41, PP.45-58. (In Persian).

مقاله پژوهشی
نشریه پژوهش آب در کشاورزی / ب / جلد ۳۸ / شماره ۴/ ۱۴۰۳.ص۳۴۱-۳۵۵
https://doi.org/10.22092/jwra.2025.366835.1053

بررسی اثرهای تغییر اقلیم و تاریخ کشت در سناریوهای پانل بین‌المللی تغییر اقلیم بر عملکرد نخود فرنگی با استفاده از مدل AquaCrop

سیده مهسا حسینی، مجتبی خوش‌روش*، محمد علی غلامی سفیدکوهی و رضا نوروز ولاشدی

دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.
saeidhabibi990@yahoo.com
دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.
khoshravesh_m24@yahoo.com; m.khoshravesh@sanru.ac.ir
استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.
magholamis@yahoo.com
استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.
rezanorooz@yahoo.com

دریافت: شهریور ۱۴۰۳ و پذیرش: آذر ۱۴۰۳

چکیده

به منظور استفاده از مدل‌های گیاهی برای بررسی اثرات تغییر اقلیم بر عملکرد محصولات زراعی، مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی مقدار عملکرد دانه نخودفرنگی در اقلیم آینده، در تیمارهای مختلف آبیاری و تاریخ‌های مختلف کشت در شهرستان بابل بکار گرفته شد. برای شبیه‌سازی مقادیر عملکرد دانه و زیست توده نخودفرنگی در سه دهه آینده، برای تاریخ‌های کشت ۲۵ مهر، آبان (۲، ۹، ۱۶، ۲۳ و ۳۰) و ۷ آذر تحت گزینه‌های وضعیت اقلیمی آینده SSP۱۲۶، SSP۲۴۵ و SSP۵۸۵ از گزارش ششم پانل بین‌المللی تغییر اقلیم (IPCC) و در سه سطح ۱۰۰% (I_1)، ۸۰ % (I_2)و ۶۰ % (I_3) آبیاری کامل استفاده شد. با توجه به نتایج، بیشترین عملکرد نخودفرنگی در دهه ۳۲-۲۰۲۳ در تیمار I_1 گزینه SSP ۵۸۵ در ۱۶ آبان به مقدار ۷/۳ تن در هکتار و کم‌ترین عملکرد در تیمار I_3 گزینه‌ی SSP۵۸۵ در ۷ آذر برابر ۴/۱ تن درهکتار شبیه‌سازی شد. بیشترین عملکرد نخودفرنگی در ۴۲-۲۰۳۳ در تیمار I_1 گزینه‌ی SSP۵۸۵ در ۲۳ آبان برابر ۸/۴ تن در هکتار و کم‌ترین عملکرد در I_3 گزینه‌ی SSP۲۴۵ در ۷ آذر برابر ۴/۴ تن بر هکتار بود. بیشترین عملکرد نخودفرنگی در ۵۲-۲۰۴۳ در I_1 گزینه‌ی SSP۵۸۵ در ۹ آبان برابر ۸/۷ تن در هکتار و کم‌ترین عملکرد در تیمار I_3 گزینه‌ی SSP۱۲۶ در ۲۵ مهر به مقدار ۳/۹ تن بر هکتار شبیه‌سازی شد. بیشترین مقدار زیست توده نخودفرنگی در ۲۰۳۲-۲۰۲۳ در تیمار I_1 گزینه SSP ۵۸۵ در ۲۳ آبان به مقدار ۱۷/۱ تن در هکتار و کم‌ترین مقدار در تیمار I_3 گزینه‌ی SSP۵۸۵ در ۷ آذر به مقدار ۱۰/۳ تن بر هکتار به‌دست آمد. نیز، بیشترین مقدار زیست توده در ۴۲-۲۰۳۳ در تیمار I_1 گزینه‌ی SSP۵۸۵ در ۳۰ آبان برابر ۲۰/۱ تن در هکتار و کم‌ترین مقدار در I_3 گزینه‌ی SSP۲۴۵ در ۷ آذر به مقدار ۱۱/۱ تن بر هکتار شبیه‌سازی شد. بیشترین مقدار زیست توده در ۵۲-۲۰۴۳ در I_1 گزینه‌ی SSP۱۲۶ در ۲۳ آبان به مقدار ۲۰/۶ تن در هکتار و کم‌ترین مقدار در تیمار I_3 تحت گزینه‌ی SSP۲۴۵ در ۷ آذر برابر ۱۲/۷ تن بر هکتار شد. بنابراین بهترین زمان تاریخ کشت برای گیاه نخودفرنگی در شهرستان بابل در تاریخ‌های ۹، ۱۶ و ۲۳ آبان در تیمار آبیاری I_1 می‌باشد که از این نتایج می‌توان برای مدیریت بهتر کشت و آبیاری در شهرستان بابل استفاده نمود. به‌طور کلی تغییر اقلیم می‌تواند هم باعث افزایش و هم کاهش عملکرد و زیست‌توده نخودفرنگی شود، اما با مدیریت مناسب آبیاری و انتخاب تاریخ کشت، احتمال افزایش عملکرد بیشتر است.

واژه‌های کلیدی: مدل گیاهی، مدیریت آبیاری، شهرستان بابل، مدیریت کشت

* - آدرس ایمیل نویسنده مسئول: **m.khoshravesh@sanru.ac.ir**

مقدمه

شواهد بسیار قوی مبنی بر اینکه عامل اصلی گرمایش جهانی زمین، افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای (کربن دی‌اکسید، متان و مونواکسیدکربن) است، وجود دارد. گرم شدن زمین از اواسط قرن بیستم آغاز شده و انتظار می‌رود که این روند در سال‌های آینده نیز ادامه پیدا کند. تغییرات بلندمدت شرایط عمومی آب و هوایی زمین، تغییر اقلیم نامیده می‌شود که در اثر آن پارامترهای آب‌وهوا مانند دما و بارش در مناطق مختلف تغییر می‌یابد و در نتیجه آن رویدادهای حدی مانند سیل و خشک‌سالی‌های طولانی‌مدت رخ خواهد داد (تاکاریندوا، ۲۰۱۳). ششمین گزارش هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم IPCC[1] که در سال ۲۰۲۱ منتشر شد، نشان می‌دهد که دمای کره زمین نسبت به دوره پیش از انقلاب صنعتی حدود یک درجه سلسیوس افزایش یافته است و این افزایش دما بر تولید محصولات کشاورزی تأثیرات منفی داشته است؛ زیرا کشاورزی، به دلیل وابستگی به پارامترهای آب‌وهوا، یکی از مهم‌ترین بخش‌های تأثیرپذیر از تغییر اقلیم است؛ بنابراین اتخاذ راهبردهای مناسب و سازگار با تغییرات آب و هوایی، بی‌تردید موجب کاهش اثرات منفی بر عملکرد محصولات کشاورزی می‌گردد (حسینی و همکاران، ۲۰۱۳؛ چالینور و همکاران، ۲۰۱۴؛ IPCC. ۲۰۱۴). از سوی دیگر همگام با تغییر اقلیم، علاوه بر کاهش عملکرد محصولات در نتیجه تأثیرپذیری منفی زیست‌توده نسبت به شرایط یاد شده موجب تشدید مسئله کمبود آب نیز می‌شود (ماکووارو و همکاران، ۲۰۱۸).

گزینه‌های گزارش ششم، بر اساس روش پیش‌بینی‌های مختلفی از تغییرات آب‌وهوا در آینده ارائه می‌دهند. برخی از این گزینه‌ها، نشان می‌دهند که اگر انتشار گازهای گلخانه‌ای به‌سرعت کاهش یابد، می‌توان از رسیدن به حد بحرانی گرمایش جهانی (۱/۵ درجه سانتی‌گراد) جلوگیری کرد و تأثیرات منفی تغییر اقلیم را کاهش داد؛ اما برخی دیگر از گزینه‌ها، نشان می‌دهند که اگر انتشار گازهای گلخانه‌ای به روند فعلی خود ادامه دهد یا حتی بالاتر برود، ممکن است گرمایش جهانی به بیش از چهار درجه سانتی-گراد برسد و تأثیرات شدید و غیرقابل برگشت تغییر اقلیم را به همراه داشته باشد (اونیل و همکاران، ۲۰۱۷).

انتخاب تاریخ کاشت مطلوب یکی از عوامل مهم و اصلی در مدیریت زراعی است که با انطباق فرایندهای فیزیولوژیکی، مورفولوژیکی و مراحل فنولوژیکی گیاه مانند رشد رویشی، رشد زایشی و گلدهی و کل دوره رشد با شرایط مطلوب آب و هوایی سبب تعیین پتانسیل عملکرد هر محصول در هر منطقه و محیطی می‌گردد (جلالی و همکاران، ۱۳۹۴). تاریخ کاشت مناسب به‌عنوان تاریخی تعریف می‌شود که در آن عملکرد به حداکثر می‌رسد و موجب بهره‌گیری بهینه از عوامل اقلیمی نظیر درجه حرارت، رطوبت، طول روز و همچنین تطابق زمان گلدهی با درجه حرارت مناسب می‌گردد (فراهانی پاد و همکاران،۱۳۹۰). تاریخ کاشت نامناسب منجر به مواجه دوران رشد رویشی و زایشی گیاه با شرایط نامساعد محیطی می‌گردد (حق‌وردیان و همکاران، ۱۳۹۰) که عدم کفایت رشد رویشی منجر به کاهش ذخیره غذایی و نقصان عملکرد می‌گردد (انوری ساوجبلاغی و همکاران، ۱۳۹۰). در نهایت با دیرهنگام و زودهنگام شدن زمان تاریخ کاشت خارج از تاریخ کاشت مناسب، عملکرد محصول کاهش می‌یابد؛ بنابراین، درک اینکه چگونه تغییرات آب و هوایی بر تاریخ کاشت در مقیاس‌های زمانی و مکانی تأثیر خواهد گذاشت، اهمیت بالایی دارد.

یکی از گیاهان زراعی که شرایط اقلیمی آینده زمین می‌تواند کشت و کار آن را دستخوش تغییر کند، گیاه نخودفرنگی است. نخود یک محصول حبوبات دانه معتدل است (مونیرجولین و همکاران، ۲۰۱۰) که در طول دوره پاییز تا بهار رشد می‌کند؛ بنابراین بیشتر در طول فصل بارانی رشد کرده و عوامل اقلیمی می‌توانند سبب محدودیت توان تولیدی نخودفرنگی شوند. به همین دلیل لازم است که اثر عوامل اقلیمی بر عملکرد نخودفرنگی تحت شرایط کم

1 -Intergovernmental Panel on Climate Change

2 -Shared Socio-Economic Pathways (SSPs)

آبیاری با استفاده از مدل‌های گیاهی به‌ویژه مدل AquaCrop مورد بررسی قرار گیرد تا بر اساس یافته‌های آن، برنامه‌ریزی‌های کلان مدیریتی اعمال شود.

اومش و همکاران (۲۰۲۲) با بررسی عملکرد ذرت با استفاده از مدل AquaCrop در هند گزارش دادند که مدل دقت خوبی برای شبیه‌سازی عملکرد دانه و بهره وری آب برای تمام سطوح آبیاری نشان می‌دهد و نتایج این مطالعه نشان داد که بیشترین میانگین عملکرد دانه و بهره‌وری آب به‌ترتیب ۳/۱۹ تن در هکتار و ۱۰/۶۵ کیلوگرم بر هکتار- میلی‌متر در ۵۰ میلی‌متر آبیاری و کمترین آن به-ترتیب ۱/۷۸ تن در هکتار و ۷/۶۰ کیلوگرم بر هکتار-میلی متر در ۱۰ میلی‌متر آبیاری ثبت شده است. پژوهشی توسط قاسم بگلو و همکاران (۱۴۰۰) در شهرستان هریس استان آذربایجان شرقی بر روی عملکرد کمی و کیفی دانه نخودفرنگی تحت تأثیر سطوح مختلف آبیاری انجام گردید که طبق یافته‌ها تأثیر سطوح مختلف آبیاری بر عملکرد و اجزای عملکرد معنی‌دار بود و باعث کاهش عملکرد و کاهش ارتفاع بوته، تعداد دانه در غلاف، تعداد غلاف در بوته، درصد پروتئین، شاخص برداشت، طول غلاف و افزایش وزن صد دانه گردید. چیبارآبادا و همکاران (۲۰۲۰) به‌منظور شبیه‌سازی عملکرد بادام‌زمینی تحت شرایط کم‌آبی در آفریقای جنوبی از مدل AquaCrop استفاده نمودند. این مدل توانست پوشش گیاهی و زیست‌توده تجمعی را به‌خوبی شبیه‌سازی کند اما تبخیر و تعرق را بیش از حد برآورد کرد. کاندا و همکاران (۲۰۲۰) پژوهشی به‌منظور ارزیابی مدل AquaCrop برای لوبیا چشم‌بلبلی تحت گزینه‌ی آبیاری کامل و کم آبیاری انجام دادند. نتایج نشان داد، مقادیر پوشش گیاهی، زیست‌توده نهایی، عملکرد و بهره‌وری آب اندازه‌گیری شده با مقادیر شبیه‌سازی شده در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی مطابقت داشت؛ بنابراین مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد محصول مناسب تشخیص داده شد. آزمایش‌های مزرعه‌ای تحت کم‌آبیاری در ایستگاه لانچنگ در سال‌های ۱۹۹۸-۲۰۰۱ انجام شد و مدلAquaCrop با بخشی از داده‌ها واسنجی و با بقیه داده‌ها اعتبارسنجی شد. به‌طورکلی، در اعتبارسنجی مدل، RMSE برای عملکرد دانه $\mathrm{Mg\ ha^{-1}}$ ۰/۵۸ و زیست‌توده $\mathrm{Mg\ ha^{-1}}$ ۰/۸۷ به‌دست آمد و نتایج نشان داد که مدل AquaCrop یک مدل معتبر و اطمینان‌بخش برای شبیه‌سازی عملکرد گندم در دشت شمالی چین است. مورالس سانتوس و همکاران (۲۰۲۳) تأثیر مدیریت‌های مختلف آبیاری بر عملکرد سویا و بهره‌وری آب را در اتریش گزارش کردند. نتایج مطابقت مقادیر پوشش گیاهی و عملکرد شبیه‌سازی‌شده با مقادیر اندازه‌گیری شده را نشان داد و ضرایب کارایی نش-ساتکلیف بین ۰/۷۶ و ۰/۹۶ بود و همچنین نتیجه‌گیری شد که کم‌آبیاری متوسط، راهبرد مناسبی برای بهبود عملکرد و بهره‌وری آب آبیاری است و در مقابل، کم‌آبیاری شدید به‌طور قابل توجهی عملکرد را کاهش می‌دهد. چنگ و همکاران (۲۰۲۲) پژوهشی به‌منظور ارزیابی مدل AquaCrop برای عملکرد گوجه‌فرنگی گیلاسی تحت مدیریت‌های مختلف آب و نیتروژن پرداختند. نتایج نشان داد که مدل AquaCrop شبیه‌سازی پوشش گیاهی، زیست‌توده و عملکرد نهایی را به‌خوبی ارائه کرده است اما تبخیر و تعرق و بهره‌وری آب را کم برآورد کرد و بهترین راهبرد مدیریت آبیاری برای عملکرد مطلوب محصول (I80N360) بود که ۹۸/۲۴ درصد از عملکرد مطلوب را به دست آورد. وانگ و همکاران (۲۰۲۳) به‌منظور شبیه‌سازی رشد، عملکرد و بهره‌وری آب سیب‌زمینی تحت رژیم‌های مختلف کم آبیاری در شمال غربی چین از مدل AquaCrop استفاده نمودند. مقدار NRMSEبرای مقایسه بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی‌شده برای پوشش گیاهی، زیست‌توده، عملکرد غده خشک، عملکرد غده تر و بهره‌وری آب به‌ترتیب ۱۴/۷، ۲۵، ۱۲/۲۱، ۱۲/۰۲ و ۵/۵۱ درصد و ضریب تعیین مدل به ترتیب ۰/۹۲، ۰/۹۲، ۰/۵۷، ۰/۵۳ و ۰/۹۱ گزارش شده است که نشان دهنده تطبیق مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی‌شده و نیز دقت خوب مدل است. ریس و همکاران (۲۰۲۳) به بررسی عملکرد یونجه با استفاده از مدل AquaCrop پرداختند که مدل توانست دقت خوبی

را برای شبیه‌سازی عملکرد و زیست‌توده نشان دهد. ازاین‌رو، مدل AquaCrop می‌تواند عملکرد محصولات زراعی را در اقلیم‌ها و محیط‌های مختلف به‌خوبی پیش‌بینی کند.

حسینی و همکاران (۱۳۹۴) در منطقه گرگان اثر تغییر اقلیم بر عملکرد سویا را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با استفاده از مدل ریز مقیاس نمایی آماری-LARS WGتحت گزینه‌های انتشار A_2 و B_1، پارامترهای هواشناسی برای دوره‌های آتی را با مدل AquaCrop شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان داد که تحت گزینه‌های انتشار A_2 و B_1 برای دوره ۲۰۳۸-۲۰۱۱ نسبت به دوره پایه، مقادیر زیست‌توده و عملکرد دانه شبیه‌سازی‌شده به‌ترتیب بین ۵ تا ۱۱/۵ درصد و ۸/۳ و ۱۳/۷ درصد کاهش داشت و برای دوره ۲۰۶۶-۲۰۳۹ بین ۱۸/۶ تا ۲۴ درصد و ۱۶ تا ۲۴/۴ درصد افزایش داشت. برای دوره ۲۰۹۴-۲۰۶۷ بین ۹ تا ۲۱/۸ درصد و ۷/۲ تا ۲۱/۲ درصد افزایش نشان داد. سومر (۲۰۲۴) به بررسی عملکرد رقم‌های مختلف نخودفرنگی در تاریخ‌های مختلف کاشت (۱۵ نوامبر، ۳۰ نوامبر و ۱۵ دسامبر) در ترکیه پرداخت. نتایج نشان داد که بیشترین عملکرد دانه نخودفرنگی در تاریخ کاشت دوم و سوم و بیشترین عملکرد دانه از ارقام میسیا و محلی بود. این مطالعه نشان داد که اثر تاریخ کاشت و ارقام بر عملکرد معنی‌دار بود.

بر اساس مطالعات گذشته، تاکنون پژوهشی با مدل گیاهی AquaCrop به همراه گزینه‌های اقلیمی جدید گزارش ششم IPCC برای بررسی اثر تغییرات اقلیم بر گیاه نخودفرنگی در شهرستان بابل انجام نشده است. یکی از تغییرات مهم در سناریوهای گزارش ششم نسبت به گزارش‌های قبلی، سناریوهای جدید SSPs است که برای تعریف سناریوهای تغییر اقلیم استفاده شده است. این روش، به‌جای تکیه بر فرضیات در مورد انتشار گازهای گلخانه‌ای، به عوامل اجتماعی-اقتصادی که موجب تغییرات آب‌وهوا می‌شوند توجه می‌کند؛ بنابراین، سناریوهای گزارش ششم با استفاده از حروف الفبا و عددها علامت‌گذاری شده‌اند که نشان می‌دهند چگونه جامعه بشر و غلظت گازهای گلخانه‌ای در آینده تغییر خواهند کرد. دیگر تغییرات در سناریوهای گزارش ششم عبارتند از:

– استفاده از داده‌های جدید و به‌روزتر از مدل‌های تغییر اقلیم (CMIP6) که دقت و قابلیت پاسخگویی بالاتری نسبت به نسخه قبلی (CMIP5) دارند.

– پوشش مناطق جغرافیایی بیشتر و جزئی‌تر در سناریوهای تغییر اقلیم، به‌خصوص در مورد آفریقا، آسیا و جزایر کوچک.

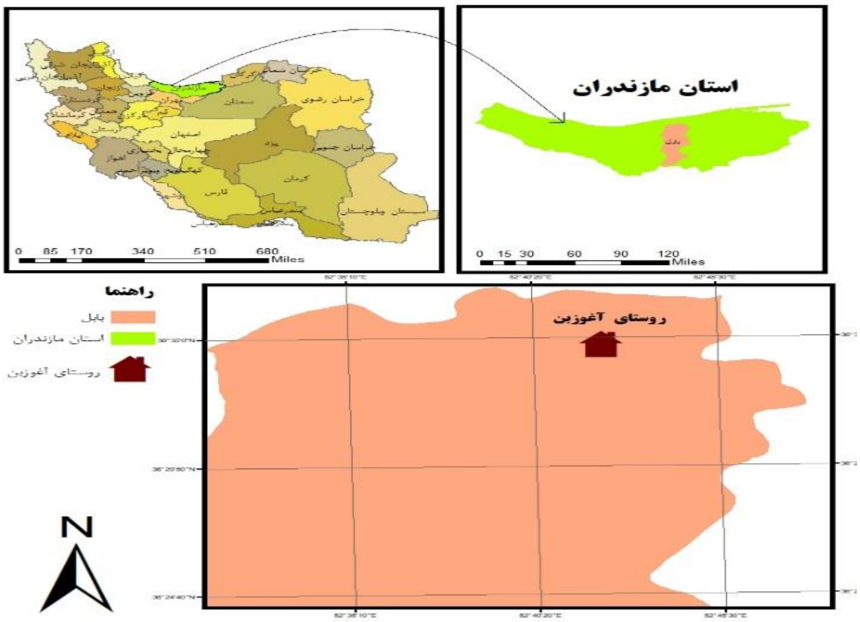
– ارائه بازه‌های اطمینان و احتمالات بالاتر برای پیش‌بینی تغییرات دما، بارش، سطح دریا و رخدادهای شدید آب و هوایی.

– لحاظ کردن عوامل غیرخطی و بازخوردها در سناریوهای تغییر اقلیم، مانند ذوب یدک‌های یخ، تغییرات در جرم خورشید و فعالیت آتشفشان‌ها.

در صورت انجام این پژوهش می‌توان برنامه‌ریزی صحیح و کارآمد جهت الگوی کشت و سازگاری نظام‌های تولید محصولات مورد نظر شهرستان بابل در شرایط اقلیمی آینده ارائه داد. هدف از این پژوهش استفاده از مدل AquaCrop در تخمین عملکرد نخودفرنگی تحت تأثیر تغییر اقلیم و تاریخ کشت در شرایط مختلف آبیاری در شهرستان بابل است.

مواد و روش‌ها

داده‌های مورد بررسی این پژوهش مربوط به یداللهی و همکاران (۱۴۰۰) است. پژوهش مذکور در روستای آغوزبن شهرستان بابل واقع در استان مازندران به طول جغرافیایی ۵۲ درجه و ۴۴ دقیقه و ۲۰ ثانیه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۳۴ دقیقه و ۱۰ ثانیه شمالی و ارتفاع دو متر پایین‌تر از سطح دریا در سال ۱۳۹۹ اجرا شد. این منطقه از نظر اقلیمی (با توجه به مدل تعیین اقلیم دومارتن) به‌عنوان اقلیم معتدل نیمه مرطوب محسوب می‌شود. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

پژوهش حاضر بر روی گیاه نخودفرنگی در شهرستان بابل واقع در استان مازندران انجام گرفت. آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شده بود. تیمارهای مورد بررسی شامل سه سطح آبیاری (۱۰۰ درصد آبیاری کامل (I_1)، ۸۰ درصد آبیاری کامل (I_2) و ۶۰ درصد آبیاری کامل (I_3)) است. در این طرح آزمایشی کرت‌ها به ابعاد ۲×۲ (متر) و آرایش کاشت ۲۰×۵۰ (سانتی‌متر) در نظر گرفته شد. میزان آبیاری تیمارهای مختلف آبیاری در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- میزان آبیاری تیمارهای مختلف آبیاری (یداللهی و همکاران، ۱۴۰۰)

ماه	۱۰۰ درصد نیاز آبی (mm)	۸۰ درصد نیاز آبی (mm)	۶۰ درصد نیاز آبی (mm)
از ۱۶ آبان	12.38	12.38	12.38
آذر	20.12	18.57	17.02
دی	49.02	39.21	29.40
بهمن	61.92	49.53	37.15
اسفند	77.39	61.91	46.43
تا ۱۶ فروردین	50.59	41.64	32.86
مجموع	271.42	223.24	175.24

مدل‌های گردش عمومی جو

برای پیش‌یابی تغییرات آینده اقلیمی از مدل‌های ریاضی با نام مدل‌های گردش عمومی[1] (GCM) استفاده می‌شود. قابلیت اطمینان این مدل‌ها به توان و صحت آن‌ها در بازتولید ویژگی‌های آب و هوایی پایه و دوره آینده بستگی دارد. در این زمینه، برنامه‌ی تحقیقات جهانی آب‌وهوا مجموعه‌ای از آزمایش‌های معروف به پروژه‌ی مقایسه‌ی مدل‌های جفت‌شده[2] (CMIP) را از دهه‌ی ۱۹۹۰ منتشر کرده است که شبیه‌سازی‌های هدفمند و با کیفیتی را برای درک بهتر تغییرات اقلیمی گذشته و انجام پیش‌یابی‌ها و برآوردهای عدم‌قطعیت در آینده ارائه کرده است (آنان و هارگریوز، ۲۰۱۱). در حال حاضر گزارش ششم پروژه‌ی

1 -General Circulation Models

2 -Coupled Model Intercomparison Project

مقایسه‌ی مدل‌های جفت شده (CMIP6) در حال انتشار است. به‌تازگی نیز، مجموعه‌ای از متغیرهای پیش‌بینی کننده از چندین مدل اقلیمی CMIP6 با حساسیت اقلیمی متفاوت منتشر شده است. هر تکرار جدید از پروژه‌ی مقایسه‌ی مدل‌های جفت شده بر این فرض استوار است که نسل نوین GCM نسبت به نسل‌های پیشین دارای پیشرفت‌های بیشتری است، زیرا مدل‌ها به‌تدریج از نظر کارایی محاسباتی، قدرت تفکیک‌پذیری و نمایش فرایندهای فیزیکی بهبود می‌یابند. در گزارش ششم در مقایسه با گزارش پنجم (CMIP5) به‌روزرسانی‌هایی در مورد افزودن پارامترها و فرایندهای فیزیکی جدید و افزایش تفکیک‌پذیری مکانی ارائه‌شده است (ایرینگ و همکاران، ۲۰۱۹). برونداد مدل‌های گزارش ششم فرصت جدیدی برای بررسی سامانه‌ی اقلیمی و پیش‌بینی‌های منطقه‌ای تحت گزینه‌های جدید فراهم می‌کنند. این گزینه‌ها که به SSPها معروف هستند تغییرات محتمل آینده را بر پایه‌ی جنبه‌های اجتماعی مانند عوامل جمعیتی، فنی، اقتصادی، حاکمیتی و محیطی توصیف و مدل می‌کنند (اونیل و همکاران، ۲۰۲۰). لذا پس از بررسی عدم قطعیت در محدوده طرح مطالعاتی این پژوهش از بهترین مدل ممکن استفاده شد.

ریز مقیاس‌سازی برونداد مدل‌هایGCM

مدل‌های گردش عمومی جو ابزار مفیدی برای شبیه‌سازی آب‌وهوایی گذشته، حال و آینده هستند. بااین‌حال، یکی از محدودیت‌های عمده مدل‌های گردش عمومی، بزرگ‌مقیاس بودن متغیرهای اقلیمی شبیه‌سازی‌شده است و آن‌ها نیازمند ریزمقیاس نمایی هستند تا با اعمال رفتارهای محلی در آن‌ها، پیش‌بینی‌هایشان در مقیاس‌های محلی بهبود یابند. به این منظور، روش‌های گوناگونی از جمله روش‌های دینامیکی و آماری برای ریزمقیاس نمایی توسعه داده شده است. مدل‌هایی که برای ریزمقیاس نمایی دینامیکی استفاده می‌شوند، بسیار شبیه همان مدل‌های گردش عمومی هستند، منتها گام‌های زمانی و مکانی شبکه، ریزتر و دقیق‌تر است؛ مثلاً گام مکانی مدل‌های گردش عمومی حدود ۲/۵ در ۲/۵ درجه جغرافیایی و حدود ۲۵۰ کیلومتر در عرض‌های جغرافیایی محدوده کشور ایران است درحالی‌که گام‌های مکانی مدل‌های ریزمقیاس نمایی دینامیکی بین ۲۰ تا ۵۰ کیلومتر در نظر گرفته می‌شود. البته این عدد ثابت نیست و ممکن است گام‌های مکانی را ۱۰ کیلومتر در نظر گرفت. روش دیگری که می‌توان مدل‌های گردش عمومی را ریزمقیاس نمود، ریزمقیاس نمایی آماری است. در این روش یک ارتباط آماری با استفاده از رگرسیون ساده، چند متغیره، شبکه عصبی و غیره بین رفتار واقعی ایستگاه و برونداد مدل گردش عمومی ایجاد می‌شود. بعد از صحت‌سنجی، این معادلات می‌توانند در ریزمقیاس نمایی پیش‌بینی‌های آینده با استفاده از گزینه‌های انتشار، مورد استفاده قرار گیرند. هدف از ریزمقیاس نمایی پیش‌نگری‌های آینده برخی از متغیرها برای قابل استفاده کردن آن‌ها در سطح شبکه است که برای برنامه‌ریزی توسعه و تصمیم‌گیری برای راهبردهای کاهش و سازگاری مؤثر و کارآمد است. ریزمقیاس نمایی آماری روشی نسبتاً سریع و کارآمد برای فرموله کردن رابطه آماری بین بروندادهای مدل گردش عمومی و داده های مشاهداتی ایستگاه است و بیش از سایر روش‌ها مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است (فاولر و همکاران، ۲۰۰۷)؛ بنابراین در این پژوهش ریزمقیاس نمایی آماری با استفاده از نرم‌افزار R و روش ریزمقیاس نمایی WorldClim انجام شد.

روش ریزمقیاس نمایی WorldClim یکی از ابزارهای معتبر برای تولید داده‌های اقلیمی با دقت بالا است که به‌ویژه در تحقیقات کشاورزی و زیست‌محیطی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش به‌منظور کاهش عدم قطعیت‌های مربوط به داده‌های اقلیمی در مقیاس‌های بزرگ و ارائه داده‌های دقیق‌تر در مقیاس‌های محلی طراحی شده است. منابع داده: WorldClim از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی موجود در سطح جهانی استفاده می‌کند. این

داده‌ها شامل دما، بارش و سایر پارامترهای اقلیمی هستند که در طول زمان جمع‌آوری شده‌اند.

مدل‌سازی ریزمقیاس: این روش از تکنیک‌های ریز مقیاس‌سازی مانند Kriging و روش‌های آماری دیگر بهره می‌برد تا داده‌های اقلیمی را به مقیاس‌های کوچک‌تری مانند نواحی کشاورزی خاص تبدیل کند. این کار به محققان کمک می‌کند تا توزیع فضایی دقیق‌تری از پارامترهای اقلیمی داشته باشند.

کاربرد در کشاورزی: با استفاده از داده‌های ریزمقیاس شده، می‌توان تأثیرات تغییرات اقلیمی را بر عملکرد محصولات زراعی به‌طور دقیق‌تری ارزیابی کرد. در مطالعه ما، این داده‌ها به‌عنوان ورودی برای مدل AquaCrop استفاده شدند تا عملکرد نخودفرنگی تحت گزینه‌های مختلف اقلیمی شبیه‌سازی شود.

دقت و اعتبار: WorldClim به‌طور مداوم به‌روزرسانی می‌شود و داده‌های آن بر اساس تحقیقات و مشاهدات جدید بهبود می‌یابد. این ویژگی باعث می‌شود که نتایج به‌دست‌آمده از این داده‌ها، معتبر و قابل اعتماد باشند.

مدل AquaCrop

یکی از مدل‌های شبیه‌سازی رشد گیاه مدل AquaCrop است که از اصلاح و بازنگری نشریه ۳۳ فائو توسط متخصصان برجسته از سرتاسر جهان به دست آمده است. مدل AquaCrop یک ابزار قدرتمند و با ارزش برای بهبود مدیریت آب در مزرعه و بهره‌وری آب است، سادگی مدل AquaCrop نیاز به داده‌های ورودی کمتر و دقت قابل قبول از مزایای استفاده از آن است (استدوتو و همکاران، ۲۰۰۹). پارامترهای مهم مورد بررسی در این مدل شامل عملکرد محصول، کارایی مصرف آب (WP) و شاخص برداشت (HI) می‌باشند:

$$WP = Yield/ET \qquad (۱)$$

$$HI = Yield/Biomass \qquad (۲)$$

که در آن: عملکرد و بیوماس (زیست‌توده) بر حسب کیلوگرم در هکتار و آب مصرفی (ET) بر حسب مترمکعب در هکتار در طی دوره رشد است. همچنین WP، پارامتر بهره‌وری آب بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب است.

ورودی‌های مدل AquaCrop به‌منظور شبیه‌سازی عملکرد و زیست‌توده محصولات کشاورزی شامل چهار گروه اطلاعات داده‌های هواشناسی، گیاه‌شناسی، خاکشناسی، مدیریت مزرعه و آبیاری است.

_ داده‌های هواشناسی: داده‌های بارش، تبخیر و تعرق پایه، حداقل و حداکثر دما، تشعشع (ساعات آفتابی)، سرعت باد و رطوبت نسبی و میانگین سالانه غلظت CO_2 موجود در اتمسفر است.

_ داده‌های گیاه‌شناسی: پارامترهای رشد گیاه مانند (مشخصات فنولوژیکی، عمق ریشه و ...) که رشد محصول و جذب آب را در ریشه تشریح می‌کند. همچنین داده‌های گیاه‌شناسی به دو دسته ثابت و غیرثابت طبقه‌بندی می‌شود. داده‌های ثابت بر اساس شرایط مدیریتی تغییر نمی‌کنند و به‌صورت پیش‌فرض در مدل قرار دارند و می‌توان از آن‌ها استفاده کرد. درحالی‌که داده‌های غیرثابت بسته به شرایط محیطی و مدیریتی تغییر می‌کنند؛ مانند مشخصات فنولوژیکی گیاهان در طی دوره رشد که بسته به شرایط محیطی و مدیریتی تغییر می‌کنند.

_ داده‌های خاکشناسی: پارامترهای فیزیکی خاک شامل بافت خاک، چگالی، هدایت هیدرولیکی و مقدار رطوبت حجمی خاک در ظرفیت زراعی (θ_{fc}) و نقطه پژمردگی دائم (θ_{pwp}) و ... می‌باشند.

_ مدیریت مزرعه و آبیاری: داده‌های مدیریت به دو گروه اصلی طبقه‌بندی می‌شود. ۱- مدیریت مزرعه ۲- مدیریت آب

مدیریت‌های مزرعه، گزینه‌های مربوط به سطح حاصلخیزی را طی شبیه‌سازی در نظر می‌گیرد.

در این پژوهش داده‌های هواشناسی سال‌های پایه (۲۰۲۱-۲۰۲۰) و (۲۰۲۲-۲۰۲۱) از ایستگاه هواشناسی قراخیل برای شبیه‌سازی به مدل داده شد.

عملکرد و زیست‌توده شبیه‌سازی‌شده توسط مدل AquaCrop به دست آمد. در نهایت برای بررسی اثر تغییر اقلیم از منظر علم هوا و اقلیم‌شناسی کلیه پارامترهای مربوط به گیاه نخودفرنگی بر اساس واسنجی‌های انجام‌شده از دوره تاریخی در نظر گرفته شد. با فرض ثابت بودن شرایط آب، خاک و گیاه به وجه اساسی محدود کننده محیط رشد گیاه یعنی به تغییرات دما، بارش و تابش در آینده دور و آینده نزدیک تحت گزینه‌های SSP۱۲۶، SSP۲۴۵ و SSP۵۸۵ در سه دهه آینده پرداخته شد. همچنین جابجایی تاریخ کشت به‌طوری‌که تغییرات عملکرد ناشی از تغییر اقلیم جبران شود بررسی شد.

در این پژوهش برای ارزیابی داده‌های تولید شده از مدل ریزمقیاس نمایی تغییر اقلیم، از شاخص‌های آماری ضریب همبستگی (R^2) و شاخص مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای مطلق (MBE) استفاده شد.

از آزمون کلموگروف–اسمیرنوف (KS) برای مقایسه توزیع‌های احتمالاتی استفاده شد. آزمون KS روش ناپارامتری ساده برای همسان‌سازی اطلاعات تجربی با توزیع آماری منتخب است. در این آزمون احتمال یکسان بودن دو توزیع مشاهداتی و محاسباتی بررسی شد. اگر این مقدار کوچک و کمتر از سطح معنی‌داری (۰/۰۱ تا ۰/۰۵) باشد، یکسان بودن اقلیم شبیه‌سازی‌شده تولیدی و اقلیم واقعی غیرمحتمل خواهد بود (دانش فراز و رزاق پور، ۱۳۹۳).

نتایج و بحث

ارزیابی مدل ریزمقیاس نمایی

بر اساس داده‌های تولیدشده از مدل و داده‌های مشاهداتی ایستگاه هواشناسی قراخیل در شهرستان قائم‌شهر در دوره پایه ۲۰۱۴-۱۹۸۵، برای دما و بارش مقایسه‌ای انجام شد که نتایج آن در جدول ۲ آورده شده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده، بیشترین و کمترین اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی و مشاهده‌شده، به‌ترتیب مربوط به بارندگی و دمای حداقل است. به‌طورکلی میزان خطای موجود در شبیه‌سازی بارش در مقایسه با خطای موجود در شبیه‌سازی دما بالاتر است که با توجه به خاصیت بی‌ثباتی و تغییرپذیری بارش قابل توجیه و قابل‌قبول است.

در جدول ۳ نتایج حاصل از آزمون KS برای پارامترهای دمای بیشینه، دمای کمینه و بارش ارائه شده است. نتایج نشان داد که پارامترهای دما با دقت بالایی شبیه‌سازی‌شده اما در شبیه‌سازی بارش نسبت به دیگر پارامترها خطا بیشتر ولی در حد قابل‌قبول است.

جدول ۲- شاخص‌های آماری ارزیابی مدل

پارامتر	R^2	RMSE	MBE
حداکثر دما	0.88	4.9	0.4
حداقل دما	0.91	3.0	2.4
بارش	0.29	1.6	1.2

جدول ۳- نتایج آزمون KS برای پارامترهای دمای بیشینه، دمای کمینه و بارش ماهانه داده‌های شبیه‌سازی و مشاهده‌شده

	ماه	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	مه	ژوئن	جولای	آگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
دمای	آزمون KS	0.120	0.107	0.057	0.077	0.078	0.102	0.117	0.081	0.100	0.099	0.105	0.110
بیشینه	سطح معنی‌داری	0.031	0.083	0.910	0.495	0.481	0.193	0.040	0.426	0.137	0.141	0.095	0.047
دمای	آزمون KS	0.131	0.110	0.073	0.094	0.062	0.095	0.129	0.105	0.094	0.088	0.131	0.113
کمینه	سطح معنی‌داری	0.010	0.067	0.599	0.204	0.818	0.186	0.012	0.096	0.203	0.284	0.010	0.054
بارش	آزمون KS	0.124	0.095	0.088	0.108	0.125	0.128	0.260	0.266	0.250	0.091	0.123	0.110
	سطح معنی‌داری	0.022	0.189	0.297	<0.077	<0.020	<0.016	<0.001	<0.001	<0.001	0.248	0.025	0.070

واسنجی مدل AquaCrop

در این پژوهش، از اطلاعات دو ساله مزرعه مورد مطالعه، داده‌های لازم برای ارزیابی مدل AquaCrop به دست آمد. به منظور واسنجی این مدل، از داده‌های اندازه گیری شده سال اول استفاده شد. جدول ۴ مقایر داده‌های ورودی مورد استفاده در مرحله واسنجی مدل AquaCrop برای گیاه نخودفرنگی را نشان می‌دهد که پس از وارد کردن تمامی اطلاعات موردنیاز، مدل AquaCrop اجرا شد.

جدول ۴- مقادیر پارامترهای ورودی مدل AquaCrop

پارامتر	مقدار	واحد
تراکم کشت	160000	گیاه در هکتار
پوشش گیاهی هر نهال هنگام جوانه‌زنی	5	سانتی‌متر مربع
پوشش گیاهی اولیه (CC_0)	0.8	درصد
بیشینه رشد کانوپی (CCx)	100	درصد
مدت‌زمان کاشت تا جوانه‌زنی	12	روز
مدت‌زمان کاشت تا بیشینه رشد کانوپی	88	روز
مدت‌زمان کاشت تا رسیدن و پیری	148	روز
مدت‌زمان کاشت تا برداشت محصول	176	روز
ضریب رشد پوشش (CGC)	9.7	درصد روز
ضریب کاهش پوشش (CDC)	9.7	درصد روز
عمق مؤثر ریشه	100	سانتی‌متر
مدت‌زمان رسیدن به بیشینه رشد ریشه	90	روز
دمای پایه	4	درجه سانتی‌گراد
دمای بالا	29	درجه سانتی‌گراد
بهره‌وری مصرف آب نرمال شده (WP^*)	16	گرم بر مترمربع
شاخص برداشت (HI)	40	درصد
حد بالا ضریب تخلیه آب خاک برای توسعه گیاه	0.22	–
حد پایین ضریب تخلیه آب خاک برای توسعه گیاه	0.6	–
حداکثر ضریب گیاهی برای تعرق	1.1	درصد روز

مقادیر شاخص‌های آماری واسنجی و صحت‌سنجی مدل AquaCrop در جدول ۵ ارائه شده است. نتایج شاخص‌های آماری نشان می‌دهد که مدل AquaCrop توانست با دقت بالایی مقدار عملکرد و زیست‌توده را شبیه‌سازی کند. نتایج هر دو سال کشت نشان می‌دهد که مقدار RMSE و NRMSE در حد پایین به‌دست آمد که نشان‌دهنده کارایی بهتر مدل است.

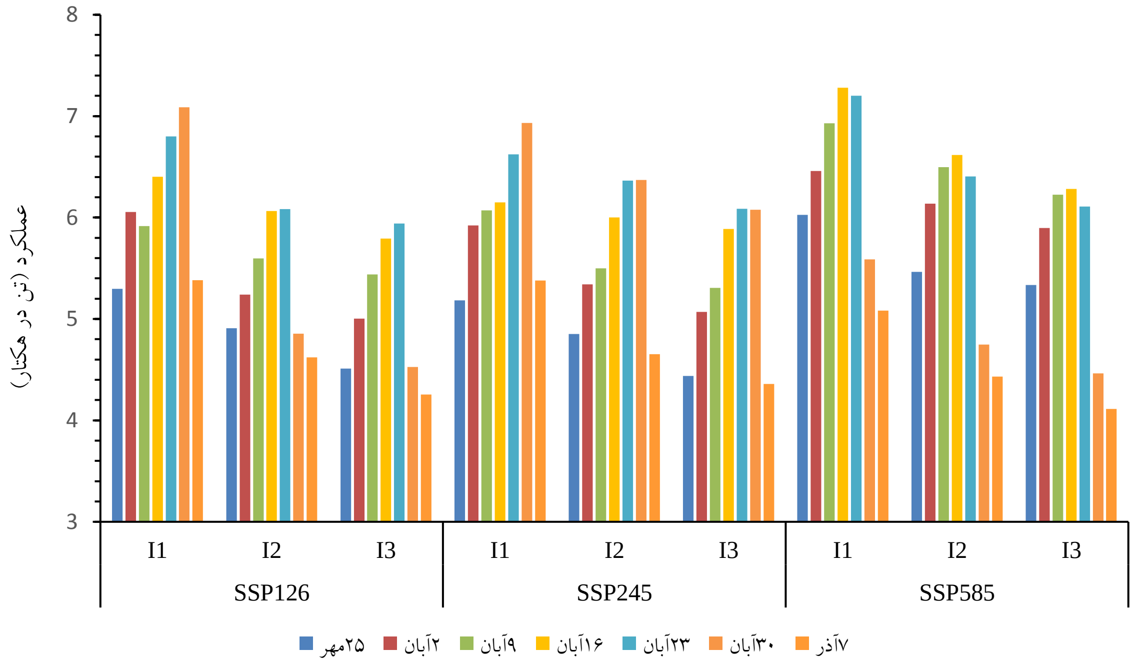
جدول ۵- شاخص‌های آماری واسنجی و صحت‌سنجی مدل AquaCrop

پارامتر	مرحله	R^2	RMSE	NRMSE	MBE
عملکرد (کیلوگرم در هکتار)	واسنجی	0.99	0.13	1.95	0.12
	صحت‌سنجی	0.98	0.10	1.49	0.09
زیست‌توده (کیلوگرم در هکتار)	واسنجی	0.99	0.37	2.15	0.35
	صحت‌سنجی	0.99	0.34	1.93	0.31

مقادیر عملکرد شبیه‌سازی شده نخودفرنگی در تاریخ‌های مختلف کاشت در سه دهه آینده ۲۰۳۲-۲۰۲۳، ۲۰۴۲-۲۰۳۳، ۲۰۵۲-۲۰۴۳ در شکل‌های ۲ تا ۴ ارائه شده است. با توجه به شکل ۲ بیشترین عملکرد نخودفرنگی در دهه اول بر اساس گزینه‌ی SSP۱۲۶ در تاریخ کشت ۳۰ آبان و در تیمار I_1 به مقدار ۷/۰۸۹ تن در هکتار شبیه‌سازی شد اما در تیمارهای I_2 و I_3 عملکرد پایین شبیه‌سازی شد بر همین اساس بهترین تاریخ کاشت که در آن تمام تیمارها

عملکرد مناسبی داشته باشند انتخاب شد. بهترین تاریخ کاشت در دهه اول بر اساس گزینه‌ی SSP۱۲۶ در تاریخ ۲۳ آبان و تاریخ بعدی تاریخ ۱۶ آبان است. بیشترین عملکرد نخودفرنگی در دهه اول بر اساس گزینه‌ی SSP۲۴۵ در تاریخ کشت ۳۰ آبان و در تیمار I_1 به مقدار ۶/۹۳۴ تن در هکتار شبیه‌سازی شد و بهترین تاریخ کاشت در دهه اول بر اساس گزینه‌ی SSP۲۴۵ در تاریخ ۳۰ آبان و تاریخ بعدی تاریخ ۲۳ آبان است.

