

تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی

(تحقیقات مهندسی کشاورزی)



جلد ۲۵، شماره ۹۷، زمستان ۱۴۰۳



Irrigation and Drainage Structures Engineering Research

(Agricultural Engineering Research)

شاپا چاپی: ۶۷۶۴ - ۳۰۶۰ شاپا الکترونیکی: ۶۷۷۲ - ۳۰۶۰

پژوهشی

جلد ۲۵، شماره ۹۷، زمستان ۱۴۰۳

Vol. 25, No. 97, Winter 2024

Print ISSN: 3060-6764 Online ISSN:3060-6772

فهرست مقالات

- ۱ ◀ بررسی اثر مدیریت مصرف آب بر عملکرد و بهره‌وری آب گندم با روش آبیاری بارانی تاشو (رین فلت)
نادر نادری، علیرضا محمدی
- ۱۵ ◀ بررسی وضعیت آب مجازی گندم آبی و ارائه راهکارهای فنی و سیاسی برای بهبود آن در ایران
نادر حیدری، فرشید تاران
- ۳۵ ◀ اثر خصوصیات سازه الیافی شیشه‌ای حصیری بر دقت حسگر بلوک متخلخل در پایش رطوبت خاک
مریم نوابیان، مصطفی جمشیدی اوانکی
- ۵۱ ◀ ارزیابی راهکارهای کاهش تقاضا برای آبیاری و سازگاری با کم آبی در استان فارس
عبدالرحمان میرزائی، افشین سلطانی، فریبرز عباسی، ابراهیم زینلی، شهرزاد میرکریمی
- ۷۹ ◀ شبیه‌سازی اثر نسبت راس سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای بر ضریب آبگذری با نرم‌افزار FLOW 3D
صائب الغزی، جواد مظفری
- ۹۵ ◀ ارزیابی بهره‌وری هرم‌های تقطیری خورشیدی تحت تأثیر سطوح مختلف شوری و عمق آب در منطقه نیمه‌خشک
راضیه صادقی، خالد احمدآلی، سینا کوثری، سلمان زارع، شهرام خلیقی سیکارودی

AERI

Contents

- 1 ▶ Investigating the effect of water use management on wheat yield and water productivity using the rain flat sprinkler irrigation method.
Nader Naderi, Alireza Mohammadi
- 15 ▶ Investigating the Status of Virtual Water of Irrigated Wheat and Providing Technical and Policy Solutions for its Improvement in Iran.
Nader Heydari, Farshid Taran
- 35 ▶ Effect of fiber-based Sensors Structure on Block Sensor in soil Moisture monitoring performance
Maryam Navabian, Mostafa Jamshidi Avanaki
- 51 ▶ Assessment of Options to Reduce Irrigation Demand and Daptation to Water Scarcity in Fars Province
Abdolrahman Mirzaei, Afshin Soltani, Fariborz Abbasi, Ebrahim Zeinali, Shahrzad Mirkarimi
- 79 ▶ Simulating the effect of trapezoidal labyrinth weir apex ratio on discharge coefficient using Flow-3D software
Saeed Alghezi, Javad Mozaffari
- 95 ▶ Evaluation of the Efficiency of Pyramid solar stills under Different Salinity and Water Depth Levels in a Semi-Arid Region
Raziye Sadeghi, Khaled Ahmadaali, Sina Kosari, Salman Zare, Shahram Khalighi Sigaroodi

AERI

تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



وزارت جهاد کشاورزی

سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی

مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی

تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی

(تحقیقات مهندسی کشاورزی)

پژوهشی

جلد ۲۵، شماره ۹۷، زمستان ۱۴۰۳ شاپا چاپی: ۶۷۶۴ - ۳۰۶۰ شاپا الکترونیکی: ۶۷۷۲ - ۳۰۶۰

فهرست مقالات

پژوهشی

بررسی اثر مدیریت مصرف آب بر عملکرد و بهره‌وری آب گندم با روش آبیاری بارانی تاشو (رین فلت)

۱ نادر نادری، علیرضا محمدی

بررسی وضعیت آب مجازی گندم آبی و ارائه راهکارهای فنی و سیاسی برای بهبود آن در ایران

۱۵ نادر حیدری، فرشید تاران

اثر خصوصیات سازه‌ی الیافی شیشه‌ای حصیری بر دقت حسگر بلوک متخلخل در پایش رطوبت خاک

۳۵ مریم نوابیان، مصطفی جمشیدی اوانکی

ارزیابی راهکارهای کاهش تقاضا برای آبیاری و سازگاری با کم آبی در استان فارس

۵۱ عبدالرحمان میرزائی، افشین سلطانی، فربرز عباسی، ابراهیم زینلی، شهرزاد میرکریمی

شبیه‌سازی اثر نسبت راس سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای بر ضریب آبگذری با نرم‌افزار FLOW 3D

۷۹ صائب الغزی، جواد مظفری

ارزیابی بهره‌وری هرم‌های تقطیری خورشیدی تحت تأثیر سطوح مختلف شوری و عمق آب در منطقه نیمه‌خشک

۹۵ راضیه صادقی، خالد احمدآلی، سینا کوثری، سلمان زارع، شهرام خلیقی سیگارودی

مجله "تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی"

با درجه علمی - پژوهشی مطابق ابلاغ (مجوز) شماره ۳/۱۸/۸۱۶۷۱ مورخ ۱۳۹۴/۰۴/۳۱ وزارت علوم، تحقیقات و فناوری.

نمایه شده در CABI، پایگاه استنادی علوم جهان اسلام (ISC)، ایران ژورنال، بانک اطلاعات نشریات کشور، پایگاه اطلاعات جهاد دانشگاهی و مرکز اطلاعات و مدارک علمی کشاورزی (Agris) (Agris)

صاحب امتیاز: مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی

مدیر مسئول: دکتر حسین دهقانی‌سانج

سر دبیر: دکتر نادر عباسی

دستیار سر دبیر: دکتر امید رجا

هیأت تحریریه (به ترتیب حروف الفبا):

محمدحسین امید	استاد، دانشگاه تهران
عاطفه پرورش‌ریزی	دانشیار، دانشگاه تهران
نادر حیدری	دانشیار، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی
محمود شفاعی بجستان	استاد، دانشگاه شهید چمران اهواز
فریبرز عباسی	استاد، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی
نادر عباسی	استاد، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی
صلاح کوچک‌زاده	استاد، دانشگاه تهران
محمدجواد منعم	استاد، دانشگاه تربیت مدرس
ابوالفضل ناصری	دانشیار، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان شرقی
علیرضا کیانی	استاد، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان گلستان

هیأت تحریریه بین‌المللی (به ترتیب حروف الفبا):

علی ترابی حقیقی	دانشیار، گروه مهندسی و مدیریت هیدروسستم‌ها، دانشکده آب و انرژی و محیط زیست، دانشگاه Oulu فنلاند
محمدعلی شریفی	دانشیار مؤسسه علوم جغرافیایی و مشاهده زمین، دانشگاه Twente، هلند
راضیه فرمانی	دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی، دانشگاه Exeter انگلستان

بررسی‌کنندگان / این شماره:

- بهروز ابوالپور	- عاطفه پرورش‌ریزی	- ابراهیم دهقانیان	- فریبرز عباسی
- مهدی اسمعیلی ورکی	- فرشید تاران	- امید رجا	- نادر عباسی
- افشین اشرف زاده	- علیرضا توکلی	- مهدی زینی‌وند	- مصطفی گودرزی
- هادی افشار	- سیدابوالقاسم حقایقی مقدم	- سالومه سپهری	- عبدالمجید لیاقت
- جواد باغانی	- افشین خورسند	- محمدعلی شاه‌رخ‌نیا	- علی مختاران

ویراستار علمی و ادبی: محمدرضا داهی

ویراستار انگلیسی: محمدرضا داهی

مدیر داخلی: افشین یوسف گمرکچی

صفحه‌آرا: شبنم جباری

آدرس: کرج، بلوار شهید فهمیده، ص. پ. ۸۴۵-۳۱۵۸۵، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی

تلفن: ۰۲۲۰۵۳۲۰، ۰۲۲۷۰۵۲۴۲ و ۰۲۲۷۰۸۳۵۹ (۰۲۶)، دورنگار: ۰۲۲۷۰۶۲۷۷ (۰۲۶)

پایگاه اطلاعاتی مؤسسه: www.aeri.ir

پایگاه اطلاعاتی مجله: <http://idser.areeo.ac.ir>

پیام‌نگار: aridsej@areeo.ac.ir

شرایط پذیرش و راهنمای تهیه مقاله برای مجله تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی

نشریه "تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی" مقاله‌های علمی- پژوهشی در زمینه‌های فنی و مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی را که به زبان فارسی نوشته شده و قبلاً منتشر نشده یا برای انتشار در نشریه یا نشریه‌ای دیگر ارسال نشده باشد، برای بررسی و داوری می‌پذیرد و در صورت تأیید به ترتیب تاریخ وصول چاپ می‌کند. همچنین مقاله‌های گردآوری یا تحلیلی که توسط پژوهشگران صاحب‌نظر و تنها به دعوت هیأت تحریریه در زمینه مسائل روز فنی و مهندسی تهیه شده است، پس از بررسی و تصویب به چاپ خواهد رسید.

مسئولیت هر مقاله از نظر علمی بر عهده نویسنده (یا نویسندگان) است. ترتیب نام نویسندگان بر عهده شخص مکاتبه‌کننده خواهد بود و مکاتبات با وی انجام خواهد شد. نشریه در رد یا قبول و حک و اصلاح مقالات آزاد است و مقاله‌های دریافتی مسترد نخواهند شد. نشریه در نشر مطالب به صورت الکترونیکی، اینترنتی یا اینترنتی مجاز است.

مقاله‌ها باید با عنوان کامل، **بدون نام و مشخصات نگارنده (یا نگارندگان)**، به انضمام برگ مشخصات مقاله، روی کاغذ سفید A4 حداکثر در ۱۵ صفحه با فاصله سطرها یک سانتی‌متر و حاشیه از بالا ۳/۸ سانتی‌متر و ۲/۵ سانتی‌متر از چپ و راست و پایین صفحه با قلم فارسی نازنین (B Nazanin)، اندازه ۱۳، به صورت تایپ رایانه‌ای در محیط ورد (Microsoft Word) تهیه و به همراه اصل فایل در فرمت ورد (Word) از طریق سامانه (<http://idser.areeo.ac.ir>) ارسال شود. ارسال فرم تعهد نگارندگان و فرم تعارض منافع نیز الزامی است.

ترتیب و شرح قسمت‌های مختلف مقاله

مقاله‌های ارسالی شامل برگه مشخصات مقاله، عنوان، چکیده فارسی، واژه‌های کلیدی، مقدمه، مواد و روش‌ها، نتایج و بحث، نتیجه‌گیری، قدردانی، مراجع مورد استفاده، چکیده مبسوط و واژه‌های کلیدی به زبان انگلیسی و در صورت لزوم ضمائم است.

برگه مشخصات مقاله

این قسمت در یک صفحه جداگانه تهیه می‌شود و در برگه‌بند عنوان مقاله، نام و نام خانوادگی و مرتبه علمی نگارنده (یا نگارندگان)، آدرس کامل، شماره تلفن، شماره دورنگار، آدرس پست الکترونیکی، و منبعی خواهد بود که مقاله از آن استخراج شده است (پایان نامه دانشجویی، طرح تحقیقاتی و مانند آن). برگه مشخصات مقاله باید به دو زبان فارسی و انگلیسی ارائه شود.

عنوان

عنوان باید کوتاه (حداکثر ۲۵ کلمه)، رسا، جامع، و بیانگر محتوای مقاله باشد.

چکیده فارسی

چکیده فارسی (حداکثر در ۲۰۰) کلمه بیانگر فرضیه، هدف پژوهش، توصیف مختصر مواد و روش‌ها، نتایج اصلی به دست آمده و نتیجه‌گیری کلی از پژوهش است.

واژه‌های کلیدی

واژه‌های کلیدی شامل حداکثر پنج واژه مجزا یا مرکب خواهد بود و برای نشان دادن ماهیت و گرایش موضوع مقلله به هنگام طبقه‌بندی در سامانه‌های اطلاع‌رسانی است.

مقدمه

در این بخش باید موضوع مورد پژوهش معرفی و فرضیه مورد نظر تعریف شود. همچنین لازم است به اهم کارهای پژوهشی انجام شده قبلی در این مورد نیز اشاره و لزوم پژوهش مورد نظر تشریح و هدف مطالعه حاضر مشخص شود.

مواد و روش‌ها

این قسمت شامل شرح کامل مواد و روش‌های مورد استفاده در اجرای پژوهش است. در مورد روش‌های متداول و شناخته شده، ذکر منبع مربوط کافی است. ذکر مشخصات فنی و نام‌های دقیق علمی و تجاری مواد و دستگاه‌ها و همچنین معیارهای مورد استفاده ضرورت دارد.

نتایج و بحث

این بخش در برگیرنده نتایج حاصل از پژوهش به صورت متن(ها)، جدول(ها)، شکل(ها) و تصویر(ها) است. در این قسمت علل و روابط بین آنها در ایجاد نتایج حاصل، با استفاده از منابع علمی دیگر، مورد بحث قرار می‌گیرد. ضرورت دارد جدول‌ها و شکل‌ها با اندازه مناسب و کیفیت بالا تهیه شود، ارقام خوانا باشند، و تغییرات آشکار در منحنی‌ها با واحدهای سنجش سیستم بین‌المللی (SI) تهیه شود. عنوان جدول در بالا و عنوان نمودار یا شکل در زیر (به فارسی و انگلیسی) نوشته شود. عنوان جدول یا نمودار باید مختصر و گویای ارتباط عوامل مورد بحث در جدول یا نمودار باشد (لازم است تمامی توضیحات محورها و تمامی واحدها در نمودارها هم به فارسی و هم انگلیسی نوشته شوند و اعداد داخل جداول و نمودارها به انگلیسی نوشته شود). نتایج بررسی‌های آماری باید به یکی از روش‌های علمی در جدول(ها) منعکس شود مگر در مواردی که ذکر ارقام به صورت خام ضروری باشد. هر جا به جدول یا نموداری اشاره می‌شود آن جدول یا نمودار باید بلافاصله نشان داده شود مگر در موارد ضروری که حسب مورد در قسمت ضمایم ارائه خواهد شد. اعداد، مقیاس‌ها، واحدها در متن مقاله و در جدول و نمودار به فارسی نوشته شود. کارهای ترسیمی اصلی بوده یا به صورت رایانه‌ای و سازگار با ورد (Word) دارای کیفیت مناسب برای چاپ باشد. تکرار جدول‌ها، نمودارها، و غیره به هنگام بیان نتایج ضرورت ندارد.

نتیجه‌گیری

این قسمت شامل یک استنتاج نهایی، خلاصه پژوهش، و ذکر کاربرد (یا کاربردهای) احتمالی موضوع مورد تحقیق است. نگارندگان می‌توانند پیشنهادها را خود را برای انجام تحقیقات تکمیلی ارائه کنند.

قدردانی

در این بخش (در صورت نیاز)، از اشخاص حقیقی، حقوقی، سازمان‌ها، و نهادهای مؤثر در انجام پژوهش قدردانی می‌شود.

مراجع

- ۱- کلیه مراجعی که در متن مقاله بیان شده است باید در فهرست مراجع و بعد از متن آورده شوند. نگارندگان موظف‌اند مشخصات مراجع را چه در این بخش، چه در متن مقاله به درستی و مطابق با مشخصاتی بیاورند که در هر یک از منابع دیده می‌شود.
- ۲- در متن مقاله فقط به نام نگارنده (یا نگارندگان) و سال انتشار مرجع اشاره شود (به صورت شماره اشاره نشود). مثال: (Razavi, 2003)، (Regier & Schubert, 2001)

۳- اگر مرجع بیشتر از دو نگارنده دارد نام نفر اول همراه با «*et al.*» ذکر شود اما در فهرست مراجع اسامی تمامی نگارندگان درج شود.

مثال: (Budiman *et al.*, 1999)

۴- مراجع به ترتیب حروف الفبای نام نگارندگان مرتب شود. در صورتی که نگارنده‌ای در یک سال چند مقاله دارد با اضافه کردن حروف a و b و ... تنظیم شوند.

۵- **مراجع فارسی به زبان انگلیسی ترجمه شده و در انتها عبارت (in Persian) قید شود.**

۶- از روش زیر برای مرتب کردن مراجع استفاده شود.

الف- تک نگارنده

Elsafi, S. H., 2014. Artificial neural networks (ANNs) for flood forecasting at Dongola Station in the River Nile, Sudan. *Alexandria Engineering Journal*, 53(3), pp.655-662.

ب- دو یا چند نگارنده

Kashefipour, S. M., Lin, B., & Falconer, R. A. (2006). Modelling the fate of faecal indicators in a coastal basin. *Water Research*, 40(7), pp.1413-1425.

پ- کتاب

Chanson, H., 2004. *Hydraulics of open channel flow*. Butterworth-Heinemann.

ت- فصلی از کتاب

Pfister, M., Schleiss, A. J., & Tullis, B. (2013). *Effect of driftwood on hydraulic head of piano key weirs*. In S. Erpicum., F. Laugier., M. Pfister., M. Piroton., G. M. Cicero., & A. J. Schleiss (Eds.) *Labyrinth and Piano Key weirs II* (pp 225-265). CRC Press, Leiden, Netherlands.

در صورتی که تعداد نگارندگان فصل یک نفر باشد از (Ed.) و در غیر این صورت از (Eds.) استفاده شود.

ث- مجموعه مقاله‌ها

Pagliara, S., & Carnacina, I. (2010). *Scour and dune morphology in presence of large wood debris accumulation at bridge pier*. In *International Conference on Fluvial Hydraulics*. Sep. 8-10. Braunschweig, Germany.

ج- دیسکت فشرده مجموعه مقاله‌ها (CD)

فقط کلمه CD قبل از Proceeding یا مجموعه مقاله‌ها آورده شود.

چنانچه مقاله‌ای در دست چاپ است، به جای کلمه ناشر، In press یا «در دست چاپ» به کار برده شود.

چ- پایان نامه، گزارش یا طرح تحقیقاتی

Stockstill, R.L. (1998). Innovative lock design, report 1, case study, New McAlpine Lock Filling and Emptying System, Ohio River, Kentucky. *Technical Rep. INP-CHL*, 1.

Salahinia, S. (2015). Experimental investigation of the subsurface flow under rainfall recharge and soil variability (M. Sc. Thesis), Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran. (in Persian)

ه- مرجع بدون نویسنده مشخص

Anon. 1998. ASAE Standard: ASAE S368.1. Compression tests of food materials of convex shape. ASAE. St. Joseph. MI 49085-9659. USA.

چکیده مبسوط به زبان انگلیسی

چکیده مبسوط انگلیسی شامل مقدمه، مواد و روش‌ها، نتایج و بحث، نتیجه‌گیری، قدردانی و کلمات کلیدی است که طبق فرمت نشریه (در بخش راهنمای نگارندگان) تهیه شده در انتهای مقاله آورده می‌شود.

واژه‌های کلیدی به زبان انگلیسی

این واژه‌ها معادل "واژه‌های کلیدی فارسی" به زبان انگلیسی ذکر شود.

تذکر

الف- برای پذیرش اولیه مقاله و بررسی آن، رعایت دقیق دستورالعمل بالا ضروری است (جزئیات فرمت تهیه مقاله در سایت نشریه و در بخش راهنمای نگارندگان موجود است).

ب- به منظور بهبود کیفیت مقاله و رفع اشکالات اساسی احتمالی توصیه می‌شود که نگارندگان محترم قبل از ارسال مقاله برای درج در این نشریه آن را به نظر دو نفر از همکاران مجرب خود برسانند.

تبصره

نشریه علمی پژوهشی تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی کتاب‌ها و مجلات جدید مهندسی کشاورزی به زبان فارسی را که یک نسخه از آن به دفتر نشریه برسد، پس از تصویب هیأت تحریریه معرفی می‌نماید.

بررسی اثر مدیریت مصرف آب بر عملکرد و بهره‌وری آب گندم با روش آبیاری بارانی تاشو (رین فلت)

نادر نادری^{۱*}، علیرضا محمدی^۲

^۱ نادر نادری، استادیار پژوهش، بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان سمنان (شاهرود)، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شاهرود، ایران.

^۲ علیرضا محمدی، استادیار پژوهش، بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان سمنان (شاهرود)، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شاهرود، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۲۸

چکیده

برای بررسی اثر دور و مقدار آب آبیاری در روش آبیاری بارانی تاشو بر عملکرد و بهره‌وری آب گندم، آزمایشی در سال‌های ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۰ در خاکی با بافت لومی شنی در مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی سمنان (شاهرود) اجرا گردید. کرت‌های اصلی شامل ۳ دور آبیاری (۴، ۵ و ۶ روز) و در کرت‌های فرعی، سطوح آبیاری (۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد) قرار گرفت. نیاز آبی به روش پنمن - مانیتیت محاسبه شد و با کنتور حجمی در اختیار تیمارهای آبیاری قرار گرفت. نتایج اثر ساده تیمارها نشان داد تیمارهای دور آبیاری ۴ و ۵ روز به ترتیب با عملکرد دانه ۵۴۱۰/۶ و ۵۰۱۶/۱ کیلوگرم در هکتار و بهره‌وری آب ۱/۱۶۹ و ۱/۰۷۷ کیلوگرم بر مترمکعب در گروه آماری برتر هستند. از نظر تامین نیاز آب آبیاری، تیمار ۸۰ درصد سطح تامین نیاز آب آبیاری با متوسط عملکرد ۵۵۲۰/۷ کیلوگرم و بهره‌وری آب ۱/۱۳۰ کیلوگرم بر مترمکعب، بهترین تیمار مقدار آبیاری بود. اثر متقابل تیمارهای آزمایشی نشان داد تیمار دور ۴ روز با ۸۰ درصد تامین نیاز آبی با عملکرد ۶۱۷۲/۵ کیلوگرم در هکتار و بهره‌وری آب ۱/۳۳۶ کیلوگرم بر مترمکعب بهترین تیمار است و با کاهش دور آبیاری به ۴ روز مقدار آب مصرفی را تا ۲۰ درصد می‌توان کاهش داد.

واژه‌های کلیدی: دور آبیاری، عملکرد، مقدار آب، آبیاری بارانی تاشو

مقدمه

بیش از ۷۰ درصد آن از طریق تبخیر از دسترس خارج می‌شود. حجم منابع آب تجدیدپذیر حدود ۱۰۰ میلیارد مترمکعب است که ۷۰ درصد آن در بخش کشاورزی مصرف می‌شود (Naseri et al., 2017). استان سمنان دارای اقلیم خشک و نیمه خشک است و از این رو برای جبران نیاز آبی گیاهان، نیاز به آبیاری مکرر خواهد بود. نزدیک به ۹۲ درصد از آب کشاورزی، از طریق آب‌های زیرزمینی تامین می‌شود. حجم کسری سالیانه مخزن آب‌های زیرزمینی استان ۱۳۹/۳ میلیون متر مکعب برآورد شده است. به منظور دستیابی به تولید پایدار در این شرایط، یکی از راهکارهای مؤثر و عملی استفاده بهینه از آب و صرفه جویی در مصرف آب در

امنیت غذایی و افزایش ضریب خود اتکایی در محصولات اساسی مانند گندم از ارکان مهم برنامه‌های توسعه کشور است. مهم‌ترین چالش این خود اتکایی بحران آب است، زیرا خشکسالی و کم آبی در ایران واقعیتی اقلیمی است و با توجه به روند روزافزون نیاز بخش‌های مختلف به آب، این مشکل در سال‌های آینده حادثتر نیز خواهد شد. میانگین بارندگی دراز مدت کشور ۲۴۳ میلی‌متر (یک سوم میانگین جهانی) و پتانسیل تبخیر در کشور حدود ۲۰۰۰ میلی‌متر در سال (سه برابر متوسط جهانی) است. حجم کل منابع آب ناشی از بارش در کشور ۴۰۳ میلیارد مترمکعب است که

کمک کرد (Naderi et al., 2018). با استفاده از سامانه های نوین آبیاری و برنامه ریزی درست آبیاری (مقدار و دور آبیاری)، استفاده بهینه از منابع محدود آب میسر می گردد. مهتدی و همکاران (Mohtadi et al., 2017) بهره‌وری آب برای گندم را در برخی از شبکه‌های آبیاری و زهکشی استان خوزستان بررسی و گزارش کردند بیشترین بهره‌وری‌ها مربوط به شبکه‌های آوان، گتوند و شادگان به ترتیب با ۱/۰۳، ۰/۹۸ و ۰/۸۵ کیلوگرم بر مترمکعب آب است. پایین‌ترین بهره‌وری مربوط به شبکه رامشیر با متوسط بهره‌وری ۰/۴۴ کیلوگرم بر مترمکعب آب گزارش شده است. این محققان نتیجه‌گیری کردند زمانی که حجم آب آبیاری از نیاز آبی گندم بیشتر شود عملکرد ثابت و در بعضی مواقع کاهش پیدا می‌کند و در نتیجه باعث کاهش بهره‌وری می‌شود. صفرزاده و همکاران (Safarzadeh et al., 2021) اثر سه سامانه آبیاری سطحی، بارانی و قطره‌ای نواری را روی عملکرد و بهره‌وری آب گندم بررسی کردند و نشان دادند کمترین حجم آب کاربردی مربوط به سامانه قطره‌ای نواری است، بهره‌وری آب در این روش تنها ۵ درصد کمتر است تا در روش آبیاری بارانی، و استفاده از سامانه آبیاری بارانی ضمن ۴۰ درصد صرفه‌جویی در مصرف آب، نسبت به روش سطحی، بالاترین بهره‌وری آب را دارد. قدمی فیروزآبادی و همکاران (Ghadami Firouzabadi et al., 2017) با بررسی اثر سامانه‌های آبیاری جویچه‌ای، بارانی و قطره‌ای بر عملکرد و بهره‌وری آب سه ژنوتیپ گندم گزارش کردند آبیاری تیپ باعث افزایش ۱۳۲ و ۴۵ درصد در بهره‌وری مصرف آب نسبت به روش جویچه‌ای و بارانی شده است. این محققان می‌افزایند تفاوت بین ژنوتیپ‌ها از نظر عملکرد معنی‌دار نیست ضمن آنکه استفاده از هر دو روش آبیاری بارانی و تیپ، به‌جای روش جویچه‌ای، برای تمامی ارقام گندم مورد استفاده دارای توجیه اقتصادی است و روش آبیاری بارانی نسبت به روش آبیاری تیپ از لحاظ اقتصادی برتری دارد.

محصولات مهم زراعی است (Anonymous, 2017). در استان سمنان گندم فاریاب با سطح زیر کشت ۲۲۰۶۰ هکتار و با دارا بودن ۳۴ درصد از سطح کل محصولات فاریاب استان جایگاه ویژه‌ای در بوم نظام‌های زراعی استان دارد (Anonymous, 2024). بنابراین، به منظور افزایش بهره‌وری آب، به‌ویژه برای گندم، استفاده از تکنولوژی‌های نوین آبیاری اهمیت بسزایی دارد. سامانه‌های آبیاری تحت فشار، یکی از نتایج پیشرفت‌های تکنولوژی، برای جلوگیری از هدررفت آب و افزایش راندمان آب کاربردی در بخش کشاورزی است. در این راستا، استفاده از روش آبیاری بارانی در مزارع گندم راهی برای استفاده موثرتر از منابع آبی است. سامانه آبیاری بارانی تاشو^۱ که در این پژوهش استفاده شد نسبت به روش‌های رایج آبیاری بارانی نیاز به فشار کمتری دارد و در نتیجه مصرف انرژی در این روش پایین‌تر است، ضمن آنکه اجرای آن نسبت به دیگر روش‌های بارانی سرعت بالاتری نیز دارد (Naderi et al., 2018). به‌منظور توزیع یکنواخت آب، توصیه شده است لوله‌های بارانی تاشو عمود بر جهت شیارها نصب شوند تا اگر قطره‌های آب با گیاه برخورد کند، رواناب حاصل درون شیارها جاری شوند و تمام سطح مزرعه به طور یکسان آبیاری شود (Roodbarani et al., 2021). یکی از شاخص‌های پرکاربرد که برای ارزیابی مصرف بهینه آب در تحلیل‌ها و تصمیم‌گیری‌ها به‌کار می‌رود، شاخص بهره‌وری آب است. این شاخص بنا به تعریف برابر است با مقدار محصول اقتصادی به ازای واحد حجم آب مصرفی. یکی از عوامل مهم موثر بر شاخص بهره‌وری آب برنامه آبیاری است. برنامه آبیاری شامل مقدار آب مورد نیاز محصول است که در دور آبیاری در اختیار آن قرار می‌گیرد (Abbasi et al., 2017). اعتقاد بر این است اگر در روش‌های نوین آبیاری آب مورد نیاز به صورت درست و مناسب استفاده شود، علاوه بر کاهش هزینه‌ها، می‌توان با افزایش راندمان آبیاری در میزان آب مصرفی صرفه‌جویی و به تقویت سفره‌های آب زیرزمینی

¹ Rain Flat

می‌یابد، اما هزینه سالانه خرید نوارهای آبیاری (تیپ) برای کشاورز سنگین خواهد بود. در روش بارانی، با وجود افزایش نسبی مصرف آب، هزینه اولیه سالیانه آبیاری برای کشاورز به اندازه روش قطره‌ای نواری نخواهد بود. سامانه آبیاری بارانی تاشو نیز دارای مزایایی است که امروزه کاربرد آن را بیشتر کرده است. هنگامی که نیاز به یک روش کاربردی و با دوام برای انتقال آب به مزارع وجود دارد، می‌توان نیازهای سامانه آبیاری را با استفاده از لوله‌های بارانی تاشو به راحتی برطرف کرد. نصب سریع و آسان بدون نیاز به جوشکاری، جمع‌آوری آسان و سریع، امکان استفاده از همه نوع ماشین‌آلات کشاورزی اعم از دستگاه‌های کاشت، داشت و برداشت در مزرعه به دلیل سهولت جمع‌آوری و نصب مجدد، بی‌نیازی به نیروی متخصص و ابزار خاص برای نصب و جمع‌آوری، امکان استفاده برای آبیاری چندین مزرعه و نیز بهترین گزینه برای استفاده در مزارع استیجاری از مزایای سامانه آبیاری بارانی تاشو هستند (Seyedi et al., 2024).

رودبارانی و همکاران (Roodbarani et al., 2021) عملکرد سامانه آبیاری بارانی تاشو را با سامانه‌های آبیاری شیاری و تیپ بر مزرعه لوبیا بررسی و مقایسه کردند و نشان دادند روش آبیاری بارانی تاشو، نسبت به روش آبیاری تیپ و شیاری، موجب افزایش در عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک به ترتیب به میزان ۲۹/۵ درصد و ۲۷/۸ درصد شده است، اما این افزایش معنی‌دار نبود. بهره‌وری آب در روش‌های آبیاری بارانی تاشو و تیپ با یکدیگر اختلاف معنی‌داری نداشتند، اما اختلاف آن‌ها با سامانه شیاری معنی‌دار بود. با توجه به نسبت هزینه‌های اجرای هر یک از روش‌های آبیاری مشخص گردید که هزینه سامانه آبیاری تیپ بیشتر از هزینه سامانه آبیاری بارانی تاشو است. بنابراین، کشت لوبیا با استفاده از روش آبیاری بارانی تاشو به دلیل بهره‌وری اقتصادی مناسب‌تر، در مقایسه با سامانه‌های آبیاری قطره‌ای تیپ و آبیاری سطحی شیاری، توصیه گردید. عابدین‌پور و اثنا اشاری (Abedinpour & Athna Ashari, 2018) سامانه آبیاری

در پژوهشی دیگر، اثر دو روش آبیاری نواری با انتهای بسته و شیاری و مقادیر مختلف ۱۰۰، ۷۵ و ۵۵ درصد نیاز آبی بر عملکرد و بهره‌وری آب گندم هامون در زابل بررسی و نشان داده شد بهره‌وری آب در محدوده ۰/۹۵ و ۱/۱۷ کیلوگرم بر مترمکعب آب است. و تیمار ۷۵ درصد آبیاری در روش آبیاری نواری با بهره‌وری مصرف آب ۱/۱۵ کیلوگرم بر مترمکعب آب و عملکرد ۴۰۴۰ کیلوگرم در هکتار بهترین گزینه برای کم‌آبیاری در منطقه است (Keykhaei, 2017). & Ganji Khorramdel,

نخجوانی و همکاران (Nakhjavanimoghaddam et al., 2017) گزارش کردند که برای دستیابی به مقادیر بهینه بهره‌وری آب آبیاری در منطقه مشهد و در شرایط محدودیت منابع آب، اولویت کشت گندم با مزارعی است که با مدیریت کم‌آبیاری کنترل شده و با مصرف آب آبیاری به میزان ۳۰۰ میلی‌متر، بهره‌وری آب این گیاه در حدود ۱/۶ کیلوگرم بر مترمکعب آب شود. با در نظر گرفتن میزان بارندگی موثر این منطقه، باید با به‌کارگیری کل آب کاربردی به اندازه ۴۲۰ میلی‌متر و با اعمال مدیریت کم‌آبیاری، بهره‌وری آب کاربردی گندم برابر ۱/۱ کیلوگرم بر مترمکعب آب حاصل گردد. جلینی (Jolaini, 2013) اثر مقدار آب مصرفی و زمان قطع آب آبیاری را در روش آبیاری بارانی بر میزان عملکرد و بهره‌وری آب در ارقام مختلف گندم بررسی کرد. عملکرد گندم در سه سطح آبیاری ۷۰، ۸۵ و ۱۰۰ درصد به ترتیب برابر با ۳۱۸۲، ۴۶۳۹ و ۴۷۴۸ کیلوگرم در هکتار به دست آمد. عملکرد در دو تیمار ۸۵ و ۱۰۰ درصد، تفاوت معنی‌داری با یکدیگر نداشتند. بیشترین میزان بهره‌وری آب در تیمار ۸۵ درصد آب مصرفی به دست آمد. توصیه شده است در زمان مواجهه با کمبود آب، سطح ۸۵ درصد آب مصرفی و نیز قطع آب در مرحله ساقه رفتن و رقم الوند استفاده شود. دو روش عمده آبیاری تحت فشار در کشور، روش قطره‌ای نواری و بارانی هستند که هر یک مزایا و معایب مخصوص به خود را دارد. در روش آبیاری قطره‌ای نواری بهره‌وری آب افزایش

بارانی تاشو را از نظر فنی ارزیابی کردند. به دلیل اینکه در این سامانه برای همپوشانی باید لوله ها به صورت موازی کنار هم قرار گیرند، ارزیابی برای فاصله های مختلف ۴، ۵ و ۶ متر و در فشار ۰/۷ بار (توصیه سازندگان) اجرا گردید. نتایج تحقیق نشان داد که معیارهای ضریب یکنواختی کریستیانسن^۱ (CU)، یکنواختی توزیع آب^۲ (DU)، راندمان واقعی در ربع پایین اراضی^۳ (AELQ) و راندمان پتانسیل کاربرد در ربع پایین^۴ (PELQ) به ترتیب برابر ۵۷/۴، ۴۶/۳، ۴۰/۲ و ۵۴/۰ درصد برای فاصله ۶ متر و ۶۲/۲، ۵۴/۴، ۵۱/۲ و ۶۶/۵ درصد برای فاصله ۵ متر و ۷۸/۵، ۶۶/۷، ۷۱/۸ و ۸۳/۰ درصد برای فاصله ۴ متر به دست آمد. با توجه به نتایج شاخص های ارزیابی، مشاهده شد هنگامی که فاصله قرارگیری لوله ها بیش از ۴ متر باشد، شاخص های یکنواختی پخش آب از حد مطلوب و استاندارد تعیین شده برای سامانه های آبیاری بارانی، پایین تر است. بنابراین، برای افزایش یکنواختی توزیع و پخش آب در این سامانه آبیاری، فاصله لوله ها به میزان ۴ متر در فشار ۰/۷ بار توصیه گردید.

با توجه به مزایای سامانه جدید آبیاری بارانی تاشو، گزارش ها نشان می دهد این سامانه با شرایط اقلیمی کشور نیز سازگار است. به منظور توسعه، کاربرد و بومی سازی لازم است این سامانه از نظر پارامترهای اصلی آبیاری بررسی شود. مقاله حاضر برگرفته از پژوهشی است که در آن دور آبیاری و مقدار

آب کاربردی زراعت گندم در روش آبیاری بارانی تاشو بررسی شده است.

مواد و روش ها

مشخصات محل اجرای پروژه

این پژوهش در ایستگاه بسطام مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان سمنان (شاهرود) در دو سال زراعی مطابق جدول (۱) به اجرا درآمد. عرض جغرافیایی ایستگاه ۳۶ درجه و ۲۸ دقیقه شمالی و طول آن ۵۴ درجه و ۵۸ دقیقه شرقی و ارتفاع از سطح دریا ۱۳۶۶ متر است. بر پایه آمار بلند مدت هواشناسی، میانگین حداقل، متوسط و حداکثر دمای سالانه به ترتیب ۸/۷، ۱۴/۷ و ۲۰/۶ درجه سانتی گراد و متوسط بارندگی سالیانه بلندمدت در این منطقه ۱۵۲ میلی متر است. این ایستگاه در پهنه بندی اقلیمی جزو اقلیم های خشک و نیمه خشک سرد محسوب می شود.

کیفیت آب و خاک محل آزمایش

آب مورد استفاده از چاه های موجود تامین شده است. آب به لحاظ کاربرد در زراعت محدودیتی نداشته و کیفیت آن خوب است. نتایج آزمایش کیفیت آب در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۱- تاریخ های کاشت و برداشت در سال های انجام پژوهش
Table 1- Planting and harvesting dates in the years of research

سال زراعی		
۱۳۹۹-۱۴۰۰	۱۳۹۸-۱۳۹۹	
۳ آبان	۲۸ مهر	تاریخ کاشت
۱۳ تیر	۱۰ تیر	تاریخ برداشت

¹ Uniformity Christiansen's Coefficient

² Distribution Uniformity

³ Application Efficiency of Low Quarter

⁴ Potential Efficiency of Low Quarter

بررسی اثر مدیریت مصرف آب بر عملکرد و بهره‌وری آب گندم با روش آبیاری بارانی تاشو (رین فلت)

جدول ۲- ویژگی‌های شیمیایی آب آبیاری

Table 2- Chemical properties of irrigation water

SAR	آنیون‌ها (میلی اکوی والان بر لیتر)		کاتیون‌ها (میلی اکوی والان بر لیتر)				pH	هدایت الکتریکی (میکرو موس بر سانتی‌متر)
	کربنات و بی کربنات	سولفات	کلر	پتاسیم	کلسیم و منیزیم	سدیم		
۴/۳۲	۳/۱۴	۰/۹۶	۵/۶۴	-	۴/۷۶	۶/۶۷	۸/۳	۹۸۵

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در مزرعه با نمونه‌برداری تعیین شد. پارامترهای مربوط شامل بافت خاک، ظرفیت زراعی، نقطه پژمردگی، pH، هدایت الکتریکی (EC) و عناصر شیمیایی خاک شامل نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم و منیزیم تعیین گردید. مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک در جدول (۳) درج شده است.

روش اجرای پژوهش

این پژوهش به منظور بررسی اثر دور آبیاری و مقادیر مختلف آب بر عملکرد محصول و بهره‌وری آب گندم در روش آبیاری بارانی تاشو در مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع

جدول ۳- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش

Table 3- Physical and chemical properties of the soil

عمق خاک (سانتی‌متر)		پارامترهای اندازه‌گیری شده
۳۰-۶۰	۰-۳۰	
لومی شنی	لومی شنی	۱- بافت خاک
۵۵	۵۳	الف- درصد شن
۳۳	۳۲	ب- درصد سیلت
۱۲	۱۵	ج- درصد رس
۱/۵۸	۱/۵۳	۲- وزن مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب)
۱۸/۶	۱۹/۷	۳- رطوبت وزنی در حد ظرفیت مزرعه (درصد)
۹/۰	۹/۴	۴- رطوبت وزنی در نقطه پژمردگی (درصد)
۸/۰۸	۷/۹۰	۵- اسیدیته خاک (pH)
۱/۶۸	۳/۹۹	۶- هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک (دسی زیمنس بر متر)
		۷- عناصر غذایی
۳۹۰	۳۸۰	الف- پتاسیم قابل جذب (قسمت در میلیون)
۹/۵۸	۱۳/۵	ب- فسفر قابل جذب (قسمت در میلیون)
۰/۵۳	۰/۹۵	ج- درصد کربن آلی
۳۴/۰۲	۳۳/۴۹	۸- درصد مواد خنثی شونده



شکل ۱- نوارهای آبیاری تاشو (سمت راست) و سامانه آبیاری بارانی تاشو در حال کار (سمت چپ)
Figure 1- Rain flat irrigation strips (right) and rain flat sprinkler irrigation system in operation (left)

در مهر ماه، براساس آزمون خاک، کود فسفردار (۱۰۰ کیلوگرم در هکتار) و پتاسیم دار (۱۵۰ کیلوگرم در هکتار) به صورت پایه مصرف گردید و آماده سازی زمین صورت گرفت. بذر گندم رقم پیشگام با قارچ کش کاربوکسین تیرام (ویتاواکس) به نسبت ۲ در هزار ضد عفونی و کاشته شد. میزان بذر مصرفی ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار در نظر گرفته شد و برای کاشت در ردیف های به فاصله ۲۰ سانتی متر از ردیف کار غلات استفاده شد.

کود نیتروژن دار (۳۸۰ کیلوگرم در هکتار) در پاییز و بهار به صورت سرک مصرف شد. برای مبارزه با علف های هرز پهن برگ از علف کش توفوردی به میزان یک لیتر در هکتار (در ۴۰۰ لیتر آب) در مرحله پنجه زنی گندم استفاده شد. نیاز آبی کامل گیاه (۱۰۰ درصد نیاز آبی) به روش پنمن-مانتیت با استفاده از داده های هواشناسی ایستگاه هواشناسی موجود در مرکز برآورد شد. راندمان آبیاری با توجه به کوچکی کرت ها و نو بودن سامانه، ۸۰ درصد در نظر گرفته شد (Zarei et al., 2018). بر اساس نیاز آبی کامل محاسبات

آزمایش به صورت کرت های خرد شده بر پایه طرح بلوک های کامل تصادفی در سه تکرار اجرا شد. کرت های اصلی شامل سه دور آبیاری (۴، ۵ و ۶ روز) و کرت های فرعی شامل ۳ سطح آبیاری (۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد) بودند. عرض هر کرت ۱۰ متر و طول آن ۸ متر بود. فاصله بین کرت ها دو متر در نظر گرفته شد. در هر کرت دو لوله آبیاری بارانی به فاصله ۴ متر از یکدیگر قرار گرفته بودند. برای همپوشانی مناسب و افزایش یکنواختی پخش آب در این سامانه آبیاری، فاصله لوله ها به میزان ۴ متر توصیه گردیده است. در هر متر لوله، ۲۸ روزنه وجود دارد و آبدهی هر متر لوله آبیاری به طور متوسط ۱۸۰ لیتر در ساعت است. در سامانه آبیاری بارانی تاشو در مزرعه گندم، بعد از اینکه ارتفاع گندم به حداکثر خود رسید، آب پخش شده با گیاه برخورد می کند و در شیارهای موجود در زمین و در بین ردیف های کاشت جاری می شود و مشابه آبیاری سطحی و قطره ای آب در پای بوته ها قرار می گیرد و تمام سطح مزرعه به طور یکسان آبیاری می شود (Roodbarani et al., 2021).

صورت گرفت و نیاز آبی برای تیمارهای با سطوح آبی ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی محاسبه و از طریق کنتور حجمی در اختیار مزرعه قرار داده شد. برداشت نهایی از سطح ۴ مترمربع هر پلات دنبال گردید و عملکرد گندم در هر تیمار تعیین شد.

شاخص بهره‌وری آب با استفاده از معادله‌های ۱ و ۲ محاسبه گردید (Naderi & Ghadami Firouzabadi, 2022):

$$WP = \frac{Yield}{Irrigation} \quad (1)$$

که در آن، WP بهره‌وری آب آبیاری (کیلوگرم بر مترمکعب آب)، Yield عملکرد (کیلوگرم در هکتار) و Irrigation میزان آب آبیاری (مترمکعب در هکتار) است.

$$WP = \frac{Yield}{Rain + Irrigation} \quad (2)$$

که در آن، WP بهره‌وری مجموع آب آبیاری و بارندگی برای عملکرد (کیلوگرم بر مترمکعب آب)، Yield عملکرد (کیلوگرم در هکتار)، Rain میزان بارندگی موثر (مترمکعب) و Irrigation میزان آب آبیاری (مترمکعب در هکتار) است. برای محاسبه بارندگی موثر از روش ارائه شده توسط سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS) استفاده شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس داده‌های پژوهش نشان داد که اثر عوامل دور آبیاری و سطح آبیاری و اثر متقابل آن‌ها بر عملکرد محصول و بهره‌وری آب معنی‌دار است (جدول ۴).

عملکرد دانه گندم

با تجزیه واریانس مرکب داده‌ها مشخص گردید عملکرد دانه به شدت ($\alpha = 1\%$) تحت تاثیر دور آبیاری قرار دارد (جدول ۴). مقایسه میانگین‌ها و گروه‌بندی اثر دور آبیاری بر این صفت نشان داد تیمارهای دور آبیاری ۴ و ۵ روز به ترتیب با عملکرد دانه ۵۴۱۰/۶ و ۵۰۱۶/۱ کیلوگرم در هکتار در گروه آماری برتر قرار دارند (جدول ۵). تیمار با دور

آبیاری ۶ روز با میانگین عملکرد دانه ۳۴۸۶/۸ کیلوگرم در هکتار در گروه آماری دیگر قرار گرفت. بنابراین، در خاک لومی شنی بیشترین دور آبیاری بدون کاهش عملکرد، ۵ روز است زیرا اگر این دور آبیاری به ۶ روز افزایش یابد عملکرد دانه ۳۰/۴۸ درصد کاهش می‌یابد. صنوبر و همکاران (Senobar et al., 2011) در آزمایشی در خاک لومی رسی شنی، دوره‌های آبیاری ۸، ۱۰، ۱۲ و ۱۴ روز را بر ژنوتیپ‌های مختلف گندم بررسی و اعلام کردند دور آبیاری ۸ و ۱۰ روز بالاترین عملکرد دانه را دارا هستند.

تیمار درصد تامین آب آبیاری نیز اثر بسیار معنی‌داری (۱ درصد α) بر عملکرد داشت (جدول ۴). تیمارهای ۱۰۰ درصد و ۸۰ درصد تامین نیاز آبیاری به ترتیب با متوسط عملکرد ۵۵۲۰/۷ و ۵۲۱۸/۴ کیلوگرم در هکتار با بیشترین عملکرد در گروه آماری برتر قرار گرفتند. تیمار ۶۰ درصد تامین نیاز آبی با متوسط عملکرد دانه ۳۱۷۴/۳ کیلوگرم در هکتار کمترین مقدار عملکرد را دارا بود (جدول ۵). با توجه به نتایج این تحقیق تامین نیاز آبی را از ۱۰۰ به ۸۰ درصد می‌توان کاهش داد بدون آنکه در عملکرد کاهش معنی‌داری پدید آید. اگر کاهش میزان آب آبیاری از ۸۰ به ۶۰ درصد برسد عملکرد دانه ۳۹/۱۷ درصد کاهش خواهد یافت. کیخایی و گنجی‌خرم‌دل (Keykhaei & Ganji, 2017) Khorramdel سطح تامین آب به میزان ۷۵ درصد نیاز آبی را در روش آبیاری نواری برای گندم توصیه کرده‌اند. حاجی آبادی و همکاران (Hajiabadi et al., 2021) نیز گزارش کردند که با تامین آب کمتر از ۷۵ درصد نیاز آبی، عملکرد کاهش معنی‌داری پیدا می‌کند.

عملکرد دانه به شدت (۱ درصد α) تحت تاثیر تیمارهای دور آبیاری و سطح تامین آب آبیاری قرار گرفت (جدول ۴). عملکرد دانه تیمارهای آزمایشی در محدوده ۲۵۱۸/۴ تا ۶۳۵۲/۴ کیلوگرم در هکتار نوسان داشت که نشان می‌دهد در صورت اعمال مدیریت نامطلوب آبیاری، عملکرد ۶۰/۳۵ درصد کاهش می‌یابد (جدول ۶). تیمارهای

دور ۴ روز با ۱۰۰ درصد تامین نیاز آبی، دور ۴ روز با ۸۰ درصد تامین نیاز آبی و دور ۵ روز با ۱۰۰ درصد تامین نیاز آبی به ترتیب با بالاترین عملکرد دانه به میزان ۶۳۵۲/۴، ۶۱۷۲/۵ و ۶۱۰۵/۵ کیلوگرم در هکتار در گروه آماری برتر قرار گرفتند. تیمار دور ۶ روز با ۶۰ درصد تامین نیاز آبی با عملکرد ۲۵۸۱/۴ کیلوگرم در هکتار با کمترین عملکرد در پایین ترین گروه آماری قرار گرفت. دیگر تیمارها در گروه های دیگر آماری قرار گرفتند (جدول ۶). با توجه به نتایج به دست آمده می توان چنین استنباط کرد در یک دور ثابت آبیاری، میزان تامین آب مورد نیاز را می توان ۲۰ درصد کاهش داد (تیمار ۸۰ درصد) بی آنکه کاهش محسوسی در عملکرد دانه به وجود آید. ولی با کاهش میزان آبیاری به ۶۰ درصد تامین نیاز آبی عملکرد به شدت کاهش می یابد. کاهش عملکرد دانه در تیمار ۶۰ درصد تامین نیاز آبی، نسبت به تیمار ۸۰ درصد تامین نیاز آبی، در دوره های آبیاری ۴، ۵ و ۶ روز به ترتیب برابر ۳۹/۹۴، ۴۱/۵۸ و ۳۴/۳۷ درصد محاسبه شد. باید دقت داشت با افزایش دور آبیاری و کاهش مقدار آب، شدت تنش خشکی افزایش می یابد. بهداد و همکاران (Behdad et al., 2022) با فرا تحلیل تاثیر تنش خشکی بر صفات زراعی گندم کشور اعلام داشتند تنش خشکی تاثیر منفی و معنی داری بر عملکرد دانه گندم دارد. نتایج این تحقیق نیز با نتیجه گیری آنان همخوانی دارد.

جدول ۴- تجزیه واریانس مرکب عملکرد دانه و بهره وری آب

Table 4- Combined analysis of variance for yield and water productivity data

میانگین مربعات		درجه آزادی	منبع تغییر
بهره وری آب	عملکرد دانه		
(کیلوگرم بر مترمکعب آب)	(کیلوگرم در هکتار)		
۰/۸۵۶۳ ^{ns}	۲۱۵۱۷۰۴/۰ ^{ns}	۱	سال (Y)
۰/۰۱۹۶	۳۰۲۲۵۵/۲۹	۴	تکرار × سال (Y×R)
۰/۶۵۸۵ ^{**}	۱۸۵۸۵۹۴۸/۷۴ ^{**}	۲	دور آبیاری (A)
۰/۰۰۵۲ ^{ns}	۲۸/۱۹ ^{ns}	۲	سال × دور آبیاری (Y×A)
۰/۰۰۶۶ ^{ns}	۱۲۷۳۴/۵۹ ^{ns}	۸	دور آبیاری × سال × تکرار (A×Y×R)
۰/۰۶۷۹ ^{**}	۲۹۳۲۵۱۹۹/۳۴ ^{**}	۲	سطح آبیاری (B)
۰/۰۵۷۱ ^{**}	۸۵۸۶۹۲/۴۸ ^{**}	۴	دور آبیاری × سطح آبیاری (A×B)
۰/۰۰۷۹ ^{ns}	۱۲۲/۶۶ ^{**}	۲	سال × سطح آبیاری (Y×B)
۰/۰۰۲۷ ^{ns}	۱۸۴/۷۴ ^{ns}	۴	سال × دور آبیاری × سطح آبیاری (Y×A×B)
۰/۰۰۴۳	۱۸۵۶۱/۴	۲۴	خطا

ns، * و ** به ترتیب نشان دهنده نداشتن تفاوت معنی دار، تفاوت معنی دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد است.

بهره وری آب

دارند. شایان ذکر است این دو تیمار بالاترین عملکرد را نیز دارا بودند. در روش آبیاری بارانی تاشو، بعد از آنکه ارتفاع گندم به مراحل نهایی خود رسید، آب آبیاری به دلیل برخورد با گیاه به صورت پاشش در هوا نیست، بلکه در بین ردیف های کاشت جاری می شود؛ از این رو تعداد دفعات آبیاری بیشتر، باعث افزایش تلفات تبخیر و بادبردگی نمی شود.

تجزیه واریانس مرکب داده ها نشان می دهد دور آبیاری به شدت (۱ درصد=α) بهره وری آب را تحت تاثیر قرار داده است (جدول ۴). مقایسه میانگین ها و گروه بندی اثر دور آبیاری بر این صفت نشان می دهد (جدول ۵) تیمارهای آبیاری با دور ۴ و ۵ روز به ترتیب با بهره وری آب ۱/۱۶۹ و ۱/۰۷۷ کیلوگرم بر مترمکعب آب در گروه آماری برتر قرار

بررسی اثر مدیریت مصرف آب بر عملکرد و بهره‌وری آب گندم با روش آبیاری بارانی تاشو (رین فلت)

جدول ۵- مقایسه میانگین عملکرد دانه و بهره‌وری آب در تیمارهای مختلف

Table 5- Comparison of the average grain yield and water productivity in different treatments

تیمارها	عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار)	بهره‌وری آب آبیاری (کیلوگرم بر متر مکعب آب)	بهره‌وری آب آبیاری و بارندگی (کیلوگرم بر متر مکعب آب)
دور آبیاری:			
۴	۵۴۱۰/۶ ^a	۱/۱۶۹ ^a	۰/۹۷۰ ^a
۵	۵۰۱۶/۱ ^a	۱/۰۷۷ ^a	۰/۸۹۵ ^a
۶	۳۴۸۶/۸ ^b	۰/۷۵۸ ^b	۰/۶۳۷ ^b
سطح تامین آب آبیاری:			
۱۰۰	۵۵۲۰/۷ ^a	۰/۹۵۶ ^b	۰/۸۲۵ ^b
۸۰	۵۲۱۸/۴ ^a	۱/۱۳۰ ^a	۰/۹۴۳ ^a
۶۰	۳۱۷۴/۳ ^b	۰/۹۱۸ ^b	۰/۷۲۵ ^b

جدول ۶- مقایسه میانگین اثر متقابل دور و سطح تامین آب آبیاری بر عملکرد دانه گندم (کیلوگرم در هکتار)

Table 6- Comparison of the average interaction effect of irrigation interval and water supply level on wheat grain yield (kg/ha)

دور آبیاری (روز)	سطح تامین آب آبیاری (درصد)		
	۶۰	۸۰	۱۰۰
۴	۳۷۰۶/۸ ^d	۶۱۷۲/۵ ^a	۶۳۵۲/۴ ^a
۵	۳۲۹۷/۷ ^e	۵۶۴۵/۰ ^b	۶۱۰۵/۵ ^a
۶	۲۵۱۸/۴ ^f	۳۸۳۷/۷ ^{cd}	۴۱۰۴/۳ ^c

تیمار با دور آبیاری ۶ روز با میانگین بهره‌وری آب ۰/۷۵۸ کیلوگرم بر مترمکعب آب در گروه آماری دیگر قرار گرفت. بنابراین، با دور آبیاری ۶ روز بهره‌وری آب کاهش معنی‌داری پیدا کرده است. با افزایش دور آبیاری و کاهش رطوبت خاک، تولید مواد فتوسنتزی در گیاه کاهش می‌یابد. کاهش فتوسنتز نیز باعث کم شدن فشار هیدرواستاتیکی و سرعت انتقال مواد در گیاه می‌شود و مجموع این عوامل باعث افت معنی‌دار عملکرد می‌شود و این مسئله بهره‌وری مصرف آب را کاهش می‌دهد (Senobar et al., 2011).

نتایج تحقیق نشان داد تیمار سطح تامین آب آبیاری، تاثیر بسیار معنی‌داری (۱ درصد α) بر بهره‌وری آب دارد (جدول ۵). تیمار ۸۰ درصد سطح تامین نیاز آب آبیاری با متوسط بهره‌وری آب ۱/۱۳۰ کیلوگرم بر مترمکعب آب دارای بیشترین مقدار بهره‌وری آب است و در گروه آماری برتر قرار گرفت. تیمارهای ۱۰۰ و ۶۰ درصد تامین نیاز آبی به ترتیب با متوسط بهره‌وری آب ۰/۹۵۶ و ۰/۹۱۸ کیلوگرم بر مترمکعب آب در گروه بعدی قرار گرفتند (جدول ۵). با توجه به نتایج این تحقیق می‌توان با تامین ۸۰ درصد نیاز آبی بی‌آنکه در عملکرد کاهش معنی‌داری پدید آید به بالاترین مقدار بهره‌وری آب رسید که با نتایج جلالینی (Jolaini, 2013) در یک راستاست. تنش‌های شدید کمبود آب، در مقایسه با تنش‌های ملایم، باعث کاهش انتقال مجدد

مواد فتوسنتزی (آسیمیلاتاها) می شود و در نتیجه اندازه و وزن دانه های گندم کاهش می یابد و عملکرد به طور معنی داری افت می کند. با توجه به همبستگی بالایی که بین مقدار عملکرد و بهره وری آب وجود دارد، بهره وری آب نیز دچار افت خواهد شد (Shamohammadi & Mazaheri, 2007). حاجی آبادی و همکاران (Hajiabadi et al., 2021) (۷).

دهقانی سانج و همکاران (Dehghani Sanij et al., 2008) نتیجه گرفتند هنگام آبیاری کامل (شرایط بدون تنش) کارایی مصرف آب گندم از ۰/۴ تا ۱/۳ کیلوگرم بر مترمکعب متغیر است و در زمان کم آبیاری حداکثر کارایی مصرف آب گندم را ۱/۷ کیلوگرم بر مترمکعب آب گزارش دادند. محققان گزارش کرده اند که تنش های شدید خشکی از طریق تسریع پیری برگ و کاهش دوره پر شدن دانه، از وزن دانه می کاهد و این مسئله افت شدید عملکرد و بهره وری آب را در پی دارد (Senobar et al., 2011) که با نتایج این تحقیق همخوانی دارد. افزایش تعداد آبیاری ها در مراحل پایانی رشد گندم (اوایل بهار)، مخصوصاً آبیاری های کم حجم با دور آبیاری کوتاه، روش موثری در افزایش طول پر شدن دانه و در نتیجه بهبود عملکرد و بهره وری آب گندم معرفی شده است (Rahimi et al., 2019).

بر اساس نتایج تجزیه مرکب دو ساله صفات مورد بررسی در این آزمایش، اثر متقابل دور آبیاری و سطح تامین آب آبیاری روی میزان بهره وری آب آبیاری در سطح ۱ درصد معنی دار است (جدول ۴). با توجه به این نتایج، مقایسه میانگین بین تیمارها در ادامه بررسی می گردد. در جدول ۷ نتایج مقایسه میانگین مرکب دو ساله اثر متقابل روش و سطح آبیاری بر بهره وری آب آبیاری و بهره وری آب آبیاری و بارندگی ارائه شده است. همان طور که مشاهده می شود بیشترین بهره وری آب آبیاری با میانگین ۱/۳۳۶ کیلوگرم بر مترمکعب آب مربوط به تیمار دور ۴ روز با ۸۰ درصد تامین نیاز آبی بود که با دیگر تیمارها اختلاف معنی داری دارد. پس از آن تیمار دور ۵ روز با ۸۰ درصد تامین نیاز آبی با بهره وری

جدول ۷- مقایسه میانگین اثر متقابل دور و سطح تامین آب آبیاری بر بهره وری آب آبیاری و بهره وری آب آبیاری + بارندگی (کیلوگرم بر متر مکعب آب)

Table 7 - Comparison of the average interaction effect of irrigation interval and water supply level on irrigation water productivity and irrigation water + rainfall productivity (kg/m³)

بهره‌وری آب آبیاری			بهره‌وری آب آبیاری و بارندگی			دور آبیاری (روز)
سطح آبیاری (درصد)			سطح آبیاری (درصد)			
۶۰	۸۰	۱۰۰	۶۰	۸۰	۱۰۰	
۰/۸۴۷ ^b	۱/۱۱۵ ^a	۰/۹۴۹ ^b	۱/۰۷۱ ^c	۱/۳۳۶ ^a	۱/۱۰۰ ^c	۴
۰/۷۵۳ ^c	۱/۰۲۰ ^b	۰/۹۱۲ ^b	۰/۹۵۳ ^d	۱/۲۲۲ ^b	۱/۰۵۷ ^c	۵
۰/۵۷۵ ^d	۰/۶۹۳ ^c	۰/۶۱۳ ^d	۰/۷۲۹ ^f	۰/۸۳۲ ^e	۰/۷۱۲ ^f	۶

نتیجه گیری

مقایسه میانگین‌ها و گروه‌بندی اثر دور آبیاری طی دو سال در خاکی با بافت لومی شنی بر عملکرد دانه نشان داد، تیمارهای دور آبیاری ۴ و ۵ روز به ترتیب با عملکرد دانه ۵۴۱۰/۶ و ۵۰۱۶/۱ کیلوگرم در هکتار در گروه آماری برتر قرار دارند. تیمار با دور آبیاری ۶ روز با میانگین عملکرد دانه ۳۴۸۶/۸ کیلوگرم در هکتار در گروه آماری دیگر قرار گرفت. بنابراین، با افزایش دور آبیاری به ۶ روز عملکرد کاهش معنی‌داری پیدا کرد. تیمارهای ۱۰۰ درصد و ۸۰ درصد تامین نیاز آبیاری به ترتیب با متوسط عملکرد ۵۵۲۰/۷ و ۵۲۱۸/۴ کیلوگرم در هکتار با بیشترین عملکرد در گروه آماری برتر قرار گرفتند. تیمار ۶۰ درصد تامین نیاز آبی با متوسط عملکرد دانه ۳۱۷۴/۳ کیلوگرم در هکتار کمترین مقدار عملکرد را دارا بود. بنابراین، نیاز آبی را از ۱۰۰ به ۸۰ درصد می‌توان کاهش داد بی‌آنکه در عملکرد کاهش معنی‌داری پدید آید. با این همه، اگر کاهش میزان آب آبیاری از ۸۰ به ۶۰ درصد برسد عملکرد دانه ۳۹/۱۷ درصد کاهش خواهد یافت.

نتایج اثر مشترک دور و سطح تامین آب آبیاری بر عملکرد دانه گندم نشان داد، تیمارهای دور ۴ روز با ۱۰۰ درصد تامین نیاز آبی، دور ۴ روز با ۸۰ درصد تامین نیاز آبی و دور ۵ روز با ۱۰۰ درصد تامین نیاز آبی به ترتیب با بالاترین عملکرد دانه به میزان ۶۳۵۲/۴، ۶۱۷۲/۵ و ۶۱۰۵/۵ کیلوگرم در هکتار در گروه آماری برتر قرار دارند. ولی تیمار دور ۴ روز با ۸۰ درصد تامین نیاز با میانگین بهره‌وری آب آبیاری ۱/۳۳۶ کیلوگرم بر مترمکعب بیشترین بهره‌وری آب آبیاری را در بین تیمارهای آزمایشی دارا بود. بنابراین، در روش آبیاری بارانی تاشو، تیمار با دور آبیاری ۴ روز می‌توان درصد تامین نیاز آبی را تا ۲۰ درصد کاهش داد.