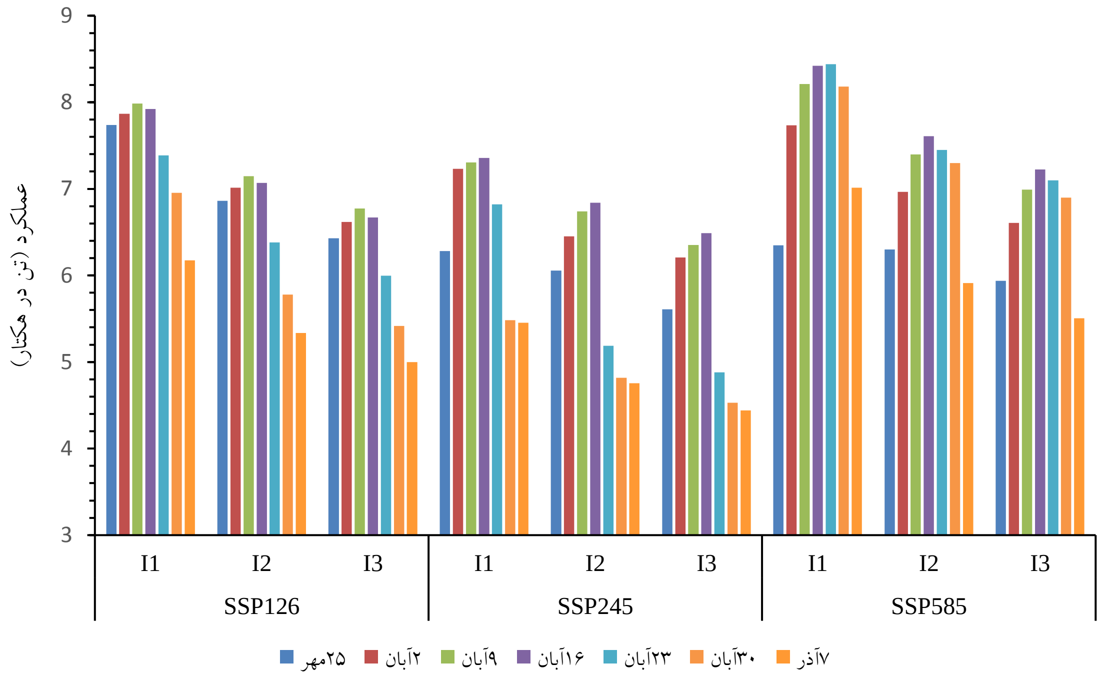
بیشترین عملکرد نخودفرنگی در دهه اول بر اساس گزینه‌ی SSP۵۸۵ در تاریخ کشت ۱۶ آبان و در تیمار I_1 به مقدار ۷/۲۸۱ تن در هکتار شبیه‌سازی شد و بهترین تاریخ کاشت در دهه اول بر اساس گزینه‌ی SSP۵۸۵ در تاریخ ۱۶ آبان و تاریخ بعدی تاریخ ۲۳ آبان است؛ بنابراین با توجه به شکل ۲ بیشترین مقدار عملکرد نخودفرنگی در دهه اول در گزینه‌ی بدبینانه SSP۵۸۵ شبیه‌سازی شد. در شرایط اقلیمی آینده این گزینه‌ی SSP۵۸۵ در دهه اول، کاهش دما و افزایش بارندگی در ماه‌های مقارن با فصل رشد نخودفرنگی رخ خواهد داد که هر دو عامل، اثر مثبتی بر عملکرد محصول نخودفرنگی خواهند داشت. پژوهشی توسط احمد و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی تأثیر تاریخ‌های مختلف کاشت بر عملکرد و اجزای عملکرد در رقم‌های مختلف نخودفرنگی در بنگلادش صورت پذیرفت. تاریخ کاشت شامل ۲۹ اکتبر، ۱۳ نوامبر و ۲۸ نوامبر و رقم شامل BARI motor-1، BADC motor-1، Natore local و Narail بود. بیشترین عملکرد دانه (۱۳۱۹/۳ کیلوگرم در هکتار) در تاریخ کشت ۱۳ نوامبر با رقم Natore local و کم‌ترین عملکرد دانه (۳۳۰/۳۵ کیلوگرم در هکتار) در تاریخ کشت ۲۸ نوامبر با رقم Narail به‌دست آمد. نتایج نشان داد که عملکرد و اجزای عملکرد به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر تاریخ کاشت و ارقام نخودفرنگی قرار گرفت.



شکل ۲- مقادیر عملکرد شبیه‌سازی‌شده نخودفرنگی در تاریخ‌های کاشت مختلف در دوره ۲۰۳۲-۲۰۲۳

با توجه به شکل ۳ بیشترین عملکرد نخودفرنگی در دهه دوم بر اساس گزینه‌ی SSP۱۲۶ در تاریخ کشت نه آبان و در تیمار I_1 به مقدار ۷/۹۸۴ تن در هکتار شبیه‌سازی شد؛ بنابراین بهترین تاریخ کاشت در دهه دوم بر اساس گزینه‌ی SSP۱۲۶ در تاریخ نه آبان و تاریخ بعدی تاریخ ۱۶ آبان است. بیشترین عملکرد نخودفرنگی در دهه دوم بر اساس گزینه‌ی SSP۲۴۵ در تاریخ کشت ۱۶ آبان و در تیمار I_1 به مقدار ۷/۳۵۸ تن در هکتار شبیه‌سازی شد؛

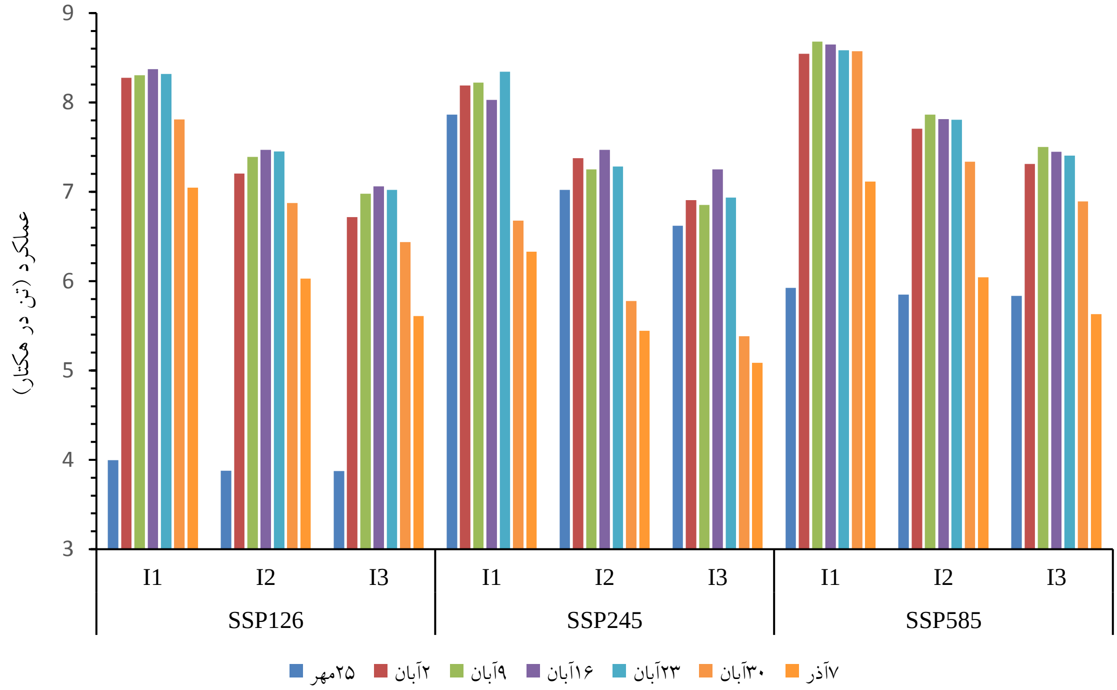
بنابراین بهترین تاریخ کاشت در دهه دوم بر اساس گزینه‌ی SSP۲۴۵ در تاریخ ۱۶ آبان و تاریخ بعدی تاریخ نه آبان است. بیشترین عملکرد نخودفرنگی در دهه دوم بر اساس گزینه‌ی SSP۵۸۵ در تاریخ کشت ۲۳ آبان و در تیمار I_1 به مقدار ۸/۴۴۰ تن در هکتار شبیه‌سازی شد؛ بنابراین بهترین تاریخ کاشت در دهه دوم بر اساس گزینه‌ی SSP۵۸۵ در تاریخ ۱۶ آبان و تاریخ بعدی تاریخ ۲۳ آبان است؛ بنابراین با توجه به شکل ۳ بیشترین مقدار عملکرد نخودفرنگی در دهه دوم در گزینه‌ی بدبینانه SSP۵۸۵ شبیه‌سازی شد. در شرایط اقلیمی آینده گزینه‌ی SSP۵۸۵ در دهه دوم، افزایش دما و کاهش بارندگی در ماه‌های مقارن با فصل رشد نخودفرنگی رخ خواهد داد اما از طرفی علاوه بر اثرات غیرمستقیم دما و بارش، افزایش غلظت دی‌اکسید کربن، به‌صورت مستقیم اثرات مثبتی بر نخودفرنگی به‌عنوان یک گیاه C3 می‌گذارد، ازاین‌رو کاهش عملکرد ناشی از افزایش دما جبران خواهد شد. سومر (۲۰۲۴) به بررسی عملکرد رقم‌های مختلف نخودفرنگی در تاریخ‌های مختلف کاشت (۱۵ نوامبر، ۳۰ نوامبر، ۱۵ دسامبر) در ترکیه پرداخت. نتایج نشان داد که اثر تاریخ کاشت و رقمهای مختلف بر عملکرد نخودفرنگی معنی‌دار بوده و بیشترین عملکرد دانه نخودفرنگی در تاریخ کاشت دوم و سوم و از ارقام میسیا و محلی بود.



شکل ۳- مقادیر عملکرد شبیه‌سازی‌شده نخودفرنگی در تاریخ‌های کاشت مختلف در دوره ۲۰۴۲-۲۰۳۳

با توجه به شکل ۴ بیشترین عملکرد نخودفرنگی در دهه سوم بر اساس گزینه‌ی SSP۱۲۶ در تاریخ کشت ۱۶ آبان و در تیمار I_1 به مقدار ۸/۳۷۳ تن در هکتار شبیه-سازی شد؛ بنابراین بهترین تاریخ کاشت در دهه سوم بر اساس گزینه‌ی SSP۱۲۶ در تاریخ ۱۶ آبان و تاریخ بعدی تاریخ ۲۳ آبان است. بیشترین عملکرد نخودفرنگی در دهه سوم بر اساس گزینه‌ی SSP۲۴۵ در تاریخ کشت ۲۳ آبان و در تیمار I_1 به مقدار ۸/۳۴۵ تن در هکتار شبیه‌سازی شد؛ بنابراین بهترین تاریخ کاشت در دهه سوم بر اساس گزینه‌ی SSP۲۴۵ در تاریخ ۲۳ آبان و تاریخ بعدی تاریخ ۱۶ آبان است. بیشترین عملکرد نخودفرنگی در دهه سوم بر اساس گزینه‌ی SSP۵۸۵ در تاریخ کشت نه آبان و در تیمار I_1 به مقدار ۸/۶۸۲ تن در هکتار شبیه‌سازی شد؛ بنابراین بهترین تاریخ کاشت در دهه سوم بر اساس گزینه‌ی SSP۵۸۵ در تاریخ نه آبان و تاریخ بعدی تاریخ ۱۶ آبان است؛ بنابراین با توجه به شکل ۴ بیشترین مقدار عملکرد نخودفرنگی در

دهه سوم در گزینه‌ی بدبینانه SSP۵۸۵ شبیه‌سازی شد. در شرایط اقلیمی آینده گزینه‌ی SSP۵۸۵ در دهه سوم، افزایش دما و افزایش بارندگی در ماه‌های مقارن با فصل رشد نخودفرنگی رخ خواهد داد. راواسی و همکاران (۲۰۲۰) با شبیه‌سازی عملکرد نخودفرنگی با استفاده از مدل STICS تحت دو گزینه‌ی RCP۴/۵ و RCP۸/۵ نشان دادند که تغییرات آب و هوایی باعث کاهش عملکرد ارقام فعلی نخودفرنگی می‌شود و افزایش آبیاری از کاهش عملکرد جلوگیری نمی‌کند؛ اما با ارقام جدید بهبودیافته نخودفرنگی که فاز رویشی کوتاه‌تر و افزایش تحمل به دمای آن بالاتر است، شبیه‌سازی عملکرد نخودفرنگی افزایش و مصرف آب کاهش یافت. راحمی‌کاریزکی و همکاران (۱۴۰۱) اثر تغییر اقلیم بر صفات فنولوژیک نخود تحت سه تاریخ کاشت مختلف (آذر، دی و بهمن) در شهرستان گنبد بررسی کردند. نتایج نشان داد با افزایش دما در اقلیم آینده طول دوره رشد نخود کاهش می‌یابد؛ اما افزایش غلظت CO_2 تأثیری روی دوره رشد نخود ندارد و همچنین تأخیر در کاشت نخود باعث کوتاه‌تر شدن دوره رشد نخود و کاهش عملکرد می‌شود.



شکل ۴- مقادیر عملکرد شبیه‌سازی‌شده نخودفرنگی در تاریخ‌های کاشت مختلف در دوره ۲۰۵۲-۲۰۴۳

نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثرات تغییر اقلیم بر عملکرد گیاه نخودفرنگی در سه دهه آینده ۲۰۳۲-۲۰۲۳، ۲۰۴۲-۲۰۳۳، ۲۰۵۲-۲۰۴۳ تحت گزینه‌های اقلیمی SSP۱۲۶، SSP۲۴۵ و SSP۵۸۵ مورد بررسی قرار گرفت و تغییر تاریخ کاشت به‌عنوان راهکار سازگاری برای بهبود عملکرد گیاه نخودفرنگی ارزیابی شد. نتایج عملکرد شبیه‌سازی شده نخودفرنگی برای تیمارهای مختلف در دوره‌های مختلف توسط مدل AquaCrop، نشان داد که بیشترین مقدار عملکرد نخودفرنگی برای تمام تیمارهای آبیاری، در دوره ۲۰۵۲-۲۰۴۳ (دهه سوم) شبیه‌سازی شد که با توجه به شرایط اقلیمی آینده، افزایش دما و بارندگی رخ خواهد داد اما از طرفی هم با افزایش غلظت دی‌اکسید کربن، اثرات مثبتی بر گیاه نخودفرنگی به‌عنوان یک گیاه C3 ایجاد می‌شود، ازاین‌رو کاهش عملکرد ناشی از افزایش دما جبران خواهد شد. طبق نتایج به‌دست‌آمده از مدل AquaCrop تحت گزینه‌های SSP و در سه سطح ۱۰۰٪، ۸۰ ٪و ۶۰ ٪ آبیاری، کمترین میزان عملکرد محصول نخودفرنگی مربوط

به تیمار I_3 در دوره ۲۰۳۲–۲۰۲۳ و برای گزینه‌ی SSP۱۲۶ و ۵/۷۹۲ تن بر هکتار است و بیشترین میزان عملکرد محصول نخودفرنگی مربوط به تیمار I_1 در دوره ۲۰۵۲–۲۰۴۳ و برای گزینه‌ی SSP۵۸۵ و ۸/۶۴۸ تن بر هکتار است. مقدار عملکرد شبیه‌سازی‌شده نخودفرنگی تحت گزینه‌های SSP و در تاریخ کشت ۱۶ آبان در دهه اول نسبت به دوره پایه، کاهش و در دهه دوم و دهه سوم نسبت به دوره پایه، افزایش خواهد داشت. در دهه ۲۰۳۲–۲۰۲۳، بیشترین زیست‌توده با مقدار ۱۷/۱۲۹ تن در هکتار برای تیمار I_1 و گزینه SSP ۵۸۵ در تاریخ ۲۳ آبان مشاهده شد. در دهه ۲۰۴۲–۲۰۳۳، بیشترین زیست‌توده با مقدار ۲۰/۱۱۲ تن در هکتار برای تیمار I_1 و گزینه SSP ۵۸۵ در تاریخ ۳۰ آبان شبیه‌سازی شد. در دهه ۲۰۵۲–۲۰۴۳، بیشترین زیست‌توده با مقدار ۲۰/۶۴۷ تن در هکتار برای تیمار I_1 و گزینه SSP ۱۲۶ در تاریخ ۲۳ آبان شبیه‌سازی شد. تغییر اقلیم هم باعث افزایش و هم کاهش عملکرد و زیست‌توده نخودفرنگی می‌شود، اما این تغییرات بستگی به شرایط آبیاری، تاریخ کشت و گزینه‌ی اقلیمی دارد. در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که عملکرد و زیست‌توده نخود در تیمارهای با آبیاری کامل تحت شرایط مختلف اقلیمی مانند SSP ۵۸۵ افزایش می‌یابد. در تیمارهای با کاهش آبیاری (I_3) و برخی شرایط اقلیمی، عملکرد و زیست‌توده به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش‌یافته است؛ بنابراین، با مدیریت مناسب تاریخ‌های کشت و استفاده از آبیاری بهینه، عملکرد و زیست‌توده نخود تحت تأثیر تغییر اقلیم می‌تواند افزایش یابد، اما در صورت عدم مدیریت صحیح، کاهش عملکرد در شرایط خاص نیز ممکن است رخ دهد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، تغییر تاریخ کاشت به‌عنوان راهکاری مناسب برای بهبود عملکرد نخودفرنگی مؤثر خواهد بود به‌طوری‌که بهترین تاریخ کاشت در دهه اول در تاریخ کشت ۲۳ آبان و در دهه‌های دوم و سوم در تاریخ کشت ۱۶ آبان است که باعث تولید عملکرد بالاتری نسبت به سایر تاریخ-های کاشت در شرایط تغییر اقلیم خواهد شد. تفاوت هفت روزه در تاریخ کشت و تغییرات قابل‌توجه در عملکرد محصولات زراعی، به عوامل فنی و زراعی مختلفی مرتبط است که عبارت‌اند از: تغییر در دما و دوره رشد، تأثیر بر دسترسی به منابع نوری، زمان‌بندی تطابق با بارش و منابع آبی، مدیریت آفات و بیماری‌ها، رشد و رقابت علف‌های هرز، اثر تغییر اقلیم بر شدت و الگوی بارش و اثر بر مراحل فیزیولوژیکی حساس.

تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافعی وجود ندارد و این مسئله مورد تأیید نویسندگان مقاله است.

فهرست منابع

۱. انوری ساوجبلاغی، کامران، تاجبخش، مهدی، چوگان، رجب، و حاجی آقایاری، منوچهر، ۱۳۹۰. بررسی روند تغییرات عملکرد و اجزای عملکرد هیبریدهای ذرت دانه‌ای در انواع گروه‌های رسیدگی در تاریخ کشته‌ای مختلف. *همایش ملی تغییر اقلیم و تأثیر آن بر کشاورزی و محیط‌زیست*، ارومیه، دوم مرداد، ۹ ص.

۲. جلالی، جواد، نصیری، مرتضی، حبیبی، معصومه، و خیری، نوراله، ۱۳۹۴. بررسی امکان افزایش ضریب موفقیت کشت مستقیم ژنوتیپ‌های برنج با تغییر تاریخ کاشت. *پژوهشی فیزیولوژی گیاهان زراعی*، ۷(۲۶)، صص. ۸۵–۱۰۳.

۳. حسینی، سیده طیبه، خوش‌روش، مجتبی، ضیاتبار احمدی، میرخالق، ۱۳۹۴. بررسی اثر تغییر اقلیم و ارزیابی تغییر تاریخ کاشت بر عملکرد سویا. *پژوهش آب در کشاورزی*، ۲۹(۴)، صص. ۵۵۹–۵۷۵.
doi: https://doi.org/10.22092/jwra.2016.105829

۴. حق‌وردیان، مهرداد، سام‌دلیری، مرتضی، مبصر، حمیدرضا، و موسوی میرکلایی، امیرعباس، ۱۳۹۰. بررسی تأثیر تاریخ کاشت بر عملکرد و برخی صفات در کشت مستقیم ارقام مختلف برنج (Oryza sativa L.). *پژوهش در علوم زراعی*، ۳(۱۲)، صص. ۱-۱۶.

۵. دانش فراز، رسول، و رزاق‌پور، هادی، ۱۳۹۳. ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر تبخیر و تعرق پتانسیل در استان آذربایجان غربی. *فضای جغرافیایی*، ۱۴(۴۶)، صص. ۱۹۹-۲۱۱.

۶. راحمی کاریزکی، علی، ثنائی، کوروش، نخزری مقدم، علی، غلامعلی‌پور علمداری، ابراهیم، پیردهقان، سارا، حبیبیان، لیلا، ۱۴۰۱. اثر تغییر اقلیم بر صفات فنولوژیک نخود (Cicer arietinum L.) تحت شرایط دیم و آبی در شهرستان گنبد. *تولید گیاهان زراعی*، (۱)۱۵، صص. ۵۷-۷۲.

۷. فراهانی‌پاد، پوریا، پاک‌نژاد، فرزاد، ایلکایی، محمدنبی، حبیبی، داوود، و داوودی فرد، مهدی، ۱۳۹۰. شبیه‌سازی عملکرد و اجزای عملکرد سویا (رقم ویلیامز) در چهار تاریخ کاشت با استفاده از مدل CROPGRO-Soybean در منطقه کرج. *زراعت و اصلاح نباتات*، ۸(۴)، صص. ۳۱-۴۱.

۸. قاسم بگلو، مهدی، صدقی، محمد، سید شریفی، رئوف، و فرزانه، سلیم، ۱۴۰۰. اثر کودهای زیستی بر عملکرد و اجزای عملکرد دانه نخودفرنگی (Pisum sativum L.) تحت سطوح مختلف آبیاری. *دانش کشاورزی و تولید پایدار*، ۳۱(۳)، صص. ۱۶۹-۱۸۰. doi: 10.22034/saps.2021.43011.2583

۹. یداللهی، امیرحسین، خوش‌روش، مجتبی، و غلامی سفیدکوهی، محمدعلی، ۱۴۰۰. تأثیر کم آبیاری تنظیم‌شده با آب مغناطیسی بر خواص کمی، کیفی و بهره‌وری آب نخودفرنگی. *پژوهش آب در کشاورزی*، ۳۵(۴)، صص. ۳۷۳-۳۸۹.
doi:https://doi.org/10.22092/jwra.2021.356340.897

10. Ahmed, B., Hasan, A.K., Karmakar, B., Hasan, M.S., Akter, F., Saha, P.S. and Haq, M.E., 2020. Influence of date of sowing on growth and yield performance of field Pea (Pisum sativum L.) genotypes. *Asian Research Journal of Agriculture*, 13(2), pp. 26-34. **doi: 10.9734/ARJA/2020/v13i230099**

11. Annan, J.D. and Hargreaves, J.C., 2011. Understanding the CMIP3 Multimodel Ensemble. *Journal of Climate*, 24(16), pp.4529-4538. doi: https://doi.org/10.1175/2011JCLI3873.1

12. Challinor, A.J., Watson, J., Lobell, D.B., Howden, S.M., Smith, D.R. and Chhetri, N., 2014. A meta-analysis of crop yield under climate change and adaptation. *Nature Climate Change*, 4(4), pp.287-291. **https://doi.org/10.1038/nclimate2153**

13. Cheng, M., Wang, H., Fan, J., Xiang, Y., Liu, X., Liao, Z., Abdelghany, A.E., Zhang, F. and Li, Z., 2022. Evaluation of AquaCrop model for greenhouse cherry tomato with plastic film mulch under various water and nitrogen supplies. *Agricultural Water Management*, 274, pp.107949. **https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107949**

14. Chibarabada, T.P., Modi, A.T. and Mabhaudhi, T., 2020. Calibration and evaluation of aquacrop for groundnut (Arachis hypogaea) under water deficit conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 281, pp.107850.

https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107850

15. Eyring, V., Flato, G., Lamarque, J.F., Meehl, J., Senior, C., Stouffer, R. and Taylor, K., 2019. Status of the coupled model intercomparison project phase 6 (CMIP6) and goals of the workshop. CMIP6 Analysis Workshop, Barcelona, Spain.

16. Fowler, H.J., Blenkinsop, S. and Tebaldi, C., 2007. Linking climate change modelling to impacts studies: Recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. *International Journal of Climatology*, 27(12), pp.1547-1578. **doi: 10.1002/joc.1556**

17. Hosseini, S.S., Nazari, M. and Araghinejad, S., 2013. Investigating the impacts of climate on agricultural sector with emphasis on the role of adaptation strategies in this sector. *Iranian Journal of Agricultural Economics and Development Research*, 44(1), pp.1-16. **doi: 10.22059/ijaedr.2013.36064**. (In Persian).
18. IPCC, 2014. "Climate Change 2014: Synthesis Report", Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (Eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp.
19. Kanda, E.K., Senzanje, A. and Mabhaudhi, T., 2020. Calibration and validation of the AquaCrop model for full and deficit irrigated cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp). *Physics and Chemistry of the Earth*, 124(2), pp.102941**. doi: 10.1016/j.pce.2020.102941**
20. Makuvaro, V., Walker, S., Masere, T.P. and Dimes, J., 2018. Smallholder farmer perceived effects of climate change on agricultural productivity and adaptation strategies. *Journal of Arid Environmental*, 152, pp.75-82. **https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2018.01.016**
21. Munier-Jolain, N., Biarnès, V., Chaillet, I., Lecoeur, J. and Jeuffroy, M.H., (Eds.). 2010. *Physiology of the Pea Crop*. Science Publishers, Enfield, USA (270 p).
22. O'Neill, B.C., Carte, T.R., Ebi K. and Harrison P.A., 2020. Achievements and needs for the climate change scenario framework. *Natural Climate Change*, 10(12), pp.1074-1084. **doi:10.1038/s41558-020-00952-0**
23. O'Neill, B., Kriegler, E., Ebi, K., Kemp-Benedict, E., Riahi, K., Rothman, D., Van Ruijven, B., Van Vuuren, D., Birkmann, J., Kok, K., Levy. and Solecki, W. 2017. The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. *Global Environmental Change*, 42(1), pp.169-180. **https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.01.004**
24. Raes, D., Fereres, E., García Vila, M., Curnel, Y., Knoden, D., Kale Çelik, S., Ucar, Y., Türk, M. and Wellens, J., 2023. Simulation of alfalfa yield with AquaCrop. *Agricultural Water Management*, 284(3), pp.108341. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108341
25. Ravasi, R.A., Paleari, L., Vesely, F.M., Movedi, E., Thoelke, W. and Confalonieri, R., 2020. Ideotype definition to adapt legumes to climate change: A case study for field pea in Northern Italy. *Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 291, pp.108081. **https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108081**
26. Santos, O.F., Cunha, F.F., Taira, T.L., Souza, E.J., Leal, A.J.F., 2023. Increase in pea productivity associated with irrigation management. *Horticultura Brasileira*, 36(2), pp.178-183. **doi: http://dx.doi.org/10.1590/S0102-053620180205**
27. Steduto, P., Raes, T., Hsiao, T. C. Fereres, E., Heng, L., Izzi, G. and Hoogeveen, J., 2009. AquaCrop: a new model for crop prediction under water deficit conditions. *Options Mediterraneennes*, 80, pp.285-292.
28. Sümer, F.O., 2024. The Effects of Sowing Date and Cultivars on Yield and Quality of Pea (Pisum sativum L.). **doi:10.20944/preprints202401. 1660.v1**
29. Tacarindua, C.R., Shiraiwa, T., Homma, K., Kumagai, E. and Sameshima, R., 2013. The effects of increased temperature on crop growth and yield of soybean grown in a temperature gradient chamber. *Field Crops Research*, 154(1), pp.74-81. **doi:https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.07.021**
30. Umesh, B., Reddy, K.S., Polisgowdar, B.S., Maruthi, V., Satishkumar, U., Ayyanagoudar, M.S., Rao, S. and Veeresh, H., 2022. Assessment of climate change impact on maize (*Zea mays* L.) through aquacrop model in semi-arid alfisol of southern Telangana. *Agricultural Water Management*, 274, pp.107950. **https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107950**
31. Wang, H., Cheng, M., Liao, Z., Guo, J., Zhang, F., Fan, J., Feng, H., Yang, Q., Wu, L. and Wang, X., 2023. Performance evaluation of AquaCrop and DSSAT-SUBSTOR-Potato models in simulating potato growth, yield and water productivity under various drip fertigation regimes. *Agricultural Water Management*, 276, pp.108076. **Doi: https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.108076**

مقاله پژوهشی
نشریه پژوهش آب در کشاورزی / ب / جلد ۳۸ / شماره ۴/ ۱۴۰۳.ص۳۷۴-۳۵۷
https://doi.org/10.22092/jwra.2025.365867.1043

اصلاح الگوی تخصیص آب برای افزایش بهره‌وری آب بخش کشاورزی در حوضه آبریز زاینده‌رود

سعید عسگری، احمد شانه‌ساززاده* و بابک صفاری

کارشناس ارشد مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده عمران و حمل و نقل دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران.
Saeida698@gmail.com
دانشیار، گروه عمران، دانشکده عمران و حمل و نقل دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران.
a.shanehsazzadeh@eng.ui.ac.ir
استادیار، گروه اقتصاد، دانشکده علوم اداری و اقتصاد، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران.
b_saffari@ase.ui.ac.ir

دریافت: خرداد ۱۴۰۳ و پذیرش: آذر ۱۴۰۳

چکیده

زاینده‌رود بزرگترین و پرآب‌ترین رودخانه فلات مرکزی ایران، به واسطه تداوم خشکسالی و افزایش مصرف در بخش‌های مختلف شرب، کشاورزی و صنعت، از بحران مدیریت آب رنج می‌برد. با در نظر گرفتن اهداف چندگانه اقتصادی و اجتماعی تا رسیدن به یک سازگاری مدیریتی، بازتخصیص بهینه منابع آب زاینده‌رود منطبق با ظرفیت منابع موجود اجتناب‌ناپذیر است. در این مقاله، برنامه اصلاح تخصیص آب زاینده‌رود به شبکه‌های هفت‌گانه آبیاری ارائه شده است. الگوی بهینه تخصیص آب زاینده‌رود بین شبکه‌های آبیاری بر اساس اهداف اقتصادی و اجتماعی (اشتغال) ارائه می‌شود. برای افزایش بهره‌وری بخش کشاورزی، تمهیداتی به‌صورت سطوح مداخله شامل اصلاح توزیع آب بین شبکه‌ها در وضعیت موجود کشت، تغییر الگوی کشت، افزایش راندمان آبیاری، و صادرات محصولات کشاورزی ارائه شده و در برنامه‌های تخصیص اعمال گردیده است. نیز، نتایج اعمال سطوح مختلف مداخله با یکدیگر و با وضعیت تخصیص فعلی مقایسه شده است. به‌طور کلی، نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که در توزیع آب بین شبکه‌های مختلف، اهداف اقتصادی و اشتغال سازگاری دارند و الگوی تخصیص کنونی بین شبکه‌های آبیاری بهینه نیست. مطابق نتایج به‌دست آمده، از تلفیق سطوح مختلف مداخله باهم، در شرایط ایده‌آل (تلفیق تمام سطوح با هم) ارزش هر مترمکعب آب سطحی در بخش کشاورزی تا ۳۰ برابر افزایش می یابد که از این میان، صادرات محصولات به خارج از کشور واصلاح الگوی کشت به ترتیب ۹ و ۳/۷ برابر ارزش آب کشاورزی را افزایش می دهند.

واژه‌های کلیدی: تخصیص بهینه منابع آب کشاورزی، ارزش آب کشاورزی، الگوی کشت، اشتغال

---

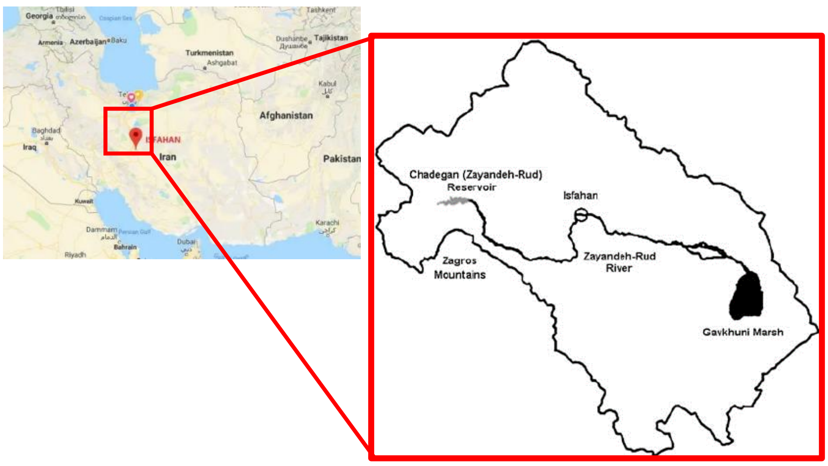
* - آدرس ایمیل نویسنده مسئول: **a.shanehsazzadeh@eng.ui.ac.ir**

مقدمه

امروزه، حفظ منابع آب و بهره‌برداری بهینه و اقتصادی از آب یک مسئله جهانی است. منابع آب تحت تأثیر شرایط طبیعی، توسعه اقتصادی، تغییرات آب‌وهوایی جهانی و سایر عوامل قرار دارند. بحران آب جدی است و حدود ۴۰٪ از جمعیت جهان در بیش از ۴۰ کشور با کمبود آب روبرو هستند (براد و همکاران، ۲۰۱۵). اگرچه مجموع آب شیرین در دسترس برای تأمین جمعیت حال حاضر جهان با تکیه بر حداقل مصرف مورد تقاضا کافی به نظر می‌رسد، اما عدم توزیع یکنواخت مکانی و زمانی منابع آب و انطباق آن با توزیع جمعیت، شرایط را به‌خصوص برای کشورهای در حال توسعه بسیار بحرانی کرده است؛ به‌طوری‌که اختلافات بین عرضه و تقاضای آب به‌طور فزاینده‌ای زیاد شده و عامل درگیری‌های اجتماعی و سیاسی گردیده است. برای رفع این درگیری‌ها، گزینه‌های توسعه پروژه‌های منابع جدید آب و افزایش راندمان کلی مدیریت آب موجود مطرح شده است. در این راستا، تخصیص بهینه منابع آب یکی از مؤثرترین راه‌ها برای مدیریت افزایش تقاضای آب و تأمین ناکافی آن است (انصاری و همکاران، ۱۳۹۶).

کمبود آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند شبه‌جزیره عربستان سعودی، اردن، شمال آفریقا، آفریقای جنوبی، شمال چین، قبرس، اسپانیا و ایران نمود بیشتری دارد (سونگ و همکاران، ۲۰۱۸). حوضه‌های فلات مرکزی ایران از جمله حوضه زاینده‌رود با توجه به دوره طولانی خشک‌سالی و بارگذاری بیش از حد و در نتیجه آن اختلاف نسبتاً زیاد بین تراز مصارف و منابع آب وضعیت حادی دارند.

زاینده‌رود بزرگ‌ترین و پرآب‌ترین رودخانه فلات مرکزی ایران است که از کوه‌های زاگرس مرکزی سرچشمه می‌گیرد و در کویر مرکزی ایران به‌سمت شرق پیش می‌رود و با طی ۳۶۰ کیلومتر طول در نهایت به تالاب گاوخونی در ۱۴۰ کیلومتری شرق اصفهان سرازیر می‌شود (شکل ۱). آورد این رودخانه در مطلوب‌ترین شرایط به ۱۲۰۰ میلیون مترمکعب در سال می‌رسد. این رودخانه به‌عنوان یک شریان حیاتی در مرکز ایران با پوشش جمعیت حدود پنج میلیون نفر نیاز آبی استان‌های بزرگ مرکزی ایران به آب آشامیدنی، کشاورزی و صنعت را تأمین می‌نماید. بیش از ۸۰۰۰۰ هکتار از اراضی استان اصفهان از طریق هفت شبکه آبیاری به‌طور مستقیم از طریق رودخانه زاینده‌رود سیراب می‌شوند.



شکل ۱- نقشه مسیر رودخانه زاینده‌رود

با توجه به افزایش جمعیت و نیاز آب شرب، افزایش اراضی زیر کشت و توسعه صنعتی در منطقه، استفاده از منابع آب سطحی و زیرزمینی در حوضه زاینده-رود به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است. بارگذاری

بیش از حد ظرفیت و به‌عبارت دیگر برداشت بیش از حد آب، به‌خصوص در بالادست و سرشاخه‌ها و به‌طورکلی توسعه بیش از توان سرزمین در حوضه زاینده‌رود، چه در بخش صنعت و چه در بخش کشاورزی، وضعیت شکننده موجود زاینده‌رود را به‌وجود آورده است (صفوی و راست‌قلم، ۱۳۹۵). تداوم خشک‌سالی در حوضه زاینده‌رود در ۴۰ الی ۵۰ سال گذشته باعث مشکلات جدی در زاینده‌رود شده است (سالمی و حیدری، ۱۳۸۵). با وجود کم‌آبی و شرایط بحران آب، راندمان و سوددهی آب در استان اصفهان بسیار کمتر از معیارهای بین‌المللی است. روش‌های تخصیص آب در حوضه زاینده‌رود سازگاری لازم برای شرایط بحران آب فعلی را ندارند و باید تجدید نظر شوند.

در سالیان گذشته، تأمین منابع آب جدید همچون انتقال آب بین‌حوضه‌ای و انتقال آب دریا به‌عنوان گزینه‌های پیش رو در مدیریت این حوضه پیچیده، همواره مورد نظر تصمیم‌گیران بوده است. این در حالی است که این افزایش در عرضه تقریباً بلافاصله با افزایش تقاضا مواجه شده و تقریباً تطبیق فوری عرضه و تقاضا به‌محض در دسترس قرار گرفتن منابع جدید آب وجود دارد (علیجانیان و همکاران، ۱۳۸۷). بر اساس قوانین مرتبط با منابع آب، رعایت حقابه زیست‌بوم‌ها هم یک اولویت است که باید در مدیریت جامع به آن توجه ویژه شود؛ بنابراین، از یک سو رعایت حقابه الزامی است و از سوی دیگر، توسعه کشاورزی، صنعت و شهرنشینی باید به‌طور برنامه‌ریزی شده پیش برود (امینی نژاد و همکاران، ۱۳۹۳). برای استمرار حیات زاینده‌رود، مدیریت جامع و مبتنی بر اهداف چندگانه و همچنین برنامه‌ریزی‌های درازمدت تخصیص منابع آب به‌منظور مقابله با بحران آب یک ضرورت اجتناب‌ناپذیر است (سالمی و حیدری، ۱۳۸۵).

تخصیص آب، ترکیبی از اقداماتی است که مصرف‌کنندگان آب را قادر می‌سازد تا آب را برای اهداف سودمند با توجه به سیستم حقوق و اولویت‌ها دریافت کنند. هدف کلی تخصیص آب، به حداکثر رساندن مزایای آب برای جامعه است که عموماً شامل مؤلفه‌های اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی است. در این راستا، همواره اصل کلی، تقسیم عادلانه منابع آب در حوضه‌های رودخانه‌ای، سطوح محلی، ملی و بین‌المللی است (وانگ و همکاران، ۲۰۰۳).

سازمان همکاری‌ها و توسعه اقتصادی (OECD[1]) گزارشی مبنی بر اشتراک‌گذاری خطرات و فرصت‌ها در تخصیص منابع ارائه داده است که در آن رئوس مسائلی که در تخصیص آب باید مدنظر قرار گیرد، مورد بررسی قرار گرفته است (آب‌ها و راه‌حل‌ها، ۲۰۱۷). بر اساس این گزارش، رژیم‌های تخصیصی باید خصوصیات عمومی و خصوصی منابع آب را در نظر بگیرند؛ زیرا این خصوصیات بر نحوه ارزش‌گذاری منابع در یک محیط خاص و افرادی که از مزایای آن استفاده می‌کنند، تأثیر می‌گذارد. رژیم‌های تخصیصی شامل عناصر مختلف (سیاست‌ها، قوانین، مکانیزم‌ها) است که اگر به‌خوبی طراحی شوند، می‌توانند به اهداف کارآیی اقتصادی، پایداری محیطی و برابری اجتماعی دست یابند. این اهداف مختلف و گاه متضاد یا حتی رقیب باید در تعادل باشند که مستلزم حل‌وفصل اختلافات بین آن‌هاست.

تا دهه ۱۹۸۰، مدیریت منابع آب در اکثر کشورها بر زیرساخت‌ها یا راه‌حل‌های فنی تأکید می‌کرد تا هدف آن برداشت حداکثر مقدار از منابع آب باشد (عرضه بیشتر). از آن زمان تاکنون این رویکرد با تأکید بیشتر بر مدیریت پایدار منابع با اتکا به راه‌حل‌های اقتصادی، از جمله نقش بیشتر مکانیسم‌های تخصیص مبتنی بر بازار، به سمت مدیریت تقاضا تغییر کرده است (آب‌ها و راه‌حل‌ها، ۲۰۱۷).

اسپید و همکاران (۲۰۱۳) در کتاب خود با عنوان طرح‌ریزی تخصیص آب حوضه بر این نکته تأکید می‌کنند که هیچ الگوی واحدی برای مدیریت منابع آب وجود ندارد. رویکردها و تکنیک‌های مدیریت آب همیشه بر

1- Organisation for Economic Co-operation and Development

اساس بافت محلی، مؤسسات، تاریخ و شرایط شکل می‌گیرد. این بدان معناست که همیشه تفاوت‌های مهمی بین رویکردهای اتخاذشده در کشورهای مختلف وجود خواهد داشت.

به‌طورمعمول، مدیریت منابع آب به جنبه‌های مختلفی چون اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی بستگی دارد که احتمالاً با یکدیگر در تضاد هستند؛ حداکثر سود اقتصادی، کاهش تبعات اجتماعی ناشی از بیکاری و مسائل زیست‌محیطی، از جمله انتشار آلاینده‌ها در آب، از جمله این اهداف به‌ظاهر متناقض هستند؛ بنابراین، در دهه‌های اخیر، تحلیل سیستم به‌طور گسترده‌ای در مدیریت تخصیص منابع آب مورد استفاده قرار گرفته است. تحلیل سیستم، در مدل‌های توسعه‌یافته، برای شبیه‌سازی و بهینه‌سازی از منابع آب استفاده می‌شود. در مدل‌های برنامه‌ریزی چندهدفه، اهداف می‌توانند از نوع بیشینه‌سازی، کمینه‌سازی و یا ترکیبی از هر دو نوع باشند. همچنین، اهداف مورد استفاده در مسئله ممکن است در مواردی متضاد با یکدیگر عمل نمایند. لذا، در این‌گونه مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی، بهینه‌شدن یک تابع هدف لزوماً مترادف با بهینه–شدن تمامی توابع هدف دیگر مسئله نیست (چن و همکاران، ۲۰۰۷). روش‌های مختلفی برای تحلیل مسائل چندهدفه کاربرد دارند که شامل وزن دادن به اهداف مسئله، اولویت مطلق، معیار جامع و روش برنامه‌ریزی آرمانی هستند (اکبری و مهدی زاهدی، ۱۳۸۷).

در این راستا، مدل‌های ریاضی در بسیاری از جنبه‌های مدیریت تعارض، برای تحقق دستاوردهای مشترک مفید بوده‌اند و توسط مدیران برای تصمیم‌سازی مورد استفاده قرار گرفته‌اند (چن و همکاران، ۲۰۰۷). امروزه، از روش‌های عددی مبتنی بر مدل‌های ریاضی به‌طور گسترده‌ای برای مدل‌های برنامه‌ریزی چندهدفه به‌منظور به‌دست‌آوردن طرح‌های تخصیص بهینه آب استفاده می‌شود. در این راستا، مجموعه‌ای از مدل‌های بهینه‌سازی مانند مدل‌های برنامه‌نویسی تک‌هدفه، چندهدفه، برنامه‌نویسی تصادفی دومرحله‌ای و برنامه‌نویسی چندمرحله‌ای توسعه داده شده‌اند. با پیشرفت تدریجی تحقیقات مرتبط، عدم قطعیت‌های مختلفی مثل فازی و تصادفی در هنگام ایجاد مدل‌های بهینه‌سازی برای استفاده کامل از داده‌های جمع‌آوری‌شده و توصیف دقیق مشکلات، در نظر گرفته شده است (لیو و همکاران، ۲۰۱۷؛ شاه ولی کوه شوری و همکاران، ۱۳۹۷؛ آقازاده اردبیلی و همکاران، ۱۳۹۷). استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌یابی و روش‌های نرم در تخصیص بهینه آب و بیشینه‌کردن بازده برنامه‌های مدیریت آب بسیار شایع و کارآمد هستند (داویجانی و همکاران، ۲۰۱۶؛ محمدی و همکاران، ۱۳۹۱؛ نصیری و معروفی، ۲۰۱۷). در این میان، از مدل برنامه‌نویسی تصادفی چندمرحله‌ای چندهدفه (IMMSP)[۲]، برنامه‌نویسی هدف (GP)[۳]، برنامه‌نویسی هدف‌گذاری وزن‌دار (WGP)[۴]، برنامه‌ریزی چندهدفه غیرخطی با محدودیت اعتبار زمانی فازی (FIC[۶]–INMP[۵]) و روشی مبتنی بر مدل‌های مرکب از طریق تحلیل الگوی MOA[۷] با استفاده از الگوریتم فراکاوشی موسوم به Tchebycheff استفاده شده است (شِوی و خان، ۲۰۰۵؛ گو و همکاران، ۲۰۱۸؛ کای و همکاران، ۲۰۰۴؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۱۹).

در دهه‌های اخیر، رویکردهای مختلف برنامه‌ریزی و الگوریتم‌های متنوع بهینه‌سازی جهت تحلیل سیستم و اصلاح تخصیص منابع آب زاینده‌رود مورد استفاده قرار گرفته است (اکبری و همکاران، ۱۳۹۳؛ پورکاظمی و والی، ۱۳۹۳؛ اکبری و همکاران، ۱۳۹۴؛ فهرستی و همکاران، ۱۳۹۶؛ کیانی و همکاران، ۱۳۹۸؛ مردانی نجف‌آبادی و همکاران، ۱۳۹۵). در این پژوهش‌ها، عموماً افزایش ارزش اقتصادی آب مبنای اصلاح الگوی تخصیص بوده است و جنبه‌های اجتماعی و فرهنگی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. این در حالی است که در نگاه کلان، حفظ سرمایه‌های اجتماعی و توسعه پایدار نباید مورد

2- Interval Multi-objective Multi-stage Stochastic Programming
3- Goal Programming
4- Weighted Goal Programming
5- Interval Nonlinear Multiobjective Programming
6- Fuzzy Interval Credibility Constraint
7- Multi-objective Analysis

غفلت قرار گیرد. مشکل اساسی در تخصیص بهینه منابع آب زاینده‌رود این است که گروه‌های ذینفع مختلف اهداف متفاوتی را دنبال می‌کنند که با یکدیگر در تضاد هستند. همچنین باید به این نکته توجه داشت که ارزش اقتصادی و اجتماعی آب در قسمت‌های مختلف حوضه یکسان نیست (عسگری و همکاران، ۱۴۰۱).

با توجه به اینکه بخش اعظم آب در بخش کشاورزی مصرف می‌شود، افزایش بهره‌وری کشاورزی با هدف افزایش ارزش اقتصادی آب و افزایش ارزش غذایی و تأثیرات اجتماعی و امنیتی بر جامعه محلی و ملی محصولات به‌صورت انواع مداخلات[8] همواره مورد توجه قرار گرفته است (علی و تالوکدر، ۲۰۰۸؛ مولدن و همکاران، ۲۰۱۰؛ پاندی و همکاران، ۲۰۱۶؛ وسترمن و همکاران، ۲۰۱۸؛ جیوردانو و همکاران، ۲۰۲۱). در کشور ایران نیز پژوهش‌های انجام شده بر تأثیر مداخلات مختلف مرتبط بیشتر بر اصلاح الگوی کشت و افزایش راندمان آبیاری متمرکز بوده است (نصابیان و همکاران، ۱۳۹۳؛ محمدی و همکاران، ۱۳۹۴؛ طباطبائی و شهیدی، ۱۳۹۶؛ (اسماعیلی موخر فردویی و همکاران، ۱۳۹۷؛ فضل الهی و همکاران، ۱۳۹۸). در این پژوهش، الگوی بهینه تخصیص آب زاینده-رود بین شبکه‌های آبیاری بر اساس اهداف اقتصادی و اجتماعی ارائه می‌شود. برای افزایش بهره‌وری بخش کشاورزی تمهیداتی به‌صورت سطوح مداخله ارائه گردیده و در برنامه‌های تخصیص اعمال می‌گردد و نتایج اعمال سطوح مختلف مداخله با یکدیگر و با وضعیت تخصیص فعلی مقایسه می‌گردد. در این پژوهش، فرض بر این است که در هر شرایطی حجم آب مورد نیاز بخش شرب شهر اصفهان و حومه به میزان ۳۴۰ میلیون مترمکعب، بخش صنعت استان به میزان ۹۰ میلیون مترمکعب و همچنین حقابه زیست‌محیطی تالاب گاوخونی به مقدار ثابت ۱۴۰ میلیون مترمکعب تخصیص داده شده و از میزان حجم آب در دسترس کسر می‌گردد و لذا برنامه تخصیص روی میزان حجم آب مورد نیاز صرفاً بخش کشاورزی وابسته به آب زاینده‌رود اعمال می‌شود. همچنین، از وجود محدودیت حقوقی تغییر حقابه‌ها در باز تخصیص صرف‌نظر شده است. سال انتخاب‌شده برای برنامه‌ریزی سال ۱۳۹۵ است زیرا در این سال اطلاعات قابل استناد از بخش کشاورزی و شبکه‌های آبیاری حوضه در دسترس بوده و همچنین این سال به شرایط نرمال آبی نزدیک است.

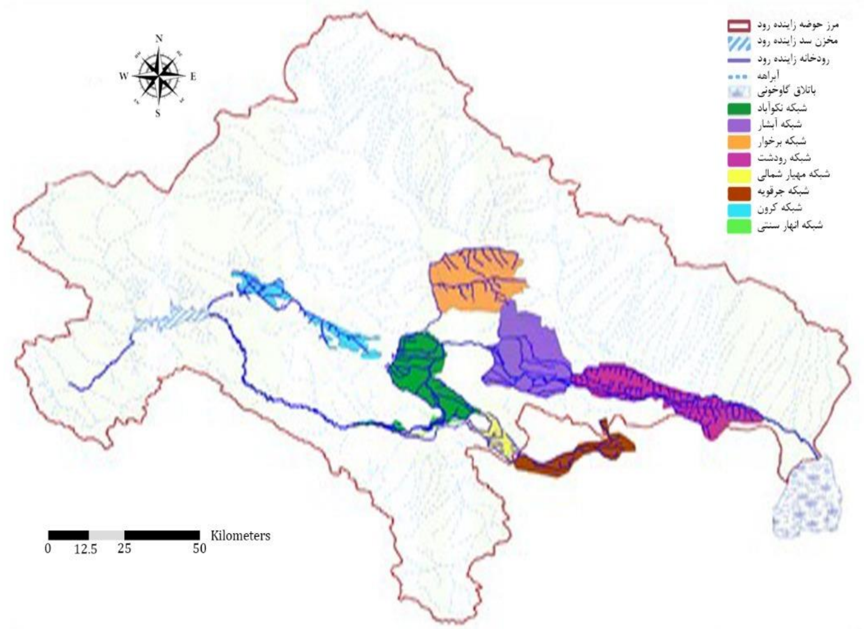
مواد و روش‌ها

آب سطحی که از رودخانه زاینده‌رود برای بخش کشاورزی در نظر گرفته شده بین هفت شبکه آبیاری و زهکشی حوضه زاینده‌رود شامل شبکه‌های رودشت، آبشار، نکوآباد، سنتی، مهیار و جرقویه (تلفیقی)، برخوار، کرون و خمیران (تلفیقی) به مصارف کشاورزی شامل محصولات زراعی و باغی می‌رسد. در شکل ۲، نقشه شبکه‌های اصلی زاینده‌رود نشان داده شده است. همچنین، سالانه بخشی از آب زاینده‌رود به مصرف شرب اصفهان بزرگ، نایین و کاشان و صنایع اصلی استان شامل صنایع فولاد، نیروگاه و پتروشیمی و تولید سیمان اختصاص می‌یابد. در جدول ۱، در ستون‌های دو و سه به ترتیب مساحت زیر کشت هر شبکه و میزان آب تخصیص‌یافته بین شبکه‌های مختلف در سال مرجع ۱۳۹۵ ارائه شده است. برای محاسبه ارزش پولی و ارزش افزوده آب در هر یک از شبکه‌های آبیاری نیاز به اطلاعات جامع و دقیق شامل نوع کشت محصولات باغی و زراعی و سطح زیر کشت و آب مورد نیاز و ارزش محصول (داخلی و صادراتی) است. اطلاعات موجود از منابع مختلف طی بازه زمانی ۱۳۹۹-۱۳۸۹ مورد بررسی قرار گرفت و از میان آن اطلاعات سال ۱۳۹۵ هم به دلیل کامل بودن اطلاعات و هم بدلیل اینکه سال ۱۳۹۵ سال نرمال آبی است انتخاب گردید.

نیاز آبیاری شهرستان‌های مرتبط به هر یک از شبکه‌های آبیاری حوضه بر اساس محصولات کشت‌شده در هر یک از شهرستان‌ها و نیاز آبی آن محصولات به‌دست می‌آید (علیزاده، ۱۳۹۴). سپس، با استفاده از نیاز آبیاری

8- Interventions

شهرستان‌های مرتبط به هر یک از شبکه‌ها و سطح زیر کشت آن شهرستان‌ها، از رابطه متوسط وزنی استفاده کرده و نیاز آبیاری هر یک از شبکه‌ها تعیین می‌گردد.



شکل ۲- جانمایی شبکه‌های آبیاری حوضه زاینده‌رود (وزارت نیرو، ۱۳۸۷)

استان اصفهان دارای تنوع محصولات کشاورزی قابل ملاحظه‌ای است. ارزش اقتصادی هر مترمکعب آب برای هر یک از محصولات زراعی و باغی بر اساس میزان مصرف آب، قیمت فروش، هزینه تولید و عملکرد محصول از رابطه (۱) تعیین می‌گردد (یانگ، ۲۰۰۵):

$$E = (G - P) / W \qquad (۱)$$

E[۹] = ارزش هر مترمکعب آب (ریال بر مترمکعب)

G[۱۰] = درآمد ناخالص محصول

P[۱۱] = هزینه تولید محصول

W[۱۲] = نیاز آبی محصول (با در نظر گرفتن راندمان آبیاری)

با استفاده از رابطه متوسط وزنی و بر اساس سطح زیر کشت محصولات زراعی و باغی در هر یک از شهرستان‌ها، ارزش هر مترمکعب آب هر یک از شهرستان‌ها به‌دست می‌آید. در نهایت، با استفاده از رابطه متوسط وزنی بین ارزش هر مترمکعب آب شهرستان‌ها و سطح زیر کشت آن‌ها، متوسط وزنی ارزش هر مترمکعب آب برای هر یک از شبکه‌ها تعیین می‌گردد. ارزش هر مترمکعب آب در هر شبکه در ستون ۴ جدول ۱ ارائه گردیده است.

ارزش افزوده بخش کشاورزی برای کل شهرستان‌های استان اصفهان توسط سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان اصفهان اعلام شده است (صفاری، ۱۳۹۶). با استفاده از سطح زیر کشت هر یک از شهرستان‌ها که با آب سطحی رودخانه زاینده‌رود تغذیه می‌شوند، ارزش افزوده شهرستان‌های مرتبط به شبکه‌های آبیاری حوضه زاینده‌رود به‌دست می‌آید. در نهایت با استفاده از حجم آب تخصیص داده‌شده به شبکه‌های آبیاری حوضه، ارزش‌افزوده هر یک از شبکه‌ها به ازای هر مترمکعب آب تعیین می‌گردد که در ستون ۵ جدول ۱ ارائه گردیده است. تعداد کل کشاورزان شاغل در هر یک از شهرستان‌ها توسط سازمان بودجه و برنامه استان اعلام شده است (صفاری، ۱۳۹۶). ابتدا تعداد کشاورزان هر شهرستان بر کل سطح زیر کشت شهرستان تقسیم می‌گردد تا تعداد کشاورز شاغل در

9- Economic value of every cubic meter of water
10- Gross product revenue
11- Product production cost
12- Water requirement of the product

هر یک هکتار شهرستان تعیین گردد. سپس با استفاده از رابطه متوسط وزنی بین راندمان اشتغال (نفر بر هکتار) و متوسط وزنی نیاز آبیاری هر یک از شهرستان‌های مرتبط به شبکه‌های آبیاری، متوسط وزنی راندمان اشتغال در یک هکتار برای هر یک از شبکه‌های آبیاری حوضه به‌دست می‌آید. از حاصل‌ضرب متوسط وزنی راندمان اشتغال (نفر بر هکتار) و سطح زیر کشت هر یک از شبکه‌ها، تعداد کشاورزان شاغل در هر یک از شبکه‌ها تعیین می‌گردد (ستون ۶ جدول ۱). از حاصل تقسیم تعداد کشاورزان شاغل در هر شبکه و حجم آب تخصیص داده شده به هر یک از آن‌ها، راندمان اشتغال برای هر میلیون مترمکعب آب به‌دست می‌آید که در ستون ۷ جدول ۱ ارائه گردیده است.

جدول ۱- اطلاعات تخصیص آب زاینده‌رود به بخش‌های مختلف کشاورزی بر اساس آمار سال ۱۳۹۵

1	2	3	4	5	6	7
شبکه‌های آبیاری	**سطح زیر کشت (هکتار)**	**حجم آب تخصیصی (میلیون مترمکعب)**	**متوسط وزنی ارزش پولی (ریال بر مترمکعب)**	**ارزش افزوده (ریال بر مترمکعب)**	**تعداد کشاورزان شاغل**	**راندمان اشتغال (نفر بر میلیون مترمکعب)**
رودشت	22000	156.65	7042	15376	7356	46.96
آبشار	15000	117	7042	14037	5015	42.87
نکوآباد	27000	224.50	10328	28456	19128	85.20
سنتی	4000	30	10954	19331	2327	77.56
مهیار	5000	35	9192	17677	2322	66.34
برخوار	4000	44.50	9818	22041	2090	46.97
کرون	3000	31.35	13973	18615	1731	55.22
کل	80000	639	9879	20828	39969	62.55

بر اساس آمارهای موجود، با تخصیص ۶۳۹ میلیون مترمکعب آب سطحی برای بخش کشاورزی استان اصفهان در سال آبی ۹۶-۱۳۹۵، ارزش هر مترمکعب آب برای شبکه‌های آبیاری به‌طور متوسط حدود ۹۸۷۹ ریال است. ارزش افزوده به ازای هر مترمکعب آب در سال ۹۶-۱۳۹۵ به‌طور متوسط برای شبکه‌های آبیاری حوضه زاینده‌رود حدود ۲۰۶۶۱ ریال است. راندمان اشتغال به‌طور متوسط برای شبکه‌های آبیاری حوضه زاینده‌رود حدود ۶۲ به ازای هر میلیون مترمکعب آب تعیین می‌گردد.

تخصیص بهینه آب زاینده‌رود

جهت برنامه‌ریزی تخصیص آب زاینده‌رود بین شبکه‌های مختلف کشاورزی، پنج برنامه تخصیص با اهداف مختلف و یا تلفیق اهداف به شرح زیر تعیین گردیده است:

۱) تابع تک هدفه اقتصادی با هدف حداکثر کردن سود اقتصادی ناشی از تخصیص آب بر اساس ارزش پولی آب

۲) تابع تک هدفه اجتماعی با هدف حداکثر کردن اشتغال ناشی از تخصیص آب بر اساس راندمان اشتغال

۳) تلفیق توابع هدف اشتغال و ارزش پولی با روش اولویت مطلق با در نظر گرفتن تابع هدف ارزش پولی به‌عنوان اولویت اول (اکبری و مهدی زاهدی، ۱۳۸۷).

۴) تلفیق توابع هدف اشتغال و ارزش پولی با روش اولویت مطلق با در نظر گرفتن تابع هدف اشتغال به‌عنوان اولویت اول (اکبری و مهدی زاهدی، ۱۳۸۷)

۵) تلفیق توابع هدف اشتغال و ارزش پولی با روش معیار جامع (اکبری و مهدی زاهدی، ۱۳۸۷)

جهت اجرای برنامه‌ریزی تخصیص از نرم‌افزار لینگو[13] استفاده شده است. نرم‌افزار لینگو یک نرم‌افزار بهینه‌سازی با استفاده از مدل ریاضی است. این نرم‌افزار قدرتمند توانایی حل مدل‌های بسیاری از جمله خطی و غیرخطی را

13 - LINGO

دارد و با تنظیمات گسترده، این امکان را برای کاربر فراهم می‌کند تا بتواند بسیاری از مدل‌های پیچیده را در زمان کوتاه به‌صورت بهینه حل نماید (شریج، ۱۹۹۶).

توابع در نظر گرفته‌شده در نرم‌افزار لینگو برای توابع هدف ارزش پولی و اشتغال به ترتیب در معادلات 2 و 3 ارائه شده است:

$$\text{MAX} = (P_1 * Q_1) + (P_2 * Q_2) + (P_3 * Q_3) + (P_4 * Q_4) + (P_5 * Q_5) + (P_6 * Q_6) + (P_7 * Q_7) \quad (۲)$$

$$\text{MAX} = (R_1 * Q_1) + (R_2 * Q_2) + (R_3 * Q_3) + (R_4 * Q_4) + (R_5 * Q_5) + (R_6 * Q_6) + (R_7 * Q_7) \quad (۳)$$

که Q_1 آب تخصیصی به شبکه رودشت، Q_2 آب تخصیصی به شبکه آبشار، Q_3 آب تخصیصی به شبکه نکوآباد، Q_4 آب تخصیصی به شبکه سنتی، Q_5 آب تخصیصی به شبکه مهیار و جرقویه (تلفیقی)، Q_6 آب تخصیصی به شبکه برخوار، Q_7 آب تخصیصی به شبکه کرون و خمیران (تلفیقی) در نظر گرفته شده است. ضریب P در تابع هدف ارزش پولی برابر ارزش پولی آب در هر یک از شبکه‌های آبیاری است که واحد آن ریال است و در تابع هدف اشتغال، ضریب R، راندمان اشتغال (نفر بر میلیون مترمکعب) در هر یک از شبکه‌های آبیاری است که حاصل تابع هدف برابر تعداد کشاورزان شاغل بر اساس تخصیص بهینه آب (واحد نفر) است.

قیود و محدودیت‌های به‌کار رفته در فرآیند تحلیل شامل در نظر گرفتن مقادیر حداقل و حداکثر هر یک از متغیرها بر اساس حداقل ۲۰ درصد آب مورد نیاز و حداکثر ۲۰ درصد مازاد بر آب مورد نیاز برای هر شبکه است. به‌عبارت‌دیگر، به علت رعایت مسائل اجتماعی و حفظ توزیع جمعیت در هر شبکه حداقل ۲۰٪ آب مورد نیاز باید تأمین گردد و از طرف دیگر با توجه به ظرفیت شبکه حداکثر امکان تخصیص ۲۰٪ اضافه وجود خواهد داشت. از دیگر محدودیت‌های برنامه‌ریزی، حاصل جمع کل دسترسی‌های معادل آب در دسترس خواهد بود که بر اساس آمار سال ۱۳۹۵ بیلان سد زاینده‌رود در بالادست، مقدار آن ۷۰۴ میلیون مترمکعب است.

روش اولویت مطلق

در این روش، مدیران و برنامه‌ریزان می‌توانند مسائل برنامه‌ریزی چندهدفه را بر اساس اهمیت و اولویت هر یک از اهداف مسئله حل نمایند. مراحل حل بر اساس این روش به شرح زیر است:

- اهداف مسئله باید به ترتیب از با اولویت‌ترین به کم‌اولویت‌ترین مرتب شود.
- مسئله برنامه‌ریزی را باید تنها با کمک‌گرفتن از با اولویت‌ترین هدف و با توجه به قیود و محدودیت‌های پیش رو حل نمود.
- جواب‌های بهینه به‌دست‌آمده از حل مسئله را در تابع هدف مورد نظر (تابع هدف مورد استفاده در قسمت دوم) قرار داده و از آن به‌عنوان یک قید یا محدودیت در مرحله قبلی استفاده می‌گردد.
- در این مرحله باید دومین اولویت را به‌عنوان تابع هدف در مسئله وارد نموده و مدل را مجدداً (البته با حضور محدودیت جدید به‌دست‌آمده در قسمت قبل در جمع محدودیت‌های مسئله) حل نمود.

با تکرار این عملیات برای سایر اولویت‌ها و با توجه به محدودیت‌های جدید ایجاد شده می‌توان جواب‌های بهینه نهایی مسئله را محاسبه نمود.

روش معیار جامع

در این روش، حل مسائل برنامه‌ریزی چندهدفه بر اساس حداقل نمودن تفاوت بین هر تابع هدف و مقدار بهینه آن‌ها صورت می‌پذیرد. مراحل حل این تکنیک به شرح زیر است:

- مسئله برنامه‌ریزی خطی را ابتدا برای تک‌تک اهداف مسئله با توجه به قیود و محدودیت‌های پیش رو حل نموده و مقادیر بهینه هر یک تعیین می‌گردد.
- در مرحله بعد به کمک رابطه زیر مدل برنامه‌ریزی خطی چندهدفه حل می‌گردد. در این رابطه Z_K^* معرف مقدار بهینه تابع هدف k ام و Z_K تابع هدف K ام است.

$$MIN\ Z' = \sum \left[\frac{Z_K^* - Z_K}{Z_K^*}\right] \quad (۴)$$

اصلاح برنامه تخصیص با اعمال سطوح مداخله

با توجه به اینکه ارزش افزوده بخش کشاورزی در حوضه زاینده‌رود به‌طور محسوسی کم است، جهت اصلاح الگوی تخصیص و افزایش بهره‌وری، سطوح مختلف مداخله به شرح زیر مورد بررسی قرار می‌گیرد:

- **وضعیت موجود:** طبق آمار و اطلاعات موجود، آب در دسترس بین شبکه‌های آبیاری حوضه زاینده‌رود مطابق این سطح تخصیص داده شده است. این تخصیص بر اساس آمار و اطلاعات شرکت میرآب استان اصفهان و شرکت آب منطقه‌ای استان اصفهان برای سال نرمال آبی به‌دست آمده است که در بخش ۲-۲ ارائه گردیده است.
- **مداخله سطح ۱:** تخصیص بهینه آب: در این سطح با حفظ الگوی کشت موجود، به‌منظور افزایش (یا بهینه نمودن) ارزش پولی و راندمان اشتغال در هر یک از شبکه‌های آبیاری حوضه زاینده‌رود، میزان آب تخصیص داده‌شده به آن‌ها بهینه می‌شود. به‌عبارت‌دیگر، در توزیع آب کشاورزی بین شبکه‌ها جهت بهینه نمودن تخصیص، با دو رویکرد اقتصادی و اجتماعی بازنگری می‌شود.
- **مداخله سطح ۲:** اعمال الگوی بهینه کشت: در این سطح با توجه به محصولاتی که در هر یک از شهرستان‌های مرتبط به شبکه‌های آبیاری حوضه زاینده‌رود کشت می‌شود، می‌توان تغییر الگوی کشت داد، به‌طوری‌که هر شهرستان اجازه کاشت فقط یک محصول باغی و یک محصول زراعی را دارد، آن هم با ارزش‌ترین محصول که دارای حداکثر ارزش پولی باشد و سابقه کشت آن در محدوده مربوطه وجود دارد. لازم به‌ذکر است که در این سطح، بر اساس ظرفیت کشت فعلی منطقه، الگوی کشت اصلاح می‌شود.
- **مداخله سطح ۳:** افزایش راندمان آبیاری: بر اساس مطالعات انجام‌شده راندمان مصرف آب کشاورزی با احتساب آب برگشتی حدود ۶۰٪ برآورد می‌شود (معاونت آمار و اطلاعات، ۱۳۹۷). در این سطح از مداخله، راندمان آبیاری برای هر یک از شبکه‌های آبیاری حوضه زاینده‌رود از عدد ۶۰ به عدد ۷۰ افزایش یافته است. سپس حداقل و حداکثر آب مورد نیاز و ارزش آب برای هر یک از شبکه‌ها نیز تغییر پیدا کرده و در نهایت حجم آب در نظر گرفته شده برای بخش کشاورزی استان بین هر یک از شبکه‌های حوضه به‌طور بهینه تخصیص داده می‌شود.
- **مداخله سطح ۴:** صادرات محصولات کشاورزی: در این سطح، با توجه به محصولاتی که در هر یک از شهرستان‌های مرتبط به شبکه‌های آبیاری حوضه کشت می‌شوند، می‌توان محصولات تولید شده را به کشورهای دیگر صادر کرد و با کسب درآمد ارزی تبعاً ارزش افزوده را افزایش داد. بدین منظور، به‌صورت واقع-بینانه، هر شهرستان ۵۰٪ از محصولات باغی خود را به کشورهای دیگر و ۵۰٪ دیگر آن و کل محصولات زراعی خود را در داخل کشور می‌فروشد زیرا مورد اخیر امکان صادرات ندارد. لذا، در این سطح مداخله، بر اساس صادرات محصولات کشاورزی، تابع هدف ارزش پولی و اشتغال به‌دست می‌آید. علاوه بر آن، برای افزایش سود اقتصادی و بهبود راندمان اشتغال در بخش کشاورزی می‌توان سطوح مختلف مداخله را با هم تلفیق کرد. باید توجه داشت که هر گونه تغییر در بخش کشاورزی با عنوان سطوح مداخلات از جمله افزایش راندمان آبیاری، صادرات محصولات کشاورزی نیاز به در نظر گرفتن تمهیدات و سرمایه‌گذاری اولیه دارد. در این پژوهش، ملاک، تغییراتی است که در بلندمدت با اجرای این سطوح مداخلات در بهره‌وری آب ایجاد می‌شود.

نتایج و بحث

تخصیص بهینه آب زاینده‌رود با استفاده از توابع مختلف تخصیص

نتایج حاصل از برنامه‌ریزی اصلاح تخصیص آب در دسترس در سال ۱۳۹۵ مبتنی بر آمار ارائه‌شده در جدول ۱ بر اساس توابع مختلف تخصیص، در جدول ۲ ارائه گردیده است. در این جدول، وضعیت تخصیص بر اساس اطلاعات شرکت آب منطقه‌ای اصفهان (غیررسمی) ارائه گردیده است. همچنین، میزان تخصیص بهینه به بخش‌های

مختلف بر اساس برنامه‌های مختلف تخصیص ارائه گردیده است. ابتدا به همه شبکه‌ها مقدار حداقل آن‌ها، یعنی ۲۰ درصد حجم آب مورد نیاز را تخصیص داده و سپس مابقی آب را به باارزش‌ترین شبکه تا رسیدن به مقدار حداکثر آن، یعنی ۲۰ درصد اضافه‌تر از حجم آب مورد نیاز آن، تخصیص می‌دهد. میزان حداقل ۲۰ درصد بر اساس مسائل اجتماعی و زیست‌محیطی و تغذیه حداقلی آبخوان بر مبنای یک قضاوت اولیه انتخاب شده است. از طرف دیگر کانال‌های موجود ظرفیت افزایش ۲۰٪ حجم آب را دارا هستند. بر اساس جدول ۲، شبکه نکوآباد از نظر اشتغال در اولویت تخصیص قرار دارد و پس از آن شبکه‌های سنتی و کرون از نظر اقتصادی است. اختلاف فاحش بین حجم تخصیص در اهداف مختلف در شبکه‌های نکوآباد، سنتی و کرون مشاهده می‌شود که بین اهداف اقتصادی و اجتماعی مباینت معنی‌داری وجود دارد. همچنین، در تمام توابع تخصیص، شبکه‌های رودشت، آبشار، مهیار و برخوار به مقادیر حداقل خود دست پیدا می‌کنند.

جدول ۲- میزان تخصیص آب زاینده‌رود بین شبکه‌های آبیاری و ارزش پولی و اشتغال کل حاصل‌شده بر اساس توابع مختلف تخصیص

		وضعیت موجود	اصلاح تخصیص				
			تابع تک هدفه اقتصادی	تابع تک هدفه اشتغال	تابع چند هدفه - اولویت مطلق اقتصادی	تابع چند هدفه - اولویت مطلق اشتغال	تابع چند هدفه با روش معیار جامع
میزان تخصیص آب (میلیون متر مکعب)	رودشت	156.65	40.97	40.97	40.97	40.97	40.97
	آبشار	117	27.94	27.94	27.94	27.94	27.94
	نکوآباد	224.50	455.16	519.85	455.16	519.85	519.85
	سنتی	30	63.62	31.11	63.62	31.11	31.11
	مهیار	35	9.78	9.78	9.78	9.78	9.78
	برخوار	44.50	7.92	7.92	7.92	7.92	7.92
	کرون	31.35	38.61	6.43	38.61	6.43	6.43
ارزش پولی کل (میلیارد ریال)		15329	19515	19363	19515	19363	19363
افزایش ارزش پولی نسبت به وضع موجود (٪)		-	27.31	26.32	27.31	26.32	26.32
ارزش افزوده کل (میلیارد ریال)		90439	122359	123179	122359	123179	123179
افزایش ارزش افزوده نسبت به وضع موجود (٪)		-	35.29	36.20	35.29	36.20	36.20
اشتغال کل (نفر)		39970	47432	48818	47432	48818	48818
افزایش اشتغال نسبت به وضع موجود (٪)		-	18.67	22.13	18.67	22.13	22.13

بر اساس یافته‌های جدول ۲، کل ارزش اقتصادی و کل اشتغال ایجادشده حاصل از تخصیص آب در صورت در نظر گرفتن ارزش پولی به‌عنوان اولویت برای هدف تخصیص به ترتیب دارای مقادیر ۱۹۵۱۵ میلیارد ریال و ۴۷۴۳۲ نفر تعیین می‌گردد که نسبت به وضعیت موجود به ترتیب ۲۷/۳۱ و ۱۸/۶۷ درصد افزایش دارد. درصورتی‌که اهداف اقتصادی و اجتماعی برای تخصیص آب به یک اندازه مهم باشند، در این صورت مقادیر کل ارزش اقتصادی

آب به مقدار ۱۹۳۶۳ میلیارد ریال و اشتغال حاصل از تخصیص آب به مقدار ۴۸۸۱۸ نفر به ازای هر مترمکعب آب دست پیدا می‌کنند که این مقادیر مشابه تابع هدفی است که اشتغال به‌عنوان اولویت برای هدف تخصیص در نظر گرفته شده است و نسبت به وضعیت موجود تخصیص در سال ۱۳۹۵، ۲۶/۳۲ و ۲۲/۱۳ درصد افزایش دارد. به‌طورکلی، نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که توزیع آب بین شبکه‌های مختلف به‌طور منطقی بین اهداف اقتصادی و اشتغال سازگاری دارند و توابع کاملاً به سمت تخصیص شبکه‌های سنتی و کرون به علت مزیت‌های اقتصادی و شبکه نکوآباد به علت مزیت‌های اجتماعی آن‌ها جانب‌داری دارند. نتایج نشان می‌دهد که در بعضی از شبکه‌ها بین تخصیص فعلی و وضعیت بهینه تخصیص اختلاف معنی-داری وجود دارد. با این وجود، به‌جز در موارد معدودی بین اولویت‌ها و احجام تخصیص بین توابع مختلف تفاوت معنی‌داری وجود ندارد.

اعمال سطوح مداخله

بر اساس بیلان آبی سال ۱۳۹۵، میزان آب در دسترس حدود ۹۸۰ میلیون مترمکعب است که با کسر حقابه زیست‌محیطی به میزان ۱۴۰ میلیون مترمکعب و آب شرب به مقدار ۳۴۰ میلیون مترمکعب، صنعت به میزان ۹۰ مترمکعب و حجم آب در دسترس برای بخش کشاورزی ۴۱۰ میلیون مترمکعب است. میزان آب تخصیص داده شده به هریک از شبکه‌های آبریز حوضه زاینده‌رود پس از اعمال سطح مداخله مختلف برای تابع چند هدفه با روش معیار جامع در جدول ۳ نشان داده شده است. طبق جدول ۳، شبکه نکوآباد به دلیل داشتن ارزش پولی بالای آب و همچنین راندمان اشتغال بیشتر نسبت به سایر شبکه‌ها، حداکثر آب مورد نیاز خود را دریافت کرده است.

نتایج حاصل از اعمال سطوح مختلف مداخله در تخصیص ۴۱۰ میلیون مترمکعب آب در دسترس برای بخش کشاورزی (شبکه‌های آبیاری حوضه زاینده‌رود) بر ارزش پولی و وضعیت اشتغال در جدول ۴ نشان داده شده است. لازم به توضیح است که در اعمال تمام سطوح مداخلات و همچنین تلفیق آن‌ها از تخصیص بهینه آب بین شبکه‌های آبیاری (سطح مداخله ۱) استفاده‌شده است. طبق جدول ۴، حداکثر ارزش پولی کل از تلفیق سطوح مداخله دو، مداخله سه و مداخله چهار یعنی صادرات ۵۰٪ محصولات کشاورزی با اصلاح الگوی کشت و افزایش ۱۰٪ راندمان آبیاری ۱۱۲۲۰۱ میلیارد ریال است که در این شرایط ۳۱۰۹۵ نفر اشتغال پیدا می‌کنند. به‌عبارت‌دیگر، با ایجاد تمهیدات و مداخلاتی در بخش کشاورزی، می‌توان ارزش پولی کل آب را برای این بخش نسبت به وضعیت موجود تقریباً تا ۳۰ برابر افزایش داد. به‌علاوه، باید توجه داشت که بخش کشاورزی با دریافت ۴۱۰ میلیون مترمکعب آب، بیشترین سود اقتصادی را به خود اختصاص می‌دهد. طبق جدول، میزان اشتغال در سطوح مختلف مداخله نسبت به وضعیت موجود حدوداً بین ۲۰ الی ۲۵ درصد افزایش پیدا می‌کند. بیشترین عدد برای میزان اشتغال بخش کشاورزی حدود ۳۱۷۶۷ نفر است که برای سطح مداخله افزایش راندمان آبیاری از ۶۰٪ به ۷۰٪ به همراه صادرات ۵۰٪ محصولات کشاورزی است و در این شرایط ارزش پولی کل برای بخش کشاورزی حدود ۳۸۹۷۲ میلیارد ریال است که نسبت به وضعیت موجود حدود ۱۰ برابر افزایش پیدا کرده است. خلاصه نتایج جدول ۳ در نمودارهای شکل‌های ۳ و ۴ ارائه‌شده است.

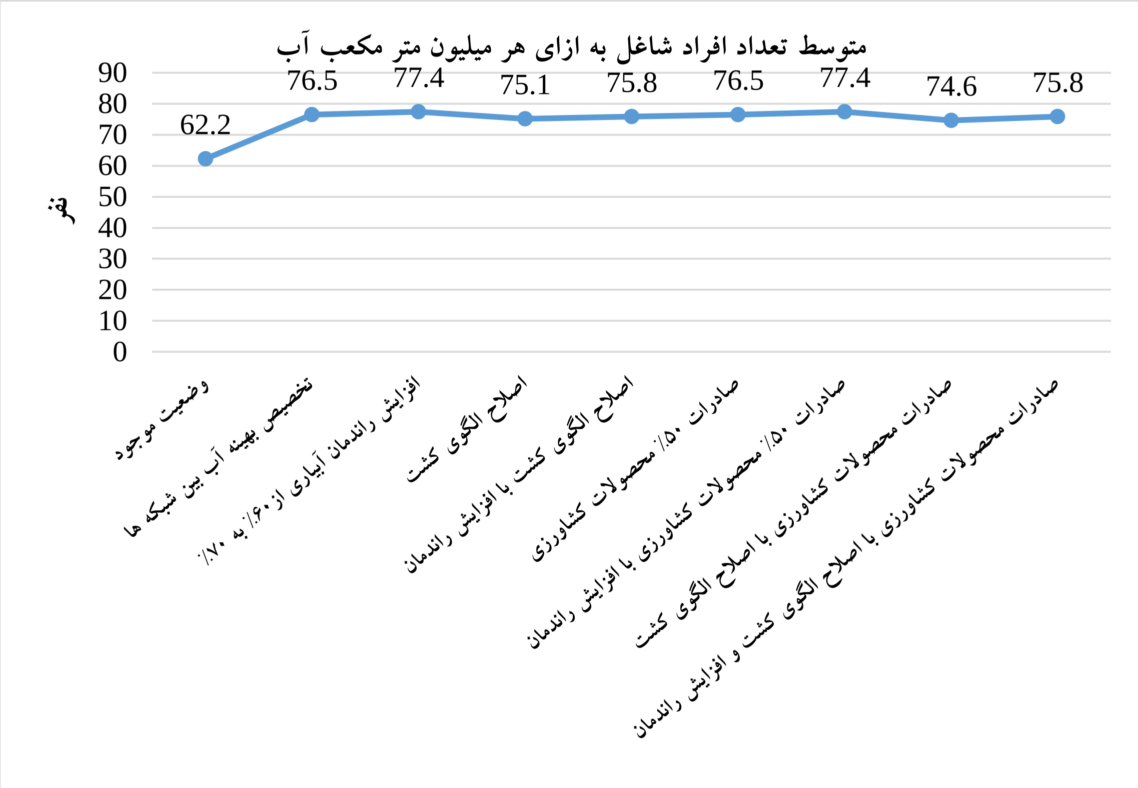
جدول ۳- میزان آب تخصیص داده شده به هریک از شبکه‌های آبریز حوضه زاینده‌رود پس از اعمال سطوح مداخله برای تابع چند هدفه با روش معیار جامع

1	2	3	4	5	6	7	8
	رودشت	**آبشار**	**نکوآباد**	**سنتی**	**مهیار**	**برخوار**	**کرون**
وضعیت موجود	156.65	117	224.50	30	35	44.50	31.35
مداخله سطح ۱	40.97	27.94	308.48	8.48	9.78	7.92	6.43
مداخله سطح ۲	40.97	27.94	304.51	10.33	11.20	8.64	7.89
مداخله سطح ۳	35.12	23.94	300.77	29.48	8.38	6.79	5.52
مداخله سطح ۴	40.97	27.94	308.48	8.48	9.78	7.92	6.43

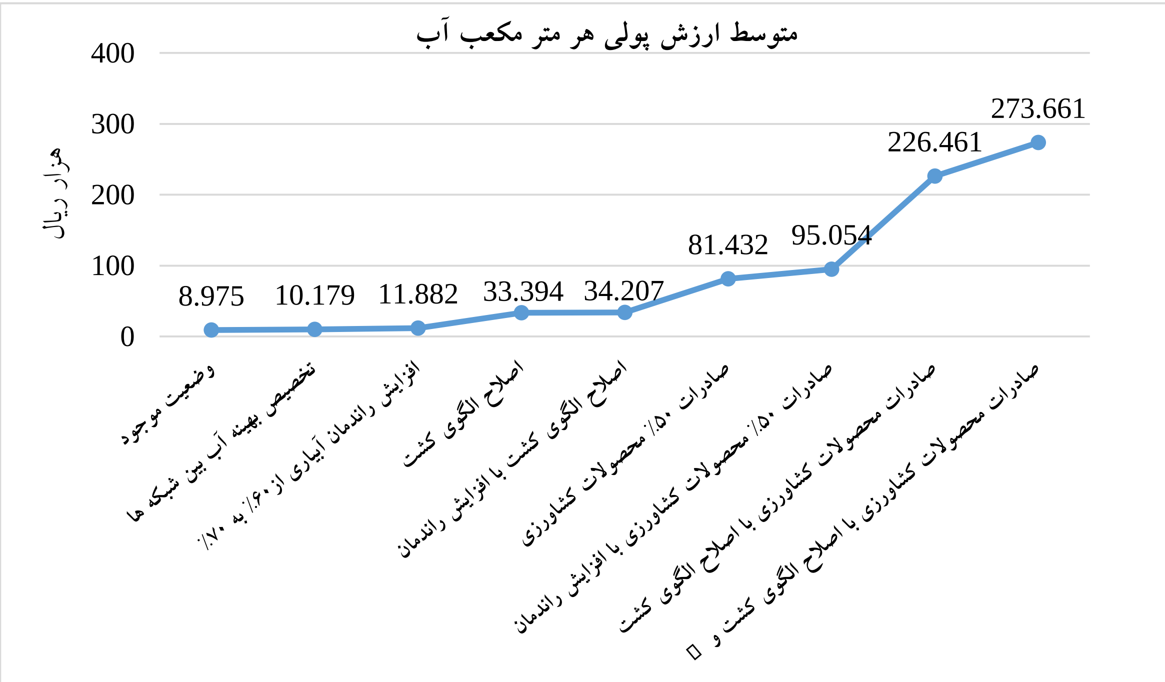
جدول ۴- نتایج حل سطوح مختلف مداخله بر توابع هدف برای کل شبکه‌های آبیاری حوضه زاینده‌رود

سطح مداخله	ارزش پولی کل بخش کشاورزی (میلیارد ریال)	میزان افزایش نسبت به وضعیت موجود (برابر)	میزان اشتغال در بخش کشاورزی (نفر)	درصد افزایش نسبت به وضعیت موجود
وضعیت موجود	3693.31	---	27374	---
تخصیص بهینه آب بین شبکه‌ها (سطح یک)	4173.44	1.13	31368	22.97
اصلاح الگوی کشت (سطح دو)	11606.11	3.15	30601	19.97
افزایش راندمان آبیاری از ۶۰٪ به ۷۰٪ (سطح سه)	4871.47	1.32	31767	24.54
صادرات ۵۰٪ محصولات کشاورزی (سطح چهار)	33387.54	9.07	31368	22.97
اصلاح الگوی کشت و افزایش راندمان آبیاری از ۶۰٪ به ۷۰٪ (سطوح دو و سه)	14025.14	3.81	31095	21.90
افزایش راندمان و صادرات ۵۰٪ محصولات کشاورزی (سطوح سه و چهار)	38971.75	10.59	31767	24.54
اصلاح الگوی کشت و صادرات ۵۰٪ محصولات کشاورزی (سطوح دو و چهار)	92848.91	25.23	30601	19.97
صادرات ۵۰٪ محصولات کشاورزی با اصلاح الگوی کشت و افزایش راندمان (سطوح دو و سه و چهار)	112201.15	30.48	31095	21.90

شکل ۳- نتایج اعمال سطوح مختلف مداخله بر تابع هدف اقتصادی بر اساس تخصیص حجم ۴۱۰ میلیون مترمکعب آب برای بخش کشاورزی



شکل ۴- نتایج اعمال سطوح مختلف مداخله بر تابع هدف اجتماعی (اشتغال) بر اساس تخصیص حجم ۴۱۰ میلیون مترمکعب آب برای بخش کشاورزی



نتایج نشان می‌دهد که صرفاً اصلاح تخصیص آب بین شبکه‌های آبیاری حوضه زاینده‌رود –بدون اعمال هیچ‌گونه مداخله دیگر– باعث رشد ۱۳ درصد ارزش هر مترمکعب آب و ۲۳ درصد اشتغال می‌گردد. با اعمال سطوح مختلف مداخله شامل اصلاح الگوی کشت، افزایش راندمان آبیاری و تسهیل در صادرات محصول، رشد ارزش آب تا ۳۰ برابر افزایش می‌یابد. نتایج بدست آمده با مطالعات حبیبی داویجانی و همکاران که با استفاده از روش بهینه‌سازی چندهدفه تاثیر تخصیص بهینه منابع آب در کویر مرکزی با افزایش ۵۴ درصد سود اقتصادی و ۱۳ درصد اشتغال همراه بوده است، همخوانی دارد. باید توجه داشت در کشور ایران در شرایط موجود افزایش سرمایه‌گذاری در بخش کشاورزی موجب کاهش ارزش‌افزوده بخش آب می‌شود (درزی نفت چالی و همکاران، ۱۳۹۸)؛ بنابراین، به‌منظور افزایش سرمایه‌گذاری در بخش کشاورزی، لازم است روش‌های مناسبی در صرفه‌جویی آب و اصلاح الگوهای کشت اعمال شود تا این روند اصلاح شود. ارتقای بهره‌وری آب در بخش کشاورزی مستلزم برنامه‌ریزی دقیق و اجرای صحیح آن است. اگرچه ارزش‌افزوده بخش کشاورزی با اعمال مداخلات مدیریتی می‌تواند به‌مراتب افزایش یابد، با این وجود، لازم است ارزش‌افزوده و اشتغال‌پذیری بخش کشاورزی در ازای مصرف واحد آب، با بخش صنایع آب‌بر منطقه نیز مقایسه شود. هم‌اکنون این اختلاف علی‌الخصوص در خصوص صنایع فولاد معنی‌دار است (پورکاظمی و والی، ۱۳۹۳ و عسگری و همکاران، ۱۴۰۱)

نتیجه‌گیری

کمبود آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک و افزایش تقاضا، مدیریت منابع محدود آب را الزامی نموده است. در مدیریت سامانه‌های منابع آب باید جنبه‌های مختلف اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیست مدنظر قرار گیرند. گروه‌های ذی‌نفع مختلف اهداف متفاوتی که در مواردی با یکدیگر در تضاد هستند را دنبال می‌کنند. حوضه زاینده‌رود یکی از حوضه‌های آبریز مهم کشور، تحت تنش آب قرار دارد. این شرایط، تنش‌های اجتماعی را نیز به همراه داشته است. برای استمرار حیات زاینده‌رود، مدیریت جامع مبتنی بر اهداف چندگانه و همچنین برنامه‌ریزی‌های درازمدت تخصیص منابع آب به‌منظور مقابله با بحران آب یک ضرورت اجتناب‌ناپذیر است.

در این پژوهش، با اولویت دادن به آب شرب و حقابه محیط‌زیست و کسر حجم سالانه این دو از آب در دسترس رودخانه زاینده‌رود، حجم آب باقی‌مانده بر اساس وضعیت آبی سال مرجع ۱۳۹۵ بین شبکه‌های آبیاری هفت‌گانه مرتبط با جریان زاینده‌رود به‌نحوی توزیع‌شده تا اهداف اقتصادی شامل افزایش ارزش پولی و ارزش‌افزوده و اجتماعی شامل افزایش اشتغال به‌صورت توأم تأمین شود. توابع هدف اقتصادی و اجتماعی به‌صورت تک‌هدفه و چندهدفه با تلفیق توابع هدف بر اساس روش‌های اولویت مطلق و معیار جامع با استفاده از نرم‌افزار لینگو حل شده است تا بهترین تخصیص منابع آب بین شبکه‌های مختلف به‌دست آید. نتایج نشان می‌دهد که در حوضه زاینده‌رود، توابع هدف اقتصادی و اجتماعی همسو هستند. به این معنی که با افزایش ارزش پولی، عموماً هدف اشتغال‌زایی نیز محقق می‌گردد. پس از تأمین آب مورد نیاز بخش صنعت، حجم آب باقی‌مانده به‌صورت بهینه بین شبکه‌های آبیاری حوضه تخصیص داده می‌شود که این تخصیص بهینه با تخصیص داده‌شده در سال مبنا متفاوت است. به‌منظور افزایش ارزش آب در بخش کشاورزی، تمهیداتی به‌صورت سطوح مداخله شامل اصلاح توزیع آب بین شبکه‌ها در وضعیت موجود کشت، تغییر الگوی کشت، افزایش راندمان آبیاری، صادرات محصولات کشاورزی و ترکیب سطوح مختلف مداخله بدون در نظر گرفتن محدودیت‌های فنی و حقوقی ارائه گردید. سطوح مداخله اعمال‌شده عبارت‌اند از اصلاح توزیع آب بین شبکه‌ها در وضعیت موجود کشت، اصلاح الگوی کشت، افزایش راندمان آبیاری به میزان ۱۰٪، صادرات ۵۰٪ محصولات کشاورزی. هر یک از سطوح به‌صورت مجزا و به‌صورت تلفیقی در نرم‌افزار لینگو تحلیل‌شده و نتایج تخصیص بهینه در سطوح مختلف

مداخله بر راندمان اقتصادی و اشتغال بخش کشاورزی تعیین گردید. نتایج تخصیص بهینه در سطوح مختلف با وضعیت موجود مقایسه گردید.

طبق نتایج به‌دست‌آمده، از تلفیق سطوح مختلف مداخله با هم در شرایط ایده‌آل، تغییر محصولات باغی و زراعی و تبدیل به محصولات با ارزش پولی بیشتر که در منطقه مورد نظر امکان کشت دارند، به‌همراه افزایش ۱۰٪ راندمان آبیاری و صادرات ۵۰٪ محصولات باغی به خارج از کشور، می‌تواند ارزش هر مترمکعب آب سطحی را در بخش کشاورزی به بیشترین نرخ حدود ۲۷۳.۶۶۱ هزار ریال، معادل ۳۰ برابر وضعیت فعلی، به افزایش رساند. با انجام سطوح مختلف مداخله، میزان اشتغال بخش کشاورزی از میزان فعلی ۱۵۱ نفر در بهترین شرایط به ۱۸۹ نفر به ازای هر میلیون مترمکعب آب افزایش می‌یابد.

اگر چه در این پژوهش جهت مدل‌سازی تخصیص آب از ساده‌سازی‌هایی در محاسبه ارزش پولی بخش کشاورزی و از برنامه‌ریزی خطی در تخصیص استفاده شده و همچنین از محدودیت‌ها و الزامات حقوقی مداخلات صرف‌نظر گردیده است، ولی نتایج به‌صراحت نشان می‌دهد که ارزش افزوده بخش کشاورزی با اعمال مداخلات مدیریتی می‌تواند به‌مراتب افزایش یابد. با این وجود، لازم است ارزش‌افزوده و اشتغال‌پذیری بخش کشاورزی در ازای مصرف واحد آب، با بخش صنایع آب‌بر منطقه نیز مقایسه شود که موضوع تحقیق آینده است. با توجه به اینکه افزایش قیمت محصولات کشاورزی مختلف از روند رشد نسبتاً یکسانی پیروی می‌کند، نتایج مطالعات حاضر در تخصیص بهینه آب بین شبکه‌ها و افزایش ارزش محصولات در سطوح مداخله برای سال‌های جاری نیز معتبر است. باید توجه داشت که اعتبار پژوهش‌های فنی و اقتصادی تخصیص آب به‌طور مستقیم وابسته به‌دقت آمارهای در دسترس به‌عنوان ورودی‌های مدل‌های تخصیص است. به‌روزرسانی و افزایش دقت آمارهای مختلف بر دقت و اعتبار نتایج به‌دست آمده خواهد افزود.

تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافعی وجود ندارد و این مسئله مورد تأیید نویسندگان مقاله است.

فهرست منابع

۱. آقازاده اردبیلی، شیما، کانونی، امین، حسن پور کاشانی، مهسا و برمکی، مرتضی،۱۳۹۷. بهینه سازی تخصیص آب بین محصولات مختلف در شرایط تنش آبی در شبکه آبیاری یامچی، اردبیل. *سیزدهمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری و سومین همایش ملی صیانت از منابع طبیعی و محیط زیست با محوریت آبخیزداری و صیانت از منابع طبیعی و محیط زیست*،اردبیل. **https://civilica.com/doc/827419**

۲. اسماعیلی موخر فردویی، محمد علی، ابراهیمی، کیومرث، عراقی‌نژاد، شهاب، فضل الهی، هاجر. ۱۳۹۷. تعیین ارزش اقتصادی آب کشاورزی با رویکرد قیمت گذاری بر اساس نوع محصول در استان مرکزی. *مدیریت آب و آبیاری*, ۸(۱). صص 163-149. **doi: 10.22059/jwim.2018.254828.602**

۳. اکبری، نعمت‌اله و زاهدی، کیوان، ۱۳۸۷. کاربرد مدل‌های برنامه‌ریزی در اقتصاد و مدیریت. فصل پنجم: برنامه‌ریزی بر اساس چندین هدف. *انتشارات جهاد دانشگاهی واحد اصفهان*، ص ۹۳ و ص ۲۲۸.