مراجع

- Abbasi, F., Sohrab, F. & Abbasi, N. (2017). Evaluation of irrigation efficiencies in Iran. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*. 17(67): 113-120. (in Persian)
- Abedinpour, M. & Athna Ashari, M. (2018). Technical evaluation and determination of optimal lateral spacing in the P-Flex sprinkler irrigation system. *In sixth Scientific Research Conference on Water and Soil Resources Management*. Mar. 6. Iranian Irrigation and Water Engineering Association. Kerman. Iran. (in Persian)
- Anonymous. (2017). Report on Semnan province agricultural water productivity, Semnan province agriculture-jahad organization. (in Persian)
- Anonymous. (2024). Statistics of the agricultural year 2022-2023. Volume one crops, Office of Statistics and information technology of the deputy minister of planning and economy of agriculture-jahad ministry. (in Persian)
- Behdad, M., Paknejad, F., Mahdavi Damghani, A., Vazan, S. & Moarrefi, M. (2022). Effects of drought stress on agronomical traits of wheat (*Triticum aestivum* L.): A meta-analysis. *Environmental Stresses in Crop Sciences*. 15(1): 53-65. (in Persian)
- Dehghani Sanij, H., Nakhjavani Moghadam, M.M. & Akbari, M. (2008). Study the water use efficiency based on regional relative advantages and deficit irrigation. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*. 2(1): 77-91. (in Persian)
- Ghadami Firouzabadi, A., Chaychi, M. & Seyedan, S.M. (2017). Effects of different irrigation systems on yield, some agronomic traits, and water productivity of different wheat genotypes and their economic assessment in Hamedan. *Journal of Water Research in Agriculture*. 31(2): 139-149. (in Persian)

- Hajjabadi, F., Hassanpour, F., Yaghoobzadeh, M., Hammami, H. & Seyyedi, S.M. (2021). The effect of deficit irrigation and saline water treatments on growth and yield responses of Sirvan bread wheat cultivar. *Journal of Crop Production and Processing*. 11(2): 51-63. (in Persian)
- Jolaini, M. (2013). Wheat deficit irrigation by water depletion and length of sprinkler irrigation. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 14(1): 1-12. (in Persian)
- Keykhaei, F. & Ganji Khorramdel, N. (2017). Effect of Deficit Irrigation in Corrugation and Border Methods on Yield and Water Use Efficiency of Wheat cv. Hamoon. *Journal of Water Research in Agriculture*. 3(2): 139-149. (in Persian)
- Mohtadi, M., Albaji, M. & Broomand nasab, S. (2017). Investigation of Water Productivity of Wheat in Some Irrigation and Drainage Networks of Khuzestan. *Journal of Irrigation Sciences and Engineering*. 40(1): 239-248. (in Persian)
- Naderi, N. & Ghadami Firouzabadi, A. (2022). Irrigation Efficiency, Water Requirement and Water Productivity in Surface Irrigation Method in Apricot and Grape Gardens. *Journal of Irrigation and Water Engineering*. 12(4): 125-140. (in Persian)
- Naderi, N., Ghadami Firouzabadi, A. & Froumadi, M. (2018). Technical Evaluation of Different Sprinkler Irrigation Systems in Field Condition. *Journal of Water Research in Agriculture*. 32(3): 429-439. (in Persian)
- Nakhjavani Moghaddam, M.M., Ghahraman, B. & Zarei, G. (2017). Wheat Water Productivity Analysis under Different Irrigation Management Practices in Some Regions of Iran. *Journal of Water Research in Agriculture*. 31(1): 43-57. (in Persian)
- Naseri, A., Abbasi, F. & Akbari, M. (2017). Estimating agricultural water consumption by analyzing water balance. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*. 18(68): 17-32. (in Persian)
- Rahimi, Z., Hosseinpanahi, F. & Siosemardeh, A. (2019). Evaluation of yield, radiation and water use efficiency of drought resistant and susceptible wheat cultivars under different irrigation levels. *Plant Production and Genetics*. 2(1): 19-34. (in Persian)
- Roodbarani, J., Mozaffari, J. & Mohseni Movahed, S.A. (2021). Comparison of bean yield in Furrow, Tape and Rain flat irrigation systems. *Journal of Water and Soil Conservation*. 28(2): 195-210. (in Persian)
- Safarzadeh, S., Saremi, M., Farshid, A. & Sharifi, H.R. (2021). Investigation yield, yield components and water efficiency of wheat in three systems: surface, sprinkler and strip drip irrigation. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*. 15(1): 87-97. (in Persian)
- Senobar, A., Tabatabayi, S.A. & Deghani, F. (2011). Effect of irrigation intervals on grain yield, yield components and harvest index of bread wheat cultivars in Yazd region. *Environmental Stresses in Crop Sciences*. 3(2): 95-104. (in Persian)
- Seyedi, S.M., Goodarzi, M., Ashtari, S., Hatamabadi Farahani, M. & Sarlak, A. (2024). The effect of four irrigation methods on the damage of weeds, two-spotted spider mite (*Tetranychus urticae* koch) and bacterial blight disease in chitti bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Iranian Journal of Pulses Research*. 15(1): 113-127. (in Persian)
- Shamohammadi, N. & Mazaheri, D. (2007). A comparison of wheat (*Triticum aestivum* L.) irrigated at different levels of irrigation in Firoozabad region of Fars province. *Iranian Journal of Agricultural Sciences (Agronomy and Crop Biotechnology)*. 38(2): 259-266. (in Persian)
- Tari, A.F. (2016). The effects of different deficit irrigation strategies on yield, quality, and water-use efficiencies of wheat under semi-arid conditions. *Journal of Agricultural Water Management*. 167: 1-10. (in Persian)
- Zarei, G., Salemi, H.R. & Sharifi, H.R. (2018). Optimal nitrogen fertilizer consumption under sprinkler irrigation system in different seeding density and wheat cultivars in Karaj. *Journal of water and soil resources conservation*. 8(1): 89-103. (in Persian)

Original Research**Investigating the effect of water use management on wheat yield and water productivity using the rain flat sprinkler irrigation method****N. Naderi*, A. Mohammadi**

***Corresponding Author:** Assistant Professor, Department of Agricultural Engineering Research, Agriculture and Natural Resources Research and Education Center of Semnan (Shahrood), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Shahrood, Iran.

Received: 9 December 2024, **Accepted:** 17 January 2025

Email: Naderi7367@yahoo.com

https://doi.org/ 10.22092/idser.2025.367942.1601

Introduction

Food security and increasing self-reliance in basic crops are important pillars of the country's economic development plans. One of the most important challenges the self-sufficiency in wheat production is faced with is the low water productivity. An effective and practical solution is to use water optimally and save the water. Pressure irrigation increases water efficiency by preventing water waste. The advantages of irrigation with the Rain flat system include reduced initial annual irrigation costs (compared to the drip tape irrigation method), quick and easy installation without the need for welding, easy and quick assembly and reinstallation, no need for specialized personnel and special tools for installation and assembly, and the ability to use it to irrigate multiple fields. The water productivity index is used to evaluate optimal water consumption in analyses and decision-making. This index is affected by the irrigation schedule. If the crop water requirement is used correctly and appropriately in modern irrigation methods, in addition to reducing costs, it is possible to save water consumption by increasing irrigation efficiency and help strengthen groundwater resources. Therefore, this study was conducted to investigate the effect of irrigation intervals and different levels of water supply in the rain flat sprinkler irrigation method on wheat yield and water productivity.

Methodology

This study was conducted in order to investigate the effect of irrigation interval and water supply level on yield and water productivity of wheat in 2019 to 2021 in the form of split plots experiment based on randomized complete blocks design in three replications. The experiment was carried out in agriculture research and education center of Semnan (Shahrud). The soil texture was sandy loam. The main plots included 3 irrigation intervals (4, 5 and 6 days in between) and the sub-plots included three levels of irrigation (100, 80 and 60% of water supply). Sprinkler irrigation pipes (laterals) were placed at 4-meter intervals between crop rows. The net irrigation water requirement was calculated using the Penman-Monteith method and the amount of water consumption, wheat yield, and water productivity were determined and the best treatment was identified.

Results and Discussion

Irrigation interval treatments of 4 and 5 days, with grain yield of 5410.6 and 5016.1 kg/ha and water productivity of 1.169 and 1.077 kg/m³ were in the superior statistical group. The treatments of 100 and 80 percent irrigation requirement with average yields of 5520.7 and 5218.4 kg/ha had the highest yield, and the treatment of 80 percent irrigation requirement with water productivity of 1.130 kg/m³ had the highest water productivity. The interaction effect of experimental treatments was effective on the studied traits. Thus, the treatments of 4-day irrigation interval with 100% and 80% water requirement and 5-day irrigation interval with 100% water requirement were superior with grain yields of 6352.4, 6172.5, and 6105.5 kg/ha, respectively. The 4-day irrigation interval with 80% water requirement had the highest water productivity of 1.336 kg/m³.

Conclusions

The results showed that in the rain flat irrigation method, increasing the irrigation interval to 6 days, compared to the irrigation interval of 4 and 5 days, reduced the yield by 35.55 percent and 30.48 percent and the water productivity by 35.55 and 29.61 percent. Because the irrigation interval treatments of 4 and 5 days were in the superior statistical group in terms of yield and water productivity, the best irrigation interval is 5 days. By reducing the percentage of irrigation water supply to 60 percent of the water requirement, compared to 80 and 100% of the water requirement, yield decreased by 39.17 and 42.50%, respectively. However, in terms of water productivity, the treatment of 80% irrigation requirement with an average water productivity of 1.130 kg/m³ had the highest water productivity and was placed in the superior statistical group. Although the treatment with a 4-day irrigation interval with 80% water requirement did not have a statistically significant difference in yield, compared to the 4- and 5-day irrigation intervals with 100% water requirement, but it had the highest water productivity among the irrigation treatments. Therefore, with the rain flat irrigation method, the percentage of water requirement can be reduced by 20 percent in the 4-day irrigation interval.

Keywords: Irrigation interval, Rain flat, Water amount, Yield



نوع مقاله: یادداشت فنی

بررسی وضعیت آب مجازی گندم آبی و ارائه راهکارهای فنی و سیاستی برای بهبود آن در ایران

نادر حیدری^{۱*}، فرشید تاران^۲

^{۱*}دانشیار پژوهش، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.
^۲استادیار پژوهش، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۱۰

چکیده

مفهوم آب مجازی در قرن بیست و یکم به عنوان شاخصی کلیدی برای ارزیابی مصرف بهینه آب در تولید محصولات کشاورزی، به ویژه در مواجهه با بحران کمبود آب، برجسته شده است. این مطالعه به بررسی و تحلیل آب مجازی گندم آبی در ایران پرداخته است که یکی از محصولات راهبردی کشاورزی شناخته می شود. این مطالعه تفاوت های مقدار آب مجازی گندم آبی را در استان ها و اقلیم های مختلف کشور بررسی کرده است. نتایج بررسی ها نشان می دهد میزان آب مجازی گندم آبی در ایران در دامنه وسیع ۲۸۴-۳۵۲۳ مترمکعب بر تن قرار دارد و به طور متوسط برابر ۱۴۰۰ مترمکعب بر تن و ۵۰ درصد بالاتر از میانگین میزان آب مجازی گندم در تعدادی از کشورهای جهان (۹۳۰ مترمکعب بر تن) است. بر این اساس، بیشترین آب مجازی آبی (دامنه ۳۵۲۳-۱۵۳۹ مترمکعب بر تن) مربوط به استان های خوزستان، کرمان، سمنان، بوشهر، سیستان و بلوچستان، اصفهان، فارس، یزد، و بخش هایی از استان های قم، کرمانشاه، خراسان جنوبی، خراسان شمالی، چهارمحال و بختیاری، و آذربایجان شرقی با متوسط ۲۶۱۰ مترمکعب بر تن است. کمترین آب مجازی آبی (دامنه ۵۸۶-۲۸۴ مترمکعب بر تن) مربوط به استان های مازندران، همدان، گلستان، کردستان، کهگیلویه و بویراحمد و مناطقی از استان های خراسان جنوبی، مرکزی، هرمزگان، و ایلام با متوسط ۴۵۱ مترمکعب بر تن است. بررسی ها همچنین نشان می دهد اکثر مناطق تحت کشت گندم در ایران (حدود ۵۳ درصد زمین های تحت کشت آبی)، در مناطق با بحران کم آبی واقع شده است. کشت گندم از ابعاد مقدار نیاز آبی و کارایی مصرف آب پتانسیل در استان های مختلف دارای درجات متفاوتی از برتری است. از جنبه مقدار آب مجازی آبی، کشت گندم در دو استان گلستان و اردبیل که نسبتاً مشکل کم آبی ندارند و مقدار آب مجازی گندم در آن ها پایین نیز هست، برتری زیادی دارد. استان خوزستان نیز در صورت بهبود مدیریت آبیاری، با توجه به اقلیم مناسب و گرمای هوا و امکان استفاده مناسب از بارش های زمستانه در فصل رشد و رسیدگی سریع محصول، برای کشت گندم دارای برتری است. کشت گندم در برخی مناطق ایران، به ویژه در مناطق مرکزی و جنوب شرقی، مناسب نیست. نتایج این بررسی بر لزوم مدیریت بهینه منابع آب کشاورزی و انتخاب راهبردی مناطق و سطح تحت کشت گندم در الگوی کشت ملی از جنبه برتری تولید مرتبط با نیاز آبی، محدودیت منابع آب، بهبود بهره وری و کاهش مقدار آب مجازی، کاهش ضایعات، و تجارت آب مجازی گندم تأکید دارد.

واژه های کلیدی: تولید، کمبود آب، مدیریت منابع آب، مصرف آب

مقدمه

(2011). در تجارت جهانی کالاها در واقع آب مجازی آنها

یکی از معضلات قرن بیست و یکم که آینده زندگی بشر را در این کره خاکی به شدت تهدید می کند، کمبود آب است. میزان آبی که در فرایند تولید هر محصول مصرف می شود، آب نهفته یا آب مجازی آن محصول نامیده می شود (Allan, 2011). در تجارت جهانی کالاها در واقع آب مجازی آنها انتقال می یابد که سبب به وجود آمدن جریان مجازی از آب بین کشورهای مختلف خواهد شد. ایران از نظر منابع آب در وضعیت بحرانی قرار دارد و از این رو توجه به میزان آب مجازی محصولات کشاورزی اهمیت ویژه ای خواهد داشت.

مفاهیم ردپای آب (WFP)^۱ و تجارت آب مجازی (VWT)^۲ اخیراً به ادبیات علمی معرفی شده‌اند تا به پایداری منابع آب از نظر کمیّت و کیفیت کمک کنند (Xinchun et al., 2017). این مفاهیم به تحلیل دقیق‌تر مصرف و آلوده شدن آب در فرآیند تولید هر محصول کمک می‌کنند (Ewaid et al., 2020). به عبارت دیگر، از آنجاکه مفهوم آب مجازی در بردارنده آب پنهانی است که در تمام فرایند تولید و فراوری محصول مصرف می‌شود، در فراوری محصولات مختلف مانند تولید محصولات لبنی یا محصولات دامی دیگر، این آب از حالت خالص و پاک آن خارج می‌شود و آلوده به مواد شیمیایی مختلف خواهد شد و پساب زیادی در فرآیند تولید محصول نهایی به‌دست می‌آید. از این رو در مفهوم آب مجازی باید علاوه بر مصرف آب به صورت کمی، تغییر کیفی آن و در واقع حجم پساب و آب آلوده شده از آن را نیز اندازه‌گیری و لحاظ کرد. آب مجازی یکی از شاخص‌های کمبود آب و ارزیابی بهره‌وری آب^۳، مفهوم تازه‌ای است که در سال‌های اخیر توجه برنامه‌ریزان و صاحب‌نظران علوم آب را به خود جلب کرده است. علاوه بر محدودیت آب، محدودیت‌های مالی و زمانی عوامل مهم دیگری هستند که امکان بهره‌برداری کارآمدتر را از منابع موجود با مشکل مواجه می‌کنند. به همین دلیل در سال‌های اخیر در کنار مدیریت عرضه (تأمین منابع آب)، مدیریت تقاضا نیز باید با توجه به مفهوم آب مجازی در نظر گرفته شود (Mekonnen and Hoekstra, 2011).

تولید و صادرات گندم برای کشور ایران اهمیت زیادی دارد و حمایت‌های اساسی دولت‌ها معطوف به این محصول راهبردی بوده است. در سطح جهانی نیز گندم یکی از مهم‌ترین محصولات کشاورزی به شمار می‌رود که نقش حیاتی در تأمین غذای جمعیت رو به رشد بشر دارد. اتحادیه اروپا با تولید بیش از ۱۵۶ میلیون تن گندم در سال ۲۰۱۵، بزرگترین تولیدکننده این محصول بوده است و چین و هند

در مقام‌های بعدی قرار دارند (Mirbagheri et al., 2016). در بازه زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۵ میلادی، اتحادیه اروپا با ۱۳۵ میلیون تن تولید سالیانه بزرگترین تولیدکننده این محصول بوده است (Heydari, 2022). این میزان تولید تغییرات زیادی تاکنون نداشته است و بر اساس آمار جدیدتر (سال ۲۰۲۳) برابر ۱۳۵/۵ میلیون تن بوده است (Statista, 2025a). میزان گندم تولیدی چین و هند در سال ۲۰۲۳ به ترتیب برابر با ۱۳۶/۶ و ۱۱۲ میلیون تن تخمین زده شده است (Statista, 2025 b, c). در اینجا هدف مقایسه میزان تولید برخی قطب‌های تولید کننده گندم در جهان است نه مقایسه دو به دو کشورها. اتحادیه اروپا متشکل از کشورهای مختلف اروپایی است و سیاست‌های واحدی دارد که از نظر تولید گندم، با توجه به آنکه تولیدات گندم این کشورها بیشتر برای صادرات است تا مصرف داخلی، می‌تواند بر کشورهای وارد کننده عمده تاثیرگذار و مهم باشد. در حالیکه در قاره آسیا سیاست کشورها هم‌راستا نیست و از طرفی اولویت کشورهای عمده تولیدکننده گندم مانند چین، روسیه، و هند بیشتر بر مصرف داخلی متکی است و مشخص نیست که هدف آنها بیشتر صادرات است یا تولید غذای جمعیت زیاد خود آنها.

در ایران، گندم محصولی کلیدی در سیاست‌های کشاورزی و اقتصادی است. این محصول در تمامی استان‌ها کشت می‌شود و با وجود ظرفیت‌های بالقوه کشور، میزان واردات این محصول همچنان بالاست. بر اساس آمار سازمان توسعه تجارت ایران^۴، میزان واردات گندم ایران در سال ۱۴۰۲ برابر با ۴/۴۷۳ میلیون تن بوده است. ضریب خودکفایی گندم در سال‌های ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۲ نوسان‌های زیادی داشته و به‌طور متوسط ۷۵ درصد بوده است (Mohammadjani & Yazdani, 2014). بر اساس آمار سال ۱۴۰۱ میزان تولید گندم آبی و دیم ایران به ترتیب برابر ۸/۸۱ و ۴/۴۷ میلیون تن بوده است (Agricultural Statistics Yearbook, 2022).

¹ Water Foot Print

² Virtual Water Trade

³ Water Productivity

⁴ https://amarfact.com/statistics/import-weight-of-basic-goods-to-iran/?utm_source=chatgpt.com

و اتاق بازرگانی ایران) قرار گیرد. با توجه به ابعاد وسیع کار، تمرکز این مقاله بر محصول راهبردی گندم است که سالانه حجم زیادی از واردات محصولات کشاورزی ایران را به خود اختصاص می‌دهد و ارزش زیادی بابت آن صرف می‌شود. در این مقاله (یادداشت فنی)، ضمن بررسی وضعیت آب مجازی گندم آبی در کشور، تحلیل‌های لازم شده است تا راهکارهای مناسبی برای مدیریت بهینه منابع آبی و کاهش آب مجازی گندم تولیدی ارائه شود.

مفهوم و تعریف آب مجازی

اصطلاح آب مجازی، اولین بار در دهه ۱۹۹۰ میلادی توسط تونی آلن به صورت مجموع آب مصرف‌شده برای تولید مقدار معینی از محصول (اعم از کالا، فرآورده‌های کشاورزی، یا حتی خدمات) تعریف شد (Allan, 2011). برای مثال، آب مجازی یک عدد گوجه فرنگی (۷۰ گرمی) ۱۳ لیتر (۰/۱۸۵ لیتر بر گرم) است، یا برای تولید یک کیلوگرم گندم (از مرحله کاشت تا برداشت) به‌طور متوسط ۱۳۰۰ لیتر آب مورد نیاز است (۱/۳ مترمکعب بر کیلوگرم)، که آن را مقدار آب مجازی گندم می‌نامند (Ehsani, 2009). مقدار آب مجازی همچنین می‌تواند از جمع کل آب مصرف‌شده در مراحل مختلف زنجیره تولید تا محصول نهایی (مثلاً آب مجازی آرد گندم یا نان) محاسبه شود (Ehsani et al., 2008). صفت مجازی در تعریف بالا بدین معنی است که بخش عمده آب مصرف‌شده طی فرآیند تولید در محصول یا کالای نهایی به صورت فیزیکی وجود ندارد. برای نمونه، بهره‌وری آب پرتقال در استان فارس به‌طور متوسط ۱/۳۰ کیلوگرم بر مترمکعب (Shahrokhnia et al., 2023) است که معادل آب مجازی برابر با ۷۶۹ مترمکعب بر تن یا ۷۶/۹ لیتر در هر ۱۰۰ گرم (۱۰۷/۷ لیتر در ۱۴۰ گرم) محصول است. وزن متوسط یک پرتقال در ایران حدود ۱۴۰ گرم است. در هر ۱۰۰ گرم پرتقال حدود ۰/۰۸۵ لیتر آب (آب میوه) (۰/۱۱۹ لیتر در ۱۴۰ گرم) وجود دارد.^۱ مشاهده می‌شود

سیاست خودکفایی در تولید گندم از هدف‌های مهم کشور است و قانون تضمین خرید محصولات کشاورزی نیز به حمایت از تولید گندم پرداخته است. بررسی آمارها نشان می‌دهد که طی برنامه‌های پنج ساله توسعه اول تا چهارم، بیشترین میزان تولید و سطح زیر کشت گندم مربوط به سه سال اول برنامه چهارم توسعه بوده است (Ahmadvand & Najafpour, 2010).

با توجه به محدودیت منابع آب و ضرورت استفاده بهینه از آن برای تولید محصولات کشاورزی و امنیت غذایی، اهمیت کشت گندم در کشور ایران، به دلیل راهبردی بودن این محصول، بسیار بالا است. گندم نه تنها یکی از اصلی‌ترین منابع تامین غذای جمعیت رو به رشد کشور است، بلکه نقش کلیدی در سیاست‌های کشاورزی و اقتصادی ایران دارد. به دلیل مصرف گسترده آب در فرآیند تولید گندم آبی، مفهوم آب مجازی این محصول نیز اهمیت ویژه‌ای دارد. تجارت آب مجازی یا انتقال بین استانی گندم می‌تواند به عنوان یک استراتژی مؤثر برای کاهش کمبود آب در مناطق کم‌آب کشور استفاده شود. با انتقال آب مجازی از استان‌های با مازاد تولید به استان‌های دارای کمبود گندم، می‌توان از منابع آبی موجود به شکل بهینه‌تری بهره‌برداری و امنیت غذایی کشور را تضمین کرد.

به‌رغم آنکه در بعضی از منابع معمولاً شاخص آب مجازی به صورت عکس بهره‌وری آب تعریف می‌شود، ولی آن برداشت سطحی از موضوع است و بیان مسائل مدیریت آب در قالب آب مجازی و ردپای آب که معمولاً متخصصان منابع آب بیشتر به آن تمایل دارند، رویکرد دیگری به موضوع است. مسائل بهره‌وری آب محصولات مختلف از جمله گندم در مقالات زیادی قبلاً ارائه و چاپ شده‌اند و از این رو رویکرد بررسی مدیریت آب از جنبه آب مجازی محصولات مختلف با اهمیت است که می‌تواند در مسائل مدیریت آب از جنبه‌های صادرات و واردات محصولات کشاورزی راهبردی به خصوص گندم، مورد استفاده دستگاه‌های متولی اقتصاد و بازرگانی کشور (مانند وزارت صمت

¹ <https://tools.myfooddata.com/nutrition-facts/169097/wt1&https://www.delgarm.com/cooking/properties-of-food>

آب مجازی باید در سطح مزرعه، یعنی از محل تحویل آب در سر مزرعه، ملاک محاسبه قرار گیرد؟ و آیا در محاسبه آب مجازی راندمان‌ها، تلفات آب و تبخیر از سطح کانال‌ها باید از نقطه تحویل تا محل مصرف را در نظر گرفت؟ با پذیرش هر یک از تعریف‌های بالا، مقدار آب مجازی نیز به تناسب تغییرات زیادی خواهد داشت. در حالتی که صرفاً نیاز واقعی مصرف آب گیاه ملاک قرار گیرد کمترین مقدار آب مجازی و در حالتی که راندمان آبیاری، تلفات آب در کانال‌ها و آب ورودی در بالاترین نقطه تحویل ملاک سنجش باشد آب مجازی بیشترین مقدار را نشان خواهد داد (Iranian National Committee on Irrigation and Drainage, 2009a).

وضعیت آب مجازی گندم آبی در برخی از کشورهای جهان

در جدول (۱)، مقدار آب مجازی گندم آبی (بر اساس آب آبی) در برخی کشورهای مهم جهان ارائه و در شکل (۱) نیز نقشه پهنه‌بندی آب مجازی شبیه‌سازی شده غلات آبی در مناطق معتدل آبی در دوره ۱۹۹۹-۲۰۰۳ برای مناطق مختلف جهان آورده شده است (Fader et al., 2010). مشاهده می‌شود که مقدار آب مجازی آبی محصولات کشاورزی در جهان بسیار متغیر است. در مناطق وسیعی از آفریقا مقادیر آن بیشتر از ۲۰۰۰ مترمکعب بر تن است، در حالی که در اروپای مرکزی، به دلیل عملکرد بالای محصول و مصرف کم آب آبی، این مقدار کمتر از ۵۰۰ مترمکعب بر تن است (Fader et al., 2010). بر اساس شکل (۱)، کشورهای اروپای مرکزی، شرق آمریکا و جنوب شرقی چین حداقل مقادیر متوسط آب مجازی آبی غلات (۳۰۰ مترمکعب بر تن) را دارند، در حالی که خاورمیانه، آفریقا و بعضی مناطق آمریکای جنوبی مقادیر بزرگ‌تری از آب مجازی (تا ۵۰۰۰ مترمکعب بر تن) برای تولید غلات دارند (Fader et al., 2010).

که آب مجازی برای تولید یک عدد پرتغال ۱۴۰ گرمی بسیار بزرگ‌تر و حدود ۹۰۵ برابر آب درون (آب میوه) یک عدد میوه پرتقال است.

در سال ۲۰۰۳، هوکسترا و همکاران (Hoekstra et al., 2011) تعریف کامل‌تری از آب مجازی ارائه دادند "آب مجازی، مجموع آب مورد نیاز برای تولید مقدار معینی از محصول (کالا)، با توجه به شرایط اقلیمی، مکانی، زمان تولید و راندمان است". بر اساس تعریف اخیر، شرایط اقلیمی، مکان و زمان تولید، مدیریت و برنامه‌ریزی، و فرهنگ و عادات مردم در میزان آب مجازی مؤثرند و مقدار آن در یک محصول در مناطق مختلف قطعاً متفاوت خواهد بود. منابع علمی دیگری مفهوم آب مجازی را بر اساس اندازه‌گیری یا تخمین مقدار کل آب مصرفی و پساب تولید شده در فرآیند تولید یا زنجیره تأمین هر محصول تعریف کرده‌اند (Ewaid et al., 2020). در فرآیند تولید هر کالا یا هر محصول ممکن است منابع مختلف آب مانند آب زیرزمینی، آب سطحی، چشمه‌ها، آب باران، پساب‌های تصفیه شده و غیره به کار گرفته شده باشد، که در آن صورت نوع منبع تأمین آب و کیفیت آن می‌تواند در تعیین و تحلیل آب مجازی نقش بسزایی داشته باشد. این مفهوم منجر به معرفی و طبقه‌بندی آب‌های مجازی به سه رنگ آبی، سبز و خاکستری شده است. آب مجازی سبز به آب باران ذخیره‌شده در خاک، آب مجازی آبی به آب‌های سطحی و زیرزمینی، و آب مجازی خاکستری به آب‌های آلوده شده در فرآیند تولید محصولات اشاره دارد (Mekonnen and Hoekstra, 2011).

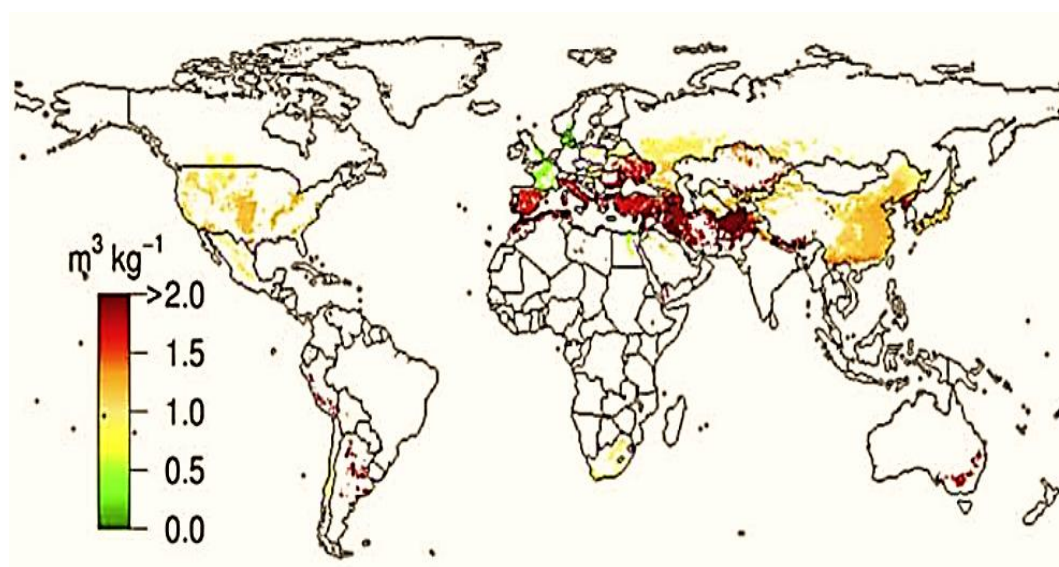
مهم‌ترین چالش آب مجازی اندازه‌گیری و ارائه مقدار استاندارد آن در مزرعه تولیدی تا مرحله مصرف محصول است. پرسش‌ها و چالش‌هایی که در این زمینه وجود دارند آن است که آیا حجم آب مجازی محصولات کشاورزی با میزان تعرق گیاهان در دوره رشد برابر است یا دقیقاً همان مقدار آبی است که گیاه واقعاً مصرف می‌کند؟ آیا اندازه‌گیری

بررسی وضعیت آب مجازی گندم آبی و ارائه راهکارهای فنی و سیاستی برای بهبود آن در ایران

جدول ۱- مقدار آب مجازی (آب آبی)^۱ گندم آبی برخی کشورها و مناطق جهان

Table 1- Virtual water content (blue) of irrigated wheat in some countries and regions of the world

آب مجازی آبی			آب مجازی آبی		
منبع	(مترمکعب بر تن)	کشور / منطقه	منبع	(مترمکعب بر تن)	کشور / منطقه
Source	Virtual water (m ³ /tons)	Country/region	Source	Virtual water (m ³ /tons)	Country/region
Muratoglu (2020); Ehsani (2009)	۱۰۰۰ و ۱۶۰۰	هند	Muratoglu (2020)	۵۰	استرالیا
Muratoglu (2020)	۸۵۰	دجله و فرات	Ehsan (2009)	۵۰۰	انگلستان
Muratoglu (2020); Renault (2002)	۳۰۰ و ۷۸۰	سوریه	Muratoglu (2020)	۱۰۰	ایالات متحده آمریکا
Muratoglu (2020)	۳۶۰۰	عراق	Muratoglu (2020)	۷۴۸ - ۱۱۶۱	ترکیه
Renault (2002)	۱۲۳۰	مراکش	Renault (2002)	۱۱۷۰	تونس
El-Marsafawy <i>et al.</i> (2018); Renault (2002)	۵۰۰ و ۷۵۰	مصر و دلتای نیل	Muratoglu (2020); Sun <i>et al.</i> (2013)	۱۰۷۱-۴۰۰	چین



شکل ۱- آب مجازی شبیه سازی شده (مترمکعب بر کیلوگرم) غلات آبی مناطق معتدل جهان در دوره ۱۹۹۹-۲۰۰۳ (Fader *et al.*, 2010)

Fig.1-Simulated virtual water (m³/Kg) of irrigated cereals in temperate zones of the world in 1999-2003

(Fader *et al.*, 2010)

^۱ مقدار آب مجازی صرفا مبتنی بر مصرف آب آبیاری (کشت آبی)

هوایی و مدیریت آب و تولید در نواحی مختلف این کشورها است. بر اساس جدول (۱)، میانگین آب مجازی کشورها حدود ۹۳۰ مترمکعب بر تن است. البته این نکته را هم نباید از نظر دور داشت که در کشورهای عمده تولید کننده گندم مانند هندوستان، یکی از عوامل تولید زیاد ممکن است سطح زیر کشت بالای محصول باشد و الزاماً تولید در واحد سطح چندان بالا نباشد. در ایران بیشتر زمین های تحت کشت گندم به صورت سنتی و سطحی آبیاری می شود، ولی در کشورهایی مانند آمریکا و استرالیا که زمین های زیر کشت به طور عمده با سیستم های مدرن آبیاری می شوند نمی توان نقش فناوری های پیشرفته را در این زمینه از نظر دور داشت.

وضعیت آب مجازی گندم آبی در ایران

در جدول (۲) مقدار آب مجازی گندم آبی در استان های مختلف ایران ارائه شده است. بر این اساس، بیشترین آب مجازی (دامنه ۳۵۲۳-۱۵۳۹ مترمکعب بر تن) در استان های خوزستان، کرمان، سمنان، بوشهر، سیستان و بلوچستان، اصفهان، فارس، یزد، و بخش هایی از استان های قم، کرمانشاه، خراسان جنوبی، خراسان شمالی، چهارمحال و بختیاری، و آذربایجان شرقی با متوسط ۲۶۱۰ مترمکعب بر تن است که نشان دهنده نیاز شدید آبی برای تولید محصولات کشاورزی و شرایط اقلیمی خاص این مناطق است. کمترین آب مجازی (دامنه ۵۸۶-۲۸۴ مترمکعب بر تن) نیز در استان های مازندران، همدان، گلستان، کردستان، کهگیلویه و بویراحمد و مناطقی از استان های خراسان جنوبی، مرکزی، هرمزگان، و ایلام و با متوسط ۴۵۱ مترمکعب بر تن دیده می شود که حاکی از بهره وری آب زیاد، اقلیم مناسب، و نیاز آبی کمتر محصول در این مناطق است. آب مجازی گندم آبی بقیه استان های کشور در بین این دو دامنه قرار می گیرد.

طبق داده های جدول (۱)، کشور عراق در بین کشورهای منتخب دارای بالاترین میزان آب مجازی گندم آبی (۳۶۰۰ مترمکعب بر تن) است که می تواند ناشی از شرایط آب و هوایی خشک و نیاز به آبیاری زیاد، و پایین بودن راندمان آبیاری در این کشور باشد. مقدار بالای آب مجازی در عراق چالش های جدی در زمینه مدیریت منابع آبی این کشور ایجاد کرده و نیازمند سیاست گذاری ها و کاربرد فناوری های پیشرفته برای بهبود بهره وری آب است. از سوی دیگر، ایالات متحده آمریکا و استرالیا کمترین مقدار آب مجازی آبی را دارند. زیرا اعداد ارائه شده در جدول (۱) بیانگر مقدار آب آبیاری (آب آبی) کاربردی در کشورهاست و برای کشورهایی مثل استرالیا و ایالات متحده ارقام آب مجازی پایین (به ترتیب برابر ۵۰ و ۱۰۰ مترمکعب بر تن) به این دلیل بوده است که بخش زیادی از آب مصرفی برای تولید گندم از بارش ها تامین شده است و تولید آن حالت نیمه دیم داشته است. این نکته مهمی است که کشت گندم در کشورهایی که بارش مناسبی در فصل رشد دارند و مابقی آب مورد نیاز به صورت آب آبیاری تکمیلی به کار برده می شود، برتری خوبی دارد ولی برای کشورهای خشکی مثل عراق با آب مجازی ۳۶۰۰ مترمکعب بر تن بیانگر آن است که تمام تولید با آب آبیاری و با فشار بر منابع آب بوده است.

به طور کلی، مقدار پایین آب مجازی نشان دهنده بهره وری آب زیاد در کشاورزی و فرآیند تولید در این کشورها و استفاده از فناوری های پیشرفته آبیاری است. استرالیا با توجه به شرایط خشک خود توانسته است با مدیریت بهینه منابع آب، مقدار آب مجازی آبی محصولات کشاورزی خود را به حداقل برساند. انگلستان، مصر، سوریه، و تا حدی ترکیه نیز در رده های پایین مقدار آب مجازی (۷۴۸-۳۰۰) قرار دارند (جدول ۱). این تنوع در مقدار آب مجازی غلات آبی و به خصوص گندم، نشان دهنده تفاوت های منطقه ای و آب و

جدول ۲- مقدار آب مجازی گندم آبی در استان‌های مختلف ایران

Table 2- Virtual water content of irrigated wheat in different provinces of Iran

منبع Source	آب مجازی آبی (مترمکعب بر تن) Virtual water (Blue) (m ³ /tons)	استان Province	منبع Source	آب مجازی آبی (مترمکعب بر تن) Virtual water (Blue) (m ³ /tons)	استان Province
Aligholinia <i>et al.</i> (2017)	۱۳۰۲	فارس	Aligholinia <i>et al.</i> (2017)	۱۸۲۱	آذربایجان شرقی
Najafi			Najafi		
Alamdaru <i>et al.</i> (2015)	۹۸۶		Alamdaru <i>et al.</i> (2015)	۱۱۶۶	
Vafaei & Bazr Afshan (2017)	۱۴۰۰		Vafaei & Bazr Afshan (2017)	۱۱۰۰	
Ehsani (2009)	۱۶۷۵				
Omidi & Homaee (2015)	۱۰۹۹-۱۰۱۱	قزوین	Aligholinia <i>et al.</i> , (2017)	۱۷۰۱	
Aligholinia <i>et al.</i> (2017)	۱۲۱۲		Aligholinia <i>et al.</i> (2017)	۱۱۶۵	آذربایجان غربی
Najafi			Najafi		
Alamdaru <i>et al.</i> (2015)	۱۲۰۳		Alamdaru <i>et al.</i> (2015)	۹۵۵	
Vafaei & Bazr Afshan (2017)	۱۳۰۰		Vafaei & Bazr Afshan (2017)	۱۲۵۰	
Ehsani (2009)	۱۴۱۰				
Aligholinia <i>et al.</i> (2017)	۱۵۳۹	قم	Aligholinia <i>et al.</i> (2015)	۱۰۷۱	
Najafi			Aligholinia <i>et al.</i> (2017)	۷۴۸	اردبیل
Alamdaru <i>et al.</i> (2015)	۷۱۹		Najafi		
Vafaei & Bazr Afshan (2017)	۱۴۰۰		Alamdaru <i>et al.</i> (2015)	۸۳۶	
Aligholinia <i>et al.</i> (2017)	۹۹۲	کردستان	Vafaei & Bazr Afshan (2017)	۱۰۰۰	
Najafi			Ehsani (2009)	۱۴۵۰	
Alamdaru <i>et al.</i> (2015)	۵۸۶		Aligholinia <i>et al.</i> (2017)	۲۲۱۳	اصفهان
Vafaei & Bazr Afshan (2017)	۱۲۰۰		Najafi		
Aligholinia <i>et al.</i> (2017)	۳۲۴۷	کرمان	Alamdaru <i>et al.</i> (2015)	۱۵۸۹	
Najafi			Vafaei & Bazr Afshan (2017)	۱۵۰۰	
Alamdaru <i>et al.</i> (2015)	۷۱۰		Ehsani (2009)	۱۴۹۰	
Vafaei & Bazr Afshan (2017)	۱۷۵۰		Aligholinia <i>et al.</i> (2017)	۹۴۱	البرز
			Najafi		
			Alamdaru <i>et al.</i> (2015)	۷۳۶	

Aligholinia et al. (2017)	۵۹۴	کرمانشاه	Aligholinia et al. (2017)	۵۷۳	ایلام
Najafi			Najafi		
Alamdaru et al. (2015)	۶۲۸		Alamdaru et al. (2015)	۸۱۰	
Vafaei & Bazr Afshan (2017)	۱۱۰۰		Vafaei & Bazr Afshan (2017)	۱۴۰۰	
Khoramivafa et al. (2017)	۳۵۲۳		Aligholinia et al. (2017)	۱۵۷۴	بوشهر
		کهگیلویه و بویر	Najafi		
Aligholinia et al. (2017)	۵۳۰	احمد	alamdaru et al. (2015)	۱۲۳۴	
Najafi			Vafaei & Bazr Afshan (2017)	۲۸۰۰	
Alamdaru et al. (2015)	۱۲۷۳				
Vafaei & Bazr Afshan (2017)	۱۶۰۰		Aligholinia et al., (2017)	۱۲۱۵	تهران
Aligholinia et al. (2017)	۴۳۶	گلستان	Najafi		
			Alamdaru et al. (2015)	۸۶۳	
Najafi			Vafaei & Bazr Afshan (2017)	۱۰۵۰	
Alamdaru et al. (2015)	۷۲۴				
Vafaei & Bazr Afshan (2017)	۹۵۰		Aligholinia et al. (2017)	۱۳۳۶	چهارمحال و بختیاری
Aligholinia et al. (2017)	۱۲۱۴	گیلان	Najafi		
			Alamdaru et al. (2015)	۲۵۳۵	
Najafi			Vafaei & Bazr Afshan (2017)	۱۴۵۰	
Alamdaru et al. (2015)	۸۶۲				
Vafaei & Bazr Afshan (2017)	۱۳۰۰		Aligholinia et al. (2017)	۲۸۵	خراسان جنوبی
Aligholinia et al. (2017)	۱۳۰۹	لرستان	Najafi		
			Alamdaru et al. (2015)	۱۷۴۴	
Najafi			Vafaei & Bazr Afshan (2017)	۱۹۵۰	
Alamdaru et al. (2015)	۸۳۳				
Vafaei & Bazr Afshan (2017)	۱۴۰۰		Aligholinia et al. (2017)	۱۳۴۳	خراسان رضوی
Aligholinia et al. (2017)	۲۸۴	مازندران	Najafi		
			Alamdaru et al. (2015)	۱۵۸۹	
Najafi			Vafaei & Bazr Afshan (2017)	۱۴۰۰	
Alamdaru et al. (2015)	۳۴۴				
Vafaei & Bazr Afshan (2017)	۵۵۰		Aligholinia et al. (2017)	۱۱۷۰	خراسان شمالی
Aligholinia et al. (2017)	۵۶۶	مرکزی	Najafi		
			Alamdaru et al. (2015)	۱۶۸۴	
Najafi			Vafaei & Bazr Afshan (2017)	۱۵۵۰	
Alamdaru et al. (2015)	۱۰۳۲				

بررسی وضعیت آب مجازی گندم آبی و ارائه راهکارهای فنی و سیاستی برای بهبود آن در ایران

Vafaei & Bazr Afshan (2017)	۱۴۰۰	هرمزگان	Aligholinia et al. (2017)	۱۵۵۰	خوزستان
Aligholinia et al. (2017)	۱۴۷۵		Najafi Alamdarlu et al. (2015)	۱۳۸۷	
Najafi Alamdarlu et al. (2015)	۸۶۴		Vafaei & Bazr Afshan (2017)	۱۵۸۰	
Vafaei & Bazr Afshan (2017)	۱۴۰۰	همدان	Hasili et al. (2017)	۱۴۴۰	زنجان
Bazrafshan et al. (2018)	۴۹۰		Ehsani (2009)	۱۶۷۰	
Aligholinia et al. (2017)	۳۲۶		Aligholinia et al. (2017)	۱۳۴۳	
Najafi Alamdarlu et al. (2015)	۷۸۳	یزد	Najafi Alamdarlu et al. (2015)	۱۱۳۵	سمنان
Aligholinia et al. (2017)	۲۶۱۷		Vafaei & Bazr Afshan (2017)	۱۴۰۰	
Najafi Alamdarlu et al. (2015)	۱۹۷۷		Vafaei & Bazr Afshan (2017)	۱۹۹۷	
Vafaei & Bazr Afshan (2017)	۲۴۰۰	در مقیاس ملی	Aligholinia et al. (2017)	۳۳۴۹	سیستان و بلوچستان
Omidi (2017)	۱۱۶۱-۱۵۹۰		Najafi Alamdarlu et al. (2015)	۱۱۱۱	
Keshavarz (2017)	۶۵۰		Vafaei & Bazr Afshan (2017)	۱۵۵۰	
Omidi & Homaei (2015)	۹۸۰-۱۰۵۰		Aligholinia et al. (2017)	۲۳۵۰	
Muratoglu (2020)	۸۵۰		Najafi Alamdarlu et al. (2015)	۱۱۵۹	
			Vafaei & Bazr Afshan (2017)	۲۰۰۰	
			Salari et al. (2015)	۳۴۲۰	

ارقام جدول (۲) نشان می‌دهد دامنه آنها حتی برای استان خاص نسبتاً زیاد است. یکی از دلایل توجیهی می‌تواند آن باشد که مدیریت آب، تولید و بهره‌وری آب بسیار وابسته به مدیریت کشاورزی و سواد و دانش و سایر متغیرهای اقلیمی است. این وضعیت در ارقام ارائه شده برای تمامی مطالعات و منابع علمی مرتبط با جمع‌بندی مقادیر شاخص‌های مدیریت آب مانند راندمان آبیاری، تعیین آب کاربردی در واحد سطح برای محصولات کشاورزی مختلف (Abbasi et al., 2017; Abbasi & Abbasi, 2024)، مشاهده می‌شود که خود به نوعی گواهی از آن دارد که در صورت اصلاح مدیریت مزارع و رفع محدودیت‌ها و ناکارآمدی‌های مدیریت تولید و آب، پتانسیل زیادی برای افزایش بهره‌وری آب و کاهش آب مجازی وجود دارد. بر اساس ارقام جدول (۲)، متوسط حسابی صرفاً با متوسط‌گیری اعداد ردیف‌های جدول (۱) آب مجازی گندم آبی در کشور برابر ۱۴۰۱ مترمکعب بر تن برآورد می‌شود که ۵۱ درصد بالاتر از میانگین جهانی یعنی ۹۳۰ مترمکعب بر تن متوسط آب مجازی ارقام کشورهای ارائه شده در جدول (۱) است. میانگین آب مجازی گندم آبی، حدود ۱۴۰۱ مترمکعب بر تن در سطح ایران، نشان‌دهنده نیاز به بهبود بهره‌وری در مصرف آب کشاورزی و اصلاح

گسترش مناسبی یافته‌اند عملکرد بالاتر، آب مصرفی کمتر و در نهایت دارای آب مجازی کمتری برای محصولات خود باشند. استان‌هایی که در آن‌ها ضریب پوشش سیستم‌های نوین آبیاری کم تا متوسط است ولی باز گندم آبی آب مجازی نسبتاً کمی دارد (مانند استان‌های فارس و البرز)، احتمالاً کشاورزان این مناطق دارای سواد و دانش تجربی و قدمت بیشتری در تولید گندم هستند و یکی از عوامل می‌تواند چنین مؤلفه‌ای نیز باشد.

بحث

تغییرات اقلیمی و نوسان‌های منابع آبی به‌طور فزاینده‌ای به چالش‌هایی جدی برای کشاورزی و امنیت غذایی جهانی تبدیل شده‌اند. در این زمینه تحلیل عملکرد و مقدار آب مجازی^۱ (VWC) سه محصول اصلی (گندم، جو و کلزا) در منطقه آلبرتای کانادا نشان داد در بازه‌های زمانی ۱۹۸۵ تا ۲۰۰۹ و ۲۰۴۰ تا ۲۰۶۴ عملکرد و مقدار آب مجازی سه محصول مذکور تحت تأثیر شدید تغییرات اقلیمی قرار خواهد گرفت (Masud et al., 2019). پیش‌بینی می‌شود که پتانسیل صادرات سالانه آب مجازی از این محصولات به حدود ۱۳۸ میلیارد مترمکعب برسد. این مقدار ۴۷ درصد از کل بارش و ۶۱ درصد از تبخیر و تعرق واقعی منطقه را شامل می‌شود. در نتیجه، تجارت گندم از آلبرتا به بیش از صد کشور جهان در دوره ۲۰۰۵-۱۹۹۶ موجب صرفه‌جویی سالانه در حدود ۵ میلیارد مترمکعب آب مجازی در کشورهایی شده است که گندم از آلبرتا به آنها صادر شده است. به عبارت دیگر به دلیل صادرات گندم از این منطقه، کشورهایی که این گندم را وارد کرده‌اند، نیازی به مصرف این مقدار معادل آب برای تولید گندم نداشته‌اند، بنابراین آب مجازی برابر با ۵ میلیارد مترمکعب در این کشورها ذخیره شده است. این یافته‌ها بر اهمیت مدیریت منابع آب در سطح محلی و جهانی برای کشاورزی پایدار تأکید می‌کنند.

فرآیند تولید محصولات کشاورزی از نظر کاهش مصرف آب و افزایش عملکرد و کارایی در تمام مراحل تولید تا مصرف غذا در کشور است. با توجه به شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک ایران، مدیریت منابع آبی کارآمد و استفاده از فناوری‌های نوین می‌تواند به کاهش مقدار آب مجازی محصولات کشاورزی و به خصوص گندم کمک کند. بر اساس پهنه‌بندی مرتبط با مقدار آب مجازی گندم (آب آبی)، مناطق شرقی و مرکزی ایران دارای حداکثر مقدار آب مجازی آبی (۲۴۰۰-۲۰۰۰ مترمکعب بر تن) و مناطق شمالی، غربی، شمال‌غربی، و تا حدی جنوب‌غربی کشور دارای مقدار آب مجازی کمتری (۱۹۰۰-۹۰۰ مترمکعب بر تن) هستند (Aligholinya et al., 2019).

استان‌های مختلف ایران با توجه به شرایط جغرافیایی و آب و هوایی مقدار آب مجازی متفاوتی دارند. مناطقی با شرایط خشک و نیاز به آبیاری بیشتر، آب مجازی بالاتری دارند. استان‌هایی که از فناوری‌های پیشرفته آبیاری و مدیریت منابع آبی کارآمد بهره می‌برند، مقدار آب مجازی محصولات تولیدی آنها کمتر است. نمونه‌ای از این استان‌ها، استان‌های البرز و فارس هستند که با وجود شرایط خشک، بهره‌وری بالایی در مصرف آب دارند و در نتیجه محصولات تولیدی آنها آب مجازی کمتری دارند. استان‌هایی مانند خوزستان و کرمان نیز با مقدار زیاد آب مجازی، چالش‌های جدی در مدیریت منابع آبی خود دارند. تفاوت‌های منطقه‌ای قابل توجهی در میزان آب مجازی در استان‌های مختلف ایران مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده تأثیر عواملی چون روش‌های آبیاری و شرایط آب و هوایی است. البته این یک نتیجه‌گیری منطقی است که معمولاً در صورت استفاده مناسب از فناوری‌های پیشرفته آبیاری و بهبود راندمان آبیاری، حجم آب کاربردی در واحد هکتار کاهش می‌یابد و از این رو مقدار آب مجازی محصولات نیز کاهش خواهد یافت و پیش‌بینی و انتظار آن است که در استان‌هایی که سیستم‌های آبیاری نوین

¹ Virtual water content

تولید غلات، چالشی جدی برای تأمین مواد غذایی در سطح ملی به شمار می‌آید. برآوردها نشان می‌دهند که ۴۰ درصد (۹۴ میلیون تن) از کل عرضه غذایی غلات در سال ۲۰۱۱-۲۰۱۲ بین ایالت‌های مختلف هند مبادله شده است. این مقدار معادل ۵۴ میلیارد مکعب آب مجازی آبی و ۹۹/۴ میلیارد مترمکعب آب مجازی سبز است. در این کشور، ۴۱ درصد از غلات تولیدی در ایالت‌هایی به دست می‌آید که ذخایر آب زیرزمینی آن‌ها بیش از حد برداشت شده است و ۲۱ درصد دیگر در ایالت‌هایی با کاهش بحرانی ذخایر آب زیرزمینی تولید می‌شوند. این وابستگی به منابع آب تحت بحران، تهدیدی جدی برای امنیت غذایی هند محسوب می‌شود (Harris et al., 2020).

مطالعات بالا نشان می‌دهند که درک بهتر از روابط بین تجارت محصولات کشاورزی و منابع آبی محلی می‌تواند به کشورهای مختلف کمک کند تا در جهت تأمین امنیت غذایی و حفظ پایداری منابع آبی خود گام بردارند. در این راستا، پیشنهاد‌های زیر را می‌توان برای بهبود وضعیت ارائه داد. به کارگیری این رویکردها و پیشنهادها می‌تواند به بهبود امنیت غذایی و پایداری منابع آبی در سطح محلی و جهانی کمک کند. با درک عمیق‌تر از چالش‌ها و فرصت‌های موجود، کشورهای مختلف می‌توانند گام‌هایی مؤثر برای رو به رو شدن با تغییرات اقلیمی و نوسان‌های آب بردارند:

- کشورها باید سیاست‌های مؤثری برای مدیریت منابع آب محلی تدوین کنند تا وابستگی به واردات آب مجازی از مناطق کم‌آب کاهش یابد. این موضوع شامل تقویت قوانین حفظ آب و بهینه‌سازی استفاده از منابع آبی موجود است.

- گسترش سیستم‌های تولید متنوع‌تر و تشویق به کشت محصولات با نیاز آبی کمتر در مناطق کم‌آب می‌تواند به افزایش تاب‌آوری سیستم‌های غذایی

در ایران حدود نیمی از نواحی کشت گندم در مناطقی با کمبود آب قرار دارند. تحقیقات نشان داده است که ۳۱ تا ۱۰۰ درصد از کمبود گندم در این مناطق می‌تواند با تولید مازاد سایر استان‌ها تأمین شود. این مطلب بدان معناست که استان‌های دارای کمبود گندم می‌توانند ۳/۵-۵/۵ میلیارد مترمکعب آب مجازی را با واردات گندم از سایر استان‌ها دریافت کنند (Faramarzi, 2010). در بحث مدیریت تخصیص آب و الگوی کشت منطبق با آن باید کل محصولات و مبادلات آبی مرتبط را لحاظ کرد و برای تصمیم‌گیری کلان موضوع صرفاً نتایج تحقیقات به دست آمده از یک محصول کفایت نمی‌کند.

در ایالات متحده، در مطالعه‌ای ضمن معرفی شاخص "نسبت واردات ناپایدار" (UIF) تأکید شده است که بخش زیادی از تجارت غلات معمولی و نرم‌دانه بین شهرستان‌های مجاور است. این تحقیق نشان می‌دهد که یک سوم شهرستان‌های آمریکا ۷۵ درصد یا بیشتر از آب مجازی خود را از مناطق کم‌آب وارد می‌کنند. در سال ۲۰۱۷، ایالت تگزاس^۱ بزرگ‌ترین واردکننده و ایالت میزوری^۲ بزرگ‌ترین صادرکننده غلات آمریکا شناخته شدند. این وابستگی به آب مجازی، خطرهایی برای پایداری منابع آبی این ایالت‌ها ایجاد می‌کند و نگرانی‌هایی درباره تأثیرات منفی بر محیط زیست و منابع آبی را به وجود می‌آورد. تعداد ایالت‌هایی از آمریکا که غلات و محصولات نرم‌دانه را از مناطق کم‌آب وارد می‌کنند از سال ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۷ به طور مداوم در حال افزایش بوده است. این روند، نیاز به اتخاذ سیاست‌های تجاری و مدیریت منابع آبی مؤثر را بیش از پیش ضروری ساخته است (Rathore et al., 2023).

در هند، غلات نقش اساسی در رژیم غذایی مردم دارند و ۴۷ درصد از انرژی غذایی روزانه را تأمین می‌کنند. با این حال، کاهش ذخایر آب زیرزمینی، به‌ویژه در مناطق اصلی

¹ Texas

² Missouri

(حدود ۵۳ درصد زمین های تحت کشت گندم آبی)، در مناطق با بحران کم آبی واقع شده اند. بر اساس آمارنامه کشاورزی سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۱، رتبه دوم میزان تولید محصولات آبی در کشور مربوط به گندم آبی با تولید حدود ۱۰/۵ میلیون تن و سهم ۱۳/۹ درصد از کل میزان تولید محصولات زراعی آبی است که استان های خوزستان با سهم ۱۷/۸ درصد، فارس با سهم ۱۲/۸ درصد، خراسان رضوی با سهم ۶/۹ درصد، کرمانشاه با سهم ۶/۵ درصد، و آذربایجان غربی با سهم ۶/۳ درصد در رتبه های اول تا پنجم تولیدکنندگان گندم آبی کشور قرار داشته اند. این پنج استان نسبتاً کم آب جمعاً در حدود ۵۰/۴ درصد از کل تولید گندم آبی کشور را تامین کرده اند (Agricultural Statistics Yearbook, 2024). این پنج استان حدود ۴۵ درصد منابع آب کشاورزی کشور را هم در اختیار دارند و شاید طبیعی باشد که حدود ۵۰ درصد تولید گندم کشور را داشته باشند. ولی در سال های اخیر با توجه به بحران تغییر اقلیم، استان های پر آب مانند خوزستان به دلیل کمبود بارش ها در سرشاخه های حوضه های آبریز بالادست، دچار کم آبی شده اند و از این رو بررسی های تکمیلی نیاز است تا معلوم شود چرا هنوز سطح زیر کشت گندم با توجه به پایین بودن نسبی بهره وری آب گندم، ۵۰ درصد سطح زیر کشت آبی این استان ها را تشکیل می دهند؟ این بحث از جنبه های الگوی کشت بهینه، بهره وری آب اقتصادی، فیزیکی، و مسائل حفاظت از منابع آب کشور نیاز به بررسی های عمیق تری دارد. دیگر استان های تولیدکننده گندم کشور (مانند استان های آذربایجان شرقی، اصفهان، سمنان، سیستان و بلوچستان و قزوین) نیز در مناطق با بحران آب قرار دارند. کمبود گندم در این مناطق می تواند واردات گندم و یا با تأمین از تولیدات اضافی دیگر استان های با وضعیت بحران آب کمتر جبران شود.

این نتیجه گیری از جنبه مقدار آب مجازی و بهره وری آب گندم آبی (تقریباً ۰/۸ کیلوگرم بر مترمکعب) است که در مقایسه با

کمک کند. این استراتژی ها می توانند شامل استفاده از گیاهان مقاوم به خشکی و شیوه های کشاورزی پایدار باشند.

- استفاده از فناوری های نوین آبیاری و بهبود مدیریت آب از طریق آموزش کشاورزان و استفاده از سیستم های آبیاری هوشمند می تواند به بهبود کارایی مصرف آب و کاهش وابستگی به منابع آب زیرزمینی کمک کند.

- تجدیدنظر در سیاست های تجارت داخلی و کاهش صادرات غلات از مناطق کم آب می تواند به جلوگیری از فرسایش بیشتر منابع آبی کمک کند و امنیت غذایی را حفظ کند. این سیاست ها باید به گونه ای طراحی شوند که توسعه پایدار و حفاظت از منابع آبی را ترویج کنند.

در قرن بیست و یکم کمبود آب به یکی از معضلات اصلی جهانی تبدیل شده است که تأثیرات عمده ای بر زندگی بشر دارد. ایران، با توجه به وضعیت بحرانی منابع آب خود، با این چالش به شدت مواجه است. مفهوم آب مجازی، به میزان آب مصرف شده برای تولید هر واحد از محصول اشاره دارد و برای محصولات راهبردی مانند گندم اهمیت ویژه ای دارد. گندم در کشور و حتی در جهان محصولی راهبردی محسوب می شود و سطح زیر کشت زیادی (تقریباً ۴۰ درصد زمین های تحت کشت آبی کشور)^۱ را دارد (Heydari, 2022). بر اساس آمارنامه سال ۱۴۰۱، سطح زیر کشت گندم آبی و دیم در ایران به ترتیب برابر با ۲۳۶۹۷۱۶ هکتار (۳۶/۵ درصد زمین های تحت کشت آبی) و ۴۵۳۸۸۲۹ هکتار (۷۴/۶ درصد زمین های تحت کشت دیم) بوده است (Agricultural Statistics Yearbook, 2022). تحقیقات نشان می دهند که گندم به دلیل مصرف بالای آب در فرایند تولید و عملکرد پایین، دارای مقدار آب مجازی زیادی است. به استثنای مناطق شمالی کشور، اکثر مناطق تحت کشت گندم در ایران

^۱ با فرض مساحت اراضی تحت کشت آبی کشور تقریباً برابر ۸ میلیون هکتار.

که با توجه به ماهیت و فیزیولوژی گیاه گندم، مزیت اقلیمی کشت گندم در مناطق مختلف به صورت ذاتی مشخص شود. بدیهی است عملکرد محصول و میزان مصرف آب بستگی زیادی به مدیریت کشاورز دارد، ولی این جدول گویای آن است که اگر اثر متغیرها و شرایط راندمان آبیاری و مصرف ناخالص آب آبیاری از بررسی و تجزیه و تحلیل‌ها جدا گردد و فقط نیاز آبی خالص مد نظر قرار داده شود، اقلیم‌ها و مناطق مختلف ایران چه استعدادهایی برای کشت گندم دارند. بر اساس ارقام جدول (۳)، شاخص کارایی مصرف آب گندم در مناطق مختلف کشور دامنه‌ای وسیع دارد و مقدار آن از ۰/۵۶ تا ۲/۳۲ کیلوگرم بر مترمکعب تغییر می‌کند. این ارقام، نشان‌دهنده آن هستند که حتی برای محصولی معین (در اینجا گندم) مناطق مختلف استعدادهای متفاوتی برای تولید و کارایی مصرف آب آن محصول دارند و برتری کشت محصولات از لحاظ کارایی مصرف آب و مقدار آب مجازی در مناطق مختلف متفاوت است. بر اساس مقدار آب مجازی گندم در استان‌های مختلف، استان‌های گلستان و اردبیل که نسبتاً مشکل کم‌آبی ندارند و مقدار آب مجازی گندم در آنها کم نیز هست، برتری بیشتری برای کشت گندم در کشور دارند. خوزستان که به دلیل پایین بودن راندمان آبیاری و تلفات زیاد آب دارای مقدار آب مجازی بیشتری است، در صورت بهبود مدیریت آبیاری با توجه به اقلیم مناسب و گرمای هوا و امکان استفاده مناسب از بارش‌های زمستانه در فصل رشد و رسیدگی سریع محصول، دارای برتری زیادی برای کشت گندم است (جدول ۳).

دیگر محصولات با ارزش اقتصادی بیشتر، بهره‌وری آب نسبتاً پایین‌تری دارد. برای حل بحران آب، سطح زیر کشت محصولات آبی باید کاهش یابد و با بهینه‌سازی الگوی کشت از آب تخصیصی به بخش کشاورزی باید استفاده بهینه شود و ارزش اقتصادی بالاتری از آن دریافت شود. با توجه به بحث تدوین الگوی کشت جامع در کشور و برای ارائه محصولی کم‌آب‌بر و در حین حال با ارزش اقتصادی بیشتر به جای گندم به عنوان یک راهکار تقریبی، می‌توان کشت گیاهان دارویی و روغنی و صنعتی کم‌آب‌بر مانند گلرنگ را در منطقه خرامه استان فارس پیشنهاد داد. این منطقه در سال‌های اخیر با بحران شدید آب روبه‌رو شده است و کشت این محصولات در آنجا رواج دارد (Heydari & Dehghanian, 2018).