۴. اکبری، ندا ، نیک سخن، محمد حسین و اردستانی، مجتبی،۱۳۹۳. تخصیص بهینه آب با استفاده از تئوری بازی های همکارانه مطالعه موردی: حوضه آبریز زاینده رود. **https://civilica.com/doc/1578363**

۵. اکبری، ندا ، نیک سخن، محمد حسین و اردستانی، مجتبی،۱۳۹۴. بهینه سازی تخصیص ازمخزن سد با استفاده از الگوریتم ژنتیک وتاکید برتامین جریان زیستی رودخانه (مطالعه موردی: زاینده رود). *کنفرانس بین المللی علوم، مهندسی و فناوری های محیط زیست،تهران*. **https://civilica.com/doc/407697**

۶. امینی نژاد، سیدرامین، صمدی، محسن و رحمتی، مراحم،۱۳۹۳. بحران کم آب زاینده رود، پیامدها و راهکارها. *همایش ملی آب، انسان و زمین ،اصفهان*. **https://civilica.com/doc/319026**

۷. انصاری، حسین، بوستانی، آرمین، طباطبایی، علیرضا و فروزش، مجید، ۱۳۹۶. بررسی مدیریت مصرف و برآورد میزان تقاضای آب شرب شهری مشهد در افق ۱۴۲۰ (یادداشت فنی). *آب و توسعه پایدار*, ۴(۱). صص 125-132. **doi: 10.22067/jwsd.v4i1.50409**

۸. پورکاظمی، محمد حسین و والی، معصومه،۱۳۹۳. مدیریت منابع آبی زاینده رود بین بخش های صنعت و کشاورزی استان اصفهان با استفاده از نظریه بازی ها. **https://civilica.com/doc/790364**

۹. درزی نفت چالی، عبداله، رفیعی راد، ساره، خوش‌روش، مجتبی، عسگری، احمد، بابایی، محمدرضا و زیردست رستمی، حسینعلی، ۱۳۹۸. رابطه ارزش‌افزود–ه بخش آب با ارزش‌افزوده بخش‌های کشاورزی، صنعت و برق در استان مازندران. *علوم آب‌وخاک*.۲۳ (۱) :۵۷–۶۶ .

۱۰. سالمی، حمیدرضا و حیدری، نادر، ۱۳۸۵. ارزیابی منابع و مصارف آب در حوزه آبریز زاینده رود، *تحقیقات منابع آب ایران*، ۲(۱)، pp. 72-76.

۱۱. شاه ولی کوه شوری، سحر، غضنفری مقدم، محمد صادق و خانجانی، محمد جواد، ۱۳۹۷. بهینه سازی مدیریت منابع آب با اعمال سناریوهای مختلف تخصیص (مطالعه موردی: حوضه آبریز دز)، *علوم و مهندسی آبیاری*، ۴۱(۱)، صص.55-45 . doi: 10.22055/jise.2018.13452 .

۱۲. صفاری، بابک، ۱۳۹۶. طرح تهیه و تدوین اسناد توسعه شهرستان‌های استان اصفهان با الگوی اقتصاد مقاومتی. سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان اصفهان، *دانشکده علوم اداری و اقتصاد دانشگاه اصفهان*.

۱۳. صفوی، حمیدرضا و راست قلم، مهدی، ۱۳۹۵. راهکار برون رفت از بحران آب در حوضه آبریز زاینده رود: مدیریت توامان تامین و مصرف آب، *تحقیقات منابع آب ایران*. ۱۲(۴), صص22-12 .

۱٤. طباطبائی، سید مصطفی و شهیدی، علی،۱۳۹۶. بررسی افزایش بهره وری اقتصادی آب با تغییر الگوی کشت در روستای مزرعه نو در اردکان-یزد. پژوهش آب در کشاورزی، ۳۱ (۱). صص ۱۱۹–۱۲۸. https://civilica.com/doc/1477871.

۱۵. عسگری، سعید، شانه ساززاده، احمد و صفاری، بابک، ۱۴۰۱. برنامه‌ریزی تخصیص بهینه آب زاینده‌رود به بخش‌های کشاورزی و صنعت با استفاده از تحلیل اهداف اقتصادی و اجتماعی، *سیزدهمین کنگره ملی مهندسی عمران*، دانشگاه صنعتی اصفهان.

۱۶. علیجانیان، محمدعلی و صفوی، حمیدرضا و ابریشمچی، احمد،۱۳۸۷. ارتباط بین مدل های شبیه سازی و بهینه سازی در مدیریت تلفیقی منابع آب سطحی و زیر زمینی با استفاده از منطق فازی، *چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران*،تهران.https://civilica.com/doc/37728

۱۷. علیزاده، امین، ۱۳۹۴. نیاز خالص آبیاری محصولات زراعی و باغی ایران، پروژه بهینه‌سازی الگوی مصرف آب کشاورزی ایران.

۱۸. فضل الهی، هاجر و ابراهیمی، کیومرث و فتاحی، روح اله، ۱۳۹۸. تاثیر انتقال آب بین حوضه ای بر ارزش اقتصادی منابع آب کشاورزی (مطالعه موردی: دشت اراک)، *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*، ۱۳(۵)، صص 1363-1373.

۱۹. فهیمی، الهه ، فتاحی اردکانی، احمد و فهرستی، مسعود،۱۳۹۷. ارزش گذاری اقتصادی خدمات بوم نظام منابع آب مطالعه موردی: رودخانه زاینده رود.https://civilica.com/doc/763387

۲۰. کیانی، غلامحسین، خوش اخلاق، رحمان و کمال، محمد مهدی، ۱۳۹۸. تخصیص بهینه منابع آب زاینده‌رود بین استان‌های چهارمحال بختیاری، اصفهان و یزد با استفاده از نظریه بازی‌ها، *نظریه های کاربردی اقتصاد*، ۶(۳)، صص .188-165.

۲۱. محمدی، حمید، بوستانی، فردین و کفیل‌زاده، فرشید، ۱۳۹۱. تعیین الگوی کشت بهینه با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه غیرخطی فازی: مطالعه موردی، *مجله آب و فاضلاب*، ۲۳(۴), صص 55-43.

۲۲. محمدی، حمید، سرگزی، علی رضا و دهباشی، وحید و پودینه، محمد،۱۳۹۴. بهینه سازی الگوی کشت با تاکید بر منافع اجتماعی در بهره برداری منطقی آب در تولید محصولات زراعی: مورد استان فارس، https://civilica.com/doc/1289193

۲۳. مردانی نجف آبادی، مصطفی و نیکویی، علیرضا و ضیایی، سامان و احمدپور برازجانی، محمود، ۱۳۹۵. تدوین الگوی منطقه ای کشت محصولات زراعی و باغی در استان اصفهان: رویکرد برنامه‌ریزی ساختاری چند هدفه، *اقتصاد و توسعه کشاورزی*، ۳۰(۳)، صص .206-188. doi: 10.22067/jead2.v30i3.53749

۲۴. معاونت آمار و اطلاعات (سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان اصفهان)، ۱۳۹۷. سالنامه آماری استان اصفهان سال ۱۳۹۶، تهران. سازمان برنامه‌وبودجه کشور، *مرکز اسناد مدارک و انتشارات*.

۲۵. نصابیان، شهریار و محمدی، حمید و کیخا، علی رضا،۱۳۹۳. تاثیر اصلاح الگوی کشت بر کاهش کود و آب فعالیت های کشاورزی: مطالعه موردی استان فارس. https://civilica.com/doc/1288301

۲۶. وزارت نیرو، شرکت سهامی آب منطقه‌ای اصفهان، ۱۳۸۷. تعیین منابع و مصارف آب حوضه زاینده‌رود – ویرایش دوم، تیر ۱۳۸۷، *مطالعات مرحله اول – جلد دهم – سنتز مطالعات*. اصفهان، مهندسین مشاور زاینده‌آب.

27. Ali, M.H., and Talukder, M.S.U., 2008. Increasing water productivity in crop production-A synthesis. *Agricultural Water Management*, 95(11), 1201-1213.

28. Braude, E., Hauser, S., Sinuany-Stern, Z., and Oron, G., 2015. Water allocation between the agricultural and the municipal sectors under scarcity: A financial approach analysis. *Water Resources Management*, 29(10), 3481-3501.

29. Cai, X., Lasdon, L., and Michelsen, A.M., 2004. Group decision making in water resources planning using multiple objective analysis. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 130(1), 4-14.

30. Chen, L., McPhee, J., and Yeh, W.W.G., 2007. A diversified multiobjective GA for optimizing reservoir rule curves. *Advances in Water Resources*, 30(5), 1082-1093.

31. Habibi Davijani, M., Banihabib, M.E., Nadjafzadeh Anvar, A. and Hashemi, S.R., 2016. Multi-objective optimization model for the allocation of water resources in arid regions based on the maximization of socioeconomic efficiency. *Water Resources Management*, 30(3), 927-946.

32. Giordano, M., Scheierling, S.M., Tréguer, D.O., Turral, H. and McCornick, P.G., 2021. Moving beyond 'more crop per drop': Insights from two decades of research on agricultural water productivity. *International Journal of Water Resources Development*, 37(1), 137-161.

33. Guo, S., Wang, J., Zhang, F., Wang, Y., and Guo, P., 2018. An integrated water-saving and quality-guarantee uncertain programming approach for the optimal irrigation scheduling of seed maize in arid regions. *Water*, 10(7), 908.

34. Liu, J., Li, Y., Huang, G. and Chen, L. 2017. A recourse-based type-2 fuzzy programming method for water pollution control under uncertainty. *Symmetry*, 9(11), 265.

35. 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), pp.528-535.

36. Nasiri, G. O., & Marofi, S. 2017. A multi-objective bargaining and Fuzzy programming approaches for optimal water allocation with emphasis on deficit irrigation.
37. Schrage, L. E. 2006. Optimization modeling with LINGO. Lindo System.
38. Pandey, V.L., Dev, S.M. and Jayachandran, U., 2016. Impact of agricultural interventions on the nutritional status in South Asia: A review. *Food policy*, 62, pp.28-40.
39. Song, W., Liu, Y. Q., Arowolo, A., Zhang, Y., and Xu, Q. 2018. Optimal water allocation scheme in integrated water-ecosystem-economy system. *River Basin Management. Springer,* 1-28.
40. Speed, R., Yuanyuan, L., Zhiwei, Z., Le Quesne, T., and Pegram, G. 2013. Basin water allocation planning: Principles, procedures and approaches for basin allocation planning.
41. Young, R.A. 2005 "Determining the Economic Value of Water; Concepts and Methods," Washington DC: Resources for the Future.
42. Wang, L. Z., Fang, L. and Hipel, K. W. 2003. Water resources allocation: a cooperative game theoretic approach. *Journal of Environmental Informatics*, 2(2), 11-22.
43. Waters, D., and Solutions, E. P. 2017. OECD Studies on Water.
44. Westermann, O., Förch, W., Thornton, P., Körner, J., Cramer, L. and Campbell, B., 2018. Scaling up agricultural interventions: Case studies of climate-smart agriculture. *Agricultural Systems*, 165, pp.283-293.
45. Xevi, E., and Khan, S. 2005. A multi-objective optimisation approach to water management. Journal of environmental management, 77(4), 269-277.
46. Zhang, F., Guo, P., Engel, B. A., Guo, S., Zhang, C., and Tang, Y. 2019. Planning seasonal irrigation water allocation based on an interval multiobjective multi-stage stochastic programming approach. *Agricultural Water Management*, 223, 105692.

مقاله پژوهشی
نشریه پژوهش آب در کشاورزی / ب / جلد ۳۸ / شماره ۴/ ۱۴۰۳.ص۳۷۵-۳۹۵
https://doi.org/10.22092/jwra.2024.366784.1052

اثر افزایش فشار کارکرد و شوری آب بر عملکرد برخی از قطره‌چکان‌های تنظیم‌کننده فشار

حسین پرویزی[۱*]، حدیث حاتمی[۱] ، امیر پرنیان[۱]، محمدحسن رحیمیان[۱] و حسین بیرامی[۲]

۱. استادیار مرکز ملی تحقیقات شوری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، یزد، ایران. H.parvizi@areeo.ac.ir،
H.hatami@ areeo.ac.ir ، A.parnian@ areeo.ac.ir، Mhrahimian@gmail.com

۲. دانشیار مرکز ملی تحقیقات شوری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، یزد، ایران. H.beyrami@areeo.ac.ir

دریافت: شهریور ۱۴۰۳ و پذیرش: آذر ۱۴۰۳

چکیده

پژوهش حاضر با هدف تعیین اثرات فشار کارکرد و شوری آب آبیاری بر عملکرد قطره‌چکان‌های رایج تنظیم‌کننده فشار طراحی و انجام شد. بر این اساس، سه نشان تجاری قطره‌چکان با نام‌های نتافیم، یورودریپ و پرسی زالوان در دو آبدهی ۸ و ۲۴ لیتر در ساعت و تحت فشار کارکردهای ۰/۵، ۱/۵ و ۲/۵ بار و دو سطح شوری آب ۵ و ۱۲ دسی زیمنس بر متر مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که افزایش فشار از ۰/۵ تا ۲/۵ بار و افزایش شوری از ۵ به ۱۲ دسی زیمنس بر متر منجر به افزایش و یا عدم تغییر ضریب تغییرات آبدهی در قطره‌چکان‌های مختلف می‌شود. مقایسه نتایج ارزیابی‌ها قبل (قطره‌چکان نو) و بعد از انجام آزمایشات نشان داد که تغییرات مشاهده شده در اثر یکی از عوامل تغییر فشار، شوری آب و یا جزو ذات قطره‌چکان می‌باشد. با این حال، نتایج نشان دهنده عدم وقوع گرفتگی معنی دار و قابل توجه در اثر تغییر شوری در قطره‌چکان‌های مختلف و در شرایط کاربرد فشارهای متفاوت بود. هر چند که در قطره‌چکان‌های نتافیم و یورودریپ (هشت لیتر در ساعت)، میانگین گیری نتایج نشان دهنده اثر افزایش شوری بر کاهش آبدهی بود. این میزان کاهش در نتافیم ۳/۸ % و در یورودریپ نیز ۲/۶% بود. با توجه به نتایج، کاربرد فشار ۲/۵ بار منجر به ورود قطعات و اجسام جامد موجود در لوله‌های آبیاری و یا عبور کرده از سامانه فیلتراسیون به درون قطره‌چکان‌ها شد و میزان آبدهی را به مقدار قابل توجهی کاهش داد. اگر چه می توان این مشکل را با شستشوی لوله ها قبل از شروع به کار سیستم تا حدود زیادی مرتفع نمود. قطره‌چکان‌های نتافیم هشت لیتر در ساعت علیرغم عدم ورود قابل توجه این اجسام دارای مشکل چسبندگی دیافراگم بودند و به نوعی بیشترین کاهش آبدهی را به این دلیل نشان دادند. بررسی دقیق نمونه‌های تخریب شده نشان داد که دلیل این تفاوت‌ها، شکل و ساختار متفاوت مجرای ورود آب می‌باشد. بر این اساس، کوچک بودن سطح مقطع ورود آب به درون قطره‌چکان‌ها ورود قطعات جامد را کاهش می‌دهد. بنابراین در نمونه‌های پرسی زالوان با بیشترین سطح مقطع، بالاترین میزان ورود اجسام خارجی و در نمونه نتافیم هشت لیتر در ساعت کمترین میزان ورود اجسام به دلیل کاربرد فشار کارکرد ۲/۵ بار مشاهده گردید.

واژه‌های کلیدی: گرفتگی قطره‌چکان، قطره‌چکان نتافیم، قطره‌چکان یورودریپ، قطره‌چکان پرسی زالوان

* - آدرس ایمیل نویسنده مسئول: H.parvizi@areeo.ac.ir

مقدمه

کارایی مطلوب سامانه‌های آبیاری قطره‌ای در هنگام استفاده از آب‌های نامتعارف و شور به‌عنوان سامانه آبیاری کارآمد، به خصوصیات هیدرولیکی از جمله تغییرات دبی و به‌خصوص یکنواختی پخش آب قطره‌چکان‌ها بستگی دارد (چوپان و امامی، ۱۳۹۷)؛ بنابراین، نقش قطره‌چکان‌ها با توجه به تغییرات گسترده‌ای که از نظر مشخصات و ویژگی‌های فنی و کیفیت ساخت دارند در افزایش کارآیی سامانه‌های آبیاری قطره‌ای غیرقابل‌انکار است. اگر چه امروزه تقریباً تمامی مدل‌های معروف و در دسترس قطره‌چکان بر اساس معیارها و استانداردهای مربوطه ساخته می‌شوند؛ اما تغییر شرایط و عوامل متعدد می‌تواند کارآیی آن‌ها را تحت تأثیر قرار دهد و در عمل و کاربرد ممکن است نتایج دیگری را نشان دهند. قطره‌چکان‌های تنظیم‌کننده فشار قادرند تغییرات فشار در دامنه گسترده‌ای از ۰/۵ تا ۴ بار را در تنظیم نمایند و دبی تقریباً یکنواختی داشته باشند. بااین‌حال پژوهش‌های مختلف نشان داده‌اند که این قطره‌چکان‌ها نیز در برابر تغییرات فشار عملکرد متفاوتی دارند و می‌توان آن‌ها را درجه‌بندی کرد (میریان و همکاران، ۱۳۹۸؛ پرویزی و همکاران، ۱۴۰۲؛ کرناک و همکاران،۲۰۰۴). پروینی و معروف‌پور (۱۳۹۲) نشان دادند که قطره‌چکان‌های نتافیم و آنتلکو با دبی هشت لیتر در ساعت و قطره‌چکان یورودریپ با دبی چهار لیتر در ساعت، برترین قطره‌چکان‌ها از بین موارد مورد بررسی از نظر معیارهای کیفی و یکنواختی پخش می‌باشند. بر اساس نتایج پیروزفر و همکاران (۱۳۹۳) قطره‌چکان‌های نتافیم و یورودریپ در شوری‌های متفاوت، دارای میزان گرفتگی متفاوتی می‌باشند. همچنین به عقیده کریمی و همکاران (۱۳۹۰)، قطره‌چکان‌های نتافیم و انتلکو با ضریب تغییرات ساخت کارخانه بسیار پایین دو نوع از بهترین و کاربردی‌ترین قطره‌چکان‌ها در آبیاری تحت‌فشار می‌باشند. بر اساس نتایج این پژوهشگران، قطره‌چکان‌های نتافیم دارای یکنواختی توزیع خوبی بوده و در طولانی‌مدت نسبت به قطره‌چکان‌های آنتلکو برتری دارد. بااین‌حال، هزارجریبی و همکاران (۱۳۹۲) عنوان کردند که در قطره‌چکان‌های مورد بررسی نمی‌توان به اطلاعات ارائه شده از سوی کارخانه‌ها در مورد یکنواختی آبدهی قطره‌چکان‌ها اطمینان کرد. در تائید این موضوع، فراستی و همکاران (۱۳۸۹) تعداد ۱۱ قطره‌چکان رایج تنظیم‌کننده فشار که بیشتر در بازار ایران موجود است را مورد بررسی قرار دادند و بیان کردند که اطلاعات واقعی اندازه‌گیری شده با اطلاعات ارائه‌شده توسط سازندگان متفاوت است و در طراحی باید از داده‌های واقعی اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه استفاده کرد.

به عقیده پرویزی و همکاران (۱۴۰۲) و بر اساس نتایج یک پژوهش میدانی در باغات پسته با شوری آب آبیاری ۱ تا ۱۳ دسی زیمنس بر متر، در صورت تأمین و توزیع فشار کارکرد مناسب (۰/۵ تا ۴ بار) در پشت قطره‌چکان‌ها در سامانه‌های نوین آبیاری اجراشده، فارغ از برند و نوع، می‌توان به ضریب تغییرات پایین و یکنواختی پخش بالادست یافت. بااین‌حال، نمونه‌های مختلف، نتایج متفاوتی را از خود نشان می‌دهد. در رابطه با کاربرد فشار بالا، میریان و همکاران (۱۳۹۸) نشان دادند که کاربرد فشار سه بار در مقایسه با فشارهای پایین‌تر منجر به کاهش گرفتگی در قطره‌چکان‌های یورودریپ چهار و هشت لیتر در ساعت می‌گردد به‌گونه‌ای که در آبدهی بالاتر (هشت لیتر در ساعت) گرفتگی کمتری اتفاق می‌افتد. همچنین نتایج نصرالهی و همکاران (۱۳۹۲)، نشان‌دهنده اثرگذاری تغییرات فشار و دما بر قطره‌چکان‌های مختلف است. همچنین الامین و همکاران (۲۰۱۷) نشان دادند که در دو نوع قطره‌چکان تنظیم‌کننده فشار (توربو و اوکتا) و یک نمونه غیر تنظیم‌کننده فشار (بررل)، با افزایش فشار از.۰/۵ به‌یک‌بار میزان گرفتگی کاهش می‌یابد. در رابطه با کاربرد شوری، نتایج لی لی و همکاران (۲۰۲۱) بیانگر تصادفی بودن فرآیند انسداد شیمیایی در قطره‌چکان است. این پژوهشگران معتقدند که فرآیند انسداد شیمیایی به سه صورت کاهش تدریجی، نوسانی و ناگهانی رخ می‌دهد. بر این اساس، بیشترین خطر گرفتگی شیمیایی در سامانه‌ها در

انتهای لوله‌های جانبی (لاترال) و در قطره‌چکان‌ها در مسیر جریان در هسته مرکزی آن‌ها وجود دارد. به‌طورکلی این پژوهشگران، شوری آب کمتر از چهار دسی زیمنس بر متر را مناسب برای استفاده در سامانه‌های آبیاری قطره‌ای می‌دانند. از طرفی، برخی گزارش‌ها نشان می‌دهد که کاربرد آب تا شوری شش دسی زیمنس بر متر منجر به تغییر پارامترهای گرفتگی مانند تغییر نسبت دبی و ضریب یکنواختی در قطره‌چکان‌ها می‌گردد (ترکی و همکاران، ۲۰۲۰؛ الامین و همکاران، ۲۰۲۰). بررسی هم‌زمان اثر شوری و تغییر فشار کارکرد در پژوهش سیلوا و همکاران (۲۰۱۶) نشان داد که کاربرد شوری تا ۴/۵ دسی زیمنس بر متر در برخی قطره‌چکان‌های تنظیم‌کننده فشار و تحت فشارهای ۰/۶ تا ۱/۶ بار منجر به تغییرات آبدهی اندک در محدوده هفت درصد و مطابق با مقادیر توصیه‌شده توسط سازنده می‌شود. علاوه بر این، در پژوهشی دیگر که اخیراً توسط عبدالسلام و همکاران (۲۰۲۴) انجام‌شده و در آن اثرات آب مغناطیسی، شوری و فشار بر عملکرد قطره‌چکان‌های تنظیم‌کننده فشار مورد بررسی قرار گرفته، گزارش شده است که افزایش فشار تا ۱/۵ بار منجر به افزایش یکنواختی پخش و کاهش تغییرات آبدهی در تمامی شوری‌ها و فارغ از نوع آب (مغناطیس یا غیر مغناطیس) می‌گردد. بر اساس آنچه ذکر گردید، علاوه بر تغییرات ذاتی در ساخت که منجر به عدم یکنواختی می‌شود کارکرد قطره‌چکان‌ها تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند شوری و فشار قرار می‌گیرد که بعضاً منجر به گرفتگی آن‌ها و در نتیجه کاهش آبدهی و یکنواختی پخش آب می‌شود. به عقیده برخی از کارشناسان بخش اجرا در استان یزد و منطبق بر نتایج برخی پژوهش‌های ارائه‌شده، یکی از دلایل عدم عملکرد مناسب پایین بودن فشار کارکرد در پشت قطره‌چکان‌ها است و در صورت افزایش فشار کارکرد تا حدود سه بار مشکلات ناشی از گرفتگی به‌ویژه در شرایط کاربرد آب شور کاهش می‌یابد و یا مرتفع می‌شود. از طرفی دیگر، فلسفه وجود قطره‌چکان‌های تنظیم‌کننده فشار آبدهی یکسان و عدم انسداد در دامنه فشار کارکرد توصیه‌شده توسط سازنده است. تقریباً در تمامی قطره‌چکان‌های تنظیم‌کننده فشار حداقل فشار کارکرد توصیه‌شده ۰/۵ بار است و عمده بهره‌برداران به دلیل این‌که تأمین فشارهای بالاتر مستلزم صرف هزینه ثابت و جاری بالاتری است ترجیح می‌دهند که با تأمین حداقل فشار سامانه‌های خود را راه‌اندازی و مورد استفاده قرار دهند. بنابراین وجود نظرات متفاوت در زمینه میزان فشار کاربرد در پشت قطره‌چکان‌های رایج و پرکاربرد تنظیم‌کننده فشار، نشان‌دهنده نیاز به بررسی عملکرد این قطره‌چکان‌ها تحت فشارهای متفاوت و به‌ویژه در شرایط کاربرد آب شور است. علاوه بر این، بررسی اثرات فشار کارکرد و شوری آب آبیاری بر عملکرد این قطره‌چکان‌ها می‌تواند گامی مثبت در جهت روشن‌سازی و پاسخ نهایی به این نظرات باشد. ازاین‌رو، پژوهش حاضر با هدف بررسی وجود تغییرات ذاتی در ساخت برخی قطره‌چکان‌های رایج و پرکاربرد تنظیم‌کننده فشار و ارزیابی اثرات تغییرات فشار کارکرد و شوری آب آبیاری بر عملکرد این قطره‌چکان‌ها طراحی و انجام شده است.

روش پژوهش

مکان و نحوه انجام آزمایش‌ها

پژوهش حاضر در مرکز ملی تحقیقات شوری واقع در شهر یزد و با مشخصات جغرافیایی عرض شمالی ۳۱,۹۱۷۸۰۲ و طول شرقی ۵۴,۲۸۱۷۳۸ و ارتفاع ۱۲۳۶ متری از سطح دریا انجام شد. به‌منظور انجام این پژوهش، تعدادی قطره‌چکان رایج و پرکاربرد تنظیم‌کننده فشار انتخاب و تحت شرایط کاربرد آب شور در فشارهای مختلف مورد بررسی قرار گرفتند. بر این اساس دو نشان تجاری خارجی در تولید قطره‌چکان با نام‌های نتافیم (آبدهی اسمی ۸ و ۲۵ لیتر در ساعت) و یورودریپ (آبدهی اسمی ۸ و ۲۴ لیتر در ساعت) و یک نشان تجاری ایرانی با نام پرسی زالوان (آبدهی ۸ و ۲۴ لیتر در ساعت) و تحت فشار کارکردهای ۰/۵، ۱/۵ و ۲/۵ بار مورد ارزیابی قرار گرفتند. علاوه بر این، دو سطح شوری آب ۵ و ۱۲ دسی

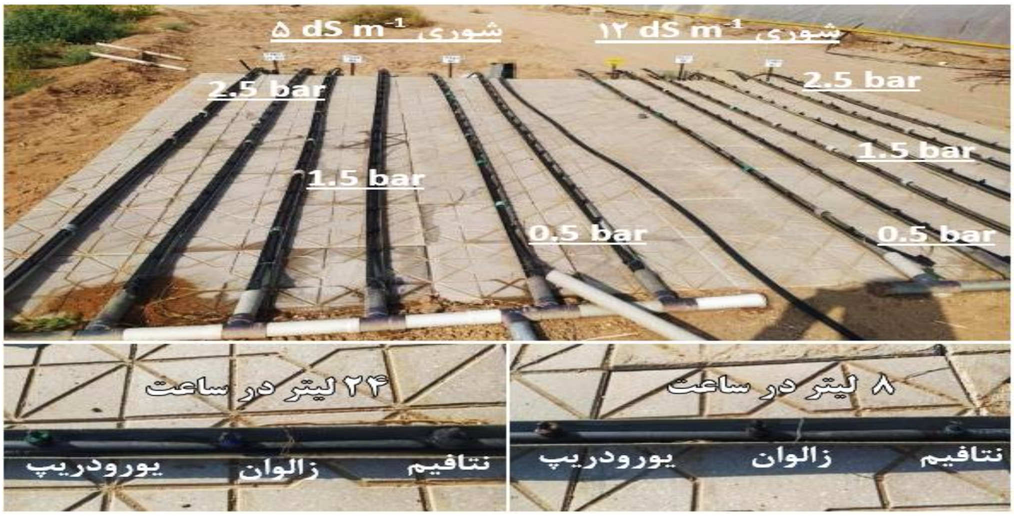
زیمنس بر متر نیز در این بررسی مورد استفاده قرار گرفت (جدول ۱). برای تهیه این شوری‌ها، ابتدا آب با شوری طبیعی بیش از ۳۰۰ دسی زیمنس بر متر از رودخانه شور شهرستان اردکان به محل پژوهش انتقال داده شد و سپس با کمک آب شهری رقیق و شوری‌های مورد نظر ساخته شد.

جدول ۱- خصوصیات کیفی آب مورد استفاده در آزمایش‌ها

EC (dS/m)	pH	Co_3^{-2}	HCo_3^-	Cl^-	Mg^{+2}	Ca^{+2}	Na^+	K^+	So_4^{-2}	RSC	LSI
5.24	7.91	0	3.03	40.3	7.6	5.37	36.6	0.37	7.4	-9.9	0.25
12.11	7.94	0	2.89	105.5	15.9	6.55	101/5	0.42	13.1	-19.1	0.13

* پارامترهای LSI، RSC ، pH و EC به ترتیب نشان‌دهنده نمایه اشباع لانژیلر، باقی‌مانده کربنات سدیم، اسیدیته و شوری آب می‌باشند

بر این اساس و مطابق شکل ۱، لاترال‌هایی به طول ۳/۵ متر ایجاد و بر روی هر لاترال از هر نشان تجاری شش قطره‌چکان و در مجموع ۱۸ قطره‌چکان به‌صورت یک در میان و فاصله ۲۰ سانتی‌متر از یکدیگر نصب گردید. به‌منظور اجرای آزمایش، هر لاترال در بازه زمانی ۱۶ ماهه و از خرداد ۱۴۰۰ تا آبان ۱۴۰۱ به مدت ۱۹۵ ساعت در مجموع (۶۵ نوبت سه ساعته) تحت آزمایش قرار گرفت. فاصله بین اعمال نوبت‌ها برای هر تیمار (ترکیب شوری و فشار) به‌طور متوسط شش روز بود. برای جلوگیری از گرفتگی قطره‌چکان‌ها از یک فیلتر دیسکی با مش ۱۳۰ میکرون استفاده گردید و این فیلتر قبل از هر مرتبه شروع به کار سیستم کاملاً شستشو گردید. لازم به ذکر است که انتخاب این مش با توجه به اطلاعات ارائه شده توسط سازندگان قطره‌چکان‌ها انجام‌شده است. با توجه به این‌که مخازن آب سرپوشیده بود و قبل از شروع به کار پمپ آب درون آن‌ها کاملاً در حالت سکون قرار داشت بنابراین ذرات ریز و معلق کاملاً در مخازن ته‌نشین شده بود و با توجه به شوری آب و همچنین پوشیدگی مخازن پلی‌اتیلن عملاً رشد جلبک و سایر عوامل زیستی منجر به انسداد نیز در سیستم وجود نداشت. بررسی مخازن در پایان آزمایش‌ها نیز تائید کننده این مطلب بود؛ بنابراین فیلتر شن و هیدروسیکلون حذف گردید و با توجه به ظرفیت خروجی مد نظر (حداکثر آبدهی مورد نیاز برای کارکرد یک یا چند لاترال بطور هم‌زمان) تنها فیلتر دیسکی انتخاب و نصب شد. به‌منظور کنترل شوری، هر شش روز یک‌بار کسری آب مخازن جبران و شوری با کمک EC متر تنظیم گردید. برای بررسی اثر این تیمارها، آبدهی قطره‌چکان‌های هر نشان تجاری در فواصل تقریباً یک‌ماهه و پس از هر چهار نوبت آبیاری، اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری آبدهی قطره‌چکان‌ها، از یک زمان‌سنج و استوانه مدرج ۵۰ میلی‌لیتری استفاده گردید و در انتها میانگین آبدهی شش قطره‌چکان موجود برای هر تیمار مورد مقایسه قرار گرفت. همچنین، کنترل و تنظیم فشار در ابتدا و انتهای لترال‌ها به‌وسیله نصب فشارسنج‌های روغنی چهار بار انجام گردید.



شکل ۱- نمای کلی طرح پایلوت ارزیابی اثرات فشار و شوری بر روی کارکرد قطره‌چکان‌های تنظیم‌کننده فشار

بر اساس استاندارد جهانی ISO 9261 و به‌منظور پذیرش عملکرد یک قطره‌چکان هم‌زمان می‌بایست دو شرط اساسی زیر تأمین شود.

قدر مطلق میانگین آبدهی قطره‌چکان‌ها در نمونه‌های مورد بررسی نباید بیشتر از هفت درصد از دبی اسمی قطره‌چکان انحراف داشته باشد. این شرط تحت عنوان Q_n-D در این بررسی نام‌گذاری شده است.

$$Q_n\text{-}D = ABS\ (Q_{avg} - Q_{nominal}) \quad (۱)$$

که در این معادله، Q_{avg} و $Q_{nominal}$ به ترتیب نشان‌دهنده میانگین آبدهی اندازه‌گیری شده و آبدهی اسمی ارائه‌شده توسط سازنده می‌باشند.

میزان ضریب تغییرات آبدهی ساخت (CV) در نمونه‌های مورد بررسی کمتر از هفت درصد باشد.

$$CV=\sigma/ Q_{avg} \quad (۲)$$

در این معادله، Q_{avg} و σ به ترتیب میانگین و انحراف معیار دبی‌های اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهند؛ بنابراین در پژوهش حاضر این دو معیار به‌منظور مقایسه قطره‌چکان‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفت.

یافته‌ها و بحث

بررسی معیارهای استاندارد ISO 9261 در قطره‌چکان‌های نو

به‌منظور بررسی این معیارها دسترسی به اطلاعات ارائه‌شده توسط سازندگان ضروری است. در رابطه با قطره‌چکان‌های نتافیم، سازندگان معتقدند که آبدهی در بازه فشار کارکرد ۰/۵ تا ۴ بار برای هر دو نمونه ۸ و ۲۵ لیتر در ساعت کاملاً ثابت بوده و تغییر نخواهد کرد. برای نمونه‌های یورودریپ، بررسی اطلاعات سازنده نشان می‌دهد که با تغییرات فشار مقادیر اندکی تغییر در آبدهی وجود دارد و آبدهی اسمی برای نمونه هشت لیتر در ساعت در فشارهای ۰/۵، ۱/۵ و ۰۲/۵ بار به ترتیب برابر با ۷/۸۵، ۸/۱۵ و ۸/۲۵ لیتر در ساعت و برای نمونه ۲۴ لیتر در ساعت، به ترتیب برابر با ۲۴/۸، ۲۶ و ۲۶/۵ لیتر در ساعت است. همچنین اطلاعات ارائه‌شده برای نمونه‌های ایرانی پرسی زالوان در دو آبدهی ۸ و ۲۴ لیتر در ساعت به ترتیب نشان‌دهنده آبدهی اسمی ۷/۶۷، ۸/۱۵ و ۸/۲ لیتر در ساعت و ۲۳/۱، ۲۴/۱ و ۲۵/۴۵ لیتر در ساعت در فشارهای ۰/۵، ۱/۵ و ۲/۵ بار بود. بر این اساس، نتایج مربوط به ارزیابی قطره‌چکان‌ها در ابتدای پژوهش و مطابق با معیارهای استاندارد ISO 9261 در جدول ۲ ارائه شده است. با توجه به نتایج (جدول ۲)، قطره‌چکان‌های هشت لیتر در ساعت هر سه نشان تجاری (قطره‌چکان نو) در فشارهای ۰/۵، ۱/۵ و ۲/۵ بار و در هر دو شوری آب (۵ و ۱۲ دسی زیمنس بر متر) دارای ضریب تغییرات آبدهی کمتر از هفت درصد و واجد یکی از شرایط استاندارد بودند. در رابطه با مطابقت نتایج با استاندارد انحراف از میانگین آبدهی کمتر از هفت درصد (Qn-D)، نتایج برای قطره‌چکان‌های مختلف در فشارهای متفاوت یکسان نبود و نمونه‌های پرسی زالوان در هر سه فشار کارکرد در محدوده استاندارد و دارای انحراف از آبدهی اسمی کمتر از هفت درصد بودند. همچنین نشان تجاری یورودریپ دارای آبدهی اسمی کمتر از مقادیر ارائه‌شده توسط سازنده بود و انحراف از آبدهی ۱۰ تا ۱۵ درصدی را در فشارهای مختلف نشان داد. در تطابق با این نتایج، پروینی و معروف پور (۱۳۹۲) نشان دادند که این نوع قطره‌چکان دارای خطای دبی بیش از ۲۰ درصدی است. قطره‌چکان‌های نتافیم در فشار کارکرد ۱/۵ بار دارای آبدهی اسمی منطبق بر استاندارد و ارائه شده توسط سازنده بودند اما در فشارهای ۰/۵ و ۲/۵ بار آبدهی کمتر از مقادیر اسمی ارائه‌شده را نشان دادند به‌طوری‌که در فشار ۰/۵ بار این آبدهی تا ۱۰ درصد و در فشار ۲/۵ بار به بیش از ۲۵ درصد کاهش یافت. در مطالعات ابراهیمی و همکاران (۱۳۹۴) میزان انحراف از آبدهی اسمی برای قطره‌چکان نتافیم هشت لیتر در ساعت حدود ۱۳ درصد ذکر شده است که به‌نوعی مطابقت با این نتایج را نشان می‌دهد. همچنین نتایجی مشابه با پژوهش حاضر برای نتافیم هشت لیتر در ساعت در ساعت توسط زمانی و همکاران (۱۳۹۳) گزارش شده است. در پژوهش مذکور و در فشارهای ۰/۵ و ۲/۵ بار، بالاترین انحراف از آبدهی اسمی (حدود ۳۰ درصد) مشاهده گردید، درحالی‌که در فشار ۱/۵ بار نتایج

نشان‌دهنده انطباق با اطلاعات سازنده بود. همچنین بررسی معیارها نشان داد (جدول ۲) که قطره‌چکان‌های ۲۴ لیتر در ساعت عمدتاً در فشار ۲/۵ بار مطابق با اطلاعات ارائه‌شده توسط سازنده عمل می‌کنند اما در فشارهای پایین‌تر نتایج متفاوتی را نشان می‌دهند به‌گونه‌ای که در فشار ۰/۵ بار، نشان‌های تجاری پرسی زالوان، یورودریپ و نتافیم به ترتیب دارای ۸، ۱۲ و ۱۸ درصد آبدهی میانگین کمتر و در فشار ۱/۵ بار نیز نشان‌های تجاری یورودریپ و پرسی زالوان دارای ۱۳ و ۲۱ درصد آبدهی میانگین بیشتر نسبت به ادعای سازنده بودند.

جدول ۲- ارزیابی فنی قطره‌چکان‌های مورد بررسی در شرایط مختلف و قبل از شروع آزمایش‌ها

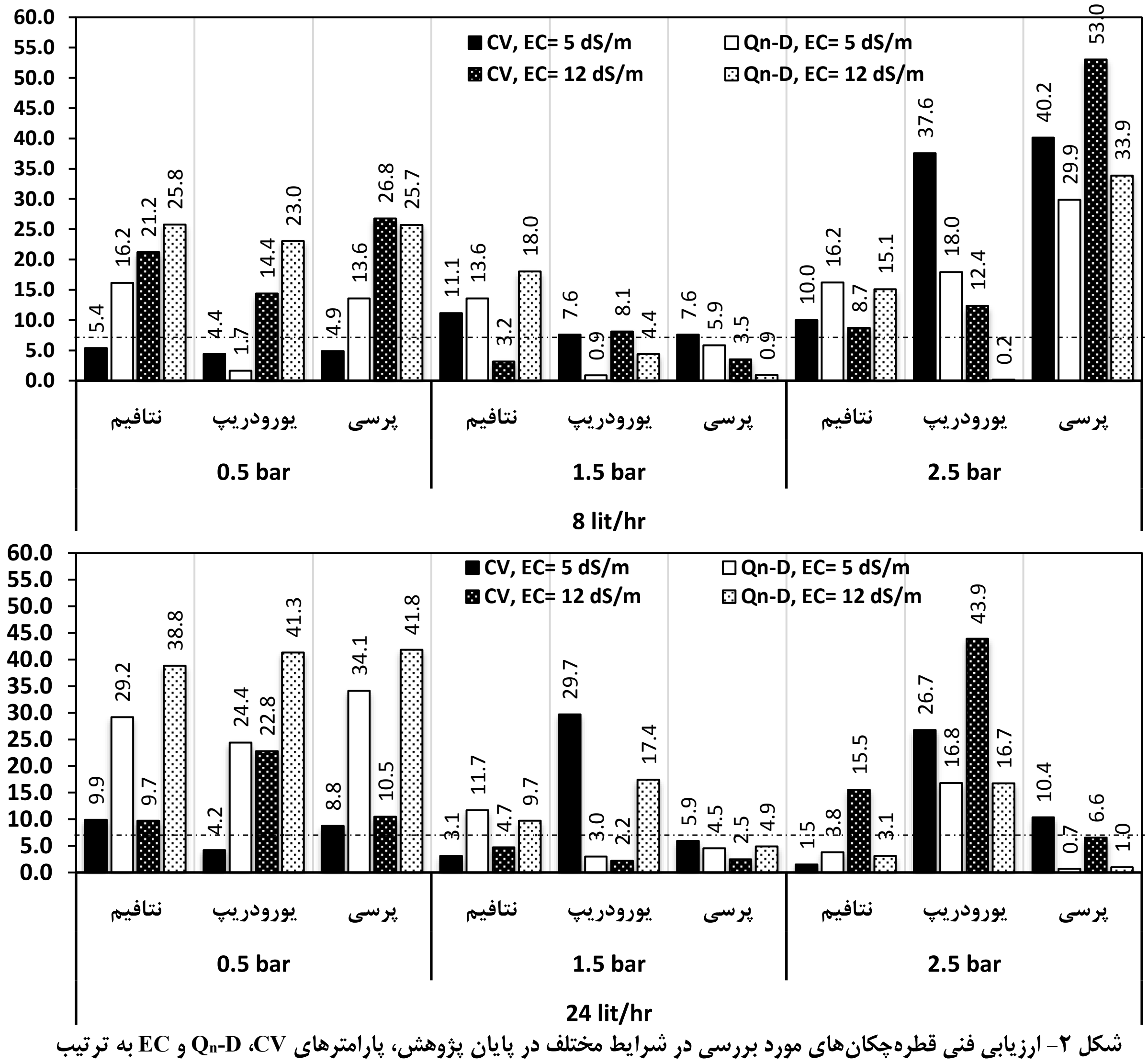
نشان تجاری	دبی اسمی	فشار	EC= 12 dS m^{-1}			*EC= 5 dS m^{-1}		
			Q_{avg}	CV	Q_n-D	Q_{avg}	CV	Q_n-D
یورودریپ	7.85	0.5	6.95	5.73	11.41	7.20	2.88	8.33
زالوان	7.67	0.5	7.95	4.56	3.65	8.48	2.84	10.56
نتافیم	8.00	0.5	7.03	4.16	12.16	7.19	4.79	10.16
یورودریپ	8.15	1.5	6.95	3.56	14.75	6.93	1.86	14.94
زالوان	8.15	1.5	8.21	4.04	0.72	7.99	5.95	1.94
نتافیم	8.00	1.5	7.78	4.63	2.70	7.78	5.45	2.72
یورودریپ	8.25	2.5	7.14	3.20	13.41	7.30	5.46	11.47
زالوان	8.20	2.5	8.08	5.13	1.41	7.99	3.32	1.90
نتافیم	8.00	2.5	5.79	6.00	27.59	6.22	4.72	22.23
یورودریپ	24.8	0.5	21.32	5.19	14.02	22.34	4.66	9.93
زالوان	23.1	0.5	21.18	4.41	8.31	21.23	2.75	8.11
نتافیم	25.0	0.5	20.45	3.33	18.19	20.45	5.54	18.19
یورودریپ	26.0	1.5	29.41	5.00	13.11	29.42	2.29	13.15
زالوان	24.1	1.5	29.17	3.55	21.05	29.18	2.58	21.07
نتافیم	25.0	1.5	26.05	2.60	4.21	26.05	3.82	4.21
یورودریپ	26.5	2.5	28.39	۴/۲۸	7.15	28.21	2.30	6.45
زالوان	25.5	2.5	26.57	۴/۱۵	4.19	28.54	2.84	11.92
نتافیم	25.0	2.5	24.65	۳/۲۷	1.39	25.03	4.54	0.14

* پارامترهای CV، Q_{avg}، Q_n-D و EC به ترتیب نشان‌دهنده ضریب تغییرات ساخت، آبدهی میانگین اندازه‌گیری شده، قدر مطلق انحراف آبدهی میانگین نسبت به آبدهی اسمی و شوری آب می‌باشند. آبدهی‌ها بر حسب لیتر در ساعت و فشار بر حسب بار است

اثرات تغییر فشار کارکرد و شوری بر معیارهای استاندارد ISO 9261 در انتهای آزمایش‌ها

به‌طورکلی افزایش فشار کارکرد مداوم در طول انجام آزمایش‌ها از ۰/۵ تا ۲/۵ بار و افزایش شوری از ۵ به ۱۲ دسی زیمنس بر متر منجر به افزایش و یا عدم تغییر ضریب تغییرات آبدهی در قطره‌چکان‌های مختلف گردید (شکل ۲). در رابطه با انحراف از آبدهی اسمی نیز الگوی مشخص کاهشی یا افزایشی مشاهده نگردید. در شوری ۵ دسی زیمنس بر متر، ضریب تغییرات آبدهی برای همه قطره‌چکان‌ها با آبدهی هشت لیتر در ساعت و در فشارهای ۰/۵ و ۱/۵ بار حدود هفت درصد بود و نشان‌دهنده تغییرات ناچیز در تفاوت بین آن‌ها بود. علاوه بر این، میزان انحراف از آبدهی اسمی در نشان تجاری یورودریپ در فشارهای ۱/۵ و ۰/۵ بار و در نمونه‌های نتافیم در فشار ۰/۵ بار حدود ۱۴ درصد افزایش یافت و منجر به ثبت آبدهی کمتری نسبت به دبی اسمی گردید. در فشار ۲/۵ بار اما مقادیر CV و Qn-D برای هر سه نشان تجاری همراه با افزایش بود و نشان‌دهنده اثر منفی فشار ۲/۵ بار بر آبدهی قطره‌چکان‌ها بود. این تأثیر در نمونه‌های نتافیم شدیدتر و به ترتیب ۴۰ و ۳۰ درصد برای CV و Qn-D بود. در آبدهی‌های بالاتر (۲۴ و ۲۵ لیتر در ساعت) و فشار ۰/۵ بار، هر سه نوع قطره‌چکان دچار کاهش آبدهی شده و در نتیجه انحراف از آبدهی اسمی و ضریب تغییرات با افزایش همراه شدند. هر چند که تنها در نمونه پرسی زالوان ضریب تغییرات علیرغم

این کاهش آبدهی همچنان کمتر از هفت درصد بود. برای آبدهی‌های مذکور و در فشار ۱/۵ بار، CV نمونه‌های پرسی زالوان بسیار بالا و مقادیر مربوط به دو نمونه نتافیم و یورودریپ همچنان در محدوده استاندارد بودند. دلیل افزایش شدت تغییرات در نمونه‌های پرسی زالوان گرفتگی دو عدد از قطره‌چکان‌ها بود که آبدهی تقریباً نصف سایر نمونه‌های مشابه را داشتند. در فشار ۲/۵ بار، نمونه‌های یورودریپ دارای بهترین عملکرد بودند و همچنان معیارهای استاندارد را حفظ کرده اما نمونه‌های نتافیم علیرغم عدم انحراف از آبدهی اسمی دارای ضریب تغییرات ۱۰ درصدی بودند. نمونه‌های پرسی زالوان دارای ضعیف‌ترین عملکرد در این فشار بوده و هر دو معیار استاندارد را تا مقادیر قابل توجهی افزایش داده و مقادیر CV حدود ۲۳ درصدی و Qn-D تقریباً ۱۷ درصدی را نشان دادند. اثر شوری ۱۲ دسی زیمنس بر متر بر تمامی نشان‌های تجاری نسبت به شوری پنج دسی زیمنس بر متر متفاوت بود و در فشار ۰/۵ بار و برای تمامی آبدهی‌ها، مقادیر ضریب تغییرات و انحراف از آبدهی اسمی خارج از محدوده استاندارد و بالاتر از هفت درصد قرار گرفت. دو نشان تجاری پرسی زالوان و نتافیم با آبدهی هشت لیتر در ساعت دارای تطابق با معیارهای استاندارد در فشار ۱/۵ بار بودند در حالیکه نمونه‌های یورودریپ علیرغم کاهش آبدهی ۱۷ درصدی همچنان دارای ضریب تغییرات کمتر از هفت درصد بودند.