استفاده از مزیت‌های اقلیمی و کشت محصولات کشاورزی در مناطقی که از نظر اقلیمی دارای برتری تولید و بهره‌وری آب بیشتر (آب مجازی کمتر) هستند، کشور را قادر می‌سازد که با تمرکز بر تولید در مناطق خاصی که دارای برتری تولید است، و بالعکس محدودیت کشت آن محصول در مناطقی که از نظر اقلیمی برتری ندارد، بهینه‌سازی تولید دنبال شود. به منظور بررسی برتری کشت گندم (از ابعاد نیاز آبی و کارایی مصرف آب پتانسیل) در تولید این محصول در کشور، شاخص کارایی مصرف آب گندم آبی تحت کشت در مناطق مختلف و بر اساس نیاز آبی خالص محصولات کشاورزی مبتنی بر سند ملی آب کشور محاسبه و نتایج آنها در جدول (۳) ارائه شده است. هدف از آنچه در جدول (۳) آمده است، ارائه تصویری از کارایی مصرف آب پتانسیل گندم در مناطق با اقلیم‌های مختلف کشور است. در واقع، هدف آن بوده است

جدول ۳- نیاز خالص آبیاری، عملکرد، و کارایی مصرف آب گندم آبی در مناطق مختلف کشور (Heydari et al., 2005)

Table 3-Net irrigation water requirement, yield, and water use efficiency (WUE) of irrigated wheat in different regions of Iran (Heydari et al., 2005)

نیاز خالص آبیاری (*) (مترمکعب بر هکتار) Net irrigation water requirement (m ³ /ha)	عملکرد (**)(کیلو گرم بر هکتار) (Kg/ha)	کارایی مصرف آب (***)(کیلو گرم بر مترمکعب) WUE (Kg/m ³)	آب مجازی آبی (مترمکعب بر تن) Virtual water (m ³ /tons)	حوضه آبریز - ایستگاه هواشناسی مبنا Basin- Base Meteorology station	استان Province
۵۷۹۰	۳۲۲۰	۰/۵۶	۱۷۸۶	کویر درانجیر - بردسیر	کرمان
۵۱۴۰	۳۶۲۱	۰/۷۰	۱۴۲۹	ابرقو - ابرقو	یزد
۴۴۹۰	۳۵۷۹	۰/۸۰	۱۲۵۰	کال شور - قوچان	خراسان
۴۹۷۰	۴۳۳۹	۰/۸۷	۱۱۴۹	دشت برخوار - زاینده رود	اصفهان
۳۰۱۰	۳۲۲۱	۱/۰۷	۹۳۵	حمیدیه، قدس - حوضه کرخه	خوزستان
۲۱۰۰	۳۳۶۷	۱/۶۰	۶۲۵	ارس - پارس آباد مغان	اردبیل
۱۵۱۰	۳۵۰۸	۲/۳۲	۴۳۱	گرگان و گنبد - گلستان	گلستان

* بر اساس سند ملی آب کشور (نیاز آبی گیاه در طول دوره رشد با احتساب بارندگی مؤثر).

** برگرفته از آمارنامه کشاورزی سال ۸۲-۱۳۸۱

*** عملکرد محصول تقسیم بر نیاز خالص آبیاری

این امر نشان دهنده اهمیت تجارت آب مجازی در کاهش بحران کمبود آب در سطح کشور است. شاخص های جهانی نشان می دهند که مقدار رد پای محصولات کشاورزی در ایران زیاد است و آب مجازی گندم در مناطق مختلف کشور در مجموع بین ۲۸۴ تا ۲۸۰۰ مترمکعب بر تن برای آب مجازی آبی و ۶۷ تا ۱۱۴۳ مترمکعب بر تن برای آب مجازی سبز متغیر است. این تفاوت ها تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند شرایط آب و هوایی و روش های کشاورزی قرار دارند. برای مدیریت مؤثر منابع آب و کاهش مصرف آن در تولید گندم و دیگر محصولات کشاورزی، ضروری است این راهکارها عملی شود: بهبود بهره وری آب، کاهش ضایعات گندم در مراحل مختلف، استفاده از روش های آبیاری بهینه، انتخاب گونه های مقاوم به خشکی، و اجرای سیاست های هوشمندانه مدیریت آب. اجرای برنامه های آموزشی برای کشاورزان و اتخاذ تصمیمات راهبردی در انتخاب مناطق

کشت گندم نیز به پایداری محیطی و اقتصادی کشور کمک خواهد کرد.

در زمینه راهکار کاهش ضایعات باید گفت بر اساس آخرین آمار و با استفاده از مفهوم آب مجازی، سالانه ۱۳ میلیارد مترمکعب آب فقط در اثر ضایعات محصولات کشاورزی از بین می رود (با فرض تولید محصولات کشاورزی: ۷۷/۲ میلیون تن، میزان ضایعات محصولات ۱۵ درصد، و متوسط بهره وری آب محصولات کشاورزی برابر ۰/۹ کیلوگرم بر مترمکعب (آب مجازی ۱۱۱۰ مترمکعب بر کیلوگرم). این میزان از هدررفت آب، از نظر بزرگی حدود ۳ برابر حجم آب ذخیره شده در پشت سد بزرگ کرخه و برابر ۱۴ درصد از کل آب مصرفی در بخش کشاورزی است (Heydari, 2015).

بر همین اساس و با استفاده از آمار سال ۱۳۸۲، تولید گندم کشور در این سال حدود ۱۲/۵ میلیون تن بود. مطالعات بیانگر آن است که میزان ضایعات بعد از برداشت تا مرحله

غذایی و آسیب به محیط زیست، ۳) بی‌اعتمادی به تجارت جهانی و روابط حاکم بر تجارت جهانی، ۴) قیمت و یارانه برای غذا، ۵) سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌ها یا واردات آب مجازی، ۶) واردات آب مجازی در عوض انتقال آب بین‌حوضه‌ای با هزینه زیاد، ۷) مسائل خودکفایی نسبی و سرمایه‌گذاری برای امنیت غذایی از لحاظ ریسک‌پذیری کمتر آن به لحاظ کاهش هزینه‌های گزاف سیاسی و اقتصادی مترتب^۱، ۸) اشتغال و فقر، و ۹) هزینه فرصت آب مصرفی (Ehsani, 2009). بر اساس جمع‌بندی نشست مرتبط با مسائل و اتخاذ سیاست تجارت آب مجازی در کشور، توسعه مفهوم آب مجازی در جامعه می‌تواند دستاوردهای مفیدی به همراه داشته باشد که از آن جمله ارزیابی حجم عظیم آب به هدر رفته از طریق ضایعات محصولات و مواد غذایی است که در این ارتباط اطلاع‌رسانی و آگاهی‌دادن به مردم از طریق رسانه‌ها جزو یکی از امور مستمر مدیریت منابع آب مطرح خواهد بود. با وجود این، به نظر می‌رسد در تعریف آب مجازی و نحوه محاسبه آن ابهاماتی وجود دارد و در مطالعات مختلف همگرایی کمی نسبت به مفاهیم کلی آب مجازی دیده می‌شود. در بخش کشاورزی، یکی از مهم‌ترین ابهام‌ها چگونگی اندازه‌گیری آب مجازی در مزرعه تا مرحله مصرف محصول است (Iranian National Committee on Irrigation and Drainage, 2009a, b).

نتیجه‌گیری

با توجه به بحران آب و لزوم تأمین امنیت غذایی از منابع آب محدود کشور، شناخت و تسری مفاهیم آب مجازی و تجارت آن در جامعه و به‌ویژه در جامعه کارشناسی کشور اهمیت ویژه‌ای دارد. بر اساس اسناد بالادستی، گندم محصولی راهبردی و جزو محصولات اساسی شناخته می‌شود

آردسازی گندم حدود ۱۰ درصد و ضایعات مصرف نان کشور حداقل ۱۶ درصد بوده که این مقدار ضایعات نان برابر ۱۳/۴ درصد از کل تولید گندم کشور است. بنابراین، حدود ۲/۹۳ میلیون تن گندم یا در واقع حدود ۴/۲ میلیارد مترمکعب آب (با فرض آب مجازی ۱۴۲۹ مترمکعب بر تن برای گندم) علاوه بر ضایعات سایر نهادهای کشاورزی فقط از طریق ضایعات گندم و نان ضایع شده است (Keshavarz & Heydari, 2004).

در سطح جهانی، کشورهای مختلف با چالش‌های مشابهی در مدیریت آب مجازی و کمبود آب مواجه هستند. برای حفظ منابع آب و تأمین امنیت غذایی، کشورهای مختلف نیاز به بهبود مدیریت منابع آب و انتخاب راهبردی مناطق کشت محصولات کشاورزی دارند. تعدادی از محققان معتقدند که واردات آب مجازی (از طریق مواد غذایی یا محصولات صنعتی) راه حل مناسبی برای بحران آب به‌ویژه برای کشورهای خشک است که کشاورزی آنها فقط بستگی به آبیاری دارد و کارایی مصرف آب محصولات تولیدی آنها نیز کم است. بنابراین، به جای مصرف منابع آب کمیاب برای محصولاتی که مصرف آب آنها نیز زیاد است، این قبیل کشورها می‌توانند غذای ارزان وارد و از فشار بیش از حد به منابع آب خودداری کنند. برای نظریه تجارت آب مجازی، چالش‌ها و ابهام‌های جهانی زیر وجود دارد: ۱) مسائل امنیت غذایی و خودکفایی غذایی و جنبه‌های سیاسی آن، ۲) وجود ابهام‌های بنیادی از جنبه‌های ضرورت سرمایه‌گذاری در توسعه امور زیربنایی آبیاری و زهکشی برای خودکفایی غذایی یا هزینه کرد و سرمایه‌گذاری‌ها برای دیگر بخش‌های اقتصادی و در عوض واردات مواد غذایی از دیگر کشورها؛ مسائل اعتماد به بازار جهانی مواد غذایی؛ و توجیه‌پذیری تولید مواد غذایی از منابع آب داخلی برای کسب امنیت

^۱ به نظر می‌رسد در حال حاضر سیاست فعلی کشور به این نظریه نزدیکتر است.

شامل افزایش دما، تغییرات در الگوهای بارش و دیگر تغییرات جوّی می‌تواند تأثیرات چشمگیری بر عملکرد محصول، تبخیر و تعرق و میزان آب مورد نیاز برای رشد غلات داشته باشد. تنوع جغرافیایی و آب و هوایی، تأثیر زیادی بر میزان آب مجازی در هر کشور دارد و نیازمند سیاست‌گذاری‌ها و فناوری‌های مناسب برای بهبود بهره‌وری آب است. از این رو هر کشور باید بر اساس شرایط خاص خود راهبردهای مناسب را برای مدیریت منابع آبی خود توسعه دهد تا با بهره‌برداری بهینه از آن‌ها به پایداری منابع آب و امنیت غذایی دست یابد.

اگر جریان‌های آب مجازی، به‌ویژه از مناطق کم‌آب، مدیریت نشود می‌تواند به پایداری منابع آبی کشورها آسیب برساند. برخی از پیشنهاد‌های ارائه شده در این زمینه عبارت‌اند از: (۱) کاهش واردات محصولات از مناطق کم‌آب و بهبود سیاست‌های تجارت آب مجازی برای محافظت از منابع آبی این مناطق، (۲) تشویق به استفاده از محصولاتی که آب سبز بخش عمده‌ای از نیاز آبی آنها را تامین می‌کند و موجب کاهش وابستگی به آبیاری می‌شود، و (۳) تدوین سیاست‌های ملی و منطقه‌ای برای حمایت از کشاورزی پایدار و مدیریت بهتر منابع آبی.

کاربرد سیاست تجارت آب مجازی گندم دارای چالش‌های خاص خود نیز هست، از آن جمله مسائل واردات این محصول از نظر بی‌اعتمادی به تجارت جهانی در روابط سیاسی لازم با کشورهای صادرکننده؛ قیمت فروش محصول؛ هزینه فرصت آب مصرفی؛ سیاست خودکفایی نسبی در این محصول؛ و چگونگی اندازه‌گیری، و مسائل پیچیدگی نحوه محاسبه آب مجازی محصولات کشاورزی در فرآیندهای مختلف تولید آن تا مرحله تولید غذا و مصرف آن در جامعه از ابعاد میزان ضایعات و آب مصرف شده تا تولید محصول نهایی.

بررسی وضعیت آب مجازی گندم کشور و مقایسه آن با وضعیت جهانی تأکید می‌کند که ایران باید به‌طور جدی به بهبود مدیریت منابع آب و انتخاب راهبردی مناطق کشت

و تقریباً ۵۰ درصد زمین‌های تحت کشت کشور تحت کشت این محصول است. گندم به صورت عمده در استان‌های کم آب کشور تولید می‌شود که خود محدودیت منابع آب دارند. با این حال، تفاوت‌های چشمگیری در مقدار آب مجازی گندم بین استان‌های مختلف مشاهده می‌شود که ناشی از عواملی مانند مدیریت آبیاری، استفاده از روش‌های نوین آبیاری، مدیریت کود و دیگر نهاده‌های تولید، اقلیم و شرایط آب و هوایی، پراکندگی بارش‌ها، نوع خاک، و مهارت و مدیریت کشاورزان است. این موضوع، یعنی کشت گندم در مناطق خشک و کم‌آب، حتی در دیگر کشورهای جهان مانند آمریکا نیز مشاهده می‌شود. شاید یکی از دلایل آن، عملکرد مناسب گندم در شرایط آب و هوایی خشک و بدون رطوبت و همچنین عملکرد زیاد آن در شرایط کشاورزی آبی و آبیاری محصول است، زیرا عملکرد گندم دیم بسیار کم‌تر از عملکرد گندم آبی است.

برتری کشت گندم از جنبه نیاز آبی، میزان عملکرد، و کارایی مصرف آب پتانسیل بیانگر آن است که مناطق مختلف کشور، صرف‌نظر از میزان بحران آب آن‌ها، دارای استعدادهای متفاوتی از نظر تولید گندم هستند. از این رو در سطح ملی و جهانی جابه‌جایی در الگوی کشت، مقدار تولید، و تجارت آب مجازی گندم بین استان‌ها یا کشورهای مختلف اهمیت می‌یابد. درک مفهوم آب مجازی از جنبه تلاش برای کاهش ضایعات آن نیز اهمیت دارد. با کاهش ضایعات گندم از مرحله برداشت تا تولید نان مقادیر زیادی آب (حدود ۴/۲ میلیارد مترمکعب) صرفه‌جویی خواهد شد. تغییرات در مقدار آب مجازی و عملکرد محصولات به عواملی چون اقلیم، جغرافیا، ویژگی‌های خاک، شرایط هیدروئولوژیکی، و الگوهای کاشت و برداشت وابسته است. بنابراین، هرگونه تغییر در این عوامل می‌تواند تأثیر مستقیم و شدیدی بر میزان آب مجازی و عملکرد این محصولات داشته باشد. در آینده، عملکرد و مقدار و تجارت آب مجازی غلات به‌طور قابل توجهی تغییر خواهد کرد. تغییرات اقلیمی

گندم بپردازد. در این راستا و بر اساس مطالعات مختلف کمیّت و کیفیت آب در مناطق تحت کشت، و ارتقای (مانند Jafari & Abbasi, 2025)، توجه به تناسب اراضی، بهره‌وری آب در بخش کشاورزی می‌تواند در کاهش مصرف کاهش سطح زیر کشت در زمین‌های کم‌بازده، توجه به آب، بهبود تولید و کاهش آب مجازی گندم مؤثر باشد.

مراجع

- Abbasi, F. & Abbasi, N. (2024). An analysis of irrigation efficiencies over time in Iran. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 17(6):1025-1033. (In Persian)
- Abbasi, F., Sohrab, F. & Abbasi, N. (2017). Evaluation of irrigation efficiencies in Iran. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 17(67):113-128. (In Persian)
- Agricultural Statistics Yearbook (2022). *Agricultural Statistics Yearbook 2021-2022: Volume 1, Crop Products*. Statistical Deputy, Information Technology and Communications Deputy, Economic Planning Deputy of the Ministry of Agriculture Jihad, September 2022. (In Persian)
- Agricultural Statistics Yearbook (2024). *Agricultural Statistics Yearbook 2023-2024: Volume 1, Crop Products*. Statistical Deputy, Information Technology and Communications Deputy, Economic Planning Deputy of the Ministry of Agriculture Jihad, September 2024. (In Persian)
- Ahmadvand, M.R. & Najafpour, Z.A. (2010). Analysis of wheat cultivation area and supportive policies during the first to fourth national development plans. *Journal of Economic Research and Policies*, 17 (53): 59-76. (In Persian)
- Aligholnia, T., Rezaei, H., Behmanesh, J. & Montaseri, M. (2017). Water footprint index study for dominant crops in Urmia lake basin and its relationship with irrigation management. *Water and Soil Science*, 27 (4): 37-48. (In Persian)
- Aligholinya, T., Sheibany, H., Mohamadi, O. & Hesam, M. (2019). Comparison and evaluation of blue, green and gray water footprint of wheat in different climates of Iran. *Iran-Water Resources Research*, 15 (3): 234-245. (In Persian)
- Allan, J.A. (2011). *Virtual water: Tackling the threat to our planet's most precious resource*. I.B. Tauris.
- Bazrafshan, O., Dehghanpir, Sh. & Holisaz, A. (2018). Estimation of virtual water trade in the Hormozgan province over the past decade. *Desert Management*, 5 (10): 116-129. (In Persian)
- Ehsani, M. (2009). Understanding virtual water. Lecture presented at the Seminar "Water and Sustainable Development with a Focus on Virtual Water", Iranian National Committee on Irrigation and Drainage, July 2009, Tehran International Exhibition Center. (In Persian)
- Ehsani, M., Khaledi H. & Barghi, Y. (2008). Introduction to virtual water. Iranian National Committee on Irrigation and Drainage. (In Persian)
- El-Marsafawy, S.M., Swelam, A. & Ghanem, A. (2018). Evolution of crop water productivity in the Nile Delta over three decades (1985–2015). *Water* 2018, 10, 1168; doi:10.3390/w10091168.
- Ewaid, S.H., Abed, S.A. Abbas, A.J. and Al-Ansari, N. (2020). Estimation the virtual water content and the virtual water transfer for Iraqi wheat. *Journal of Physics: Conference Series*, 1664: 012143.
- Fader, M., Rost, S., Muller, Ch., Bondeau, A. and Gerten, D. (2010). Virtual water content of temperate cereals and maize: Present and potential future patterns *Journal of Hydrology*, 384 (3-4): 218-231.
- Faramarzi, M., Yang, H., Mousavi, J., Schulin, R., Binder, C. R. & Abbaspour K. C. (2010). Analysis of intra-country virtual water trade strategy to alleviate water scarcity in Iran. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 14, 1417–1433.
- Jafari, H. & Abbasi, F. (2025). Evaluation of wheat water irrigation management in Iran with the approach of reducing the area under cultivation and improving water productivity. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, Doi:10.22059/ijswr.2024.380800.669778. (In Persian)
- Harris, F., Dalin, C., Cuevas, S., Lakshmikantha, N.R, Adhya, T., Joy, E.J.M., Scheelbeek, P.F.D., Kayatz, B., Nicholas, O., Shankar, Bh., Dangour, A.D. and Green, R. (2020). Trading water: virtual water flows through interstate cereal trade in India. *Environmental Research Letters*, 15: 125005.

- Hasili, M.A., Golabi, M. & Boroumandnasab, S. (2017). Study and evaluation irrigation and drainage networks by using analytic hierarchy process with virtual water approach: Case study; Shahid Rajae, Ramshir and Hendijan networks. *Iran-Water Resources Research*, 13 (3):112-127. (In Persian)
- Heydari, N. (2015). Concepts of water productivity and virtual water. Scientific Lecture, Agricultural Engineering Research Institute, Karaj, Alborz, Iran. (In Persian)
- Heydari, N. (2022). Wheat water productivity in Iran compared with data of some countries. *Journal of Water Research in Agriculture*, 35 (4): 421-435. (In Persian)
- Heydari, N. & Dehghanian, S.E. (2018). Investigation of climate change impacts on agricultural sector of Iran from water resources management perspective. Research Report no. 5474, Dec. 30, 2018, 137p. (In Persian)
- Heydari, N., Keshavarz, A. & Dehghani-Sanij, H. (2005). Optimal management of agricultural water consumption in Iran considering drought and aridity. The 2nd conference on methods to prevent waste of national resources, June 15, 16, Academy of Sciences of Iran, Tehran, Iran. (In Persian)
- Hoekstra, A.Y., Chapagain, A.K., Aldaya, M.M. and Mekonnen, M.M. (2011). *The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard*. Earthscan.
- Iranian National Committee on Irrigation and Drainage. (2009a). Water and sustainable development with a focus on virtual water. Summary of the Workshop, organized by the National Committee on Irrigation and Drainage of Iran in collaboration with the Iran Water Resources Management Company, July 18, Tehran International Exhibition Center. (In Persian)
- Iranian National Committee on Irrigation and Drainage. (2009b). Virtual water policy: challenges and perspectives. Newsletter of the Iranian National Committee on Irrigation and Drainage of Iran, No. 74. (In Persian)
- Keshavarz, A. (2017). Analysis of water resources and the agricultural outlook of the country. National Center for Strategic Agricultural and Water Studies of the Iran Chamber of Commerce, The 2nd National Conference on Iranian Medicinal Herbs papers, Urmia University. (In Persian)
- Keshavarz, A. & Heydari, N. (2004). A perspective on the waste and misuse of national water resources in the production and consumption stages of agricultural products. The 1st Symposium of National Resources Loss Prevention, June 8, 10, Academy of Sciences of Iran, Tehran, Iran. (In Persian)
- Khoramivafa, M., Nouri, M., Mondani, F. and Veisi, H. (2017). Evaluation of virtual water, water productivity and ecological footprint in wheat and maize farms in west of Iran: A case study of Kouzaran region, Kermanshah Province. *Journal of Water and Sustainable Development*, 3(2): 19-26. (In Persian)
- Masud, M.B., Wada, Y., Goss, G., Faramarzi, M. (2019). Global implications of regional grain production through virtual water trade. *Science of the Total Environment*, 659: 807-820.
- Mekonnen, M., Hoekstra, A.Y. (2011). *National water footprint accounts: the green, blue and grey water footprint of production and consumption*. Delft, the Netherlands: Unesco-IHE Institute for Water Education, Value of Water Research Report 50, 50.
- Mirbagheri, V., Baradaran Nasiri, M., Emami, J. & Hosseini Sabet S.M. (2016). Production and trade of basic products of the agricultural sector in the period of 2001-2016. Vice President of Infrastructure Research and Production Affairs, Office of Infrastructure Studies (Agricultural Group), Research Center of the Islamic Council, subject code 250, serial number 15201, 99P. (In Persian)
- Mohammadjani, A. & Yazdani, N. (2014). Analysis of the water crisis situation in the Iran country and management requirements. *Ravand Quarterly*, 65-66: 117-144. (In Persian)
- Muratoglu, A. 2020. Assessment of wheat's water footprint and virtual water trade: a case study for Turkey. *Ecological Processes*, 9: 13.
- Najafi Alamdarlu, H., Vakilpour, M.H. and Riahi, F. (2015). Investigating the amount of virtual water in wheat and water productivity in Iran. The 2nd International Conference and the 5th National Conference of Environmental and Agricultural Researches of Iran, Hamadan, Iran. (In Persian)

- Omidi, T. (2017). Determination and analysis of strategies and priorities for import and export of agricultural products based on the concept of virtual water. M.Sc. Thesis, Department of Water Resources Engineering, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, 259 pp. (In Persian)
- Omidi, F. & Homaei, M. (2015). Deriving crop production functions to estimate wheat virtual water and irrigation water price. *Cereal Research*, 5 (2): 131-143. (In Persian)
- Rathore, L.S., Aziz, D., Demeke, B.W. and Mekonnen, M.M. (2023). Sustainability assessment of virtual water flows through cereal and milled grain trade among US counties. *Environmental Research: Infrastructure and Sustainability*, 3 (2): 025001.
- Renault, D. (2002). Value of Virtual Water in Food: Principles and Virtues. Land and Water Development Division (AGL), Food and Agriculture Organization of the United Nations, Italy.
- Salari, S., Karandish, F. & Darzi-Naftchali, A. (2015). Spatial and temporal analyses of the wheat virtual water variations in Sistan and Blouchestan Province. *Irrigation and Water Engineering*, 5 (2): 81-94. (In Persian).
- Shahrokhnia, M.A., Dehghanian, S.E., Nakhjavanimoghaddam, M.M. & Abbasi, F. (2023). Determining the volume of applied water and water productivity in orange and tangerine orchards in Fars province. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 17 (1): 77-86. (In Persian)
- Statista. (2025a). Statistics, Agriculture, Farming, forecast volume of wheat produced in the European Union (EU 27) from 2017 to 2023. Retrieved from <https://www.statista.com>.
- Statista. (2025b). Statistics, Agriculture, Farming, Wheat production in China between 2014 and 2024. Retrieved from <https://www.statista.com>
- Statista. (2025c). Statistics, Agriculture, Farming, Production volume of wheat during rabi season in India from Financial Year 2010 to 2022, with an Estimate for 2023. Retrieved from <https://www.statista.com>.
- Sun, S.K., Wu, P.T., Wang, Y.B., Zhao, X.N. (2013). The virtual water content of major grain crops and virtual water flows between regions in China. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 93 (6): 1427-1437.
- Vafai, K. & Bazr Afshan, A. (2017). Virtual water balance of wheat in the crop year 2014-2015 in Iran. The 4th International Conference on Environmental Planning and Management, Tehran, Iran. (In Persian)
- Xinchun, C., Mengyang, W., Xiangping, G., Yalian, Zh., Yan, G., Nan, W., Weiguang, W. (2017). Assessing water scarcity in agricultural production system based on the generalized water resources and water footprint framework. *Science of the Total Environment*, 609: 587-597.

Technical note**Investigating the Status of Virtual Water of Irrigated Wheat and Providing Technical and Policy Solutions for its Improvement in Iran****N. Heydari*, F. Taran**

***Corresponding Author:** Corresponding Author, Associate Professor; Agricultural Engineering Research Institute (AERI); Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO); Karaj; Iran.

Received: 23 October 2024, **Accepted:** 29 January 2025

Email: nrheydari@yahoo.com

https://doi.org/ 10.22092/IDSER.2025.367448.1596

Abstract

The concept of virtual water has been highlighted in the 21st century as a key indicator to evaluate the optimal use of water in the production of agricultural products, especially in the face of the water shortage crisis. This study analyzed the virtual water of irrigated wheat, known as one of the strategic agricultural products, in Iran and investigated the differences in the amount of virtual water of irrigated wheat in different provinces and climates of the country. The results indicated that the amount of virtual water of irrigated wheat in Iran is in a wide range of 284-3523 m³ ton⁻¹ with an average of 1400 m³ ton⁻¹, being 50% higher than the average values found in a number of other countries (930 m³ ton⁻¹). The highest amount of virtual water (1539-3523 m³ ton⁻¹) is in the provinces of Khuzestan, Kerman, Semnan, Bushehr, Sistan and Baluchestan, Isfahan, Fars, Yazd, some areas of Qom, Kermanshah, South Khorasan, North Khorasan, Chaharmahal and Bakhtiari, and East Azarbaijan with an average of 2610 m³ ton⁻¹. Also, the lowest amount of virtual water (284-586 m³ ton⁻¹) can be seen in the provinces of Mazandaran, Hamedan, Golestan, Kordestan, Kohkiluyeh and Buyer Ahmad, some areas of South Khorasan, Markazi, Hormozgan, and Ilam with an average of 451 m³ ton⁻¹. The study showed that most of the areas under cultivation of wheat in Iran (about 53% of the irrigated wheat lands) are located in areas with water shortage crisis. The advantage of wheat cultivation in terms of water requirement and water use efficiency varies in different provinces. In terms of virtual water content, wheat cultivation is suitable in two provinces of Golestan and Ardabil, which relatively do not have water shortage problems and have low virtual water content of irrigated wheat. Khuzestan province also is preferable for wheat cultivation if the irrigation management is improved, due to the suitable climate and warm weather and the possibility of using winter rains in the growing season and quick ripening of the crop. But, wheat cultivation is not suitable in some regions of Iran, especially in the central and southeastern regions. The results of this study emphasize the necessity of optimal management of agricultural water resources and the strategic selection of areas under wheat cultivation based on the national cropping pattern from the aspect of advantage of production related to water requirements, water resource limitations, improving productivity and reducing virtual water content, reducing of crop wastes, and more attention on virtual water trade of wheat.

Keywords: Production, Water consumption, Water resources management, Water shortage

اثر خصوصیات سازه الیافی شیشه‌ای حصیری بر دقت حسگر بلوک متخلخل در پایش رطوبت خاک

مریم نوابیان^{۱*}، مصطفی جمشیدی اوانکی^۲

^{۱*}دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه گیلان و عضو وابسته گروه آب و محیط زیست پژوهشکده حوضه آبی دریای خزر دانشگاه گیلان، گیلان، ایران.

^۲استادیار گروه مهندسی نساجی، دانشکده فنی دانشگاه گیلان، گیلان، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۱۰

چکیده

اطلاع از وضعیت رطوبت خاک می‌تواند تاثیر بسزایی بر برنامه‌ریزی آبیاری و در نتیجه مدیریت آب بخش کشاورزی به عنوان بزرگ‌ترین مصرف‌کننده آب به همراه داشته باشد. اندازه‌گیری رطوبت خاک به روش بلوک متخلخل مبتنی بر مقاومت‌سنجی جریان برق از جمله روش‌های اندازه‌گیری رطوبت است که توسعه دانش ساخت آن می‌تواند گام موثری در کاهش هزینه، افزایش دقت و سهولت اندازه‌گیری رطوبت و در نتیجه مدیریت مصرف آب کشاورزی باشد. هدف از این پژوهش، بررسی خصوصیات الیاف شیشه‌ای حصیری بر دقت اندازه‌گیری رطوبت خاک به روش بلوک متخلخل است. در این راستا، از دو الیاف P186 و P200 در ساخت بلوک مبتنی بر سازه الیافی استفاده گردید و دقت اندازه‌گیری رطوبت توسط آن در ۱۰ بافت خاک در سه تکرار بررسی شد. برای ارزیابی دقت بلوک‌ها، رطوبت اندازه‌گیری شده توسط آن‌ها با روش رطوبت وزنی مقایسه و شاخص‌های آماری R^2 ، RMSE، nRMSE، MAE و D-index محاسبه شدند. نتایج نشان داد که بلوک‌های ساخته شده با هر دو الیاف دقت قابل قبول در اندازه‌گیری رطوبت خاک دارند ($R^2=0.7-0.98$ ، $RMSE=0.05-0.07$ ، $nRMSE=16-20\%$ ، $MAE=0.05-0.06$ و $D-index=0.94-0.95$) اما الیاف P200 با خطای حدود ۵ درصد، دقت بیشتری به دست داده است. این بلوک‌ها در بافت خاک متوسط با حداقل و حداکثر شن به ترتیب ۲۰ و ۷۰ درصد و حداکثر رس ۳۰ درصد، نسبت به سایر بافت‌ها دقت بیشتری ($RMSE<0.06$) نشان دادند. دقت بلوک‌ها در حد بالای رطوبت خاک کاهش یافت به طوری که در محدوده دقت ۷ درصد قرار نگرفت. بنابراین، استفاده از آن‌ها برای دامنه رطوبت خاک ۴۰-۲۵ درصد وزنی پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: بافت خاک، تراکم الیاف، حسگر رطوبتی، خیس‌شدگی الیاف

مقدمه

مصرف‌کننده منابع آب است. کشاورزی عامل تضمین تولید غذا در جهان است که با افزایش جمعیت و محدودیت منابع، توسعه پایدار و توجه به استفاده بهینه و حفاظت از منابع مورد نیاز آن ضروری است. آب، خاک و عوامل موثر بر فتوسنتز از عوامل موثر بر عملکرد بخش کشاورزی است به طوری که گزارش شده است با آبیاری کردن زمین‌های تحت کشت به میزان ۲۰ درصد، تولید مواد غذایی تا ۴۰ درصد افزایش داشته است (World Bank, 2022). در دنیا به طور متوسط ۷۲ درصد آب در بخش کشاورزی مصرف می‌شود در

بروز و تداوم خشکسالی‌ها، کاهش میزان بارش‌ها و به تبع آن کاهش میزان رواناب، افت قابل توجه منابع آب زیرزمینی و خشک شدن تالاب‌ها از مصادیق بروز بحران‌های شدید آب در جهان است که در این بین کشور ایران شرایط سخت‌تری را نیز می‌گذراند. تغییرات اقلیمی شامل کاهش باران، افزایش دما و تبخیر محدودیت‌های منابع آب ایران را تشدید می‌کند (Rafiei-Sardooi, 2022). محدودیت منابع آب تاثیر بسزایی بر کشاورزی دارد که اصلی‌ترین

بودن دقت مطلوب به دلیل هزینه کمتر و قابلیت نصب آسان توصیه می‌شوند (Ghanadzadeh, et al., 2009). بلوک‌های متخلخل از مواد متخلخل و الکتروود تشکیل شده‌اند و براساس قانون رسانایی جریان برق، رطوبت خاک را برآورد می‌کنند. بلوک‌ها پس از قرار گرفتن در خاک با آن تبادل رطوبتی برقرار می‌کنند و هم‌رطوبت با خاک می‌شوند. از این‌رو، با اندازه‌گیری رطوبت بلوک می‌توان رطوبت خاک را بیان کرد. تاکنون از گچ، ترکیب گچ و سیمان و الیاف شیشه‌ای (فایبرگلاس) به‌عنوان ماده متخلخل بلوک استفاده شده است (Werner, 2002). یزدانی کچویی (Yazdani, 1996) با مقایسه روش‌های بلوک‌های گچی با روش مستقیم وزنی در مزرعه‌ای با بافت تقریباً یکنواخت نشان داد که رطوبت اندازه‌گیری شده با بلوک گچی حدود دو درصد با رطوبت اندازه‌گیری شده با روش وزنی تفاوت دارد. کیهانی (Keyhani, 2001) نشان داد که تفاوت اندازه‌گیری بین بلوک گچی معمولی و اصلاح شده بر اساس دمای خاک، متأثر از عمق کارگذاری بلوک در خاک از ۶/۵ تا ۲/۴ درصد متغیر است و با افزایش عمق کارگذاری از میزان خطا کاسته می‌شود. اسماعیلی‌زاده و نیشابوری (Esmailzadeh & Nayshapori, 2201) توانستند با ارتقای طراحی و ساخت بلوک‌های گچی با استفاده از افزایش الکتروود، کارگذاری تصحیح کننده دما و افزایش بازه مقاومت‌سنجی بلوک، محدوده قرائت رطوبت خاک را از ۲۰-۴/۵ به ۲۶-۲/۵ درصد افزایش دهند. قنادزاده و همکاران (Ghanadzadeh et al., 2009) ساختمان مختلف بلوک گچی شامل گچ کشته، گچ نیمه‌کشته، معمولی و ترکیبی از گچ و سیمان را برای تعیین رطوبت خاک ارزیابی کردند و نشان دادند بلوک گچی از جنس گچ و سیمان در بافت خاک لوم رسی دقت بالاتری (جذب آب بیشتر و تغییرات یکنواخت رطوبت) برای اندازه‌گیری رطوبت خاک دارد. نتایج بررسی‌ها همچنین نشان داد هر چه فاصله بین الکتروودها بیشتر باشد

حالی‌که در ایران این میزان بیش از ۹۰ درصد است (FAO, 2017). با توجه به راندمان کل آبیاری گزارش شده در بازه زمانی سال‌های ۱۳۹۵ تا ۱۴۰۰ (۵۷/۲ درصد) (Abbasi & Abbasi, 2024)، مقادیر قابل توجهی از منابع آب بدون استفاده در مزرعه هدر می‌رود و بعضاً مخاطرات محیط‌زیستی را افزایش می‌دهد. مدیریت آب در مزرعه از طریق تعیین مقدار و زمان مناسب آبیاری می‌تواند بر راندمان سامانه‌های آبیاری و افزایش کارایی مصرف آب اثر بسزایی داشته باشد. برای مثال، رجا و همکاران (Raja, et al., 2019) گزارش کردند که بهبود راندمان آبیاری در دو منطقه درودزن و کربال استان فارس به‌ترتیب منجر به صرفه‌جویی در مصرف آب به میزان ۱۱/۲ و ۱۰/۸ درصد شده است. در آمریکا نیز گزارش شده است که بهبود ۳۰-۶ درصد در راندمان سامانه آبیاری می‌تواند کاهش ۱۱-۶ درصد در مصرف آب در بخش کشاورزی را به دنبال داشته باشد (Wang, 2019). اندازه‌گیری پیوسته و بروز رطوبت خاک نقش موثری در تعیین مقدار و زمان آبیاری و در نتیجه مدیریت مصرف آب و افزایش کارایی آن دارد. از این‌رو دستیابی به روش‌های دقیق اندازه‌گیری رطوبت خاک مورد توجه است. روش‌های مختلفی از جمله روش وزنی (Campbell & Mulla, 1990)، بلوک‌های متخلخل (McCann et al., 1992; Spaans & Baker, 1992)، حسگرهای خازنی (Leib, 1998; Leib et al, 2002)، تانسیمتری (Prichard et al., 2004) و پخش نوترونی (Charlesworth, 2005) برای اندازه‌گیری رطوبت خاک وجود دارد اما اغلب آن‌ها گران‌قیمت‌اند و در قرائت عمق و تعداد نقاط محدودیت دارند و برای سلامت انسان زیانبارند. روش وزنی دقیق‌ترین روش اندازه‌گیری رطوبت خاک است اما زمان‌بر بودن و نیاز به نمونه‌برداری از محدودیت‌های آن به شمار می‌آید. از این‌رو روش‌های غیرمستقیم مانند حسگرهای رطوبتی و بلوک‌های متخلخل در صورت دارا

دلیل استفاده از گچ در بلوک‌های متخلخل، میزان تخلخل و حالت کریستالی آن است که عامل انتقال موثرتر رطوبت است (Coleman & Hendrix, 1949). بلوک گچی بیش از شش دهه است که در کشاورزی استفاده می‌شود (Bouyoucos *et al.*, 1940) اما دما و میزان شوری خاک، پدیده پسماند، اندازه بلوک و عمق نصب آن بر نتایج آن تاثیر می‌گذارد. علاوه بر این، بلوک گچی به تغییرات مکش در خاک مرطوب در کمتر از 30 کیلوپاسکال حساس نیست و به خصوص در خاک‌های اسیدی حل می‌شود و در خاک‌های شنی دقت لازم را ندارد (Ghanadzadeh *et al.*, 2009). اما بلوک‌های فایبرگلاس به دلیل مناسب بودن قیمت، در دسترس بودن، استحکام کششی و انعطاف‌پذیری بالا، مقاومت شیمیایی و حرارتی بالا می‌توانند گزینه‌ای مناسب‌تر باشند (Aram & Meysami, 2010).

بررسی مطالعات پیشین نشان داد که بلوک‌های متخلخل نتایج قابل قبولی در اندازه‌گیری رطوبت خاک دارند. اما محدودیت‌های بلوک‌های متخلخل گچی و سهولت کاربرد و هزینه کم بلوک‌های متخلخل فایبرگلاس نسبت به دیگر روش‌های اندازه‌گیری رطوبت خاک (Ansari & Hassanpour, 2015)، از دلایل مهم تلاش برای ارتقای دانش ساخت بلوک‌های متخلخل هستند. از آنجا که بلوک‌های مبتنی بر غشا مانند بلوک‌های با الیاف شیشه‌ای حصیری در ایران در دسترس نیستند، در این پژوهش، بررسی اثر ویژگی‌های الیاف شیشه‌ای در ساخت بلوک متخلخل مبتنی بر سازه‌های الیافی (غشا) برای دستیابی به حسگر با دقت بیشتر در اندازه‌گیری رطوبت خاک مد نظر قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

بلوک‌های متخلخل حسگرهایی هستند که بر اساس رسانایی یا مقاومت جریان برق، رطوبت خاک را اندازه‌گیری می‌کنند. در این پژوهش، برای افزایش دقت بلوک‌های متخلخل در اندازه‌گیری رطوبت و رفع محدودیت‌های بلوک

عدد مقاومت خوانده شده مربوط خواهد بود به حجم بیشتری از بلوک و اندازه‌گیری نیز دقیق‌تر است، هرچند افزایش دقت ایجاد شده معنی‌دار به دست نیامد.

بای و همکاران (Bai *et al.*, 2013) نشان دادند اگرچه ویژگی‌های فیزیکی بلوک متخلخل بر هدایت الکتریکی تاثیرگذار است اما خصوصیات خاک شامل درصد تراکم خاک (جرم مخصوص ظاهری) و تعداد تر و خشک شدن خاک نیز بر روند مقادیر هدایت الکتریکی موثر است به طوری که با افزایش تراکم خاک، دقت بلوک افزایش می‌یابد و بعد از چهار مرحله خشک و تر شدن خاک تغییرات هدایت الکتریکی کاهش خواهد یافت. رادنیک و همکاران (Rudnick *et al.*, 2015) بلوک گچی Watemark 200SS را در خاک رسی لومی در مقایسه با حسگر خازنی Delta-T PR1- capacitance توصیه کردند. مروج‌الاحکامی و باغشاهی (Moravejalahkami & Baghshahi, 2020) یک حسگر بلوک گچی را طراحی و دقت برآورد رطوبت خاک را با حسگر شرکت Watemark در بافت‌های خاک لوم رسی شنی، لومی و رس سیلتی ارزیابی کردند و نشان دادند حسگر Watemark در بافت خاک لومی و لوم رسی شنی قادر به برآورد نسبتاً دقیق رطوبت وزنی خاک است. در حالی که در بافت خاک رس سیلتی هر دو حسگر دقت مناسبی در برآورد رطوبت خاک ندارند. در این پژوهش مقدار $nRMSE$ در بافت خاک لومی، لوم رسی شنی و رس سیلتی به ترتیب ۲۵/۹، ۲۱/۹ و ۳۶/۳ و ۳۸/۴ درصد در سنسور طراحی شده گزارش شد. همچنین، مقدار MAE در حسگر Watemark به میزان ۲/۶، ۱/۶ و ۳/۹ و در حسگر طراحی شده به میزان ۲/۸، ۱/۲ و ۶/۲ به ترتیب در بافت خاک‌های لومی، لوم رسی شنی و رس سیلتی به دست آمد. در پژوهشی دیگر، دقت بلوک گچی با روش وزنی اندازه‌گیری رطوبت خاک مقایسه و نتایج نشان داد که میانگین اختلاف میان روش وزنی با روش‌های بلوک گچی ۶/۳ درصد است (Ezekiel *et al.*, 2021).

با جنس گچ، بلوک متخلخلی در دانشگاه گیلان شامل دو الکترود پیچیده شده با ۱۰ سانتی‌متر الیاف مورد نظر و جاسازی شده در قالب مشبک مکعبی به ابعاد 4×3 سانتی‌متر و ضخامت ۶ میلی‌متر ساخته شد (شکل ۱). از آنجا که الیاف شیشه‌ای حصیری قابلیت خوبی در انعطاف‌پذیری و عایق حرارت دارند، از این الیاف برای ساخت بلوک مبتنی بر سازه الیافی استفاده شد. خصوصیات غشا بر عملکرد بلوک تاثیرگذار است، از این رو دو نوع ساختمان بافت مختلف از الیاف شیشه‌ای موجود در ایران که تراکم متفاوتی داشتند بررسی شدند (جدول ۱). برای ارزیابی عملکرد دو الیاف انتخاب شده با یک نمونه خارجی، از یک بلوک با الیاف شیشه‌ای ساخت شرکت ELE International استفاده شد که با نام اختصاری ELE در این مقاله از آن ذکر می‌شود (شکل ۲). تراکم بافت عبارت است از تعداد نخ‌های تار یا پود در واحد طول که معمولاً به صورت تعداد در ۱۰ سانتی‌متر در جهات تار یا پود بیان می‌شود که تعداد نخ تار در عرض غشا، تراکم عرضی و تعداد نخ پود در طول غشا،

تراکم طولی نامیده می‌شوند. از ویژگی‌های مهم بلوک‌های متخلخل در اندازه‌گیری رطوبت خاک، خیس‌شدگی و انتقال آب در هنگام قرار گرفتن بلوک در خاک است و این‌که تبادل و تعادل رطوبتی بین خاک و بلوک به درستی صورت گیرد. ارزیابی صعود کاپیلاری در الیاف شیشه‌ای یکی از معیارهای تشخیص میزان تمایل الیاف به خیس‌شدگی است که با آزمایش فیتله‌ای قابل اندازه‌گیری است. در این آزمایش طول ۱۵ سانتی‌متری از الیاف انتخاب و داخل محلول رنگی (ERIONYL BRILLIANT BLUE RL 200%) نگه‌داشته شد. پس از آن روند صعود محلول رنگی در هر یک از الیاف نسبت به زمان ثبت شد. شکل (۳) میزان صعود محلول رنگی در الیاف‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد. برای بررسی روند کاهش رطوبت بلوک متناسب با کاهش رطوبت خاک، ۱۰ سانتی‌متر از الیاف به مدت ۴۸ ساعت اشباع کردن در آب مقطر، در آون با دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد و در زمان‌های مختلف وزن الیاف اندازه‌گیری شد.



شکل ۱- شمایی از الیاف و الکتروود (سمت راست)، بلوک متخلخل (وسط) و رسانایی‌سنج طراحی شده (سمت چپ)
Fig.1- Schematic of the fibers and electrode (right), the porous block (middle), and the designed conductivity meter (left)

اثر خصوصیات سازه الیافی شیشه‌ای حصیری بر دقت حسگر بلوک متخلخل در پایش رطوبت خاک



شکل ۲- شمایی از تراکم الیاف شیشه‌ای حصیری مورد استفاده در پژوهش (به ترتیب از سمت راست P200, P186 و ELE)
Fig. 2 - Schematic of the density of glass mat fibers used in the research (from the right P200, P186 and ELE respectively)

جدول ۱- برخی ویژگی‌های مهم الیاف‌های مورد بررسی

Table 1- Some of important properties of fibers used in the research

ردیف	کد نمونه	نوع الیاف	ساختمان بافت	تراکم طولی (1/cm)	تراکم عرضی (1/cm)	وزن واحد سطح (g/m ²)
۱	P200		Plain	۸	۸	۲۰۰
۲	P186	شیشه	Plain	۲۰	۲۴	۱۸۶
۳	ELE		Plain	۱۲	۱۲	۱۷۵





شکل ۳- میزان صعود محلول رنگی در الیاف P200 (الف)، P186 (ب) و ELE (ج)

Fig. 3- The rate of dye solution capillary in P200 (a), P186 (b) and ELE (c) fibers

استخراج معادلات کالیبراسیون و ارزیابی دقت معادلات استفاده شدند. برای بیان دقت بلوک‌ها در اندازه‌گیری رطوبت، تقسیم شاخص‌های ضریب تبیین (R^2)، ریشه میانگین مجذور خطا (RMSE)، ریشه میانگین مجذور خطای نرمال شده ($nRMSE$)، شاخص توافق ویلموت ($D-index$) و میانگین خطای مطلق (MAE) به دست آمدند. روابط (۱) تا (۵) به ترتیب این آمارها را نشان می‌دهند.

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

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

$$nRMSE = \frac{RMSE}{\bar{O}} \times 100 \quad (3)$$

$$D-index = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (4)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |P_i - O_i|}{n} \quad (5)$$

در این روابط: P_i مقادیر تخمین زده شده، O_i مقادیر مشاهده‌ای، $\bar{O}$ میانگین مقادیر مشاهده‌ای و n تعداد کل مشاهدات است. آماره R^2 نسبت پراکندگی را بین مقادیر تخمین زده شده و مشاهداتی نشان می‌دهد که مقدار بیشتر

با توجه به تخلخل خاک، ارتباط خاک و بلوک و انتقال رطوبت بین این دو محیط می‌تواند متأثر از بافت خاک باشد، از این رو دقت بلوک‌های ساخته شده در بافت‌های مختلف خاک بررسی شد. برای ارزیابی بلوک‌های ساخته شده، نمونه خاک از اطراف شهرستان رشت تهیه شد. برای حصول اطمینان از بافت خاک، آزمایش هیدرومتری روی نمونه‌ها صورت گرفت. با توجه به بافت خاک‌های به دست آمده، دقت بلوک‌ها در ۱۰ بافت خاک شنی لومی، لوم، لوم شنی رسی، شنی، لوم رسی، لوم سیلتی رسی، لوم شنی، رسی، رسی سیلتی و لوم سیلتی ارزیابی شد.

برای ارزیابی دقت بلوک‌های ساخته شده در بافت‌های مختلف خاک، نمونه‌های خاک پس از هوا خشک شدن، کوبیدن و گذراندن از الک دو میلیمتری، در گلدان‌های به قطر ۲۰ و ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر ریخته و بلوک‌ها در عمق ۸ سانتی‌متری کار گذاشته شدند. بدین منظور از الیاف انتخاب شده (P200 و P186) سه بلوک برای جلوگیری از خطای ساخت بلوک، در گلدان استفاده شد. پس از اشباع شدن خاک گلدان، هر روز با تغییر رطوبت خاک، رسانایی بلوک‌ها قرائت و رطوبت خاک به روش وزنی اندازه‌گیری شد که دقیق‌ترین روش اندازه‌گیری رطوبت خاک است (Rasheed et al., 2022). در هر بافت خاک‌ها، داده‌ها به دو سری برای

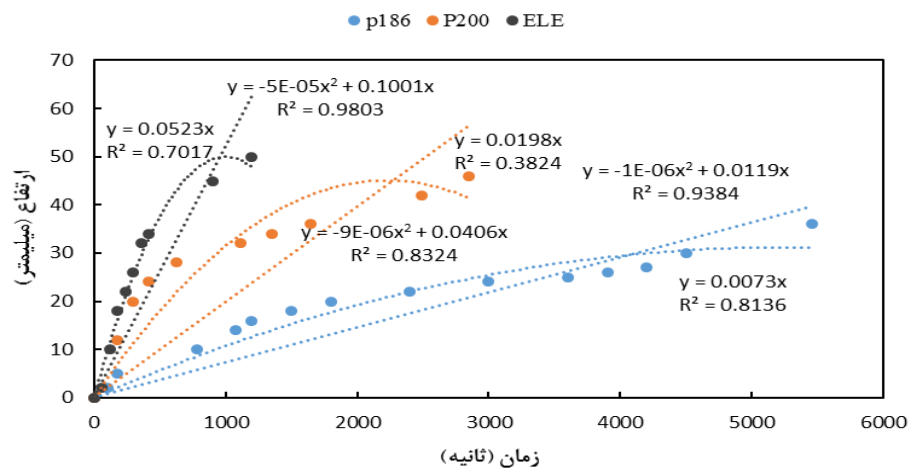
از ۰/۷، ۰/۵-۰/۷ و ۰/۳-۰/۵ آن به ترتیب بیان‌کننده همبستگی خوب، متوسط و ضعیف بین داده‌هاست (Ozili, 2023). به‌منظور بیان میزان تفاوت بین مقادیر مشاهده‌شده و شبیه‌سازی از RMSE استفاده می‌شود که کمتر بودن این شاخص بیان‌گر شبیه‌سازی بهتر مدل است (Savage, 1993). جامیسون و همکاران (Jamieson et al., 1991) روشی برای برآورد خطا پیشنهاد دادند که در آن میانگین مربعات خطا به‌عنوان درصدی از میانگین مشاهدات است که با nRMSE نمایش داده می‌شود. زمانی که این پارامتر در محدوده کمتر از ۱۰ درصد باشد نشان‌دهنده کارایی عالی، بین ۱۰ تا ۲۰ درصد بیان‌گر کارایی بسیار خوب، بین ۲۰ تا ۳۰ درصد بیان‌کننده کارایی متوسط و در بیشتر از ۳۰ درصد نیز نشان‌دهنده ضعیف بودن توانایی مدل در شبیه‌سازی است. این محدوده‌ها در بررسی‌های بنایان و هوگنبوم (Bannayan & Hoogenboom, 2009) تأیید گردید. شاخص آماری توافق ویلموت (D-index) براساس اندازه پراکندگی بین داده‌هاست. محدوده این شاخص بین صفر و یک است که ۰/۱-۰/۲ توافق جزئی، ۰/۲-۰/۴ توافق نسبتاً خوب، ۰/۴-۰/۶ توافق متوسط، ۰/۶-۰/۸ توافق قابل توجه، ۰/۸-۰/۹۹ توافق نزدیک به کامل و عدد ۱ توافق کامل را بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی نشان می‌دهد (Willmott, 1982). MAE میانگین مطلق خطا را نشان می‌دهد و هر چه مقدار این آماره به صفر نزدیک‌تر باشد، بهتر است به طوری که مقدار کمتر از ۰/۱ آن وضعیت خوب و بالای ۰/۵ دقت نامناسب را نشان می‌دهد (Lewis, 1982).

نتایج و بحث

نتیجه روند خیس‌شدگی و رفتار فتیل‌های الیاف در برابر محلول رنگی در شکل (۴) نشان داده شده است. در این شکل مشخص است که هر دو الیاف نسبت به زمان در جذب محلول روند صعودی را طی کرده‌اند اما روند افزایش جذب در P200 سریع‌تر از P186 است به طوری که در زمان‌های مشابه اندازه‌گیری ۱۸۰ و ۳۰۰۰ ثانیه روند جذب محلول به

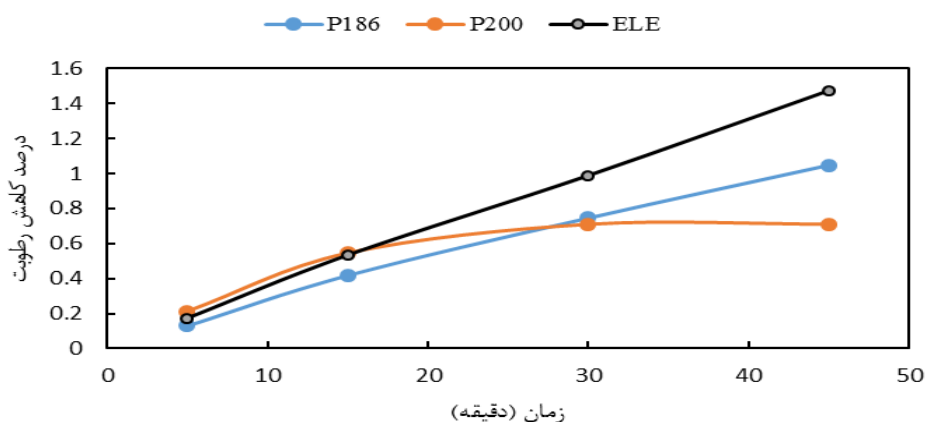
ترتیب در P200، ۱/۴ و ۲ برابر بیشتر نسبت به P186 به دست آمد. نتایج بررسی‌ها نشان داد که الیاف شیشه‌ای ELE نسبت به دو الیاف P200 و P186 در زمان مشابه ۱۸۰ ثانیه به ترتیب ۲/۶ و ۰/۵ برابر بیشتر آب را جذب کرده است. مقایسه نوع منحنی برازشی بر رفتار فتیل‌های دو الیاف نشان می‌دهد که منحنی درجه دوم نسبت به خط می‌تواند برازش بهتری را ایجاد کند. نتایج تحقیق همچنین نشان می‌دهد در P200 پس از حدود ۶۳۰ ثانیه و در P186 پس از حدود ۱۸۰ ثانیه، شیب افزایش جذب محلول کاهش می‌یابد. روند تغییر شیب در الیاف P200 پس از ۶۳۰ ثانیه اول با شیب تقریباً ثابت صعودی به دست آمد در حالی که شیب افزایشی در P186 پس از ۲۴۰۰ ثانیه مجدد ملایم‌تر شد. بنابراین به نظر می‌رسد الیاف P200 در جذب محلول و متعاقب آن آب محیط خاک می‌تواند موفق‌تر عمل کند و در خصوص سرعت رسیدن به تعادل رطوبتی باخاک موثرتر واقع شود. مقایسه شیب صعودی دو الیاف P200 و P186 با ELE نشان می‌دهد الیاف P200 در خصوص جذب آب رفتار نزدیک‌تری با الیاف ELE دارد. شکل (۵) روند خشک شدن الیاف‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است دو الیاف ELE و P200 تا ۱۵ دقیقه اول کاملاً روند کاهشی یکسانی را در رطوبت طی کرده‌اند اما بعد از ۱۵ دقیقه میزان کاهش رطوبت در P200 با شیب کمتری ادامه یافته و پس از ۳۰ دقیقه تغییر محسوسی در کاهش رطوبت نداشته است. با توجه به نبود تفاوت معنی‌دار درصد کاهش رطوبت بین زمان‌های ۴۵ و ۳۰ دقیقه، می‌توان دریافت که الیاف تقریباً به وزن خشک اولیه‌اش برگشته است. این در حالی است که الیاف P186 با تفاوت به طور میانگین ۲۵ درصد کمتر، رفتار مشابه با الیاف ELE داشته‌است و پس از گذشت ۴۵ دقیقه هر دو الیاف به وزن خشک اولیه نرسیدند. رفتار مشابه الیاف ELE در زمان‌های اولیه و از دست دادن سریع‌تر رطوبت، می‌تواند بیان‌کننده رفتار بهتر الیاف در هنگام کاهش رطوبت خاک باشد که در الیاف P200 مشاهده شد.

شکل (۶) مقادیر شاخص‌های آماری ارزیابی دقت بلوک ساخته شده با الیاف P200 را در اندازه‌گیری رطوبت خاک نشان می‌دهد. مطابق شکل، معیار R^2 نشان داد که در بافت خاک‌های شنی لومی، لوم، لوم شنی، رسی و رسی سیلتی بین داده‌های اندازه‌گیری شده رطوبت خاک به دو روش بلوک و وزنی همبستگی خوبی وجود دارد. میزان خطای میان مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده به دو روش وزنی و بلوک با سه شاخص nRMSE، MAE و D-index مشخص می‌شود. شاخص nRMSE با توجه به طبقه‌بندی جانیسون و همکاران (Jamieson et al., 1991) نشان می‌دهد که در



شکل ۴- میزان صعود محلول رنگی در الیاف‌های مورد بررسی

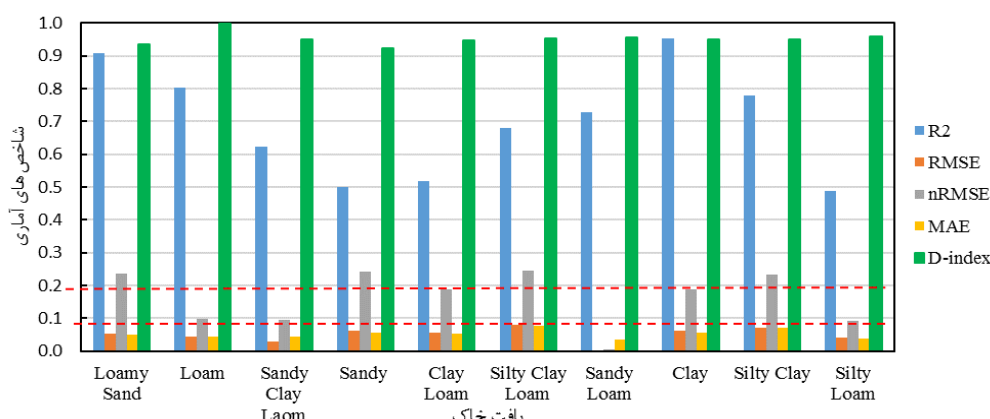
Fig. 4- Dye solution capillary value in fibres used in the research



شکل ۵- روند از دست دادن رطوبت در الیاف‌های مورد بررسی

Fig. 5 - Moisture loss trend in the fibers used in the research

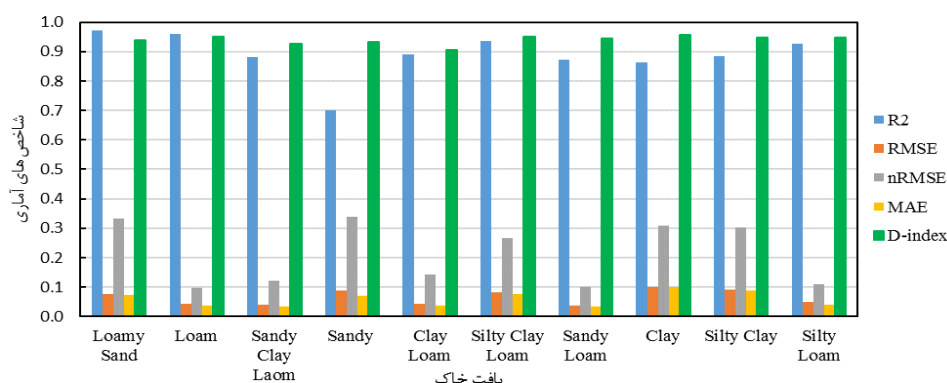
اثر خصوصیات سازه الیافی شیشه‌ای حصیری بر دقت حسگر بلوک متخلخل در پایش رطوبت خاک



شکل ۶- مقادیر شاخص‌های آماری در ارزیابی دقت اندازه‌گیری رطوبت خاک در روش بلوک متخلخل با الیاف P200 و وزنی

Fig. 6- Values of statistical indexes in evaluating the accuracy of soil moisture measurement in the porous block with P200 fibers and gravimetric method

شکل (۷) مقادیر شاخص‌های آماری ارزیابی دقت بلوک ساخته شده با الیاف P186 در اندازه‌گیری رطوبت خاک را نشان می‌دهد. طبق شکل، معیار R^2 نشان داد که به غیر از بافت Sandy در بقیه بافت خاک‌ها، بین داده‌های اندازه‌گیری شده رطوبت خاک به دو روش بلوک و وزنی همبستگی خوبی وجود دارد. شاخص nRMSE با توجه به طبقه‌بندی جامیسون و همکاران (Jamieson et al., 1991) نشان می‌دهد که در بافت خاک‌های لوم شنی و لوم دقت دارد.



شکل ۷- مقادیر شاخص‌های آماری در ارزیابی دقت اندازه‌گیری رطوبت خاک در روش بلوک متخلخل با الیاف P186 و وزنی

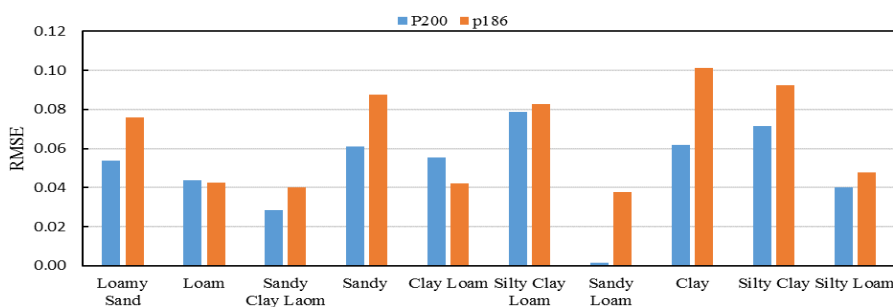
Fig. 7- Values of statistical indexes in evaluating the accuracy of soil moisture measurement in the porous block with P186 fibers and gravimetric method

از آنجا که شاخص‌های آماری هم‌واحد با پارامتر مورد بررسی (RMSE و MAE) برای نشان دادن خطا در اندازه‌گیری بیان بهتری دارند و به دلیل تبعیت مقادیر خطای محاسبه شده در شاخص‌های RMSE و MAE از توزیع نرمال، مقادیر شاخص آماری RMSE در بافت خاک‌های مختلف برای دو الیاف P200 و P186 در شکل (۸) نشان داده شده است. به طور میانگین، بلوک ساخته شده با الیاف P200 رطوبت خاک را با خطای ۵ درصد و بلوک ساخته شده با

تغییرات کم رطوبت در الیاف (شکل ۵)، به نظر می‌رسد بیش از ظرفیت خیس‌شدگی الیاف، آب وارد بلوک می‌شود. مروج‌الاحکامی و باغشاهی (Moravejalahkami & Baghshahi 2020) نشان دادند که بلوک گچی طراحی شده در بافت خاک لومی و لوم رسی شنی قادر به برآورد نسبتاً دقیق رطوبت خاک است در حالی که در بافت خاک رس سیلتی به دلیل تبادل دیر هنگام رطوبت، دقت مناسبی در برآورد رطوبت خاک ندارد.

میانگین شاخص‌های آماری در بافت خاک‌های مورد بررسی در شکل (۱۰) آمده است. بر اساس نتایج تمام میانگین شاخص‌های آماری محاسبه شده، استفاده از الیاف P200 در ساخت بلوک متخلخل، نسبت به الیاف P186، منجر به دقت بیشتری در اندازه‌گیری رطوبت خاک شده است. مطابق با طبقه‌بندی جامیسون و همکاران (Jamieson *et al.*, 1991)، الیاف P200 منجر به ساخت بلوک متخلخل با درجه دقت خوب (۱۰ تا ۲۰ درصد) در اندازه‌گیری رطوبت خاک شد در حالی که در الیاف P186 درجه دقت در حد متوسط (۲۰ تا ۳۰ درصد) به دست آمد. ارزیابی شاخص توافق ویلموت نشان می‌دهد که هر دو الیاف توافق تقریباً کامل بین مقادیر رطوبت خاک در دو روش بلوک و وزنی دارند. شاخص R^2 نشان داد که در الیاف P200 همبستگی خوبی بین مقادیر رطوبت خاک اندازه‌گیری شده در دو روش وجود دارد. ازکیل و همکاران (Ezekiel *et al.*, 2021) نشان دادند میانگین اختلاف میان روش وزنی با روش‌های بلوک گچی، تانسئومتر و حسگر طراحی شده به ترتیب ۶/۳، ۳/۹۵ و ۳/۰۲ درصد است.

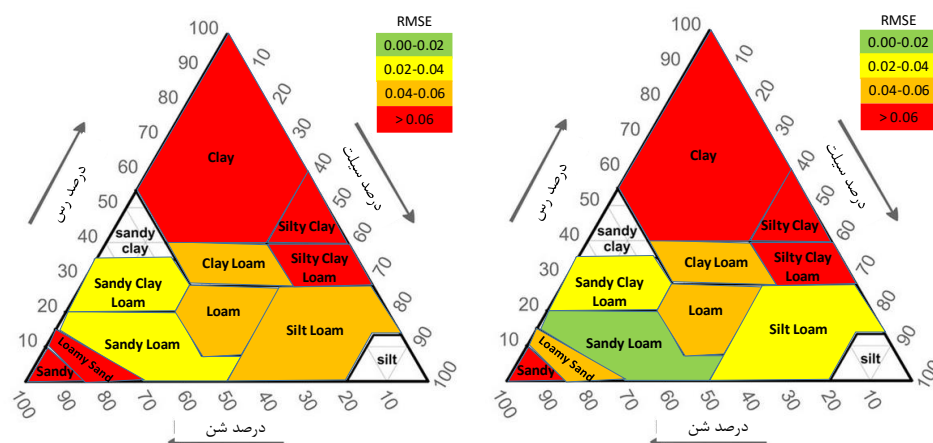
الیاف P186 رطوبت خاک را با خطای ۶/۵ درصد نسبت به روش وزنی اندازه‌گیری کرده‌اند. مقایسه RMSE در بافت خاک‌های مختلف نشان می‌دهد که به غیر از بافت خاک لوم رسی (که تفاوت RMSE آن در دو روش حدود ۲۴ درصد بیشتر است)، در سایر بافت خاک‌ها، بلوک ساخته شده با الیاف P200 دقت بیشتری نسبت به الیاف P186 دارد اگرچه در بافت خاک‌های لوم و لوم سیلتی رسی، دقت دو بلوک بسیار نزدیک به هم است. در بافت خاک لوم شنی تفاوت دو بلوک ساخته شده با دو الیاف بسیار زیاد است به طوری که بلوک ساخته شده با الیاف P200 حدود ۲۲ برابر رطوبت خاک را اندازه‌گیری کرده است. شکل (۹) دقت بلوک‌های متخلخل ساخته شده با دو الیاف را در مثلث بافت خاک نشان می‌دهد. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد دقت دو الیاف در بافت خاک متوسط بیشتر است تا در دیگر بافت‌های خاک. در الیاف P186 بیشترین دقت در بافت خاک با مقدار شن در دامنه ۷۰-۵۰ درصد و میزان رس کمتر از ۳۵ درصد به دست آمده است. در الیاف P200، علاوه بر دامنه مقدار شن و رس ذکر شده در الیاف P186، در دامنه مقدار شن ۵۰-۲۰ درصد و میزان رس کمتر از حدود ۲۸ درصد نیز دقت مناسبی به دست می‌آید. مطابق با نتایج، در بافت خاک‌های با مقادیر رس یا شن بالا، الیاف P200 و P186 دقت بالایی در اندازه‌گیری رطوبت خاک ندارند. به نظر می‌رسد در خاک دارای مقادیر بالای رس، به دلیل ظرفیت بالای نگهداری آب در خاک، انتقال آب به الیاف داخل بلوک و خیس‌شدگی آن کند است. در خاک‌های با مقادیر بالای شن، به دلیل بالاتر بودن آب قابل دسترس خاک و با توجه به درصد



شکل ۸- شاخص آماری RMSE در بافت خاک‌های مورد بررسی

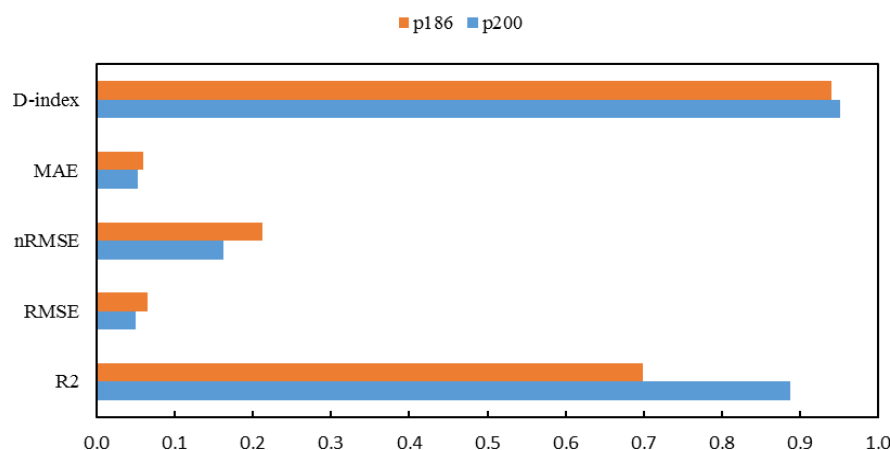
Fig. 8- RMSE statistical index in the soil texture of the research

اثر خصوصیات سازه الیافی شیشه‌ای حصیری بر دقت حسگر بلوک متخلخل در پایش رطوبت خاک



شکل ۹- شاخص آماری RMSE اندازه‌گیری رطوبت خاک در بلوک‌های ساخته شده با الیاف P200 (سمت راست) و الیاف P186 (سمت چپ) در مثلث بافت خاک

Fig. 9 - RMSE statistical index of soil moisture measurement in blocks with P200 fibers (right) and P186 fibers (left) in the soil texture triangle



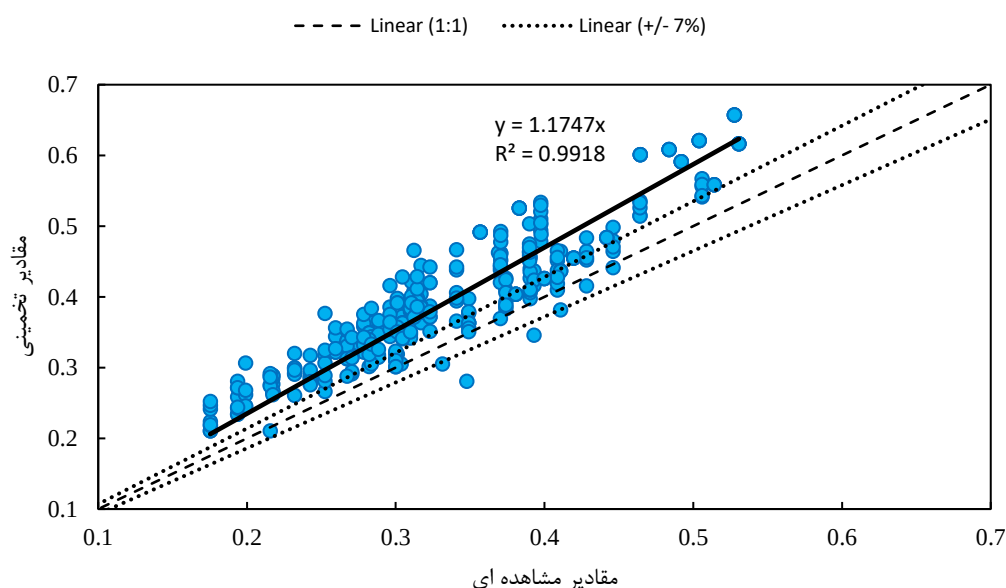
شکل ۱۰- میانگین شاخص‌های آماری برای ارزیابی دقت اندازه‌گیری رطوبت خاک در دو الیاف P186 و P200

Fig. 10- Average statistical index for evaluating the accuracy of soil moisture measurement in two fibers P200 and P186

روش وزنی، انتظار خطا وجود دارد. ناندی و شرستا (Nandi and Shrestha, 2024) نشان دادند که حسگرهای مقاومتری خطای ۴/۸، ۴/۴ و ۳/۸ درصد در بافت خاک‌های به ترتیب متوسط، ریز و درشت دارند. بر اساس نتایج شکل (۱۱) و نزدیکی نقاط به خط یک به یک می‌توان گفت در دامنه رطوبت ۲۵-۴۰ درصد وزنی، نتایج اندازه‌گیری رطوبت در بلوک به مقادیر رطوبت در روش وزنی نزدیک‌تر است و استفاده از بلوک در این گستره رطوبتی قابل توصیه است. با توجه روند تغییرات نسبت به زمان در شکل‌های (۴) و (۵)، به نظر می‌رسد فرآیند خیس‌شدگی (در هنگام بیشتر بودن

مقادیر اندازه‌گیری شده رطوبت خاک به روش بلوک‌های متخلخل ساخته شده و وزنی در شکل (۱۱) نشان داده شده است. مطابق با شکل، در اغلب اندازه‌گیری‌های رطوبت خاک به روش بلوک مقادیر رطوبت بالای خط یک به یک است و بنابراین بیشتر از مقدار رطوبت وزنی به دست آمده است. این مسئله می‌تواند به دلیل وجود املاح در محلول خاک و تاثیر بر رسانایی یا مقاومت جریان قرائت شده توسط بلوک باشد. اگرچه میزان بیش‌برآورد رطوبت مطابق شکل (۱۱) و شاخص‌های آماری به نظر قابل قبول می‌رسد زیرا در هر روش غیرمستقیم اندازه‌گیری رطوبت نسبت به

رطوبت خاک از رطوبت بلوک) و از دست دادن آب (در زمان خشک شدن خاک) الیاف در بازه رطوبتی ذکر شده در شرایط مناسبی نباشد. مروج‌الاحکامی و باغشاهی (Moravejalahkami & Baghshahi, 2020) گزارش کردند، حسگر طراحی شده در رطوبت‌های کمتر از ۵۰ درصد کل آب قابل دسترس قادر به تخمین نسبتاً دقیق رطوبت خاک است. این در حالی است که حسگر طراحی شده و نیز حسگر Watermark در رطوبت‌های بیشتر از حد زراعی تخمین دقیقی از رطوبت خاک ندارند. قائمی و رحمانی ثقیه (Ghaemi & Rahmani Soghayeh, 2014) نشان دادند که تانسیومتر و حسگرهای Watermark 200ss و Watermark 200ss-v در مکش‌های بالا، نسبت به مکش‌های پایین، اندازه‌گیری دقیق‌تری از مقدار رطوبت خاک را نشان می‌دهند.



شکل ۱۱ - مقایسه رطوبت خاک در دو روش وزنی و بلوک متخلخل ساخته شده با الیاف P200 و P186

Fig. 11 - Comparison of soil moisture in two gravimetric and porous blocks with P200 and P186 fibers methods

نتیجه‌گیری

اغلب به صورت بیش‌برآورد بود. استفاده از الیاف P200 نسبت به P186 منجر به ساخت بلوک متخلخل با خطای کمتر در اندازه‌گیری رطوبت خاک شد. دقت اندازه‌گیری رطوبت توسط بلوک‌های طراحی شده در بافت خاک متوسط نسبت به بافت‌های رسی و شنی بیشتر بود. با توجه به نتایج به‌دست آمده، استفاده از بلوک‌های طراحی شده برای اندازه‌گیری رطوبت خاک در پروژه‌های آبیاری به‌خصوص در مزارع دارای بافت خاک متوسط قابل توصیه است. برای دستیابی به بلوک‌های مبتنی بر سازه الیاف با دقت بالاتر، توصیه می‌شود دیگر الیاف موجود در بازار ایران نیز آزمایش شوند و اثر آن‌ها بر بهبود دقت بلوک‌ها ارزیابی شود.

در این پژوهش اثر ویژگی‌های الیاف شیشه‌ای حصیری بر امکان ساخت بلوک‌های متخلخل و بهبود دقت آن‌ها در اندازه‌گیری رطوبت خاک بررسی شد. الیاف P200 و P186 با توجه به تفاوت در تراکم تار و پود انتخاب و دقت آن‌ها در به‌کارگیری ساخت بلوک متخلخل در ده بافت خاک مختلف ارزیابی شد. نتایج تحقیق نشان داد که فرآیند خیس‌شدگی و از دست دادن رطوبت در الیاف مورد بررسی بر رفتار بلوک تاثیر دارد. مقادیر شاخص‌های آماری نشان داد که بلوک‌های ساخته شده با هر دو الیاف دقت قابل قبولی در اندازه‌گیری رطوبت خاک دارند. مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده با بلوک

تقدیر و تشکر

این مقاله برگرفته از نتایج طرح به شماره قرارداد ۲۵۵۶۸۴۲ با پژوهشکده حوضه آبی دریای خزر دانشگاه گیلان است. بدین وسیله از حمایت‌های آن پژوهشکده محترم تقدیر می‌شود.

مراجع

- Abbasi, F., & Abbasi, N. (2024). An analysis of irrigation efficiencies over time in Iran. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*. 6(17): 1025-1033. (In Persian)
- Ansari, H., & Hassanpour, M. (2015). Design and construction of REC-P55 for reading of soil moisture, temperature and salinity. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*. 1(9): 32-43. (In Persian)
- Aram, M., & Meysami, H. (2010). Concrete with fiber, a method for producing high strength concrete shell. *Concrete Research*. 3(1): 51-59. (In Persian)
- Bai, W., Kong, L., & GuoState, L. (2013). Effects of physical properties on electrical conductivity of compacted lateritic soil *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 5: 406-411.
- Bannayan, M., & Hoogenboom, G. (2009). Using pattern recognition for estimating cultivar coefficients of a crop simulation model. *Field crops research*. 111(3): 290-302.
- Bouyoucos, G.J., & Mick, A.H. (1940). *An electrical resistance method for the continuous measurement of soil moisture under field conditions*. Bull. 172. Michigan Agric. Exp. Stn., East Lansing. Physical and mineralogical methods. 2nd ed. SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison, WI.
- Campbell, G.S., & Mulla, D.J. (1990). Measurement of soil water content and potential. Chapter 6 In Stewart B.A. and Nielsen D.R. (co-editors). *Irrigation of Agricultural Crops. American Society of Agronomy. Madison, USA*. 127-142.
- Charlesworth, P. (2005). Soil Water Monitoring, Irrigation Insights No. 1, Second Edition. Coelho E.F. and D. Or. 1996. Flow and uptake patterns affecting soil water sensor placement for drip irrigation management. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*. 39(6): 2007-2016.
- Coleman, E.A., & Hendrix, T.M. (1949). The fiberglass electrical soil- moisture instrument. *Soil Science*. 67: 425-438.
- Esmailzadeh, M., & Nayshapori, M. R. (2001). Design, manufacture and increase the efficiency of gypsum blocks for determining soil moisture. *Agricultural Sciences and Natural Resources*. 8(3): 3-11. (In Persian)
- Ezekiel, O., Danbaki, B.A., & Fabumi, G.T. (2021). Performance evaluation of gypsum block, tensiometer and moisture sensor for soil moisture content determination. *Journal of Agricultural Engineering and Technology*. 26 (2): 103-111.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2017). Water for Sustainable Food and Agriculture. A report produced for the G20 Presidency of Germany. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*, 33 pages.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2017a). Water Scarcity – One of the Greatest Challenges of Our Time. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. (Accessed 15 March 2023).
- Ghaemi, A.A. & Rahmani Soghayeh, J. (2014). Investigation the Performance of Smart Sensors as a New Approach to Determine Soil Moisture Content. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*. 1(8): 16-25. (In Persian)
- Ghanadzadeh, M. A. Davari, K. & Ghahraman, B. (2009). Evaluation of some different types of gypsum blocks for determination of soil moisture. *Journal of Iranian Water Research*. 2 (2): 23-32. (In Persian)

- Jamieson, P.D., Porter, J.R., & Wilson, D.R. (1991). A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. *Field Crops Research*. 27 (4): 337-350.
- Keyhani, A. (2001). Development of Mini-Gypsum Blocks for Soil Moisture Measurement and their Calibration to Compensate for Temperature. *Journal of Agricultural Science Technology*. 3: 141-145.
- Leib, B.G. (1998). *The 1998 survey of irrigation scheduling providers*. The Washington Irrigator News Letter. Washington State University. Prosser, WA.
- Leib, B.G., Hattendorf, M., Elliott, T. & Matthews, G. (2002). Adoption and of 1998. Agric. Water Manage. 55:105–120. Adaptation of Scientific Irrigation Scheduling: Trend from Washington, USA as of 1998. *Agriculture Water Management*. 55: 105–120.
- Lewis, C. D. (1982). *Industrial and business forecasting methods*, London: Butterworths.
- McCann, I.R., Kincaid, D.C & Wang, D. (1992) Operational characteristics of the Watermark model 200 soil water potential sensor for irrigation management. *Applied Engineering in Agriculture*. 8 (5): 605- 609.
- Moravejalahkami, B. & Baghshahi, M. (2020). Feasibility study of the construction and evaluation of a soil moisture sensor in different soil textures. *Iran-Water Resources Research*. 16(1): 135-145. (In Persian)
- Nandi, R., & Shrestha, D. (2024). Assessment of Low-Cost and Higher-End Soil Moisture Sensors across Various Moisture Ranges and Soil Textures. *Sensors*. 24 (5886): 1-13.
- Ozili, P.K. (2023). The acceptable R-square in empirical modelling for social science research. MPRA Paper No. 115769. Online at <https://mpra.ub.uni-muenchen.de/115769/>
- Prichard, T., Hanson, B., Schwankl, L., Verdegaa, P., & Smith, R. (2004). Deficit irrigation of quality wine grapes using micro-irrigation techniques. University of California Cooperative Extension, PP. 91.
- Rafiei-Sardooi, E., Azareh, A., Joorabian Shooshtari, S., & Parteli, E.J.R. (2022). Long-term assessment of land-use and climate change on water scarcity in an arid basin in Iran *Ecol. Model*. 467, Article 109934.
- Raja, O. Parsinejad, M. & Sohrabi, T. (2019). Evaluation of management strategies to reduce water use in Marvdasht-Kharameh study area. *Journal of Water and Soil Recourses Conservation*. 8 (4): 67-85. (In Persian)
- Rasheed, M.W., Tang, J., Sarwar, A., Shah, S., Saddique, N., Khan, M. U., Imran Khan, M., Nawaz, S., Shamshiri, R. R., Aziz, M., & Sultan. M. (2022) .Soil Moisture Measuring Techniques and Factors Affecting the Moisture Dynamics: A Comprehensive Review. *Sustainability*. 14 (1153): 1-23.
- Rudnick, D. R., Djaman, K., & Irmak, S. (2015). Performance analysis of capacitance and electrical resistance type soil moisture sensors in a silt loam soil. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. 58 (3): 649-665.
- Savage, M. J. (1993). Statistical aspects of model validation. In a workshop on the field water balance in the modeling of cropping systems. University of Pretoria, South Africa.
- Spaans, E.J.A., & Baker, J.M. (1992). Calibration of Watermark soil moisture sensors for soil matric potential and temperature. *Plant and Soil*. 143: 213-217.
- Wang, H. (2019). Irrigation efficiency and water withdrawal in US agriculture. *Water Policy*. 21: 768–786.
- Werner, H. (2002). Irrigation Management: using electrical resistance blocks to measure soil moisture. College of Agriculture & Biological Sciences publications page, which is at <http://agbiopubs.sdstate.edu/articles/FS899.pdf>.
- Willmott, C. J. (1982). Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 63 (11): 1309-1313.
- Yazdani Kachouei, M. (1996). Comparison of methods for measuring soil moisture in the field. (M. Sc. Thesis), Faculty of Agriculture, Department of Water Engineering and Management, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. (In Persian)

Original Research

Effect of fiber-based Sensors Structure on Block Sensor in soil Moisture monitoring performance

M. Navabian*, M. Jamshidi Avanaki

***Corresponding Author:** Associated Prof. of Water Eng. Dep., Agricultural Sciences Faculty, University of Guilan and and Dept. of Water Eng. and Environment, University of Guilan. Rasht, Iran

Received: 1 January 2025, **Accepted:** 29 January 2025

Email: Navabian@guilan.ac.ir

https://doi.org/ 10.22092/IDSER.2025.368179.1605

Abstract

Knowledge of soil moisture status can significantly impact irrigation planning and, consequently, water management in the agricultural sector, which is the most expensive recipient of water resource allocation. Soil moisture measurement using the porous block method, based on electrical resistance measurement, is one of the techniques for assessing moisture levels. Developing an understanding of its construction can effectively reduce costs, increase accuracy, simplify moisture measurement, and achieve these goals. This study aims to enhance the understanding of soil moisture measurement through the development and assessment of porous blocks constructed with glass mat fibers, specifically P200 and P186 types.

Materials and Methods

In this regard, two types of glass fibers, P200 and P186, were used in the construction of a block with a fibrous structure. The accuracy of moisture measurement was then evaluated in 10 different soil textures. To prepare the soil, it was dried, pounded, and passed through a 2-mm sieve before being placed into a pot. After installing three replicates of each block in the pot, the soil was saturated. At various intervals until the soil dried, the electrical resistance of the block and the soil moisture were measured using the gravimetric method. To assess the accuracy of the blocks, the moisture readings from the blocks were compared with those obtained from the gravimetric method, and statistical indices such as R^2 (coefficient of determination), RMSE (root mean square error), nRMSE (normalized root mean square error), MAE (mean absolute error), and D-index (index of agreement) were calculated.

Results and Discussion

The results showed that ELE glass fibers absorbed 2.6 and 0.5 times more water than P200 and P186 fibers, respectively, over 180 seconds. A comparison of the fitting curves for the wicking behavior of the two fibers indicates that the quadratic curve provides a better fit than the linear curve. Additionally, the results showed that solution absorption in P186 decreased earlier than in P200. Therefore, it appears that P200 fibers are more effective at absorbing the solution and, subsequently, the water from the soil environment. The results also indicated that ELE and P200 fibers exhibited a similar decreasing trend in moisture over the first 15 minutes; however, after that point, the moisture reduction rate in P200 continued at a lower slope. P200 fibers demonstrated behavior more akin to ELE fibers during both moisture reduction and solution absorption. The findings reveal that the porous blocks constructed with P200 fibers achieved superior accuracy in measuring soil moisture, yielding an error margin of approximately 5%. Notably, the findings indicate that the P186 and P200 fibers exhibit optimal accuracy in medium soil textures, outperforming their performance in other soil types. Specifically, the P186 fibers achieve their highest accuracy in soil textures characterized by a sand content between 50-70% and clay content below 35%. Similarly, the P200 fibers also demonstrate robust accuracy within the same sand and clay content ranges, but they extend their effectiveness to include soils with sand content ranging from 20-50% and clay content around 28%. Conversely, the results

suggest that both P200 and P186 fibers struggle with accuracy in soil textures that exhibit either high clay or high sand content. This highlights the importance of soil composition in the performance of these fibers for measuring soil moisture, indicating that they are less reliable in extreme soil conditions. Furthermore, the study highlighted a decline in measurement accuracy at elevated soil moisture levels, indicating that these blocks are most effective within a soil moisture range of 25-40% by weight.

Conclusion

In conclusion, this research underscores the potential of utilizing glass mat fibers in the construction of porous blocks to improve soil moisture measurement accuracy. By refining this methodology, the findings contribute valuable insights toward optimizing irrigation practices and advancing water management strategies in agriculture. Enhanced accuracy in moisture readings not only promotes efficient water usage but also supports sustainable agricultural practices, ultimately benefiting food production and environmental conservation efforts.

Keywords: Fiber Density, Moisture Sensor, Soil Texture, Wetting of Fiber

<https://doi.org/10.22092/IDSER.2025.368179.1605>

Email: Navabian@guilan.ac.ir

نگارنده مسئول:



© 2023, The Author(s). Published by [Agricultural Engineering Research Institute](#). This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

ارزیابی راهکارهای کاهش تقاضا برای آبیاری و سازگاری با کم آبی در استان فارس

عبدالرحمان میرزائی^۱، افشین سلطانی^۲، فریبرز عباسی^۳، ابراهیم زینلی^۴، شهرزاد میرکریمی^۵^۱ گروه زراعت، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.^{۲*} گروه زراعت، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.^۳ استاد، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.^۴ گروه زراعت، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.^۵ گروه اقتصاد کشاورزی، دانشکده مدیریت کشاورزی، دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۱۹

چکیده

سازگاری با کم آبی یکی از چالش‌های اصلی کشاورزی در ایران است. هدف از این مطالعه، ارزیابی ظرفیت صرفه‌جویی آب در بخش کشاورزی آبی استان فارس با استفاده از (۱) بهینه‌سازی الگوی کشت، (۲) کاربرد سایبان در باغ‌ها و مزارع تولید سبزی و صیفی، (۳) کاربرد مالچ‌کشی در باغ‌ها و مزارع، (۴) تغییر نظام کشت غرقابی به هوازی برنج و (۵) انتقال تولیدات سبزی و صیفی از مزرعه به گلخانه است. برای این منظور از سامانه حسابداری آب (SAWA) برای کشاورزی آبی استان فارس استفاده شد. حجم آب آبیاری کاربردی (خالص) در کشاورزی استان برای شرایط کشاورزان (نه شرایط پتانسیل و مطلوب) در الگوی کشت فعلی ۴۶۱۹ میلیون متر مکعب در سال برآورد و بهینه‌سازی الگوی کشت باعث کاهش ۳۵ درصد از این حجم آب شده است. استفاده از مالچ‌کشی در الگوی کشت فعلی و بهینه به ترتیب ۸ و ۱۰ درصد، کاربرد سایبان به ترتیب ۲۹ و ۲۴ درصد و استفاده از نظام کشت هوازی برنج، به جای غرقابی، به ترتیب ۴ و ۱ درصد حجم آب کاربردی کشاورزان را کاهش می‌دهد. انتقال تولیدات سبزی و صیفی از مزرعه به گلخانه در هر دو الگوی کشت فعلی و بهینه توانست حجم آب آبیاری کاربردی کشاورزان را ۴ درصد کاهش دهد. نتایج بررسی‌ها نشان داد که ترکیب راهکارها در الگوی کشت فعلی و بهینه می‌تواند به ترتیب ۶۶ و ۴۸ درصد صرفه‌جویی در حجم آب آبیاری کاربردی کشاورزان استان ایجاد کند. پیشنهاد می‌شود که محققان، سیاست‌گذاران و بهره‌برداران بخش کشاورزی با ارزیابی و مطالعات تکمیلی به سمت رفع موانع و گسترش استفاده از این راهکارهای ارزشمند و دوست‌دار محیط‌زیست حرکت کنند.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی الگوی کشت، مالچ‌کشی، سایبان، کشت هوازی برنج.

مقدمه

کشور ۶۲ میلیارد مترمکعب در سال است (Ministry of

Energy, 2019). از سوی دیگر، حجم آب قابل برنامه‌ریزی برای کشاورزی کشور بر اساس رعایت استانداردهای بین‌المللی و پایداری در کشاورزی برابر با ۳۸/۵ میلیارد مترمکعب در سال است (Soltani et al., 2019). بنابراین، تا حد مد نظر وزارت نیرو و پایدار به ترتیب ۳۰ و ۵۰ درصد اضافه برداشت آب در بخش کشاورزی کشور وجود دارد که

اضافه برداشت آب به اصلی‌ترین عامل تهدید کننده تولیدات کشاورزی آبی تبدیل شده است (Matteau et al., 2022). مقدار برداشت کنونی از منابع آب برای بخش کشاورزی ایران حدود ۷۲ میلیارد مترمکعب در سال است (Naseri et al., 2017). این درحالی است که حجم آب قابل بهره‌برداری اعلام شده توسط وزارت نیرو برای کشاورزی

آب مصرفی را کاهش دهد. شفیعی و همکاران (Shafiee et al., 2023) با ارزیابی اقتصادی، مالی و زیست‌محیطی کاربرد سایبان در باغ‌های پسته در شهرستان‌های انار و رفسنجان در استان کرمان نشان دادند کاربرد سیستم پیشنهادی سایبان در بیش از ۶۰ درصد از باغ‌های پسته این دو شهرستان در نرخ تنزیل ۲۰ درصد اقتصادی خواهد بود. مطالعات متعدد نشان داده است که کاربرد سایبان در باغ‌ها و مزارع می‌تواند مصرف آب آبیاری را کاهش دهد (Bassett et al., 2017). استفاده از مالچ‌کشی (کشاورزی حفاظتی) در مزارع و باغ‌های سبب کاهش رواناب و تبخیر از سطح خاک می‌شود و در نتیجه نیاز به آب آبیاری مزارع را کاهش می‌دهد. جوردن و همکاران (Jordán et al., 2010) نشان دادند که استفاده از مالچ کاه و کفش گندم در سطح ۵، ۱۰ و ۱۵ تن در هکتار به ترتیب ۱/۱، ۱/۲۵ و ۱/۲۵ برابر آب قابل دسترس خاک را افزایش می‌دهد و در نتیجه نیاز به آب آبیاری مزرعه کاهش پیدا می‌کند. پژوهش‌های دیگر نیز نشان داده‌اند که کاربرد مالچ‌کشی در کاهش مصرف آب در مزارع تأثیر مثبت دارد (Foroughifar & Pourkasemani, 2003; Rezvani Moghaddam et al., 2013; Paravar, 2003; Jin et al., 2009; Cai et al., 2015; Eslami & Farzamnia, 2009; Akhtar et al., 2019). سلطانی و همکاران (Soltani et al., 2020) گزارش کردند که ۶۴ درصد از برداشت آب آبی در استان گلستان به کشت غرقابی برنج اختصاص داده شده است. کشت غرقابی برنج مصرف آب بالایی دارد و تبدیل کشت غرقابی به هوازی می‌تواند تا حجم زیادی از آب کاربردی مزارع استان را کاهش دهد. سلطانی و همکاران (Soltani et al., 2024) طی مطالعه‌ای نشان دادند که تبدیل کشت غرقابی به هوازی برنج می‌تواند بین ۲۲ تا ۵۰ درصد حجم آب آبیاری مزارع را کاهش دهد اما

برای توقف آن باید گام‌هایی برداشته شود. به عبارت دیگر، با استفاده از راه‌کارهای مناسب باید میزان برداشت آب را در بخش کشاورزی کشور کاهش داد و کشاورزی را با کم‌آبی سازگار کرد.

برخی از مهم‌ترین راه‌کارها برای کاهش نیاز آبیاری در مزارع و باغ‌ها و در نتیجه کاهش برداشت آب برای کشاورزی عبارت‌اند از: (۱) بهینه‌سازی الگوی کشت^۱، (۲) استفاده از سایبان در باغ‌ها و مزارع تولید سبزی‌وصیفی، (۳) استفاده از مالچ‌کشی در باغ‌ها و مزارع، (۴) تبدیل کشت غرقابی به هوازی برنج، (۵) انتقال تولیدات سبزی‌وصیفی از مزرعه به گلخانه (توسعه کشت گلخانه‌ای).

سلطانی و همکاران (Soltani et al., 2024) با بررسی نقش بهینه‌سازی الگوی کشت در کاهش مصرف آب آبیاری استان گلستان نشان دادند که با شرط تغییرنیافتن درآمد کشاورزان و لحاظ کردن تعدادی از معیارهای پایداری در کشاورزی، بهینه‌سازی الگوی کشت می‌تواند تا ۴۱ درصد از حجم آب آبیاری را کاهش دهد. مطالعات متعدد دیگر نیز نشان داده‌اند که بهینه‌سازی الگوی کشت می‌تواند مصرف آب را در مقیاس‌های مختلف (از مزرعه تا سطح کشور) کاهش دهد (Osama et al., 2017; Ye et al., 2018; Chouchane et al., 2020). کاربرد سایبان در باغ‌ها و مزارع برای جلوگیری از زیان پرتو زیاد مثل آفتاب سوختگی پیشنهاد شده است (Møller et al., 2023). سایبان‌ها در رنگ‌های مختلف ارائه می‌شوند و درجه‌هایی از پرتوهای خورشیدی را عبور می‌دهند و در دسترس گیاه قرار خواهند داد. سایبان با کاهش عبور پرتوهای خورشیدی می‌تواند سبب کاهش تبخیر-تعرق و تعدیل دمای زیرسایبان شود و در نتیجه نیاز به آب آبیاری را کاهش دهد (Møller et al., 2023). عجمی و همکاران (Ajmi et al., 2018) در پژوهشی نشان دادند که کاربرد سایبان می‌تواند تا ۳۰ درصد حجم

¹ Cropping pattern optimization

یکپارچه پیشین نیز تنها برای یکی از این راهکارها بوده است نه این تعداد راهکار که هر یک جداگانه و ترکیب با یکدیگر ارزیابی گردد. در اینجا باید اشاره شود که این مطالعه زیربنای مطالعات بعدی برای کاربرد این روش‌ها است. به عبارت دیگر، در مطالعه حاضر ظرفیت کاهش آب آبیاری کاربردی استان برای هر یک از این روش‌ها برآورد شده و برای کاربرد این روش‌ها نیاز به مطالعات تکمیلی است. این ارزیابی بر اساس استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی گیاهی است که بر اساس شرایط مزارع کشاورزان واسنجی شده است؛ این مورد نیز از نقطه قوت مطالعه حاضر است. در مطالعه حاضر مبنای تصمیم‌گیری جهت ارزیابی راهکارهای کاهش تقاضا برای آبیاری در استان فارس، حجم آب آبیاری کاربردی (خالص) در شرایط مزارع کشاورزان است که توسط میرزائی و همکاران (Mirzaei et al., 2024b) با استفاده از سامانه SAWA (Mirzaei et al., 2024a) برآورد شده است. اغلب مطالعات مشابه که با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی گیاهی مثل Cropwat انجام شده است که برآوردها را برای شرایط مطلوب رشد یا پتانسیل ارائه می‌کند که به شرایط مزارع کشاورزان نزدیک نیستند.

مواد و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه در پژوهش حاضر استان فارس است که در جنوب غربی ایران واقع شده و یکی از بزرگ‌ترین تولیدکنندگان محصولات کشاورزی در ایران است. بر اساس آخرین آمار منتشر شده، استان فارس از لحاظ سطح زیرکشت محصولات زراعی و باغی به ترتیب رتبه دوم و چهارم کشور را داراست (Ministry of Agriculture-Jihad, 2024). تولیدات کشاورزی این استان حدود ۱۳ میلیون تن در سال است و ۱۲ درصد تولیدات کشاورزی کشور را تشکیل می‌دهد (Ministry of Agriculture-Jihad, 2024).

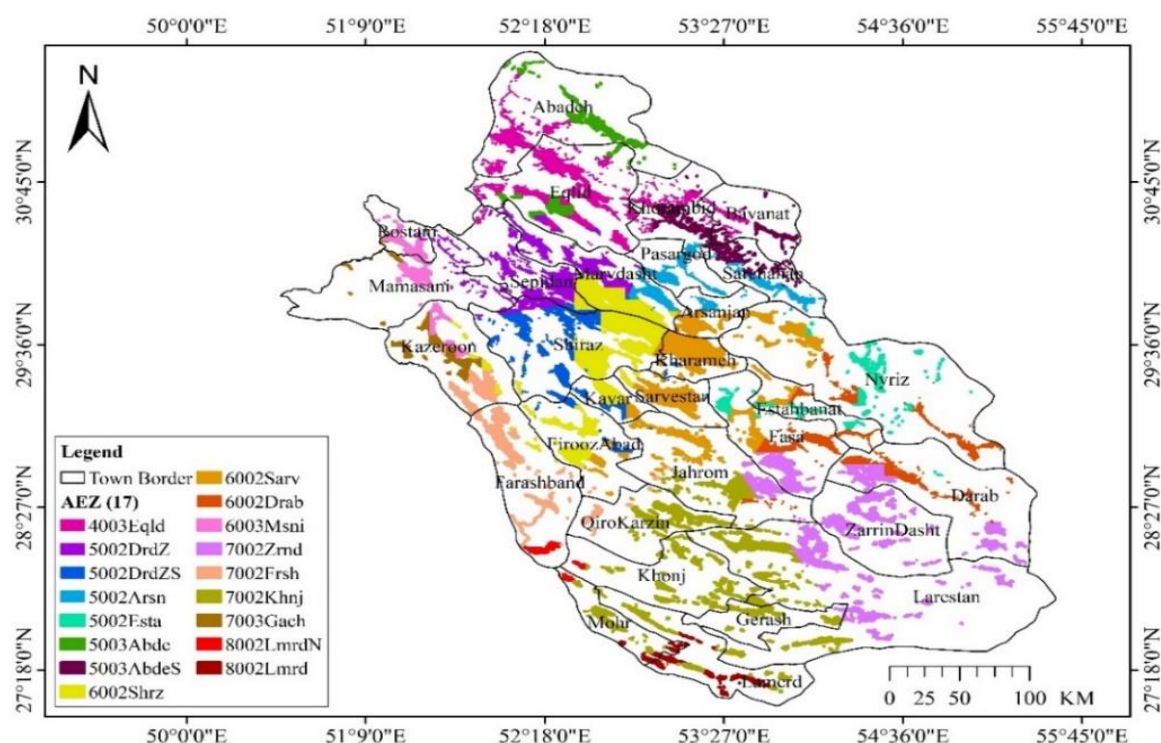
عمکرد را بین ۹ تا ۳۱ درصد کاهش می‌دهد. تولیدات گیاهی در شرایط گلخانه، در مقایسه با شرایط مزرعه، به آب کمتری نیاز دارد و دلیل آن رطوبت نسبی بالا در گلخانه و کاهش تبخیر-تعرق است (Chacha et al., 2023). سیزیک و همکاران (Czyzyk et al., 2014) با مقایسه مصرف آب کشت گلخانه‌ای با مزرعه‌ای در کنیا و کامرون نشان دادند مصرف آب در گلخانه‌ها در حدود ۵۰ تا ۹۰ درصد کمتر است تا در مزارع. مطالعات دیگری نیز حاکی از آن است که در کشت گلخانه‌ای، نسبت به کشت مزرعه، آب کمتری مصرف می‌شود (Naseri, 2019; Khoshkam & Saei, 2011).

هدف مطالعه حاضر بررسی ظرفیت صرفه‌جویی آب در بخش کشاورزی استان فارس با استفاده از بهینه‌سازی الگوی کشت، استفاده از سایبان در باغ‌ها و مزارع تولید سبزی‌وصیفی، استفاده از مالچ‌کلیش (کشاورزی حفاظتی) در باغ‌ها و مزارع، تبدیل کشت غرقابی به هوازی برنج و انتقال تولیدات سبزی‌وصیفی از مزرعه به گلخانه (توسعه کشت گلخانه‌ای)، به تنهایی و نیز در ترکیب با یکدیگر است که تا کنون ارزیابی جامع مشابهی نشده است. در بالا بیان شد این راهکارها پیش از این در مطالعات متعددی ارزیابی و نتایج به صورت مختصر آورده شده‌اند، اما اینکه مطالعه‌ای در سطح یک استان به صورت یکپارچه (نه یک منطقه، شبکه، دشت یا حوضه آبریز) برای همه گیاهان (نه چند گیاه محدود) و برای شرایط مزارع کشاورزان (نه شرایط پتانسیل رشد) باشد، در کشور سابقه ندارد و از این رو می‌توان مطالعه‌ای دارای نوآوری دانست، مطالعه‌ای که می‌تواند راهکارهای مختلف صرفه‌جویی آب در استان را کنار هم مقایسه کند. بسیاری از مطالعات پیشین راهکارها را برای مثال برای یک گیاه یا یک منطقه یا بر اساس شرایط پتانسیل ارزیابی کرده‌اند یعنی سطح مطالعه بزرگ (استان) نبوده و برای تعداد زیادی از گیاهان نیز نبوده است یا چندین راهکار صرفه‌جویی آب به صورت یکپارچه و در کنار هم مقایسه نشده‌اند. حتی مطالعات

روش‌شناسی مطالعه

سامانه، ارزیابی راهکارهای سازگاری با کم‌آبی است. برای این منظور در سامانه SAWA زمین‌های کشاورزی استان فارس بر پایه ویژگی‌های خاک و اقلیم به ۱۷ پهنه آگرواکولوژیک تقسیم‌بندی شده (شکل ۱) که مشخصات آنها در جدول (۱) آورده شده است.

به منظور ارزیابی راهکارهای سازگاری با کم‌آبی، از سامانه استانی بیلان و حسابداری آب (SAWA^۱) استفاده شد که پیش از آن میرزائی و همکاران (Mirzaei et al., 2024a,b) تهیه و ارزیابی کرده بودند. یکی از مهم‌ترین کاربردهای این



شکل ۱- پهنه‌بندی آگرواکولوژیک زمین‌های کشاورزی آبی به دست آمده که بیش از ۹۰ درصد زمین‌های کشاورزی آبی استان را پوشش می‌دهد. هر رنگ نشان‌دهنده یک پهنه آگرواکولوژیک است که با کد ۸ یا ۹ حرفی مشخص شده است.

Fig. 1 - Agroecological zoning (AEZ) of irrigated agricultural lands was obtained, covering more than 90 percent of the irrigated agricultural lands of the province. Each color represents an agroecological zone, which is identified by an 8- or 9-letter code.

¹ System for regional Agricultural Water balance and water Accounting

ارزیابی راهکارهای کاهش تقاضا برای آبیاری و سازگاری با کم آبی در استان فارس

جدول ۱- مشخصات پهنه‌های آگرواکولوژیک شناسایی شده که بیش از ۹۶ درصد زمین‌های کشاورزی آبی استان را در خود جای داده است (توضیحات بیشتر در مورد کدهای اقلیم و خاک به ترتیب به van Wart *et al.*, 2013 و Koo & Dimes, 2013 رجوع شود). ۴ درصد باقی‌مانده از سطح کل زمین‌های کشاورزی است که توسط سامانه پوشش داده نشده است.

Table 1 - Characteristics of the identified agroecological zones that cover more than 96 percent of the province's irrigated agricultural lands (For further details on climate and soil codes, see van Wart *et al.*, 2013 and Koo & Dimes, 2013, respectively.). The remaining 4 percent of the total agricultural land area is not covered by the system.

سطح کشت در پهنه		کد خاک Soil code	کد اقلیم Climate code	مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی نماینده					کد پهنه
آگرواکولوژیک	ارتفاع Elevation			عرض Latitude	طول Longitude	شناسه ID	نام Name	آگرواکولوژیک	
Cultivation area in the agroecological zone								Characteristics of representative meteorological stations	Agroecological zone code
(درصد) (%)	(هکتار) (ha)								
۱۵	123565	۵	۶۰۰۲	۱۴۸۴	۲۹/۵۴	۵۲/۶۰	۴۰۸۴۸	شیراز Shiraz	6002Shrz
۱۳	111254	۵	۶۰۰۲	۱۵۵۹	۲۹/۲۸	۵۳/۲۲	۹۹۵۹۷	سروستان Sarvestan	6002Sarv
۱۰	۸۸۳۵۲	۵	۷۰۰۲	۶۷۴	۲۷/۸۷	۵۳/۴۲	۹۹۶۳۸	خنج Khonj	7002Khnj
۱۰	۸۱۰۰۶	۵	۷۰۰۲	۱۰۲۹	۲۸/۳۷	۵۴/۴۳	۹۹۵۹۰	زرین‌دشت Zarrindasht	7002Zrnd
۹	۷۲۸۹۸	۵	۴۰۰۳	۲۳۰۰	۳۰/۸۷	۵۲/۶۸	۴۰۸۲۸	اقلید Eqlid	4003Eqld
۸	۶۹۰۹۸	۵	۵۰۰۲	۱۶۵۰	۳۰/۱۸	۵۲/۴۷	۴۰۸۴۴	درودزن Dorodzan	5002DrdZ
۶	۵۲۱۷۶	۱۷	۶۰۰۲	۱۰۹۸	۲۸/۷۹	۵۴/۳۰	۴۰۸۶۲	داراب Darab	6002Drab
۵	۴۵۰۳۴	۵	۵۰۰۲	۱۶۵۰	۳۰/۱۸	۵۲/۴۷	۴۰۸۴۴	درودزن Dorodzan	5002DrdZS
۴	۳۶۲۰۴	۱۷	۵۰۰۲	۱۷۰۳	۲۹/۹۴	۵۳/۲۸	۹۹۵۷۹	ارسنجان Arsanjan	5002Arsn
۴	۳۵۶۲۲	۵	۷۰۰۲	۷۸۲	۲۸/۸۱	۵۲/۱۲	۴۰۸۶۴	فرشبند Farashband	7002Frsh
۳	۲۲۰۹۶	۵	۵۰۰۳	۲۰۳۰	۳۱/۲۰	۵۲/۶۱	۴۰۸۱۸	آباده Abadeh	5003Abde
۲	۱۸۳۸۲	۱۷	۶۰۰۳	۹۷۲	۳۰/۰۸	۵۱/۵۴	۹۹۵۸۰	ممسنی Mamasani	6003Msni
۲	۱۴۸۱۹	۵	۷۰۰۳	۶۹۹/۵	۳۰/۳۰	۵۰/۸۰	۴۰۸۳۵	گچساران Gachsaran	7003Gach
۲	۱۴۱۲۵	۱۴	۵۰۰۲	۱۶۹۰	۲۹/۱۴	۵۴/۰۵	۹۹۶۰۷	استهبان Estahban	5002Esta
۲	۱۲۹۵۳	۵	۵۰۰۳	۲۰۳۰	۳۱/۲۰	۵۲/۶۱	۴۰۸۱۸	آباده Abadeh	5003AbdeS
۱	۸۸۹۵	۵	۸۰۰۲	۴۰۵	۲۷/۳۶	۵۳/۲۰	۸۸۱۹۰	لامرد Lamerd	8002Lmrd
۱	۴۹۰۴	۵	۸۰۰۲	۴۰۵	۲۷/۳۶	۵۳/۲۰	۸۸۱۹۰	لامرد Lamerd	8002LmrdN
۹۶	۸۱۱۳۸۳	-	-	-	-	-	-	کل Total	-

مدل شبیه‌سازی مورد استفاده

هسته مرکزی سامانه SAWA از یک مدل شبیه‌ساز گیاهی به نام SSM-iCrop2 تشکیل شده است که این مدل پیش‌تر در مطالعات متعددی در سطوح استانی، کشوری و بین‌المللی استفاده شده است (Dadrasi et al., 2020; Nehbandani et al., 2023; Soltani et al., 2020a,b; Mohammadi et al., 2022; Keramat et al., 2023; Pourshirazi et al., 2023; Mirzaei et al., 2024a,b; Jafarnodeh et al., 2024). این مدل به دلیل ساده‌بودن و منبع بازبودن^۱ این امکان را برای متخصصان مدل‌سازی گیاهی به وجود می‌آورد تا با تغییرات در کدها یا افزودن پارامترهای گیاهی آن را برای هدف‌های خاص تهیه کنند. بر همین اساس، میرزائی و همکاران (Mirzaei et al., 2024b) در ابتدا بر پایه داده‌های عملکرد (میانگین ۵ ساله ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۰: Agricultural Jihad Organization of Fars Province, 2023) مدل را برای ۳۵ گیاه مهم استان تحت شرایط کشاورزان واسنجی کردند، به‌طوری‌که عملکرد پیش‌بینی‌شده توسط مدل با مقادیر اندازه‌گیری‌شده در مطالعات مطابقت داشته باشد. این محققان سه پارامتر مدل را که بیش از دیگر پارامترها در شرایط کشاورز تحت تأثیر قرار می‌گیرند تغییر دادند. این پارامترها عبارت‌اند از LAI_{max} : حداکثر شاخص سطح برگ گیاه، IRUE: راندمان استفاده از تشعشع و HI_{max} : حداکثر شاخص برداشت. در مزارع کشاورزان آفات، بیماری‌ها و علف‌های هرزی که وجود دارند یا سطح برگ گیاه (زراعی یا باغی) را کاهش می‌دهند که در LAI_{max} دیده شده است، یا روی کلروفیل و یا کلروپلاست‌ها تأثیر منفی دارند که در شاخص IRUE دیده شده است، یا روی میوه و دانه‌ها تأثیر منفی می‌گذارند که در شاخص

HI_{max} دیده شده است. با تغییر این سه شاخص و واسنجی آن با عملکرد و آب آبیاری اندازه‌گیری شده واقعی در مزارع، مدل برای شرایط مزارع کشاورزان واسنجی گردید. برای شبیه‌سازی‌ها از آمار هواشناسی سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۱ استفاده شد. باید گفت عملکرد و حجم آب کاربردی شبیه‌سازی شده توسط مدل کالیبره شده در مقابل همین متغیرها در شرایط واقعی کشاورزان از مطابقت بالایی برخوردارند (برای جزئیات بیشتر به Mirzaei et al., 2024a,b; Soltani et al., 2022; Jafarnodeh et al., 2024 مراجعه شود). مدل حجم آب آبیاری کاربردی (خالص) را برای هریک از گیاهان در هریک از پهنه‌ها برآورد کرد. با استفاده از نرم‌افزار GIS سهم هریک از پهنه‌ها در استان مشخص گردید و بر اساس آن میانگین استانی حجم آب آبیاری کاربردی (خالص) در واحد سطح (هکتار) محاسبه شد (جدول ۲: این مقادیر میانگین حجم آب آبیاری کاربردی خالص برای کل استان است، طبیعتاً برای هر گیاه در هر پهنه عددی متفاوت است که در این‌جا آورده نشده است؛ برای جزئیات بیشتر در مورد نحوه محاسبه به Mirzaei et al., 2024a رجوع شود). سپس با تهیه یک فایل داشبورد در اکسل، با استفاده از میانگین ۵ ساله سطح زیرکشت کنونی (هکتار)، حجم آب کاربردی خالص سالیانه هر گیاه (میلیون مترمکعب در سال) در استان برآورد شد. در مطالعه حاضر، منظور از حجم آب آبیاری کاربردی میزان آب آبیاری خالص (نه ناخالص) با لحاظ‌کردن بارش مؤثر است در شرایط کشاورزان. لازم است گفته شود به دلیل تعدد گیاهان و ارائه بهتر نتایج، این گیاهان در ۱۶ گروه گیاهی/گیاه قرار گرفتند (جدول ۲).

¹ Open Source

ارزیابی راهکارهای کاهش تقاضا برای آبیاری و سازگاری با کم آبی در استان فارس

جدول ۲. میانگین ۵ ساله (۱۳۹۶ تا ۱۴۰۰) سطح زیر کشت (هکتار)، عملکرد (کیلوگرم در هکتار) (Agricultural Jihad Organization of Fars Province. 2023) و حجم آب کاربردی خالص (مترمکعب بر هکتار) محصولات گیاهی آبی در استان فارس.

Table 2. 5-year average (2017 to 2021) cultivated area (hectares), yield (kilograms per hectare) (Agricultural Jihad Organization of Fars Province. 2023) and applied water (m³ per hectare) of irrigated plant crops in Fars Province.

نام گیاه Crop	گروه گیاهی Crop Group	سطح کشت (ha) Area		عملکرد (kg/ha) Yeild	آب کاربردی خالص (m³/ha) Net applied water
		مثمر Fruitfull	غیرمثمر* Unfruitfull*		
گندم Wheat	گندم Wheat	۲۸۹۲۴۵/۸	-	۴۷۰۴	۲۵۲۳
جو Barley	جو Barley	۶۲۸۴۰/۲	-	۳۴۹۶	۱۷۲۹
یونجه Alfalfa	یونجه Alfalfa	۳۳۰۱۶/۷	-	۱۱۰۴۶	۷۵۷۵
ذرت علوفه‌ای Fodder corn	ذرت علوفه‌ای Fodder corn	۲۸۷۷۳/۲	-	۶۴۱۱۹	۷۳۰۲
برنج Rice	برنج Rice	۲۵۳۷۴	-	۴۸۶۵	۱۴۴۸۹
لوبیا Bean	حبوبات گرمادوست Warm season legumes	۲۴۸۹۰	-	۱۷۶۴	۴۷۱۲
پنبه Cotton	گیاهان روغنی گرمادوست Cool season oil plants	۱۶۵۰۴/۱	-	۳۲۴۴	۷۵۹۶
ذرت دانه‌ای Grain corn	ذرت دانه‌ای Grain corn	۱۴۳۴۵/۴	-	۸۹۴۶	۷۱۵۴
چغندر قند Sugarbeet	چغندر قند Sugarbeet	۱۲۹۱۴/۳	-	۵۲۱۸۴	۷۹۶۲
کلزا Rapeseed	گیاهان روغنی سردادوست Cool season oil plants	۱۰۹۴۰/۷	-	۲۰۸۹	۱۹۵۵
کنجد Seasem	گیاهان روغنی گرمادوست Warm season oil plants	۸۹۷۰	-	۱۱۹۱	۵۲۶۸
سیب زمینی Patato	سیب زمینی Patato	۸۴۸۶/۲	-	۴۱۸۷۸	۶۲۹۸
نخود Chickpea	حبوبات سردادوست Cool season legumes	۲۰۷۱/۱	-	۱۸۸۴	۱۹۶۷
عدس Lentil	حبوبات سردادوست Cool season legumes	۱۹۷۸/۳	-	۲۰۳۹	۳۱۳۰
مرکبات Citrus	درختان گرمادوست Warm season trees	۵۴۴۲۶/۴	۸۷۶۳	۱۹۲۰۸	۹۳۴۶
انگور Grape	درختان سردادوست Cool season trees	۳۱۸۵۵	۱۳۱۲	۱۷۵۳۴	۷۰۹۵
نخل Date	درختان گرمادوست Warm season trees	۳۰۹۱۳	۳۳۵۰/۸	۶۳۹۶	۲۳۶۵۱
سیب Apple	درختان سردادوست Cool season trees	۲۸۲۶۶/۲	۲۲۴۱/۴	۱۷۰۴۶	۵۱۷۱
انار Pomegranate	درختان سردادوست Cool season trees	۲۱۷۲۷/۶	۱۶۶۲/۴	۱۶۳۲۸	۱۰۱۶۰
پسته Pistachio	درختان سردادوست Cool season trees	۲۰۹۰۳/۱	۸۴۴۳	۹۶۱	۳۲۴۹
گردو Walnut	درختان سردادوست Cool season trees	۷۵۷۲/۴	۶۶۲/۸	۱۹۷۶	۴۳۵۸
بادام	درختان سردادوست Cool season trees	۷۵۱۶/۳	۱۲۴۳/۶	۱۴۸۱	۳۳۳۲

نام گیاه Crop	گروه گیاهی Crop Group	سطح کشت (ha) Area		عملکرد (kg/ha) Yeild	آب کاربردی خالص (m ³ /ha) Net applied water
		مثمر Fruitfull	غیرمثمر* Unfruitfull*		
Almond زیتون	Cool season trees درختان سرما دوست	۷۳۸۴/۴	۲۵۳۵/۴	۲۶۴۲	۷۹۷۴
Olive هلو	Cool season trees درختان سرما دوست	۳۷۷۳/۱	۳۰۴/۲	۱۰۷۹۱	۴۲۹۳
Peach به	Cool season trees درختان سرما دوست	۳۲۸۸/۴	۵۲۶/۶	۱۳۸۹۳	۴۰۸۴
Quince زردآلو	Cool season trees درختان سرما دوست	۲۴۹۳/۴	۳۱۵/۴	۱۰۹۴۶	۳۹۹۸
Apricot آلو	Cool season trees درختان سرما دوست	۲۳۴۰	۲۴۳/۴	۸۹۶۱	۳۲۲۸
Plum انجیر	Cool season trees درختان گرمادوست	۱۶۸۸/۳	۱۰۴۹/۲	۴۷۹۰	۶۰۹۴
Fig گوجه‌فرنگی	Warm season trees سبزی‌وصیفی	۱۵۲۵۱/۳	-	۶۲۳۴۶	۷۵۷۳
Tomato هندوانه	Vegetable سبزی‌وصیفی	۱۳۸۹۹/۰	-	۴۶۸۰۷	۶۵۰۵
Watermelon خربزه	Vegetable سبزی‌وصیفی	۸۱۷۹/۲	-	۳۰۱۲۶	۴۹۶۴
Melon پیاز	Vegetable سبزی‌وصیفی	۵۵۵۷	-	۵۷۳۶۰	۷۳۷۳
Onion خیار	Vegetable سبزی‌وصیفی	۴۸۲۴/۲	-	۲۲۱۶۳	۳۳۲۷
Cucumber گرمک	Vegetable سبزی‌وصیفی	۱۵۶۸/۳	-	۲۶۶۵۱	۴۷۲۰
Cantaloupe بادمجان	Vegetable سبزی‌وصیفی	۱۴۵۵/۴	-	۳۱۲۴۰	۴۸۳۷
Aubergine سایر زراعی	Vegetable سایر	۷۳۰۹۸/۹	-	۸۹۷۰/۱	-
Other crops سایر سبزی-صیفی	Other سایر	۱۱۵۰۵/۴	-	۱۳۴۶۶/۴	-
Other vegetables سایر گیاهان باغی	Other سایر	۱۰۰۴۰/۳	۱۳۴۲/۴	۵۵۰۰/۶	-
Other garden crops سایر گیاهان گلخانه‌ای	Other سایر	۵۱۳/۸	-	۱۸۴۱۵۷/۳	-
Other greenhouse crops کل	Other -	۹۱۰۳۹۰/۹	۳۳۹۹۵/۶	-	-
Total					

* غیرمثمر: منظور باغ‌هایی است که به تازگی احداث شده‌اند و هنوز درختانشان به باردهی و میوه‌دهی نرسیده باشد.

*Unfruitfull: It means gardens that have just been built and the trees have not yet reached fruiting and fruiting.

سپس در سامانه S.A.W.A، الگوی کشت فعلی بر اساس (Province. 2023)، و قیمت محصولات (سال ۱۴۰۰؛ عملکرد (کیلوگرم در هکتار)، میزان آب آبیاری کاربردی (Statistical Center of Iran, 2023) با هدف سازگاری با (مترمکعب در هکتار)، سطح زیر کشت (میانگین ۵ ساله: کم‌آبی (حداقل‌سازی مصرف آب آبیاری) بهینه‌سازی گردید که جزییات و نتایج آن طی مطالعه‌ای جداگانه توسط میرزائی Agricultural Jihad Organization of Fars؛ ۱۳۹۶-۱۴۰۰

- و همکاران (Mirzaei et al., 2024c) ارائه شده است. تابع هدف در مدل بهینه‌سازی تهیه شده برای زمین‌های کشاورزی آبی استان فارس با رویکرد سازگاری با کم آبی و دستیابی به هدف‌های کشاورزی پایدار تدوین شده است. برای این منظور، سعی شد تا علاوه بر کاهش آب مصرفی مزارع کشاورزان، برخی از اصول کشاورزی پایدار مانند حفظ گیاهان چندساله و دائمی (تخفیف پیامدهای تغییر اقلیم، افزایش ترسیب کربن و حفظ تنوع زیستی) و حفظ بقولات (افزایش تثبیت بیولوژیک نیتروژن) نیز رعایت شود. بنابراین، پس از تهیه اطلاعات مورد نیاز برای حل مسئله و تعیین محدودیت‌های موجود در استان، مسئله بهینه‌سازی الگوی کشت زمین‌های کشاورزی آبی استان فارس به صورت زیر فرمول‌بندی گردید:

تابع هدف طبق معادله (۱) بیان می‌شود:

$$\text{معادله (۱)} \quad \text{Min (Z)} = \sum_{i=1}^n W I_i X_i$$

که در این معادله $W I_i$ و X به ترتیب میزان آب آبیاری کاربردی خالص سالیانه (میلیون مترمکعب در سال)، آب آبیاری کاربردی خالص هر گیاه (مترمکعب در هکتار)، سطح زیرکشت هر گیاه (هکتار) است. بنابراین تابع هدف در این مطالعه حداقل‌سازی مصرف آب در مزارع کشاورزان است. منظور از مصرف آب، حجم آب آبیاری کاربردی در شرایط مزارع کشاورزان در کل استان است. در بهینه‌سازی یک سری محدودیت‌ها به شرح زیر در افزونه Solver تعریف و در مدل اعمال گردید:

- سطح زیرکشت گیاهان دائمی (شامل یونجه، درختان سردسیری و گرمسیری)، و بقولات در الگوی کشت بهینه از سطح زیرکشت کنونی آن‌ها کمتر نباشد. شرط حفظ سطح زیرکشت این سه گروه از این جهت گذاشته شد که گیاهان دائمی و بقولات نقش مهمی در پایداری کشاورزی (تخفیف پیامدهای تغییر اقلیم، حفظ تنوع زیستی، حفاظت از خاک و منابع آب) دارند. برای هریک از محصولات یک حداقل و حداکثر سطح زیرکشت به شرح زیر در نظر گرفته شد:

- حداقل و حداکثر سطح زیرکشت گندم به ترتیب ۷۰ درصد و ۲/۵ برابر سطح زیرکشت کنونی باشد.
- حداقل سطح زیرکشت برنج ۲۰ درصد سطح زیرکشت و حداکثر آن همین مقدار باشد که هست.
- حداقل و حداکثر سطح زیرکشت دیگر گیاهان به ترتیب ۴۰ درصد و ۲/۵ برابر سطح زیرکشت کنونی باشد.

به این صورت هیچ یک از گیاهان موجود در فهرست گیاهان استان در الگوی کشت بهینه حذف نمی‌شود و این میزان تغییرات در الگوی بهینه‌طوری است که در یک دوره زمانی کوتاه قابل اجراست.

برای اینکه در بهینه‌سازی الگوی کشت اشتباهی روی ندهد و گیاهان تابستانه یا زمستانه به جای یکدیگر کشت نشوند، این شرط لحاظ شد که سطح زیرکشت گیاهان زمستانه و همین‌طور سطح زیرکشت گیاهان تابستانه در الگوی کشت بهینه از سطح زیرکشت فعلی آن‌ها بیشتر نباشد.