شکل ۲- ارزیابی فنی قطره‌چکان‌های مورد بررسی در شرایط مختلف در پایان پژوهش، پارامترهای Q_n-D ،CV و EC به ترتیب نشان‌دهنده ضریب تغییرات، قدر مطلق انحراف آبدهی میانگین نسبت به آبدهی اسمی و شوری آب می‌باشند. آبدهی‌ها بر حسب لیتر در ساعت و فشار بر حسب بار است

علاوه بر این، نتایج نشان داد که افزایش فشار تا ۲/۵ بار منجر به افزایش ضریب تغییرات در هر سه نشان تجاری هشت لیتر در ساعت می‌گردد و این افزایش در نمونه نتافیم به دلیل ایجاد گرفتگی بسیار شدیدتر بود. کاربرد فشار ۱/۵ بار در هر سه نمونه با آبدهی بالا (۲۴ و ۲۵ لیتر در ساعت) باعث نقض معیارهای استاندارد نگردید و عملکرد هر سه نمونه در این فشار در مقایسه با شروع پژوهش بدون تغییر قابل توجه بود. در فشار ۲/۵ بار اما تنها نمونه نتافیم عملکرد موفق و بدون تغییری را نشان داد و نمونه‌های پرسی زالوان و یورودریپ با افزایش ضریب تغییرات همراه شدند که این افزایش در نمونه‌های پرسی زالوان شدیدتر بود. به‌طورکلی مقایسه نتایج ارزیابی‌ها قبل (قطره‌چکان نو) و بعد از انجام آزمایش‌ها (کارکرد مداوم با فشار و شوری‌های مختلف) نشان داد که تغییرات مشاهده‌شده به دلایل گوناگون شکل گرفته و احتمالاً برخی در اثر تغییر فشار، برخی به دلیل شوری آب و برخی نیز جزو ذات قطره‌چکان بوده است. در نمونه‌های نو یورودریپ هشت لیتر در ساعت، در فشارهای مختلف کاهش آبدهی نسبت به مقادیر اسمی ارائه‌شده توسط سازنده مشاهده گردید و بنابراین این نتایج جزو ذات آن‌ها است. در واقع نتایج نشان داد که نمونه‌های یورودریپ نو دارای آبدهی اسمی تا ۱۵ درصد کمتر از مقادیر ادعایی در فشارهای مختلف می‌باشند. این موضوع البته برای نمونه‌های با آبدهی ۲۴ لیتر در ساعت این نشان تجاری نیز در فشارهای ۰/۵ و ۱/۵ بار صادق بود، اما در فشار ۲/۵ بار انطباق بین اطلاعات ارائه شده توسط سازنده و مقادیر مشاهده شده وجود داشت. اثرگذار بودن فشار کارکرد بر آبدهی از همان ابتدا و در نمونه‌های نو برای هر سه نشان تجاری ۲۴ لیتر در ساعت و در فشار ۰/۵ بار مشاهده شد، جایی که کاهش آبدهی به دلیل فشار پایین قابل توجه بود؛ اما نکته جالب اثر افزایش فشار به میزان ۲/۵ بار بر کاهش آبدهی در برخی نمونه‌های نو بود، جایی که نتافیم هشت لیتر در ساعت به شدت با کاهش آبدهی در این فشار روبرو گردید. برخلاف این نتایج اما نمونه‌های نو یورودریپ و پرسی زالوان ۲۴ لیتر در ساعت با افزایش آبدهی در فشار ۱/۵ بار روبرو بودند. همان‌طور که مشاهده می‌شود در تغییرات ذکر شده به دلیل شروع آزمایش‌ها و نو بودن همه نمونه‌ها اثری از شوری وجود ندارد. هر چند که بخشی از تغییرات اتفاق افتاده در پایان پژوهش می‌تواند به دلیل وجود شوری باشد. بررسی نتایج سایر پژوهش‌ها نشان می دهد که موضوع عدم تطابق نتایج در قطره‌چکان‌های تنظیم کننده فشار (قطره‌چکان نو) با اطلاعات سازندگان موضوعی جدید نیست و ابتدا در مطالعات فراستی و همکاران (۱۳۸۹) و در ادامه توسط هزارجریبی و همکاران (۱۳۹۲)، زمانی و همکاران (۱۳۹۳)، ابراهیمی و همکاران (۱۳۹۴) و زمانی و فتاحی (۱۳۹۸) گزارش گردیده است. هر چند که بررسی هم‌زمان اثر شوری و تغییر فشار کارکرد در پژوهش سیلوا و همکاران (۲۰۱۶) نشان داد که کاربرد شوری تا ۴/۵ دسی زیمنس بر متر در برخی قطره‌چکان‌های تنظیم‌کننده فشار و تحت فشارهای ۰/۶ تا ۱/۶ بار منجر به تغییرات آبدهی اندک در محدوده هفت درصد و مطابق با مقادیر توصیه‌شده توسط سازنده می‌شود.

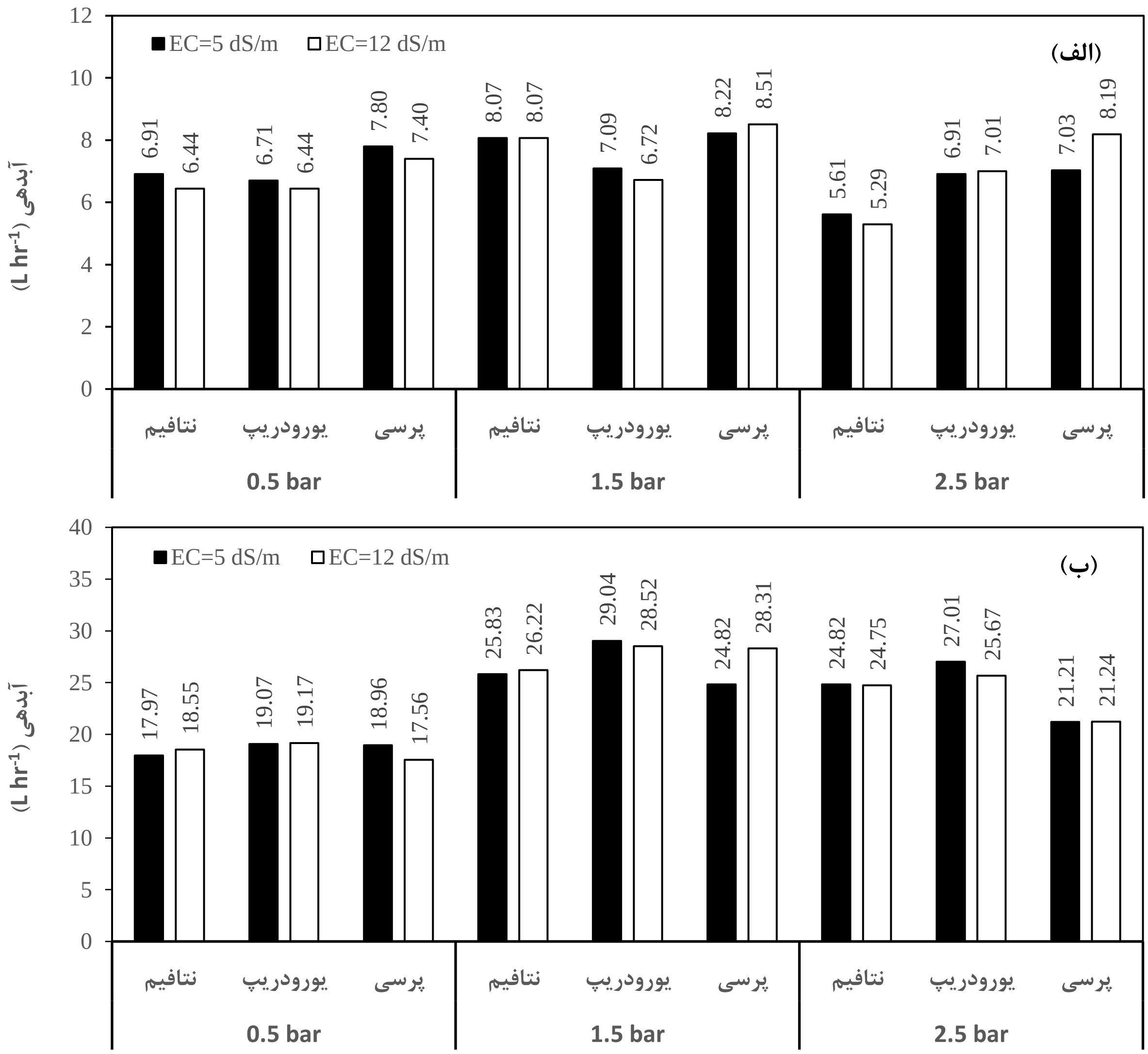
اثرات تغییر فشار کارکرد و شوری بر روی تغییرات آبدهی قطره‌چکان‌ها

اثرات تغییر شوری بر آبدهی قطره‌چکان‌ها

نتایج حاصل از تأثیر شوری‌های مختلف در فشارهای متفاوت بر روی میانگین آبدهی قطره‌چکان‌های مختلف در مدت‌زمان انجام آزمایش‌ها در شکل ۳ الف و ب نشان داده شده است. بر این اساس، افزایش شوری از ۵ به ۱۲ دسی زیمنس بر متر منجر به کاهش اندک آبدهی در تمامی نمونه‌های هشت لیتر در ساعت و در شرایط کاربرد فشار ۰/۵ بار گردید. بااین‌حال، در فشارهای کارکرد بالاتر تغییرات کاهشی یا افزایشی آبدهی میانگین در اثر استفاده از آب شور در نمونه‌های مختلف متفاوت بود. بر این اساس، در فشار ۱/۵ بار نمونه یورودریپ دچار کاهش، نتافیم بدون تغییر و پرسی زالوان با افزایش آبدهی همراه بود. در فشار ۲/۵ بار نیز رفتار متفاوتی دیده شد به‌گونه‌ای

که نتافیم دارای کاهش و یورودریپ و پرسی زالوان دارای اندکی افزایش در آبدهی بودند (شکل ۳ الف). همچنین نتایج متفاوتی برای آبدهی‌های ۲۴ لیتر در ساعت و در هر سه نشان تجاری مشاهده شد. در فشار ۰/۵ بار، آبدهی در پرسی زالوان کاهش و در نتافیم و یورودریپ اندکی افزایش یافت. علاوه بر این و در فشار ۱/۵ بار، یورودریپ با افزایش شوری به ۱۲ دسی زیمنس بر متر، کاهش آبدهی و پرسی زالوان و نتافیم افزایش اندک آبدهی را نشان دادند. همچنین در فشار ۲/۵ بار، یورودریپ دارای کاهش آبدهی نسبت به شوری پنج دسی زیمنس بر متر و پرسی زالوان و نتافیم بدون تغییر بودند (شکل ۳ ب).

به‌طورکلی نتایج نشان‌دهنده عدم وقوع گرفتگی معنی‌دار و قابل توجه در اثر تغییر شوری در قطره‌چکان‌های مختلف و در شرایط کاربرد فشارهای متفاوت بود. بر خلاف انتظار، این نتیجه با نتایج تجزیه شیمیایی آب و مثبت بودن شاخص LSI که منجر به رسوب کربنات‌ها و در نتیجه گرفتگی و کاهش آبدهی می‌گردد، مطابقت نداشت. دلیل این امر را می‌توان تا حدودی به مواردی مانند تعداد ساعات کارکرد پایین سامانه و همچنین طول کم لاترال ها نسبت داد. در واقع علیرغم تلاش برای شبیه‌سازی شرایط نزدیک به واقعیت، احتمال این‌که در استفاده طولانی‌مدت از قطره‌چکان‌ها با این نوع آب دچار کاهش قابل‌توجه آبدهی به دلیل رسوب کربنات‌ها شویم وجود دارد. همچنین در عمل و در مزرعه معمولاً طول لاترال‌ها بیش از چند ده متر بوده و آب موجود در آن‌ها با افزایش دما مواجه شده و در نتیجه سرعت رسوب کربنات افزایش می‌یابد که در این پژوهش به دلیل طول کم (۳/۵ متر) این اتفاق رخ نداده است. ابراهیمی و همکاران (۱۳۹۴) نشان دادند که کاربرد شوری حدود ۱۲ دسی زیمنس بر متر به مدت شش ماه هیچ‌گونه تأثیری بر تشکیل رسوب و ایجاد انسداد در چهار نوع قطره‌چکان تنظیم‌کننده فشار مورد بررسی نداشته است. علاوه بر این، عدم گرفتگی و کاهش اندک آبدهی (دو درصد) برای تنها قطره‌چکان تنظیم‌کننده فشار مورد بررسی توسط فرزام نیا و حقایقی مقدم (۱۳۸۸) در شرایط کاربرد آب با شوری هشت دسی زیمنس بر متر نیز با نتایج این پژوهش مطابقت داشت. همچنین کیانی و همکاران (۱۳۹۴) نشان دادند که تغییر شوری آب آبیاری از ۰/۶ به ۱۴ دسی زیمنس بر متر تنها منجر به کاهش آبدهی حدود چهار درصدی نتافیم چهار لیتر در ساعت می‌گردد که این مقدار کاهش در محدوده استانداردهای توصیه‌شده است. بر خلاف نتیجه‌گیری کلی این پژوهش، لی لی و همکاران (۲۰۲۱) نشان دادند که کاربرد آب با شوری بالاتر از چهار دسی زیمنس بر متر منجر به کاهش شدید یکنواختی و آبدهی در قطره‌چکان‌ها می‌گردد. نکته قابل توجه در رابطه با نتایج این پژوهشگران قطره‌چکان‌های مورد استفاده از نوع لوله‌های تیپ است که دارای آبدهی ۱/۲ لیتر در ساعت است و قابل مقایسه با قطره‌چکان‌های تنظیم‌کننده فشار نمی‌باشند. همچنین، برخی گزارش‌ها نشان می‌دهد که کاربرد آب تا شوری شش دسی زیمنس بر متر منجر به تغییر پارامترهای گرفتگی مانند تغییر نسبت دبی و ضریب یکنواختی در قطره‌چکان‌های تنظیم‌کننده فشار می‌گردد (ترکی و همکاران، ۲۰۲۰؛ الامین و همکاران، ۲۰۲۰). اگر چه در مورد نمونه‌های هشت لیتر در ساعت نتافیم و یورودریپ و درصورتی‌که نتایج مربوط به هر سه فشار را میانگین‌گیری نماییم نشان‌دهنده اثر افزایش شوری بر کاهش آبدهی است، به‌گونه‌ای که این میزان کاهش در نمونه نتافیم ۳/۸ درصد و در یورودریپ نیز ۲/۶ درصد بود. در تطابق با نتایج این پژوهش، پیروزفر و همکاران (۱۳۹۳) نتایج مشابهی را برای قطره‌چکان‌های چهار لیتر در ساعت نتافیم و یورودریپ گزارش کرده و بیان کردند که با افزایش شوری از سه به پنج دسی زیمنس بر متر، میزان گرفتگی این قطره‌چکان‌ها با افزایش حدود دو درصدی روبرو می شود. علاوه بر این، قدمی فیروزآبادی و همکاران (۱۳۹۷)، کاهش آبدهی حدود پنج درصدی را برای نتافیم چهار لیتر در ساعت در اثر تغییر شوری آب آبیاری از ۵ به ۱۰ دسی زیمنس بر متر گزارش کردند.



شکل ۳- میانگین آبدهی در قطره‌چکان‌های مختلف (الف: هشت لیتر در ساعت و ب: ۲۴ لیتر در ساعت) تحت فشارها و شوری‌های مختلف پس از پایان آزمایش‌ها

بررسی دقیق‌تر اثر شوری بر روی قطره‌چکان‌ها از طریق تخریب برخی از نمونه‌ها و مقایسه میزان رسوب تشکیل‌شده بر روی آن‌ها تا حدودی امکان‌پذیر است. بدین منظور نتایج حاصل از این بررسی در شکل ۴ ارائه شده است. بر این اساس، مشاهده می‌شود که در نمونه‌های هشت لیتر در ساعت و در شرایط کاربرد فشار ۰/۵ بار، شوری بالاتر (تصاویر سمت چپ) منجر به میزان بالاتری از رسوب ذرات جامد در مجرای عبور آب نسبت به کاربرد شوری پایین‌تر (تصاویر سمت راست) گردیده است. هر چند که این میزان رسوب بیشتر ذرات منجر به تغییر آبدهی محسوسی حداقل در بازه زمانی انجام این آزمایش‌ها نشده است. علاوه بر این، نتایج مشابهی برای نمونه‌های ۲۴ لیتر در ساعت نیز به دست آمد. در این مورد نیز تفاوت بین میزان رسوب مواد جامد در مجرای عبور آب در شوری ۱۲ دسی زیمنس بر متر (تصاویر سمت چپ) با شوری پنج دسی زیمنس بر متر (تصاویر سمت راست) قابل مشاهده بود.

شکل ۴- مقایسه وضعیت رسوب ذرات جامد در مجرای عبور آب در قطره‌چکان‌های ۸ (بالا) و ۲۴ (پایین) لیتر در ساعت به ترتیب در شرایط کاربرد شوری‌های ۵ (سمت راست) و ۱۲ (سمت چپ) دسی زیمنس بر متر. الف: نتافیم، ب: یورودریپ و ج: پرسی زالوان

اثرات تغییر فشار بر آبدهی قطره‌چکان‌ها

قطره‌چکان‌های نتافیم

بر اساس نتایج، در شرایط کاربرد آب شور ۱۲ و ۵ دسی زیمنس بر متر و در قطره‌چکان‌های هشت لیتر در ساعت، کاربرد فشارهای ۰/۵ و ۲/۵ بار منجر به تغییرات آبدهی در پایان آزمایش‌ها گردید و میانگین آبدهی در مقایسه با آبدهی در ابتدای آزمایش‌ها به ترتیب حدود ۶/۲ و ۱۰ درصد کاهش یافت (جدول ۲ و شکل ۳ الف). بررسی

نمونه‌های تخریب‌شده در انتهای آزمایش تا حدودی می‌تواند این تغییرات آبدهی را توجیه نماید. شکل ۵ مقاطعی از مجرای عبور جریان در این نوع قطره‌چکان و در فشارهای مختلف و شوری‌های متفاوت را نشان می‌دهد. با توجه به شکل به نظر می‌رسد که دلیل اصلی کاهش آبدهی وجود زائده‌ای اضافه در مجرای عبور آب بوده که در زمان قالب‌گیری باقی مانده است. این زائده در قطره‌چکان‌های تحت‌فشار کارکرد ۰/۵ و ۲/۵ بار دارای اندازه به‌مراتب بزرگ‌تری نسبت به فشار کارکرد ۱/۵ بار است؛ بنابراین منجر به کاهش آبدهی شده است. علاوه بر این، فشار کارکرد کم (۰/۵ بار) منجر به تجمع مواد جامد و ذرات ریز در مجرای عبور در پشت این زائده‌ها شده است و می‌توان دلیل کاهش ۶/۲ درصدی آبدهی را این دو مورد دانست.

12 dS/m-0.5bar | 12 dS/m-1.5bar | 12 dS/m-2.5 bar | 5 dS/m-0.5 bar | 5 dS/m-1.5bar | 5 dS/m-2.5bar

شکل ۵- تصاویری از مجرای جریان در قطره‌چکان‌های نتافیم هشت لیتر در ساعت که نشان‌دهنده وجود زائده‌ای اضافی در مسیر عبور آب است

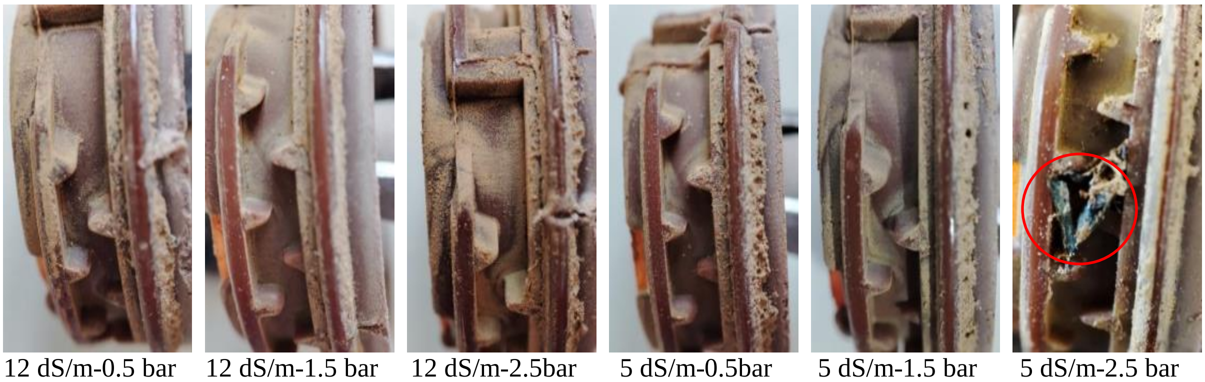
در فشار کارکرد ۱/۵ بار، به دلیل مناسب بودن فشار و کوچک‌تر بودن زائده‌ها، تجمع ذرات اتفاق نیفتاده و آبدهی تحت تأثیر قرار نگرفته است. اگرچه باید توجه کرد که کوچک‌تر بودن زائده‌ها در تعدادی از قطره‌چکان‌های تخریب‌شده تحت این فشار کاملاً تصادفی بوده و این احتمال وجود داشت که در صورت تخریب تمامی نمونه‌های مورد بررسی تحت فشار ۱/۵ بار، زائده نیز مشاهده شود؛ بنابراین ممکن است در صورت قرارگیری نمونه‌هایی با زائده‌های بزرگ‌تر تحت این فشار، با کاهش آبدهی روبرو شویم. از طرفی ممکن است در دو فشار ۰/۵ و ۲/۵ بار نیز در صورت تخریب همه نمونه‌های مورد بررسی، قطره‌چکان‌هایی با زائده‌های بسیار کوچک نیز مشاهده شود. بااین‌حال و به‌طورکلی، وجود این زائده‌ها به‌طورکلی نکته منفی برای نتافیم هشت لیتر در ساعت و منجر به کاهش آبدهی شده است. علیرغم پذیرش این دلایل برای کاهش آبدهی، همچنان باید به دنبال کاهش مضاعف آبدهی در فشار کارکرد ۲/۵ بار باشیم (شکل ۳ الف). با توجه به نتایج، علت اصلی این کاهش مضاعف، چسبیدگی دیافراگم‌های سیلیکونی به مجرای ورود آب در اثر فشار بالا به دلیل احتمالی کیفیت نامناسب و غیراستاندارد دیافراگم و همچنین ورود حشرات به داخل مجرای قطره‌چکان از سمت خروجی است. شکل ۶ تصاویر گرفته‌شده از دیافراگم نمونه‌های تحت آزمایش در این فشار را نشان می‌دهد که ثابت‌کننده این موضوع است. علاوه بر این، در این نوع قطره‌چکان به دلیل نداشتن کلاهک روی مجرای خروجی ورود حشرات از مجرای خروجی و محبوس شدن آن‌ها درون ساختار اتفاق افتاده است و در نهایت منجر به کاهش قابل توجه آبدهی شده است.

شکل ۶- تصاویری از چسبیدگی دیافراگم در قطره‌چکان‌های نتافیم هشت لیتر در ساعت و ورود حشرات از مجرای خروجی که منجر به انسداد مسیر عبور آب شده‌اند

در رابطه با قطره‌چکان‌های نتافیم ۲۵ لیتر در ساعت و با توجه به ساختار کاملاً متفاوت آن‌ها با نمونه هشت لیتر در ساعت، افزایش فشار به مقادیر ۱/۵ و ۲/۵ بار منجر به تغییرات آبدهی نگردید و پس از انجام آزمایش‌ها آبدهی در هر دو شوری مطابق با اطلاعات ارائه‌شده توسط سازنده بود (شکل ۳ ب). در فشار ۰/۵ بار اما برخلاف ادعای سازنده، این نوع قطره‌چکان با کاهش میانگین آبدهی حدود ۱۸ درصدی روبرو گردید (جدول ۲) که این کاهش در انتهای آزمایش‌ها بیشتر بود و تا ۲۷ درصد نیز رسید؛ بنابراین به نظر می‌رسد که حداقل فشار کارکرد برای این مدل مقادیری بالاتر از ۰/۵ بار باشد. در رابطه با اثر بلند مدت کاربرد آب شور، نتایج مربوط به فشار کارکردهای ۱/۵ و ۲/۵ بار نشان داد که کاربرد هر دو شوری ۵ و ۱۲ دسی زیمنس منجر به کاهش آبدهی نمی‌گردد؛ اما درصورتی‌که فشار کارکرد به ۰/۵ بار کاهش یابد، مقادیر میانگین کاهش آبدهی در شوری ۱۲ و پنج دسی زیمنس بر متر به ترتیب برابر با ۲۵/۸ و ۲۸/۱ درصد خواهد بود (شکل ۳ ب). لازم به ذکر است که این مقدار کاهش نسبت به آبدهی اسمی است و با توجه به این‌که قطره‌چکان‌های نو نیز در ابتدا دارای کاهش آبدهی بوده‌اند، مقدار واقعی این کاهش در اثر شوری‌های مذکور به ترتیب ۹,۳ و ۱۲,۱ درصد است (جدول ۲ و شکل ۳ ب).

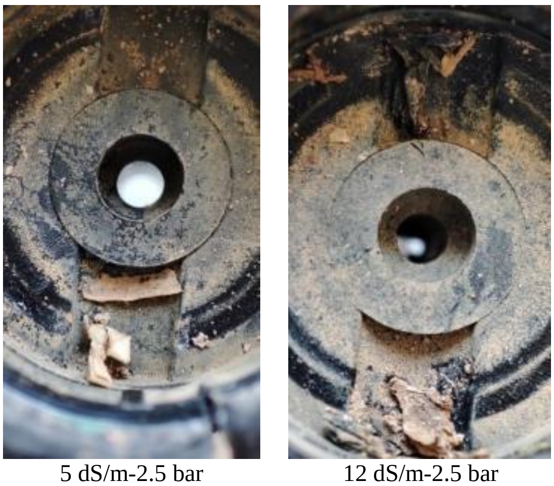
قطره‌چکان‌های یورودریپ

با توجه به رفتار تقریباً مشابه نمونه‌های هشت لیتر در ساعت در فشارها و شوری‌های مختلف، به نظر می‌رسد که کاهش آبدهی به‌مرور زمان در این نوع اگر چه اندک ولی در اثر استفاده بلندمدت از آب شور است. بر این اساس، کاربرد آب شور پنج دسی زیمنس بر متر منجر به کاهش میانگین آبدهی ۶/۸ و ۵/۳ درصدی به ترتیب در فشارهای ۰/۵ و ۲/۵ بار نسبت به ابتدای آزمایش‌ها (قطره‌چکان نو) و در اثر گذر زمان گردید (جدول ۲ و شکل ۳ الف). علاوه بر این، با کاربرد آب شور تر با شوری ۱۲ دسی زیمنس بر متر، مقادیر این کاهش‌ها در فشارهای ۰/۵، ۱/۵ و ۲/۵ بار به ترتیب برابر با ۷/۳، ۳/۳ و ۱/۸ درصد بود. لازم به ذکر است که بررسی تصاویر نمونه‌های تخریب‌شده اگرچه نشان‌دهنده علائم قابل توجه به‌منظور نتیجه‌گیری در رابطه با اثرات فشار و شوری بر کاهش آبدهی نبود اما نشان‌دهنده تجمع بیشتر ذرات در فشارهای بالاتر و ورود ذرات جامد بزرگ در فشار ۲/۵ بار به مجرای عبور آب در قطره‌چکان بود و علت کاهش آبدهی در این فشار این امر نیز است (شکل ۷).



شکل ۷- تصاویری از مجرای جریان در قطره‌چکان‌های یورودریپ هشت لیتر در ساعت در شرایط مختلف آزمایش‌ها

در قطره‌چکان‌های ۲۴ لیتر در ساعت به‌طور میانگین و برای هر دو شوری، میزان آبدهی تنها در فشار ۲/۵ بار در محدوده استاندارد و متناسب با آبدهی اسمی بود (جدول ۲). در فشار ۱/۵ بار، آبدهی میانگین حدود ۱۳ درصد بالاتر از مقادیر اسمی بود. به نظر می‌رسد که مقادیر آبدهی بدست آمده در نمونه‌های مذکور و در این فشار کارکرد آبدهی اسمی واقعی این نوع قطره‌چکان باشد و اعداد ارائه‌شده توسط سازنده نادرست باشد. نکته قابل توجه در این مورد ساخت این قطره‌چکان‌ها توسط شرکت‌های مختلف و تحت برند سازندگان اصلی است و ممکن است کیفیت ساخت و مشخصات سازندگان تحت برند با مشخصات ارائه‌شده توسط سازندگان نمونه‌های اصلی متفاوت باشد. به عبارتی ممکن است نمونه‌های مورد بررسی تقلبی و غیر اصل بوده باشند. هر چند که این نمونه‌ها از مجاری مورد تائید وزارت جهاد کشاورزی تهیه شده بود. همچنین در فشار کارکرد ۰/۵ بار، آبدهی میانگین در هر دو شوری در انتهای آزمایش‌ها نسبت به ابتدای آزمایش‌ها، با کاهش قابل توجه و حدود ۱۳ درصدی همراه بود (جدول ۲ و شکل ۳ ب). دلیل این تغییرات احتمالاً حساسیت بالای آبدهی این نوع در فشارهای پایین، عدم تأمین مناسب فشار و یا خطای احتمالی اندازه‌گیری فشار است که در طول انجام آزمایش‌ها احتمالاً افزایش یافته است. برای این نوع قطره‌چکان، بررسی نمونه‌های تخریب شده نشان داد که فشار بالا منجر به ورود قطعات جامد جدا شده از سطح داخلی لوله‌ها به درون قطره‌چکان شده و سبب کاهش آبدهی در برخی از قطره‌چکان‌ها و درنتیجه کاهش کلی آبدهی گردیده است (شکل ۸).



شکل ۸- تصاویری از مجرای ورود جریان در قطره‌چکان‌های یورودریپ ۲۴ لیتر در ساعت که نشان‌دهنده ورود اجساد جامد به ساختار درونی قطره‌چکان و در نتیجه کاهش آبدهی شده است

قطره‌چکان‌های پرسی زالوان

علیرغم عدم تفاوت قابل‌توجه آبدهی میانگین در فشارها و شوری‌های مختلف در ابتدای آزمایش‌ها، به نظر می‌رسد که آبدهی قطره‌چکان‌های پرسی زالوان هشت لیتر در ساعت در گذر زمان در برخی فشارها با کاهش همراه بوده است. در فشار کارکرد ۰/۵ بار و برای هر دو شوری، میزان کاهش آبدهی میانگین در پایان آزمایش‌ها در مقایسه با ابتدای آن حدود هفت درصد کاهش یافت (جدول ۲ و شکل ۳ الف). بررسی‌ها نشان داد که این کاهش آبدهی در یک یا دو عدد از قطره‌چکان‌ها رخ داده است؛ بنابراین نمونه‌ها تخریب و نتایج نشان داد که ورود اجسام خارجی به دلیل نوع مجرای ورود آب در این قطره‌چکان‌ها منجر به انسداد و در نتیجه کاهش آبدهی شده است (شکل ۹) لازم به ذکر است که این امر به دلیل مقادیر فشار کارکرد نبوده و می‌توانست در هر فشاری اتفاق بیفتد. بررسی نتایج در فشار کارکرد ۲/۵ بار و در شوری پنج دسی زیمنس بر متر نیز تائید کننده این مطلب است.

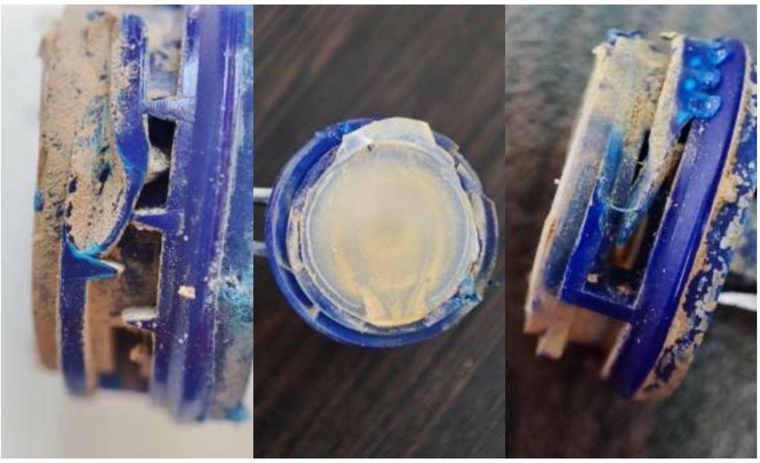
شکل ۹- شکل مجرای ورودی آب در قطره‌چکان پرسی زالوان هشت لیتر در ساعت و ورود اجسام خارجی و در نتیجه انسداد مجرای عبور آب در فشارهای ۰/۵ و ۲/۵ بار

در نمونه‌های ۲۴ لیتر در ساعت پرسی زالوان نیز مانند نمونه‌های هشت لیتر در ساعت، برای فشارهای مختلف و در هر شوری نتایج کمی با یکدیگر متفاوت بود. نتایج نشان داد که در فشار ۲/۵ بار، مقادیر آبدهی در ابتدای کار تقریباً با مقادیر توصیه‌شده توسط سازنده برابر بود اما کاربرد این فشار منجر به کاهش میانگین آبدهی به میزان تقریبی ۲۳ درصد در پایان آزمایش‌ها نسبت به ابتدای آن‌ها شد (شکل ۳ ب و جدول ۲). تأثیر فشار ۰/۵ بار بر آبدهی این نوع قطره‌چکان نیز شبیه اثرات فشار ۲/۵ بار بود به گونه‌ای که مقدار کاهش آبدهی در پایان آزمایش‌ها نسبت به ابتدای آن به ترتیب برابر با ۱۷/۱ و ۱۰/۶ درصد در شوری‌های ۱۲ و ۵ دسی زیمنس بر متر بود (شکل ۳ ب و جدول ۲). با کاربرد فشار ۱/۵ بار و در شوری ۱۲ دسی زیمنس بر متر مقادیر میانگین آبدهی در ابتدا و انتهای آزمایش‌ها تقریباً برابر بود اما در شوری پنج دسی زیمنس بر متر میانگین آبدهی در انتها حدود ۱۵ درصد کمتر از ابتدای آزمایش‌ها بود (شکل ۳ ب و جدول ۲). در واقع دو ماه پس از کاربرد فشارهای ۰/۵ و ۲/۵ بار به ناگاه آبدهی تعدادی از قطره‌چکان‌ها به‌طور قابل توجهی با کاهش همراه بود و در نتیجه میانگین کل را با کاهش همراه کرد. بررسی نمونه‌های تخریب‌شده این قطره‌چکان‌ها نشان داد که دلیل این کاهش ناگهانی آبدهی ورود ذرات جامد درشت به

درون قطره‌چکان‌ها به دلیل شکل خاص مجرا ورود آب در این نوع قطره‌چکان و مانند نمونه‌های هشت لیتر در ساعت آن است. به عبارتی درصورتی‌که جسم جامدی در آب وجود داشته باشد به احتمال بسیار زیاد وارد این نوع قطره‌چکان شده و انسداد ایجاد می‌کند. مشاهده نتایج تخریب نمونه‌هایی از قطره‌چکان در این دو فشار که دارای آبدهی پایین بودند این نتیجه‌گیری را تائید می‌کند (شکل ۱۰).

شکل ۱۰- نمونه‌هایی از قطره‌چکان‌های تخریب‌شده پرسی زالوان ۲۴ لیتر در ساعت در شوری‌ها و فشارهای مختلف

نکته قابل توجه در این تصاویر بیشتر بودن اجسام خارجی وارد شده در فشارهای بالاتر بود که طبیعتاً باعث کاهش آبدهی بیشتری نیز شده بود؛ بنابراین و به‌طورکلی علت این کاهش آبدهی را می‌توان فشار بیان کرد. علاوه بر موارد ذکر شده در مورد نمونه‌های پرسی زالوان ۲۴ لیتر در ساعت، برخی نمونه‌های تخریب‌شده دارای مشکلاتی در ساختار بودند که نشان‌دهنده دقت پایین سازنده در هنگام قالب‌گیری این محصولات است. این ناهمگونی‌ها و تغییر شکل ساختار اگرچه به‌طور تصادفی اثر مشهودی بر کاهش آبدهی در مدت انجام آزمایش‌ها نداشت اما بدون شک در بلندمدت کارکرد آن‌ها را دچار مشکل خواهد کرد و قطعاً انسداد در آن‌ها رخ خواهد داد. شکل ۱۱ نمونه‌ای از این ناهنجاری‌ها ایجادشده در اثر قالب‌گیری ناصحیح در فرآیند ساخت را در مجراها و دیافراگم این نوع قطره‌چکان نشان می‌دهد.



شکل ۱۱- ناهنجاری‌های ایجاد شده در اثر قالب‌گیری ناصحیح در فرآیند ساخت و یا شکستگی در مجراها و دیافراگم پرسی زالوان ۲۴ لیتر در ساعت

نکات تکمیلی کاربرد فشار ۲/۵ بار در قطره‌چکان‌های مختلف

با توجه به نتایج ارزیابی‌ها و بررسی نمونه‌های تخریب‌شده می‌توان نتیجه‌گیری کرد که کاربرد این فشار منجر به ورود قطعات و اجسام جامد موجود در لوله‌های آبیاری و یا عبور کرده از سامانه فیلتراسیون مانند برش‌های نازک مواد پلی‌اتیلنی در جداره‌های لوله و یا تأسیسات شده و میزان آبدهی را به مقدار قابل توجهی کاهش می‌دهد. بااین‌حال نتایج نشان داد که رفتار قطره‌چکان‌های مختلف در مواجهه با این موضوع یکسان نیست. اگرچه می‌توان این مشکل را با شستشوی لوله‌ها قبل از شروع به کار سیستم تا حدود زیادی مرتفع نمود. بر این اساس و درحالی‌که نمونه‌های پرسی زالوان ۲۴ لیتر در ساعت بیشترین میزان ورود این اجسام خارجی به مجرای عبور آب را داشتند، کمترین میزان ورود اجسام در نمونه‌های نتافیم ۲۵ لیتر در ساعت مشاهده شد. بر خلاف این نتایج و در نمونه‌های هشت لیتر در ساعت، قطره‌چکان‌های نتافیم علیرغم ورود قابل توجه این اجسام دارای مشکل چسبندگی دیافراگم بودند و به نوعی بیشترین کاهش آبدهی را نشان دادند. درحالی‌که نمونه‌های یورودریپ کمترین کاهش آبدهی را به دلیل ورود اجسام نشان دادند. بررسی دقیق نمونه‌های تخریب شده نشان داد که دلیل این تفاوت‌ها، شکل و ساختار متفاوت مجرای ورود آب است. شکل ۱۲ ورودی مجراهای هر شش نمونه قطره‌چکان مورد بررسی را نشان می‌دهد. در نمونه‌های پرسی زالوان و یورودریپ تفاوتی بین شکل و اندازه مجرا در هر دو آبدهی ۸ و ۲۴ لیتر در ساعت وجود نداشت اما نمونه‌های نتافیم مانند ساختار کلی در مجرای ورودی نیز تفاوت داشتند. بر اساس نتایج، کوچک بودن سطح مقطع ورود آب به درون قطره‌چکان‌ها ورود قطعات جامد را کاهش می‌دهد؛ بنابراین در نمونه‌های پرسی زالوان با بیشترین سطح مقطع، بالاترین میزان ورود اجسام خارجی و در نمونه نتافیم هشت لیتر در ساعت کمترین میزان ورود اجسام به دلیل کاربرد فشار کارکرد بالا مشاهده گردید.

شکل ۱۲- ساختار مجرای ورود آب و میزان ورود اجسام خارجی ریز به سطح زیر دیافراگم درون قطره‌چکان در نمونه‌های مختلف

به‌طورکلی و بر اساس بررسی‌های به عمل آمده می‌توان نتیجه گرفت که بهترین فشار کارکرد برای انواع قطره‌چکان تنظیم‌کننده فشار محدوده یک تا دو بار است و مقادیر بالاتر از آن (۲/۵ بار) می‌تواند در برخی نمونه‌ها منجر به چسبیدگی احتمالی دیافراگم سیلیکونی به مجرای خروجی، ورود اجسام جامد ریز و در نتیجه کاهش آبدهی شود. همچنین مقادیر کمتر از یک بار برای نمونه‌های با آبدهی ۲۴ لیتر در ساعت توصیه نمی‌گردد و لازم است حداقل فشار کارکرد یک بار در پشت این قطره‌چکان‌ها تأمین شود. در نمونه‌های با آبدهی کمتر (هشت لیتر در ساعت) نیز اگر چه فشار کارکرد ۱/۵ بار بهترین نتیجه را نشان داد اما تأمین فشار کارکرد ۰/۵ بار نیز به‌خوبی قادر به ایجاد آبدهی یکنواخت در این قطره‌چکان‌ها است. بر خلاف نتایج این پژوهش، میریان و همکاران (۱۳۹۸) بیان

کردند که فشار کارکرد سه بار در مقایسه با فشار کارکرد دو و یک بار از گرفتگی قطره‌چکان‌های یورودریپ چهار و هشت لیتر در ساعت به میزان قابل توجهی جلوگیری می کند و این میزان فشار کارکرد را توصیه کردند. در بررسی نتایج این پژوهشگران چند نکته وجود دارد که باید مدنظر قرار گیرد. نکته اول این‌که گرفتگی در کدام قسمت از ساختار قطره‌چکان رخ داده است که در پژوهش مذکور به آن اشاره‌ای نشده است. در واقع مکانیزم کارکرد قطره‌چکان‌های تنظیم‌کننده فشار مانند یورودریپ به‌گونه‌ای است که دیافراگم ارتجاعی با کنترل میزان فشار ورودی، آبدهی قطره‌چکان را ثابت نگه می‌دارد و استهلاک میزان فشار باقی‌مانده نیز در مجرای مارپیچ اتفاق می‌افتد. نکته دیگر استفاده از گچ با غلظت نیم گرم در لیتر در سیستم در این پژوهش بوده است. بر اساس آنالیز آب ارائه‌شده توسط این پژوهشگران دلیل اصلی انسداد وجود سولفات کلسیم در آب بوده است که به نظر می‌رسد این رسوبات در فشارهای پایین‌تر (یک و دو بار) و قبل از ورود به مجرای مارپیچ منجر به انسداد شده‌اند و در فشار سه بار این ذرات از قطره‌چکان‌ها عبور کرده‌اند. بااین‌حال، نتایج آنان همچنان محل ابهام است در جایی که پس از مدت‌زمان آزمایش‌ها میزان انسداد توسط فشار یک و دو بار به حدود ۹۰ درصد رسیده است اما در فشار ۳ بار این میزان انسداد حدود ۱۵ درصد است و هیچ دلیلی برای این تفاوت فاحش ارائه نشده است. به عبارتی مکانیزم عمل فشار می‌بایست یکسان باشد و تغییرات خطی از فشار یک به دو و سپس سه بار اتفاق بیفتد که این امر رخ نداده است. بر خلاف نتایج این پژوهشگران و در تطابق با یافته‌های پژوهش حاضر، زمانی و فتاحی (۱۳۹۸) فشار کارکرد ۱/۵ بار را فشار بهینه برای قطره‌چکان‌های تنظیم‌کننده فشار گزارش کردند. عبدالسلام و همکاران (۲۰۲۴) نیز افزایش فشار تا ۱/۵ بار را منجر به افزایش یکنواختی پخش و کاهش تغییرات آبدهی در شوری‌های مختلف دانستند. همچنین الامین و همکاران (۲۰۱۷) نشان دادند که در دو نوع قطره‌چکان تنظیم‌کننده فشار (توربو و اوکتا) و یک نمونه غیر تنظیم‌کننده فشار (بررل)، با افزایش فشار از ۰/۵ به یک بار میزان گرفتگی کاهش می‌یابد. علاوه براین، زمانی و همکاران (۱۳۹۳) نشان دادند که در بررسی‌های آن‌ها، تنها قطره‌چکان تنظیم‌کننده فشار (یورودریپ هشت لیتر در ساعت) در فشارهای کارکرد ۰/۵ و ۲/۵ بار به ترتیب دارای کاهش و افزایش آبدهی قابل توجه است اما در فشار ۱/۵ بار بهترین عملکرد را دارا است. علاوه بر این، نصرالهی و همکاران (۱۳۹۲) نیز نشان دادند که قطره‌چکان‌های یورودریپ و نتافیم هشت لیتر در ساعت در فشار کارکرد ۰/۵ بار با کاهش آبدهی اسمی روبرو می‌شوند اما در محدوده فشار کارکرد یک تا دو بار انحراف از آبدهی اسمی آن‌ها پایین است.