در مطالعه حاضر، میزان صرفه‌جویی آب آبیاری کاربردی (خالص) در الگوی بهینه برآورد گردید و با مقدار آب آبیاری کاربردی (خالص) در الگوی کشت کنونی مقایسه شد. پس از آن برای هر دو الگوی کشت کنونی و بهینه میزان صرفه‌جویی آب آبیاری کاربردی (خالص) برای شرایط (۱) استفاده از مالچ‌کشی در کل گیاهان استان به جز برنج و

- سود حاصل از فروش محصولات کشاورزی در کل استان در الگوی بهینه برابر مقدار فعلی آن باشد. یعنی الگوی بهینه‌شده باعث کاهش سود کشاورزان نگردد ولی حجم آب آبیاری کاربردی برای کل گیاهان در استان به حداقل ممکن برسد.
- سطح زیرکشت کل در الگوی بهینه از سطح زیرکشت کل کنونی بیشتر نباشد.

یونجه (۲) استفاده از سایبان در باغ‌ها و مزارع سبزی‌وصیفی، (۳) تبدیل کشت غرقابی برنج به کشت برنج هوازی و (۴) انتقال تولیدات سبزی‌وصیفی از مزرعه به گلخانه برآورد و مقایسه گردید.

یکی از راه‌های اصلی کاهش مصرف آب، ایجاد پوشش مناسب روی خاک است تا از تبخیر آب آبیاری جلوگیری کند. در کشاورزی حفاظتی، از گیاه پوششی، مالچ کاه و کلش، کود سبز یا روش‌های دیگر استفاده می‌شود تا علاوه بر فوایدی که برای حفاظت از تنوع زیستی، بهبود ویژگی‌های خاک و ترسیب کربن دارد، از هدرروی آب به صورت تبخیر نیز جلوگیری می‌کند. در این مطالعه فرض شد که با استفاده از گیاه پوششی، مالچ کاه و کلش، کود سبز یا روش‌های دیگر، پوششی در سطح خاک ایجاد شود که آن پوشش معادل ۲ تن مالچ کاه و کلش باشد. این ۲ تن مالچ کاه و کلش برای تمامی گیاهان استان به جز برنج و یونجه در مدل تعریف شد. در باغ‌ها نیز این پوشش را می‌توان با استفاده از کشت گیاهان پوششی یا کود سبز در بین درختان ایجاد کرد. طول عمر این مالچ کلش ۱۸۰ روز در نظر گرفته شد یعنی در مدت ۱۸۰ روز مالچ کلش تجزیه می‌شود و از بین می‌رود. به منظور ارزیابی تأثیر مالچ کاه و کلش در مدل شبیه‌ساز تولید گیاهی، ابتدا مقدار مالچ کلش به درصد پوشش زمین تبدیل و سپس تأثیر آن بر رشد، عملکرد و حجم آب آبیاری کاربردی بررسی می‌شود. مالچ کلش باعث کاهش تبخیر از سطح خاک می‌شود به دو دلیل: یکی اینکه پوششی است که روی سطح خاک ایجاد می‌کند و دیگری کاهش حداقل تبخیری است که از خاک صورت می‌گیرد. علاوه بر این، مالچ کلش موجب افزایش برگاب، کاهش رواناب و افزایش آلیبدوی خاک می‌شود. آلیبدوی خاک معمولاً ۱۴ یا ۱۵ است (Soltani and Sinclair, 2012). در این مطالعه، آلیبدوی مالچ کلش ۲۳ در نظر گرفته شد که باعث می‌شود تشعشع بیشتری منعکس گردد که خود تبخیر و تعرق را کاهش می‌دهد.

در ارتباط با کاربرد سایبان، در این مطالعه فرض شد که در باغ‌های میوه و مزارع سبزی‌وصیفی در سطح استان از ۳۱ اردیبهشت تا ۳۱ شهریور سایبان‌هایی مستقر گردد. فرض شد این سایبان‌ها (۱) ورود پرتوهای خورشیدی را ۵۰ درصد و (۲) دمای حداکثر در وسط روز را ۵ درجه سانتی‌گراد کاهش می‌دهد (Gindaba and Wand, 2005)، و (۳) دمای حداقل در شب را ۲/۵ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌دهد. این اثرها در مدل شبیه‌ساز گیاهی برای درختان میوه و مزارع سبزی‌وصیفی تعریف گردید.

در ارتباط با تبدیل کشت غرقابی به کشت هوازی برنج دو سناریو بر اساس تحقیقات سلطانی و همکاران (Soltani et al., 2024) تعریف شد، سناریو برنج هوازی یک: ۴۲۵ درجه سانتی‌گراد بر واحد دمایی مورد نیاز از زمان کاشت تا برداشت بذر نسبت به برنج غرقابی (نظام کشت فعلی) افزوده شد (یعنی به اندازه تعداد واحد دمایی مورد نیاز از کاشت بذر برنج در خزانه تا زمان انتقال نشاها به زمین اصلی)، دمای پایه ۸ درجه سانتی‌گراد، عمق مؤثر استخراج آب توسط ریشه برابر با ۷۵ سانتی‌متر و زمان آبیاری پس از تخلیه ۴۰ درصد از رطوبت خاک در نظر گرفته شد. سناریو برنج هوازی دو: واحد دمایی مورد نیاز از زمان کاشت بذر تا برداشت معادل نشاکاری تا برداشت در نظام کشت فعلی (با استفاده از ارقام زودرس‌تر نسبت به ارقام کنونی)، عمق مؤثر استخراج آب توسط ریشه برابر با ۷۵ سانتی‌متر و آبیاری پس از تخلیه ۴۰ درصد از رطوبت خاک در نظر گرفته شد. پس از آن فرض شد که از هر یک از سناریوهای یک و دو به‌طور مساوی در زمین‌های زیر کشت برنج استفاده می‌شود. بر همین اساس از معدل عملکرد و آب آبیاری کاربردی سناریوی یک و دو برای محاسبات بعدی استفاده شد.

در ارتباط با انتقال تولید سبزی‌وصیفی از مزرعه به گلخانه، در این مطالعه فرض شد که همان مقدار سبزی‌وصیفی که در مزرعه تولید می‌شود، در گلخانه تولید گردد و تولید در مزرعه متوقف شود. در وضعیت کنونی سطح

یونجه ۲۵۰ میلیون مترمکعب در سال (۵ درصد)، ذرت علوفه‌ای ۲۰۳ میلیون مترمکعب در سال (۴ درصد)، گیاهان روغنی گرمادوست ۱۷۳ میلیون در سال (۴ درصد)، جو ۱۰۹ میلیون مترمکعب در سال (۲ درصد)، حبوبات گرمادوست ۱۰۴ میلیون مترمکعب در سال (۲ درصد)، چغندر قند ۱۰۳ میلیون مترمکعب در سال (۲ درصد)، ذرت دانه‌ای ۱۰۳ میلیون مترمکعب در سال (۲ درصد)، سیب‌زمینی ۵۳ میلیون مترمکعب در سال (۱ درصد)، گیاهان روغنی سرمادوست ۲۱ میلیون مترمکعب در سال (کمتر از یک درصد) و حبوبات سرمادوست (کمتر از یک درصد) (شکل ۲).

در الگوی کشت بهینه حجم آب آبیاری از ۴۶۱۹ به ۳۰۰۷ میلیون مترمکعب در سال در سطح استان کاهش (معادل ۳۵ درصد) پیدا می‌کند. در الگوی کشت بهینه، میزان حجم آب آبیاری استان برای این محصولات محاسبه شده است: درختان سرمادوست ۹۸۴ میلیون مترمکعب در سال (۳۳ درصد)، گندم ۵۱۱ میلیون مترمکعب در سال (۱۷ درصد)، نخل ۲۹۲ میلیون مترمکعب در سال (۱۰ درصد)، درختان گرمادوست ۲۸۸ میلیون مترمکعب در سال (۱۰ درصد)، سبزی‌وصیفی ۲۵۹ میلیون مترمکعب در سال (۹ درصد)، حبوبات گرمادوست با ۱۶۸ میلیون مترمکعب در سال (۶ درصد)، یونجه ۱۰۰ میلیون مترمکعب در سال (۳ درصد)، ذرت علوفه‌ای ۸۱ میلیون مترمکعب در سال (۳ درصد)، برنج ۷۴ میلیون مترمکعب در سال (۲ درصد)، گیاهان روغنی گرمادوست ۶۹ میلیون مترمکعب در سال (۲ درصد)، جو ۴۳ میلیون مترمکعب در سال (۱ درصد)، چغندر قند ۴۱ میلیون مترمکعب در سال (۱ درصد)، ذرت دانه‌ای ۴۱ میلیون مترمکعب در سال (۱ درصد)، حبوبات سرمادوست ۲۶ میلیون مترمکعب در سال (۱ درصد) و گیاهان روغنی سرمادوست ۹ میلیون مترمکعب در سال (کمتر از ۱ درصد).

زیرکشت و تولید سبزی و صیفی در استان به ترتیب برابر با ۵۰۷۳۲ هکتار و ۲ میلیون و ۳۶۱ هزار تن است. در اینجا فرض شد که همین میزان تولیدات در گلخانه تولید شود، میزان صرفه‌جویی آب حاصل از آن برآورد شد. برای مثال، فرض کنید که ۱۰۰ هکتار زمین در فضای باز زیرکشت گوجه فرنگی می‌رود و هر هکتار ۸۵ تن محصول می‌دهد، میزان کل تولیدات در این شرایط ۸۵۰۰ تن خواهد بود. اگر در یک هکتار گلخانه ۲۵۰ تن به‌دست آید، ۳۴ هکتار گلخانه لازم خواهد بود تا همین مقدار گوجه فرنگی به‌دست آید. یعنی به جای ۱۰۰ هکتار مزرعه، ۳۴ هکتار گلخانه گوجه فرنگی احداث می‌گردد که تولید یکسانی ایجاد شود. در این حالت آب و زمین مازاد کنار گذاشته می‌شود که یک ظرفیت در کاهش آبیاری ایجاد می‌کند. در شرایط کنونی تولید هر تن سبزی‌وصیفی در مزرعه و گلخانه در استان فارس به ترتیب به ۱۳۵ و ۶۰ متر مکعب آب نیاز دارد (Soltani et al., 2019).

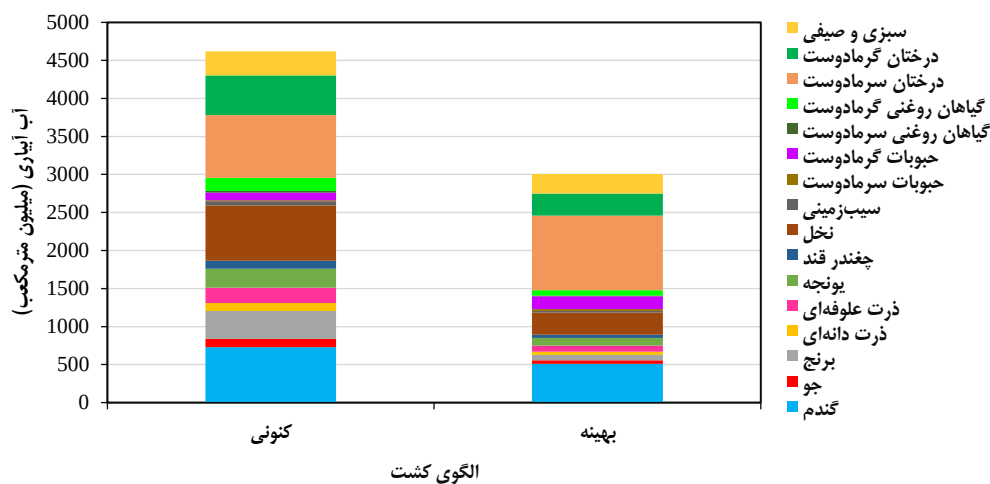
نتایج مطالعه

تأثیر بهینه‌سازی الگوی کشت بر حجم آب کاربردی

بهینه‌سازی الگوی کشت باعث تغییراتی در حجم آب آبیاری کاربردی کشاورزی استان نسبت به الگوی کشت کنونی می‌شود. حجم آب آبیاری کاربردی استان برای الگوی کشت کنونی با استفاده از سیستم SAWA برابر با ۴۶۱۹ میلیون مترمکعب در سال برآورد شد (خالص: بدون در نظر گرفتن راندمان آبیاری و توزیع غیریکنواخت). بیشترین سهم حجم آب آبیاری در الگوی کشت کنونی استان به‌ترتیب از این قرار است: درختان سرمادوست ۸۲۵ میلیون مترمکعب در سال (۱۸ درصد)، نخل ۷۳۱ میلیون مترمکعب در سال (۱۶ درصد)، گندم ۷۳۰ میلیون مترمکعب در سال (۱۶ درصد)، درختان گرمادوست ۵۱۹ میلیون مترمکعب در سال (۱۱ درصد)، برنج ۳۶۸ میلیون مترمکعب در سال (۸ درصد)، سبزی‌وصیفی ۳۱۸ میلیون مترمکعب در سال (۷ درصد)،

میزان تولیدات گیاهی در الگوی کشت کنونی بیش از ۱۰ میلیون تن در سال است که بهینه‌سازی الگوی کشت باعث می‌شود تا با کاهش حجم آب آبیاری کل استان به میزان ۳۵ درصد نسبت به الگوی کشت کنونی، تولید محصول به حدود ۷ میلیون تن در سال برسد. این در حالی است که سود ناخالص اقتصادی در اثر بهینه‌سازی الگوی کشت تغییری پیدا نمی‌کند (۱۰۱۱ هزار میلیارد ریال). به بیان دیگر، در الگوی کشت بهینه ترکیب گیاهان نسبت به

الگوی کشت کنونی تغییر پیدا می‌کند به طوری که در الگوی کشت بهینه سهم گیاهان آب بر و با سود ناخالص اقتصادی کم نسبت به گیاهان کم آب‌بر و با سود ناخالص اقتصادی زیاد، کاهش می‌یابد. البته در این راه مقداری از سطح زیرکشت و به دنبال آن بخشی از تولیدات گیاهی از دست داده خواهد رفت که باید با برنامه‌ریزی در سطح کشور و کشت آن گیاهان در استان‌های با مزیت اقتصادی بالاتر و نیز تنظیم واردات-صادرات این کاهش جبران شود.



شکل ۲- تأثیر بهینه‌سازی الگوی کشت بر حجم آب آبیاری کاربردی کشاورزی استان فارس. برآوردها با استفاده از سامانه SAWA و بر اساس میانگین ۱۰ ساله داده‌های هواشناسی (۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰) و آمار و اطلاعات سطح زیرکشت میانگین ۵ ساله (۱۳۹۶ تا ۱۴۰۰) است. رنگ‌ها در هر ستون متعلق به هر گیاه یا هر گروه گیاهی است و متناظر یکدیگر هستند.

Fig. 2- The Impact of cropping pattern optimization on the Fars province agricultural applied water. Estimates were made using the SAWA system based on a 10-year average of meteorological data (2011-2021) and a 5-year average of crop area statistics and information (2017-2021). The colors in each column belong to a plant or plant group and correspond to each other.

کاهش بیشتر حجم آب آبیاری کاربردی در الگوی کشت کنونی نسبت به الگوی کشت بهینه این است که در الگوی کشت کنونی سطح زیرکشت بیشتری به سبزی‌وصیفی و درختان میوه تعلق دارد.

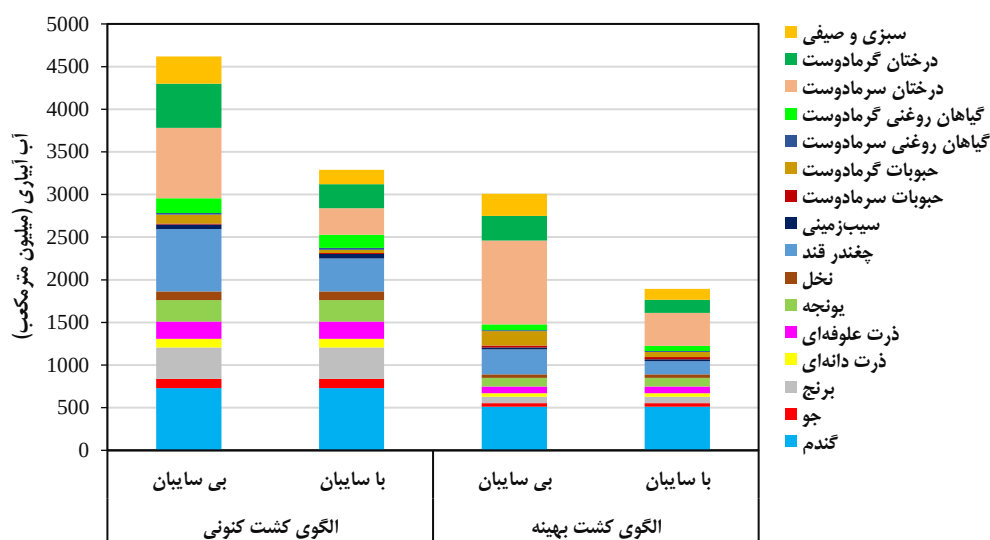
میزان تولیدات گیاهی در الگوی کشت کنونی برابر با ۱۰۳۵۰ هزارتن در سال است که با استفاده از سایبان به ۸۶۲۹ هزارتن در سال کاهش پیدا می‌کند (کاهشی معادل ۱۷ درصد). میزان تولیدات گیاهی در الگوی کشت بهینه برابر با ۷۰۰۳ هزارتن در سال است که در پس از استفاده از

تأثیر استفاده از سایبان در باغ‌ها و مزارع سبزی‌وصیفی بر حجم آب کاربردی

نتایج بررسی‌ها نشان داد که کاربرد سایبان در الگوی کشت کنونی باعث می‌شود تا حجم آب آبیاری کاربردی گیاهان از ۴۶۱۹ به ۳۲۸۸ میلیون مترمکعب در سال کاهش یابد (معادل ۲۹ درصد کاهش)، اما استفاده از سایبان در الگوی کشت بهینه باعث خواهد شد تا حجم آب آبیاری کاربردی از ۳۰۰۷ به ۲۲۹۴ میلیون مترمکعب در سال کاهش پیدا کند (معادل ۲۴ درصد کاهش) (شکل ۳). دلیل

ارزیابی راهکارهای کاهش تقاضا برای آبیاری و سازگاری با کم آبی در استان فارس

سایبان به ۵۴۰۶ هزارتن در سال کاهش پیدا می‌کند (کاهش معادل ۲۳ درصد). استفاده از سایبان در الگوی کشت کنونی سود ناخالص اقتصادی را از ۱۰۱۱ به ۷۴۳ هزار میلیارد ریال کاهش می‌دهد (کاهش معادل ۲۶ درصد) درحالی که استفاده از سایبان در الگوی کشت بهینه سود ناخالص را از ۱۰۱۱ به ۶۶۷ هزار میلیارد ریال می‌رساند (است).



شکل ۳- تأثیر کاربرد سایبان (کاهش ۵۰ درصد در عبور پرتوهای خورشیدی) بر حجم آب آبیاری کاربردی کشاورزی استان در الگوی کشت کنونی و بهینه. برآوردها با استفاده از سامانه SAWA بر اساس میانگین ۱۰ ساله داده‌های هواشناسی (۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰) و آمار و اطلاعات سطح زیرکشت میانگین ۵ ساله (۱۳۹۶ تا ۱۴۰۰) است (سایبان برای گیاهان گندم، جو، یونجه، ذرت علوفه‌ای، برنج، پنبه، ذرت دانه‌ای، چغندر قند، سیبزمینی، نخود، عدس، پیاز و کلزا تعریف نشد). رنگ‌ها در هر ستون متعلق به هر گیاه یا هر گروه گیاهی است و متناظر یکدیگر هستند.

Fig. 3- The impact of the use of shade net (50% radiation deficit) on the Fars province agricultural applied water in the current and optimal cropping patterns. Estimates were made using the SAWA system based on a 10-year average of meteorological data (2011-2021) and a 5-year average of crop area statistics and information (2017-2021). (shade net was not defined for wheat, barley, alfalfa, foliage corn, rice, cotton, grain corn, sugarbeet, potato, chickpea, lentil, onion and canola.). The colors in each column belong to a plant or plant group and correspond to each other.

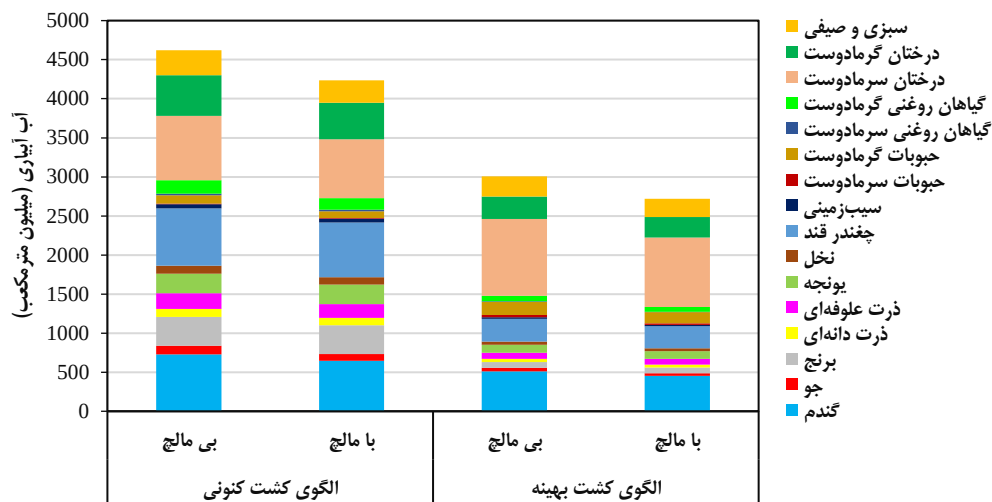
تأثیر استفاده از مالچ‌کشی بر حجم آب کاربردی

الگوی کشت بهینه سطح زیرکشت درختان افزایش پیدا می‌کند و بنابراین اثربخشی استفاده از مالچ‌کشی در صرفه‌جویی مصرف آب آبیاری کاربردی در الگوی کشت بهینه اندکی بیشتر است تا در الگوی کشت کنونی.

میزان تولیدات گیاهی در الگوی کشت کنونی برابر با ۱۰۳۵۰ هزارتن در سال است که در استفاده از مالچ‌کشی تغییر پیدا نمی‌کند. در الگوی کشت بهینه نیز استفاده از مالچ‌کشی میزان تولیدات گیاهی دچار تغییر نمی‌شود (۷۰۰۳ هزارتن در سال). در همین راستا، استفاده از

نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد استفاده از مالچ‌کشی (خاک‌ورزی حفاظتی) در الگوی کشت کنونی باعث خواهد شد تا حجم آب آبیاری کاربردی از ۴۶۱۹ به ۴۲۳۵ میلیون مترمکعب در سال کاهش پیدا کند (معادل ۸ درصد کاهش) اما استفاده از مالچ‌کشی در الگوی کشت بهینه باعث می‌گردد تا حجم آب آبیاری کاربردی گیاهان استان از ۳۰۰۷ به ۲۷۱۵ میلیون مترمکعب در سال کاهش یابد (معادل ۱۰ درصد کاهش) (شکل ۵). دلیل این کاهش آن است که در

مالچ‌کشی سود ناخالص اقتصادی در الگوی کشت کنونی و مرتبط با خرید یا تهیه مالچ‌کشی یا دیگر هزینه‌های ادوات بهینه را تحت تأثیر قرار نمی‌دهد (۱۰۱۱ هزار میلیارد ریال) و ماشین‌آلات در محاسبات لحاظ نشده است). (باید به این نکته اشاره شود که در مطالعه حاضر هزینه‌های



شکل ۴- تأثیر مالچ‌کشی بر حجم آب آبیاری کاربردی کشاورزی استان فارس در الگوی کشت کنونی و بهینه. برآوردها با استفاده از سامانه SAWA و بر اساس میانگین ۱۰ ساله داده‌های هواشناسی (۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰) و آمار و اطلاعات سطح زیر کشت میانگین ۵ ساله (۱۳۹۶ تا ۱۴۰۰) است. رنگ‌ها در هر ستون متعلق به هر گیاه یا هر گروه گیاهی است و متناظر یکدیگر هستند.

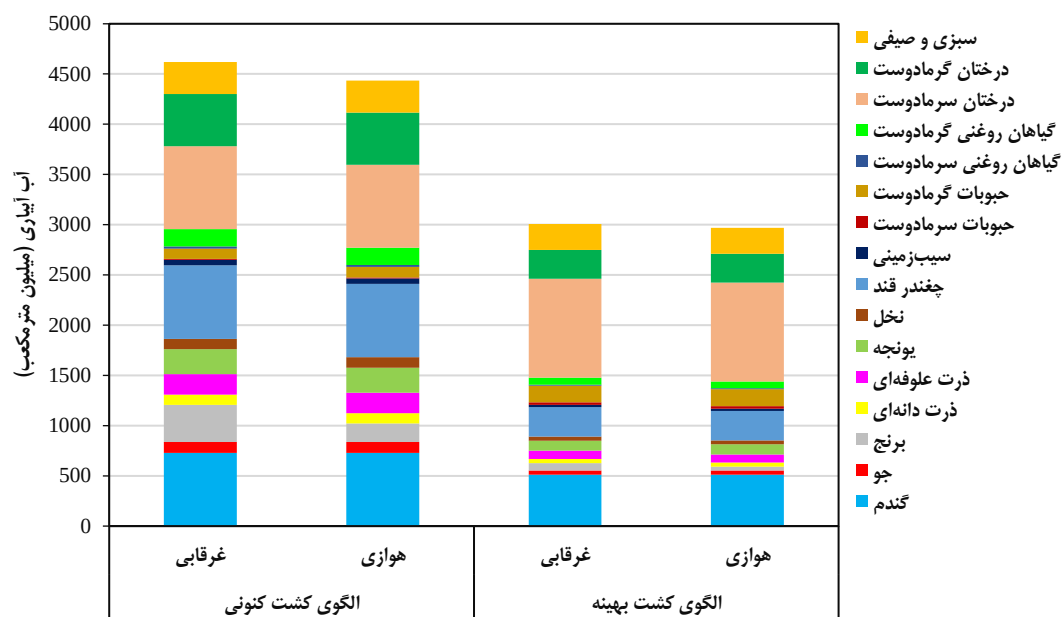
Fig. 4- The effect of mulch on the Fars province agricultural applied water in the current and optimal cropping patterns. Estimates were made using the SAWA system based on a 10-year average of meteorological data (2011-2021) and a 5-year average of crop area statistics and information (2017-2021). The colors in each column belong to a plant or plant group and correspond to each other.

تأثیر تغییر نظام کشت غرقابی برنج به هوازی بر حجم آب کاربردی
اثر بخشی کمتری در صرفه‌جویی آب آبیاری کاربردی داشته است.

میزان تولیدات گیاهی در الگوی کشت کنونی برابر با ۱۰۳۵۰ هزار تن در سال است که با تغییر نظام کشت غرقابی برنج به کشت هوازی میزان تولیدات گیاهی بدون تغییر باقی می‌ماند. در الگوی کشت بهینه نیز تغییر نظام کشت غرقابی برنج به هوازی میزان تولیدات گیاهی (۷۰۰۳ هزار تن در سال) را دچار تغییر نمی‌کند. از آنجایی که سود ناخالص اقتصادی تابعی از میزان تولیدات گیاهی است، تغییر نظام کشت غرقابی برنج به کشت هوازی سود ناخالص اقتصادی را در هر دو الگوی کشت کنونی و بهینه تغییر نمی‌دهد (۱۰۱۱ هزار میلیارد ریال).

نتایج تحقیق نشان داد که تبدیل کشت غرقابی به هوازی برنج در الگوی کشت کنونی باعث خواهد شد تا حجم آب آبیاری کاربردی از ۴۶۱۹ به ۴۴۳۴ میلیون مترمکعب در سال کاهش پیدا کند (کاهشی معادل ۴ درصد). اما تبدیل کشت غرقابی به هوازی برنج در الگوی کشت بهینه باعث می‌شود تا حجم آب آبیاری از ۳۰۰۷ به ۲۹۷۰ میلیون مترمکعب در سال کاهش یابد (کاهشی معادل ۱ درصد) (شکل ۵) و دلیل آن هم این است که در الگوی کشت بهینه سطح زیر کشت برنج کاهش پیدا کرده است و در نتیجه

ارزیابی راهکارهای کاهش تقاضا برای آبیاری و سازگاری با کم آبی در استان فارس



شکل ۵- تأثیر کشت هوازی برنج بر حجم آب آبیاری کاربردی کشاورزی استان فارس در الگوی کشت کنونی و بهینه. برآوردها با استفاده از سامانه SAWA و بر اساس میانگین ۱۰ ساله داده‌های هواشناسی (۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰) و آمار و اطلاعات سطح زیر کشت میانگین ۵ ساله (۱۳۹۶ تا ۱۴۰۰) است. رنگ‌ها در هر ستون متعلق به هر گیاه یا هر گروه گیاهی است و متناظر یکدیگر هستند.

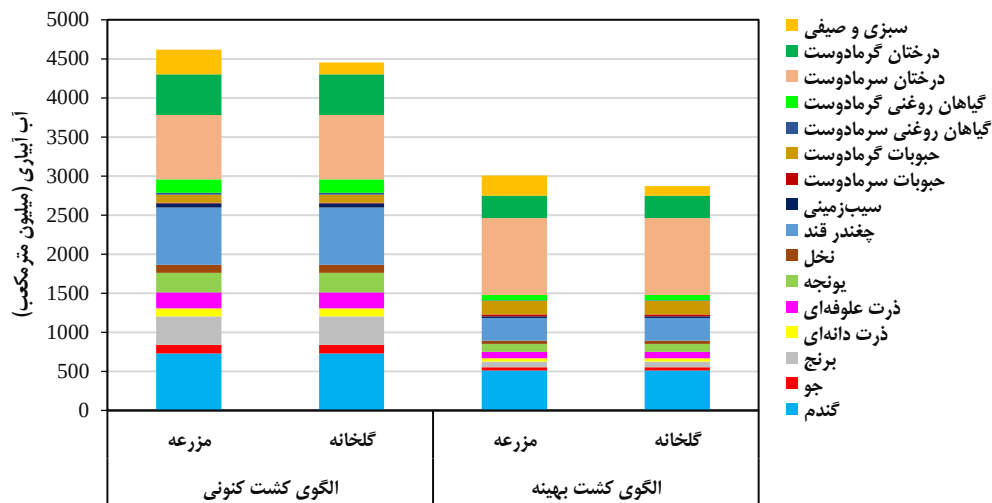
Fig. 5- Effect of aerobic rice cultivation on the Fars province agricultural applied water in the current and optimal cropping patterns. Estimates were made using the SAWA system based on a 10-year average of meteorological data (2011-2021) and a 5-year average of crop area statistics and information (2017-2021). The colors in each column belong to a plant or plant group and correspond to each other.

تأثیر انتقال تولیدات سبزی و صیفی از مزرعه به گلخانه بر

حجم آب کاربردی کشاورزی استان فارس

میزان تولیدات گیاهی در الگوی کشت کنونی برابر با ۱۰۳۵۰ هزارتن در سال است که با انتقال تولیدات سبزی و صیفی از مزرعه به گلخانه تغییر پیدا نمی‌کند. در الگوی کشت بهینه نیز انتقال تولیدات سبزی و صیفی از مزرعه به گلخانه میزان تولیدات گیاهی دچار تغییر نمی‌شود (۷۰۰۳ هزارتن در سال). در همین راستا انتقال تولیدات سبزی و صیفی از مزرعه به گلخانه سود ناخالص اقتصادی را در الگوی کشت کنونی و بهینه تحت تأثیر قرار نمی‌دهد (۱۰۱۱ هزار میلیارد ریال) (باید به این نکته اشاره شود که در مطالعه حاضر هزینه‌های مرتبط با احداث گلخانه، تهیه بذر و یا نشاء، هزینه‌های کارگری و دیگر هزینه‌های مرتبط با گلخانه لحاظ نشده است).

نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که با انتقال تولیدات سبزی و صیفی از مزرعه به گلخانه در الگوی کشت کنونی حجم آب آبیاری کاربردی گیاهان استان از ۴۶۱۹ به ۴۴۵۲ میلیون مترمکعب در سال کاهش پیدا می‌کند (کاهش معادل ۴ درصد). در الگوی کشت بهینه نیز سهم سبزی و صیفی از سطح زیر کشت استان تغییر زیادی ندارد، تولیدات گیاهی و در نتیجه مصرف آب گیاهان نیز به همان نسبت کاهش پیدا می‌کند، به‌طوری که با انتقال تولیدات سبزی و صیفی به گلخانه در الگوی کشت بهینه، حجم آب آبیاری کاربردی گیاهان استان از ۳۰۰۷ به ۲۸۷۰ میلیون مترمکعب در سال کاهش می‌یابد (کاهش معادل ۴ درصد) (شکل ۶).



شکل ۶- میزان تغییرات حجم آب آبیاری کاربردی کشاورزی استان فارس (میلیون مترمکعب) در شرایط انتقال تولیدات سبزی و صیفی از شرایط مزرعه (فضای باز) به گلخانه در شرایط الگوی کشت فعلی و بهینه. برآوردها با استفاده از سامانه SAWA و بر اساس میانگین ۱۰ ساله داده‌های هواشناسی (۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰) و آمار و اطلاعات سطح زیر کشت میانگین ۵ ساله (۱۳۹۶ تا ۱۴۰۰) است. رنگ‌ها در هر ستون متعلق به هر گروه گیاهی است و متناظر یکدیگر هستند. توجه شود که انتقال به گلخانه فقط بر حجم آب آبیاری سبزی و صیفی اثر دارد و آب مصرفی سایر گیاهان در هر یک از الگوهای کنونی و بهینه بدون تغییر باقی می‌ماند.

Fig. 6 - Changes in the Fars province agricultural applied water (million cubic meters) in the context of transferring vegetables from field conditions (open space) to greenhouse conditions in the current and optimal cropping patterns. Estimates were made using the SAWA system based on a 10-year average of meteorological data (2011-2021) and a 5-year average of crop area statistics and information (2017-2021). The colors in each column belong to a plant or plant group and correspond to each other. It should be noted that transition to greenhouse only affects the applied water of vegetables and applied water of other plants remains unchanged in either the current or optimal cropping patterns.

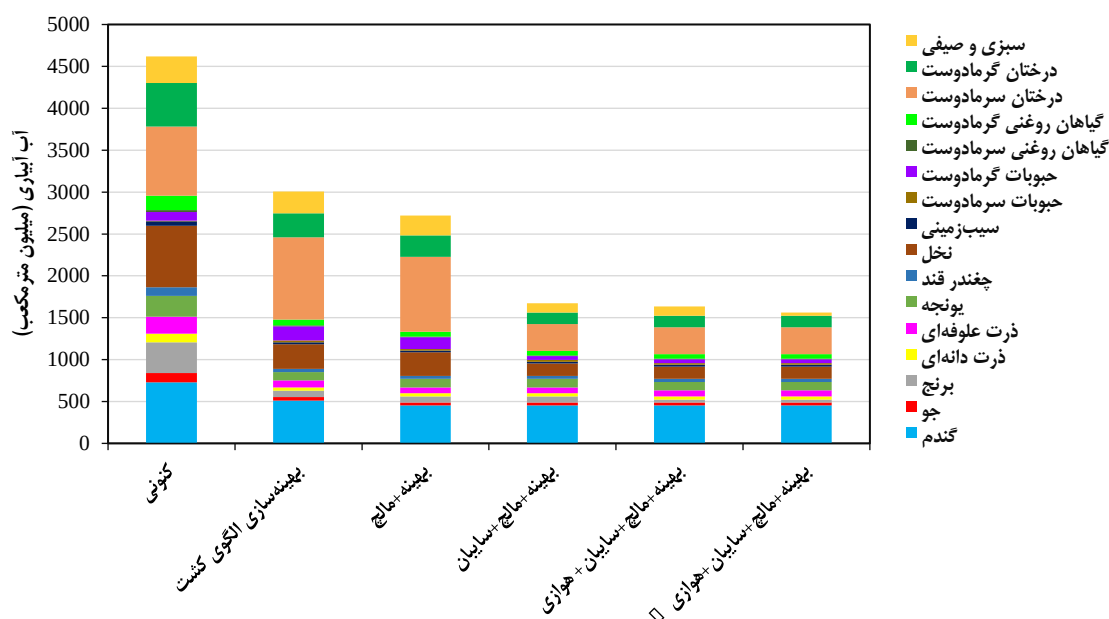
تأثیر ترکیب راهکارهای سازگاری به کم‌آبی در کشاورزی فارس

سال کاهش می‌یابد (علاوه بر ۴۱ درصد ناشی از بهینه‌سازی الگوی کشت و کاربرد مالچ‌کلیش)؛ یعنی جمعاً ۶۴ درصد در حجم آب آبیاری کاربردی صرفه‌جویی می‌گردد. اگر در الگوی کشت بهینه شده‌ای که از مالچ‌کلیش و سایبان استفاده شده است، کشت هوازی برنج نیز به کار گرفته شود ۱ درصد دیگر در حجم آب آبیاری کاربردی کاهش ایجاد می‌شود و حجم آب آبیاری کاربردی به ۱۶۳۴ میلیون مترمکعب در سال می‌رسد که در این صورت مجموعاً ۶۵ درصد کاهش در حجم آب آبیاری اتفاق می‌افتد. استفاده از راهکار انتقال تولیدات سبزی و صیفی به همراه راهکارهای قبلی در الگوی کشت بهینه نیز باعث کاهش ۱ درصدی در حجم آب آبیاری کاربردی می‌شود و در این صورت حجم آب آبیاری کاربردی گیاهان استان به ۱۵۶۳ میلیون مترمکعب در سال می‌رسد. سرانجام اینکه ترکیب راهکارهای سازگاری به کم‌آبی در

نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد در شرایط کنونی حجم آب آبیاری کاربردی گیاهان استان ۴۶۱۹ میلیون مترمکعب در سال است که بهینه‌سازی الگوی کشت می‌تواند آن را تا ۳۵ درصد کاهش دهد و به ۳۰۰۷ میلیون مترمکعب در سال برساند. اگر در الگوی کشت بهینه از مالچ‌کلیش استفاده شود، ۶ درصد دیگر از حجم آب آبیاری کاسته می‌شود (علاوه بر ۳۵ درصد کاهش ناشی از بهینه‌سازی الگوی کشت) که در مجموع حجم آب آبیاری کاربردی ۲۷۲۰ میلیون مترمکعب در سال (کاهش معادل ۴۱ درصد) کاهش می‌یابد. اگر در الگوی کشت بهینه علاوه بر مالچ‌کلیش، از سایبان استفاده شود، ۲۳ درصد دیگر از حجم آب آبیاری کاربردی کم می‌شود و حجم مصرف آب به ۱۶۷۱ میلیون مترمکعب در

ارزیابی راهکارهای کاهش تقاضا برای آبیاری و سازگاری با کم آبی در استان فارس

الگوی کشت فعلی استان فارس می‌تواند ۶۶ درصد (معادل ۳۰۴۸ میلیون مترمکعب در سال) صرفه‌جویی در حجم آبیاری کاربردی ایجاد کند (شکل ۷) که میزان قابل توجهی است. بخش بزرگی از این کاهش ناشی از بهینه‌سازی الگوی کشت و استفاده از سایبان در باغ‌ها و مزارع سبزی‌وصیفی است. ترکیب این راهکارها در الگوی کشت بهینه می‌تواند باعث صرفه‌جویی حجم آب آبیاری کاربردی تا ۴۸ درصد شود (از ۳۰۰۷ به ۱۵۶۳ میلیون مترمکعب در سال که معادل ۱۴۴۴ میلیون مترمکعب در سال است).



شکل ۷- تغییرات حجم آب آبیاری کاربردی کشاورزی استان فارس (میلیون مترمکعب) در شرایط فعلی و راهکارهای سازگاری با کم‌آبی. برآوردها با استفاده از سامانه SAWA و بر اساس میانگین ۱۰ ساله داده‌های هواشناسی (۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰) و آمار و اطلاعات سطح زیر کشت میانگین ۵ ساله (۱۳۹۶ تا ۱۴۰۰) است. رنگ‌ها در هر ستون متعلق به هر گیاه یا هر گروه گیاهی است و متناظر یکدیگر هستند.

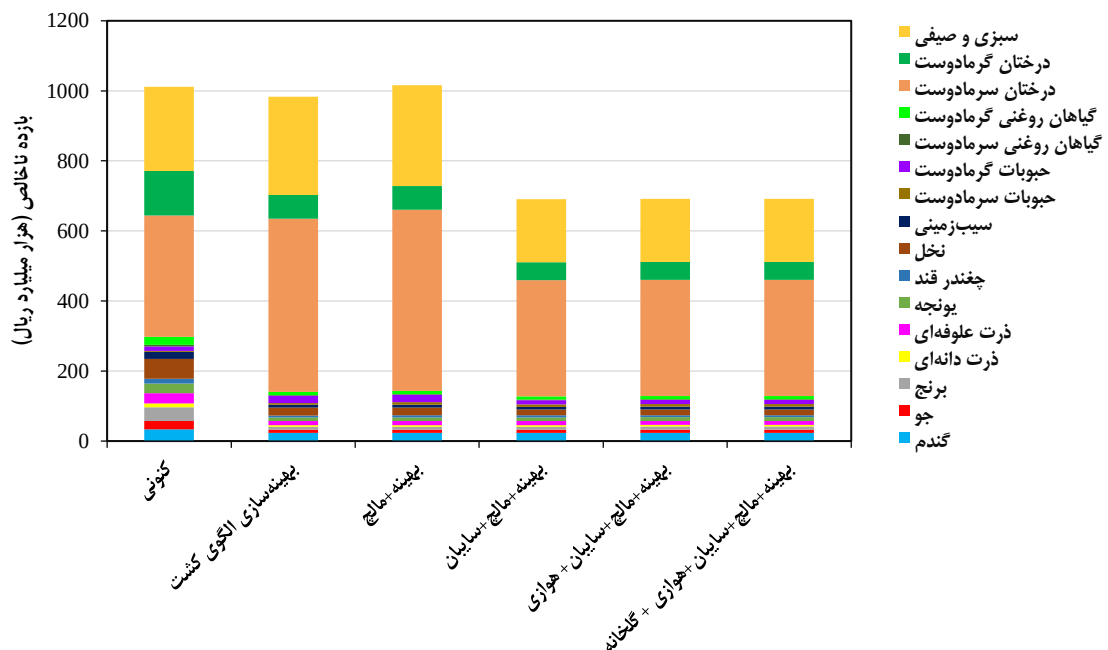
Fig. 7 - Changes in the Fars province agricultural applied water (million cubic meters) in current conditions and adaptation strategies to water scarcity. Estimates were made using the SAWA system based on a 10-year average of meteorological data (2011-2021) and a 5-year average of crop area statistics and information (2017-2021). The colors in each column belong to a plant or plant group and correspond to each other.

تأثیر سازگاری با کم‌آبی بر درآمد کشاورزان

کشت بهینه و مالچ‌کشی، درآمد کشاورزان کاهش پیدا می‌کند و دلیل آن نیز به کاهش عملکرد گیاهان در اثر کاهش پرتوهای دریافتی ناشی از سایبان برمی‌گردد که روی درآمد تأثیر منفی دارد (کاهش عملکرد از صفر تا ۴۷ درصد بسته به گیاه و پهنه آگرواکولوژیک). با استفاده از کشت برنج هوازی در ترکیب راهکارهای قبلی نیز درآمد کشاورزان کاهش پیدا می‌کند زیرا در اثر کشت هوازی برنج عملکرد آن نسبت به برنج غرقابی کاهش پیدا می‌کند (کاهش عملکرد از ۷ تا ۲۳ درصد بسته به پهنه آگرواکولوژیک). با استفاده از راهکار انتقال تولیدات سبزی‌وصیفی از مزرعه به گلخانه در

یکی از شرط‌هایی که در بهینه‌سازی الگوی کشت در نظر گرفته شد این است که درآمد کشاورزان کاهش پیدا نکند. به همین دلیل در الگوی کشت بهینه کاهشی در درآمد کشاورزان اتفاق نمی‌افتد. البته همان‌طور که بیان شد این شرط درآمد کل کشاورزان استان است و ممکن است بسته به منطقه با توجه به تغییر الگوی کشت درآمد زیاد و یا کمتر از مقدار کنونی آن منطقه شود. در شرایط استفاده از مالچ‌کشی در الگوی بهینه نیز درآمد کشاورزان کاهش نمی‌یابد. اما در شرایط استفاده از سایبان در ترکیب الگوی

ترکیب با راهکارهای قبلی، درآمد کشاورزان تغییری پیدا نمی‌کند. در مورد انتقال تولیدات سبزی و صیفی از مزرعه به گلخانه و کاربرد سایبان، باید گفت هزینه احداث و نگهداری گلخانه و استقرار سایبان لحاظ نشده است. اعمال این هزینه‌ها می‌تواند درآمد کشاورزان را از طریق افزایش هزینه‌ها تحت تأثیر قرار دهد. در ارتباط با کاربرد مالچ‌کشی نیز خرید دستگاه و ادوات جدید و به‌کارگیری آن و همچنین کنترل آفات و علف‌های هرز احتمالی نیز می‌تواند هزینه‌ها را افزایش دهد و در نتیجه درآمد کشاورزان را تغییر دهد که در اینجا لحاظ نشده است. شایان ذکر است که بهینه‌سازی الگوی کشت هزینه چندانی ندارد اما به نظر می‌رسد که اگر هزینه‌های بیان شده در ارتباط با کاربرد مالچ‌کشی، سایبان و انتقال تولیدات سبزی و صیفی از مزرعه به گلخانه لحاظ شود، از گزینه الگوی کشت بهینه + مالچ‌کشی (شکل ۸) به



شکل ۸- تغییرات بازده ناخالص کشاورزی استان فارس (هزار میلیارد ریال) در شرایط فعلی و راهکارهای سازگاری به کم‌آبی. برآوردها با استفاده از سامانه SAWA و بر اساس میانگین ۱۰ ساله داده‌های هواشناسی (۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰) و آمار و اطلاعات سطح زیرکشت میانگین ۵ ساله (۱۳۹۶ تا ۱۴۰۰) است. (باید توجه داشت که در محاسبات این مطالعه تنها کاهش درآمد ناشی از افت عملکرد لحاظ شده و کاهش درآمد ناشی از افزایش هزینه‌های تهیه و کاربرد راهکارهای مورد مطالعه لحاظ نشده است). رنگ‌ها در هر ستون متعلق به هر گیاه یا هر گروه گیاهی است و متناظر یکدیگر هستند.

Fig. 8- Changes in the Fars province agricultural gross margin (thousand billion rials) in current conditions and adaptation strategies to water scarcity. Estimates were made using the SAWA system based on a 10-year average of meteorological data (2011-2021) and a 5-year average of crop area statistics and information (2017-2021). The colors in each column belong to a plant or plant group and correspond to each other.

بحث و نتیجه گیری

اما بهینه سازی الگوی کشت را با توجه به اینکه هزینه زیادی ندارد می توان برای استان فارس توصیه کرد. سلطانی و همکاران (Soltani *et al.*, 2024) نشان دادند که بهینه سازی الگوی کشت در استان گلستان بدون کاهش درآمد کشاورزان و با لحاظ کردن معیارهای پایداری کشاورزی می تواند تا ۴۱ درصد حجم آب کاربردی را در شرایط کشاورزان و در نتیجه برداشت آب در استان کاهش دهد (از ۱۳۳۸ به ۷۸۵ میلیون مترمکعب در سال) همچنان که در مطالعه کنونی نیز بهینه سازی الگوی کشت باعث کاهش حجم آب آبیاری کاربردی گردید. در راستای مدیریت مصرف آب در شهرستان گرگان، جهان تیغ (Jahantigh, 2022) با بهینه سازی الگوی کشت نشان داد که در وضعیت الگوی کشت کنونی کل میزان مصرف آب ۲۱۳/۶۲۶ میلیون مترمکعب در سال است که پس از بهینه سازی الگوی کشت به ۲۳/۴۲۷ میلیون مترمکعب در سال کاهش می یابد. مطالعات متعدد دیگر (Ghasemi *et al.*, 2016; Chouchane *et al.*, 2020; Montazar *et al.*, 2010) نشان داده است که بهینه سازی الگوی کشت می تواند به صرفه جویی آب در بخش کشاورزی کمک کند.

نتایج مطالعه کنونی نشان داد که استفاده از سایبان در باغ ها و مزارع سبزی و صیفی دومین راهکار مؤثر در سازگاری با کم آبی در استان فارس است که روی میزان تبخیر از خاک و تعرق گیاه تأثیر می گذارد (Ajmi *et al.*, 2017). بررسی ها نشان داده است که سایبان با کاهش دمای حداکثر در روز و افزایش دمای حداقل در شب روی تبخیر و تعرق گیاه تأثیر می گذارد (Momeni *et al.*, 2022). علاوه بر این، در مناطقی (مانند استان فارس) که میزان پرتوهای خورشیدی زیاد است دمای برگ و خاک افزایش می یابد و در نتیجه تبخیر و تعرق گیاه بیشتر می شود. در این مناطق، استفاده از سایبان پوشش بین گیاه و نور خورشید را ایجاد می کند که میزان دریافتی توسط گیاه و خاک را تعدیل می بخشد و میزان تبخیر و تعرق گیاه را کاهش می دهد و در نتیجه میزان نیاز آبی

ارزیابی کمی راهکارهای مختلف سازگاری با کم آبی در زمین های آبی استان فارس نشان داد که استفاده از بهینه سازی الگوی کشت، استفاده از سایبان، استفاده از مالچ کلش، تغییر نظام کشت غرقابی برنج به کشت هوازی و انتقال تولیدات سبزی و صیفی از مزرعه به گلخانه در الگوی کشت فعلی می توانند به ترتیب ۳۵ درصد (معادل ۱۶۱۲ میلیون مترمکعب در سال)، ۲۹ درصد (معادل ۱۳۳۱ میلیون مترمکعب در سال)، ۸ درصد (معادل ۳۸۴ میلیون مترمکعب در سال)، ۴ درصد (معادل ۱۸۵ میلیون مترمکعب در سال) و تقریباً ۴ درصد (معادل ۱۶۷ میلیون مترمکعب در سال) از حجم آب آبیاری کاربردی فعلی کشاورزی آبی استان (۴۶۱۹ میلیون مترمکعب در سال) بکاهد (بدون در نظر گرفتن راندمان آبیاری و توزیع غیر یکنواخت). این در حالی است که حجم آب آبیاری کاربردی در الگوی کشت بهینه (۳۰۰۷ میلیون مترمکعب در سال) بدون در نظر گرفتن راندمان آبیاری و توزیع غیر یکنواخت) با استفاده از سایبان، استفاده از مالچ کلش، تغییر نظام کشت غرقابی به نظام کشت هوازی و انتقال تولید سبزی و صیفی از مزرعه به گلخانه به ترتیب ۲۴ درصد (معادل ۷۱۳ میلیون مترمکعب در سال)، ۱۰ درصد (معادل ۲۹۲ میلیون مترمکعب در سال)، ۱ درصد (معادل ۳۷ میلیون مترمکعب در سال) و ۴ درصد (معادل ۱۳۷ میلیون مترمکعب در سال) کاهش پیدا می کند.

مقایسه راهکارهای سازگاری با کم آبی در الگوی کشت فعلی نشان داد که بهینه سازی الگوی کشت و استفاده از سایبان بیشترین اثربخشی را می توانند در سازگاری با کم آبی در کشاورزی آبی استان فارس ایجاد کنند. در الگوی کشت بهینه نیز استفاده از سایبان در باغ ها و مزارع سبزی و صیفی بیشترین تأثیر را در سازگاری با کم آبی ایجاد کرده است. باید توجه داشت که سایبان کاهش عملکرد ایجاد می کند و هزینه احداث و نگهداری دارد، بنابراین ممکن است در اولویت قرار نگیرد. این موضوع به مطالعات تکمیلی و بیشتری نیاز دارد

گیاه کاهش پیدا می‌کند (Shafiee et al., 2023)؛ در راستای اهمیت سایبان، رانا و همکاران (Mahmood et al., 2018). در راستای اهمیت سایبان، رانا و همکاران (Rana et al., 2004) با استفاده از روش‌های مختلف ایجاد سایبان به مطالعه ارتباط ریزاقلیم و آب در تاکستان‌های جنوب ایتالیا پرداختند و نشان دادند میزان تبخیر-تعرق تاکستان‌های بدون سایبان پس از آبیاری، بالا (۴/۶ میلی‌متر در روز) بود و پس از ۹ روز به حداقل مقدار خود (حدود ۴ میلی‌متر در روز) رسید. درحالی که میزان تبخیر-تعرق تاکستان‌های دارای سایبان پس از آبیاری، کمتر (۳ میلی‌متر در روز) بود و کاهش آن بسیار کند بود به‌طوری که ۲۴ روز طول کشید تا به حداقل مقدار خود (۱/۹ میلی‌متر) برسد. این محققان می‌گویند نیاز آبیاری تاکستان‌های با سایبان کمتر است تا تاکستان‌های بی‌سایبان. در همین ارتباط پژوهش‌های رتامل- سالگادو و همکاران (Retamal-Salgado et al., 2017)، عجمی و همکاران (Ajami et al., 2018)، هیرزل و همکاران (Hirzel et al., 2020) و ویلالوبوس - سوبلت و همکاران (Villalobos-Soublett et al., 2021) نیز نشان دادند که کاربرد سایبان در باغ‌ها (انگور، بلوبری و سیب) باعث صرفه‌جویی در حجم آب مصرفی می‌شود.

نتایج مطالعه کنونی نشان داد که سومین راهکار مؤثر در سازگاری با کم‌آبی، استفاده از مالچ‌کشی در باغ‌ها و مزارع است. استفاده از مالچ‌کشی همراه با کشاورزی حفاظتی باعث کاهش تبخیر از خاک می‌گردد و در نتیجه نیاز آبی گیاه کاهش می‌یابد. مطالعات بوگل و همکاران (Bogle et al., 1989) بیانگر نقش مثبت استفاده توأم سیستم آبیاری قطره‌ای و مالچ پلی‌اتیلن در افزایش عملکرد و کاهش مصرف آب در زراعت گوجه‌فرنگی بوده است، به‌طوری که عملکرد نهایی محصول در صورت استفاده از مالچ در سیستم‌های آبیاری سطحی و آبیاری قطره‌ای به ترتیب ۶۶/۷ و ۱۲۳ درصد نسبت به شاهد (آبیاری معمولی بدون استفاده از مالچ) افزایش و مصرف آب در هر دو حالت نسبت به شاهد، ۵۵

درصد کاهش یافته است. جردن و همکاران (Jordan et al., 2010) طی مطالعه‌ای نشان دادند که کاربرد مالچ‌کشی به میزان ۵، ۱۰ و ۱۵ تن در هکتار به ترتیب موجب افزایش ۱/۱، ۱/۲۵، ۱/۲۵ برابر مقدار آب قابل دسترس خاک می‌شود که در نتیجه نیاز آبی گیاه کاهش پیدا می‌کند.

نتایج مطالعه حاضر حاکی از آن است که استفاده از نظام کشت هوازی به جای کشت غرقابی برنج چهارمین راهکار مؤثر در سازگاری با کم‌آبی در استان فارس است. در همین راستا، سلطانی و همکاران (Soltani et al., 2024) طی مطالعه‌ای نشان دادند که استفاده از نظام کشت هوازی برنج به جای کشت غرقابی در استان گلستان می‌تواند اضافه برداشت آب را در بخش کشاورزی استان را به‌طور قابل توجهی (۷۰ تا ۹۰ درصد) کاهش دهد.

نتایج مطالعه کنونی نشان داد که انتقال تولید سبزی‌وصیفی از مزرعه به گلخانه پنجمین راهکار مؤثر در سازگاری با کم‌آبی در استان فارس است. گلی‌رئیزی و همکاران (Goli Raeisi et al., 2019) با استفاده از مدل SWAT و AquaCrop و با بررسی ظرفیت صرفه‌جویی آب در مدیریت کشت گلخانه در زیرحوضه مرودشت-خرامه نشان دادند مدیریت کشت گلخانه با ۲۴ درصد کاهش در تبخیر-تعرق نقش مهمی در کاهش مصرف آب در آن زیرحوضه دارد. ناصری (Naseri, 2019) طی مطالعه‌ای به مقایسه عملکرد و اجزای آن در گیاه سیر در شرایط گلخانه و مزرعه پرداخت و گزارش کرد مصرف آب در گلخانه (۶ دور آبیاری) کمتر از مصرف آب در مزرعه (۱۲ دور آبیاری) است اما عملکرد سیر در گلخانه حدود ۴ برابر عملکرد سیر در مزرعه است. مطالعات خوشکام و ساعی (Khoshkam & Saei, 2011) و رضوردی‌نژاد و همکاران (Rezaverdinejad et al., 2017) نیز حاکی از آن است که کشت در محیط گلخانه، در مقایسه با کشت مزرعه‌ای (فضای باز)، می‌تواند به کاهش حجم آب مصرفی و افزایش بهره‌وری آب بینجامد.

میلیون مترمکعب در سال) صرفه‌جویی در آب آبیاری کاربردی کشاورزی استان ایجاد کند که بخش بزرگی از این میزان صرفه‌جویی ناشی از بهینه‌سازی الگوی کشت و کاربرد سایبان در باغ‌ها و مزارع سبزی‌وصیفی استان است. این درحالی است که میزان صرفه‌جویی مدنظر وزارت نیرو (Ministry of Energy, 2021) برای استان فارس برابر با ۸۲۴ میلیون مترمکعب در سال است. این میزان برای شرایط برداشت پایدار استان (Soltani et al., 2019) برابر با ۲۶۱۵ میلیون مترمکعب در سال است. بنابراین، بر اساس نتایج مطالعه حاضر می‌توان گفت ترکیب راهکارهای سازگاری به کم‌آبی در استان فارس می‌تواند نزدیک به ۴ برابر کاهش مدنظر وزارت نیرو و ۱/۲ برابر کاهش برای شرایط برداشت پایدار صرفه‌جویی در آب آبیاری کشاورزی استان ایجاد کند. باید توجه داشت که این راهکارهای سازگاری به کم‌آبی جزء گزینه‌های ایمن برای محیط زیست هستند (Soltani & Mirzaei, 2021) و مانند گزینه‌های افزایش دسترسی به آب مثل استفاده از آب چاه‌های ژرف، انتقال آب بین حوضه‌ای، شیرین‌سازی آب دریا، بارورسازی ابرها برای طبیعت و محیط‌زیست مخاطره‌ای در پی ندارند.

نتایج مطالعه کنونی نشان داد که راهکارهای سازگاری به کم‌آبی مثل بهینه‌سازی الگوی کشت و ترکیب بهینه‌سازی الگوی کشت با کاربرد مالچ‌کشی در باغ‌ها و مزارع سبزی‌وصیفی تأثیری بر درآمد کشاورزان ندارد. ولی ترکیب الگوی کشت بهینه با کاربرد مالچ‌کشی و سایبان، ترکیب الگوی کشت بهینه با کاربرد مالچ‌کشی، سایبان و برنج‌هوازی و ترکیب الگوی کشت بهینه با مالچ‌کشی، سایبان، برنج‌هوازی و انتقال تولیدات سبزی و صیفی از مزرعه به گلخانه باعث کاهش بازده ناخالص کشاورزان استان می‌گردد. با توجه به ضرورت سازگاری با کم‌آبی در استان فارس باید به سمت استفاده از راهکارهای صرفه‌جویی آب حرکت کرد هرچند مقداری از سود کشاورزان کاهش پیدا کند. البته در این بخش دولت می‌تواند با استفاده از یارانه یا تسهیلات بانکی

نتایج مطالعه حاضر بستگی دارد به الگوی کشت فعلی، هدف مطالعه (حداقل‌سازی مصرف آب) و محدودیت‌هایی که در بهینه‌سازی تعریف شده است؛ یعنی اگر الگوی کشت فعلی و آن محدودیت‌ها تغییر یابند یا هدف چیز دیگری بود، نتایج متفاوتی حاصل می‌شد. بهینه‌سازی الگوی کشت به عواملی شامل: (۱) عملکرد، (۲) حجم آب آبیاری کاربردی، (۳) قیمت، و (۴) هزینه‌های تولید محصولات استان بستگی دارد. این عوامل هستند که با توجه به محدودیت‌ها و شرایط تعریف‌شده روی بهینه‌سازی الگوی کشت تأثیر می‌گذارند. تغییر هر یک از عوامل مذکور یا شرایط و محدودیت‌های جدید نتایج متفاوت ارائه می‌دهد. در ارتباط با مالچ‌کشی، مقدار مالچ‌کشی ۲ تن در هکتار انتخاب شده است و اگر از این میزان بیشتر انتخاب گردد، نتیجه متفاوتی حاصل می‌شود. در مورد مالچ‌کشی سطح کاربرد مالچ‌کشی کل استان به جز یونجه و برنج لحاظ شد که اگر این سطح کاربرد تغییر داده شود نیز نتیجه دیگری به دست می‌آید. در ارتباط با کاربرد سایبان نیز دوره استقرار و خصوصیات تعریف‌شده آن در مطالعه کنونی مشخص است که اگر این موارد تغییر داده شود، نتیجه متفاوت خواهد بود. در مورد جایگزینی کشت برنج‌هوازی به جای کشت غرقابی نیز فرض شده است که تمام برنج‌کاری‌های استان از غرقابی به هوازی تبدیل شوند که در این حالت نیز اگر ۵۰ درصد یا درصدهای کمتری از برنج‌کاری‌ها به هوازی تبدیل شوند طبیعتاً می‌تواند روی صرفه‌جویی آب تأثیرگذار باشد. باید این نکته را توجه داشت که پیاده‌سازی این راهکارها مستلزم ایجاد مقدمات خاص خود است. برای مثال به سرمایه‌گذاری، ادوات، دانش فنی، آموزش و موارد دیگری نیاز خواهد بود. موارد دیگری مانند خرد و کوچک‌بودن زمین‌های کشاورزی و معیشتی بودن مزارع در کشور نیز از مهم‌ترین موانع بر سر راه اجرای این راهکارها هستند.

یافته‌های مطالعه حاضر حاکی از آن است که ترکیب راهکار سازگاری با کم‌آبی می‌تواند بیش از ۶۶ درصد (۳۰۵۶)

بخشی از این هزینه‌ها یا کاهش درآمد کشاورزان را جبران کند. علاوه بر این، برای جبران ناترازی هزینه-درآمد کشاورزان پیشنهاد می‌گردد که (۱) زنجیره ارزش در زیربخش‌های مختلف زراعت و باغبانی در استان به‌منظور حذف دلال‌ها در خرید و فروش محصولات کشاورزی ایجاد شود تا از این طریق به افزایش درآمد کشاورزان کمک گردد و (۲) صادرات محصولات کشاورزی توسعه یابد و فرآیند تجارت محصولات گلخانه‌ای تسهیل گردد.

نتایج این مطالعه نشان داد که ۵ راهکار ایمن و مؤثر برای سازگاری با کم‌آبی در کشاورزی استان فارس وجود دارد که اثربخشی هر یک از آن‌ها به تنهایی در کاهش حجم آب آبیاری کاربردی در الگوی کشت کنونی بین ۴ تا ۳۵ درصد (۱۶۷ تا ۱۶۱۲ میلیون مترمکعب در سال) متغیر است. ترکیب این راه‌کارها با در نظر گرفتن شرایط و فرضیاتی در الگوی کشت کنونی و بهینه‌آستان فارس می‌تواند به ترتیب در حدود ۶۶ و ۴۸ درصد (۳۰۵۶ و ۱۴۴۴ میلیون مترمکعب در سال) در حجم آب آبیاری کاربردی صرفه‌جویی ایجاد کند. پیشنهاد می‌شود محققان، مسئولان اجرایی، سیاست‌گذاران و بهره‌برداران بخش کشاورزی با ارزیابی و مطالعات تکمیلی به سمت رفع موانع و فراهم کردن زمینه گسترش استفاده از این راهکارهای ارزشمند حرکت کنند تا علاوه بر پایداری در تولیدات کشاورزی استان، به شادابی طبیعت آن کمک کنند و از تخریب بیشتر محیط‌زیست نیز جلوگیری شود.

مراجع

- Abbasi, F., Abbasi, N., & Tavvakoli, A. (2017). Water productivity in agriculture; Challenges and prospects. *Journal of Water and Sustainable Development*. 4(1): 141-144. (In Persian)
- Agricultural Jihad Organization of Fars Province. (2023). Statistics and information on cultivated area, production and yield of agricultural and garden plants at 2017- 2021. (In Persian)
- Ajmi, A., Vazquez, S., Morales, F., Chaari, A., Hamdi El-Jendoubi, H. Abadia, A. & Larbi, A. (2018). Prolonged artificial shade affects morphological, anatomical, biochemical and ecophysiological behavior of young olive trees. *Scientia Horticulturae*. 241: 275-284.
- Akhtar, K., Wang, W., Khan, A., Ren, G., Afridi, M.Z., & Feng, Y. (2019). Wheat straw mulching offset soil moisture deficient for improving physiological and growth performance of summer sown soybean. *Agricultural Water Management*. 211 (1): 16-25.
- Bassett, C., Wisniewski, M., Artlip, T., & Norelli, J. (2006). Global analysis of genes regulated by low temperature and photoperiod in peach bark. *Journal of American Society of Horticultural Science*. 131(4): 551-563.
- Bogle, C.R., Hartz, T.K., & Nanez, C. (1989). Comparison of subsurface trickle and furrow irrigation on plastic mulched and bare soil for tomato production. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 114(1): 40-43.
- Cai, T., Zhang, Y., Huang, H., Huang, B., Yang, Z., & Zhao, C. (2015). Effects of different straw mulch modes on soil water storage and water use efficiency of spring maize (*Zea mays* L.) in the Loess Plateau of China. *Plant Soil Environmental*. 61(6): 253-259.
- Chacha, J.M., Thirumalai, M., Idawa, O., Chilwea, J., Kilamba, C., Hussy, B.D., Ishaq, H., Rajendran, K. (2023). Greenhouse and open-field Tomato farming. A comparison through yield and growth parameters investigated in Dar es Salaam. *Innovations in Agriculture*. 6: e32876. <https://doi.org/10.25081/ia.2023-02>
- Chouchane, H., Krol, M. S., & Hoekstra, A. 2020. Changing global cropping patterns to minimize national blue water scarcity. *Hydrology and Earth System Sciences*. 24: 3015-3031. <https://doi.org/10.5194/hess-24-3015-2020>

- Czyzyk, K.A., Bement, S.T., Dawson W.F., and K. Mehta, K. (2014). Quantifying water savings with greenhouse farming, *IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC 2014)*, San Jose, CA, USA, 325-332. <https://doi:10.1109/GHTC.2014.6970300>
- Dadrasi, A., Torabi, B., Rahimi, A., Soltani, A., & Zeinali, E. (2020). Parameterization and Evaluation of a Simple Simulation Model (SSM-iCrop2) for Potato (*Solanum tuberosum* L.) Growth and Yield in Iran. *Potato Research*. 63: 545-563.
- Esfaram Meshgin Shahr, H., Mirshekari, B., Hassanpanah, D., Farahvash, F., & Yarnia, M. (2022). Effect of sowing depth on qualitative characteristics tuber yield and water use efficiency of potato cultivars in autumn and spring cultivations of moderate and cold regions. *Environmental Stresses in Crop Sciences*. 15(1): 259-273. (in Persian)
- Eslami, A., & Farzamnia, M. (2009). Effect of mulch material on increasing soil water holding capacity and Pistachio yield. *Iranian Journal of Irrigation and drainage*. 2(3): 79-87. (in Persian)
- Foroughifar, H., & Pourkasemani, M. (2003). *Soil Sciences and Management*. Mashhad University Publication. 336 pages. (In Persian)
- Ghasemi, M.M., Karamouz, M. & Shui, L.T. (2016). Farm-based cropping pattern optimization and conjunctive use planning using piece-wise genetic algorithm (PWGA): a case study. *Modeling Earth Systems and Environment*. 2(1), 1-12.
- Gheshlaghi, P., Kamrani, E., Naji, A., Daliri, M. (2022). Impacts of the seawater desalination plants' discharges on survival and ionic balance of Blue swimmer crab, *Portunus segnis* (Forsk., 1775), in the northern Persian Gulf. *Iranian Journal of Health and Environment*. 15(2): 245-260. (In Persian)
- Gindaba, J. & S. J. E. Wand. (2005). Comparative effects on evaporative cooling, kaolin particle film and shade net on sunburn and fruit quality in apples. *HortScience*. 40(3): 592-596.
- Goli Raeisi, L., Morid, S., Delavar, M. (2019). Assessment of water saving and increasing agriculture water productivity policies in an integrated framework. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*. 13(5): 1410-1425. (in Persian)
- Hemmati, A., Ghorbani, Kh., & Ebrahimi, K. (2022). Assessment of inter-basin water transfer projects damages in Iran. *Journal of Water and Irrigation Management*. 12(1): 139-156. (in Persian)
- Hirzel, J., Moya-Elizondo, E., Herndndez, M., Guzman, P., & Gonzalez, D. (2020). Effect of shade cloth on fruit and leaf nutritional concentration and bitter pit incidence in 'Fuji' apples. *Chilean journal of agricultural research*. 80: 535-545.
- Jafarnodeh, S., Soltani, A., Soltani, E., Dadrasi, A., & Rahban, S. (2024). Application of SSM-iCrop2 Model for Yield and Water Balance Simulation under Farmers' Conditions. *Water and Soil*. 38(3): 301-319. (in Persian)
- Jahantigh, H. (2022). Optimization of Agricultural Cropping Pattern in order to Water Use Management in Gorgan. *Journal of Irrigation and Water Engineering*. 12(3): 369-385. (in Persian)
- Jordán, A., Zavala, L. M. and Gil, J. (2010). Effects of mulching on soil physical properties and runoff under semi-arid conditions in southern Spain. *Catena*, 81, 77-85.
- Jin, H., Qingjie, W., Hongwen, L., Lijin, L., & Huanwen, G. (2009). Effect of alternative tillage and residue cover on yield and water use efficiency in annual double cropping system in North China Plain. *Soil and Tillage Research*. 104: 198-205.
- Kavousi Heidari, A., Roozbahani, R., Eftekhari, M. (2019). Deep groundwater resources: characteristics and constraints. *Journal of Water and Sustainable Development*. 6(1): 67-76. (in Persian)
- Keramat, S., Torabi, B., Soltani, A., Zeinali, E. (2023). Parameterization and evaluation of SSM-iCrop2 model to simulate the growth and yield of rice in Iran. *Journal of Plant Production Research*. 30(1): 21-47. (in Persian)
- Khoshkam, S., & Saei, M. (2011). Agronomic and economic study of the most appropriate time of continuous lettuce cultivation in greenhouse and open space conditions in Jiroft area. *Journal of Soil and Plant Interactions*. 2(3): 29-40. (in Persian)

- Mahmood, A., Hu, Y., Tanny, J. & Asante, E. A. (2018). Effects of shading and insect-proof screens on crop microclimate and production: A review of recent advances. *Scientia Horticulturae*. 241: 241-251.
- Matteau, J.P., Célécourt, P., Létourneau, G., Gumiere, T., & Gumiere, S.J. (2022). Effects of irrigation thresholds and temporal distribution on potato yield and water productivity in sandy soil. *Agricultural Water Management*. 264: 107483.
- Ministry of Agriculture-Jihad. (2024). Statistics and information on cultivated area, production and yield of agricultural and garden plants in 2024. (In Persian) available at: <https://maj.ir/>
- Ministry of Energy. (2019). Second round of statistics. Available at: <https://data.wrm.ir/st/161>
- Ministry of Energy. (2021). Fars province water scarcity adaptation programs. . Available at: <https://www.wsanw.ir/st/56/>
- Mirzaei, A., Soltani, A., Abbasi, F., Zeinali, E., & Mirkarimi, Sh. (2024a). Development of water accounting system for irrigated agricultural lands of Fars province. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 55(2): 219-244. (in Persian)
- Mirzaei, A., Soltani, A., Abbasi, F., Zeinali, E., & Mirkarimi, Sh. (2024b). Estimation of withdrawal water for Fars Province agriculture based on water balance modelling. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 55(6): 963-978. (in Persian)
- Mirzaei, A., Soltani, A., Abbasi, F., Zeinali, E., & Mirkarimi, Sh. (2024c). Optimizing the cropping pattern of Fars province irrigated lands with the aim of adaptation to water scarcity. *Journal of Water and Soil Science*. (Accepted) (in Persian)
- Mohammadi, A. (2023). A perspective on the position of potato crops in the country's food security in the horizon of 1430. *Journal of Applied Potato Sciences*. 6(11): 13-22. (in Persian)
- Mohammadi, S., Zeinali, E., Soltani, A., Torabi, B. (2022). Parameterization and evaluation of SSM_iCrop2 model to simulate the growth and yield of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in Iran. *Iranian Journal of Pulses Research*. 13(1): 37-54. (in Persian)
- Mohammadian, R. (2020). Management package to reduce irrigation water and increase water use productivity in sugar beet cultivation. *Journal of Water Management in Agriculture*. 6(2): 103-114. (in Persian)
- Møller, Ch., March-Salas, M., Kuppler, J., De Ferenne, P., and Scheepens, J.F. (2023). Intra-individual variation in *Galium odoratum* is affected by experimental drought and shading. *Annals of Botany*. 131: 411–422.
- Montazar, A., Riazi, H., & Behbahani, S. (2010). Conjunctive water use planning in anirrigation command area. *Water Resources Management*. 24: 577–596.
- Momeni, D., Javadimoghaddam, J., & Roustapour, O. (2022). Investigating the Effect of Using Shading Net on Climate Change in Pistachio and Apricot Gardens. *Journal of Agricultural Mechanization*. 7(1): 49-72. (in Persian)
- Najjar, H., Taherian, M., & Saeidnia, F. (2023). Comparison of water consumption in direct cultivation and cotton transplanting under farmers' conditions. *Journal of Water Conservation and Efficiency*. 1(7): 52-57.
- Naseri, A., Abbasi, Fariborz, F., Akbari, M. (2017). Estimating agricultural water consumption by analyzing water balance. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*. 18(68): 17-32. (in Persian)
- Naseri, M. (2019). Comparison of yield and yield components of garlic (*Allium sativum* L.) under greenhouse and field conditions. *Journal of Greenhouse Vegetable*. 2(2): 45-50. (in Persian)
- Nehbandani, A., Barani, H., Soltani, A., Torabi, B., & Sharifian, A. (2023). Estimating Rangeland Production in Current and Future Conditions Using SSM-iCrop2 Model in Iran. *Agricultural Research*. 12(3): 346-355.
- Oliveira, M., Teles, J., Barbosa, P., Olazabal, F., & Queiroz, J. (2014). Shading of the fruit zone to reduce grape yield and quality losses caused by sunburn. *OENO One*. 48(3): 179–187. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2014.48.3.1579>.

- Osama, S., Elkholy, M., and Kansoh, R. M. (2017). Optimization of the cropping pattern in Egypt. *Alexandria Engineering Journal*. 56: 557–566, <https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.04.015>.
- Paravar, E. 2017. Studying the effect of wheat residue mulch on soybean yield and water consumption in Gorgan: Experiment and simulation (M. Sc. Thesis). Faculty of Plant Production. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. Gorgan. Iran. (in Persian)
- Pourshirazi, Sh., Soltani, A., Zeinali, E., & Torabi, B. (2023) Parameterization and evaluation of a simple simulation model (SSM-iCrop2) for Alfalfa (*Medicago sativa* L.) Growth and Yield in Iran. *Journal of Agroecology*. 15(1): 169-189. (in Persian)
- Rana, G., Katerji, N., Introna, M., and Hammami, A. (2004). Microclimate and plant water relationship of the “overhead” table grape vineyard managed with three different covering techniques. *Scientia Horticulturae*. 102: 105-120.
- Retamal-Salgado, J., Vasquez, R., Fischer, S., Hirzel, J., and Zapata, N. (2017). Decrease in artificial radiation with netting reduces stress and improves rabbit-eye blueberry productivity (*Vaccinium virgatum* Aiton) ‘Ochlockonee’ productivity. *Chilean Journal of Agricultural Research*. 77: 226-233.
- Rezavardinejad, V., Shabanian, M., Besharat, S., & Hasani, A. (2017). Determination of crop water requirement, crop coefficient and water use efficiency of greenhouse-grown cucumber and tomato (Case study: Urmia region). *Journal of Soil and Plant Interactions*. 8(3): 27-40. (In Persian)
- Rezvani Moghaddam, P., Koocheki, A., Molafilabi, A., & Seyyedi, S.M. (2013) The effects of different levels of applied wheat straw in different dates on saffron (*Crocus sativus* L.) daughter corms and flower initiation criteria in the second year. *Saffron Agronomy and Technology*. 1(1): 55-70. (In Persian)
- Shafiee, L., Abdolahi-Ezzatabadi, M., Panahi, B. (2023). Economic, financial and environmental evaluation of canopy use in pistachio orchards. *Pistachio Science and Technology*. 8(14):29-50. (In Persian)
- Soltani, A., Alimagham, S.M., Nehbandani, A., Torabi, B., Zeinali, E., Dadrasi, A., Zand, E., Ghassemi, S., Pourshirazi, Sh., Alasti, O., Hosseini, R.S., Zahed, M., Arabameri, R., Mohammadzadeh, Z., Rahban, S., Kamari, H., Fayazi, H., Mohammadi, S., Keramat, S., Vadez, V., Van Ittersum, M.K., Sinclair, T.R. (2020a). SSM-iCrop2: A simple model for diverse crop species over large areas. *Agricultural Systems*. 182:102855.
- Soltani, A., Alimagham, S.M., Nehbandani, A., Torabi, B., Zeinali, E., Zand, E., Vadez, V., Van Loon, M.P., Van Ittersum, M.K. (2020b). Future food self-sufficiency in Iran: A model-based analysis. *Global Food Security*. 24: 100351.
- Soltani, A., Jafarnode, S., Dadrasi, A., Rahban, S., Nazeri, M., Zeinali, E., Najafinejad, A., Torabi, B., Kazemi, H. (2022). Development of a provincial system for water balance and water accounting in agricultural lands: case study of Golestan province. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, research project report. 124 pages. (In Persian)
- Soltani, A., Jafarnode, S., Zeinali, E., Gharekhloo, J., Torabi, B. (2024). Assessing aerobic rice systems for saving irrigation water and paddy yield at regional scale. *Paddy and Water Environment*. 22 (2), 271-284. <https://doi.org/10.1007/s10333-023-00966-2>
- Soltani, A., Mirzaei, A., Jafarnodeh, S., Zeinali, E., Mirkarimi, Sh. 2024. Adaptation of irrigated agriculture in Golestan province to water scarcity through optimizing cropping pattern. *Journal of Water and Soil Conservation*. (Accepted) (In Persian)
- Soltani, A., & Mirzaei, A. (2021). *Sustainable agriculture*. Sirang Publication. 384 Pages. (In Persian)
- Soltani, A., & Sinclair, T.R. (2012). *Modeling Physiology of Crop Development, Growth and Yield*. CABI Publisher. 312 p.
- Soltani, A., Zand, E., Alimagham, S. M., Nehbandani, A., Barani, H., Soltani, E., Torabi, B., Zeinali, E., Mirkarimi, Sh., Joulaei, R., Khosravian, T., Habibpour Kashefi, E., Jafarnode, S., Dadrasi, A., Ghasemi, S., Rahban, S., Pourshirazi, Sh., Bahrehmand, A., Dehghani, A. A., Eshraghi, F., Bahmani, M., Fatah Taleghani, D., Ahmadi, K., Mohammadrezaei, M., Goli, Sh., Alasti, O., Hoseini, R., Zahed, M., Fayyazi, H., Kamari, H., Arabameri, R., Mohammadzadeh, Z., Mohammadi, S., Keramat, S.,

- Sosaraei, N., Asheanvar, M., Ahmadi, M., and Taghdisi Naghib, R. (2019). Analysis of the country's food security until 2050 by modeling the correlation of water, land, food and environment: perspective and necessary policies. Agricultural Research, Education and Extension Organization and Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, research project report. (In Persian)
- Statistical Center of Iran. (2023). Available at: <https://amar.org.ir/statistical-information>
- Taheri, Sh., Soltani, A., Behnam, K., Nazeri, M., Shakeri, E. (2021). Modelling the effect of seedling culture on yield and water use of maize under Gorgan environmental conditions. *Journal of Agroecology*. 13 (2): 307-324. (In Persian)
- Taheriyoun, M., Alavi, V., Ahmadi, A. (2016). Risk analysis of wastewater reuse in agriculture using bayesian network. *Journal of Civil Engineering*. 48(1): 101-109. (In Persian)
- Villalobos-Soublett, E., Gutiérrez-Gamboa, G., Balbontín, C., Zurita-Silva, A., Ibacache, A., and Verdugo-Vásquez, N. (2021). Effect of Shading Nets on Yield, Leaf Biomass and Petiole Nutrients of a Muscat of Alexandria Vineyard Growing under Hyper-Arid Conditions. *Horticulturae*. 7, 445. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7110445>.
- Ye, Q., Li, Y., Zhuo, L., Zhang, W., Xiong, W., Wang, C., and Wang, P. (2018). Optimal allocation of physical water resources integrated with virtual water trade in water scarce regions: A case study for Beijing, China, *Water Res.*, 129, 264–276, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.11.036>
- Zolfagharan, A., Alizadeh, A., Khavari, S., Bannayan, M., & Ansari, H. (2016). Investigation and comparison of water productivity in direct and transplant seeding of corn in different irrigation regimes. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*. 10(4) 508-519. (In Persian)

Assessment of options to reduce irrigation demand and adaptation to water scarcity in Fars province

A. Mirzaei, A. Soltani*, F. Abbasi, E. Zeinali, Sh. Mirkarimi

***Corresponding Author:** Department of Agronomy, Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.

Received: 20 January 2025, **Accepted:** 9 March 2025

Email: afshin.soltani@gmail.com

[https://doi.org/ 10.22092/idser.2025.368347.1606](https://doi.org/10.22092/idser.2025.368347.1606)

Introduction

Over-withdrawal of water in the agricultural sector of Iran is one of the most important factors that threatens the sustainability of agricultural production and natural resources. Therefore, appropriate approaches should be used to eliminate this factor. In this study, the water saving capacity in the irrigated agricultural sector of Fars province was examined using some options that decrease irrigation demand in fields and orchards. These options are: (1) optimization of cropping pattern with the aim of minimizing water use, (2) using shade net in gardens and vegetable farms, (3) using straw mulch in gardens and farms through implementation of conservation tillage, (4) changing the current flooded rice cultivation system to aerobic system, and (5) transferring vegetable production from the farm to the greenhouse. The effects of the options were assessed individually and in combination.

Methodology

The System for regional Agricultural Water balance and Accounting (SAWA) set up for irrigated agriculture lands in Fars province was used. The core of this system consists of a plant simulation model (SSM-iCrop2). For each of the water saving option of this study, a separate SAWA system was prepared and the amount of irrigation water used in agriculture in the province was estimated and compared. The system provides crop yield and irrigation water under farmer's and potential conditions as influenced by climate, soil, management and crop. The system estimates were based on 10-year meteorological data (2011-2021), 5-year average crop area statistics (2017-2021), and yield, price, and cost of production data for plants in 2021.

Results and Discussion

The results showed that the applied irrigation water in agriculture in the province for farmers' conditions (not for potential or optimal conditions) under the current cropping pattern is 4619 million cubic meters per year (net irrigation water without considering irrigation efficiency and uneven water distribution). Optimization of the cropping pattern reduced this figure by 35% (a reduction equivalent to 1616 million cubic meters per year). Optimizing the cropping pattern was done with the aim of minimizing the amount of irrigation water applied under farmers' conditions in the entire province provided that the farmers' profits in the optimized pattern would not change and the area under cultivation of perennial plants and legumes, which play an important role in agricultural sustainability, would not decrease. The **implementation** of 2 t/ha straw mulch via conservation tillage for all crops except for rice and alfalfa in the current and optimal cropping patterns reduced the net applied water by 8 and 10%, respectively (equivalent to 384 and 292 million cubic meters per year), the use of shade net (decreases solar radiation by 50%) during the summer months in the current and optimal cropping patterns reduced the applied water by 29 and 24%, respectively (equivalent to 1331 and 713 million cubic meters per year), and the use of aerobic rice cultivation system instead of flooding system in the current and optimal cropping patterns reduced the applied water by 4 and 1%, respectively (equivalent to 185 and 37 million cubic meters per year). Transferring vegetable production from the field to

the greenhouse in both the current and optimal cultivation patterns was able to reduce the applied irrigation water by 4 percent (equivalent to 167 and 137 million cubic meters per year, respectively). However, combination of water saving options in the current and optimal cropping patterns could save irrigation water by 66 and 48% (equivalent to 3048 and 1444 million cubic meters per year), respectively.

Conclusions

The findings of this study indicate that the evaluated options provide safe and effective solutions for addressing water scarcity in the irrigated agriculture of Fars Province. Therefore, it is recommended that executive officials, policymakers, and agricultural sector stakeholders work toward eliminating barriers and promoting the widespread adoption of these valuable options through evaluation and additional studies. By doing so, sustainable agricultural practices can be achieved, contributing to a healthier environment and preventing further ecological degradation.

Keywords: Aerobic rice cultivation, Cropping pattern optimization, Mulch, Shade net.



نوع مقاله: پژوهشی

شبیه‌سازی اثر نسبت راس سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای بر ضریب آبگذری با نرم افزار

FLOW 3D

صائب الغزی^۱ و جواد مظفری^{۲*}^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه اراک، ایران.^{۲*} دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه اراک، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۱۸

چکیده

سرریزهای کنگره‌ای، نسبت به سرریزهای خطی، طول بیشتری دارند و دبی بیشتری را در هت ثابت آب از خود عبور می‌دهند. در این پژوهش به بررسی ضریب آبگذری در سرریز کنگره‌ای مثلثی و دوزنقه‌ای با استفاده از نرم افزار FLOW 3D و مدل $k - \varepsilon RNG$ پرداخته شد. بررسی‌ها نشان داد که با افزایش هت نسبی (H_T/P) و نیز با افزایش نسبت بزرگنمایی، استغراق موضعی و تداخل تیغه‌های ریزشی افزایش می‌یابد و سبب کاهش ضریب دبی در سرریز کنگره‌ای مثلثی و دوزنقه‌ای می‌شود. نتایج بررسی‌ها نشان داد با افزایش نسبت راس، تا ۱۲/۷ درصد ضریب دبی کاهش می‌یابد. با افزایش عرض راس تا ۲۰ سانتی‌متر در سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای، منطقه‌ای بزرگ‌تر در بالادست راس سرریز با سرعت کمتر ایجاد می‌شود و آشفتگی بیشتری در جریان نزدیک به راس به وجود می‌آید. از طرفی، ایجاد سرعت کمتر در راس سبب حرکت جریان به سمت کناره‌ها می‌شود که حرکت جریان به سمت کناره‌ها سبب ایجاد آشفتگی بیشتری در کناره‌ها می‌شود و ضریب دبی را کاهش خواهد داد. نتایج تحقیق همچنین نشان داد که سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای با عرض راس در کناره‌ها، عملکرد کمتری نشان می‌دهد زیرا میزان تداخل تیغه‌های ریزشی و استغراق موضعی در راس آن بیشتر است.

واژه‌های کلیدی: استغراق موضعی، تداخل تیغه ریزشی، سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای، سرریز کنگره‌ای مثلثی

مقدمه

بیشتری دارد. محمدی و یاسی (Mohammadi & yasi, 2008)

سرریزها در کانال‌های انتقال آب و رودخانه‌ها برای تنظیم کردن سطح آب و کنترل جریان سیل استفاده می‌شوند. عوامل محدود کننده مانند توپوگرافی و عرض محدود ساخت سرریز ممکن است اجازه ساخت سرریز با طول تاج زیاد را ندهد. یکی از راهکارهای افزایش آبگذری و افزایش راندمان عبور آب از سرریز، استفاده از سرریز با تاج غیرخطی است. تکل و همکاران (Tacail et al., 1990) می‌گویند در عرض‌های یکسان، سرریزهای کنگره‌ای دو سیکلی از سرریزهای کنگره‌ای سه سیکلی بهتر عمل می‌کنند. ویلمور (Willmore, 2004) با پژوهش در باره سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای در سیکل‌های مختلف نشان داد که سرریز با تاج اوجی، نسبت به سرریز با تاج نیم‌دایره و ربع‌دایره، راندمان

بیشتری دارد. محمدی و یاسی (Mohammadi & yasi, 2008) نشان دادند که پلان قوسی سرریز کنگره‌ای، نسبت به سرریزهای کنگره‌ای دوزنقه‌ای و مثلثی با طول تاج یکسان، کارایی هیدرولیکی بهتری دارد. طالب بیدختی و زهرایی‌فرد (Taleb bidokhti & Zahrayi fard, 2008) نشان دادند که با تیزتر شدن نوک راس سرریز کنگره‌ای، کارایی سرریز افزایش می‌یابد و با کاهش زاویه بین دیواره کانال و امتداد جریان، میزان کارایی سرریز کنگره‌ای افزایش می‌یابد. کومار و همکاران (Kumar et al., 2011) با مطالعه آزمایشگاهی در زمینه ضریب دبی سرریز کنگره‌ای مثلثی نشان دادند که کاهش زاویه راس سرریز، طول ناحیه تداخل جریان افزایش می‌یابد و ضریب دبی جریان سرریز کنگره‌ای کاهش محسوس پیدا می‌کند. اژدري مقدم و همکاران

بنابراین می‌توان برای طراحی سرریزهای کنگره‌ای با دقت قابل قبولی، از مدل‌های عددی در نرم‌افزار Flow3d استفاده کرد. از طرفی، نسبت راس پارامتری موثر بر تداخل تیغه‌های ریزشی در سرریز کنگره‌ای است که تغییرات آن می‌تواند سبب تغییر در ضریب آبگذری شود و در این پژوهش به کمک شبیه‌سازی بررسی خواهد شد.

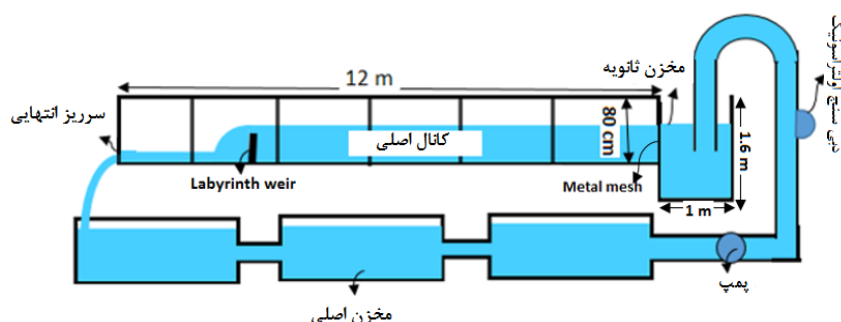
مواد و روش‌ها

کانال آزمایشگاهی

آزمایش‌های مدل هیدرولیکی در آزمایشگاه تحقیقاتی هیدرولیک گروه علوم و مهندسی آب اجرا گردید که شمای فلوم مورد استفاده در شکل (۱) آمده است. مدل هیدرولیکی مورد استفاده در داخل یک فلوم شیشه‌ای به طول ۱۲ متر، ارتفاع و عرض ۸۰ سانتی‌متر آزمایش شد. این فلوم دارای پمپی با حداکثر دبی ۹۰ لیتر در ثانیه است. دبی توسط دبی‌سنج اولتراسونیک با دقت ± 0.01 لیتر بر ثانیه اندازه‌گیری می‌گردد. برای اندازه‌گیری تراز سطح آب نیز از چند عمق‌سنج ریلی استفاده می‌شود که در طول فلوم قابل حرکت است.

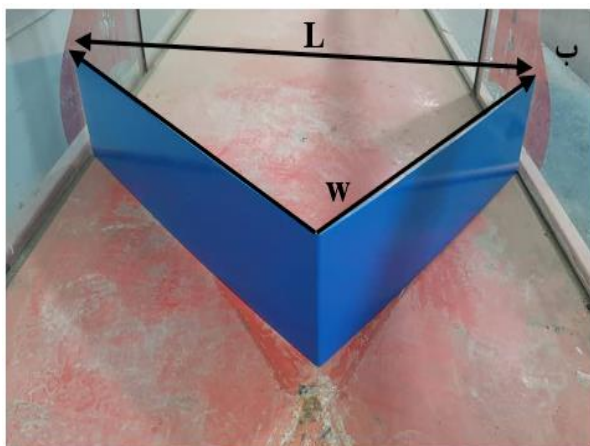
شکل (۲) نمایی از دبی‌سنج اولتراسونیک و سرریز آزمایشگاهی مورد استفاده را نشان می‌دهد. جنس مدل آزمایشگاهی از ورق آهنی به ضخامت ۴ میلی‌متر و ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر است. طول تاج مدل ۱۲۶ سانتی‌متر و نسبت L/W برابر با ۱/۵۸ است. L طول تاج و W عرض کانال است.

(Azhdari moghadam et al., 2012) پارامترهای جریان سرریز کنگره‌ای مثلی را با مدل عددی $k - \varepsilon RNG$ در نرم‌افزار Flow-3D تعیین و با داده‌های تالیس و همکاران (Tullis et al., 1995) مقایسه کردند. نتایج این مقایسه نشان داد که مدل عددی رفتار هیدرولیکی سرریز کنگره‌ای مثلی را به‌خوبی شبیه‌سازی می‌کند. کروکستون و همکاران (Crookston et al., 2010) عملکرد هیدرولیکی سرریزهای کنگره‌ای دوزنقه‌ای را بررسی و گزارش کردند کارایی سرریز با افزایش زاویه راس افزایش می‌یابد. میرزایی و همکاران (Mirzayee et al., 2022) با بررسی عددی ضریب دبی سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای در زاویه‌های مختلف نسبت به امتداد جریان با کمک نرم‌افزار Flow3d نشان دادند که افزایش زاویه سرریز در امتداد جریان و در طول راس، سبب افزایش ضریب دبی جریان می‌گردد. آیدین و همکاران (Aydin et al., 2024) با بررسی تعیین رفتار جریان موثر بر عملکرد دبی سرریزهای کنگره‌ای دوزنقه‌ای با استفاده از مدل‌های عددی و فیزیکی نشان دادند شرایط جریان در سیکل‌های پایین دست (یعنی تداخل ریزشی و استغراق موضعی) و همچنین ویژگی‌های جریان در چرخه‌های بالادست (یعنی جریان‌های جانبی مؤثر) تأثیرات قابل‌توجهی بر راندمان هیدرولیکی سرریزهای کنگره‌ای دارند. سلیم و همکاران (Selim et al., 2024) با بررسی مشخصات جریان و اتلاف انرژی در سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای نتیجه گرفتند که تطابق خوبی بین نتایج تجربی و عددی وجود دارد.



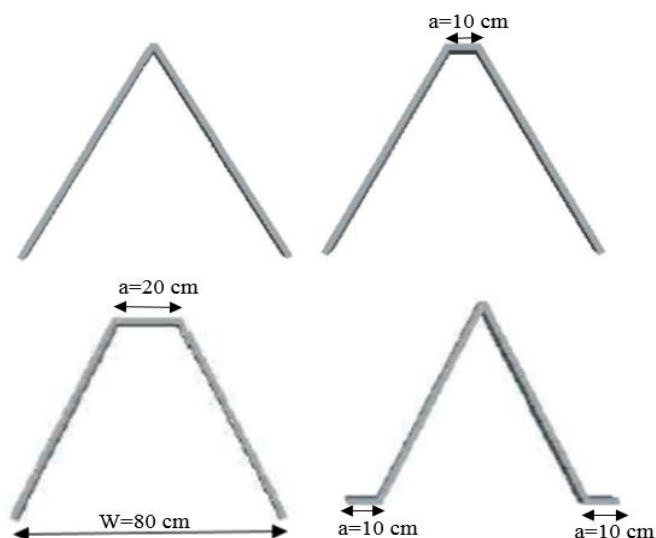
شکل ۱- شمای فلوم آزمایشگاهی

Fig. 1- Laboratory flume schematic



شکل ۲- الف) دبی سنج اولتراسونیک و ب) مدل آزمایشگاهی سرریز کنگره‌ای مثلثی

Fig. 2- Laboratory models of triangular labyrinth weir



شکل ۳- مدل‌های شبیه‌سازی شده با $L/W=2$ برابر با ۲

Fig. 3- Simulated models with $L/W=2$

مدل‌های شبیه‌سازی شده

ابتدا مدل آزمایشگاهی با مدل شبیه‌سازی شده مقایسه گردید. پس از آن ۱۰ مدل سرریز کنگره‌ای بررسی شد. سه مدل سرریز کنگره‌ای مثلثی و شش مدل سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای با بزرگ‌نمایی‌های $L/W=2$ ، $L/W=3$ و $L/W=4$ شبیه‌سازی گردید. شکل (۳) مدل‌های شبیه‌سازی شده با L/W برابر با ۲ را نشان می‌دهد. برابر این شکل، نسبت راس برابر است با نسبت عرض راس (a) به عرض سرریز (W).

جدول (۱) مدل‌های شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد.

مدل دهم، سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای با راس مدل در کناره‌های سرریز است، به‌طوری‌که ۱۰ سانتی‌متر از عرض راس در کناره‌چپ و ۱۰ سانتی‌متر در کناره‌راست قرار گرفته است. همچنین زاویهٔ جدارهٔ مدل با دیوارهٔ کانال برای سرریز کنگره‌ای مثلثی، سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای با عرض راس ۱۰ سانتی‌متر و برای سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای با عرض راس ۲۰ سانتی‌متر در جدول آمده است.

جدول ۱- مدل‌های شبیه‌سازی شده

Table 1- Simulated models

مدل Model	شکل سرریز Weir Plan	L/W	نسبت راس Apex Ratio	زاویه سرریز با جریان (درجه) Weir angle with flow (degrees)
1	مثلثی	2	0	30
2	دو زنگه‌ای	2	0.125	27.8
3	دو زنگه‌ای	2	0.250	25.4
4	مثلثی	3	0	19.4
5	دو زنگه‌ای	3	0.125	18
6	دو زنگه‌ای	3	0.250	16
7	مثلثی	4	0	14.5
8	دو زنگه‌ای	4	0.125	13
9	دو زنگه‌ای	4	0.250	11.4
10	دو زنگه‌ای	2	0.250*	25.4

*عرض راس در کناره‌ها قرار گرفته است.

رابطه‌های حاکم و شرایط مرزی

محدود حل می‌کند. این رابطه‌ها در دستگاه مختصات

به منظور شبیه‌سازی میدان جریان، از نرم افزار-Flow 3D استفاده گردید. این نرم افزار برای تحلیل سه بعدی جریان رابطه‌های ناویراستوکس را با استفاده از روش حجم

$$V_f \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial(pvA_x)}{\partial x} + \frac{\partial(pvA_y)}{\partial y} + \frac{\partial(pvA_z)}{\partial z} = R_{SOR} \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{1}{p} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{1}{p} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y \quad (3)$$

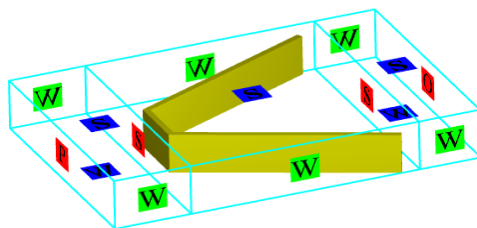
$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{1}{p} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z \quad (4)$$

که در آن (u, v, w) : مولفه های سرعت، (A_x, A_y, A_z) : کسری از مساحت مرتبط با جریان، (G_x, G_y, G_z) : شتاب جرمی، (f_x, f_y, f_z) : شتاب لزوجت در جهت های x, y, z ، P : چگالی سیال، R_{SOR} : ترم چشمه، V_f : کسری از حجم مرتبط با جریان و P : فشار است (Ghasemzadeh, 2024). در نرم افزار Flow-3d برای شبیه سازی سطح آزاد از روش (VOF) استفاده می شود که در این روش با حل رابطه (5)، F به عنوان جزو حجم سیال در یک سلول سطوح آزاد محاسبه می شود (Ghasemzadeh, 2024).

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left(\frac{\partial}{\partial x} (FuA_x) + \frac{\partial}{\partial y} (FvA_y) + \frac{\partial}{\partial z} (FwA_z) \right) = 0 \quad (5)$$

اگر $F=0$ باشد، سلول پر از هوا و اگر $F=1$ باشد، سلول پر از آب است. همچنین برای حل آشفتگی میدان جریان نیز از مدل آشفتگی $K-\epsilon$ از نوع RNG استفاده گردید. دلیل

انتخاب این مدل آن بود که یک ترم اضافی نسبت به سایر رابطه‌های آشفتگی دارد که برای حل رابطه‌های مربوط به آشفتگی جواب دقیق‌تری می‌دهد (Kahe et al., 2016). در پژوهش حاضر، در ورودی جریان از شرط مرزی عمق ۴، جریان ۱، خروجی از شرط مرزی جریان خروجی ۲، دیواره‌ها



شکل ۴- شرایط مرزی برای سرریزهای کنگره‌ای شبیه‌سازی شده
Fig. 4- Boundary conditions for simulated labyrinth weirs

تایید توانایی مدل، سرریز کنگره‌ای، تجزیه و تحلیل داده‌های به دست آمده از نرم افزار دنبال می‌شود. نرم‌افزار Flow3D یک شبکه مش‌بندی سه بعدی متشکل از سلول‌های مکعب مستطیلی برای میدان مورد نظر ایجاد می‌کند. به همین منظور در ابتدا با استفاده از نرم‌افزار Autocad مدل سه‌بعدی مورد نظر تولید می‌شود و پس از آن نتایج حاصل به نرم‌افزار Flow3D وارد می‌شود و شبکه‌بندی و شرایط مرزی در نرم‌افزار صورت می‌گیرد. سرانجام برای مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی از پارامتر ضریب دبی استفاده می‌شود. برای تعیین ضریب دبی از رابطه زیر استفاده می‌گردد (Tullis et al., 1995):

$$Q = \frac{2}{3} C_d L \sqrt{2gH_T^3} \quad (6)$$

که در آن Q : دبی عبوری از سرریز کنگره‌ای بر حسب مترمکعب بر ثانیه، C_d : ضریب دبی سرریز کنگره‌ای، L : طول موثر سرریز کنگره‌ای بر حسب متر و H_T : هد کل آب روی سرریز بر حسب متر است.

معیار ارزیابی مدل

عملکرد مدل مورد استفاده در این پژوهش بر پایه محاسبه جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین

بیشترین مش (تعداد سلول) مربوط به سرریز کنگره‌ای مثلی با بزرگنمایی ۴ و هد ۱۵ سانتی‌متر به تعداد کل ۹۵۱۵۷۲ سلول، و کمترین مش مربوط به سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای با عرض راس ۲۰ با بزرگنمایی ۲ و هد ۱/۵ سانتی‌متر به تعداد کل ۳۱۳۲۵۲ سلول است. دلیل تغییر در مقادیر مش‌بندی، تغییر در عمق مورد بررسی است و برای کاهش زمان اجرای برنامه، با کاهش عمق مورد بررسی تعداد مش‌بندی عمودی نیز کاهش یافته است و حداکثر تا ۳ سانتی‌متر بالای عمق مش‌بندی اجرا شده است. مش‌ها در کنار دیواره ریزتر در نظر گرفته شد و با کاهش اندازه مش‌ها و اجرای مدل، نهایتاً ریزترین مش بدون تغییر در جواب نهایی به دست آمده استفاده گردید. پس از انتخاب ابزار عددی، اولین گام برای شبیه‌سازی عددی بررسی عملکرد مدل برای شبیه‌سازی است. بدین منظور با استفاده از نرم‌افزار عددی FLOW-3D نمونه در کانال یکسانی با نمونه شبیه‌سازی شده مقایسه می‌شود. با مقایسه نتایج شبیه‌سازی و داده‌های موجود، ابزار عددی صحت‌سنجی می‌شود و اگر خطای شبیه‌سازی قابل قبول باشد، از مدل و نرم‌افزار مورد نظر استفاده خواهد شد. بنابراین پس از صحت‌سنجی و

³Wall

⁴Symmetry

¹Specified pressure

²Out Flow

مربعات خطا (MSE) ارزیابی شد است. دو پارامتر آماری که

نتایج و بحث

در مقایسه کارایی مدل‌ها از آن‌ها بهره گرفته شده است عبارت‌اند از:

به منظور صحت سنجی مدل، ضریب دبی برای داده‌های

مدل عددی و آزمایشگاهی بررسی گردید. شکل (۵) نتایج

این مقایسه را نشان می‌دهد.

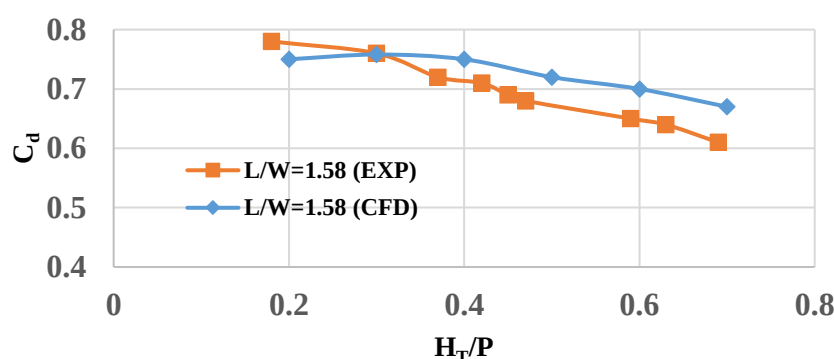
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - t_i)^2}{N}} \quad (7)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - t_i)^2 \quad (8)$$

که در آن O_i و t_i : به ترتیب مقادیر مشاهداتی و خروجی

مدل‌ها، p_i : میانگین مقادیر مشاهداتی، و N : تعداد کل

رویدادهای لحاظ شده است.



شکل ۵- مقایسه داده‌های عددی و آزمایشگاهی سرریز کنگره‌ای مثلثی

Fig. 5- Comparison of numerical and experimental data of the triangular labyrinth weir

نسبی H_T/P ، ضریب دبی روند کاهشی دارد. سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای با عرض راس ۱۰ سانتی‌متر عملکرد بهتری را از هد نسبی ۰/۴ تا ۰/۸ نشان داده است. افزایش عملکرد سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای مورد بررسی به میزان ۱/۲ درصد بوده است که مقدار کمی به‌نظر می‌رسد. از هد نسبی ۰/۱ تا ۰/۴ دو سرریز مورد بررسی تقریباً عملکرد یکسانی دارند و سپس از هد نسبی ۰/۴ تا ۰/۸ سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای با راس ۱۰ سانتی‌متر، عملکرد بهتری را نشان داده است. به‌نظر می‌رسد با افزایش هد نسبی، سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای به-دلیل کاهش تداخل تیغه‌های ریزشی و کاهش استغراق موضعی در راس، عملکرد بهتری داشته است. پس از هد نسبی ۰/۸ هر دو سرریز عملکرد یکسانی نشان داده‌اند و بنابراین ارتفاع زیاد آب سبب شده است که تیغه‌های ریزشی در هر دو سرریز اثر یکسانی بگذارند. بر طبق شکل، سرریز

بر طبق شکل (۵)، RMSE برابر با ۳/۹ درصد و MSE برابر با ۰/۱۶ درصد است. بنابراین، خطای مدل شبیه‌سازی شده قابل قبول به‌نظر می‌رسد و بنابراین از این مدل برای ادامه شبیه‌سازی و مقایسه سرریزهای کنگره‌ای مثلثی و دوزنقه‌ای استفاده خواهد شد. در پژوهش اژدری مقدم و همکاران (Azhdari moghadam et al., 2012) نیز مدل مذکور نتایج مناسب برای بررسی سرریزهای کنگره‌ای به دست آورده است.

بررسی شبیه‌سازی جریان در سرریزهای مورد بررسی

در $L/W = 2$

شکل (۶) مقادیر ضریب دبی و هد نسبی را برای سرریز کنگره‌ای مثلثی، دوزنقه‌ای با عرض راس ۱۰ سانتی‌متر و دوزنقه‌ای با عرض راس ۲۰ سانتی‌متر در نسبت $L/W=2$ نشان می‌دهد. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد با افزایش هد

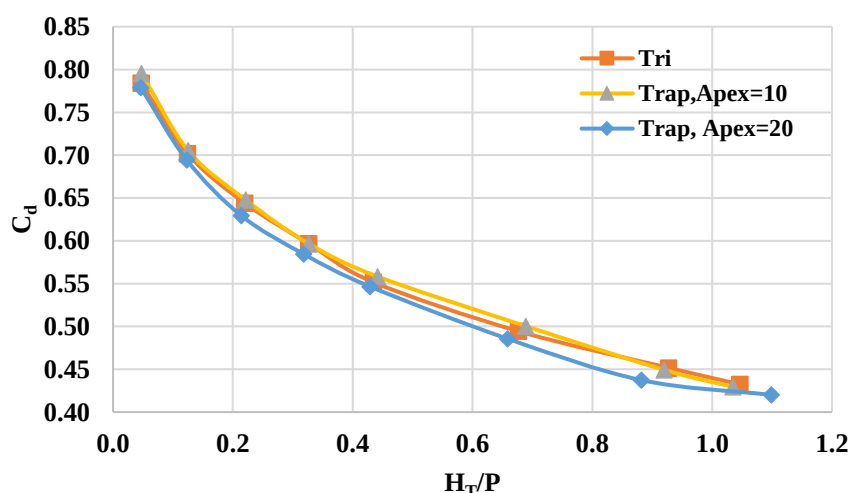
می‌شود و آشفتگی بیشتری در جریان نزدیک به راس ایجاد خواهد شد. ایجاد سرعت کمتر در راس، سبب حرکت جریان به سمت کناره‌ها می‌شود که این مسئله در سرریزهای کنگره‌ای دوزنقه‌ای و با افزایش عرض بیشتر رخ خواهد داد (Nazari sharifi, 2023). سرانجام، با حرکت نمودارهای سرعت به سمت کناره‌ها آشفتگی و تداخل جریان بیشتری نیز در کناره‌ها ایجاد می‌شود و ضریب دبی را کاهش خواهد داد.

بررسی شبیه‌سازی جریان در سرریزهای کنگره‌ای مورد بررسی در $L/W=3$

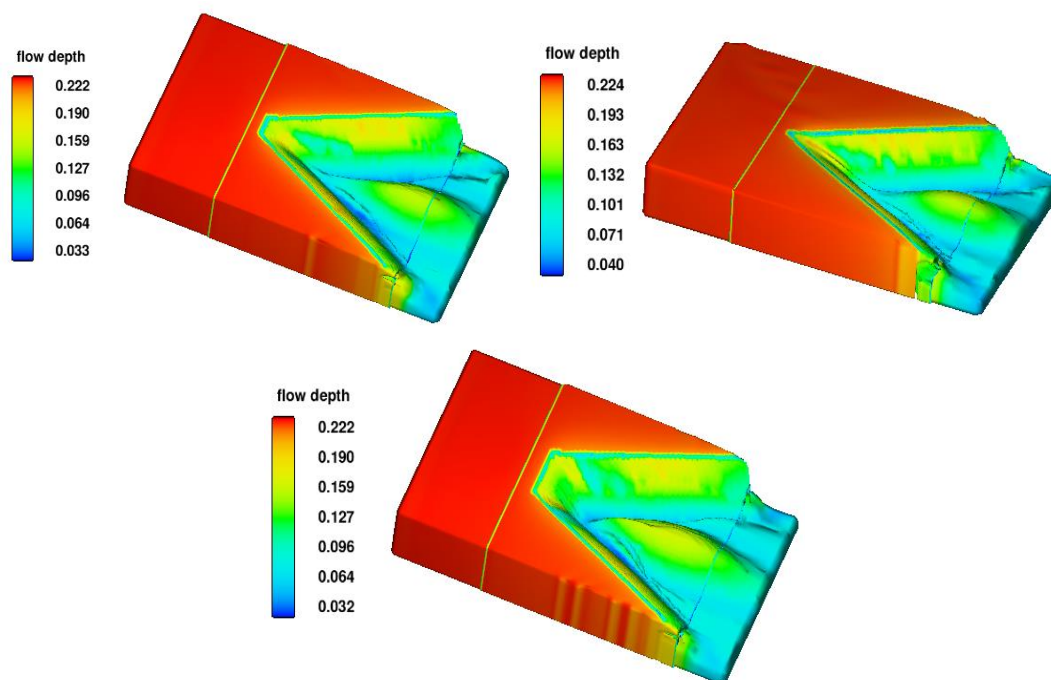
شکل (۹) تغییرات ضریب دبی برای سرریزهای کنگره‌ای مورد بررسی را در نسبت بزرگنمایی ۳ نشان می‌دهد. طبق این شکل، سرریز کنگره‌ای مثلثی، در مقایسه با سرریزهای کنگره‌ای دوزنقه‌ای مورد بررسی، عملکرد بهتری داشته است. سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای با عرض راس ۱۰ حداکثر ۱/۹ درصد کاهش عملکرد نسبت به سرریز کنگره‌ای مثلثی نشان می‌دهد. سرریز کنگره‌ای دوزنقه با راس ۲۰ سانتی‌متری حداکثر ۴/۸ درصد کاهش را نسبت به سرریز کنگره‌ای مثلثی نشان داده است.

کنگره‌ای دوزنقه‌ای با عرض راس ۲۰ سانتی‌متر عملکرد کمتری از هر دو سرریز کنگره‌ای مثلثی و دوزنقه‌ای با راس ۱۰ سانتی‌متر نشان می‌دهد که این میزان کاهش حداکثر تا ۳/۱ درصد بوده است. به نظر می‌رسد با اینکه تداخل تیغه‌های ریزشی و استغراق موضعی در راس کمتر شده است اما عمود شدن جریان در راس به دیواره سرریز سبب ایجاد آشفتگی بیشتر و کاهش عملکرد خواهد شد. از طرفی، کاهش زاویه سرریز با جداره کانال با افزایش عرض راس سرریز دوزنقه‌ای به وجود می‌آید که سبب کاهش عملکرد شده است. عملکرد سرریز به وسیله زاویه دیوار سرریز (α) با جهت جریان تاثیر می‌پذیرد. در یک عرض مشخص، با افزایش زاویه α طول تاج سرریز کاهش می‌یابد و درجه انقباض و فشردگی مسیر جریان از مدخل ورودی سرریز تا انتهای خروجی آن کاهش خواهد یافت و نیز تداخل تیغه‌های ریزشی کاهش می‌یابد (Falvey, 2002).

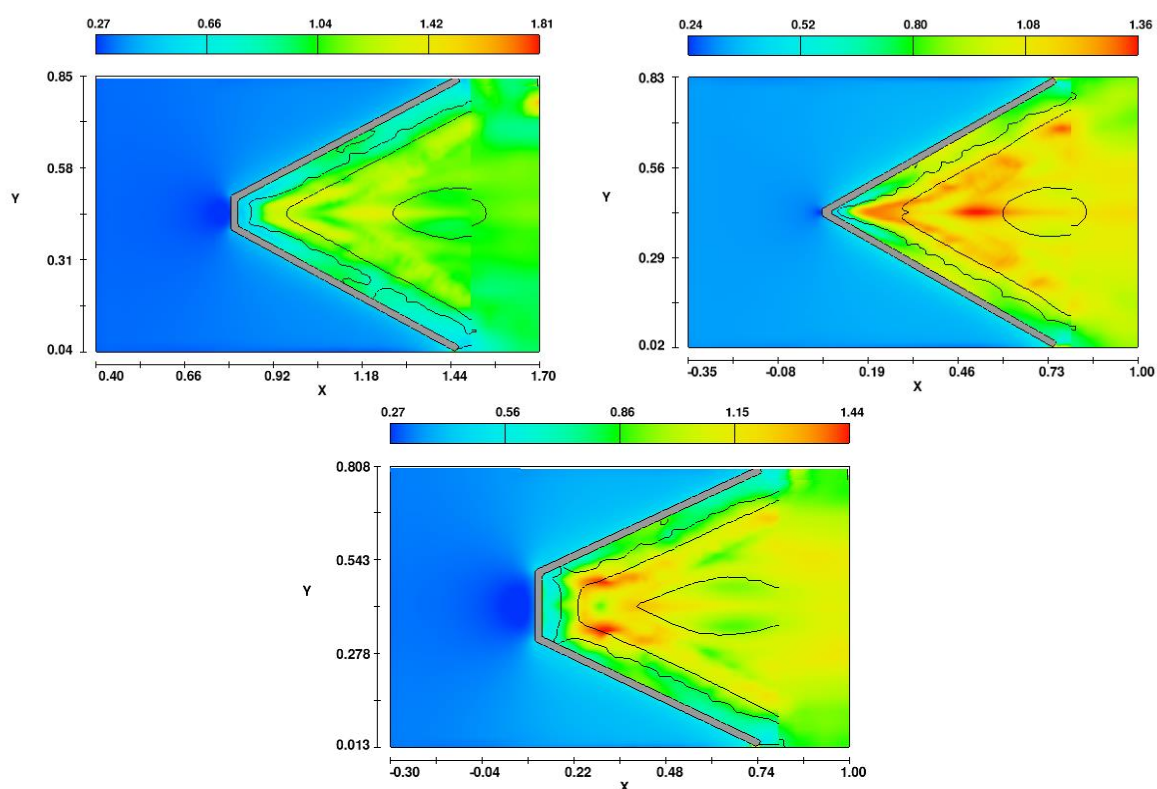
شکل (۷) تغییرات عمق و شکل (۸) تغییرات سرعت متوسط عمقی را برای نسبت بزرگنمایی ۲ در سرریزهای مورد بررسی نشان می‌دهد. بر طبق شکل (۸)، کمترین سرعت متوسط عمقی در راس سرریزها رخ داده است. بنابراین با افزایش عرض راس تا ۲۰ سانتی‌متر، منطقه‌ای بزرگ‌تر نیز در بالادست راس سرریز با سرعت کمتر ایجاد



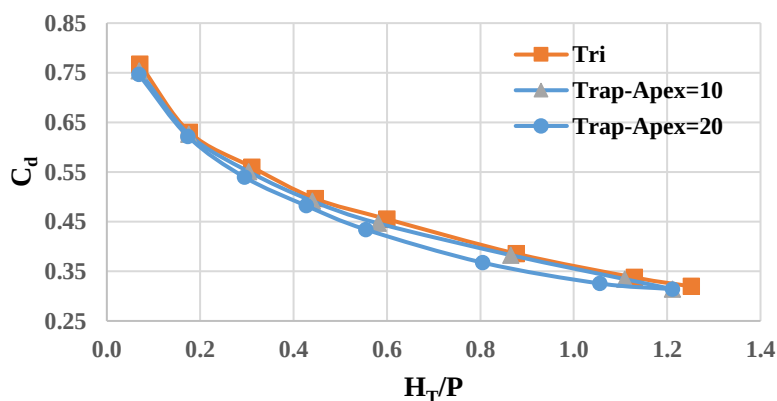
شکل ۶- ضریب دبی برای سرریزهای کنگره‌ای با نسبت بزرگنمایی ۲
Fig. 6- Discharge coefficient for labyrinth weirs with a magnification ratio of 2



شکل ۷- عمق جریان در سرریز کنگره‌ای مثلثی $L/W=2$, $H/P=0.5$
 Fig. 7- Flow depth in the triangular labyrinth weir $L/W=2$, $H/P=0.5$



شکل ۸- تغییرات سرعت متوسط‌گیری شده در $L/W=2$, $H/P=0.5$
 Fig. 8- Averaged velocity changes in $L/W=2$, $H/P=0.5$



شکل ۹- تغییرات ضریب دبی سرریزهای کنگره‌ای برای نسبت بزرگنمایی ۳
Fig. 9- Changes in the discharge coefficient of labyrinth weirs for magnification ratio 3

به طور کلی می‌توان سرریز کنگره‌ای مثلی را دارای عملکرد بهتری دانست، با این حال، ملاحظات ساخت و ساز اغلب موارد استفاده از یک عرض راس محدود (سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای) را اجبار می‌کند (Falvey, 2002). فالوی (Falvey, 2002) می‌گوید به دو دلیل مقادیر نسبت راس کمتر از ۰/۸ تأثیر قابل توجهی بر عملکرد سرریز نخواهد داشت و می‌توان به جای سرریز کنگره‌ای مثلی از آن استفاده کرد:

- در سرریز کنگره‌ای مثلی با راس رو به بالادست، تداخل تیغه‌های ریزشی وجود دارد و سبب می‌شود مقدار کمتری جریان منتقل گردد. بنابراین، جایگزینی گوشه تیز سرریز کنگره‌ای مثلی با راس دوزنقه‌ای تأثیر کمی در عملکرد خواهد داشت.
- در سرریز کنگره‌ای مثلی با راس رو به پایین‌دست، منطقه رکود جریان وجود دارد. در این منطقه، تیغه ریزشی به دیواره سرریز برخورد می‌کند و سبب افزایش نیمرخ سطح آب و ایجاد مقاومت در برابر عبور جریان می‌شود. بنابراین، راس مثلی می‌تواند با یک راس دوزنقه‌ای جایگزین شود که تأثیر کمی بر عملکرد کلی سرریز خواهد داشت و می‌تواند افزایش پروفیل سطح آب را کاهش دهد.

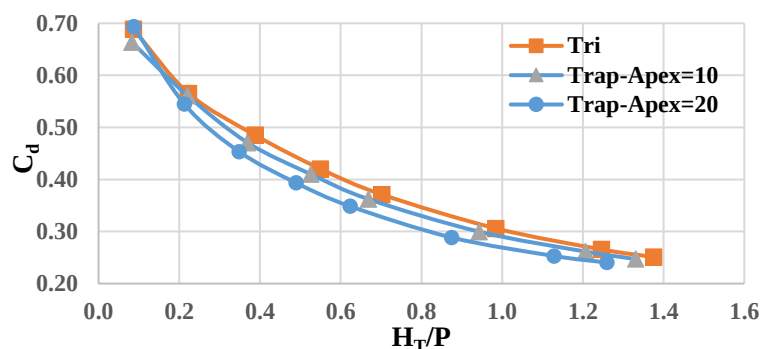
در این بخش، با افزایش نسبت بزرگنمایی به ۳ و کاهش زاویه جداره سرریز با جریان، تأثیر تداخل تیغه‌های ریزشی و استغراق موضعی خود را کاملاً نشان می‌دهد. در نسبت بزرگنمایی ۲، برای سرریز دوزنقه با عرض راس ۱۰ سانتی‌متر، تا حدودی ایجاد فاصله بین دیواره‌های سرریز، میزان تداخل تیغه‌های ریزشی و استغراق موضعی را کاهش داده بود. اما در نسبت بزرگنمایی ۳، زاویه سرریز با جریان کاهش پیدا کرده است. بنابراین تداخل تیغه‌های ریزشی و استغراق موضعی افزایشی شده است و اثر افزایش فاصله بین دو دیوار سرریز از بین رفته است.

بررسی شبیه‌سازی جریان در سرریزهای کنگره‌ای با

نسبت بزرگنمایی $L/W = 4$

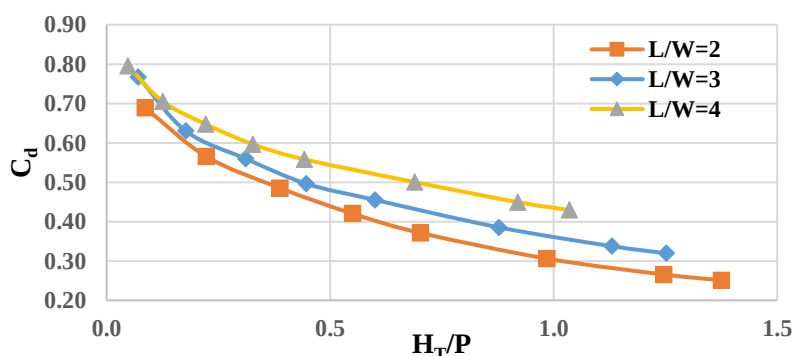
شکل (۱۰) مقادیر ضریب دبی را برای سرریزهای کنگره‌ای در نسبت بزرگنمایی ۴ نشان می‌دهد. با افزایش نسبت بزرگنمایی ضریب‌های دبی کاهش زیادی نشان داده است، به طوری که سرریز کنگره‌ای دوزنقه با راس ۲۰ سانتی-متری حداکثر ۱۲/۷ درصد کاهش را نسبت به سرریز کنگره‌ای مثلی نشان داده است. در نسبت بزرگنمایی ۴ نیز با توجه به کاهش زاویه سرریز با جریان، تداخل تیغه‌های ریزشی و استغراق موضعی افزایش زیادی داشته است و ایجاد راس دوزنقه‌ای برای کاهش تداخل تیغه‌ها اثری نداشته است.

مقایسه ضریب آبگذری سرریزهای کنگره‌ای مثلثی و بزرگنمایی ۲، ۳ و ۴ نشان می‌دهد. طبق این شکل، L/W دوزنقه‌ای در نسبت‌های طولی مختلف برابر با ۲ بیشترین عملکرد را دارد و با افزایش L/W ضریب شکل (۱۱) تغییرات ضریب دبی C_d در مقابل هد نسبی H_T/P را در سرریز کنگره‌ای مثلثی برای نسبت‌های



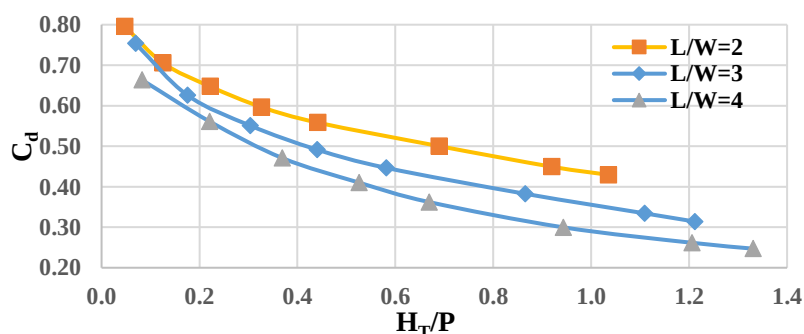
شکل ۱۰- تغییرات ضریب دبی سرریز کنگره‌ای مثلثی و دوزنقه‌ای برای نسبت بزرگنمایی ۴

Fig. 10- Variations of triangular and arched labyrinth weir discharge coefficient for magnification ratio 4



شکل ۱۱- تغییرات ضریب دبی در سرریز کنگره‌ای مثلثی در نسبت‌های بزرگنمایی مختلف

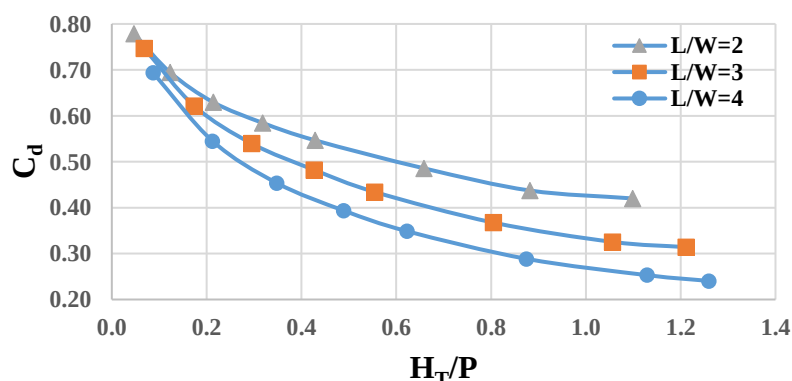
Fig. 11- Discharge coefficient in triangular lanyrinth weir in different magnification ratios



شکل ۱۲- تغییرات ضریب دبی در سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای با عرض راس ۱۰ سانتیمتر در نسبت‌های بزرگنمایی مختلف

Fig. 12- Discharge coefficient in trapezoidal labyrinth weir with 10 cm apex width in different magnification ratios

در H_T/P برابر $0/3$ ، ضریب دبی برای سرریز کنگره‌ای مثلثی و برای نسبت‌های بزرگ‌نمایی 2 ، 3 و 4 به ترتیب برابر $0/6$ ، $0/58$ و $0/52$ است. بنابراین، ضریب دبی در نسبت بزرگ‌نمایی 2 تا 4 به میزان 15 درصد کاهش داشته است. در $H_T/P = 1$ ، ضریب دبی سرریز کنگره‌ای در نسبت‌های بزرگ‌نمایی 2 ، 3 و 4 به ترتیب $0/44$ ، $0/35$ و $0/30$ است و در نسبت بزرگ‌نمایی 2 تا 4 به میزان 47 درصد کاهش یافته است. بنابراین، افزایش نسبت بزرگ‌نمایی سبب کاهش زاویه جداره با جریان و کاهش در ضریب دبی شده است. البته کاهش ضریب دبی در نسبت‌های بزرگ‌نمایی بیشتر نشان‌دهنده کاهش مقدار دبی عبوری از سرریز نیست بلکه میزان راندمان عبور دبی کاهش یافته است. تالیس و همکاران (Tullis et al., 1995) در آزمایش‌های خود حداقل زاویه دیواره سرریز نسبت به امتداد جریان را 6 درجه نشان دادند که این معادل نسبت بزرگ‌نمایی حدود $9/5$ است. کارایی سرریزهای کنگره‌ای هنگامی به شدت کاهش می‌یابد که نسبت بزرگ‌نمایی طولی از حدود 10 تجاوز کند. شکل (۱۲) تغییرات ضریب دبی C_d در مقابل هد نسبی H_T/P را در سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای با عرض راس 20 سانتی‌متر نشان می‌دهد. طبق این شکل، مانند سرریز کنگره‌ای پیشین، با افزایش L/W مقدار ضریب دبی کاهش می‌یابد.