نتیجه‌گیری

جمع‌بندی کلی ارزیابی‌های فنی نشان داد که برخی از قطره‌چکان‌های نو علیرغم داشتن ضریب تغییرات آبدهی ساخت (CV) کمتر از هفت درصد، از نظر میانگین آبدهی با مقادیر اسمی ارائه‌شده (Qn-D) مطابقت ندارند. این عدم تطابق برای فشار ۰/۵ بار و نمونه‌های ۲۴ لیتر در ساعت هر سه نشان تجاری مشهودتر بود و دارای آبدهی میانگین کمتری نسبت به دبی اسمی بودند. نتایج ارزیابی بعد از انجام آزمایش‌ها نشان داد که افزایش فشار کارکرد از ۰/۵ تا ۲/۵ بار و افزایش شوری از ۵ به ۱۲ دسی زیمنس بر متر منجر به افزایش و یا عدم تغییرات ضریب تغییرات آبدهی در قطره‌چکان‌های مختلف گردید. در رابطه با انحراف از آبدهی اسمی نیز اگر چه الگوی مشخص کاهشی یا افزایشی مشاهده نگردید اما تغییرات در آبدهی قطره‌چکان‌ها منجر به از بین رفتن معیارهای استاندارد در اکثر قطره‌چکان‌ها گردید. بطور کلی مقایسه نتایج ارزیابی‌ها قبل و بعد از انجام آزمایش‌ها نشان داد که تغییرات مشاهده‌شده به دلایل گوناگون شکل گرفته و برخی در اثر تغییر فشار، برخی به دلیل شوری آب و برخی نیز جزو ذات قطره‌چکان بوده است. در رابطه با اثر شوری، نتایج نشان‌دهنده عدم وقوع گرفتگی معنی‌دار و قابل توجه در اثر

تغییر شوری در قطره‌چکان‌های مختلف و در شرایط کاربرد فشارهای متفاوت بود که مواردی مانند تعداد ساعات کارکرد پایین سیستم و همچنین طول کم لاترال‌ها و در نتیجه عدم گرم شدن آب و رسوب کربنات‌ها از دلایل این موضوع است. اگرچه در مورد نمونه‌های هشت لیتر در ساعت نتافیم و یورودریپ و درصورتی‌که نتایج مربوط به هر سه فشار را میانگین‌گیری نماییم نشان‌دهنده اثر افزایش شوری بر کاهش آبدهی است، به‌گونه‌ای که این میزان کاهش در نمونه نتافیم ۳/۸ درصد و در یورودریپ نیز ۲/۶ درصد بود. به‌طورکلی و با توجه به نتایج ارزیابی‌ها و بررسی نمونه‌های تخریب‌شده می‌توان نتیجه‌گیری کرد که کاربرد فشار ۲/۵ بار منجر به ورود قطعات و اجسام جامد موجود در لوله‌های آبیاری و یا عبور کرده از سیستم فیلتراسیون مانند برش‌های نازک مواد پلی‌اتیلنی در جداره‌های لوله و یا تأسیسات شده و میزان آبدهی را به مقدار قابل‌توجهی کاهش می‌دهد. اگرچه می‌توان این مشکل را با شستشوی لوله‌ها قبل از شروع به کار سیستم تا حدود زیادی مرتفع نمود بااین‌حال رفتار قطره‌چکان‌های مختلف در مواجهه با این موضوع یکسان نیست و درحالی‌که نمونه‌های پرسی زالوان ۲۴ لیتر در ساعت بیشترین میزان ورود این اجسام خارجی به مجرای عبور آب را داشتند، کمترین میزان ورود اجسام در نمونه‌های نتافیم ۲۵ لیتر در ساعت مشاهده شد. بر خلاف این نتایج و در نمونه‌های هشت لیتر در ساعت، قطره‌چکان‌های نتافیم علیرغم عدم ورود قابل‌توجه این اجسام دارای مشکل چسبندگی دیافراگم بودند و به نوعی بیشترین کاهش آبدهی را نشان دادند. درحالی‌که نمونه‌های یورودریپ کمترین کاهش آبدهی را به دلیل ورود اجسام نشان دادند. بررسی دقیق نمونه‌های تخریب‌شده نشان داد که دلیل این تفاوت‌ها، شکل و ساختار متفاوت مجرای ورود آب است. بر اساس نتایج، کوچک بودن سطح مقطع ورود آب به درون قطره‌چکان‌ها ورود قطعات جامد را کاهش می‌دهد؛ بنابراین در نمونه‌های پرسی زالوان با بیشترین سطح مقطع، بالاترین میزان ورود اجسام خارجی و در نمونه نتافیم هشت لیتر در ساعت کمترین میزان ورود اجسام به دلیل کاربرد فشار کارکرد ۲/۵ بار مشاهده گردید.

تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافعی وجود ندارد و این مسئله مورد تأیید نویسندگان مقاله است.

فهرست منابع

۱. ابراهیمی، مسعود، شریفان، حسین، هزارجریبی، ابوطالب و حسام، موسی، ۱۳۹۴. بررسی عملکرد چهار نوع قطره‌چکان در شرایط به‌کارگیری آب‌شور. *مجله آبیاری و زهکشی ایران*، ۹(۲)، صص. ۳۹۸– ۳۹۱.

۲. پروینی، مریم و معروف‌پور، عیسی، ۱۳۹۲. بررسی ضریب تغییرات ساخت و یکنواختی ریزش قطره‌چکان‌های تنظیم‌کننده فشار رایج در کشور. *مجله آبیاری و زهکشی ایران*، ۷(۲)، صص. ۲۳۱–۲۴۲.

۳. پرویزی، حسین، پرنیان، امیر، حاتمی، حدیث و رحیمیان، محمدحسن، ۱۴۰۲. اثر تغییرات فشار و نوع قطره‌چکان بر عملکرد سامانه‌های آبیاری قطره‌ای باغ‌های پسته استان یزد. *پژوهش آب در کشاورزی*، ۳۷(۱)، صص. ۱۷ – ۳۳. **(DOI):10.22092/JWRA.2023.360971.966**

۴. پیروزفر، وحیدرضا، برومندنسب، سعید، محمدی سلطانی، امیر و معاضد، هادی، ۱۳۹۳. بررسی عملکرد قطره‌چکان نتافیم و یورودریپ در شوری‌های مختلف آب آبیاری. *دومین همایش سراسری کشاورزی و منابع طبیعی پایدار*. تهران، **https://civilica.com/doc/309894**

۵. چوپان، یحیی و امامی، سمیه، ۱۳۹۷. تأثیر کاربرد فاضلاب تصفیه‌شده بر تغییرات دبی قطره‌چکان‌ها، *دومین کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران*، اصفهان. **https://civilica.com/doc/856089**

۶. زمانی، سعید، بهمنش، جواد و زینال‌زاده، کامران، ۱۳۹۳. ارزیابی عملکرد گسیلندهٔ کنترل‌کنندهٔ حجم آب در مقایسه با گسیلنده‌های متداول در سیستم آبیاری میکرو. *تحقیقات آب‌وخاک ایران*، ۴۵ (۴)، صص.۴۵۳-۴۶۱. **(DOI): 10.22059/IJSWR.2014.52598**

۷. زمانی، سعید و فتاحی نافچی، روح‌اله، ۱۳۹۸. ارزیابی عملکرد و تعیین بازه فشاری کارکرد بهینه چهار گسیلنده متداول در سیستم خرد آبیاری. *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*، ۱۳ (۵)، صص. ۱۱۸۲-۱۱۹۰. **(DOI): 20.1001.1.20087942.1398.13.5.1.5**

۸. فرزام نیا، مسعود و حقایقی‌مقدم، سید ابوالقاسم، ۱۳۸۸. بررسی تأثیر آب شور بر گرفتگی برخی قطره‌چکان‌های مورد استفاده در ایران. *علوم و مهندسی آبیاری*، ۳۲ (۱)، صص. ۱۷-۲۵. **(DOI): 10.22055/JISE.2010.13379**

۹. قدمی فیروزآبادی، علی، پورغلام، مسعود و خوش‌روش، مجتبی. ۱۳۹۷. تأثیر میدان مغناطیسی و سطوح مختلف شوری آب آبیاری بر دبی قطره‌چکان‌ها. *نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران*، ۹ (۲)، صص. ۱۹۲-۱۸۰. **(DOI): 10.22125/IWE.2019.87392**

۱۰. کیانی، علی‌رضا، هزارجریبی، ابوطالب، دهقان، طیبه و خوش‌روش، مجتبی، ۱۳۹۴. تأثیر آب مغناطیسی و شوری آب بر گرفتگی قطره‌چکان‌ها در آبیاری قطره‌ای. *نشریه آب‌وخاک (علوم و صنایع کشاورزی)*، ۲۹ (۱)، صص. ۴۸-۵۸. **(DOI): 10.22067/jsw.v0i0.27841**

۱۱. فراستی، معصومه، بهزاد، مجید و برومندنسب، سعید، ۱۳۸۹. .بررسی عملکرد چند نوع قطره‌چکان تنظیم‌کننده فشار موجود در بازار ایران. *علوم مهندسی آبیاری (مجله علمی کشاورزی)*، ۳۳(۱)، صص. ۳۰-۱۵ **(DOI) 10.22055/JISE.2009.13393**.

۱۲. کریمی، نادر، قوچانی، حسن، طاحونه‌دار، میثم و یقینی، فرزانه، ۱۳۹۰. ارزیابی قطره‌چکان‌های مورد استفاده در آبیاری تحت‌فشار. *اولین کنفرانس ملی هواشناسی و مدیریت آب کشاورزی*، کرج. **https://civilica.com/doc/173404**

۱۳. میریان، صبا، شریفی‌پور، مجید و نصرالهی، علی‌حیدر. ۱۳۹۸. اثر مدیریت آبیاری، دبی و فشار کارکرد بر گرفتگی قطره‌چکان‌های تنظیم‌کننده فشار. *تحقیقات آب‌وخاک ایران*، ۵۰(۹). صص. ۲۲۳۸- ۲۲۲۸. **(DOI): 10.22059/IJSWR.2019.278268.668151**

۱۴. نصرالهی، علی حیدر، بهزاد، مجید، برومندنسب، سعید و حیدری‌نیا، مولود، ۱۳۹۲. بررسی تأثیر تغییرات فشار روی مشخصات هیدرولیکی قطره‌چکان‌های تنظیم‌کننده فشار. *مجله علوم آب‌وخاک*. ۱۷(۶۶)، صص. ۲۳۳ تا ۲۲۵. **(DOI): 20.1001.1.24763594.1392.17.66.1.5**

۱۵. هزارجریبی، ابوطالب، و قربانی نصرآبادی، قربان، و فضل اولی، رامین و عابدین‌پور، میثم، ۱۳۹۲. بررسی عملکرد هیدرولیکی سه نوع قطره‌چکان خارجی تنظیم‌شونده در فشارهای کارکرد مختلف. *پژوهش‌های حفاظت آب‌وخاک (علوم کشاورزی و منابع طبیعی)*، ۲۰(۱)، صص. ۱۹۹-۲۱۱. **(DOI): 20.1001.1.23222069.1392.20.1.11.9**

16. Abdelsalam, H., Mostafa, H., El-Ansary, M., Awad, M. and Sultan, W., 2024. Evaluation of saline and magnetized water on emitter hydraulic performance and clogging in drip irrigation. *Scientific Reports*, 14(1), p.7339. **DOI: 10.1038/s41598-024-57543-8**

17. Binbin, J., Xinkun, W., Song, H., Erdong, F., Hailan, Y., Jicheng, Y., & Jianjun, Y. 2020. Effects of high-frequency pressure pulse generated by a jet tee on the clogging of labyrinth

emitter. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 36(22). 5-171. **DOI: *10.11975/j.issn.1002-6819.2020.22.018***

18. Elamin, A.W.M., Abd Eldaiam, A.M., Abdalla, N.A. and Hussain, M.E., 2017. Hydraulic performance of drip irrigation system under different emitter types, and operating pressures using treated wastewater at Khartoum state. *International Journal of Development and Sustainability*, 6(9), pp.1086-1095.
19. Elamin, A.W.M., Saeed, A.B., Rahma, A.E. and Elgamry, T., 2020. Hydraulic Performance of Drip Emitters under Different Conditions and Water Qualities. *Sudan Journal of Desertification Research*, 11(1). pp. 46-57.
20. Kirnak, H., DOĞAN, E., Demir, S. and Yalçin, S., 2004. Determination of hydraulic performance of trickle irrigation emitters used in irrigation systems in the Harran Plain. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 28(4), pp.223-230.
21. Lili, Z., Peiling, Y., Wengang, Z., Yunkai, L., Yu, L. and Chong, Z., 2021. Effects of water salinity on emitter clogging in surface drip irrigation systems. *Irrigation Science*, 39, pp.209-222. **DOI: 10.1007/s00271-020-00690-3**
22. Da Silva, P.F., de Mato, R.M., Neto, J.D., Gomes, R.D.C.B. and de Lima, V.L.A., 2016. Characterization of the hydraulic performance of self-compensating emitters with water of different salt concentrations. *Semina: Ciências Agrárias,* 37(2), pp.639-650. **DOI: 10.5433/1679-0359.2016v37n2p639**
23. Turkey, Z., Yeser, A.E., Elbagoury, K.F. and Mahmoud, M., 2020. Hydraulic Performance Analysis of Emitters under Magnetied Saline Water Conditions. *Arab Universities Journal of Agricultural Sciences,* 28(4), pp.1055-1064. **DOI: 10.1038/s41598-024-57543-8**

مقاله پژوهشی نشریه پژوهش آب در کشاورزی / ب / جلد ۳۸ / شماره ۴/ ۱۴۰۳.ص۳۹۷-۴۲۲
https://doi.org/10.22092/jwra.2025.367441.1061

ارزیابی تأثیر کم‌آبیاری تنظیم‌شده و آبیاری ناقص ریشه بر کارایی مصرف آب بر مبنای تولید و کیفیت علوفه ارزن مرواریدی

اسماء مقبلی مهنی دررودی، معصومه دلبری*، عباس رضایی استخروئیه و قاسم محمدی‌نژاد

دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران.
Asma.moghbeli@gmail.com
دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران.
masoomeh.delbari@uoz.ac.ir
استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.
Rezaei@mail.uk.ac.ir
استاد، پژوهشکده فناوری تولیدات گیاهی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.
Mohammadinejad@uk.ac.ir

دریافت: آبان ۱۴۰۳ و پذیرش: آذر ۱۴۰۳

چکیده

کمبود آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک، چالشی جدی برای تولید علوفه است، بنابراین، بهینه‌سازی آبیاری و انتخاب ارقام مقاوم به خشکی مانند ارزن ضروری است. در این پژوهش تأثیر دو روش کم‌آبیاری تنظیم‌شده و آبیاری ناقص ریشه در چهار سطح رژیم آبیاری (۱۰۰، ۸۰، ۶۰ و ۴۰ درصد نیاز آبی گیاه) بر عملکرد علوفه، کارایی مصرف آب، درصد و عملکرد پروتئین ارزن مرواریدی هیبرید (رقم نوتریفید) بررسی شد. پژوهش به‌صورت کرت‌های خرد شده نواری در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار و با استفاده از روش آبیاری قطره‌ای با نوار تیپ در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه شهید باهنر کرمان طی دو فصل زراعی ۱۳۹۶ و ۱۳۹۷ انجام شد. نتایج نشان داد که تیمار آبیاری ناقص ریشه با تأمین ۱۰۰٪ نیاز آبی گیاه، بیشترین عملکرد علوفه تر و خشک را به‌ترتیب با ۸۰/۲۰ و ۱۶/۲۷ تن در هکتار داشت. تیمار ۸۰٪ نیاز آبی در همین روش، علاوه بر قرار گرفتن در رتبه دوم با عملکرد علوفه تر و خشک به‌ترتیب ۷۱/۷۱ و ۱۵/۴۷ تن در هکتار، بالاترین عملکرد پروتئین علوفه خشک (۱۴۱۸/۷۰ کیلوگرم در هکتار) و کارایی مصرف آب آبیاری بر اساس عملکرد علوفه تر و خشک (به‌ترتیب ۱۳/۷۴ و ۲/۹۷ تن بر مترمکعب) را داد. همچنین، بیشترین درصد پروتئین (۱۱/۴۱) در تیمار آبیاری ناقص ریشه با تأمین ۶۰٪ نیاز آبی مشاهده شد. به‌طورکلی، آبیاری ناقص ریشه با تأمین ۸۰٪ نیاز آبی گیاه به‌عنوان یک راهکار مناسب برای بهبود کارایی مصرف آب آبیاری و حفظ کیفیت و کمیت علوفه در شرایط کم‌آبی توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: تنش خشکی، روش‌های بهینه آبیاری، ارزن رقم نوتریفید، پایداری تولید علوفه

* – آدرس ایمیل نویسنده مسئول: **masoomeh.delbari@uoz.ac.ir**

مقدمه

در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان، کمبود منابع آب یکی از عوامل اصلی محدودکننده تولید محصولات کشاورزی است. تنش خشکی، به‌عنوان عامل کلیدی محدودکننده رشد گیاهان، اثرات منفی بیشتری نسبت به سایر تنش‌های محیطی دارد. در کشورهایی مانند ایران با میانگین بارندگی سالانه تنها ۲۴۰ میلی‌متر، ضرورت بهبود بهره‌وری آب و استفاده از روش‌های مدیریت نوین آبیاری بیش از پیش احساس می‌شود (مریدی، ۲۰۱۷؛ سیواساکتی و همکاران، ۲۰۲۴؛ جیائو و همکاران، ۲۰۲۴). با توجه به رشد نمایی جمعیت و تغییرات اقلیمی که فشار بیشتری بر منابع آب شیرین، کشاورزی و صنعت وارد می‌کند، مدیریت آب به یک چالش پیچیده تبدیل شده است (الهانی و همکاران، ۲۰۱۹؛ جیائو و همکاران، ۲۰۲۴).

ارزن مرواریدی (*Pennisetum glaucum* L.) یکی از مهم‌ترین غلات گرمسیری چهارکربنه (C4) است که در شرایط نیمه‌خشک و خاک‌های فقیر از نظر مواد مغذی قابلیت رشد و نمو دارد. این گیاه به‌دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فرد خود، نقش مهمی در تأمین امنیت غذایی و تولید علوفه دارد و به‌عنوان گزینه‌ای کلیدی برای کشاورزی پایدار در مناطقی با منابع آبی محدود شناخته می‌شود. ارزن مرواریدی به‌ویژه در آفریقا و جنوب آسیا، به‌خصوص هند، به‌عنوان منبع اصلی غلات برای مصرف انسانی و علوفه دام استفاده می‌شود (میسون و همکاران، ۲۰۱۵؛ کروکستون و همکاران، ۲۰۲۰؛ آسوینی و همکاران، ۲۰۲۳). این گیاه در سامانه‌های کشاورزی دیم، همراه با گیاهانی مانند سورگوم و ذرت یا در ترکیب با لگوم‌هایی مانند لوبیا چشم‌بلبلی کشت می‌شود که به بهبود تناوب زراعی کمک می‌کند (ساماکه و همکاران، ۲۰۰۶؛ میسون و همکاران، ۲۰۱۵). تولید جهانی ارزن مرواریدی در سال ۲۰۲۲ به حدود ۳۱ میلیون تن رسید که از این میزان، آفریقا و آسیا به‌ترتیب ۵۱ و ۴۶ درصد از کل تولید را به خود اختصاص داده‌اند (فائو، ۲۰۲۲). ارزن مرواریدی به‌دلیل ارزش غذایی بالا و تناسب با چرخه‌های زراعی کوتاه‌مدت و منابع آب محدود، به‌عنوان خوراک دام در مناطق نیمه‌خشک رایج است (اسماعیل، ۲۰۱۲؛ بهاتارای و همکاران، ۲۰۱۹؛ ماچیسِک و همکاران، ۲۰۱۹).

در ایران، ارزن مرواریدی به‌دلیل مقاومت بالا در برابر خشکی و توانایی تحمل شرایط نامساعد خاک، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند استان کرمان کشت می شود. این گیاه به‌ویژه رقم نوتریفید که با اقلیم‌های گرم و خشک سازگار است، به‌عنوان گزینه‌ای پایدار برای کشاورزی در مناطق کم‌آب شناخته شده است (مهرپویان و همکاران، ۱۳۹۰؛ صفائی طرقبه و همکاران، ۱۳۹۶؛ نگارستانی، ۲۰۱۹؛ فاطمی، ۲۰۲۱).

از نظر تغذیه‌ای، ارزن مرواریدی حاوی پروتئین‌ها، کربوهیدرات‌ها، اسیدهای آمینه ضروری، آنتی اکسیدان‌ها و ویتامین‌هایی مانند تیامین، ریبوفلاوین، اسید فولیک، نیاسین، بتاکاروتن است. همچنین مواد معدنی مانند آهن، فسفر، منیزیم و روی و ترکیبات شیمیایی نظیر پلی فنول‌ها و فلاونوئیدها را در خود دارد که نقش مهمی در تأمین امنیت غذایی و بهبود تعادل تغذیه‌ای در کشورهای درحال‌توسعه ایفا می‌کند (کومار و کومار، ۲۰۲۱؛ ساچان و شاه، ۲۰۲۳). علاوه بر این، ارزن مرواریدی به‌دلیل ارزش علوفه‌ای خود نیز شناخته شده و این ویژگی دو منظوره بودن، باعث افزایش ارزش اقتصادی آن می‌شود (تلاسیا و همکاران، ۲۰۱۹).

بر اساس پیش‌بینی‌ها، نیاز آبی محصولات کشاورزی تا سال ۲۰۸۰ حدود ۲۵ درصد افزایش خواهد یافت. همچنین، تغییرات اقلیمی باعث افزایش تبخیر-تعرق (ETo) خواهد شد، که این امر از ظرفیت محصولات کشاورزی برای مقابله با آن فراتر می‌رود و ممکن است به کاهش بهره‌وری آن‌ها منجر شود (نیکولائو و همکاران، ۲۰۲۰). بنابراین، به‌روزرسانی روش‌های تأمین آب آبیاری و بهبود عملکرد کشاورزی در شرایط کم‌آبی برای دست‌یابی به امنیت پایدار آب و غذا، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (الومران و لوکی، ۲۰۲۴). در این راستا، با توجه به چالش‌های فزاینده ناشی از تغییرات اقلیمی، مانند

کاهش بارش و افزایش دما، اهمیت کاشت محصولات مقاوم مانند ارزن مرواریدی به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است. توانایی این محصول در مقاومت در برابر شرایط نامساعد، آن را به گزینه‌ای امیدوارکننده برای تضمین شیوه‌های کشاورزی پایدار و تأمین امنیت غذایی در مواجهه با تغییرات اقلیمی تبدیل می‌کند. بااین‌حال، تولید ارزن مرواریدی همچنان تحت تأثیر محدودیت‌های آبی قرار دارد. مهرپویان و فرامرزی (۱۳۹۰) گزارش کردند که تنش آبی منجر به کاهش عملکرد علوفه و کارایی مصرف آب آبیاری[1] (IWUE) در ارزن نوتریفید شد. به‌گونه‌ای که بیشترین عملکرد در شرایط بدون تنش و کمترین عملکرد در تیمار با ۳۰ درصد کاهش نیاز آبی مشاهده گردید. با این‌حال، ارزن نوتریفید در مقایسه با سایر گونه‌های علوفه‌ای تحت شرایط تنش آبی، افت عملکرد کمتری داشت و توانایی بالاتری در حفظ تولید نسبی خود نشان داد. این ویژگی، به همراه سیستم فتوسنتزی C4 و توانایی تنظیم تعرق، ارزن نوتریفید را به‌عنوان گونه‌ای مقاوم به خشکی معرفی کرده است (شرستا و همکاران، ۲۰۲۳). ارزن به‌طورکلی به‌عنوان گیاهی مقاوم به خشکی شناخته می‌شود، اما مقاومت آن نسبی است و به ویژگی‌های فیزیولوژیکی و ژنتیکی خاص آن بستگی دارد. ارزن مرواریدی، در مقایسه با غلاتی مانند گندم و ذرت، توانایی بیشتری در حفظ عملکرد نسبی خود تحت تنش آبی دارد. این مقاومت به ویژگی‌هایی همچون کاهش مصرف آب از طریق بسته شدن روزنه‌ها، افزایش تولید ترکیبات تنظیم‌کننده اسمزی مانند پرولین و قندهای محلول، و توسعه ریشه‌های عمیق‌تر برای جذب آب بیشتر از خاک مربوط می‌شود (مارویا و واخاریا، ۲۰۱۶؛ راغب بخیط الوافی و همکاران، ۲۰۲۱؛ شرستا و همکاران، ۲۰۲۳). با این‌حال، مقاومت به خشکی به این معنا نیست که ارزن تحت تنش شدید آبی هیچ کاهش عملکردی نشان نمی‌دهد. بلکه منظور آن است که این گیاه در مقایسه با سایر غلات در شرایط مشابه، عملکرد بهتری ارائه می دهد و کارایی مصرف آب بیشتری دارد. به‌عنوان مثال، پژوهش‌ها نشان داده‌اند که تحت شرایط کم‌آبی، ارزن می تواند تولید ترکیبات پروتئینی و سایر متابولیت‌های سازگار با تنش را افزایش دهد که به بقای گیاه در شرایط خشک کمک می‌کند (قاتک و همکاران، ۲۰۱۶). بنابراین، به‌کارگیری راهکارهای مدیریتی بهینه آبیاری می‌تواند نقش مهمی در بهبود بهره‌وری و کاهش اثرات منفی تنش آبی در این محصول ایفا کند (کروکستون و همکاران، ۲۰۲۰؛ آگیلار و همکاران، ۲۰۲۳؛ سیواساکتی و همکاران، ۲۰۲۴).

هدف اصلی مدیریت آبیاری در مزرعه، به حداکثر رساندن عملکرد محصول از طریق شناسایی دوره‌های حساس به کمبود آب است. علاوه بر این، مدیریت رطوبت خاک در ناحیه ریشه و پیش‌بینی سناریوهای خشکسالی برای بهبود عملکرد گیاهان ضروری است (گرکچ، ۲۰۱۹). در این زمینه، استراتژی‌هایی مانند کم‌آبیاری[2] (DI) که به‌منظور کاهش مصرف آب آبیاری و افزایش بهره‌وری آب طراحی شده‌اند، به‌عنوان راهکارهایی نویدبخش برای دست‌یابی به عملکرد قابل قبول و اقتصادی در مناطق خشک و نیمه‌خشک شناخته می‌شوند (استگنو و همکاران، ۲۰۲۴؛ جیائو و همکاران، ۲۰۲۴). کم‌آبیاری علی‌رغم کاهش عملکرد در واحد سطح، با کاهش مصرف آب و هزینه‌های مرتبط با استحصال، انتقال و توزیع آن، منجر به سودآوری بیشتر می‌شود (یازار و همکاران، ۲۰۰۹). در این راستا، روش‌های پیشرفته کم‌آبیاری مانند کم‌آبیاری تنظیم‌شده[3] (RDI) و آبیاری ناقص ریشه به‌طور متغیر[4] (PRD) به‌عنوان تکنیک‌های کلیدی در مدیریت آبیاری و افزایش بهره‌وری گیاهان تحت شرایط کم‌آبی شناخته شده‌اند. این روش‌ها به کشاورزان کمک می‌کنند تا با مصرف کمتر آب، محصولاتی با کیفیت بالا تولید کنند و به این ترتیب به راهکارهایی پایدار برای کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک تبدیل شوند (هوشمند و همکاران، ۲۰۱۹؛ الغامدی و همکاران، ۲۰۲۳؛ چن و همکاران، ۲۰۲۳؛ استگنو و همکاران، ۲۰۲۴؛ جیائو و همکاران، ۲۰۲۴). روش RDI به کاهش میزان آبیاری کمتر

1- Irrigation water use efficiency
2- Deficit irrigation
3- Regulated deficit irrigation
4- Partial root-zone drying

از نیاز تبخیر-تعرق کامل گیاه در مراحل خاص رشد اشاره دارد. این روش مصرف آب را کاهش داده و در عین حال، عملکرد محصول را حفظ یا بهبود می‌بخشد. روش RDI برای بهینه‌سازی IWUE طراحی شده است و در محصولات مختلف از جمله ارزن مرواریدی، سورگوم علوفه‌ای، ذرت و گندم به اثبات رسیده است (بهاتارای و همکاران، ۲۰۲۰ الف؛ وو و همکاران، ۲۰۲۰؛ الحمد و همکاران، ۲۰۲۳؛ الغامدی و همکاران، ۲۰۲۳؛ چن و همکاران، ۲۰۲۳؛ جیائو و همکاران، ۲۰۲۴). در این روش، لازم است که وضعیت آب گیاه به‌طور مداوم مورد بررسی قرار گیرد تا تنش آبی در سطحی نگه‌داشته شود که به عملکرد گیاه آسیب نرساند. روش PRD یک مدیریت کم آبیاری به شیوه خشکی موضعی ریشه است که از روش RDI توسعه یافته است. در این روش، تنها بخشی از منطقه ریشه در هر نوبت آبیاری مرطوب می‌شود و بخش دیگر به حال خود رها می‌شود. زمانی که میزان آب خاک به حد ظرفیت زراعی می‌رسد، آبیاری به بخش خشک ریشه منتقل می‌شود. این تکنیک IWUE را بدون کاهش قابل توجه در عملکرد گیاه بهبود می‌بخشد و به‌ویژه برای افزایش غلظت شیره آوندی و کاهش هدایت روزنه‌ها مؤثر است که به نوبه خود تلفات آب را کاهش می‌دهد. همچنین، PRD کیفیت محصول را از طریق افزایش میزان قند بهبود می‌بخشد و در مقایسه با RDI، بهبود قابل توجهی در عملکرد محصول ارائه می‌دهد (لیو و همکاران، ۲۰۰۶؛ لیما و همکاران، ۲۰۱۵؛ اسماعیل و همکاران، ۲۰۱۸؛ الحمد و همکاران، ۲۰۲۳؛ الغامدی و همکاران، ۲۰۲۳). تفاوت‌های کلیدی میان PRD و RDI در نحوه اعمال کم‌آبیاری است. درحالی که PRD به‌طور متناوب بخش‌های مختلف ریشه را آبیاری می‌کند، RDI سطحی از کمبود رطوبت را در کل سیستم ریشه ایجاد می‌کند (واکریم و همکاران، ۲۰۰۵). هر دو روش می‌توانند به افزایش بهره‌وری مصرف آب کمک کنند، اما PRD به‌دلیل ایجاد سیگنال‌های شیمیایی اسید آبسزیک (ABA) در ریشه‌های خشک، در کاهش تعرق و بهبود کارایی جذب آب مؤثرتر است (مارتین ورتدر و داد، ۲۰۱۱). بسیاری از محققان این روش را به‌عنوان یکی از موفق‌ترین سناریوها در بهبود عملکرد محصول و بهره‌وری مصرف آب معرفی کرده‌اند (الهانی و همکاران، ۲۰۱۹؛ خالقی و همکاران، ۲۰۲۰). تحقیقات متعددی در زمینه تأثیر تکنیک‌های آبیاری مانند PRD و RDI بر روی محصولات مختلف انجام شده است. مطالعه‌ای بر روی گوجه‌فرنگی نشان داد که استفاده از روش PRD با تأمین ۸۵ درصد نیاز آبی گیاه، بهترین نتیجه را از نظر IWUE (۱۶ کیلوگرم بر مترمکعب) و وزن خشک زیست‌توده (۱۱۳/۷۵ گرم) به همراه داشت. این روش موجب افزایش ۲۲ درصدی IWUE نسبت به آبیاری کامل شد، درحالی‌که فقط کاهش هفت درصدی غیرمعنی‌دار در وزن خشک زیست‌توده نسبت به آبیاری کامل مشاهده گردید (هوشمند و همکاران، ۲۰۱۹). چنگ و همکاران (۲۰۲۱) نیز گزارش کردند که اجرای روش PRD در مراحل اولیه رشد ذرت، اثرات منفی کمبود آب بر رشد گیاه را تا ۸۱/۸۹ درصد کاهش داد و موجب کاهش ۱۷/۷ درصدی عملکرد دانه در مقایسه با آبیاری کامل شد، اما IWUE را تا ۴۱ درصد افزایش داده است. اقبال و همکاران (۲۰۱۹ الف) بیان کردند که روش PRD در گندم، با حفظ آب و افزایش IWUE، عملکردی نزدیک به آبیاری کامل ارائه می‌دهد. آن‌ها مشاهده کردند که در آبیاری کامل، بالاترین عملکرد دانه و وزن زیست‌توده شاخساره به‌ترتیب ۲۷ و ۵۰/۹ گرم بود، درحالی‌که این مقادیر در تیمار PRD به ۲۴/۷ و ۴۶/۸ گرم و در RDI به ۱۴/۴ و ۳۶/۲ گرم کاهش یافت. باوجود این، کاهش عملکرد دانه و زیست‌توده شاخساره در PRD فقط هشت درصد نسبت به آبیاری کامل بود، درحالی‌که شاخص برداشت در هر دو روش برابر ۵۳ درصد بود. روش PRD همچنین با ایجاد تغییرات فیزیولوژیکی مطلوب، مانند افزایش ABA و تغییرات اسمزی، نسبت به RDI عملکرد بهتری نشان داد و به‌عنوان گزینه‌ای مناسب برای مناطق کم‌آب معرفی شد. جهان‌سوز و همکاران (۲۰۱۴) نیز گزارش کردند که کاهش ۲۵ درصدی در میزان آب آبیاری باعث کاهش عملکرد ذرت، سورگوم و ارزن به‌ترتیب به

میزان ۲۸، ۱۳ و ۲۴ درصد می‌شود. با این‌حال، کم‌آبیاری منجر به افزایش پروتئین خام در هر سه گونه گیاهی شد. با توجه به بحران‌های فزاینده کم‌آبی و تغییرات اقلیمی در استان کرمان، نیاز به بهبود مدیریت منابع آب و ارتقاء بهره‌وری کشاورزی به‌طور جدی احساس می‌شود. ارزن مرواریدی با ویژگی‌های مقاومت به خشکی و توانایی بالا در تأمین علوفه و غذای انسان و دام، می‌تواند نقش مهمی در کشاورزی این منطقه ایفا کند. استفاده از تکنیک‌های پیشرفته آبیاری مانند RDI و PRD فرصت بی‌نظیری برای بازنگری در شیوه‌های سنتی و ایجاد تحول در کشاورزی استان فراهم می‌آورد. با این حال، تاکنون تحقیقی جامع و سامانمند در خصوص تأثیر هم‌زمان این روش‌های کم‌آبیاری بر صفات کمی و کیفی ارزن مرواریدی در استان کرمان انجام نشده است. این تحقیق نوآورانه، برای نخستین بار به‌طور دقیق و مقایسه‌ای به بررسی تأثیر شیوه‌های کم‌آبیاری RDI و PRD در رژیم‌های مختلف آبیاری بر ارزن مرواریدی هیبرید (رقم نوتریفید) می‌پردازد و بدین ترتیب امکان شناسایی راهکارهای جدید و بهینه برای بهبود عملکرد و بهره‌وری آب در این منطقه خشک را فراهم می آورد.

مواد و روش‌ها

موقعیت جغرافیایی و ویژگی‌های اقلیمی محل اجرای آزمایش

این پژوهش در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه شهید باهنر کرمان، واقع در طول جغرافیایی ۳۰ درجه و ۲۰ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۵۷ درجه و ۱۰ دقیقه شمالی، طی دو فصل زراعی ۱۳۹۶ و ۱۳۹۷ انجام شد. بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی آمبرژه، منطقه مورد مطالعه دارای اقلیم خشک با تابستان‌های گرم و زمستان‌های معتدل است (مزیدی و همکاران، ۱۴۰۰). میانگین دمای سالانه این منطقه حدود ۱۷/۴ درجه سلسیوس است و بیشینه و کمینه دما به‌ترتیب ۲۶/۲ و ۸/۶ درجه سلسیوس ثبت شده است. این منطقه در ارتفاع ۱۷۵۴ متری از سطح دریا قرار دارد. متوسط رطوبت نسبی سالانه ۳۱/۵ درصد، متوسط بارندگی سالانه حدود ۱۲۴/۳ میلی‌متر و میانگین تبخیر سالانه ۲۷۹۲/۳ میلی‌متر گزارش شده است.

مشخصات طرح آماری و تیمارهای آزمایش

این پژوهش به‌صورت کرت‌های خرد شده نواری در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار و هشت تیمار اجرا شد. عامل اصلی افقی شامل دو سناریوی مدیریتی کم‌آبیاری، یعنی آبیاری ناقص ریشه به‌طور متغیر (PRD) و کم‌آبیاری تنظیم شده (RDI) بود. عامل اصلی عمودی نیز شامل چهار سطح آبیاری به میزان ۴۰ درصد (I40)، ۶۰ درصد (I60)، ۸۰ درصد (I80) و ۱۰۰ درصد (I100) نیاز آبی گیاه بود.

آزمون خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک

برای ارزیابی دقیق وضعیت خاک پیش از عملیات آماده‌سازی زمین و اجرای نقشه آزمایش، نمونه‌برداری از عمق صفر تا ۸۰ سانتی‌متری خاک در ۱۰ نقطه مختلف از مزرعه انجام شد. این نمونه‌برداری‌ها به‌منظور تعیین بافت خاک، بررسی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی و ارزیابی وضعیت عناصر غذایی موجود در خاک صورت گرفت. نتایج آزمون خاک بر روی نمونه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش قبل از کشت

عمق خاک (cm)	FC	PWP	EC (dS/m)	pH	Na	Ca	Mg	ESP	شن	سیلت	رس	بافت
	(درصد وزنی)				(meq/L)			(%)				
0-20	12	5	3.30	7.89	4.62	3.80	4.28	8.32	68	17	15	شن لومی
20-40	20	8	1.80	8.09	5.81	2.50	3.00	4.04	14	62	24	سیلتی لوم
40-60	16	8	0.90	8.09	5.12	2.10	1.70	3.52	34	55	11	سیلتی لوم
60-80	15	7	0.80	8.06	4.25	2.00	2.00	3.86	20	71	9	سیلتی لوم

عملیات آماده‌سازی زمین و کاشت

عملیات آماده‌سازی زمین و کاشت بر اساس روش معمول منطقه انجام شد. بر اساس نتایج آزمون خاک، کودهای مصرفی شامل ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار سوپر فسفات تریپل و ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار اوره بودند. همه کود فسفاته به همراه نیمی از کود ازته در مرحله آماده‌سازی مزرعه و پیش از کاشت به خاک افزوده شدند. نیمه باقی مانده کود ازته به‌صورت سرک در مرحله ساقه‌دهی به مزرعه اضافه شد. سپس، کاشت بذرهای ارزن مرواریدی هیبرید (رقم نوتریفید) به‌صورت دستی و با روش خشکه کاری در دو سال متوالی در اواسط خرداد ماه انجام گرفت. بذرها در کرت‌های چهار ردیفی به طول پنج متر، با فاصله ۲۰ سانتی‌متر روی ردیف‌ها و فاصله بین خطوط ۷۵ سانتی متر، در عمق سه تا الی سانتی‌متری کاشته شدند. فاصله بین کرت‌ها ۱/۵ متر و فاصله بین تکرارها دو متر در نظر گرفته شد. در طول فصل زراعی در هر دو سال، تمامی مراقبت‌های لازم از مزرعه شامل مصرف کود سرک، واکاری، تنک کردن، وجین علف‌های هرز، و کنترل آفات و بیماری‌ها انجام شد. آبیاری به روش قطره‌ای نوار (تیپ) انجام گرفت، به‌گونه‌ای که نوارهای آبیاری قطره‌ای دو طرف ردیف‌های کشت قرار داده شدند (شکل ۱). سیستم آبیاری تحت‌فشار به‌گونه‌ای طراحی شد که دو لوله لاترال در دو طرف هر ردیف کشت نصب شد. فاصله قطره‌چکان‌ها ۲۰ سانتی‌متر و دبی خروجی هر قطره‌چکان ۱/۳ لیتر بر ساعت بود.

شکل ۱- نمای کلی از مزرعه تحقیقاتی و سیستم آبیاری قطره‌ای نواری مورد استفاده در پژوهش

در روش‌های آبیاری کامل و RDI، گیاهان از هر دو طرف آبیاری شدند. اما در روش PRD، آبیاری به‌صورت تناوبی انجام شد؛ به‌گونه‌ای که در هر نوبت آبیاری، تنها یکی از لوله‌های آبده فعال بود تا نیمی از سیستم ریشه خشک بماند. بنابراین، پس از هر دو نوبت آبیاری، محل جریان آب از سمت مرطوب به سمت خشک تغییر می‌کرد. حجم آب مورد نیاز برای آبیاری هر کرت با استفاده از کنتور حجمی دقیق اندازه‌گیری گردید. تا زمان استقرار کامل گیاهان، همه کرت‌ها به میزان یکسان آبیاری شدند و پس از آن، تیمارهای آبیاری اعمال شد. آبیاری برای همه تیمارها با دور ثابت سه روز انجام شد و تعداد دفعات آبیاری در تمامی تیمارها یکسان بود، اما حجم آب مصرفی تفاوت داشت. در سال اول، ۳۰ نوبت و در سال دوم، ۳۱ نوبت آبیاری انجام شد. کیفیت آب آبیاری (آب چاه) مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۲، و حجم آب مصرفی تیمارهای مختلف رژیم آبیاری در روش‌های PRD و RDI (بر حسب مترمکعب در هکتار) طی فصل رشد در دو سال زراعی در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۲- ویژگی‌های شیمیایی آب آبیاری مورد استفاده در پژوهش

Na^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	SO_4^{2-}	Cl^-	HCO_3^-	CO_3^{2-}	EC (dS/m)	pH
(meq/L)								
6.2	1.2	7.2	12.60	1.80	0.20	0.00	1.18	7.30

جدول ۳- حجم آب مصرفی تیمارهای مختلف رژیم آبیاری در روش‌های کم‌آبیاری تنظیم‌شده (RDI) و آبیاری ناقص ریشه به‌طور متغیر (PRD) طی دو سال زراعی

رژیم آبیاری	۴۰ درصد نیاز آبی گیاه		۶۰ درصد نیاز آبی گیاه		۸۰ درصد نیاز آبی گیاه		۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه	
سال زراعی	اول	دوم	اول	دوم	اول	دوم	اول	دوم
میانگین مقدار آب مصرفی (m^3/ha)	2522.67	2677.76	3784.00	4016.64	5045.33	5355.53	6306.67	6694.41

نیاز آبی گیاهان در هر دوره آبیاری با استفاده از لایسیمتر بیلان آبی (زهکش‌دار) استوانه‌ای با قطر ۱/۶ متر و ارتفاع یک متر تعیین شد. برای نصب لایسیمتر در مزرعه، گودالی بزرگ‌تر از ابعاد آن حفر شد و لایسیمتر به نحوی در آن قرار گرفت که لبه آن ۱۰ سانتی‌متر بالاتر از سطح خاک باشد تا از ورود آب آبیاری حاشیه به داخل لایسیمتر جلوگیری شود (شکل ۲). کف لایسیمتر به‌صورت شیب‌دار طراحی‌شده و انتهای آن به‌وسیله لوله‌ای به خارج متصل گردید تا زه‌آب به محل اندازه‌گیری هدایت شود. در کف لایسیمتر، لایه‌ای به ضخامت ۱۵ سانتی‌متر از شن قرار داده شد و روی آن توری فلزی نصب گردید تا از شسته‌شدن ذرات خاک جلوگیری شود. سپس لایسیمتر با خاک محل حفر گودال، با در نظر گرفتن ترتیب لایه‌های پروفیل خاک، پر شد. برای فشرده‌سازی خاک، خاک داخل لایسیمتر طی چند مرحله فشرده و چند نوبت آبیاری شد. پس از نشست کامل خاک، لایسیمتر مجدداً تا سطح موردنظر با خاک پر شد. در زمان کشت و پس از آن، شرایط استاندارد استفاده از لایسیمتر رعایت شد. آب اضافی از طریق لوله زهکش تعبیه‌شده در انتهای لایسیمتر به ظرف مدرج منتقل شد و حجم آن اندازه‌گیری گردید. برای اندازه‌گیری رطوبت خاک داخل لایسیمتر از تانسیومتر استفاده شد. در طول فصل زراعی، نیاز آبی ارزن مرواریدی در هر نوبت آبیاری با استفاده از لایسیمتر زهکش‌دار و معادله بیلان آبی خاک (رابطه ۱) محاسبه شد (آلن و همکاران، ۱۹۹۸):

$$ET_c = I+P-D\pm\Delta S \quad (۱)$$

در این معادله، ETc: نیاز آبی یا میزان تبخیر- تعرق گیاه (میلی‌متر)، I: میزان آب آبیاری (میلی‌متر)، P: میزان بارندگی (میلی‌متر)، D: میزان آب زهکشی شده (میلی‌متر) و ΔS: تغییرات رطوبت خاک یا تغییر در عمق آب موجود در پروفیل خاک (میلی‌متر) است.

شکل ۲- لایسیمتر مورد استفاده در محل اجرای آزمایش

ارزیابی خصوصیات مختلف در مرحله پایانی رشد

در پایان دوره رشد ارزن مرواریدی در اواسط شهریور ماه، به‌منظور حذف اثرات حاشیه‌ای، ردیف‌های کناری و نیم متر از ابتدا و انتهای هر ردیف حذف شدند. سپس از دو ردیف مرکزی هر تکرار و تیمار، ۱۰ بوته به‌طور تصادفی انتخاب و نمونه‌برداری شد. نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل شدند و ویژگی‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفتند. ابتدا، عملکرد علوفه تر (ساقه و برگ) با استفاده از ترازوی دیجیتالی اندازه‌گیری شد. سپس، نمونه‌ها به مدت سه هفته در دمای ۲۵ درجه سلسیوس خشک شدند و عملکرد علوفه خشک (ساقه و برگ) تعیین گردید (اسدی و همکاران، ۱۳۹۷). همچنین، درصد پروتئین علوفه خشک

و عملکرد پروتئین علوفه خشک نیز اندازه‌گیری شد. در این مطالعه، کارایی مصرف آب آبیاری بر اساس عملکرد علوفه تر و خشک طبق رابطه ۲ محاسبه شد:

$$IWUE = Y_T/V_T \qquad (۲)$$

که در آن: IWUE: کارایی مصرف آب آبیاری (t/m^3)، Y_T: عملکرد علوفه (t/ha) و V_T: میزان کل حجم آب آبیاری مصرفی در طول فصل (m^3/ha) است.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

پس از مرتب‌سازی داده‌ها، تجزیه و تحلیل آماری با استفاده از روش‌های مختلف انجام شد. نرمال بودن داده‌های آزمایشی با استفاده از آزمون شاپیرو–ویلک و رویه Proc Univariate بررسی شد. برای ارزیابی همگنی واریانس خطا، از آزمون بارتلت استفاده شد. تجزیه واریانس مرکب با استفاده از رویه Proc GLM و مقایسه میانگین‌ها بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد انجام گرفت. همچنین، همبستگی بین متغیرها با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون بررسی شد. محاسبات آماری با استفاده از نرم‌افزارهای SAS نسخه ۹/۴، SPSS نسخه ۲۴ و برنامه Excel انجام شدند.