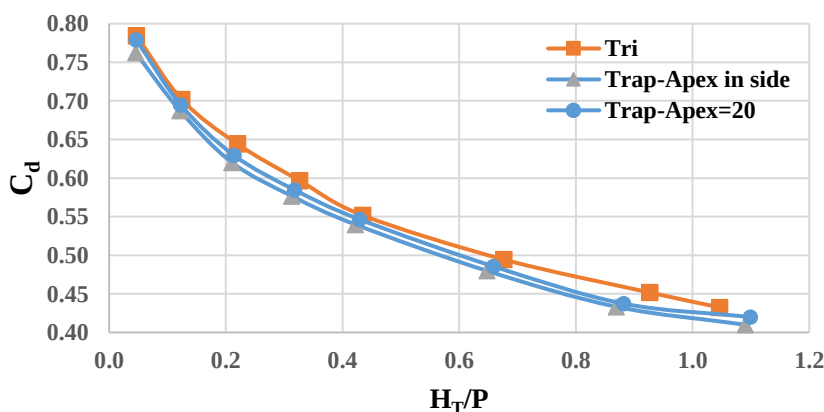
شکل ۱۳- تغییرات ضریب دبی در سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای با عرض راس 20 سانتیمتر در نسبت‌های بزرگ‌نمایی مختلف
Fig. 13- Discharge coefficient in trapezoidal labyrinth weir with 20 cm apex width in different magnification ratios

است. شکل (۱۴) ضریب دبی را برای سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای با راس در کناره‌ها نشان می‌دهد. طبق این شکل، سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای با راس در کناره از سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای با عرض راس ۲۰ سانتی‌متر (به میزان ۱/۵ درصد) و همچنین از سرریز کنگره‌ای مثلثی ضریب دبی کمتری دارد. به‌نظر می‌رسد که افزایش زاویه سرریز با جدار کانال و ایجاد فاصله دیواره اصلی سرریز از جدار کانال بتواند عملکرد را افزایش دهد اما افزایش زاویه سرریز با جدار کانال سبب افزایش عملکرد کانال نشده است. سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای با راس در کناره، به صورت یک سرریز مثلثی در میان کانال است که زاویه راس آن از سرریز کنگره‌ای مثلثی بررسی شده در این پژوهش کوچک‌تر است. بنابراین، میزان تداخل تیغه‌های ریزشی و استغراق موضعی در راس آن بیشتر خواهد بود. علاوه بر این، در کناره‌ها جریان با دیواره عمودی سرریز برخورد می‌کند و سبب آشفته‌گی و کاهش ضریب دبی خواهد شد.

در H_T/P برابر ۰/۳، ضریب دبی سرریز کنگره‌ای در نسبت‌های بزرگ‌نمایی ۰/۲، ۳ و ۴ به ترتیب برابر ۰/۶، ۰/۵۴ و ۰/۴۸ است. بنابراین، ضریب دبی از نسبت بزرگ‌نمایی ۲ تا به‌میزان ۲۰٪ کاهش داشته است. در $H_T/P = ۱$ ، ضریب دبی سرریز کنگره‌ای در نسبت‌های بزرگ‌نمایی ۰/۲، ۳ و ۴ به ترتیب ۰/۴۳، ۰/۳۳ و ۰/۲۷ است و از نسبت بزرگ‌نمایی ۲ تا ۴ به میزان ۳۷ درصد کاهش داشته است. بنابراین در سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای با عرض راس ۲۰ سانتی‌متر نیز با افزایش نسبت بزرگ‌نمایی و در حد نسبی زیاد، کاهش زیادی در ضریب دبی به‌وجود خواهد آمد. همان‌طور که بیان شد، این کاهش راندمان به دلیل کاهش زاویه راس سرریز و زاویه بین جدار دیواره کانال با سرریز رخ داده است.

سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای با عرض راس در کناره‌ها در $L/W=2$

برای بررسی اثر زاویه سرریز با دیواره کانال، از سرریز دوزنقه‌ای استفاده شد که راس آن در کناره‌ها قرار گرفته



شکل ۱۴- تغییرات ضریب دبی برای سرریزهای کنگره‌ای مثلثی، دوزنقه‌ای با عرض راس ۲۰ و دوزنقه‌ای با راس در کناره‌ها
Fig. 14- Discharge coefficient for labyrinth weirs of triangular, trapezoidal with 20 cm apex width and trapezoidal with apexes on the sides

نتیجه‌گیری

با پژوهش‌های پیشین است. افزایش هد نسبی باعث شده است ضریب دبی تا ۶۵ درصد در سرریزهای کنگره‌ای مورد بررسی کاهش یابد. دلیل این امر افزایش استغراق موضعی و افزایش تداخل تیغه‌های ریزشی است. استغراق موضعی سبب

بررسی مدل آشفتگی $k-\epsilon$ RNG و مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی نشان داد که مدل مورد استفاده با خطای کمتر از ۴ درصد، دقت قابل قبولی در شبیه‌سازی دارد که مشابه

می‌شود تا طول موثر سرریز کاهش یابد. تداخل تیغه‌های ریزشی سبب ایجاد مقاومت در برابر جریان می‌شود و ضریب دبی را کاهش می‌دهد. افزایش نسبت بزرگنمایی سبب تداخل بیشتر تیغه‌های ریزشی و استغراق موضعی در پایین دست می‌شود و در بالادست باعث انحنای عرضی در جریان و برخورد جت‌های عرضی و ایجاد آشفتگی می‌گردد و در نتیجه این عوامل باعث کاهش ضریب دبی خواهد شد. در نسبت‌های بزرگنمایی یکسان، سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای، نسبت به سرریز کنگره‌ای مثلثی، راندمان کمتری داشته است، به‌طوری‌که سرریز کنگره‌ای دوزنقه‌ای با راس ۲۰ سانتی‌متر، نسبت به سرریز کنگره‌ای مثلثی، در نسبت بزرگنمایی ۲، ۳ و ۴ به ترتیب دارای حداکثر ۳/۱ درصد، ۴/۸ درصد و ۱۲/۷ درصد کاهش است. تغییرات نشان می‌دهد که با افزایش نسبت بزرگنمایی، اختلاف ضریب دبی پلان مثلثی و دوزنقه‌ای افزایش یافته است. به‌نظر می‌رسد با اینکه تداخل تیغه‌های ریزشی و استغراق موضعی در راس سرریز‌کنگره‌ای دوزنقه‌ای کمتر شده است اما عمود شدن جریان در راس به دیواره سرریز، سبب ایجاد آشفتگی بیشتر و کاهش عملکرد خواهد شد. با افزایش نسبت راس، منطقه بزرگتری در بالادست راس سرریز با سرعت کمتر ایجاد می‌گردد و آشفتگی بیشتری در جریان نزدیک به راس ایجاد خواهد شد. ایجاد سرعت کمتر در راس سبب حرکت جریان به سمت کناره‌ها می‌شود. سرانجام، حرکت نمودارهای سرعت به سمت کناره‌ها، آشفتگی بیشتری نیز در کناره‌ها ایجاد می‌کند و ضریب دبی را کاهش می‌دهد. با افزایش نسبت راس، زاویه دیواره سرریز با جهت جریان کاهش و تداخل تیغه‌های ریزشی افزایش می‌یابد. بنابراین استفاده از راس مثلثی مناسب به‌نظر می‌رسد.

مراجع

- Aydin, M.C. Ulu, A.E. & Işık, E. (2024). Determination of effective flow behaviors on discharge performance of trapezoidal labyrinth weirs using numerical and physical models. *Modeling Earth Systems Environment Journal*, 10, PP.3763-3776.
- Azhdri Moghadam, M. and Amanian, N. (2012). *Investigating the effect of nose length and weir wall angle with flow extension in trapezoidal labyrinth weir using CFD method. The 6th National Congress of Civil Engineering*. Semnan University. (in Persian).
- Crookston B (2010). Labyrinth Weirs. Ph. D. dissertation, University of Utah State, Logan, UT.
- Falvey H.T. (2002). Hydraulic design of labyrinth weirs. ASCE Press.
- Ghasemzadeh, F. (2024). Simulation of hydraulic problems in Flow-3D software., Novar Publication.
- kahe, M. Dehghani, A. Kahe, M. and Zahiri, A. (2015). Simulation of Flow hydraulic in combined weir – gate structure by Flow3D. *Journal of Water and Soil Conservation*, 22(1), PP.111-129.
- Kumar S, Ahmad Z. and Mansoor T. (2011). A new approach to improve the discharging capacity of sharp-crested triangular plan from weirs. *Flow measurement and instrumentatioan*, 22(3), PP.175-180.
- Mirzaei, N. , Asadi, E. and abbaspour, A. (2021). Numerical study of discharge coefficient of trapezoidal labyrinth weir by changing the angle using Flow3D model. *Iranian Water Researches Journal*, 15(3). PP.61-69.
- Nazari Sharifi, M. (2023). Simulation of Labyrinth Weir with FLOW 3D software, MSc thesis, Water Science and engineering Department, Arak University.
- Selim, T. Hamed, A.K. Elkiki, M. and Eltarabily, M.G. (2024). Numerical investigation of flow characteristics and energy dissipation over piano key and trapezoidal labyrinth weirs under free-flow conditions. *Modeling Earth Systems Environment Journal*, 10. PP. 1253–1272.
- Tacail, F.G. Even, B. and Babb, A. (1990). Case study of a labyrinth spillway. *Canadian journal of civil engineering*, 17(1). PP.1-7.

- Taleb Bidakhti, N., and Zahraeifard, V. (2008). *Investigating the flow pattern over the labyrinth weir and determining the water discharge coefficient by numerical method. Third National Congress of Civil Engineering*, Tabriz University.
- Taylor, G. (1968). The Performance of Labyrinth Weirs. PhD Thesis, University of Nottingham, UK.
- Tullis, B.P. Amanian, N. and Waldron, D. (1995). Design of labyrinth weir spillways. American Society of Civil Engineering. *Journal of Hydraulic Engineering*, 121(3). PP.247-255.
- Wilmore, C. (2004). Hydraulic characteristics of labyrinth weirs. M.Sc Thesis. Utah state university.
- Yasi, M. and Mohammadi, M. (2007). Study of Labyrinth Spillways with Curved Planform . *Journal of Crop Production and Processing*, 11 (41), PP.1-13.

Original Research

Simulating the effect of trapezoidal labyrinth weir apex ratio on discharge coefficient using Flow-3D software

S. Alghezi, J. Mozaffari*

***Corresponding Author:** Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, Arak University.

Received: 3 February 2025, **Accepted:** 8 March 2025

Email: j-mozafari@araku.ac.ir

https://doi.org/10.22092/IDSER.2025.368514.1607

Introduction

Labyrinth weirs have a longer length than linear weirs and therefore pass more flow in the fixed width of the channel. Investigating a labyrinth weir with the highest efficiency at a fixed width can help reduce construction costs and also allow flow to pass at a lower height. However, investigating physical models to determine a labyrinth weir with a more appropriate efficiency will be costly. While using simulation software, in addition to reducing costs, allows for the creation of different labyrinth weir shapes in the software. The discharge coefficient of a labyrinth weir is affected by various parameters, one of which is the apex ratio. These parameters can be effective on the nappe interference, local submergence, and the creation of turbulence in the flow. In this study, the effect of different apex ratios in a labyrinth weir will be investigated.

Methodology

In this research, the flow in triangular and trapezoidal Labyrinth weir was investigated using FLOW 3D software and RNG k- ϵ model. To investigate the effect of the apex ratio, nine labyrinth weir models were simulated with magnification ratios $L/W=2$, $L/W=3$, and $L/W=4$. Three triangular labyrinth weir models with an apex ratio of zero, three trapezoidal labyrinth weir models with an apex ratio of 0.125, and three trapezoidal labyrinth weir models with an apex ratio of 0.250 were simulated. Also, to investigate the effect of the weir wall angle with the channel wall, a trapezoidal labyrinth weir model with an apex ratio of 0.25 on the side was investigated.

Results and Discussion

Investigations showed that with an increase in the water head ratio (H_T/P) and also with an increase in the magnification ratio, the local submergence and the nappe interference increases and causes a decrease in the discharge coefficient in the triangular and trapezoidal labyrinth weir. Although it seems that the greater distance between the two sides of the trapezoidal labyrinth weir at the apex compared to each other, caused a decrease in local submergence and an increase in the discharge coefficient, but the results showed that the triangular labyrinth weir had a better performance. By increasing the apex width up to 20 cm in a trapezoidal weir, a larger area will be created upstream of the weir apex with a lower velocity and more turbulence will be created in the flow near the apex. On the other hand, creating a lower velocity at the apex will cause the flow to move to the sides, which will cause the flow to move to the sides and create more turbulence on the sides and will reduce the discharge coefficient. Also, the results showed that trapezoidal labyrinth weir with apex width on the sides had lower performance because the amount of nappe interference and local submergence at the apex will be higher.

Conclusions

The study of the k- ϵ RNG turbulence model and comparison with laboratory data showed that the model used had acceptable accuracy in simulation. Increasing the water head ratio has caused a decrease in the discharge coefficient in the weir in all models. The reason is the increase in local submergence and nappe interference. Local submergence causes the effective length of the labyrinth weir to decrease. Also, the nappe interference causes resistance to the flow and reduces the discharge coefficient. Increasing the magnification ratio causes more nappe interference and local submergence at downstream of weir and causes transverse curvature in the flow and collision of transverse jets and creates turbulence at upstream of weir. As a result, these factors will cause a decrease in the discharge coefficient. At the same magnification ratios, the trapezoidal labyrinth weir has a lower efficiency than the triangular labyrinth weir. It seems that although the nappe interference and local submergence at the apex of the trapezoidal labyrinth weir has decreased, the perpendicularity of the flow at the apex to the weir wall will cause more turbulence and reduce performance.

Key words: Local submergence, Nappe interference, Trapezoidal labyrinth weir, Triangular labyrinth weir



نوع مقاله: پژوهشی

ارزیابی بهره‌وری هرم‌های تقطیری خورشیدی تحت تأثیر سطوح مختلف شوری و عمق آب در منطقه نیمه خشک

راضیه صادقی^۱، خالد احمدآلی^۲، سینا کوثری^۳، سلمان زارع^۴، شهرام خلیقی سیگارودی^۵^۱ گروه احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.^{۲*} گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.^۳ گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.^۴ گروه احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.^۵ گروه احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۵

چکیده

کمبود آب شیرین یکی از چالش‌های اساسی جوامع امروزی و ناشی از رشد جمعیت، گسترش صنایع و کشاورزی و تغییرات اقلیمی است. این مسئله به‌ویژه در مناطق خشک و بیابانی به دلیل بارش‌های نامنظم و کاهش کمی و کیفی منابع آبی شدت یافته است. منابع آبی فراوانی در دسترس است، اما بخش قابل توجهی از آن‌ها به دلیل شوری و آلودگی‌های مختلف برای مصارف کشاورزی و آشامیدنی نامناسب هستند. در این راستا، فناوری‌های شیرین‌سازی آب، به‌ویژه روش‌های مبتنی بر انرژی خورشیدی، راهکاری پایدار و سازگار با محیط‌زیست هستند. در میان این روش‌ها، هرم‌های تقطیری یکی از فناوری‌های مؤثر در نمک‌زدایی خورشیدی محسوب می‌شوند که به‌ویژه در مناطقی با میزان تبخیر بالا و دسترسی به منابع آب شور می‌توانند کارایی مطلوبی داشته باشند. عملکرد این سامانه‌ها به‌طور مستقیم تحت تأثیر پارامترهای عملیاتی و شرایط محیطی قرار دارد، از این‌رو بررسی این عوامل برای بهینه‌سازی فرآیند و افزایش بازدهی ضروری است. در این مطالعه تجربی، عملکرد پنج هرم تقطیرکننده خورشیدی تحت تأثیر سه سطح عمق آب شور ($D_1=1$ ، $D_2=3$ و $D_3=5$ سانتی‌متر) و پنج سطح شوری مختلف ($S_1=5000$ ، $S_2=10000$ ، $S_3=20000$ ، $S_4=30000$ و $S_5=40000$ میکروزیمنس بر سانتی‌متر) در دو فصل بهار و تابستان، تحت شرایط اقلیمی کرج ارزیابی شد. هدف اصلی، بررسی تأثیر عمق و شوری آب بر بازده تولید آب شیرین هرم‌هاست. علاوه بر این، مدل‌های رگرسیونی به‌منظور پیش‌بینی تأثیر شوری و عمق آب بر میزان تولید آب شیرین در شرایط اقلیمی مختلف توسعه داده شد. آزمایش‌ها با استفاده از پنج هرم تقطیری شفاف شیشه‌ای و بدون عایق از ساعت ۸ صبح تا ۱۹ به اجرا درآمدند. نتایج نشان داد که بیشترین حجم آب شیرین تولیدی در تیمار با کمترین عمق و شوری (D_1S_1) و در فصل تابستان، با مقدار 1001 میلی‌لیتر بر مترمربع در روز به‌دست می‌آید. در مقابل، با افزایش عمق آب و شوری، تولید آب کاهش یافت، به‌طوری‌که در تیمار D_3S_5 مقدار تولید به 881 میلی‌لیتر بر مترمربع در روز رسید که بیانگر کاهش ۱۲ درصد در بازدهی نسبت به تیمار D_1S_1 در فصل تابستان است. این یافته‌ها نشان می‌دهد کاهش عمق آب شور و کاهش سطح شوری، منجر به افزایش بازدهی هرم‌های تقطیری خورشیدی می‌شود. مدل‌سازی رگرسیونی نشان داد که مدل توانی ($R^2=0.96$ ، $RMSE=1.08$) برای پارامتر عمق، و مدل‌های گویا ($R^2=0.99$ ، $RMSE=0.36$) و چندجمله‌ای ($R^2=0.99$ ، $RMSE=0.4$) برای پارامتر شوری، نسبت به مدل‌های خطی دقت بالاتری دارند. به دلیل پایین بودن هزینه ساخت و سازگاری زیست‌محیطی هرم‌های تقطیری خورشیدی، می‌توان از این سامانه‌ها برای تولید آب شیرین به‌منظور مصارف آشامیدنی و در کشاورزی کوچک‌مقیاس با گیاهان کم‌آبر در مناطق گرم و دارای منابع آب شور بهره برد.

واژه‌های کلیدی: کمبود آب، شوری‌زدایی، تقطیر، تابش خورشیدی، زهاب

مقدمه

طبیعی توزیع شده است (Alawee et al., 2023; Fathy et al., 2018; Yousef and Hassan, 2019). تمرکز بر منابع آب نامتعارف به دلیل قابلیت آن‌ها در بازیافت و استفاده مجدد از آب برای فعالیتهای مختلف انسانی رو به افزایش است (Kosari et al., 2024; MasoomiBalsi et al., 2024; Morote et al., 2019). شیرین‌سازی و تصفیه آب شور راهی مؤثر برای تولید آب شیرین است (El-Sebaai and Khallaf, 2020; Patel et al., 2006).

انرژی خورشیدی به‌طور گسترده‌ای در مناطق دورافتاده که دسترسی به آب شیرین و فناوری‌های مدرن محدود است استفاده است (Awasthi et al., 2023; Shi et al., 2020; Wang et al., 2024). در مناطقی که آب شیرین کمیاب است اما تابش خورشیدی فراوانی وجود دارد، انرژی خورشیدی منبع جایگزین ترجیحی انرژی ظاهر می‌شود (Mansour et al., 2019). استفاده از انرژی خورشیدی برای تولید آب شیرین مقرون‌به‌صرفه از طریق روش‌های غیرمتمرکز بسیار مؤثر است. انرژی خورشیدی منبع تجدیدپذیر، پاک، ودوستاندار محیط زیست به‌طور گسترده قابل دسترس و دارای کاربردهای متنوع است (Awasthi et al., 2023; Mansur et al., 2019). شیرین‌سازی آب به روش خورشیدی یکی از مؤثرترین روش‌ها برای تبدیل آب شور به آب شیرین با استفاده از انرژی خورشیدی است (Sathyamurthy et al., 2014). نمک‌زدایی از آب شور راهی امیدوارکننده برای تأمین آب شیرین است (Patel et al., 2006). فناوری‌های گوناگون نمک‌زدایی، از جمله تقطیر چند مرحله‌ای (MSF^1)، فشرده‌سازی بخار حرارتی (TVC^2)، اسمز معکوس (RO^3)، تقطیر خورشیدی (SSD^4) و الکترودیالیز (ED^5)، در حال حاضر برای نمک‌زدایی از آب شور یا آب دریا استفاده می‌شوند تا آب آشامیدنی یا آب آبیاری در مناطق خشک فراهم کنند (Abdullah et al., 2020; Alsumaiei, 2020; Ashour et al., 2015; Murase et al., 2008; Tony, 2022).

آب شیرین یکی از عناصر حیاتی برای بقای انسان است (Abujazar et al., 2016; Muthu Manokar et al., 2014). کمبود آب شیرین یکی از نگرانی‌های جدی در بسیاری از مناطق جهان، به‌ویژه در نواحی خاورمیانه و شمال آفریقا (MENA) است، جایی که اغلب کشورها با اقلیم‌های خشک یا نیمه‌خشک روبه‌رو هستند (Khairy et al., 2022). رشد جمعیت چالش‌های مربوط به آب را به طور چشمگیری تشدید کرده و منجر به افزایش تقاضا و رقابت در بخش‌های مختلف مانند کشاورزی، خدمات شهری، مصارف خانگی، پایداری زیست‌محیطی و فعالیتهای صنعتی شده است (Kosari et al., 2024; Qadir et al., 2007). نیاز به آب شیرین به‌طور پیوسته در کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه رو به افزایش است زیرا این منبع حیاتی نقش کلیدی در توسعه اقتصادی، رشد پایدار، سلامت اکوسیستم و بقای انسان دارد (Abdelal & Taamneh, 2017). یکی از چالش‌های اساسی پیش روی کشورهای در حال توسعه، شناسایی منابع پایدار و طراحی فرآیندهای نوآورانه‌ای است که بتوانند آب شیرین را با هزینه‌ای مقرون‌به‌صرفه تأمین کنند، به‌ویژه برای جوامعی که در مناطق دورافتاده زندگی می‌کنند (Chen et al., 2021).

با توجه به چالش‌های ذکر شده، استفاده از منابع آب نامتعارف در کنار منابع آب متعارف در کاربردهای مختلف امری اجتناب‌ناپذیر است. منابع آب نامتعارف عبارت‌اند از آب دریا، رواناب‌های ناشی از بارندگی، زهاب کشاورزی، آب لب‌شور، آب مورد استفاده در سیستم‌های سرمایشی نیروگاه‌های حرارتی، پساب‌های صنعتی، فاضلاب خانگی و تخلیه‌های تجاری (Chen et al., 2021). تقریباً ۹۷ درصد از آب سطحی زمین در اقیانوس‌ها قرار دارد و شور است. تنها سه درصد باقی‌مانده شامل آب شیرین است که میان رودخانه‌ها، دریاچه‌ها، یخچال‌های قطبی و یخچال‌های

⁴ Solar still desalination⁵ Electrodialysis¹ Multi-stage flash² Thermal vapor compression³ Reverse osmosis

(Murugavel *et al.*, 2013). تحقیقات نشان داده‌است که دماهای بالاتر دمای محیطی موجب افزایش بهره‌وری در تقطیرکننده‌های خورشیدی می‌شود (Ahsan *et al.*, 2014; Al-Hinai *et al.*, 2002; Babalola *et al.*, 2015; Hollands, 1963; Morse and Read, 1968; Xiao *et al.*, 2013; Yeh and Chen, 1986, 1985). به‌طور معمول مشاهده می‌شود که افزایش شوری باعث کاهش خروجی آب مقطر می‌شود (Akash *et al.*, 2000; Kalbasi and Esfahani, 2010; Rababa'h, 2003). عمق آب در حوضچه تأثیر زیادی بر خروجی آب تقطیرشده دارد. چندین مطالعه نشان داده‌اند که بهره‌وری هرم خورشیدی به‌طور معکوس با عمق آب در حوضچه مرتبط است (Murugavel *et al.*, 2008; Sathyamurthy *et al.*, 2014; Singh *et al.*, 2008; Tiwari and Tiwari, 2006; Tripathi and Tiwari, 2006).

درباره هرم‌های تقطیری خورشیدی تحقیقات گسترده‌ای شده است، اما همچنان فرصت‌های قابل‌توجهی برای پیشرفت این سیستم به‌منظور تولید آب شیرین در مقیاس بزرگ و باصرفه وجود دارد. با توجه به توزیع غیریکنواخت پارامترهای هواشناسی در سراسر جهان، ضروری است مطالعات عملکرد تقطیرکننده‌های خورشیدی در شرایط اقلیمی متنوع تکرار شود. مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد که تحقیقات درباره بررسی اثر هم‌زمان شوری و عمق آب بر کارایی سیستم هرم‌های خورشیدی اندک است؛ مطالعات پیشین همچنین گویای این موضوع است که توسعه معادلات رگرسیونی برای تحلیل رابطه بین پارامترهای مؤثر بر بهره‌وری و عملکرد این هرم‌ها مورد توجه قرار بوده‌اند. به همین دلیل مطالعه تجربی به‌منظور ارزیابی عملکرد سیستم هرم‌های تقطیری خورشیدی تحت شرایط عملیاتی و هواشناسی مختلف در استان البرز، ایران در برنامه قرار گرفت. اقلیم خشک و نیمه‌خشک البرز، همراه با سطوح بالای تابش خورشیدی و کمبود شدید آب، تقطیر خورشیدی را به راه‌حلی پایدار و مناسب برای رفع مشکلات کم‌آبی در بخش‌های شرب و آبیاری در مقیاس کوچک تبدیل می‌کند. هدف‌های خاص این مطالعه عبارت‌اند از: (۱) تحلیل تأثیر سطوح مختلف شوری و عمق آب شور بر میزان آب

استفاده از هرم‌های تقطیری خورشیدی یکی از کارآمدترین روش‌های شیرین‌سازی شناخته می‌شود. این روش به دلیل ساختار ساده، پایین‌بودن هزینه عملیاتی، نیاز اندک به نگهداری و پایداری زیست‌محیطی اهمیت ویژه‌ای دارد (Elshamy and El-Said, 2018; He and Yan, 2009; Madeshwaren *et al.*, 2024; Sharshir *et al.*, 2019; Tony and Nabwey, 2024).

پیشینه پژوهش

مطالعات متعددی وجود دارد که در آن‌ها عوامل مؤثر بر عملکرد هرم‌های تقطیری خورشیدی برای تولید آب شیرین بررسی شده است. نتایج نشان داده است که بازدهی هرم‌های تقطیری خورشیدی تحت تأثیر سه عامل اصلی محیطی، عملیاتی و پارامترهای طراحی قرار دارد. شرایط محیطی شامل دمای محیط، تابش خورشیدی و سرعت باد می‌شود. شرایط عملیاتی متغیرهایی همچون عمق آب، استفاده از مواد رنگی، جهت‌گیری هرم‌ها، دمای آب شور ورودی و آب شور موجود در مخزن را در بر می‌گیرد (Hammoodi *et al.*, 2023). پارامترهای طراحی شامل شیب پوشش هرم‌ها، ساختار و مواد کاربردی به منظور احداث هرم‌ها، و طراحی غشاست (Muftah *et al.*, 2014). مطالعات متعدد به‌منظور بهبود بهره‌وری هرم‌های تقطیری خورشیدی نشان داده‌اند که راندمان تقطیرکننده خورشیدی به‌طور عمده تحت تأثیر اندازه سطح تبخیر و میزان ناحیه تابش آن قرار دارد (Abd Elaziz *et al.*, 2021; Palanikumar *et al.*, 2021). بسیاری از پژوهشگران با بررسی تأثیر تابش خورشیدی بر تولید آب شیرین سیستم‌ها نشان داده‌اند که بهره‌وری تقطیرکننده خورشیدی با افزایش تابش خورشیدی دریافتی افزایش می‌یابد (Aburideh *et al.*, 2012; Altarawneh *et al.*, 2017; Kamal, 1988; Khalifa and Hamood, 2009; Okeke *et al.*, 1990; Rahbar and Esfahani, 2012). هنگام بررسی تأثیر رطوبت نسبی در دماهای مختلف محیطی، مشاهده شده است که تولید آب تقطیرشده با افزایش رطوبت نسبی در دمای محیط مشخص کاهش می‌یابد (Lindblom and Nordell, 2006).

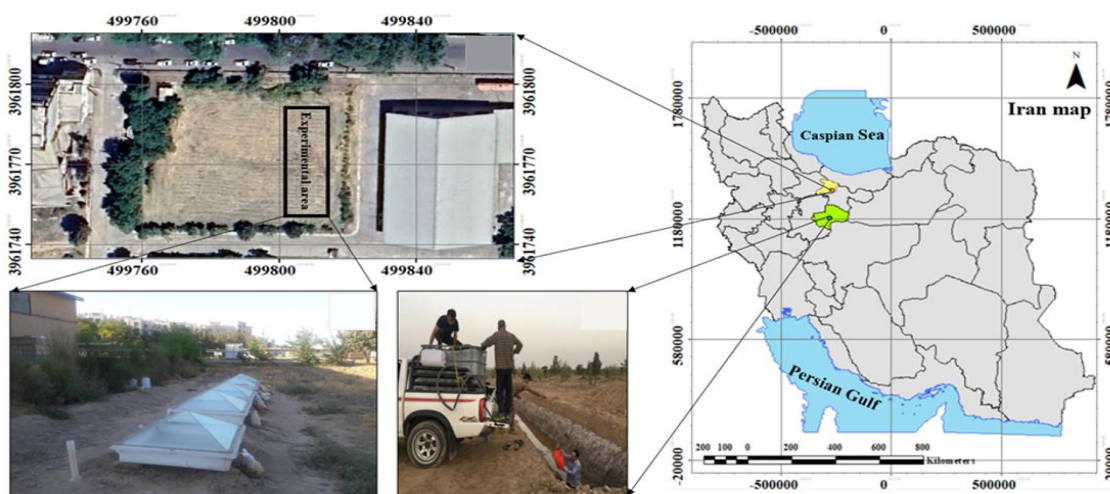
تبخیر و بارش روزانه است. بررسی داده‌های بلندمدت ایستگاه سینوپتیک کرج (مختصات جغرافیایی $35^{\circ} 80'$ شمالی و $50^{\circ} 59'$ شرقی، با ارتفاع ۱۲۹۲/۹ متر از سطح دریا) نشان داد که میانگین بارش سالانه در دوره ۲۰۲۱-۲۰۱۰ برابر با ۲۵۲ میلی‌متر بوده است. میانگین دمای سالانه در این بازه ۱۹/۴ درجه سانتی‌گراد، میانگین رطوبت نسبی ۴۵ درصد و میزان تبخیر سالانه ۲۱۸۴ میلی‌متر ثبت شده است. بر اساس شاخص طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن، این مقادیر نشان‌دهنده اقلیم نیمه‌خشک منطقه مطالعاتی هستند (E, 1926). با توجه به اینکه هرم‌های خورشیدی در محوطه دانشگاه تهران ساخته شده بودند، انتقال آن‌ها به استان‌های دیگر با پتانسیل عملکرد بالاتر به دلیل دما و شدت تابش خورشیدی بیشتر، مانند مناطق مرکزی ایران، امکان‌پذیر نبود. از این رو، منطقه مطالعاتی به‌عنوان یک ناحیه نماینده اقلیم نیمه‌خشک در نظر گرفته شد. محدوده مطالعاتی این پژوهش مساحتی معادل ۷۰ مترمربع (۲۰ متر $\times$ ۳/۵ متر) را شامل می‌شود. پیش از استقرار هرم‌ها، زمین با دقت تسطیح شد تا از هم‌سطح بودن بستر آزمایش اطمینان حاصل گردد. جهت قرارگیری تمامی هرم‌های خورشیدی در راستای شمال-جنوب تنظیم شد تا آن‌ها حداکثر دریافت انرژی خورشیدی را داشته باشند.

تقطیر یافته تولیدی توسط هرم‌های تقطیری خورشیدی، و (۲) توسعه مدل‌های رگرسیونی که شوری آب و عمق آب شور را با عملکرد سیستم مرتبط می‌سازند. این مطالعه نشان می‌دهد که با انتخاب و مدیریت مناسب پارامترها می‌توان کارایی سیستم‌های تقطیر خورشیدی را بدون نیاز به هزینه‌های اضافی ناشی از بخش طراحی هرم‌ها، تا حدودی افزایش داد.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی

به‌منظور ارزیابی کارایی تولید آب شیرین توسط هرم‌های تقطیری خورشیدی در شرایط مختلف شوری و عمق آب، یک مطالعه تجربی در مزرعه تحقیقاتی آب و خاک، وابسته به گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران، واقع در کرج (مختصات جغرافیایی $35^{\circ} 81'$ شمالی و 50° شرقی) به‌اجرا درآمد. این منطقه در ارتفاع ۱۳۰۴ متری از سطح دریا قرار دارد (شکل ۱). برای بررسی شرایط اقلیمی منطقه مطالعاتی، داده‌های هواشناسی روزانه از ایستگاه سینوپتیک کرج برای دوره هیدرولوژیکی ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۱ جمع‌آوری شد و تحلیل‌های اقلیمی بر اساس میانگین ۱۲ ساله این داده‌ها انجام گرفت. متغیرهای مورد بررسی شامل حداقل و حداکثر دما، رطوبت نسبی، سرعت باد، میزان



شکل ۱- موقعیت محل آزمایش، محل جانمایی هرم‌های تقطیری خورشیدی در منطقه مطالعاتی و نحوه تامین آب شور از کانال زهکش

Figure 1- The location of the experimental site, the placement of solar distillation systems, and the method of supplying saline water from the drainage channel

تأمین آب شور

تغییر کیفیت زهاب به محل آزمایش انتقال داده شد. میزان شوری زهاب ذخیره‌شده در مخزن با استفاده از دستگاه هدایت الکتریکی‌سنج، که به‌طور دوره‌ای کالیبره شده بود، در آزمایشگاه کیفیت آب گروه آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران اندازه‌گیری شد و مقدار آن ۴۲۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر ثبت گردید. مشخصات کیفی زهاب سنجش شده در آزمایشگاه کیفیت آب دانشگاه تهران، در جدول ۱ ارائه شده است. برای جلوگیری از تبخیر آب و کاهش اثرهای مخرب تابش خورشیدی بر مخزن، سطح بدنه آن با مقوای کارتنی ضخیم پوشانده شد. این اقدام به حداقل رساندن فرآیندهای تبخیری و واکنش‌های شیمیایی مؤثر بر تغییر شوری طی ماه‌های اجرای آزمایش کمک می‌کند.

منطقه مورد نظر برای تأمین آب شور هرم‌های خورشیدی، پارک جنگلی ثامن‌الائمه در استان قم است که در حدود ۸ کیلومتری شمال شرق مرکز شهر قم و در مختصات جغرافیایی $34^{\circ} 38'$ شمالی و $50^{\circ} 57'$ شرقی قرار دارد (شکل ۱). با توجه به اینکه تولید زهاب یکی از چالش‌های اصلی این منطقه محسوب می‌شود و آب مورد استفاده در کرج معمولاً دارای شوری کم و کیفیت بالایی است، در این مطالعه از زهاب شور موجود در سیستم زهکشی این پارک استفاده شد. پس از پر شدن مخزن ۱۰۰۰ لیتری با زهاب شور، این زهاب با استفاده از یک وسیله نقلیه مناسب و رعایت کلیه اقدامات احتیاطی برای جلوگیری از آلودگی یا

جدول ۱- مقادیر پارامترهای کیفی اندازه‌گیری شده زهاب جمع‌آوری شده از کانال زهکشی

Table 1- Measured quality parameter values of the drainage water collected from the drainage channel

مقادیر پارامترها Parameter Values	نماد Symbol	پارامتر Parameter	پی‌اچ
۷/۷	-	pH	
۴۲۰۰۰	$\mu\text{S cm}^{-1}$	Electrical Conductivity	هدایت الکتریکی
۹۶۲۵	Mg lit^{-1}	Total hardness as CaCO_3	سختی کل به‌صورت کلسیم کربنات
۱۴۸۹	Mg lit^{-1}	Magnesium (Mg^{2+})	منیزیم
۱۴۰۲	Mg lit^{-1}	Calcium (Ca^{2+})	کلسیم
۷۳۵۶	Mg lit^{-1}	Sodium (Na^+)	سدیم
۶۲۰۵	Mg lit^{-1}	Chlorine (Cl^-)	کلرید
۴۰۰۰	Mg lit^{-1}	Sulphate (SO_4^{2-})	سولفات
۲۵۱۶	Mg lit^{-1}	Bicarbonate (HCO_3^-)	بی‌کربنات

ساخت هرم‌های تقطیری خورشیدی

ذخیره و تبخیر می‌شود. پلی‌اتیلن به دلیل مقاومت شیمیایی بالا و قابلیت تحمل نوسان‌های دمایی به‌عنوان ماده اولیه انتخاب شد. به‌منظور افزایش جذب انرژی خورشیدی، سطح داخلی حوضچه با رنگ سیاه پوشانده شد که منجر به بهبود بهره‌وری در جذب انرژی حرارتی می‌شود. مخزن ذخیره آب شور با یک صفحه شیشه‌ای سکوریت با عبورپذیری ۹۱ درصد تابش خورشیدی پوشانده شد. این شیشه علاوه بر توانایی بالای خیس‌شدگی، موجب بهبود انتقال تابش و

در این مطالعه، هرم‌های تقطیری خورشیدی با طراحی شیب‌دار به‌منظور ارزیابی عملکرد فرآیند شیرین‌سازی در شرایط اقلیمی نیمه‌خشک کرج و تحت سناریوهای مختلف عملیاتی ساخته شدند. ابعاد مخزن این هرم‌ها 1×1 متر و ارتفاع آن‌ها $0/18$ متر در نظر گرفته شد. در بخش مرکزی هر هرم، یک محفظه مکعب مستطیل‌شکل از جنس پلی‌اتیلن با ضخامت شش میلی‌متر طراحی شد که آب شور در آن

هستند. شوری متوسط زهاب شور اندازه‌گیری شده در مخزن برابر با ۴۲۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر اندازه‌گیری شد؛ بنابراین، برای دستیابی به سطوح شوری مشخص شده در هر سناریو لازم بود زهاب شور ذخیره‌شده با آب شیرین رقیق شود. حجم آب موردنیاز برای رقیق‌سازی در هر سناریو با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد.

$$EC_{mix} = \frac{EC_{DW} \times V_{DW} + EC_{FW} \times V_{FW}}{V_{DW} + V_{FW}} \quad (1)$$

در رابطه ۱: EC_{mix} شوری هدف در هر سناریو (میکروزیمنس بر سانتی‌متر)، EC_{DW} شوری زهاب اندازه‌گیری شده با استفاده از دستگاه هدایت الکتریکی سنج در آزمایشگاه آبیاری گروه آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران (میکروزیمنس بر سانتی‌متر)، EC_{FW} شوری آب مورد استفاده به‌منظور رقیق‌سازی (میکروزیمنس بر متر)، V_{DW} و V_{FW} به ترتیب حجم زهاب شور و آب موردنیاز شیرین برای رقیق‌سازی (لیتر) است.

اجرای آزمایش

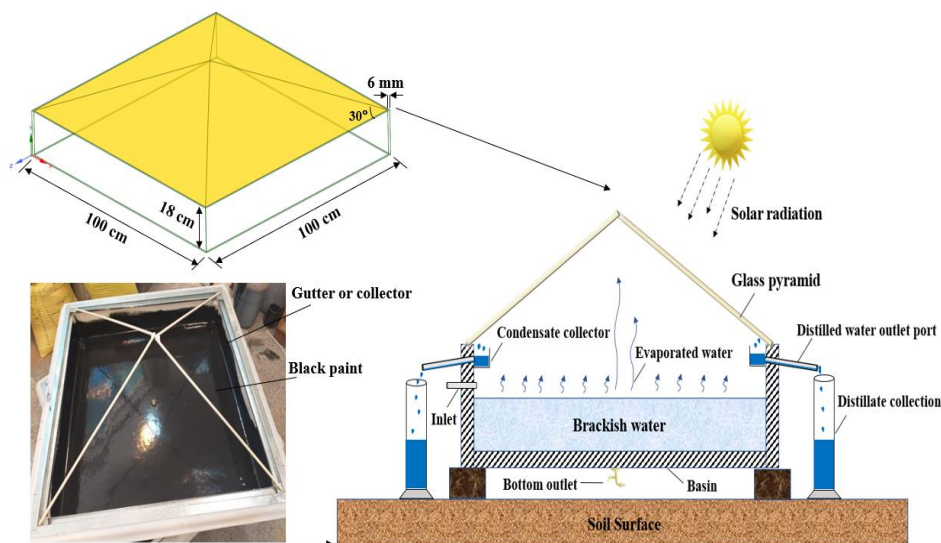
پس از استقرار هرم‌های خورشیدی، در مرحله اولیه و به‌منظور اعتبارسنجی عملکرد این تجهیزات، آب شور خارج از زمان آزمایش به داخل مخزن هرم‌ها اضافه شد تا حجم آب تولیدی از خروجی‌های هر هرم بررسی و ارزیابی شود. به‌منظور کاهش یا حذف تبخیر ناخواسته، تمامی درزهای موجود با استفاده از چسب آکواریوم و چسب سنگ به‌طور کامل پوشش داده شدند تا تلفات آب به حداقل برسد. پس از حصول اطمینان از عملکرد صحیح هرم‌ها، آزمایش‌های اصلی آغاز شد. آزمایش‌ها در دو فصل بهار و تابستان و در بازه‌های زمانی مشخص اجرا شدند. تولید روزانه آب شیرین از ساعت هشت صبح تا هشت شب و تولید شبانه از ساعت هشت شب تا هشت صبح روز بعد به‌طور دقیق اندازه‌گیری شد. این آزمایش‌ها در فصل بهار از تاریخ ۲ خرداد ۱۴۰۱ تا ۴ تیر ۱۴۰۱ و در فصل تابستان از ۱۱ مرداد ۱۴۰۱ تا ۲۵ شهریور ۱۴۰۱ اجرا گردید.

افزایش راندمان میعان می‌شود. زاویه ۳۰ درجه‌ای شیشه نسبت به افق بر اساس شرایط جغرافیایی و با هدف بهینه‌سازی جذب انرژی تابشی طراحی شده است. شیشه سکوریت مقاومت بالایی در برابر ضربه و تغییرات دما دارد. در کناره‌های داخلی مخزن، ناودان‌های کوچکی با مقطع مربعی از جنس آهن گالوانیزه و ضخامت یک میلی‌متر تعبیه شده‌اند که وظیفه جمع‌آوری آب تقطیرشده روی دیواره‌های شیشه‌ای را بر عهده دارند. این ناودان‌ها با شیب یک درصد طراحی شده‌اند و طول و ابعاد مقطع آن‌ها به ترتیب ۱۰۰ سانتی‌متر و دو سانتی‌متر است. آب جمع‌آوری شده از طریق شلنگ‌هایی با قطر ۳۰ میلی‌متر به مخزن خروجی سیستم منتقل می‌شود. در انتهای هر ناودان دو خروجی با قطر ۲۰ میلی‌متر تعبیه شده است تا آب تقطیرشده با کمترین هدررفت انتقال یابد. برای مدیریت نمک‌های تجمع‌یافته طی فرآیند، یک خروجی با قطر ۲۰ میلی‌متر در کف حوضچه نصب شده است. برای تأمین جریان یکنواخت آب شور و جلوگیری از ورود رسوبات به سیستم، یک ورودی با قطر ۲۰ میلی‌متر در ارتفاع ۱۰ سانتی‌متری از دیواره حوضچه طراحی شده است (شکل ۲).

تعریف سناریوهای آزمایش

در این پژوهش، آزمایش‌ها به‌منظور بررسی تأثیر عوامل عملیاتی (مانند عمق آب و شوری) و شرایط هواشناسی (شامل دما و تابش خورشیدی) بر عملکرد هرم‌های تقطیری خورشیدی، تحت شرایط اقلیمی فضای باز در کرج، به‌اجرا در آمد. برای بررسی تأثیر عمق‌های مختلف آب شور در مخزن و سطوح مختلف شوری، سناریوهای متعددی تعریف شدند. سناریوهای عمق آب در سه سطح مختلف تعیین شدند که شامل D_1 (یک سانتی‌متر)، D_2 (سه سانتی‌متر)، و D_3 (پنج سانتی‌متر) هستند. علاوه‌براین، سناریوهای شوری در پنج سطح مختلف شامل S_1 ، S_2 ، S_3 ، S_4 و S_5 بررسی شدند که به ترتیب معادل شوری‌های ۵۰۰۰، ۱۰۰۰۰، ۲۰۰۰۰، ۳۰۰۰۰ و ۴۰۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر

ارزیابی بهره‌وری هرم‌های تقطیری خورشیدی تحت تأثیر سطوح مختلف شوری و عمق آب در منطقه نیمه خشک



شکل ۲- شکل شماتیکی از اجزاء و ابعاد هرم تقطیری خورشیدی و نمایی از یک هرم خورشیدی رنگ شده به منظور افزایش تبخیر
Figure 2 - Schematic representation of the pyramid solar still components and dimensions, along with an image of a colored solar pyramid designed to increase evaporation

۲۰ لیتر آب شور به آب شیرین کن‌ها اضافه شد (تیمارهای S₁D₂, S₂D₂, S₃D₂, S₄D₂ و S₅D₂). سرانجام با افزودن ۲۰ لیتر دیگر در دهه سوم، تأثیر سطوح مختلف شوری در همان عمق پنج سانتی‌متر بررسی شد (تیمارهای S₁D₃, S₂D₃, S₃D₃ و S₄D₃). به دلیل بالا بودن هزینه ساخت هرم‌های خورشیدی، امکان افزایش تعداد این هرم‌ها و اجرای هم‌زمان تمام تیمارهای شوری و عمق وجود نداشت؛ بنابراین، در هر دهه از فصل، تنها یک عمق مشخص آزمایش شد. باین‌حال، تحلیل داده‌های هواشناسی تفاوت معنادار را در شرایط آب و هوایی هر دهه از فصل بهار یا تابستان نشان نداد. تمامی تیمارها طبق سناریوهای تعریف شده اعمال شدند (شکل ۳) و حجم آب تقطیر شده روزانه برای هر تیمار به طور دقیق از خروجی‌های هرم‌های تیمارهای مختلف اندازه‌گیری شد.

تحلیل خطا

در این پژوهش، از ابزارهای مختلفی برای اندازه‌گیری تابش کل خورشیدی، دمای محیط و دمای آب شور استفاده شد. تمامی خطاهای احتمالی در این دستگاه‌ها در نظر گرفته

مراحل اجرای آزمایش به شرح زیر است: در دهه اول بهار تأثیر سطوح مختلف شوری در عمق پنج سانتی‌متر بررسی شد (تیمارهای S₁D₃, S₂D₃, S₃D₃ و S₄D₃ و S₅D₃). در دهه دوم و پس از تخلیه ۲۰ لیتر آب شور از آب شیرین کن‌ها، تأثیر سطوح مختلف شوری در عمق سه سانتی‌متر ارزیابی شد (تیمارهای S₁D₂, S₂D₂, S₃D₂ و S₄D₂ و S₅D₂). و سرانجام در دهه سوم پس از تخلیه ۲۰ لیتر دیگر از زهاب شور داخل مخزن، تأثیر سطوح مختلف شوری در عمق یک سانتی‌متر بررسی شد (تیمارهای S₁D₁, S₂D₁, S₃D₁ و S₄D₁ و S₅D₁). به منظور بررسی تأثیر شرایط آب و هوایی متفاوت، تمامی تیمارهای تعریف شده در فصل تابستان نیز تکرار شدند. این تیمارهای آزمایشی امکان بررسی تأثیرات هم‌زمان پارامترهای هواشناسی، شوری آب، و عمق‌های مختلف آب شور را فراهم کردند. روش اجرای آزمایش در تابستان بدین صورت است که ابتدا ۱۰ لیتر آب شور به آب شیرین کن‌ها اضافه و تأثیر سطوح مختلف شوری در عمق یک سانتی‌متر بررسی شد (تیمارهای S₁D₁, S₂D₁ و S₃D₁ و S₄D₁ و S₅D₁). پس از آن در دهه دوم تابستان برای ارزیابی تأثیر سطوح مختلف شوری در عمق سه سانتی‌متر،

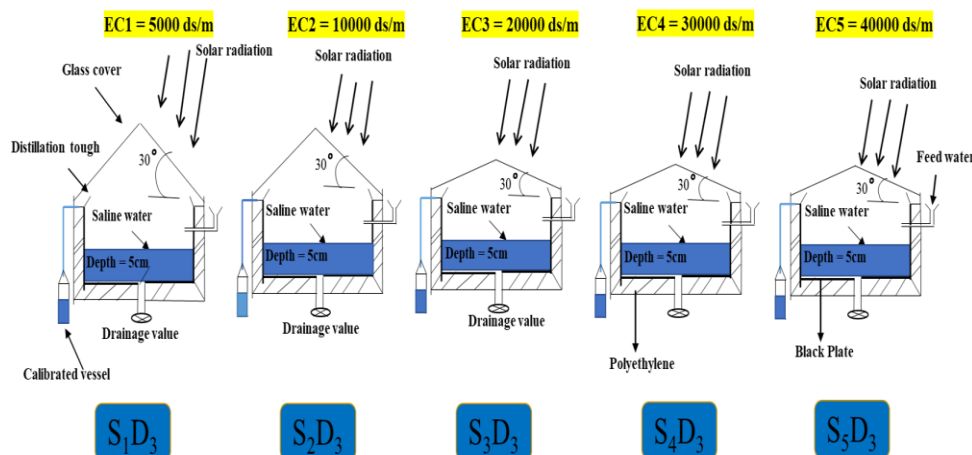
شده است زیرا این خطاها می‌توانند بر دقت نتایج تأثیرگذار باشند. این بخش به تفصیل به محاسبه خطاهای مربوط به دستگاه‌های اندازه‌گیری پرداخته است. به‌طور خاص، برای اندازه‌گیری دمای محیط، دمای آب شور، شدت تابش خورشیدی و میزان آب مقطر تولیدی، به‌ترتیب از نشانگر دما، دماسنج دیجیتال، تابش‌سنج و دو ظرف کالیبره‌شده استفاده شد. دمای محیط، شدت تابش خورشیدی و دمای آب شور به‌صورت ساعتی برای هر آب‌شیرین‌کن خورشیدی هرمی ثبت گردید و تولید آب مقطر نیز به‌طور دوره‌ای در همان بازه زمانی اندازه‌گیری شد. دقت ابزارهای اندازه‌گیری به‌کار رفته در این مطالعه در جدول ۲ آورده شده است. برای ارزیابی مدل‌های رگرسیونی ارائه شده برای شوری و عمق به‌منظور پیش‌بینی عملکرد هرم‌های تقطیری خورشیدی از

دو معیار ضریب تعیین (R^2) و خطای ریشه میانگین مربعات (RMSE) استفاده شد تا دقیق‌ترین مدل برای پیش‌بینی عملکرد سامانه‌های هرم تقطیری خورشیدی شناسایی گردد.

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}} \right]^2 \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (3)$$

در این دو رابطه: n تعداد داده‌ها، O_i و S_i به ترتیب مقادیر اندازه‌گیری‌شده و پیش‌بینی‌شده، $\bar{O}$ و $\bar{S}$ به‌ترتیب میانگین مقادیر اندازه‌گیری‌شده و پیش‌بینی‌شده، $\hat{y}_i$ مقدار مشاهده‌شده (واقعی) و y_i مقدار پیش‌بینی‌شده است.



شکل ۳ - شکل شماتیکی از فرآیند اجرای آزمایش در دهه اول بهار شامل شوری‌های مختلف با عمق ثابت پنج سانتی‌متر
Figure 3 - Schematic representation of the experiment performed in early spring, involving various salinity levels at a fixed water depth of 5 cm

جدول ۲ - دقت و درصد خطا برای ابزارهای اندازه‌گیری در این مطالعه

Table 2 - Precision and error percentage of the measuring devices employed in the research				
محدوده خطا Error range	دقت Precision	واحد Unit	پارامتر Parameter	دستگاه Device
۰ تا ۲۰۰۰	±۱	W m ⁻²	شدت تابش خورشیدی	تابش‌سنج (Pyranometer)
۰ تا ۶۰	±۰/۱	°C	دمای محیط	نشانگر دما (Temperature indicator)
-۵۰ تا ۳۰۰	±۰/۳	°C	دمای محیط و آب شور	دماسنج دیجیتال (Digital thermometer)
۱۰۰۰	±۲	mL	تولید آب مقطر	ظروف کالیبره (Calibrated vessel)

نتایج و بحث

نسبت‌های محاسبه‌شده برای رقیق‌سازی

برای دستیابی به شوری‌های هدف در هر تیمار، حجم آب شیرین موردنیاز به‌منظور مخلوط شدن با زهاب شور با دقت محاسبه شد. جدول ۳ میزان حجم آب شیرین موردنیاز برای رقیق‌سازی در هر تیمار را نمایش می‌دهد. نتایج به‌دست آمده حاکی است برای کاهش شوری زهاب از ۴۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر به ۵۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر، حجم آب شیرین موردنیاز به‌طور قابل‌توجهی با افزایش عمق آب تغییر کرده است. برای عمق پنج سانتی‌متر، این مقدار به‌ترتیب ۹۴، ۶۷، ۴۰ و ۱۳ درصد افزایش داشته است. این روند در دیگر عمق‌های آب شور نیز مشاهده شده اما با کاهش عمق، حجم آب شیرین موردنیاز برای رقیق‌سازی کاهش یافته است. این کاهش، به‌ویژه در مناطقی که با بحران کمبود آب مواجه هستند، اهمیت ویژه‌ای دارد زیرا در این مناطق منابع اصلی آب معمولاً شور هستند. برای بررسی دقیق‌تر، تأثیر عمق‌های مختلف آب شور و شوری‌های بالاتر بر میزان تبخیر مطالعه گردید تا مشخص شود کدام عمق و سطح شوری بیشترین بازدهی را در تولید آب شیرین دارد. نتایج این تحلیل‌ها می‌تواند در طراحی و مدیریت بهینه سامانه‌های آب‌شیرین‌کن خورشیدی در شرایط کم‌آبی مؤثر باشد و بهره‌وری منابع آبی را در مناطق خشک و بیابانی افزایش دهد. در صورت استفاده از سیستم‌های هرم تقطیری خورشیدی در بخش کشاورزی و شرب، میزان حجم آب شیرین تولیدی روزانه اهمیت بالایی دارد. با توجه به پایین بودن هزینه این سیستم‌ها، امکان بهره‌گیری از آن‌ها در مزارع کوچک‌مقیاس و برای کشت گیاهان کم‌آبر و مقاوم به شوری وجود دارد. با این حال به دلیل بهره‌وری پایین این سامانه‌ها، بسته به نوع گیاه هدف، می‌توان از ترکیب آب شیرین تولیدی با آب شور موجود در مناطقی استفاده کرد که دارای منابع آب شور فراوان هستند. این رویکرد باعث بهبود کیفیت آب آبیاری می‌شود و امکان استفاده کارآمدتر

از منابع آبی را فراهم می‌کند. بنابراین، در نظر گرفتن تمامی این عوامل در به‌کارگیری این سیستم در بخش کشاورزی می‌تواند منجر به بهینه‌سازی تولید روزانه آب شیرین و افزایش بهره‌وری سامانه‌های آبیاری شود. الکادی و الشیبینی (El-Kady and El-Shibini, 2001) با مطالعه تجربی به‌منظور ارزیابی کارایی سیستم‌های تقطیری خورشیدی هرمی در مصر برای تصفیه زهاب کشاورزی و استفاده از آن در آبیاری تکمیلی، این سیستم را به‌عنوان راهکاری پیشنهادی برای نمک‌زدایی ساده در کنار آبیاری قطره‌ای معرفی کردند. یافته‌های این پژوهش بر اهمیت بهره‌گیری از منابع آب غیرمتعارف، ازجمله بازچرخانی زهاب کشاورزی، استفاده از پساب تصفیه‌شده و به‌کارگیری فرایندهای ساده نمک‌زدایی مبتنی بر انرژی خورشیدی تأکید دارد. علاوه‌براین، پیشنهاد شده است که سامانه یکپارچه آب‌شیرین‌کن خورشیدی و آبیاری قطره‌ای در مناطقی که با منابع آب شور و بارندگی اندک مواجه هستند، مورد آزمایش قرار گیرد، به‌ویژه در شرایطی که ملاحظات اجتماعی-اقتصادی بر معیارهای فنی-اقتصادی اولویت دارند. علاوه‌براین، در پژوهش‌های سلامه و همکاران (Salama et al., 2024) تأثیر رژیم‌های مختلف کم آبیاری بر رشد گیاه لوبیا سبز، کارایی مصرف آب (WUE) و بهره‌وری آب (WP) بررسی نشان داده‌شده است که افزایش دسترسی به آب آبیاری موجب بهبود ویژگی‌های رشدی، عملکرد محصول و افزایش جذب عناصر غذایی نیتروژن، فسفر، و پتاسیم (NPK) در بخش‌های مختلف گیاه می‌شود. بررسی نسبت ایزوتوپی $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ بیانگر آن است که نیتروژن جذب‌شده از کود در اندام‌های مختلف گیاه، تحت شرایط آبیاری کامل (۱۰۰ درصد ظرفیت نگهداشت آب در خاک)، در غلاف‌ها بیشترین مقدار را دارد و پس از آن در ساقه‌ها و ریشه‌ها مشاهده می‌شود. بنابراین، مطالعات جامع‌تری روی سیستم‌های تقطیری خورشیدی توصیه می‌شود تا کارایی این سامانه‌ها در تأمین بخشی یا کل نیاز آبیاری گیاهان،

به‌ویژه در مناطقی با کمبود منابع آب شیرین و وفور آب شور به شکلی دقیق‌تر ارزیابی شود.

تغییرات ساعتی تابش خورشیدی، دمای محیط و آب مخزن

به‌منظور بررسی تغییرات دمایی، دمای آب مخزن و محیط با استفاده از دماسنج دیجیتال اندازه‌گیری شد. شکل ۴ تغییرات دمای آب و محیط را در روزهای مشخص شده از فصل‌های بهار و تابستان، در ارتباط با ساعات روز، نشان می‌دهد. نتایج به‌دست آمده حاکی از آن است که دمای محیط طی روزهای مختلف آزمایش و بین دو فصل مورد بررسی تفاوت قابل‌توجهی دارد. از آنجا که دمای هوا از عوامل کلیدی مؤثر بر عملکرد هرم‌های خورشیدی محسوب می‌شوند، نوسان‌های روزانه این پارامترها تأثیر مستقیمی بر میزان تولید آب شیرین در این سامانه‌ها دارد. مقادیر دمای محیط مشخص‌شده در شکل ۴، در فصل بهار از تاریخ ۱۴۰۱/۰۳/۳۰ تا ۱۴۰۱/۰۳/۰۶ و در فصل تابستان از تاریخ ۱۴۰۱/۰۵/۱۴ تا ۱۴۰۱/۰۶/۱۹ نشان داده شده است. در این مطالعه، در کل دوره آزمایش حداکثر دمای محیط برابر با ۴۰/۷۱ درجه سانتی‌گراد ثبت شده است.

مطابق شکل ۴ بیشترین دمای محیط در هر دو فصل در بازه ۱۲ ظهر تا ۳ بعدازظهر رخ داده است، درحالی‌که با کاهش تابش خورشیدی در ساعات بعدازظهر، دمای محیط به‌تدریج کاهش یافته است. بررسی تغییرات دمای محیط در بهار و تابستان نشان داد که در تاریخ ۶ خرداد، دمای محیط از ۱۷/۸ درجه سانتی‌گراد در ساعات اولیه صبح آغاز شده و تا ظهر به حداکثر مقدار ۲۸ درجه سانتی‌گراد رسیده است. در حالی که در اواخر خرداد نوسان‌های دمایی کاهش یافته و در تاریخ ۳۰ خرداد دمای محیط از ۲۶/۱ درجه سانتی‌گراد در اوایل صبح به ۳۴ درجه سانتی‌گراد در ظهر افزایش یافته است. در فصل تابستان، دمای محیط به‌طور میانگین ۲ تا ۵ درجه بیشتر است و در برخی روزها، حداکثر دما تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد نیز افزایش یافته است. روند کاهش دما پس از ظهر در هر دو فصل مشابه است اما در تابستان دمای محیط در مقادیر بالاتری حفظ شده است. بنابراین، یکی از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر تولید آب شیرین در هرم‌های خورشیدی اختلاف دمای بین آب و پوشش شیشه‌ای است. این اختلاف دما به‌عنوان نیروی محرک فرآیند نمک‌زدایی عمل می‌کند، به‌طوری‌که افزایش آن منجر به بهبود میزان تبخیر و افزایش بازده تولید آب شیرین می‌شود.

جدول ۳ - حجم محاسبه شده زهاب شور و آب شیرین مورد نیاز در تیمارهای مختلف هرم تقطیری خورشیدی
Table 3 - Calculated volume of saline drainage water and required freshwater in different treatments of the solar distillation system

شوری موردنظر ($\mu\text{S cm}^{-1}$) Desired salinity	عمق آب مخزن (cm) Depth of water	تیمار Treatment	حجم آب شیرین (L) Volume of freshwater	حجم آب شور (L) Volume of saline water
۴۰۰۰	۵	S ₅ D ₃	۲/۴	۴۷/۶
۳۰۰۰		S ₄ D ₃	۱۴/۳	۳۵/۷
۲۰۰۰		S ₃ D ₃	۲۶/۲	۲۳/۸
۱۰۰۰		S ₂ D ₃	۳۸/۱	۱۱/۹
۵۰۰		S ₁ D ₃	۴۴/۰	۶/۰
۴۰۰۰	۳	S ₅ D ₂	۱/۴	۲۸/۶
۳۰۰۰		S ₄ D ₂	۸/۶	۲۱/۴
۲۰۰۰		S ₃ D ₂	۱۵/۷	۱۴/۳
۱۰۰۰		S ₂ D ₂	۲۲/۸	۷/۲
۵۰۰		S ₁ D ₂	۲۶/۴	۳/۶
۴۰۰۰	۱	S ₅ D ₁	۰/۵	۹/۵
۳۰۰۰		S ₄ D ₁	۷/۲	۲/۸
۲۰۰۰		S ₃ D ₁	۴/۸	۵/۲
۱۰۰۰		S ₂ D ₁	۲/۴	۷/۶
۵۰۰		S ₁ D ₁	۱/۲	۸/۸

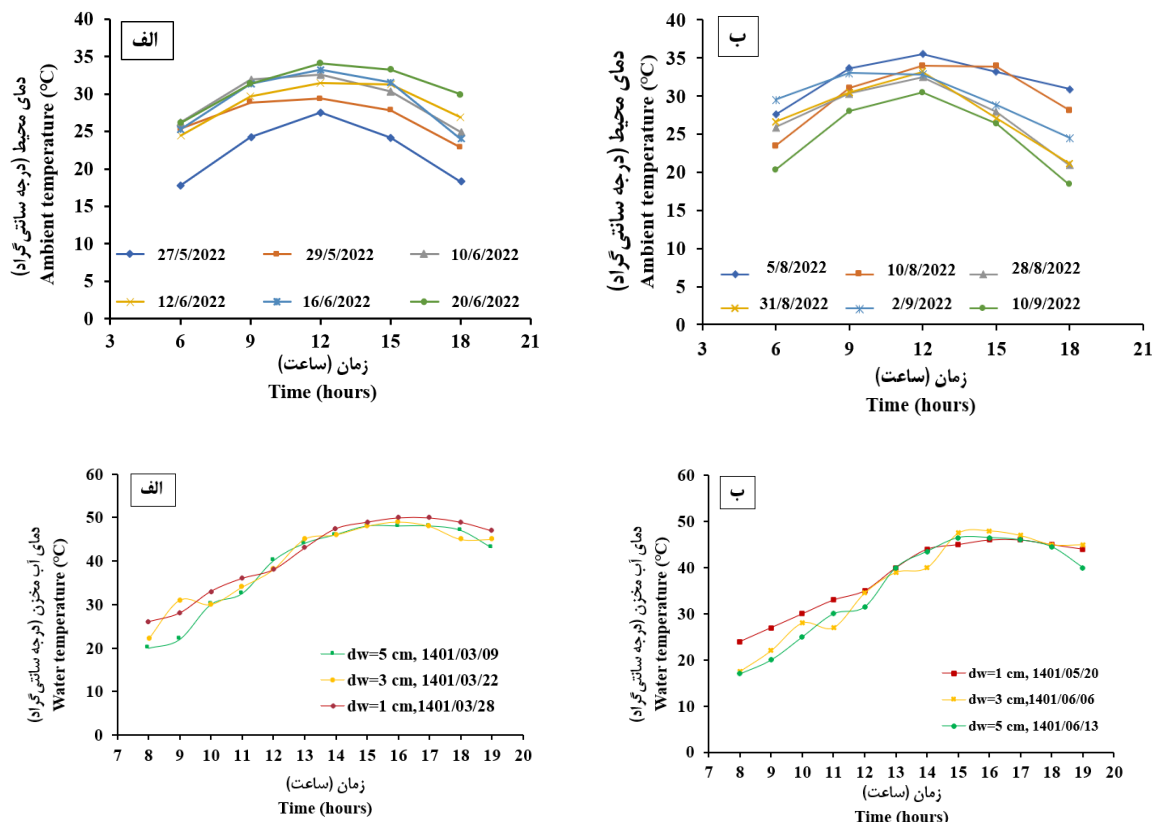
کمترین عمق (۰/۰۲ متر) از آب در هرم تقطیری خورشیدی است. مانوکار و همکاران (Manokar *et al.*, 2020) تأثیر عمق آب و شرایط عایق‌بندی را بر عملکرد آب‌شیرین‌کن خورشیدی هرمی بررسی کردند. در این مطالعه، عمق آب از ۱ تا ۳/۵ سانتی‌متر تغییر داده شد و تأثیر آن بر تولید آب شیرین با عایق و بدون عایق بررسی گردید و نشان داده شد بیشترین تولید آب شیرین در عمق یک سانتی‌متر در هر دو حالت با عایق و بدون عایق است. در شرایط بدون عایق تولید آب شیرین به ترتیب برابر با ۳/۲۷، ۲/۹۳، ۲/۲۶ و ۱/۵۹ کیلوگرم بر مترمربع برای عمق‌های ۱، ۲، ۳ و ۳/۵ سانتی‌متر مشاهده شد. اشان و همکاران (Ahsan *et al.*, 2014) یک آب‌شیرین‌کن خورشیدی کم‌هزینه را برای استفاده در مناطق روستایی و ساحلی به‌منظور تبدیل آب شور به آب آشامیدنی توسعه دادند و بهره‌وری آب را با تغییر عمق‌های آب (۱/۵، ۲/۵ و ۵ سانتی‌متر) ارزیابی کردند و به این نتیجه رسیدند که بهره‌وری آب به‌طور معکوس با عمق آب نسبت دارد. تیواری و تیواری (Tiwari and Tiwari, 2006) نیز تأثیر عمق آب‌ها را بر انتقال حرارت و جرم در یک آب‌شیرین‌کن خورشیدی در شرایط اقلیمی تابستانی بررسی کردند و دریافتند که برای حداقل عمق آب، به دلیل افزایش ضریب انتقال حرارت همرفتی و تبخیر، بهره‌وری بالاتری حاصل می‌شود.

عملکرد سیستم تقطیری خورشیدی عمدتاً با مقدار آب شیرین تولید شده تعیین می‌شود که به شدت به تابش خورشیدی، دمای محیط و زاویه پوشش‌های شیشه‌ای نسبت به افق بستگی دارد (Hammoody *et al.*, 2023; Jathar *et al.*, 2022). تابش خورشیدی ورودی مهم‌ترین عامل اقلیمی مؤثر بر عملکرد آب‌شیرین‌کن خورشیدی است. این تابش منبع اصلی تأمین انرژی حرارتی محسوب می‌شود و تأثیر مستقیمی بر راندمان فرآیند تقطیر دارد. از نظر تئوری، شدت تابش خورشیدی با حداکثر میزان تولید آب مقطر در واحد

بررسی تغییرات دمای آب در عمق‌های مختلف یک، سه و پنج سانتی‌متر نشان داد که با کاهش عمق، میزان جذب انرژی خورشیدی و افزایش دما سریع‌تر اتفاق می‌افتد. در عمق یک سانتی‌متری، دمای آب در ساعات ظهر به حداکثر مقدار خود (۵۰ درجه سانتی‌گراد) رسید درحالی‌که در عمق‌های بیشتر افزایش دما تدریجی‌تر بود. این یافته‌ها تأثیر مستقیم عمق آب را بر میزان تبادل حرارتی و جذب انرژی خورشیدی تأیید می‌کند. بالاترین دمای آب در تاریخ‌های ۲۹ خرداد و ۲۱ مرداد، به ترتیب در بهار و تابستان ثبت شد. این نتایج نشان می‌دهد که کنترل عمق آب و بهینه‌سازی زمان‌بندی برداشت انرژی خورشیدی می‌تواند عملکرد سیستم‌های تقطیر خورشیدی را بهبود بخشد. نتایج پژوهش‌های ساتیامورتی و همکاران (Sathyamurthy *et al.*, 2014) نشان داد که عمق آب تأثیر قابل‌توجهی بر تغییرات دمایی و عملکرد هرم‌های خورشیدی دارد. با کاهش عمق آب، دمای آن سریع‌تر افزایش و کاهش یافت و حداکثر دما در کمترین عمق (۰/۰۲ متر) مشاهده شد. این امر منجر به افزایش میزان تبخیر و بهبود فرآیند تقطیر شد. در عمق‌های بیشتر، اثر ذخیره‌سازی گرما موجب افزایش دمای آب در ساعات بعدازظهر گردید. علاوه‌براین، کاهش عمق آب باعث افزایش ضریب انتقال حرارت تبخیری و در نتیجه افزایش عملکرد حرارتی سامانه شد. راجامانیکام و راگوپاتی (Rajamanickam and Ragupathy, 2012) با بررسی تأثیر عمق‌های مختلف آب مخزن هرم‌های تقطیری خورشیدی بر انتقال حرارت و تولید نشان دادند بیشترین حجم آب تولیدی در کمترین عمق (۰/۰۱ متر) برابر با ۳/۰۷ لیتر بر مترمربع در روز است. در مطالعه‌ای دیگر توسط فدا‌تار و ورما (Phadatare and Verma, 2007) تأثیر عمق آب بر انتقال حرارت و جرم داخلی در آب‌شیرین‌کن خورشیدی پلاستیکی بررسی گردید و نتایج نشان داد که حداکثر میزان تولید آب تقطیرشده برابر با ۲/۱ لیتر بر متر مربع در روز در

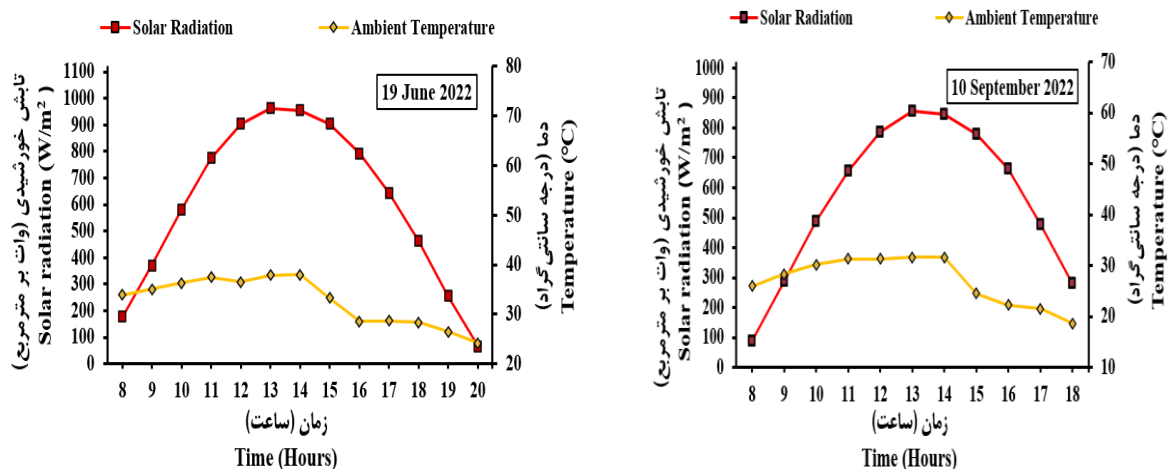
همان‌طور که در شکل ۵ نمایش داده شده است، تابش خورشیدی نیز در هر دو دوره آزمایشی در حوالی ظهر به اوج خود می‌رسد و پس از آن به تدریج کاهش می‌یابد. روند تغییرات دما نشان می‌دهد که دما در هر دو فصل با گذر زمان افزایش یافته است و در ساعات بعد از ظهر به حداکثر مقدار خود رسیده و سپس کاهش یافته است. بنابراین، یافته‌ها حاکی از آن است که در فصل تابستان، به دلیل افزایش دمای محیط و شدت تابش خورشیدی، دمای آب نیز به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده شد که بیشترین افزایش دمای آب با کاهش عمق آب شور همراه است. این امر نشان‌دهنده رابطه معکوس میان عمق آب شور و دمای آب است، به‌طوری‌که کاهش عمق آب شور منجر به افزایش بیشتر دمای آن و افزایش تولید آب شیرین می‌شود.

سطح رابطه مستقیم دارد. برای برآورد دقیق بازده روزانه، تعیین ساعات تابش خورشید ضروری است تا مقدار کل انرژی تابشی روزانه محاسبه و در تحلیل عملکرد سیستم لحاظ شود. تغییرات ساعتی دمای محیط و شدت تابش خورشیدی در روزهای آزمایشی تعیین شده برای آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی هر می‌شکل با پوشش شیشه‌ای و عمق آب پنج سانتی‌متر در شکل ۵ ارائه شده است. داده‌های میدانی جمع‌آوری شده در دو تاریخ ۲۹ خرداد (۱۹ ژوئن) و ۱۹ شهریور (۱۰ سپتامبر) نشان می‌دهد که شدت تابش خورشیدی در خردادماه در بازه‌ای بین ۷۷ تا ۹۶۵ وات بر مترمربع و در شهریورماه در محدوده ۸۷ تا ۸۵۶ وات بر مترمربع متغیر بوده است. به‌طور مشابه، دمای محیط در خردادماه بین ۲۷ تا ۳۸/۴ درجه سانتی‌گراد و در شهریورماه بین ۱۸/۶ تا ۳۱/۶ درجه سانتی‌گراد نوسان داشته است.



شکل ۴ - تغییرات دمای محیط و آب شور موجود در مخزن به صورت ساعتی در روزهای خاص آزمایش در (الف) بهار و (ب) تابستان
Figure 4 - Hourly variations of ambient temperature and saline water temperature in the reservoir during selected test days in (a) spring and (b) summer.

ارزیابی بهره‌وری هرم‌های تقطیری خورشیدی تحت تأثیر سطوح مختلف شوری و عمق آب در منطقه نیمه خشک



شکل ۵ - تغییرات ساعتی دمای محیط و شدت تابش خورشیدی در روزهای آخر ماه‌های خرداد و شهریور

Figure 5- Hourly variations of ambient temperature and solar radiation intensity on the final days of the months of Khordad (June) and Shahrivar (September)

سانتی‌گراد در دمای محیط، آب شیرین تولیدی را به میزان ۸/۲ درصد افزایش می‌دهد. تحقیقات متعدد دیگری نیز اثر تابش خورشیدی را بر عملکرد سیستم بررسی کرده‌اند و به‌طور مداوم نشان داده‌اند که بهره‌وری آب شیرین‌کن‌های خورشیدی با افزایش تابش خورشیدی افزایش می‌یابد (Altarawneh *et al.*, 2017; Hammoodi *et al.*, 2023; Kamal, 1988; Sampathkumar *et al.*, 2010).

از آنجا که پارامترهای هواشناسی دیگری مانند سرعت باد و رطوبت نسبی نیز بر عملکرد هرم‌های تقطیری خورشیدی تأثیرگذار هستند، تحقیقات بیشتر برای ارزیابی تأثیر این عوامل بر تولید آب شیرین توسط هرم‌ها در منطقه مطالعاتی کرج ضروری است که در این پژوهش تنها به بیان تأثیر این دو پارامتر بر خروجی هرم‌ها پرداخته شده است. کوفی و همکاران (Koffi *et al.*, 2009) گزارش کردند که در اکثر آزمایش‌های پیشین مربوط به هرم‌های خورشیدی، رطوبت نسبی بین ۴۰ تا ۶۵ درصد متغیر و کمترین مقدار ثبت شده ۴۰ درصد بوده است. این محققان همچنین نشان دادند که با افزایش رطوبت نسبی در دمای محیطی ثابت، میزان تولید آب تصفیه شده کاهش می‌یابد. این کاهش عمدتاً به دلیل ضریب انتقال حرارت همرفتی پایین بین هرم

روندهای مشاهده شده در تغییرات پارامترهای هواشناسی، همبستگی قابل توجهی با نتایج مطالعات تجربی پیشین نشان می‌دهند (Abdelal and Taamneh, 2017; Manokar *et al.*, 2020; Prakash and Jayaprakash, 2021; Sharshir *et al.*, 2019). در مطالعات متعدد تأثیر پارامترهای اقلیمی بر عملکرد آب شیرین‌کن‌های خورشیدی بررسی و نشان داده شده است این پارامترها مستقیماً بر بهره‌وری آب شیرین‌کن‌های خورشیدی تأثیر می‌گذارند. برای نمونه، افزایش دما باعث افزایش بهره‌وری آب شیرین‌کن خورشیدی می‌شود (Arunkumar *et al.*, 2012; Muftah *et al.*, 2014; Tripathi and Tiwari, 2004). Xiao *et al.*, (2013) گزارش کردند که میزان تولید آب شیرین‌کن تقطیری خورشیدی با افزایش اختلاف دما بین مخزن و پوشش تقطیر افزایش می‌یابد و افزایش دمای هوای محیط به‌طور جزئی بازده سیستم‌های تقطیری خورشیدی را بهبود می‌بخشد. به‌طور خاص افزایش ۱۰ درجه فارنهایت در دمای هوا معمولاً منجر به افزایش تقریباً پنج درصد در بازده می‌شود (Madeshwaren *et al.*, 2024). بررسی‌های الهینای و همکاران (Al-Hinai *et al.*, 2002) نیز این یافته‌ها را تأیید می‌کند و نشان می‌دهد افزایش ۱۰ درجه

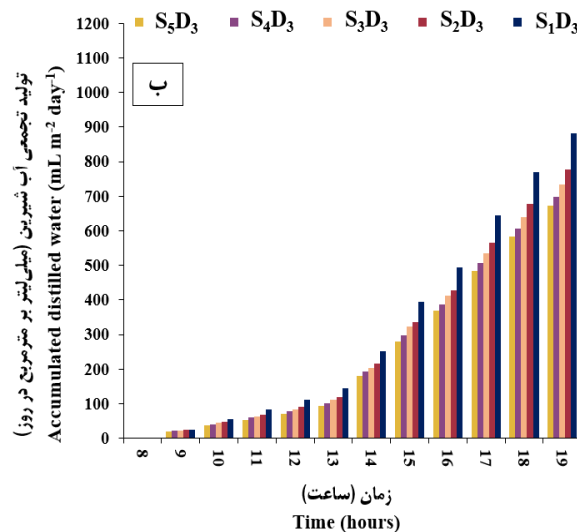
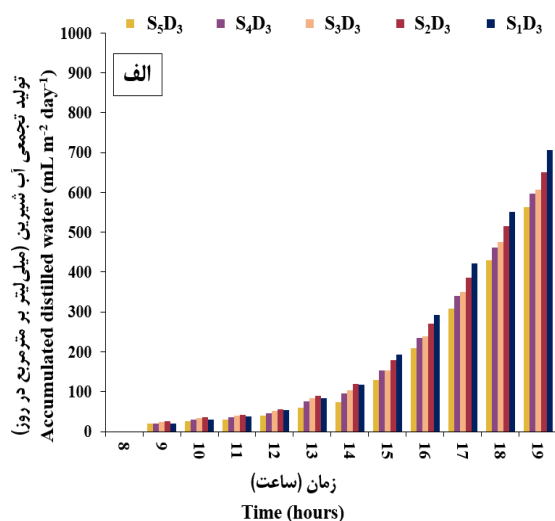
خورشیدی و محیط اطراف و کاهش دمای بخار اشباع درون هرم است (Lindblom and Nordell, 2006; Murugavel *et al.*, 2013). سرعت باد می‌تواند دو اثر متضاد بر هرم‌ها با پوشش شیشه‌ای داشته باشد. از یک سو می‌تواند باعث تسریع در دفع گرما از سطح شیشه‌ای شود، که در نتیجه دمای آن را کاهش و میزان میعان و تبخیر را افزایش می‌دهد. از سوی دیگر سرعت بالای باد ممکن است منجر به افزایش اتلاف حرارت سیستم از طریق همرفت شده و در نتیجه میزان تبخیر آب را کاهش دهد. تحقیقات مختلف نتایج متفاوتی را در مورد تأثیر باد بر راندمان آب شیرین‌کن‌های خورشیدی نشان داده‌اند (Rahbar and Esfahani, 2012). با کاهش دمای پوشش، بهره‌وری سیستم افزایش می‌یابد، زیرا اختلاف دما بین شیشه و آب بیشتر می‌شود و جریان هوای داخلی بهبود می‌یابد. افزایش سرعت باد باعث تشدید تبادل حرارتی تبخیری و همرفتی بین آب درون هرم و اتمسفر می‌شود و این تبادل حرارتی اثر منفی سرعت بالای باد را تا حدی جبران می‌کند (Tiwari *et al.*, 2009). نگاراجان و همکاران (Nagarajan *et al.*, 2017) به‌صورت تئوری تأثیر جریان هوا بر کل سطح شیشه‌ای یک آب‌شیرین‌کن خورشیدی هرمی شکل به‌منظور ارزیابی افزایش تولید آب شیرین بررسی کردند. نتایج بررسی نشان داد که با افزایش سرعت هوا به حداکثر مقدار خود (۴۰ متر بر ثانیه)، میزان تولید آب شیرین به‌طور قابل‌توجهی تا ۱۰/۱ کیلوگرم بر مترمربع افزایش می‌یابد. در شرایط واقعی، بهره‌وری تولید آب شیرین به سرعت طبیعی باد وابسته است و نتایج نشان می‌دهد که افزایش سرعت باد از ۰/۵ به ۴ متر بر ثانیه، تولید آب را تا ۱۰۴ درصد افزایش می‌دهد. ساتیامورتی و همکاران (Sathyamurthy *et al.*, 2014) تأثیر پارامترهای مختلف بر عملکرد آب‌شیرین‌کن خورشیدی هرمی شکل بررسی کردند و نشان دادند افزایش سرعت باد از ۱/۵ به ۴/۵ متر بر ثانیه موجب افزایش ۱۵/۵ درصد در تولید آب شیرین می‌شود.

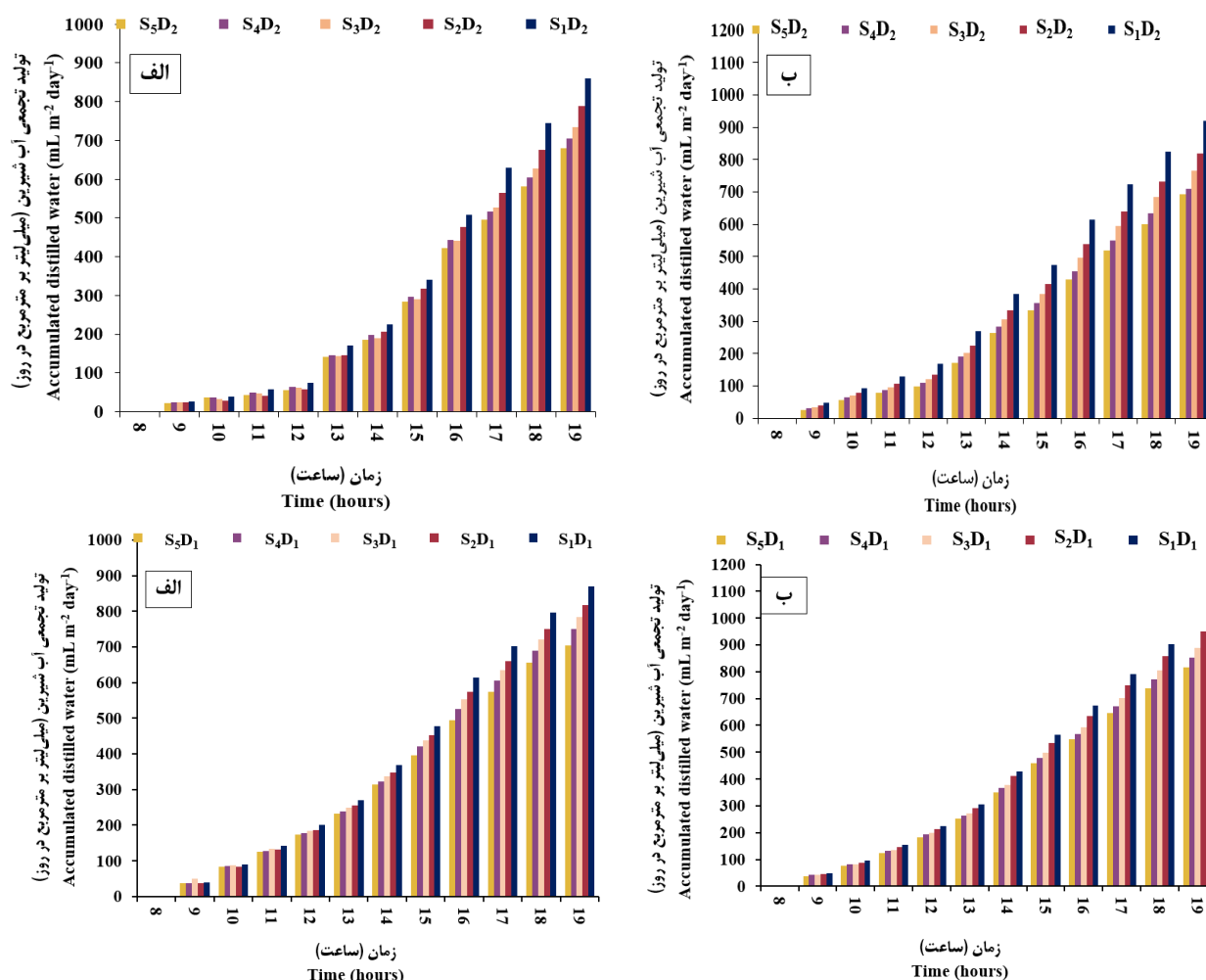
تغییرات تجمعی عملکرد تولیدی تیمارهای آزمایش

میزان تولید تجمعی روزانه آب شیرین در آب‌شیرین‌کن تقطیری خورشیدی هرمی در شکل ۶ ارائه شده است. این شکل میزان تولید تجمعی آب شیرین را در دو بازه زمانی آزمایش شامل (الف) بهار و (ب) تابستان نمایش می‌دهد. متغیرهای بررسی‌شده در این مطالعه شامل پنج سطح شوری (S_1 تا S_5) و سه عمق آب شور (D_1 تا D_2) درون مخزن هرم‌های تقطیری خورشیدی هستند. روند تغییرات عملکرد سیستم در ساعات مختلف روز، از ساعت ۸ تا ۱۹، به‌روشنی در شکل ۶ مشاهده می‌شود. نتایج حاصل نشان می‌دهد که تولید آب شیرین در ساعات ابتدایی روز به‌آرامی از صفر افزایش می‌یابد و بعد از ظهر به حداکثر مقدار خود می‌رسد. این تأخیر اولیه در فرآیند تولید ناشی از زمان لازم برای گرم شدن آب و رسیدن آن به دمای مناسب برای تبخیر است. در ساعات بعدازظهر، هم‌زمان با کاهش شدت تابش خورشیدی، میزان تولید آب مقطر نیز روند کاهشی دارد. این الگوی تغییرات نشان‌دهنده وابستگی مستقیم عملکرد آب‌شیرین‌کن‌های خورشیدی به شدت تابش خورشیدی و شرایط محیطی است. نتایج بررسی‌ها نشان داد که با افزایش شوری از ۵۰۰۰ تا ۴۰۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر، میزان تولید تجمعی آب شیرین در هر دو فصل بهار و تابستان کاهش یافته است. میزان کاهش تولید تجمعی در ساعت اوج تولید آب شیرین برای عمق پنج سانتی‌متر و در شوری‌های ۱۰۰۰۰، ۲۰۰۰۰، ۳۰۰۰۰ و ۴۰۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر، در مقایسه با شوری ۵۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر، به‌ترتیب برابر با ۸، ۱۴، ۱۵ و ۲۰ درصد بوده است. این روند کاهش مشابه، با افزایش شوری از تیمار S_1 تا S_5 ، نشان‌دهنده کاهش تجمعی حجم آب شیرین تولیدی به میزان ۱۲، ۱۷، ۲۱ و ۲۴ درصد است. حجم تجمعی روزانه تولید آب شیرین در هرم‌های خورشیدی در فصل بهار و در ساعت ۱۹ برای عمق پنج سانتی‌متر و در

به‌طور میانگین، در تمامی عمق‌ها و در هر دو فصل بهار و تابستان، اختلاف عملکرد بین تیمارهای S_1 و S_5 در حدود ۲۰ تا ۲۵ درصد برآورد شد که نشان‌دهنده اثر قابل توجه شوری بر فرآیند تبخیر است. این یافته بیانگر آن است که برای افزایش بازده سیستم‌های تقطیری هرمی شکل، کاهش شوری آب ذخیره‌شده می‌تواند راهکاری مؤثر باشد. علاوه‌براین، افزایش عمق آب از یک به پنج سانتی‌متر، در فصل تابستان و در شوری ثابت ۵۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر، منجر به کاهش میزان تولید آب شیرین از ۱۰۰۱ به ۸۸۱ میلی‌لیتر بر مترمربع در روز شد که نشان‌دهنده کاهش ۱۲ درصد در تولید آب شیرین با افزایش عمق آب شور است. این روند کاهشی در تمامی ساعات روز، فصل‌ها و شرایط شوری مشابه مشاهده شد. به‌طور کلی، نتایج تحقیق نشان می‌دهد در هر دو مجموعه داده‌های مربوط به بهار و تابستان، روند کاهش عملکرد با افزایش شوری و عمق آب مشاهده می‌شود، اما عملکرد کلی سیستم در تابستان بالاتر است. این افزایش عملکرد در تابستان عمدتاً به دلیل شدت بیشتری بودن تابش خورشیدی و دمای بالاتر محیط است که منجر به افزایش میزان تبخیر می‌شود.

شوری‌های S_1 تا S_5 به‌ترتیب برابر با ۷۰۶، ۶۵۱، ۶۰۷، ۵۹۷ و ۵۶۴ میلی‌لیتر بر مترمربع در روز اندازه‌گیری شد. این مقادیر در تابستان تحت شرایط عمق و شوری مشابه به‌ترتیب ۸۸۲، ۷۷۶، ۷۳۴، ۶۹۸ و ۶۷۳ میلی‌لیتر بر مترمربع در روز بوده است که نشان‌دهنده تأثیرات قابل توجه شرایط محیطی بر عملکرد سیستم‌های تقطیری هرمی شکل است. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، حجم تجمعی آب شیرین تولیدی در عمق سه سانتی‌متر، با افزایش شوری از تیمارهای S_1 تا S_5 ، در فصل بهار به‌ترتیب برابر با ۸۵۹، ۷۸۸، ۷۳۴، ۷۰۴ و ۶۸۰ میلی‌لیتر بر مترمربع در روز بوده است. مقایسه این مقادیر با تولید آب شیرین در عمق پنج سانتی‌متر، تحت شرایط محیطی مشابه، نشان‌دهنده افزایش میانگین ۱۷ درصد در تولید آب شیرین در عمق سه سانتی‌متر است. افزایش حجم آب شیرین تولیدی در عمق یک سانتی‌متر، در مقایسه با دو تیمار سه و پنج سانتی‌متری، به‌روشنی قابل مشاهده است. بنابراین، نتایج نشان داد که افزایش شوری و عمق آب شور منجر به کاهش حجم آب تقطیرشده توسط هرم‌های خورشیدی می‌شود. این کاهش در عملکرد سیستم، در مورد شوری آب عمدتاً به دلیل افزایش فشار اسمزی و کاهش میزان تبخیر رخ می‌دهد.





شکل ۶- تغییرات تجمعی عملکرد تولیدی تیمارهای مختلف آزمایش در دو فصل (الف) بهار و (ب) تابستان

Figure 6- Cumulative changes in the production performance of different experimental treatments during two seasons: (a) spring and (b) summer.

با توجه به اینکه یافته‌های این پژوهش صرفاً بر شناسایی پارامترهای مؤثر بر عملکرد هرم‌های خورشیدی و روابط میان آن‌ها متمرکز است، مطالعات تکمیلی برای تحلیل اقتصادی این سیستم‌ها ضروری خواهد بود. پیشنهاد می‌شود که در شرایط واقعی کاربرد هرم‌ها در آبیاری تحلیل جامعی از هزینه‌ها و سودآوری آن‌ها بشود تا ارزیابی دقیقی از پتانسیل اقتصادی این فناوری در بخش کشاورزی ارائه گردد. با توجه به تأثیر قابل توجه طراحی هرم‌ها بر عملکرد و میزان تولید آب شیرین، مطالعات تکمیلی برای تعیین طراحی بهینه و انتخاب مواد مناسب از نظر اقتصادی و بهره‌وری تولید ضروری است.

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد افزایش عمق آب تأثیر منفی بر میزان تولید آب شیرین دارد و عمق آب در هرم‌های خورشیدی به‌طور مستقیم بر بازده تولید آب خالص تأثیر می‌گذارد. این موضوع به افزایش ظرفیت گرمایی و کاهش راندمان انتقال حرارت مرتبط است. افزایش عمق آب موجب افزایش جرم حرارتی سیستم می‌شود، به‌طوری که با افزایش جرم حرارتی میزان انرژی موردنیاز برای افزایش دمای آب و تبخیر آن افزایش می‌یابد. این امر فرآیند تبخیر را طولانی‌تر می‌کند و در نتیجه باعث کاهش بهره‌وری آب‌شیرین‌کن خورشیدی می‌شود.

رگرسیونی جایگزین در پیش‌بینی عملکرد این سامانه‌ها به کار رود. نتایج حاصل از مدل‌سازی رگرسیونی بر اساس شوری آب ذخیره‌شده در هرم‌ها نشان داد که مدل‌های چندجمله‌ای و گویا عملکرد مشابهی دارند زیرا مقادیر ضریب تعیین آن‌ها برابر است. با این حال، مدل گویا به دلیل کمترین مقدار خطای ریشه میانگین مربعات ($RMSE = 0.36$) نسبت به مدل توانی ($RMSE = 0.40$) دقت بالاتری ارائه کرده است. به طور کلی، مدل‌های غیرخطی شامل مدل‌های توانی، گویا و چندجمله‌ای، در مقایسه با مدل‌های خطی، دقت بالاتری در پیش‌بینی عملکرد سامانه‌های هرم تقطیری خورشیدی نشان دادند. این یافته نشان می‌دهد که رابطه عملکرد این سامانه‌ها با متغیرهای محیطی، مانند عمق آب و شوری اغلب ماهیتی غیرخطی دارد. در حالی که مدل‌های خطی به دلیل سادگی و قابلیت تفسیر بهتر مزایای خاصی دارند. مدل‌های پیچیده‌تر مانند مدل‌های گویا و چندجمله‌ای به دلیل انعطاف‌پذیری بیشتر در توصیف روابط غیرخطی، برای تحلیل داده‌های تجربی مناسب‌تر هستند.

مدل‌های رگرسیونی عمق آب شور و میزان شوری

در این پژوهش، مدل‌های رگرسیونی مختلفی برای بررسی روابط بین عمق آب شور (D) و میزان عملکرد (Y) و بین هدایت الکتریکی (EC) و عملکرد (Y) ارزیابی شد. هر مدل بر اساس معیارهای ضریب تعیین (R^2) و خطای ریشه میانگین مربعات ($RMSE$) تحلیل شد تا دقیق‌ترین مدل برای پیش‌بینی عملکرد سامانه‌های هرم تقطیری خورشیدی شناسایی شود. در ابتدا، مقایسه‌ای جامع میان عملکرد مدل‌های مبتنی بر عمق آب شور ارائه و پس از آن مدل‌های مبتنی بر شوری بررسی شده‌اند. بر اساس نتایج ارائه‌شده در جدول ۴، مدل توانی با بیشترین مقدار ضریب تعیین ($R^2 = 0.96$) و کمترین مقدار خطای ریشه میانگین مربعات ($RMSE = 1.08$) به عنوان دقیق‌ترین مدل در پیش‌بینی عملکرد هرم‌های تقطیری خورشیدی شناخته شد. با این حال، مدل خطی نیز در مقایسه با دیگر مدل‌ها میزان خطای نسبتاً کمتری نشان داده است و می‌تواند به عنوان مدل

جدول ۴- مقایسه مدل‌های رگرسیونی مختلف برای برآورد عملکرد هرم‌های تقطیری خورشیدی

Table 4- Comparison of different regression models for estimating the performance of pyramid solar stills			
RMSE	R^2	معادله رگرسیونی Developed regression model	مدل رگرسیونی برای عمق Regression model for depth
۴/۹۶	۰/۹۴	$Y = -6.67 \times D + 100.5$	خطی (Linear)
۵/۸۴	۰/۹۱	$Y = 101.7 \times e^{-0.08084D}$	نمایی (Exponential)
۱/۰۸	۰/۹۶	$Y = 93.72 \times D^{-0.1762}$	توانی (Power)
۶/۶۴	۰/۸۸	$Y = 1027 \times (D + 9.96)^{-1}$	گویا (Rational)
RMSE	R^2	معادله رگرسیونی Developed regression model	مدل رگرسیونی برای شوری Regression model for salinity
۰/۷۵	۰/۹۸	$Y = -0.0003387 \times EC + 85.75$	خطی (Linear)
۰/۴۰	۰/۹۹	$Y = 4.22 \times 10^{-9} \times EC^2 - 527 \times 10^{-7} \times EC + 87.15$	چندجمله‌ای (Polynomial)
۰/۶۵	۰/۹۸	$Y = 86.3 \times e^{-4.354 \times 10^{-6} EC}$	نمایی (Exponential)
۱/۰۸	۰/۹۶	$Y = 156.8 \times EC^{-0.07127}$	توانی (Power)
۰/۳۶	۰/۹۹	$Y = (51.28 \times EC + 5.1 \times 10^6) \times (EC + 5.83 \times 10^4)^{-1}$	گویا (Rational)

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

رگرسیون نشان داد که مدل‌های غیرخطی از جمله مدل توانی برای عمق و مدل گویا برای شوری، نسبت به مدل‌های خطی، دقت بالاتری در پیش‌بینی عملکرد هرم‌های تقطیری خورشیدی دارند. ارتباط معناداری نیز میان عرض جغرافیایی و زاویه بهینه شیب پوشش شیشه‌ای تأیید شد که بر اهمیت تنظیم زاویه پوشش متناسب با موقعیت جغرافیایی برای بهبود بازده تقطیر تأکید دارد. نتایج این پژوهش نشان داد که کاهش عمق و شوری آب موجب افزایش کارایی هرم‌های تقطیری خورشیدی می‌شود. طراحی بهینه این سامانه‌ها با در نظر گرفتن شرایط محیطی و عملیاتی می‌تواند تأثیر بسزایی در افزایش تولید آب شیرین در مناطق کم‌آب داشته باشد. پیشنهاد می‌شود عملکرد این سیستم‌ها برای تأمین آب موردنیاز در آبیاری تکمیلی گیاهان مقاوم به شوری و کم‌آب‌بر بررسی شود. امکان ترکیب آب شور منطقه با آب شیرین تولیدی هرم‌ها به‌منظور بهبود کیفیت آب نهایی می‌تواند در افزایش عملکرد محصولات کشاورزی کرج در مقیاس کوچک تحت شرایط کم‌آبی فعلی بررسی گردد. پیشنهاد می‌شود که در مطالعات آینده به این موارد توجه شود: معرفی متغیرهای جدید، طراحی نوآورانه‌تر (مانند تغییر در ساختار هرم یا استفاده از مواد پیشرفته‌تر مانند نانومواد)، بهره‌گیری از مدل‌های پیشرفته‌تر، زاویه قرارگیری هرم‌ها، بررسی عدم قطعیت نتایج و عوامل مؤثر بر خطای آزمایش، تحلیل جامع محدودیت‌های مطالعه، و ارزیابی هزینه-فایده همراه با مقایسه با فناوری‌های جایگزین.

در این پژوهش، پنج هرم تقطیری خورشیدی مربعی طراحی و ساخته شد و طی بازه زمانی سه‌ماهه تحت شرایط اقلیمی کرج، ایران (ارتفاع ۱۳۰۴ متر؛ موقعیت جغرافیایی ۳۵° ۸۱' شمالی و ۵۰° ۹۸' شرقی) مورد آزمایش قرار گرفتند. هدف این مطالعه، بررسی عملکرد هرم‌های تقطیری خورشیدی در شرایط محیطی و عملیاتی مختلف و ارزیابی تأثیر تابش خورشیدی، عمق آب و شوری بر میزان تولید آب شیرین بود. نتایج نشان داد که اختلاف دمای بین آب و پوشش شیشه‌ای نقش کلیدی در فرآیند تقطیر دارد به‌طوری که افزایش این اختلاف دما موجب بهبود میزان تبخیر و افزایش بازده تولید آب شیرین می‌شود. بررسی تغییرات دمایی آب در عمق‌های مختلف نشان داد که در عمق‌های کمتر، جذب انرژی خورشیدی سریع‌تر است و دمای آب در مدت‌زمانی کوتاه‌تر به حداکثر مقدار خود می‌رسد. در مقابل، افزایش عمق آب تأثیر منفی بر میزان تولید آب شیرین دارد به‌گونه‌ای که در شوری ثابت، افزایش عمق از یک سانتی‌متر به پنج سانتی‌متر، منجر به کاهش ۱۲ درصد در تولید آب شیرین شده است. افزایش شوری از ۵۰۰۰ به ۴۰۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر، عملکرد سیستم را به‌طور چشمگیری کاهش داده است. بیشترین میزان تولید آب شیرین (۱۱۰۰ میلی‌لیتر بر مترمربع در روز) در تیمار D₁S₁ طی فصل تابستان به دست آمد که نشان‌دهنده تأثیر مثبت تابش خورشیدی و دمای محیط بالا در کنار کاهش عمق و شوری آب بر عملکرد سیستم است. علاوه‌براین، تحلیل‌های

مراجع

- Abd Elaziz, M., Essa, F.A., Elsheikh, A.H., 2021. Utilization of ensemble random vector functional link network for freshwater prediction of active solar stills with nanoparticles. *Sustain. Energy Technol. Assessments* 47, 101405.
- Abdelal, N., Taamneh, Y., 2017. Enhancement of pyramid solar still productivity using absorber plates made of carbon fiber/CNT-modified epoxy composites. *Desalination* 419, 117–124. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.06.012>
- Abdullah, A.S., Omara, Z.M., Bek, M.A., Essa, F.A., 2020. An augmented productivity of solar distillers integrated to HDH unit: experimental implementation. *Appl. Therm. Eng.* 167, 114723.

- Abujazar, M.S.S., Fatihah, S., Rakmi, A.R., Shahrom, M.Z., 2016. The effects of design parameters on productivity performance of a solar still for seawater desalination: A review. *Desalination* 385, 178–193. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.02.025>
- Aburideh, H., Deliou, A., Abbad, B., Alaoui, F., Tassalit, D., Tigrine, Z., 2012. An experimental study of a solar still: Application on the sea water desalination of Fouka. *Procedia Eng.* 33, 475–484.
- Ahsan, A., Imteaz, M., Thomas, U.A., Azmi, M., Rahman, A., Daud, N.N.N., 2014. Parameters affecting the performance of a low cost solar still. *Appl. Energy* 114, 924–930.
- Akash, B.A., Mohsen, M.S., Nayfeh, W., 2000. Experimental study of the basin type solar still under local climate conditions. *Energy Convers. Manag.* 41, 883–890.
- Al-Hinai, H., Al-Nassri, M.S., Jubran, B.A., 2002. Effect of climatic, design and operational parameters on the yield of a simple solar still. *Energy Convers. Manag.* 43, 1639–1650.
- Alawee, W.H., Hammoodi, K., Dhahad, H.A., Omara, Z.M., Essa, F.A., Abdullah, A.S., Amro, M.I., 2023. Effects of magnetic field on the performance of solar distillers: a review study. *Eng. Technol. J.* 41, 121–131.
- Alsumaiei, A.A., 2020. A Nonlinear Autoregressive Modeling Approach for Forecasting Groundwater Level Fluctuation in Urban Aquifers. *Water*. <https://doi.org/10.3390/w12030820>
- Altarawneh, I., Rawadieh, S., Batiha, M., Al-Makhadmeh, L., Alrowwad, S., Tarawneh, M., 2017. Experimental and numerical performance analysis and optimization of single slope, double slope and pyramidal shaped solar stills. *Desalination* 423, 124–134.
- Arunkumar, T., Vinothkumar, K., Ahsan, A., Jayaprakash, R., Kumar, S., 2012. Experimental study on various solar still designs. *Int. Sch. Res. Not.* 2012, 569381.
- Ashour, E., Tony, M., Purcell, P., 2015. Use of Agriculture-Based Waste for Basic Dye Sorption from Aqueous Solution: Kinetics and Isotherm Studies. *Am. J. Chem. Eng.* 2, 92–98. <https://doi.org/10.11648/j.ajche.20140206.14>
- Awasthi, A., Wankhede, U., Gandhi, K., Rayalu, S., 2023. Carbon nanoparticle facilitated functional pyramid solar distillation unit for wastewater treatment. *J. Environ. Chem. Eng.* 11, 110930. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110930>
- Babalola, T.A., Boyo, A.O., Kesinro, R.O., 2015. Effect of Water Depth and Temperature on the Productivity of a Double Slope Solar Still'. *J. Energy Nat. Resour.* 4, 1–4.
- Chen, C.-Y., Wang, S.-W., Kim, H., Pan, S.-Y., Fan, C., Lin, Y.J., 2021. Non-conventional water reuse in agriculture: A circular water economy. *Water Res.* 199, 117193. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117193>
- E, D.E.M., 1926. Une nouvelle fonction climatologique : L'indice d'aridite. *Meteorologie* 2, 449–459.
- El-Kady, M., El-Shibini, F., 2001. Desalination in Egypt and the future application in supplementary irrigation. *Desalination* 136, 63–72.
- El-Sebaei, A., Khallaf, A.E.-M., 2020. Mathematical modeling and experimental validation for square pyramid solar still. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 27, 32283–32295. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-07587-5>
- Elshamy, S.M., El-Said, E.M.S., 2018. Comparative study based on thermal, exergetic and economic analyses of a tubular solar still with semi-circular corrugated absorber. *J. Clean. Prod.* 195, 328–339.
- Fathy, M., Hassan, H., Ahmed, M.S., 2018. Experimental study on the effect of coupling parabolic trough collector with double slope solar still on its performance. *Sol. Energy* 163, 54–61.
- Hammoodi, K.A., Dhahad, H.A., Alawee, W.H., Omara, Z.M., 2023. A detailed review of the factors impacting pyramid type solar still performance. *Alexandria Eng. J.* 66, 123–154.
- He, T., Yan, L., 2009. Application of alternative energy integration technology in seawater desalination. *Desalination* 249, 104–108.
- Hollands, K.G.T., 1963. The regeneration of lithium chloride brine in a solar still for use in solar air conditioning. *Sol. Energy* 7, 39–43.
- Jathar, L.D., Ganesan, S., Shahapurkar, K., Soudagar, M.E.M., Mujtaba, M.A., Anqi, A.E., Farooq, M.,

- Khidmatgar, A., Goodarzi, M., Safaei, M.R., 2022. Effect of various factors and diverse approaches to enhance the performance of solar stills: a comprehensive review. *J. Therm. Anal. Calorim.* 147, 4491–4522.
- Kalbasi, R., Esfahani, M.N., 2010. Multi-effect passive desalination system, an experimental approach. *World Appl. Sci. J.* 10, 1264–1271.
- Kamal, W.A., 1988. A theoretical and experimental study of the basin-type solar still under the arabian gulf climatic conditions. *Sol. Wind Technol.* 5, 147–157.
- Khairy, S., Shaban, M., Negm, A.M., Eldeen, O.W., Ramadan, E.M., 2022. Drainage water reuse strategies: Case of El-Bats drain, Fayoum Governorate, Egypt. *Ain Shams Eng. J.* 13, 101681. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.101681>
- Khalifa, A.J.N., Hamood, A.M., 2009. Performance correlations for basin type solar stills. *Desalination* 249, 24–28.
- Koffi, B.K., Konan, D.K., Nguessa, R.K., Saraka, J.K., Tanoh, A., Kouacou, M.A., Yeo, Z., Koffi, M., Koua, A.A., 2009. Modelling of solar still for Production of Pure Water in the Abidjan Zones. *Res. J. Phys.* 3, 5–13.
- Kosari, S., Parsinejad, M., Mokhtaran, A., Zebardast, S., 2024. Predicted feasibility and economic return of drainage water recycling in an arid region. *Agric. Water Manag.* 302, 108983. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108983>
- Lindblom, J., Nordell, B., 2006. Water production by underground condensation of humid air. *Desalination* 189, 248–260.
- Madeshwaren, V., Govindaraju, K., Thangavel, S., Thangaraj, R., 2024. Solar still desalination techniques for the minimization of operational time and cost: a review. *Glob. NEST J.* 26.
- Manokar, A.M., Taamneh, Y., Winston, D.P., Vijayabalan, P., Balaji, D., Sathiyamurthy, R., Sundar, S.P., Mageshbabu, D., 2020. Effect of water depth and insulation on the productivity of an acrylic pyramid solar still—An experimental study. *Groundw. Sustain. Dev.* 10, 100319.
- Mansour, S.A., Tony, M.A., Tayeb, A.M., 2019. Photocatalytic performance and photodegradation kinetics of Fenton-like process based on haematite nanocrystals for basic dye removal. *SN Appl. Sci.* 1, 265. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0286-x>
- Mansur, A.A.P., Mansur, H.S., Tabare, C., Paiva, A., Capanema, N.S. V, 2019. Eco-friendly AgInS₂/ZnS quantum dot nanohybrids with tunable luminescent properties modulated by pH-sensitive biopolymer for potential solar energy harvesting applications. *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* 30, 16702–16717. <https://doi.org/10.1007/s10854-019-00719-0>
- MasoomiBalsi, M., Kosari, S., Parsinejad, M., Yazdani, M., Navabian, M., 2024. Removal or reduction of nitrogen and phosphorous pollutants from paddy fields drainage water in vegetated drainage ditches. *Iran. J. Soil Water Res.* <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.375972.669702>
- Morote, Á.-F., Olcina, J., Hernández, M., 2019. The Use of Non-Conventional Water Resources as a Means of Adaptation to Drought and Climate Change in Semi-Arid Regions: South-Eastern Spain. *Water.* <https://doi.org/10.3390/w11010093>
- Morse, R.N., Read, W.R.W., 1968. A rational basis for the engineering development of a solar still. *Sol. energy* 12, 5–17.
- Muftah, A.F., Alghoul, M.A., Fudholi, A., Abdul-Majeed, M.M., Sopian, K., 2014. Factors affecting basin type solar still productivity: A detailed review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 32, 430–447.
- Murase, K., Yamagishi, Y., Iwashita, Y., Sugino, K., 2008. Development of a tube-type solar still equipped with heat accumulation for irrigation. *Energy* 33, 1711–1718. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2008.05.013>
- Murugavel, K.K., Anburaj, P., Hanson, R.S., Elango, T., 2013. Progresses in inclined type solar stills. *Renew. Sustain. energy Rev.* 20, 364–377.
- Murugavel, K.K., Chockalingam, K.K.S.K., Srithar, K., 2008. Progresses in improving the effectiveness of the single basin passive solar still. *Desalination* 220, 677–686.
- Muthu Manokar, A., Kalidas Murugavel, K., Esakkimuthu, G., 2014. Different parameters affecting the rate

- of evaporation and condensation on passive solar still – A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 38, 309–322. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.092>
- Nagarajan, P.K., El-Agouz, S.A., Arunkumar, T., Sathyamurthy, R., 2017. Effect of forced cover cooling technique on a triangular pyramid solar still. *Int. J. Ambient Energy* 38, 597–604. <https://doi.org/10.1080/01430750.2016.1159609>
- Okeke, C.E., Egarievwe, S.U., Animalu, A.O.E., 1990. Effects of coal and charcoal on solar-still performance. *Energy* 15, 1071–1073.
- Palanikumar, G., Shanmugan, S., Chithambaram, V., Gorjian, S., Pruncu, C.I., Essa, F.A., Kabeel, A.E., Panchal, H., Janarthanan, B., Ebadi, H., 2021. Thermal investigation of a solar box-type cooker with nanocomposite phase change materials using flexible thermography. *Renew. Energy* 178, 260–282.
- Patel, S.G., Bhatnagar, S., Vardia, J., Ameta, S.C., 2006. Use of photocatalysts in solar desalination. *Desalination* 189, 287–291. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.07.010>
- Phadatare, M.K., Verma, S.K., 2007. Influence of water depth on internal heat and mass transfer in a plastic solar still. *Desalination* 217, 267–275.
- Prakash, A., Jayaprakash, R., 2021. Performance evaluation of stepped multiple basin pyramid solar still. *Mater. Today Proc.* 45, 1950–1956. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.227>
- Qadir, M., Sharma, B.R., Bruggeman, A., Choukr-Allah, R., Karajeh, F., 2007. Non-conventional water resources and opportunities for water augmentation to achieve food security in water scarce countries. *Agric. water Manag.* 87, 2–22.
- Rababa'h, H.M., 2003. Experimental study of a solar still with sponge cubes in basin. *Energy Convers. Manag.* 44, 1411–1418.
- Rahbar, N., Esfahani, J.A., 2012. Experimental study of a novel portable solar still by utilizing the heatpipe and thermoelectric module. *Desalination* 284, 55–61.
- Rajamanickam, M.R., Ragupathy, A., 2012. Influence of Water Depth on Internal Heat and Mass Transfer in a Double Slope Solar Still. *Energy Procedia* 14, 1701–1708. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.12.1155>
- Salama, M.A., Galal, Y.G.M., Hussien, M.A., Atia, M.F., Eldehn, I.F.M., 2024. Using desalinated water from solar stills to irrigate green beans (*Phaseolus vulgaris* L.) in different water regimes with an application of ¹⁵N stable isotope. *Egypt. J. Soil Sci.* 64, 31–47. <https://doi.org/10.21608/ejss.2023.228700.1636>
- Sampathkumar, K., Arjunan, T. V., Pitchandi, P., Senthilkumar, P., 2010. Active solar distillation—A detailed review. *Renew. Sustain. energy Rev.* 14, 1503–1526.
- Sathyamurthy, R., Kennady, H.J., Nagarajan, P.K., Ahsan, A., 2014. Factors affecting the performance of triangular pyramid solar still. *Desalination* 344, 383–390.
- Sharshir, S.W., Kandeal, A.W., Ismail, M., Abdelaziz, G.B., Kabeel, A.E., Yang, N., 2019. Augmentation of a pyramid solar still performance using evacuated tubes and nanofluid: experimental approach. *Appl. Therm. Eng.* 160, 113997.
- Shi, L., Wang, X., Hu, Y., He, Y., Yan, Y., 2020. Solar-thermal conversion and steam generation: a review. *Appl. Therm. Eng.* 179, 115691. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115691>
- Singh, A.K., Tripathy, R., Chopra, U.K., 2008. Evaluation of CERES-Wheat and CropSyst models for water–nitrogen interactions in wheat crop. *Agric. Water Manag.* 95, 776–786. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.02.006>
- Tiwari, A.K., Tiwari, G.N., 2006. Effect of water depths on heat and mass transfer in a passive solar still: in summer climatic condition. *Desalination* 195, 78–94.
- Tiwari, G.N., Dimri, V., Chel, A., 2009. Parametric study of an active and passive solar distillation system: Energy and exergy analysis. *Desalination* 242, 1–18. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.03.027>
- Tony, M.A., 2022. Valorization of undervalued aluminum-based waterworks sludge waste for the science of “The 5 Rs’ criteria”. *Appl. Water Sci.* 12, 20. <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01554-7>
- Tony, M.A., Nabwey, H.A., 2024. Recent advances in solar still technology for solar water desalination.

- Appl. Water Sci. 14, 147. <https://doi.org/10.1007/s13201-024-02188-1>
- Tripathi, R., Tiwari, G.N., 2006. Thermal modeling of passive and active solar stills for different depths of water by using the concept of solar fraction. *Sol. energy* 80, 956–967.
- Tripathi, R., Tiwari, G.N., 2004. Effect of size and material of a semi-cylindrical condensing cover on heat and mass transfer for distillation. *Desalination* 166, 231–241. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.06.078>
- Wang, Z., Horseman, T., Straub, A.P., Yip, N.Y., Li, D., Elimelech, M., Lin, S., 2024. Pathways and challenges for efficient solar-thermal desalination. *Sci. Adv.* 5, eaax0763. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aax0763>
- Xiao, G., Wang, X., Ni, M., Wang, F., Zhu, W., Luo, Z., Cen, K., 2013. A review on solar stills for brine desalination. *Appl. Energy* 103, 642–652.
- Yeh, H.-M., Chen, L.-C., 1986. The effects of climatic, design and operational parameters on the performance of wick-type solar distillers. *Energy Convers. Manag.* 26, 175–180.
- Yeh, H.-M., Chen, L.-C., 1985. Basin-type solar distillation with air flow through the still. *Energy* 10, 1237–1241.
- Yousef, M.S., Hassan, H., 2019. Energetic and exergetic performance assessment of the inclusion of phase change materials (PCM) in a solar distillation system. *Energy Convers. Manag.* 179, 349–361.

Original Research

Evaluation of the Efficiency of Pyramid solar stills under Different Salinity and Water Depth Levels in a Semi-Arid Region

R. Sadeghi, Kh. Ahmadaali*, S. Kosari, S. Zare, Sh. Khalighi Sigaroodi

***Corresponding Author:** Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

Received: 27 February 2025, **Accepted:** 15 March 2025

Email: khahmadauli@ut.ac.ir

https://doi.org/10.22092/idser.2025.368750.1608

Extended Abstract

Introduction

Freshwater scarcity is a critical global issue, especially in arid and semi-arid regions like the Middle East and North Africa (MENA), where water demand is rising due to population growth and increasing competition across agricultural, domestic, and industrial sectors. To address these challenges, utilizing unconventional water sources such as seawater, brackish water, and agricultural drainage water becomes essential. Among the various desalination methods, solar desalination has emerged as a sustainable and cost-effective solution, particularly for remote areas with abundant solar radiation but limited freshwater resources. Pyramid solar stills, due to their simple design, low operational costs, and minimal maintenance requirements, provide an efficient and environmentally friendly approach to freshwater production. These systems harness renewable solar energy, making them a clean and sustainable alternative that reduces reliance on fossil fuels and minimizes environmental impact. As a result, pyramid solar stills are a practical and viable option for decentralized water supply in water-scarce regions.

Methodology

The experiment was conducted at the Soil and Water Research Farm of the University of Tehran, located in Karaj, to evaluate the freshwater production efficiency of pyramid solar stills under varying salinity levels and water depths. The study area covered a total surface of 70 m² (20 m × 3.5 m). Saline water required for the stills was sourced from a drainage canal. Five pyramid solar stills with glass covers were used, each having a base area of 1 × 1 m and a height of 0.18 m. Three different water depth scenarios were investigated: D₁ (1 cm), D₂ (3 cm), and D₃ (5 cm). Additionally, five salinity levels were considered: S₁ (5000 μS/cm), S₂ (10000 μS/cm), S₃ (20000 μS/cm), S₄ (30000 μS/cm), and S₅ (40000 μS/cm). The experiment was conducted during both spring and summer to account for seasonal variations in meteorological conditions. Finally, different regression models were developed to predict the performance of pyramid solar stills under varying water depths and salinity levels, and their accuracy was evaluated using two statistical indices, R² and RMSE.

Results and Discussion

Meteorological analysis showed that peak ambient temperature and solar radiation occurred between 12 PM and 3 PM in both spring and summer, with temperatures decreasing as solar radiation declined. The key driver of freshwater production in solar still pyramids was the temperature difference between the water and the glass cover, which enhanced evaporation. Water temperature analysis at depths of 1 cm, 3 cm, and 5 cm indicated faster heating at shallower depths, with a peak of 50°C at 1 cm depth. Freshwater yield decreased as salinity increased from 5000 to 40000 μS/cm, with reductions of up to 20% at a depth of 5 cm. Similarly, increasing water depth from 1 cm to 5 cm at 5000 μS/cm salinity reduced freshwater production by 12%.

This decline was attributed to increased osmotic pressure lowering the evaporation rate. Overall, system performance decreased with rising salinity and water depth, though efficiency remained higher in summer. Nonlinear models, including power, rational, and polynomial models, provided better predictions than linear models, highlighting the nonlinear nature of system performance concerning salinity and water depth.

Conclusions

This study underscores the importance of optimizing solar still designs to enhance fresh water production under different environmental and operational conditions. The findings reveal that the temperature difference between the water and glass cover plays a crucial role in the distillation process, with higher temperature gradients leading to improved evaporation rates. Additionally, the results show that reducing water depth and salinity significantly boosts system performance. Nonlinear models were found to be more effective than linear ones in predicting the performance of the stills, reflecting the complex relationships between key variables. Moreover, the research emphasizes the need for considering local environmental conditions, such as latitude and solar radiation, for optimal design. Overall, these insights provide valuable guidance for improving solar still efficiency in arid and water-scarce regions.

Acknowledgement

The authors would like to thank all participants of the present study.

Keywords: Water scarcity, Desalination, Condensation, Solar radiation, Drainage water.





Ministry of Jihad - e - Agriculture
Agricultural Research, Education and Extension Organization
Agricultural Engineering Research Institute (AERI)

Irrigation and Drainage Structures Engineering Research

(Agricultural Engineering Research)

Vol. 25, No. 97, Winter 2024

Print ISSN: 3060-6764 Online ISSN:3060-6772

Contents

Research Paper

Investigating the effect of water use management on wheat yield and water productivity using the rain flat sprinkler irrigation method.

Nader Naderi, Alireza Mohammadi 1

Investigating the Status of Virtual Water of Irrigated Wheat and Providing Technical and Policy Solutions for its Improvement in Iran.

Nader Heydari, Farshid Taran 15

Effect of fiber-based Sensors Structure on Block Sensor in soil Moisture monitoring performance

Maryam Navabian, Mostafa Jamshidi Avanaki 35

Assessment of Options to Reduce Irrigation Demand and Daptation to Water Scarcity in Fars Province

Abdolrahman Mirzaei, Afshin Soltani, Fariborz Abbasi, Ebrahim Zeinali, Shahrzad Mirkarimi 51

Simulating the effect of trapezoidal labyrinth weir apex ratio on discharge coefficient using Flow-3D software

Saeed Alghenzi, Javad Mozaffari 79

Evaluation of the Efficiency of Pyramid solar stills under Different Salinity and Water Depth Levels in a Semi-Arid Region

Raziye Sadeghi, Khaled Ahmadaali, Sina Kosari, Salman Zare, Shahram Khalighi Sigaroodi 95

Irrigation and Drainage Structures Engineering Research

(Agricultural Engineering Research)

Vol. 25 No. 97 2024

Published by: Agricultural Engineering Research Institute (AERI)

Executive Director: H. Dehghani-sanij, Professor

Editor in Chief: N. Abbasi, Professor
Assistant Editor: Dr. O. Raja

Editorial Board:

F. Abbasi	Professor, Agricultural Engineering Research Institute
N. Abbasi	Professor, Agricultural Engineering Research Institute
N. Heydari	Associate Professor, Agricultural Engineering Research Institute
A. Kiani	Professor, Golestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center
S. Koochakzadeh	Professor, University of Tehran
M. J. Monem	Professor, Tarbiat Modares University
A. Nasser	Associate Professor, East Azerbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center
M. H. Omid	Professor, University of Tehran
A. Parvaresh Rizi	Associate Professor, University of Tehran
M. Shafai-Bejestan	Professor, Shahid Chamran University of Ahvaz

International Editorial Board:

M. A. Sharifi	Professor, International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC), University of Twente Enschede, Netherlands
A. Torabi Haghighi	Professor, Leader of Hydrosystems Engineering & Management research group at Water, Energy, and Environmental Research unit in University of Oulu, Finland

Text Editor: M. R. Dahi

English Editor: M. R. Dahi

Coordinating Manager: A. Uossef -Gomrokchi

Typesetting & Layout: Sh. Jabbari

Reviewers:

- B. Abolpour	- A. Parvareshrizi	- E. Dehghanian	- F. Abbasi
- M. Esmaeili Varaki	- F. Taran	- O. Raja	- N. Abbasi
- A. Ashrafzade	- A. Tavakoli	- M. Zeinivand	- M. Godarzi
- H. Afshar	- A. Haghayeghi Moghaddam	- S. Sepehri	- A.M. Liaghat
- J. Baghani	- A. Khorsand	- M.A. Shahrokhnia	- A. Mokhtaran

AERI Site: www.aeri.ir

Journal Site: <http://idser.areeo.ac.ir>

E-mail: aridsej@areeo.ac.ir