نتایج و بحث

تجزیه واریانس مرکب صفات مختلف گیاه ارزن مرواریدی هیبرید

نتایج تجزیه واریانس مرکب (جدول ۴) مربوط به صفات گیاه ارزن مرواریدی هیبرید (رقم نوتریفید) نشان داد که اثر سال بر عملکرد پروتئین علوفه خشک در سطح احتمال پنج درصد و بر سایر صفات در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار است. این نتایج نشان می‌دهد که تغییرات سالیانه، از جمله تفاوت در شرایط اقلیمی مانند بارندگی، دما و دیگر عوامل محیطی، می‌توانند تأثیر قابل توجهی بر این صفات داشته باشند. اثرات ساده کم‌آبیاری و رژیم آبیاری بر همه صفات مورد مطالعه معنی‌دار بود. اثر متقابل سال × کم‌آبیاری فقط بر درصد و عملکرد پروتئین علوفه خشک ($P < 0.01$) و اثر متقابل سال × رژیم آبیاری بر کارایی مصرف آب آبیاری بر اساس عملکرد علوفه خشک در سطح احتمال پنج درصد و بر سایر صفات در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. علاوه بر این، اثر متقابل کم‌آبیاری × رژیم آبیاری بر عملکرد علوفه خشک، کارایی مصرف آب آبیاری بر اساس عملکرد علوفه خشک و عملکرد پروتئین علوفه خشک ($P < 0.05$) و نیز بر عملکرد علوفه تر و درصد پروتئین علوفه خشک ($P < 0.01$) معنی‌دار بود. با این‌حال، اثر متقابل سال × کم‌آبیاری × رژیم آبیاری فقط بر درصد پروتئین علوفه خشک ($P < 0.01$) معنی‌دار بود. این نتایج نشان می‌دهد که شرایط محیطی مختلف، از جمله سال‌های متفاوت، کم‌آبیاری و رژیم‌های آبیاری و تعامل آن با عوامل ژنتیکی بر صفات ارزن مرواریدی هیبرید تأثیرگذار بوده و در مدیریت بهینه تولید علوفه و منابع آبی اهمیت دارند.

مقایسه میانگین اثرات ساده کم‌آبیاری

نتایج مقایسه میانگین اثرات ساده کم‌آبیاری بر صفات مختلف گیاه ارزن مرواریدی هیبرید (رقم نوتریفید) در دو سال زراعی در جدول ۵ ارائه شده است. نتایج نشان داد که روش PRD به‌طور معنی‌داری باعث افزایش همه صفات مورد مطالعه در مقایسه با RDI شد. این افزایش شامل عملکرد علوفه تر (۱۴/۶۴ درصد)، عملکرد علوفه خشک (۱۰/۵۸ درصد)، کارایی مصرف آب آبیاری بر اساس عملکرد علوفه تر (۱۴/۷۱ درصد)، کارایی مصرف آب آبیاری بر اساس عملکرد علوفه خشک (۱۱/۴۳ درصد)، درصد پروتئین علوفه خشک (۲۶/۸۷ درصد) و عملکرد پروتئین علوفه خشک (۳۵/۸۵ درصد) بود. به‌طورکلی، با توجه به یافته‌های موجود، PRD به‌دلیل بهبود توزیع آب در گیاه و حفظ بهتر رطوبت برگ‌ها، می‌تواند به‌عنوان یک روش مؤثر در افزایش عملکرد و کیفیت گیاهان مورد استفاده قرار گیرد. همچنین، PRD می‌تواند باعث افزایش IWUE در گیاهان علوفه‌ای بدون کاهش

بیوماس و بهبود ویژگی‌های فیزیولوژیکی مانند مقاومت به اکسیداسیون، تنظیم سازگاری اسمزی، فتوسنتز و محتوای کلروفیل در برگ‌ها شود (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۹). با توجه به نتایج به‌دست آمده، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که روش PRD در مقایسه با روش RDI برتر است، به‌ویژه زمانی که هدف افزایش عملکرد و بهبود کیفیت علوفه است. علوفه تولید شده با روش PRD از نظر کمیت و کیفیت در سطح بالاتری قرار دارد و می‌تواند به‌عنوان یک راهکار مؤثر در بهبود تولیدات کشاورزی و کیفیت محصولات مورد استفاده قرار گیرد. در پنبه، روش PRD با افزایش غلظت ABA در شیره زایلم (بافت چوبی) و کاهش هدایت روزنه‌ها، منجر به کاهش تعرق و افزایش بهره‌وری آب شد (لی و همکاران، ۲۰۱۷). مطالعه‌ای روی ذرت نیز نشان داد که IWUE در روش PRD بیشتر از روش RDI بود و این روش با افزایش نسبت سطح ریشه به برگ و هدایت هیدرولیکی ریشه، به بهبود بهره‌وری آب و حفظ عملکرد فتوسنتز کمک کرد (ژنچانگ و همکاران، ۲۰۱۶). این مطالعات با نتایج ما همخوانی داشت. احمد و همکاران (۲۰۲۰) نیز گزارش کردند که ویژگی‌های عملکرد گندم در آبیاری معمولی بیشتر از PRD بود، درحالی‌که مقدار نیتروژن، فسفر، و پتاسیم (NPK) دانه و بهره‌وری آب در تیمار PRD بالاتر بود.

جدول ۴- تجزیه واریانس مرکب صفات کارایی مصرف آب، عملکرد و کیفیت علوفه ارزن مرواریدی هیبرید (رقم نوتریفید) در تیمارهای مختلف کم‌آبیاری و رژیم آبیاری در دو سال زراعی

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات: عملکرد علوفه تر	عملکرد علوفه خشک	درصد پروتئین علوفه خشک	عملکرد پروتئین علوفه خشک	کارایی مصرف آب آبیاری بر اساس عملکرد علوفه تر	کارایی مصرف آب آبیاری بر اساس عملکرد علوفه خشک
سال	1	2626.85**	54.85**	74.68**	222704*	108.96**	1.85**
تکرار (سال)	4	7.34	0.51	0.56	12334	0.24	0.02
کم‌آبیاری (a)	1	662.38**	16.91*	54.34**	1449167**	31.88**	0.93*
سال × کم‌آبیاری	1	11.18n.s	0.34n.s	14.16**	208510**	0.55n.s	0.01n.s
خطا (Ea)	4	13.25	1.73	0.43	8478	0.85	0.10
رژیم آبیاری (b)	3	4924.23**	199.35**	14.40**	812173**	9.22**	0.37*
سال × رژیم آبیاری	3	196.16**	4.67n.s	5.43**	310852**	12.22**	0.29*
خطا (Eb)	12	16.21	1.46	0.64	21155	0.96	0.07
کم‌آبیاری × رژیم آبیاری (ab)	3	62.32**	2.14*	10.12**	49777*	1.19n.s	0.15*
سال × کم‌آبیاری × رژیم آبیاری	3	9.50n.s	0.45n.s	2.11**	36016n.s	0.41n.s	0.01n.s
خطا (Eab)	12	8.16	0.63	0.25	13105	0.43	0.03
ضریب تغییرات (CV, %)	-	5.24	6.74	5.62	11.33	5.54	6.62
ضریب تبیین (R^2, %)	-	99.49	98.96	98.80	97.38	97.75	94.92

*، ** و ns: به ترتیب معنی‌دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد و غیر معنی‌دار

مقایسه میانگین اثرات ساده رژیم آبیاری

نتایج مقایسه میانگین اثرات ساده رژیم آبیاری بر صفات مختلف گیاه ارزن مرواریدی هیبرید (رقم نوتریفید) در دو سال زراعی (جدول ۶) نشان داد که بالاترین میزان عملکرد علوفه تر ($۷۳/۱۴ t ha^{-1}$) متعلق به تیمار I100 بود. کاهش میزان آب آبیاری به‌طور معنی‌داری باعث کاهش عملکرد علوفه تر، به‌ویژه در تیمارهای I40 و I60 به‌ترتیب با کاهش ۵۹/۵۵ و ۳۶/۳۵ درصدی شد. کاهش محتوای آب خاک جذب عناصر ضروری مانند نیتروژن و فسفر را مختل کرده و عملکرد گیاه را کاهش می‌دهد، زیرا ریشه‌ها در شرایط خشکی توانایی جذب کافی مواد مغذی را ندارند (جهان‌زاد و همکاران، ۲۰۱۳). با این حال، تیمار I80 با کاهش کمتر و معنی‌دار عملکرد، به‌عنوان گزینه‌ای مناسب برای مدیریت مصرف آب معرفی شد. این نتایج نشان می‌دهد که آبیاری با ۸۰ درصد نیاز آبی، ضمن کاهش مصرف آب، می‌تواند سطح قابل قبولی از عملکرد محصول را در شرایط کم‌آبی حفظ کند.

بر اساس نتایج مقایسه میانگین‌ها، تیمار I100 با عملکرد علوفه خشک $۱۵/۴۳ t ha^{-1}$ بالاترین میزان را داشت و تفاوت معنی‌داری با I80 نشان نداد. تیمارهای I40 و I60 به‌ترتیب با کاهش ۵۷/۰۰ و ۳۳/۲۳ درصدی نسبت به I100، کمترین عملکرد را داشتند. در شرایط تنش آبی، کاهش ماده خشک به کاهش فشار آماس سلول‌ها و سطح برگ مرتبط است که منجر به کاهش نرخ فتوسنتز می‌شود. این کاهش ناشی از محدودیت‌های بیوشیمیایی و آسیب به رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی، به‌ویژه کلروفیل‌ها است (لاولر و کرنیک، ۲۰۰۲). واسایا و همکاران (۲۰۲۱) نشان دادند که حفظ پتانسیل اسمزی می‌تواند اثرات نامطلوب خشکی را کاهش دهد، اما افزایش تنش خشکی موجب کاهش وزن و ماده خشک اندام‌های هوایی ذرت شد.

جدول ۵- مقایسه میانگین اثرات ساده کم‌آبیاری بر صفات کارایی مصرف آب، عملکرد و کیفیت علوفه ارزن مرواریدی هیبرید (رقم نوتریفید) در دو سال زراعی

کم‌آبیاری (a)	عملکرد علوفه تر ($t ha^{-1}$)	عملکرد علوفه خشک ($t ha^{-1}$)	درصد پروتئین علوفه خشک	عملکرد پروتئین علوفه خشک ($kg ha^{-1}$)	کارایی مصرف آب آبیاری بر اساس عملکرد علوفه تر (t/m^3)	کارایی مصرف آب آبیاری بر اساس عملکرد علوفه خشک (t/m^3)
آبیاری ناقص ریشه به طور متغیر (PRD)	58.19^{a}	12.33^{a}	10.01^{a}	1167.16^{a}	12.71^{a}	2.73^{a}
کم آبیاری تنظیم شده (RDI)	50.76^{b}	11.15^{b}	7.89^{b}	859.16^{b}	11.08^{b}	2.45^{b}

میانگین‌ها با آزمون دانکن مقایسه شده‌اند (α=۵٪) و تفاوت میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک معنی‌دار نیست

بر اساس نتایج مقایسه میانگین تیمارها، I80 با مقدار $۱۳/۱۴ t/m^3$ بالاترین کارایی مصرف آب بر اساس عملکرد علوفه تر را داشت و در مقایسه با I100 افزایش ۱۶/۸۰ درصدی نشان داد. اگرچه تیمارهای I40 و I60، IWUE کمتری نسبت به I80 داشتند، اما تفاوت معنی‌داری با I100 نداشتند. برای کارایی مصرف آب بر اساس عملکرد علوفه خشک، تیمار I80 بالاترین کارایی را نشان داد و با تیمار I60 اختلاف معنی‌داری نداشت، اما نسبت به I100 افزایش ۱۷/۶۵ درصدی نشان داد. این نتایج نشان می‌دهند که تأمین کامل نیاز آبی گیاه لزوماً بهینه‌ترین IWUE را به همراه ندارد. به‌طور کلی، نتایج بیانگر این است که در شرایط کم‌آبی، کاهش آبیاری تا ۸۰ درصد می‌تواند IWUE و عملکرد علوفه تر را بهبود بخشد، ولی کاهش بیشتر از آن تأثیر منفی خواهد داشت.

مطالعات اخیر روی سورگوم نیز تأثیر مثبت آبیاری محدود و تنش خشکی بر بهبود IWUE را تأیید کرده‌اند. این تأثیر احتمالاً به‌دلیل کاهش تبخیر و بسته شدن یا کاهش تعداد روزنه‌های برگ است و با نتایج مطالعه ما همخوانی دارد (فرهادی و همکاران، ۲۰۲۲؛ قالخانی و همکاران، ۲۰۲۳). علاوه بر این، ساناتاوای و همکاران (۲۰۲۱) گزارش کردند که آبیاری بیش از حد (۱۰۴ درصد تبخیر و تعرق) به‌طور معنی‌داری IWUE ذرت را کاهش

می‌دهد. خشائی و همکاران (۱۳۹۸) بیان کردند که کاهش ۲۸ درصدی آبیاری با افزایش بهره‌وری آب می‌تواند در مناطق کم‌آب راهکاری مناسب برای بازدهی بیشتر باشد. آن‌ها گزارش کردند که بیشترین IWUE (۲/۹۸ کیلوگرم بر هکتار) با کم‌آبیاری ۷۵ درصد نیاز آبی خالص گیاه حاصل شد.

بر اساس نتایج مقایسه میانگین، بیشترین درصد پروتئین علوفه خشک (۱۰/۳۸ درصد) در تیمار I40 مشاهده شد که نسبت به تیمار I100، با ۷/۷۴ درصد، ۳۴/۱۱ درصد فزایش داشت. این افزایش احتمالاً به تأثیرات مثبت محدودیت آبی در تحریک تولید پروتئین به‌عنوان مکانیسم دفاعی گیاه در برابر تنش آبی مرتبط است. تیمار I60 نیز باعث کاهش معنی‌دار ۱۳ درصدی پروتئین علوفه خشک نسبت به تیمار I40 شد، اما اختلاف معنی‌داری با تیمار I80 نداشت. کمترین درصد پروتئین مربوط به تیمار I100 بود که احتمالاً به‌دلیل فراهم بودن آب کافی و عدم وجود تنش آبی یا فشارهای محیطی رخ داده است که برای تحریک تولید پروتئین‌های دفاعی ضروری هستند.

تیمار I40 با کمترین میزان عملکرد پروتئین علوفه خشک، حدود ۴۳ درصد کمتر از تیمار I100 بود. عملکرد پروتئین در تیمار I60 نیز نسبت به I100، ۲۲/۸۴ درصد کاهش یافت. تیمار I100 بالاترین عملکرد پروتئین را داشت و با I80 تفاوت معنی‌داری نشان نداد. این نتایج نشان می‌دهند که کاهش آبیاری از ۱۰۰ درصد به ۸۰ درصد نیاز آبی، عملکرد مطلوب پروتئین علوفه خشک را حفظ می‌کند، اما کاهش بیشتر به ۴۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی، موجب افت عملکرد پروتئین می‌شود. بنابراین، آبیاری در سطح ۸۰ درصد نیاز آبی، تعادلی بهینه بین بهره‌وری آب و عملکرد پروتئین ایجاد می‌کند.

تحقیقات نشان داده است که سطوح آبیاری تأثیر چشمگیری بر عملکرد و کیفیت علوفه ارزن مرواریدی دارد. آبیاری کامل بالاترین عملکرد و کیفیت را، شامل افزایش محتوای پروتئین خام و ماده خشک، فراهم می‌کند. با این حال، در شرایط آبیاری محدود نیز می‌توان به عملکردی قابل قبول همراه با راندمان مصرف آب بالاتر دست یافت. علاوه بر این، اثر متقابل آبیاری و نیتروژن می‌تواند به بهبود بیشتر عملکرد و کیفیت علوفه منجر شود (راوال و همکاران، ۲۰۱۴؛ پاریک و همکاران، ۲۰۱۵؛ کروکستون و همکاران، ۲۰۲۰). پژوهش‌های پیشین نتایجی مشابه با یافته‌های این مطالعه ارائه کرده‌اند. کاهش آبیاری از I100 به I40 در ارزن مرواریدی باعث کاهش ماده خشک کل و شاخص سطح برگ شده است، درحالی‌که IWUE و درصد پروتئین خام به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته‌اند، که احتمالاً به تجمع کربوهیدرات‌ها و افزایش محتوای نیتروژن در گیاه تحت تنش آبی مرتبط است (رستم‌زا و همکاران، ۲۰۱۱). علاوه بر این، بررسی‌های اخیر نشان داده‌اند که کاهش آبیاری نسبت به آبیاری معمولی، به کاهش ۲۰/۳ درصدی عملکرد علوفه خشک و ۱۲/۶ درصدی عملکرد پروتئین در ارزن مرواریدی منجر می‌شود (راغب بخیط الوافی و همکاران، ۲۰۲۱). مطالعات مشابه روی گیاهانی مانند سورگوم نشان داده‌اند که کاهش مصرف آب در مراحل رشد به تغییرات عملکرد و کیفیت علوفه منجر می‌شود. تنش آبی متوسط و شدید، عملکرد علوفه خشک و پروتئین را ۲۰ تا ۳۴ درصد کاهش داده است، اما برخی شاخص‌های کیفی مانند پروتئین خام و قابلیت هضم ماده خشک بهبود یافته‌اند (جهان‌زاد و همکاران، ۲۰۱۳). این نتایج که با یافته‌های ما همسو هستند، بر اهمیت تأثیر سطوح آبیاری در عملکرد و کیفیت علوفه تأکید می‌کنند.

مقایسه میانگین اثرات متقابل کم‌آبیاری در رژیم آبیاری

نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل کم‌آبیاری × رژیم آبیاری بر صفات ارزن مرواریدی هیبرید (جدول ۷) نشان داد که بالاترین میانگین عملکرد علوفه تر ($t\ ha^{-1}$ ۸۰/۲۰) در تیمار PRD100 مشاهده شد که اختلاف معنی‌داری با سایر تیمارها داشت. در سطح مشابه تأمین آب، عملکرد علوفه تر در روش RDI معادل ۶۶/۰۹ تن در هکتار بود. این نتایج نشان می‌دهد که افزایش رژیم آبیاری

تا ۱۰۰ درصد، به‌ویژه در روشPRD، تأثیر مثبتی بر عملکرد علوفه تر دارد، درحالی‌که در روش RDI حتی با تأمین کامل آب، عملکرد کمتری حاصل شد. همچنین، عملکرد علوفه تر در تیمار PRD80 بیشتر از تیمار RDI80 بود و کمترین میانگین عملکرد (۲۶/۷۹ $t\ ha^{-1}$) نیز در تیمار RDI40 ثبت شد. به‌طورکلی، کاهش آب آبیاری باعث کاهش عملکرد علوفه تر در هر دو روش شد، اما روش PRD تحت شرایط مختلف تأمین آب نسبت به RDI عملکرد بهتری نشان داد. حاجی‌راد و همکاران (۱۴۰۰) گزارش کردند که در سیستم آبیاری قطره‌ای، بالاترین عملکرد علوفه تر ذرت (۸۶/۶۷ تن در هکتار) در تیمار آبیاری پالسی با ۱۲۰ درصد نیاز آبی و کمترین آن (۲۳/۳۸ تن در هکتار) در تیمار آبیاری پالسی با ۶۰ درصد نیاز آبی مشاهده شد.

بیشترین عملکرد علوفه خشک (۱۶/۲۷ تن در هکتار) در تیمار PRD100 و کمترین عملکرد (۵/۹۶ تن در هکتار) در تیمار RDI40 مشاهده شد. افزایش تأمین نیاز آبی در هر دو روش کم‌آبیاری عملکرد علوفه خشک را به‌طور معنی‌داری بهبود بخشید. در روش PRD، با تأمین ۸۰ درصد نیاز آبی، عملکرد به ۱۵/۴۷ تن در هکتار رسید که تفاوت معنی‌داری با حداکثر عملکرد نداشت. در مقابل، در روش RDI، بیشترین عملکرد (۱۴/۶۰ تن در هکتار) در آبیاری کامل به‌دست آمد که کمی کمتر از PRD80 بود اما این تفاوت معنی‌دار نبود. این نتایج نشان‌دهنده کارآمدی بیشتر روش PRD در شرایط تأمین آب کامل و حساسیت بیشتر RDI به محدودیت‌های آبی است. تیمار PRD80 به‌عنوان بهترین گزینه اقتصادی و بهره‌وری مطرح می‌شود، زیرا با ۲۰ درصد کاهش مصرف آب، عملکردی مشابه آبیاری کامل ارائه می‌دهد. این تیمار با صرفه‌جویی در مصرف آب و حفظ عملکرد مطلوب، گزینه‌ای کارآمد و مقرون‌به‌صرفه برای بهبود عملکرد علوفه خشک در شرایط کم‌آبی است و به‌عنوان روشی پایدار در مدیریت منابع آب پیشنهاد می‌شود. بر اساس مطالعه ژانگ و همکاران (۲۰۲۳)، روش PRD با ۷۰ و ۸۵ درصد نیاز آبی گیاه بررسی شد. نتایج نشان داد که این روش با کاهش مصرف آب، باعث افزایش جذب فسفر در گیاه یونجه و حفظ عملکرد علوفه شد. این یافته‌ها بر کارایی بالای PRD در حفظ عملکرد با مصرف کمتر آب تأکید دارد و با نتایج مطالعه حاضر هم‌سو است. همچنین، مطالعات روی ذرت نشان داده‌اند که افزایش کمبود آب در روش RDI به کاهش تدریجی و قابل‌توجه عملکرد منجر می‌شود. به‌ویژه، کمبود شدید آب در مرحله رشد رویشی باعث کاهش ارتفاع، سطح برگ و رشد گیاه می‌شود، که با یافته‌های پژوهش ما مطابقت دارند (چی و همکاران، ۲۰۲۰؛ جیائو و همکاران، ۲۰۲۴).

کارآیی استفاده از آب آبیاری می‌تواند با استفاده از مدیریت خاک، پرورش گیاه، مدیریت آب، انتخاب ژنتیکی و مدیریت رقابت گیاهان بهبود یابد (فاروق و همکاران، ۲۰۱۹). نتایج نشان داد که بالاترین کارایی مصرف آب آبیاری بر اساس عملکرد علوفه تر، معادل ۱۳/۷۴ تن بر مترمکعب، متعلق به تیمار PRD80 بود. پس از آن، تیمار RDI80 با کارایی مصرف آب ۱۲/۵۴ تن بر مترمکعب در رتبه بعدی قرار گرفت که تفاوت معنی‌داری با تیمارهای PRD40، PRD60 و PRD100 نداشت. در مقابل، کمترین IWUE در تیمارهای RDI40 و RDI100 مشاهده شد.

جدول ۶- مقایسه میانگین اثرات ساده رژیم آبیاری بر صفات کارایی مصرف آب، عملکرد و کیفیت علوفه ارزن مرواریدی هیبرید (رقم نوتریفید) در دو سال زراعی

رژیم آبیاری (b)	عملکرد علوفه تر ($t\ ha^{-1}$)	عملکرد علوفه خشک ($t\ ha^{-1}$)	درصد پروتئین علوفه خشک	عملکرد پروتئین علوفه خشک ($kg\ ha^{-1}$)	کارایی مصرف آب آبیاری بر اساس عملکرد علوفه تر (t/m^3)	کارایی مصرف آب آبیاری بر اساس عملکرد علوفه خشک (t/m^3)
آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی گیاه	29.58^{d}	6.64^{c}	10.38^{a}	682.07^{c}	11.31^{b}	2.54^{bc}
آبیاری بر اساس ۶۰ درصد نیاز آبی گیاه	46.56^{c}	10.31^{b}	9.03^{b}	923.77^{b}	11.88^{b}	2.64^{ab}
آبیاری بر اساس ۸۰ درصد نیاز آبی گیاه	68.63^{b}	14.58^{a}	8.65^{b}	1240.33^{a}	13.14^{a}	2.80^{a}
آبیاری بر اساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه	73.14^{a}	15.43^{a}	7.74^{c}	1197.14^{a}	11.25^{b}	2.38^{c}

میانگین‌ها با آزمون دانکن مقایسه شده‌اند (α=٪۵) و تفاوت میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک معنی‌دار نیست

جدول ۷- مقایسه میانگین اثرات متقابل کم‌آبیاری × رژیم آبیاری بر صفات صفات کارایی مصرف آب، عملکرد و کیفیت علوفه ارزن مرواریدی هیبرید (رقم نوتریفید) در دو سال زراعی

کم‌آبیاری (a)	رژیم آبیاری (b)	عملکرد علوفه تر ($t\ ha^{-1}$)	عملکرد علوفه خشک ($t\ ha^{-1}$)	درصد پروتئین علوفه خشک	عملکرد پروتئین علوفه خشک ($kg\ ha^{-1}$)	کارایی مصرف آب آبیاری بر اساس عملکرد علوفه تر (t/m^3)	کارایی مصرف آب آبیاری بر اساس عملکرد علوفه خشک (t/m^3)
آبیاری ناقص ریشه به‌طور متغیر (PRD)	آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی گیاه	32.38^{f}	7.32^{e}	10.62^{b}	764.86^{d}	12.39^{b}	2.81^{ab}
	آبیاری بر اساس ۶۰ درصد نیاز آبی گیاه	48.48^{d}	10.28^{d}	11.41^{a}	1155.20^{b}	12.37^{b}	2.63^{bc}
	آبیاری بر اساس ۸۰ درصد نیاز آبی گیاه	71.71^{b}	15.47^{ab}	9.45^{c}	1418.70^{a}	13.74^{a}	2.97^{a}
	آبیاری بر اساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه	80.20^{a}	16.27^{a}	8.59^{d}	1399.57^{a}	12.34^{b}	2.51^{c}
کم آبیاری تنظیم شده (RDI)	آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی گیاه	26.79^{g}	5.96^{f}	10.14^{b}	599.28^{e}	10.23^{d}	2.28^{d}
	آبیاری بر اساس ۶۰ درصد نیاز آبی گیاه	44.63^{e}	10.33^{d}	6.65^{f}	692.33^{de}	11.39^{c}	2.64^{bc}
	آبیاری بر اساس ۸۰ درصد نیاز آبی گیاه	65.54^{c}	13.70^{c}	7.85^{e}	1061.96^{bc}	12.54^{b}	2.63^{bc}
	آبیاری بر اساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه	66.09^{c}	14.60^{bc}	6.90^{f}	994.71^{c}	10.16^{d}	2.25^{d}

میانگین‌ها با آزمون دانکن مقایسه شده‌اند (α=٪۵) و تفاوت میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک معنی‌دار نیست

به‌طوری‌که IWUE در تیمار RDI80، ۲۳/۴۲ درصد بیشتر از تیمار RDI100 بود. همچنین، تیمارهای PRD40 و PRD60 اختلاف معنی‌داری با تیمار PRD100 نشان ندادند، که بیانگر پایداری کارایی مصرف آب در شرایط مختلف آبیاری ناقص ریشه است.

بیشترین کارایی مصرف آب آبیاری بر اساس عملکرد علوفه خشک (۲/۹۷ تن بر مترمکعب) مربوط به تیمار PRD80 بود و تیمار PRD40 بدون اختلاف معنی دار با PRD80، در رتبه دوم قرار گرفت. در مقابل، تیمارهای RDI100 و RDI40 به‌ترتیب با کارایی مصرف آب ۲/۲۵ و ۲/۲۸ تن بر مترمکعب، پایین‌ترین مقادیر را داشتند. IWUE در PRD80 حدود ۳۲ درصد بیشتر از کمترین مقدار در RDI100 بود. در شرایط آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی، کمترین IWUE در روش RDI و بیشترین مقدار در روش PRD مشاهده شد، که نشان‌دهنده تأثیر مثبت PRD در شرایط تنش خشکی شدید است. در شرایط آبیاری بر اساس ۶۰ درصد نیاز آبی گیاه، اختلاف معنی‌داری بین دو روش PRD و RDI مشاهده نشد، که نشان می‌دهد در شرایط تنش متوسط، تفاوت چندانی در بهره‌وری آب بین این دو روش وجود ندارد. به‌طورکلی، روش PRD80، به‌ویژه در شرایط کم‌آبی، موجب افزایش قابل توجه IWUE و بهبود بهره‌وری آب می‌شود و به‌عنوان یک استراتژی مؤثر برای مدیریت منابع آب و بهبود کشاورزی پایدار پیشنهاد می‌شود. این نتایج با تحقیقات قبلی در مورد ارزن مرواریدی هم‌خوانی دارد (مهرپویان و همکاران، ۱۳۹۰؛ کروکستون و همکاران، ۲۰۲۰). افزایش IWUE احتمالاً به‌دلیل تحریک بهتر ریشه‌ها برای جذب آب و مواد مغذی و همچنین کاهش تبخیر و تعرق است (الهانی و همکاران، ۲۰۱۹). مطالعات مختلف نشان داده‌اند که ارزن مرواریدی در شرایط تنش خشکی، بهره‌وری آب بالاتری نسبت به سایر گیاهان علوفه‌ای دارد (مهرپویان و همکاران، ۱۳۹۰؛ بهاتارای و همکاران، ۲۰۲۰ ب). همچنین، پژوهش‌ها روی مرکبات تحت شرایط کم‌آبیاری نشان داده‌اند که کارایی مصرف آب با کاهش میزان آب افزایش می‌یابد، که با نتایج مطالعه ما همسو است (استگنو و همکاران، ۲۰۲۴). چن و همکاران (۲۰۲۳) گزارش کردند که تیمار RDI در شرایط ۷۵٪ ظرفیت زراعی (FC) باعث افزایش معنی‌دار ارتفاع گیاه، وزن تر و خشک بلال و وزن خشک کل ذرت نسبت به شاهد (آبیاری کامل) شد. همچنین، تیمار PRD به‌طور معنی‌داری عملکرد اقتصادی، کارایی مصرف آب آبیاری بر اساس عملکرد و کارایی مصرف آب آبیاری بر اساس زیست‌توده را نسبت به تیمار RDI افزایش داد. علاوه بر این، تیمار PRD با ۵۰٪ FC باعث کاهش ۷۲ درصدی مصرف آب نسبت به شاهد شد. مطالعات حاجی‌راد و همکاران (۱۴۰۰) نشان داد که در شرایط کمبود آب، استفاده از مدیریت آبیاری پالسی در سیستم آبیاری قطره‌ای و کم‌آبیاری با ۸۰ درصد نیاز آبی گیاه، به بهینه‌سازی مصرف آب و افزایش بهره‌وری در زراعت ذرت علوفه‌ای کمک می‌کند. همچنین، در مطالعه موسوی و همکاران (۱۴۰۱) روی عملکرد، اجزای عملکرد و بهره‌وری مصرف آب گلرنگ، گزارش شد که برای کاهش ۲۰ درصدی مصرف آب، روش RDI80 و برای صرفه‌جویی ۴۰ درصدی در مصرف آب، روش PRD60 مناسب است.

نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل نشان داد که بالاترین درصد پروتئین (۱۱/۴۱) در تیمار PRD60 به دست آمد، درحالی‌که تیمارهای PRD40 و RDI60 نیز درصد پروتئین قابل توجهی داشتند اما تفاوت معنی‌داری بین آن‌ها مشاهده نشد. کمترین درصد پروتئین در تیمارهای RDI60 و RDI100 ثبت شد که اختلاف معنی داری با یکدیگر نداشتند. در روش PRD، افزایش نیاز آبی از ۴۰ به ۶۰ درصد موجب افزایش معنی‌دار درصد پروتئین شد، اما با افزایش نیاز آبی به ۸۰ و ۱۰۰ درصد، کاهش معنی داری در درصد پروتئین مشاهده شد. به‌طور مشابه، در روش RDI نیز درصد پروتئین در آبیاری بر اساس ۴۰ درصد نیاز آبی بیشترین مقدار بود، اما با افزایش نیاز آبی به ۶۰ درصد، به کمترین مقدار کاهش یافت و تفاوتی با آبیاری کامل نداشت. به‌طورکلی، در هر دو روش، افزایش نیاز آبی

از ۴۰ به ۶۰ درصد منجر به تغییرات متفاوتی در درصد پروتئین شد، اما افزایش بیش از این مقدار تأثیر منفی داشت. بر این اساس، آبیاری بر اساس ۶۰ درصد نیاز آبی گیاه بهینه‌ترین روش برای افزایش درصد پروتئین علوفه خشک است. مطالعات پیشین نیز نشان داده‌اند که کاهش نیاز آبی می‌تواند کیفیت محصولات کشاورزی را بهبود بخشد. تحقیقی روی گوجه‌فرنگی نشان داد که روش RDI با کاهش مصرف آب، کیفیت میوه را از طریق افزایش مواد جامد محلول و ویتامین C افزایش می‌دهد. با این حال، کاهش بیش از حد آب ممکن است به افت عملکرد محصول منجر شود (لو و همکاران، ۲۰۱۹). این یافته‌ها بر اهمیت مدیریت متعادل آب تأکید دارند تا ضمن افزایش بهره‌وری، کیفیت محصول نیز حفظ شود.

افزایش درصد پروتئین در گیاه ارزن تحت تنش خشکی، برخلاف بسیاری از غلات مانند گندم، به مجموعه‌ای از تغییرات فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی، ژنتیکی و متابولیکی مرتبط است که در پاسخ به کمبود آب رخ می دهد و باعث سازگاری گیاه با شرایط کم‌آبی می‌شود (چاکرابورتی و همکاران، ۲۰۲۲). یکی از دلایل اصلی این پدیده، تغییر در تخصیص منابع متابولیکی است. در شرایط کم‌آبی، رشد سلولی و میزان فتوسنتز کاهش می‌یابد که این امر موجب کاهش سنتز کربوهیدرات‌ها و نشاسته می‌شود. در نتیجه، گیاه ارزن منابع نیتروژنی خود را به‌جای ذخیره در نشاسته، به مسیرهای سنتز پروتئین اختصاص می‌دهد. این تغییر باعث افزایش نسبت پروتئین به سایر ترکیبات در بافت گیاه می‌شود (قاتک و همکاران، ۲۲۰۱۶؛ شو و همکاران، ۲۰۲۰؛ راغب بخیط الوافی و همکاران، ۲۰۲۱؛ گائو و همکاران، ۲۰۲۳). در مقایسه با گندم، ارزن از نظر سازوکارهای تنظیمی تنش تفاوت‌های قابل‌توجهی دارد. گندم به دلیل حساسیت بیشتر به کم‌آبی، در شرایط خشکی معمولاً با کاهش کارایی جذب نیتروژن مواجه شده و در نتیجه، میزان پروتئین آن کاهش می‌یابد در مقابل، در ارزن ترکیبات فیتوشیمیایی و مسیرهای بیوشیمیایی به‌گونه‌ای تنظیم‌شده‌اند که تنش خشکی منجر به فعال‌سازی آنزیم‌های متابولیکی مرتبط با پروتئین‌سازی می‌شود. این سازوکار، گیاه را قادر می‌سازد تا در شرایط کم‌آبی، از منابع نیتروژنی خود بیشترین بهره را ببرد (قاتک و همکاران، ۲۰۲۱). این تفاوت را می‌توان به ساختار ژنتیکی و تنظیمات فیزیولوژیکی ارزن نسبت داد. در شرایط کم‌آبی، افزایش فعالیت آنزیم‌های تجزیه‌کننده کربوهیدرات‌ها، از جمله آمیلاز، و اختصاص بیشتر مواد آلی به مسیرهای پروتئین‌سازی گزارش شده است. این تغییرات باعث کاهش فعالیت آنزیم‌های سنتزکننده نشاسته می‌شود که در نهایت منجر به افزایش تجمع ترکیبات نیتروژنی در گیاه و بالا رفتن نسبت پروتئین به کربوهیدرات می‌گردد (ژو و همکاران، ۲۰۲۱؛ یانگ و همکاران، ۲۰۲۳). علاوه بر این، مطالعات نشان داده‌اند که تحت تنش خشکی، بیان ژن‌های مسئول سنتز آنزیم‌های متابولیکی و پروتئین‌های ذخیره‌ای در اندام‌های هوایی افزایش می‌یابد. این افزایش فعالیت ژنی منجر به بهبود سنتز پروتئین‌های سازگار با تنش مانند آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و تنظیم‌کننده‌های اسمزی (پرولین و آمینواسیدهای آزاد) می‌شود. این ترکیبات علاوه بر تنظیم اسمزی، در شرایط کمبود آب به‌عنوان اجزای مهم پروتئین‌های سلولی ذخیره می‌شوند و می‌توانند باعث افزایش درصد پروتئین در کل گیاه شوند (ماروِیا و واخاریا، ۲۰۱۶؛ ژو و همکاران، ۲۰۲۱؛ چاکرابورتی و همکاران، ۲۰۲۲). تحقیقات جدید نیز نشان می‌دهند که پروتئین‌های خاص مرتبط با پاسخ به تنش، به‌ویژه در ریشه و برگ‌ها، نقش کلیدی در حفظ تعادل هیدرولیکی و افزایش مقاومت گیاه دارند (قاتک و همکاران، ۲۰۱۶). از سوی دیگر، در تنش خشکی، فعالیت آنزیم‌هایی که در مسیرهای مرتبط با جذب و استفاده از نیتروژن نقش دارند، مانند نیترات ردوکتاز و گلوتامین سنتتاز، افزایش می‌یابد. این امر نه فقط سنتز پروتئین را تقویت می‌کند، بلکه از ذخیره نیتروژن در قالب ترکیبات غیرپروتئینی جلوگیری کرده و باعث افزایش درصد پروتئین در گیاه می‌شود (ماچادو و همکاران، ۲۰۲۳). همچنین، مطالعات پروتئومیک نشان داده‌اند که در ارزن، تحت شرایط خشکی، بیان پروتئین‌های ذخیره‌ای و

پروتئین‌های پاسخ‌دهنده به تنش افزایش می‌یابد. این پروتئین‌ها در حفظ تعادل هیدرولیکی سلول و افزایش مقاومت گیاه به تنش نقش کلیدی دارند (قاتک و همکاران، ۲۰۱۶؛ چاکرابورتی و همکاران، ۲۰۲۲). علاوه بر این، تنش خشکی می‌تواند باعث کاهش فعالیت آنزیم‌های پروتئاز (آنزیم‌های تجزیه‌کننده پروتئین) و افزایش فعالیت آنزیم‌های سنتزکننده پروتئین شود که این نیز به افزایش درصد پروتئین منجر می‌شود (مولوی و نگرا، ۲۰۲۳). مطالعات نشان داده‌اند که تحت شرایط تنش کم‌آبی، میزان برخی اسیدهای آمینه ضروری مانند لوسین و ایزولوسین در برخی گونه‌های ارزن افزایش می‌یابد که می‌تواند یکی از دلایل افزایش پروتئین گیاه باشد و درعین‌حال، به بهبود کیفیت تغذیه‌ای علوفه نیز کمک کند (هو و همکاران، ۲۰۲۲؛ رن و همکاران، ۲۰۲۴). در نهایت، ارزن با استفاده از سازوکارهایی مانند افزایش سنتز ترکیبات محافظتی (پرولین و پروتئین‌های LEA)، تغییر در الگوی تخصیص نیتروژن و تنظیم فعالیت آنزیم‌های مرتبط با متابولیسم نیتروژن، می‌تواند در شرایط خشکی پروتئین بیشتری تولید کند (پان و همکاران، ۲۰۱۸؛ شو و همکاران، ۲۰۲۰؛ چاکرابورتی و همکاران، ۲۰۲۲).

اگرچه درصد پروتئین ویژگی مهمی در ارزیابی کیفیت علوفه است، اما عملکرد کل پروتئین در هر واحد سطح اهمیت بیشتری دارد، زیرا این شاخص ترکیبی از عملکرد علوفه خشک و محتوای پروتئین را نشان می‌دهد (جهان‌زاد و همکاران، ۲۰۱۳). بر اساس نتایج مطالعه حاضر، بیشترین عملکرد پروتئین علوفه خشک (۱۴۱۸,۷۰ کیلوگرم در هکتار) در تیمار PRD80 به دست آمد که تفاوت معنی‌داری با PRD100 نداشت. در مقابل، کمترین عملکرد پروتئین (۵۹۹,۲۸ کیلوگرم در هکتار) مربوط به تیمار RDI40 بود که با RDI60 تفاوت معنی‌داری نداشت، اما هر دو به‌طور قابل توجهی کمتر از تیمارهای PRD بودند. همچنین، در آبیاری بر اساس ۸۰ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه، روش PRD عملکرد پروتئین بیشتری نسبت به RDI نشان داد. این نتایج نشان می‌دهد که آبیاری به روش PRD با ۸۰ درصد نیاز آبی گیاه، بهترین ترکیب برای حداکثر عملکرد پروتئین علوفه خشک است، درحالی‌که آبیاری RDI با ۴۰ درصد نیاز آبی، کمترین بازده را دارد. روش آبیاری PRD علاوه بر صرفه‌جویی در مصرف آب، می‌تواند کیفیت محصول را از جمله محتوای پروتئین و سایر شاخص‌های کیفی بهبود بخشد. به گزارش اقبال و همکاران (۲۰۱۹ ب)، اگرچه رشد و نرخ فتوسنتز در پنبه تحت آبیاری کامل (FI) بهتر بود، اما محتوای پروتئین، قندها، و غلظت آنتی‌اکسیدان‌ها در روش PRD به‌طور قابل‌توجهی بالاتر بود. شاه‌نظری و همکاران (۲۰۰۷) نیز در بررسی سیب‌زمینی نشان دادند که استفاده از PRD با ۷۰ درصد آب مورد نیاز FI، عملکرد بیولوژیکی و اقتصادی مشابهی ارائه داده و تولید غده‌های با اندازه ۴۰ تا ۵۰ میلی‌متر را تا ۲۰ درصد افزایش داده است. همچنین، روش PRD توانست با کاهش ۳۰ درصدی مصرف آب، بهره‌وری آبیاری را ۶۱ درصد افزایش دهد و تولید غده‌ها را حفظ کند. این نتایج نشان‌دهنده اثربخشی PRD در بهبود بهره‌وری و کیفیت محصولات کشاورزی است. مطالعه‌ای تأثیر هفت رژیم آبیاری، شامل آبیاری غرقابی معمولی (CFI) و شش تیمار کم‌آبیاری (RDI و PRD) در سه سطح مختلف پتانسیل آب خاک ۰/۱-، ۰/۳- و ۰/۶- بار)، بر عملکرد و کیفیت برنج را بررسی کرد. تیمارهای RDI1 و PRD1 عملکردی مشابه CFI داشتند، اما IWUE در این تیمارها به‌ترتیب ۲۲/۹ و ۴۵/۷ درصد بیشتر بود. به‌طورکلی، تیمارهای PRD در مقایسه با RDI به‌طور میانگین ۱۶ درصد بهره‌وری آب بالاتری نشان دادند. علاوه بر این، تنش شدید آبی در تیمارهای RDI6 و PRD6 باعث افزایش محتوای آمیلوز و ارزش پخش قلیایی شد که نشان‌دهنده بهبود کیفیت پخت برنج بود (ماچکپشتی و همکاران، ۲۰۲۳).

از نظر اقتصادی نیز بررسی منابع نشان می‌دهد که سیستم PRD نسبت به روش‌های مرسوم، علی‌رغم داشتن هزینه‌های اولیه‌ی بیشتر، در بلندمدت مقرون‌به‌صرفه است. این سیستم مصرف آب را ۲۵ تا ۵۰ درصد کاهش داده و

بهره‌وری مصرف آب را بهبود می‌بخشد (سپاس‌خواه و احمدی، ۲۰۱۰؛ بدر و همکاران، ۲۰۱۸). اگرچه عملکرد محصول ۷ تا ۱۰ درصد کاهش می‌یابد، اما این کاهش با صرفه‌جویی در منابع آبی و کاهش هزینه‌های عملیاتی جبران می‌شود (سادراس، ۲۰۰۹). مزیت اصلی سیستم PRD کاهش تعداد دفعات آبیاری و حجم آب مصرفی است که منجر به کاهش قابل‌توجه هزینه‌های عملیاتی می‌شود. این ویژگی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک با منابع آبی محدود اهمیت دارد (بدر و همکاران، ۲۰۱۸). در آبیاری قطره‌ای با استفاده از نوار تیپ، مشکل گرفتگی قطره‌چکان‌ها که در لوله‌های قطره‌ای سنتی دیده می‌شود، به میزان قابل‌توجهی کاهش می‌یابد. نوار تیپ‌ها دارای منافذ یکنواخت و ساده‌تری هستند که نسبت به قطره‌چکان‌های معمولی کمتر مستعد گرفتگی ناشی از رسوبات، املاح و مواد آلی موجود در آب هستند. علاوه بر این، نوار تیپ معمولاً برای یک فصل کشت استفاده شده و در پایان هر دوره تعویض می‌شود. مطالعات نشان داده‌اند که سامانه‌های نوار تیپ در مقایسه با روش‌های مرسوم، نه‌تنها هزینه‌های نگهداری و تعمیرات کمتری دارند، بلکه توزیع آب را نیز یکنواخت‌تر انجام می‌دهند (حسینیان و همکاران، ۲۰۱۶).

همبستگی فنوتیپی بین صفات مختلف

ضرایب همبستگی پیرسون بین صفات کارایی مصرف آب، عملکرد و کیفیت علوفه ارزن مرواریدی هیبرید (رقم نوتریفید) در جدول ۸ ارائه شده است.

جدول ۸- ضرایب همبستگی فنوتیپی بین صفات کارایی مصرف آب، عملکرد و کیفیت علوفه ارزن مرواریدی هیبرید (رقم نوتریفید) در دو سال زراعی

صفات	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
عملکرد علوفه تر ($t\ ha^{-1}$, X_1)	1					
عملکرد علوفه خشک ($t\ ha^{-1}$, X_2)	0.994^{**}	1				
کارایی مصرف آب آبیاری بر اساس عملکرد علوفه تر (t/m^3, X_3)	0.408	0.383	1			
کارایی مصرف آب آبیاری بر اساس عملکرد علوفه خشک (t/m^3, X_4)	0.128	0.137	0.910^{**}	1		
درصد پروتئین علوفه خشک (X_5)	-0.419	-0.477	0.318	0.281	1	
عملکرد پروتئین علوفه خشک ($kg\ ha^{-1}$, X_6)	0.872^{**}	0.844^{**}	0.669	0.374	0.059	1

* و ** به‌ترتیب معنی‌داری در سطوح احتمال پنج و یک درصد

بالاترین همبستگی مثبت و معنی‌دار ($P < 0.01$)، بین عملکرد علوفه تر و خشک مشاهده شد. عملکرد پروتئین علوفه خشک نیز همبستگی مثبت و بسیار معنی‌داری با عملکرد علوفه تر و خشک نشان داد. کارایی مصرف آب آبیاری بر اساس عملکرد علوفه تر، همبستگی مثبت و بسیار معنی‌داری با کارایی مصرف آب آبیاری بر اساس عملکرد علوفه خشک داشت. این نتایج با مطالعات پیشین روی گیاه علوفه‌ای ارزن دم روباهی مطابقت دارد که در آن، همبستگی مثبت و بسیار معنی‌داری بین عملکرد علوفه خشک و تر و همچنین عملکرد خشک برگ با عملکرد علوفه خشک و تر مشاهده شد. علاوه بر این، عدم وجود همبستگی معنی‌دار بین IWUE و عملکرد علوفه خشک و تر نیز تأیید شده است (زوله و همکاران، ۲۰۱۱). پژوهشی روی ارزن مرواریدی در هند نشان داد که بین عملکرد علوفه تر و صفاتی مانند پروتئین خام، درصد ماده خشک و عملکرد علوفه خشک، همبستگی مثبت قوی وجود دارد که این نتایج با مطالعه حاضر همسو است (آسوینی و همکاران، ۲۰۲۳).

نتیجه‌گیری

ارزن مرواریدی به‌عنوان یکی از غلات مقاوم به خشکی در مناطق خشک و نیمه‌خشک، نقش مهمی در تولید علوفه و تولیدات دامی ایفا می‌کند. در این پژوهش، تأثیر روش‌های مختلف کم‌آبیاری بر عملکرد، کیفیت علوفه و بهره‌وری مصرف آب در ارزن مرواریدی هیبرید بررسی شد. نتایج نشان داد که روش PRD، به‌ویژه در سطح ۸۰

درصد نیاز آبی (PRD80)، با بهینه‌سازی توزیع آب در منطقه ریشه و کاهش تبخیر، باعث افزایش عملکرد علوفه تر و خشک و پروتئین و کاهش مصرف آب می‌شود. علاوه بر این، سیستم PRD در مقایسه با روش‌های مرسوم آبیاری، از نظر اقتصادی در بلندمدت مقرون‌به‌صرفه است و موجب افزایش پایداری تولید نیز می‌شود. در مقایسه با روش RDI که در شرایط کمبود آب شدید منجر به کاهش عملکرد علوفه و پروتئین شد، روش PRD80 توانست عملکرد را حفظ کرده و از کاهش کیفیت جلوگیری کند. اگرچه روشPRD100 عملکرد بالاتری ارائه داد، اما نیاز به مصرف آب بیشتری داشت که در شرایط کم‌آبیاری از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه نیست. بنابراین، روش PRD80 به‌عنوان گزینه‌ای کارآمد و اقتصادی در مدیریت منابع آبی، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک توصیه می شود. همبستگی‌های معنی‌دار مثبت بین صفات مختلف نیز می‌تواند به‌عنوان شاخص‌هایی برای پیش‌بینی تغییرات کیفیت و عملکرد گیاهان علوفه‌ای استفاده شود. این تحقیق بر اهمیت تطبیق استراتژی‌های آبیاری با شرایط محیطی تأکید دارد و نتایج آن می‌تواند مبنای توسعه استراتژی‌های پایدار در مدیریت منابع آب و کشاورزی باشد. پیشنهاد می‌شود که در آینده اثرات کم‌آبیاری در شرایط محیطی مختلف، تأثیرات طولانی‌مدت آن بر کیفیت خاک و پایداری محصولات و ادغام آن با استراتژی‌های مدیریت پایدار آب بررسی شود تا به توسعه راهکارهای جامع‌تر و مؤثرتر کمک کند.

تشکر و قدردانی

از دانشگاه زابل (کد پژوهانه UOZ-GR-6621) و پژوهشکده فناوری تولیدات گیاهی دانشگاه شهید باهنر کرمان برای تأمین اعتبار مالی این پژوهش، تشکر و قدردانی می‌گردد.

تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافعی وجود ندارد و این مسئله مورد تأیید نویسندگان مقاله است.

فهرست منابع

۱. اسدی، رسول، حسن‌پور، فرزاد، مهربانی، میترا، باقی‌زاده، امین، و کاراندیش، فاطمه. ۱۳۹۸. تأثیر کم‌آبیاری تنظیم‌شده و آبیاری ناقص ریشه بر ویژگی‌های کمی رزماری. *مجله آب و خاک*، ۳۳(۵)، ۶۵۹–۶۷۰. **DOI: https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.70053**

۲. حاجی‌راد، ایمان، میرلطیفی، سید مجید، دهقانی سانیج، حسین، و محمدی، ساناز. ۱۴۰۰. بررسی تأثیر کم‌آبیاری بر عملکرد و بهره‌وری آب ذرت علوفه‌ای در استفاده از دو نوع مدیریت مختلف در سیستم آبیاری قطره‌ای. *مجله پژوهش آب ایران*، ۱۵، ۱۵–۲۳.

۳. خشائی، فرشاد، بهمنش، جواد، رضاوردی‌نژاد، وحید، و آزاد، نسرین. ۱۳۹۸. تأثیر مقدار آبیاری و تقسیط کود نیتروژن بر عملکرد، اجزای عملکرد و بهره‌وری آب ذرت دانه‌ای در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی. *مجله پژوهش آب در کشاورزی*، ۳۳، ۶۰۱–۶۱۲. **DOI: https://doi.org/10.22092/jwra.2020.121241**

۴. صفائی طرقبه، محمد، آذری، آرمان، دشتی، حسین، و مداح حسینی، شهاب. ۱۳۹۶. اثر تنش آبی بر ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیک ارزن نوتریفید و سورگوم اسپیدفید در چین‌های مختلف. *نشریه تولید و فرآوری محصولات زراعی و باغی*، ۷، ۶۹–۸۲. **URL: http://jcpp.iut.ac.ir/article-1-2675-fa.html**

۵. مزیدی، احمد، عنایت‌پور، مهدیه، و حسینی، سید سلام. ۱۴۰۰. تعیین اقلیم استان کرمان با استفاده از روش‌های منحنی آمبروترمیک، ضریب خشکی دومارتن، اقلیم‌نمای آمبرژه. جغرافیا و روابط انسانی، ۴، ۳۵–۴۳. **DOI: https://doi.org/10.22034/gahr.2021.287987.1565**

۶. موسوی، سید محمدسعید، الباجی، محمد، ناصری، عبدعلی، گلابی، منا، و مرادی تلاوت، محمدرضا. ۱۴۰۱. تأثیر کم‌آبیاری به روش تنظیم‌شده و خشکی موضعی ریشه بر عملکرد، اجزاء عملکرد و بهره‌وری مصرف آب گلرنگ در شرایط اقلیمی خوزستان. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۴، ۱۵۵-۱۷۱.
DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.354250.669435

۷. مهرپویان، مهدی، و فرامرزی، علی. ۱۳۹۰. تاثیر سطوح مختلف کم آبیاری بر عملکرد کمی و راندمان مصرف آب در ارزن نوتریفید و سورگوم اسپید فید. گیاه و زیست بوم (ویژه نامه تنش خشکی و شوری)، ۷، ۶۰-۷۱.
Available from: https://sid.ir/paper/145317/fa

8. Aguilar, J., Moghbel, F. and Fazel, F., 2023. Evaluation of novel deficit irrigation techniques in western Kansas. Kansas Agricultural Experiment Station Research Reports.
DOI: https://doi.org/10.4148/2378-5977.8492

9. Ahmad, S., Raza, M.A.S., Saleem, M.F., Zaheer, M.S., Iqbal, R., Haider, I., Aslam, M.U., Ali, M. and Khan, I.H., 2020. Significance of partial root zone drying and mulches for water saving and weed suppression in wheat. Journal of Animal and Plant Sciences, 30, pp.154-162. **DOI: https://doi.org/10.36899/japs.2020.1.0018**

10. 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, 300(9), p.D05109.

11. Alghamdi, A., Aly, A., Al-Omran, A., Louki, I. and Alkhasha, A., 2023. Tomato yield responses to deficit irrigation and partial root zone drying methods using biochar: A greenhouse experiment in a loamy sand soil using fresh and saline irrigation water. Water, 15(15), p.2797. **DOI: https://doi.org/10.3390/w15152797**

12. Alhammad, B.A., Zaheer, M.S., Ali, H.H., Hameed, A., Ghanem, K.Z. and Seleiman, M.F., 2023. Effect of co-application of Azospirillum brasilense and Rhizobium pisi on wheat performance and soil nutrient status under deficit and partial root drying stress. Plants, 12(17), p.3141. **DOI: https://doi.org/10.3390/plants12173141**

13. Alomran, A.M. and Louki, I.I., 2024. Impact of irrigation systems on water saving and yield of greenhouse and open field cucumber production in Saudi Arabia. Agricultural Water Management, 302, p.108974.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108974

14. Aswini, M., Ganesan, K. and Ezhilarasi, T., 2023. The correlation between green fodder yield and fodder quality traits in hybrids of pearl millet [Pennisetum glaucum (L.) R. Br.]. International Journal of Plant & Soil Science, 35, pp.1975-1983.
DOI: https://doi.org/10.9734/ijpss/2023/v35i193749

15. Badr, M., El-Tohamy, W., Abou-Hussein, S., and Gruda, N. 2018. Tomato yield, physiological response, water and nitrogen use efficiency under deficit and partial root zone drying irrigation in an arid region. Journal of Applied Botany and Food Quality, 91, pp.332-340. **DOI: https://doi.org/10.5073/JABFQ.2018.091.042**

16. Bhattarai, B., Singh, S., West, C.P., Ritchie, G.L. and Trostle, C.L., 2020a. Effect of deficit irrigation on physiology and forage yield of forage sorghum, pearl millet, and corn. Crop Science, 60(4), pp.2167-2179. **DOI: https://doi.org/10.1002/csc2.20171**

17. Bhattarai, B., Singh, S., West, C.P., Ritchie, G.L., Trostle, C.L. and Trostle, C.L., 2020b. Water depletion pattern and water use efficiency of forage sorghum, pearl millet, and corn under water limiting condition. Agricultural Water Management, 238, p.106206.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106206

18. Bhattarai, B., Singh, S., West, C.P. and Saini, R., 2019. Forage potential of pearl millet and forage sorghum alternatives to corn under the water-limiting conditions of the Texas high plains: A review. Crop, Forage & Turfgrass Management, 5, pp.1-12.

DOI: https://doi.org/10.2134/cftm2019.08.0058

19. Chakraborty, A., Viswanath, A., Malipatil, R., Semalaiyappan, J., Shah, P., Ronanki, S., Rathore, A., Singh, S.P., Govindaraj, M., Tonapi, V.A. and Thirunavukkarasu, N., 2022. Identification of candidate genes regulating drought tolerance in pearl millet. International Journal of Molecular Sciences, 23(13), p.6907.
DOI: https://doi.org/10.3390/ijms23136907
20. Chen, C.H., Lin, K.H., Chang, Y.S. and Chang, Y.J., 2023. Application of water-saving irrigation and biostimulants on the agronomic performance of maize (Zea mays). Process Safety and Environmental Protection, 177, pp.1377-1386.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.08.008
21. Cheng, M., Wang, H., Fan, J., Zhang, F. and Wang, X., 2021. Effects of soil water deficit at different growth stages on maize growth, yield, and water use efficiency under alternate partial root-zone irrigation. Water, 13, p.148.
DOI: https://doi.org/10.3390/w13020148
22. Crookston, B., Blaser, B., Darapuneni, M. and Rhoades, M., 2020. Pearl millet forage water use efficiency. Agronomy, 10, p.1672.
DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy10111672
23. Elhani, S., Haddadi, M., Csákvári, E., Zantar, S., Hamim, A., Villányi, V., Douaik, A. and Bánfalvi, Z., 2019. Effects of partial root-zone drying and deficit irrigation on yield, irrigation water-use efficiency and some potato (Solanum tuberosum L.) quality traits under glasshouse conditions. Agricultural Water Management, 224, p.105745.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105745
24. Farhadi, A., Paknejad, F., Golzardi, F., Ilkaee, M.N. and Aghayari, F., 2022. Effects of limited irrigation and nitrogen rate on the herbage yield, water productivity, and nutritive value of sorghum silage. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 53, pp.576-589. **DOI: https://doi.org/10.1080/00103624.2021.2017959**
25. Faroq, M., Hauuain, M., Ul-Allah, S. and Siddique, K.H.M., 2019. Physiological and agronomic approaches for improving water-use efficiency in crop plants. Agricultural Water Management, 219, pp.95-108.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.04.010
26. Fatemi, S.N., Maghsoodi Mood, A.A. and Mohammadi Nejad, G., 2021. Agro-physiological responses of different pearl millet (Pennisetum glaucum L.) cultivars to water deficit in Kerman climatic conditions. Journal of Crop Ecophysiology, 14(4), pp.465-478. **DOI: https://doi.org/10.30495/jcep.2021.679975**
27. FAO. Production Quantities of Millet by Country. FAOSTAT, Crops. 2020. Available online: http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC/visualize (accessed on 22 October 2020).
28. Gao, H., Ge, W., Bai, L., Zhang, T., Zhao, L., Li, J., Shen, J., Xu, N., Zhang, H., Wang, G. and Lin, X., 2023. Proteomic analysis of leaves and roots during drought stress and recovery in Setaria italica L. Frontiers in Plant Science, 14, p.1240164.
DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1240164
29. Ghalkhani, A., Golzardi, F., Khazaei, A., Mahrokh, A., Illés, Á., Bojtor, C., Mousavi, S.M.N. and Széles, A., 2023. Irrigation management strategies to enhance forage yield, feed value, and water-use efficiency of sorghum cultivars. Plants, 12, p.2154.
DOI: https://doi.org/10.3390/plants12112154
30. Ghatak, A., Chaturvedi, P., Bachmann, G., Valledor, L., Ramšak, Ž., Bazargani, M.M., Bajaj, P., Jegadeesan, S., Li, W., Sun, X. and Gruden, K., 2021. Physiological and proteomic signatures reveal mechanisms of superior drought resilience in pearl millet compared to wheat. Frontiers in Plant Science, 11, p.600278.
DOI:https://doi.org/10.3389/fpls.2020.600278

31. Ghatak, A., Chaturvedi, P., Nagler, M., Roustan, V., Lyon, D., Bachmann, G., Postl, W., Schröfl, A., Desai, N., Varshney, R. and Weckwerth, W., 2016. Comprehensive tissue-specific proteome analysis of drought stress responses in Pennisetum glaucum (L.) R. Br. (Pearl millet). Journal of proteomics, 143, pp.122-135. **DOI: https://doi.org/10.1016/j.jprot.2016.02.032**
32. Grecksch, K., 2019. Scenarios for resilient drought and water scarcity management in England and Wales. International Journal of River Basin Management, 17(2), pp.219-227. **DOI: https://doi.org/10.1080/15715124.2018.1461106**
33. Hooshmand, M., Albaji, M., Nasab, S. and Ansari, N., 2019. The effect of deficit irrigation on yield and yield components of greenhouse tomato (Solanum lycopersicum) in hydroponic culture in Ahvaz region, Iran. Scientia Horticulturae, 254, pp.84-90. **DOI: https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2019.04.084**
34. Hosseinian, S., Khaledian, M., Biglouei, M., and Shahinrokhsar, P. 2016. Technical and economical evaluation of tape drip and drip line irrigation systems in a strawberry greenhouse. Acta Agriculturae Slovenica, 107, pp.55-64. **DOI: https://doi.org/10.14720/AAS.2016.107.1.06**
35. Hou, S., Men, Y., Wei, M., Zhang, Y., Li, H., Sun, Z. and Han, Y., 2022. Total protein content, amino acid composition and eating-quality evaluation of foxtail millet (Setaria italica (L.) P. Beauv). Foods, 12(1), p.31. **DOI: https://doi.org/10.3390/foods12010031**
36. Iqbal, R., Andersen, M.N., Raza, M.A.S., Rashid, M.A. and Ahmad, S., 2019a. Physiological manipulation and yield response of wheat grown with split root system under deficit irrigation. Pakistan Journal of Agricultural Research, 32, pp.514-526 **DOI: http://dx.doi.org/10.17582/journal.pjar/2019/32.3.514.526**
37. Iqbal, R., Muhammad, A.S.R., Muhammad, F.S., Imran, H.K., Salman, A., Muhammad, S.Z., Muhammad, U. and Imran, H., 2019b. Physiological and biochemical appraisal for mulching and partial rhizosphere drying of cotton. Journal of Arid Land, 11, pp.785-794. **DOI: https://doi.org/10.1007/s40333-019-0014-9**
38. Ismail, S., El-Nakhlawy, F. and Basahi, J., 2018. Sudan grass and pearl millet productivity under different irrigation methods with fully irrigation and stresses in arid regions. Grassland Science, 64, pp.29-39. **DOI: https://doi.org/10.1111/GRS.12179**
39. Ismail, S.M., 2012. Optimizing productivity and irrigation water use efficiency of pearl millet as a forage crop in arid regions under different irrigation methods and stress. African Journal of Agricultural Research, 7, pp.2509-2518.
40. Jahanzad, E., Jorat, M., Moghadam, H., Sadeghpour, A., Chaichi, M.-R. and Dashtaki, M., 2013. Response of a new and a commonly grown forage sorghum cultivar to limited irrigation and planting density. Agricultural Water Management, 117, pp.62-69. **DOI: https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.11.001**
41. Jahansouz, M.R., Keshavarz Afshar, R., Heidari, H. and Hashemi, M., 2014. Evaluation of yield and quality of sorghum and millet as alternative forage crops to corn under normal and deficit irrigation regimes. Jordan Journal of Agricultural Sciences, 10(4), pp.699-715. **DOI: http://dx.doi.org/10.12816/0031747**
42. Jiao, F., Ding, R., Du, T., Kang, J., Tong, L., Gao, J. and Shao, J., 2024. Multi-growth stage regulated deficit irrigation improves maize water productivity in an arid region of China. Agricultural Water Management, 297, p.108827. **DOI: https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108827**
43. Khaleghi, M., Hassanpour, F., Karandish, F. and Shahnazari, A., 2020. Integrating partial root-zone drying and saline water irrigation to sustain sunflower production in freshwater-scarce regions. Agricultural Water Management, 234, p.106094.

DOI: https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106094

44. Kumar, P. and Kumar, A., 2021. Water management for improving pearl millet production under irrigated environment: A review. Agricultural Reviews, 42, pp.225-229. **DOI: https://doi.org/10.18805/AG.R-1990**
45. Lawlor, D.W. and Cornic, G., 2002. Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficits in higher plants. Plant, Cell & Environment, 25, pp.275-294. **DOI: https://doi.org/10.1046/j.0016-8025.2001.00814.x**
46. Li, W., Jia, L. and Wang, L., 2017. Chemical signals and their regulations on the plant growth and water use efficiency of cotton seedlings under partial root-zone drying and different nitrogen applications. Saudi Journal of Biological Sciences, 24, pp.477-487. **DOI: https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2017.01.015**
47. Lima, R.S.N., Assis Figueiredo, F.A.M.M., Martins, A.O., Deus, B.C.S., Ferraz, T.M., Assis Gomes, M.M., Sousa, E.F., Glenn, D.M. and Campostrini, E., 2015. Partial rootzone drying (PRD) and regulated deficit irrigation (RDI) effects on stomatal conductance, growth, photosynthetic capacity and water-use efficiency of papaya. Scientia Horticulturae, 183, pp.13-22. **DOI: https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.12.005**
48. Liu, F., Shahnazari, A., Andersen, M.N., Jacobsen, S.E. and Jensen, C.R., 2006. Physiological responses of potato (Solanum tuberosum L.) to partial root-zone drying: ABA signaling, leaf gas exchange, and water use efficiency. Journal of Experimental Botany, 57, pp.3727-3735. **DOI: https://doi.org/10.9755/EJFA.2018.V30.I5.1678**
49. Lu, J., Shao, G., Cui, J., Xiaojun, W. and Keabetswe, L., 2019. Yield, fruit quality and water use efficiency of tomato for processing under regulated deficit irrigation: A meta-analysis. Agricultural Water Management, 222, pp.301-312. **DOI: https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2019.06.008**
50. Machado, J., Vasconcelos, M.W., Soares, C., Fidalgo, F., Heuvelink, E. and Carvalho, S.M., 2023. Young tomato plants respond differently under single or combined mild nitrogen and water deficit: an insight into morphophysiological responses and primary metabolism. Plants, 12(5), p.1181. **DOI: https://doi.org/10.3390/plants12051181**
51. Machekposhti, M.F., Shahnazari, A., Yousefian, M., Ahmadi, M.Z., Sarjaz, M.R., Arabzadeh, B., Akbarzadeh, A. and Leib, B.G., 2023. The effect of alternate partial root-zone drying and deficit irrigation on the yield, quality, and physiochemical parameters of milled rice. Agricultural Water Management, 289, p.108546. **DOI: https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108546**
52. Machicek, J.A., Blaser, B.C., Darapuneni, M. and Rhoades, M.B., 2019. Harvesting regimes affect brown midrib sorghum-sudangrass and brown midrib pearl millet forage production and quality. Agronomy, 9, p.416. **DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy9080416**
53. Marviya, G.V. and Vakharia, D.N., 2016. Effect of terminal water stress and benzyl adenine on osmoregulants in pearl millet [Pennisetum glaucum (L.) R. Br.] genotypes. Indian Journal of Agricultural Biochemistry, 29(1), pp.9-16. **DOI: https://doi.org/10.5958/0974-4479.2016.00002.2**
54. Martin-Vertedor, A.I. and Dodd, I.C., 2011. Root-to-shoot signalling when soil moisture is heterogeneous: Increasing the proportion of root biomass in drying soil inhibits leaf growth and increases leaf abscisic acid concentration. Plant, Cell & Environment, 34, pp.1164-1175. **DOI: https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2011.02315.x**
55. Mason, S.C., Maman, N. and Pale, S., 2015. Pearl millet production practices in semi-arid West Africa: A review. Experimental Agriculture, 51, pp.501-521. **DOI: https://doi.org/10.1017/S0014479714000441**

56. Moloi, S.J. and Ngara, R., 2023. The roles of plant proteases and protease inhibitors in drought response: a review. Frontiers in Plant Science, 14, p.1165845. **DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1165845**
57. Moridi, A., 2017. State of water resources in Iran. International Journal of Hydrology, 1(4), pp.111-114. **DOI: https://doi.org/10.15406/IJH.2017.01.00021**
58. Negarestani, M., Tohidi-Nejad, E., Khajoei-Nejad, G., Nakhoda, B. and Mohammadi-Nejad, G., 2019. Comparison of different multivariate statistical methods for screening the drought tolerant genotypes of pearl millet (Pennisetum americanum L.) and sorghum (Sorghum bicolor L.). Agronomy, 9, p.645. **DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy9100645**
59. Nikolaou, G., Neocleous, D., Christou, A., Kitta, E. and Katsoulas, N., 2020. Implementing sustainable irrigation in water-scarce regions under the impact of climate change. Agronomy, 10(8), p.1120. **DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy10081120**
60. Pan, J., Li, Z., Wang, Q., Garrell, A.K., Liu, M., Guan, Y., Zhou, W. and Liu, W., 2018. Comparative proteomic investigation of drought responses in foxtail millet. BMC Plant Biology, 18, pp.1-19. **DOI: https://doi.org/10.1186/s12870-018-1533-9**
61. Pareek, P., Patel, M., Patel, H. and Patel, P., 2015. Effect of irrigation and nitrogen levels on forage yield and quality of pearl millet [Pennisetum glaucum (L.) R.Br.]. International Journal of Agricultural Sciences, 11, pp.264-267. **DOI: https://doi.org/10.15740/HAS/IJAS/11.2/264-267**
62. Qi, D.L., Hu, T.T. and Song, X., 2020. Effects of nitrogen application rates and irrigation regimes on grain yield and water use efficiency of maize under alternate partial rootzone irrigation. Journal of Integrative Agriculture, 19, pp.2792–2806. **DOI: https://doi.org/10.1016/S2095-3119(20)63205-1**
63. Raghib Bakheit Alwafy, B., Ali, M.B., Elsaid Mahdy, R. and Kandeel, M.N., 2021. Performance of pearl millet (Pennisetum glaucum) genotypes for forage yield and its components under normal and water stress irrigation. Assiut Journal of Agricultural Sciences, 52, pp.45-63. **DOI: http://dx.doi.org/10.21608/ajas.2022.113072.1076**
64. Raval, C., Patel, A., Rathore, B., Vyas, K. and Bedse, R., 2014. Productivity, quality and soil fertility status as well as economics of multi-cut summer forage pearl millet as influenced by varying levels of irrigation and nitrogen. Research on Crops, 15, pp.785-789. **DOI: https://doi.org/10.5958/2348-7542.2014.01412.0**
65. Ren, J., Liu, Y., Mao, J., Xu, Y., Wang, M., Hu, Y., Wang, S., Liu, S., Qiao, Z. and Cao, X., 2024. Metabolomics and physiological methods revealed the effects of drought stress on the quality of broomcorn millet during the flowering stage. Agronomy, 14(2), p.236. **DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy14020236**
66. Rostamza, M., Chaichi, M.-R., Jahansouz, M.-R. and Alimadadi, A., 2011. Forage quality, water use and nitrogen utilization efficiencies of pearl millet (Pennisetum americanum L.) grown under different soil moisture and nitrogen levels. Agricultural Water Management, 98, pp.1607-1614. **DOI: https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2011.05.014**
67. Sachan, N. and Shah, P., 2023. Nutritional health benefits of pearl millet. International Journal of Plant Sciences, 18(2), pp.167-176. **DOI: https://doi.org/10.15740/has/ijps/18.2/167-176**
68. Sadras, V. 2009. Does partial root-zone drying improve irrigation water productivity in the field? A meta-analysis. Irrigation Science, 27, pp.183-190. **DOI: https://doi.org/10.1007/s00271-008-0141-0**

69. Samake, O., Stomph, T., Kropff, M. and Smaling, E., 2006. Integrated pearl millet management in the Sahel: Effects of legume rotation and fallow management on productivity and Striga hermonthica infestation. Plant and Soil, 286, pp.245-257. **DOI: https://doi.org/10.1007/s11104-006-9041-3**
70. Sanatawy, E.A.M., Ash-Shormillesy, S.M.A.I., Qabil, N., Awad, M.F., Mansour, E. and Seed, H., 2021. Priming improves seedling vigor, grain yield, and water use efficiency of maize under varying irrigation regimes. Water, 13, p.2115. **DOI: https://doi.org/10.3390/w13152115**
71. Sepaskhah, A., and Ahmadi, S. 2010. A review on partial root-zone drying irrigation. International Journal of Plant Production, 4, pp.241-258. **DOI: https://doi.org/10.22069/IJPP.2012.708**
72. Shahnazari, A., Liu, F., Andersen, M.N., Jacobsen, S.E. and Jensen, C.R., 2007. Effects of partial root-zone drying on yield, tuber size and water use efficiency in potato under field conditions. Field Crops Research, 100, pp.117-124. **DOI: https://doi.org/10.1016/j.fcr.2006.05.010**
73. Shrestha, N., Hu, H., Shrestha, K. and Doust, A.N., 2023. Pearl millet response to drought: A review. Frontiers in Plant Science, 14, p.1059574. **DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1059574**
74. Sivasakthi, K., Tharanya, M., Choudhary, S., Garin, V., Vadez, V., and Kholová, J., 2024. Drought adaptation in pearl millet (Pennisetum glaucum (L.) R. Br.): Physiological, molecular and genetic approaches. p. 69-83. In R.K. Srivastava, C.T. Satyavathi, and R.K. Varshney (eds.) The Pearl Millet Genome. Compendium of Plant Genomes. Springer, Cham. **DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-56976-0_5**
75. Stagno, F., Brambilla, M., Roccuzzo, G. and Assirelli, A., 2024. Water Use Efficiency in a deficit-irrigated orange orchard. Horticulturae, 10, p.498. **DOI: https://doi.org/10.3390/horticulturae10050498**
76. Talasila, V., Singh, R., Kishore, C. and Singh, A., 2019. Effect of planting density and nitrogen levels on growth and yield of fodder pearlmillet (Pennisetum glaucum L.). International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences. 8(7), pp.312-318. **DOI: https://doi.org/10.20546/IJCMAS.2019.807.038**
77. Wakrim, R., Wahbi, S., Tahi, H., Aganchich, B. and Serraj, R., 2005. Comparative effects of partial root drying (PRD) and regulated deficit irrigation (RDI) on water relations and water use efficiency in common bean (Phaseolus vulgaris L.). Agriculture, Ecosystems & Environment, 106(2-3), pp.275-287. **DOI: https://doi.org/10.1016/j.agee.2004.10.019**
78. Wasaya, A., Affan, M., Yasir, T.A., ur-Rehman, A., Mubeen, K., ur-Rehman, H., Ali, M., Nawaz, F., Galal, A., Iqbal, M.A., Sohidul Islam, M., El-Sharnouby, M., ur Rahman, M.H. and El Sabagh, A., 2021. Foliar potassium sulfate application improved photosynthetic characteristics, water relations and seedling growth of drought-stressed maize. Atmosphere, 12, p.663. **DOI: https://doi.org/10.3390/ atmos12060663**
79. Wu, Y., Zhao, Z., Liu, S., Huang, X. and Wang, W., 2020. Does partial root-zone drying have advantages over regulated deficit irrigation in pear orchard under desert climates? Scientia Horticulturae, 262, p.109099. **DOI: https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.109099**
80. Xu, B., Gao, X., Dong, K., Li, X., Yang, P., Yang, T. and Feng, B., 2020. Grain protein content comparison and proteomic analysis of foxtail millet (Setaria italica L.) seed response to different drought stress levels. Acta physiologiae plantarum, 42(2), p.20. **DOI: https://doi.org/10.1007/s11738-019-2999-2**

81. Yang, X., Liu, R., Jing, M., Zhang, N., Liu, C. and Yan, J., 2023. Variation of root soluble sugar and starch response to drought stress in foxtail millet. Agronomy, 13(2), p.359.
DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy13020359

82. Yazar, A., Gokcel, F. and Sezen, M., 2009. Corn yield response to partial root zone drying and deficit irrigation strategies applied with drip system. Plant, Soil & Environment, 55(11), pp.494-503. **DOI: http://dx.doi.org/10.17221/96/2009-PSE**

83. Zhang, J., Liu, H.X., Pang, X.P., Yu, C., Wang, Q., Zhou, Y.P., Lin, L.G. and Guo, Z.G., 2019. Effect of partial root-zone drying irrigation (PRD) on the gas exchange and antioxidant enzymatic activities in alfalfa. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 19, pp.127-136. **DOI: https://doi.org/10.1007/s42729-019-0018-8**

84. Zhang, J., Liu, H.X., Wei, X.X. and Guo, Z.G., 2023. Effect of partial root-zone drying irrigation (PRDI) on alfalfa available soil P. Archives of Agronomy and Soil Science, 69, pp.2631-2644. **DOI: https://doi.org/10.1080/03650340.2023.2169915**

85. Zhenchang, W., Xiaofei, Y., Liang, F. and Jianbin, Z., 2016. Partial rootzone drying irrigation increases root surface area, root hydraulic conductivity and water use efficiency in maize. International Journal of Environmental Monitoring and Analysis, 4, p.146.
DOI: https://doi.org/10.11648/J.IJEMA.20160406.12

86. Zhou, L., Tian, X., Cui, B. and Hussain, A., 2021. Physiological and biochemical responses of invasive species Cenchrus pauciflorus benth to drought stress. Sustainability, 13(11), p.5976. **DOI: https://doi.org/10.3390/SU13115976**

87. Zooleh, H.H., Jahansooz, M.R., Yunusa, I., Hosseini, S.M., Chaichi, M.R. and Jafari, A.A., 2011. Effect of alternate irrigation on root-divided foxtail millet (Setaria italica). Australian Journal of Crop Science, 5(2), pp.205-213. ISSN: 1835-2707.
DOI: https://api.semanticscholar.org/CorpusID:59380346

Evaluating the Effect of Regulated Deficit Irrigation and Partial Root-Zone Irrigation on Water Use Efficiency Based on Forage Production and Quality of Pearl Millet

A. Moghbeli Mehni Dareroodi, M. Delbari *, A. Rezaei Estakhroeih, and G. Mohammadi-Nejad

Ph.D. student of Irrigation and Drainage, Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Iran. **Asma.moghbeli@gmail.com**

Associate Prof., Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Iran. **masoomeh.delbari@uoz.ac.ir**

Assistant Prof., Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran. **Rezaei@mail.uk.ac.ir**

Professor, Research and Technology Institute of Plant Production (RTIPP), Shahid Bahonar University of Kerman, Iran. **Mohammadinejad@uk.ac.ir**

Received: October 2024 and Accepted: December 2024

Abstract

Water scarcity in arid and semi-arid regions is a serious challenge for fodder production. Therefore, optimizing irrigation techniques and selecting drought-resistant cultivars, such as millet, is essential. This study investigated the effects of two irrigation methods, namely, regulated deficit irrigation and partial root-zone irrigation, at four irrigation levels (100%, 80%, 60%, and 40% of the plant's water requirement, WR) on forage yield, irrigation water use efficiency, forage protein percentage, and yield of hybrid pearl millet (Nutrifeed variety). The research was conducted using a split-block (strip-split-plot) design based on a randomized complete block design (RCBD) with three replications, utilizing the drip irrigation method with tape strips at the research farm of Shahid Bahonar University of Kerman, during the 2017 and 2018 growing seasons. The results demonstrated that the partial root-zone irrigation treatment, by supplying 100% WR resulted in the highest fresh and dry forage yields, with 80.20 and 16.27 t/ha, respectively. The 80% WR in the same method, in addition to being ranked second, with fresh and dry forage yields of 71.71 and 15.47 t ha^{-1}, respectively, yielded the highest dry forage protein yield (1418.7 kg/ha) and water use efficiency based on fresh and dry forage yields (13.74 and 2.97 t/m^3, respectively). Additionally, the highest protein percentage (11.41%) was observed in the partial root-zone irrigation treatment by supplying 60% WR. Overall, partial root-zone irrigation, by providing 80% WR, is recommended as a suitable strategy to improve irrigation water use efficiency and maintain the quality and quantity of forage under water-limited conditions.

Keywords: Drought stress, optimal irrigation methods, Millet Nutrifeed variety, Forage production stability

* - Corresponding author's email**: masoomeh.delbari@uoz.ac.ir**

https://doi.org/10.22092/jwra.2025.367441.1061

Effect of Increasing Operating Pressure and Water Salinity on the Performance of Some Common Pressure Compensating Emitters

H. Parvizi[1*], H. Hatami[1], A. Parnian[1], M. H. Rahimian[1], and H. Beyrami[2]

1. Assistant Prof., National Salinity Research Center, Agricultural Research, Education, and Extension Organization, Yazd, Iran. **H.parvizi@areeo.ac.ir, H.hatami@ areeo.ac.ir, A.parnian@ areeo.ac.ir,** and **Mhrahimian@gmail.com**

2. Associate Prof., National Salinity Research Center, Agricultural Research, Education, and Extension Organization, Yazd, Iran. **H.beyrami@areeo.ac.ir**

Received: August 2024 and Accepted: December 2024

Abstract

This study was designed and carried out to determine the effects of operating pressure and irrigation water salinity on the performance of common pressure-compensating emitters in irrigation systems. The study evaluated three commercial brands, namely, “Netafim”, “Eurodrip,” and “Peresi Zalvan”. These emitters were tested at flow rates of 8 and 24 L/h under operating pressures of 0.5, 1.5, and 2.5 bars. Additionally, two levels of water salinity (5 and 12 dS/m) were considered. The results revealed that increasing operating pressure from 0.5 to 2.5 bars and raising salinity from 5 to 12 dS/m led to either increased or unchanged coefficient of discharge variations in different emitters. Comparing pre-test (new) emitters with post-test (used) ones showed variations due to various factors, including pressure changes, salinity effects, and inherent emitter characteristics. Notably, the impact of salinity did not result in significant differences in emitter performance under varying pressure conditions. However, for the Netafim and Eurodrip emitters (8 L/hr), averaging the results across all three operating pressures indicated that increased salinity led to reduced discharge. Specifically, the reduction was approximately 3.8% for Netafim and 2.6% for Eurodrip. Also, it was concluded that the application of 2.5 bar pressure led to the entry of parts and solid objects in the irrigation pipes or passed through the filtration system into the emitters, resulting in a decrease in flow rate. However, this problem can be solved to a large extent by washing the pipes before starting the system. Netafim emitters (8 L/hr), despite the lack of significant entry of these objects, had a diaphragm adhesion problem, and showed the greatest decrease in flow rate due to this reason. A detailed examination of the destroyed samples showed that the reason for these differences was the different shape and structure of the water inlet. Accordingly, the smallness of the cross-sectional area of water inlet, reduces the entry of solid parts. Therefore, application of 2.5 bar pressure resulted in the highest rate of solid parts entry into the Peresi Zalvan with the largest cross-sectional area and the lowest rate of entry in the Netafim (8 L/hr). However, this problem can be solved to a large extent by washing the pipes before starting the system.

Keywords: Dripper Clogging, Netafim Emitter, Eurodrip Emitter, Peresi Zalvan Emitter

* - Corresponding author’s email: **H.parvizi@areeo.ac.ir**

https://doi.org/10.22092/jwra.2024.366784.1052

Modifying Water Allocation Pattern to Increase Water Productivity in Agricultural Sector in Zayandehrud Basin

S. Asgari, A. Shanehsazzadeh*, and B. Saffari
MSc in Water Resources Engineering and Management, Faculty of Civil Engineering and Transportation University of Isfahan, Isfahan, Iran. **Saeida698@gmail.com**
Associate Prof., Faculty of Civil Engineering and Transportation, University of Isfahan, Isfahan, Iran.
a.shanehsazzadeh@eng.ui.ac.ir
Assistant Prof., Faculty of Administrative Sciences and Economics, University of Isfahan, Isfahan, Iran.
b_saffari@ase.ui.ac.ir

Received: June 2024 and Accepted: December 2024

Abstract

Zayandehrud River, the largest river in the central plateau of Iran, has suffered water management crisis due to the continued drought and increased consumption in various sectors, including drinking, agricultural, and industrial sectors. To achieve logical compatibility, and taking into account the multiple economic and social goals, optimum reallocation of water resources of Zayandehrud according to the capacity of the existing resources is inevitable. In this article, the modification plan of Zayandehrud water allocation between seven irrigation networks is presented. To increase the productivity of the agricultural sector, some measures are presented in the form of intervention levels and applied in the allocation plans and the results are compared with each other and with the allocation in the current situation. These measures include changing the distribution of water between the networks under the current cultivation conditions, modifying the cultivation pattern, increasing the irrigation efficiency, and increasing the added value with the export of agricultural products. The results reveal that the current pattern of allocation between irrigation networks is not optimal in terms of economics and employment. Different levels of intervention in ideal conditions (combining all levels together) increase the value of water in the agricultural sector up to 30 times, among which export of the products abroad and modification of the cultivation pattern increase the value of agricultural water by 9 and 3.7 times, respectively.

Keywords: Optimum water allocation, Value of agricultural water, Cropping pattern, Employment

* - Corresponding author's email: **a.shanehsazzadeh@eng.ui.ac.ir**
https://doi.org/10.22092/jwra.2025.365867.1043

Assessment of Climate Change and Planting Date Impacts under IPCC Scenarios on Pea Yield Using the AquaCrop Model

M. Hoseini, M. Khoshravesh*, M. A. Gholami Sefidkouhi, and R. Norouz Valashedi

MSc Student of Irrigation and Drainage, Water Engineering Department, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. **mahsah77h@gmail.com**
Associate Prof., Water Engineering Department, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. **m.khoshravesh@sanru.ac.ir**
Professor, Water Engineering Department, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. **magholamis@yahoo.com**
Assistant Prof., Water Engineering Department, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. **rezanorooz@yahoo.com**

Received: September 2024 and Accepted: December 2024

Abstract

In this study, AquaCrop model was employed to simulate the grain yield of pea plants under future climate conditions, considering various irrigation treatments and different planting dates as an adaptation strategy, in Babol County, Iran. The grain yield and biomass of pea plants were simulated for the next three decades for planting dates of October (16, 23, and 30), November 6, 13, 20, and 27), under future climate scenarios of 126SSP, 245SSP, and 585SSP of Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Sixth Report, and three levels of irrigation: 100% (I_1), 80% (I_2), and 60% (I_3). According to the results, the highest pea yield in the 2023-32 was simulated for the I_1 treatment under the 585SSP scenario on November 6, yielding 7.2 t/ha, while the lowest yield was simulated for the I3 treatment under the same scenario on November 27, yielding 4.1 t/ha. In 2033-42, the highest yield was observed for I_1 under the 585SSP scenario on November 13, yielding 8.4 t/ha, and the lowest yield for I_3 under the 245SSP scenario on November 27, yielding 4.4 t/ha. In the 2043-52, the highest yield was simulated for I_1 under the 585SSP scenario on November 9, yielding 8.7 t/ha, while the lowest yield belonged to I_3 under 126SSP on October 16, yielding 3.9 t/ha. The highest pea biomass in 2023-32 was simulated for I_1 under the 585SSP scenario on November 13, yielding 17.1 t/ha, while the lowest biomass belonged to I_3 under the same scenario on November 27, yielding 10.3 t/ha. In 2033-42, the highest biomass was simulated for I_1 under the 585SSP on November 20, yielding 20.1 t/ha, and the lowest biomass for the I_3 under the 245SSP scenario on November 27, yielding 11.1 t/ha. In 2043-52, the highest biomass was for the I_1 under the 126SSP scenario on November 1_3, yielding 20.6 t/ha, while the lowest biomass was observed for I_3 under the 245SSP on November 27, yielding 12.7 t/ha. Therefore, the optimal planting dates for pea crops in Babol County are October 30, November 6 and 13, under the I_1 irrigation, which can help improve crop and irrigation management in this region. Overall, climate change can lead to both increases and decreases in pea yield and biomass, but with proper irrigation management and selection of the optimal planting dates, the likelihood of yield increase is higher.

Keywords: Crop model, Irrigation management, Babol County, Cultivation management.

* - Corresponding author's email: **m.khoshravesh@sanru.ac.ir**
https://doi.org/10.22092/jwra.2025.366835.1053

Preparation of Rice Water Productivity Maps Using Remote Sensing Methods in Khuzestan Watersheds

A. Mokhtaran*, M. Mohammady, and H. Dehghanisanij

Assistant Prof., Agricultural Engineering Research Department, Khuzestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, (AREEO), Ahwaz, Iran. **alimokhtaran@gmail.com**

MSc in Remote Sensing and Geographical Information System, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran. **mohammady_maryam@yahoo.com**

Professor, Agricultural Engineering Research Institute (AERI), (AREEO), Karaj, Iran.**dehghanisanij@yahoo.com**

Received: November 2024 and Accepted: December 2024

Abstract

This research aimed to determine rice cultivation map (RCM) for different managements of planting and irrigation (traditional cultivation with permanent flooding and Khoshkeh-kari" with intermittent irrigation) from June to November 2023 in Khuzestan, using vegetation-, temperature- and soil-indicators and remote sensing data. In this research, the temporal-spatial variations of rice water consumption were evaluated and analyzed based on the value of actual water consumption (ETa) and water productivity (WP_{ET}). The Random Forest algorithm with Machine Learning technique was used to classify and achieve the rice cultivated area in the province. Sentinel 2, Landsat 9 and WAPOR product bands were used to calculate the indices and WAPOR database was used in the GEE platform environment to determine ETa and WP_{ET}. The results showed that the area under rice cultivation for the traditional system in the entire province is 136,770 ha and 43,172 ha for Khoshkeh-kari method. In these conditions, the overall accuracy of rice field separation according to the type of cultivation was around 99.65% and the Kappa coefficient was 0.87. The total ETa of rice in 2023 for Khuzestan Province was 1.62 BCM, with 1.27 BCM for the total ETa of the traditional cultivation and 354 MCM in Khoshkeh-kari. The results showed that, although the farmers tried to avoid crop yield reduction by daily irrigation in the last 45 days of the growth period, the weighted average of ETa reduction and WP_{ET} improvement in this technology compared to the traditional method was, respectively, 13% and 8%. Meanwhile, as long as the periodicity of irrigation (Irrigation interval of 2 to 4 days) was observed in the Khoshkeh-kari, the rate of ETa reduction and WP_{ET} improvement in this technology was 24% and 16%, respectively. The results of this research, compared to the field data resulting from the applied research works in the province, estimated the efficiency of water use in rice fields with traditional cultivation at 27% and for Khoshkeh-kari at 34%. This shows that if necessary, rice cultivation should be done by Khoshkeh-kari with intermittent irrigation management and in areas that are in good condition in terms of soil, water, underground water level and drainage engineering.

Keyboard: Actual water consumption, Khoshkeh-kari, Permanent flood irrigation, intermittent irrigation

*- Corresponding author's email: **alimokhtaran@gmail.com**

https://doi.org/10.22092/jwra.2024.367168.1057

Assessment of Irrigation Methods Effects on Sweet Cherry Yield in Selected Orchards of Ardabil Province

F. Parchami-Araghi* and M. Jolaini

Assistant Prof., Agricultural Engineering Research Department, Ardabil Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Ardabil, Iran. **f.parchamiaraghi@areeo.ac.ir**

Agricultural Engineering Research Department, Khorasan Razavi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Mashhad, Iran. **mjolainire@gmail.com**

Received: July 2024 and Accepted: December 2024

Abstract

Reliable estimates of the seasonal applied water and irrigation performance indicators under the current orchard conditions are prerequisites for improving water resources management in agriculture. In this study, seasonal applied water, irrigation methods, and assessment indicators of sweet cherries were studied by monitoring 22 orchards under actual conditions, in Ardabil Province (Parsabad and Meshginshahr counties), Iran, during the 2020-21 growing season. The seasonal estimates of the net crop water requirement, I_n, during the study season ranged from 460 mm (drip irrigation with no active ground cover) to 729 mm (surface irrigation with active ground cover). The adjusted I_n estimates for the drip irrigation method were 19-29% lower than those for the surface irrigation, and the presence of active ground cover increased I_n by 31-35%. The total sum of seasonal applied water and effective precipitation ($I + P_e$) and the fruit yield ranged from 436-1457 mm and 1.60-16.67 $ton.ha^{-1}$ (with a weighted average of 583 mm and 9.03 ton ha^{-1}), respectively. Over-irrigation was more common in the initial and developmental growth stages compared to the middle and late stages. Most of the orchards experienced different degrees of deficit irrigation during pre- and post-harvest periods (13 and 21 orchards, respectively). On average, 60% of the seasonal applied water was allocated to the post-harvest period. There was a significant ($P < 0.05$) difference between the values of the relative irrigation supply index ($RIS = I / I_n$) during pre- and post-harvest periods. Water productivity indicators were significantly ($P < 0.05$) affected by the managers' education and skill level, orchard size, age of the trees, irrigation method, and frost damage. Frost damage accounted for a 61% and 72% reduction in fruit yield and water productivity (WP_{I+Pe}), respectively, compared to the orchards without severe frost damage. The results indicated severely poor irrigation management in the study orchards. Controlling frost damage, and implementing regulated deficit irrigation during the post-harvest period seem to be the most significant and effective strategies to improve irrigation performance indicators in the study area.

Keywords: Surface Irrigation, Drip Irrigation, Frost Damage

*- Corresponding author's email: **f.parchamiaraghi@areeo.ac.ir**

https://doi.org/10.22092/jwra.2025.366390.1048

Contents

Subject **Page**

Ministry of Jihad-e-Agriculture

Agricultural Research, Education, and Extension Organization

Soil and Water Research Institute

Journal of Water Research in Agriculture

Vol. 38, No. 4
2025

Manager-in–Charge: **Hadi Asadi Rahmani, PhD**
Director General, Soil and Water Research Institute

Editor-in–Chief: **Hamid Siadat, PhD**
Professor (Research), Soil and Water Research Institute

Postal Address: P. O. Box: 317793545, Karaj – IRAN
Tel / Fax: 026-36220160
Soil and Water Research Institute Website: www.swri.ir
Journal Website: http://www.wra.areo.ir

Journal of

Water Research in Agriculture

wra.areeo.ir

Volume 38/ No 4/ 2025

ISSN: 2228-7140

Contents

Subject **Page**