



# پژوهش آب در کشاورزی

*Wra.areeo.ac.ir*

ISSN: 2228-7140

ب/ جلد ۳۹ / شماره ۲ / سال ۱۴۰۴

صفحه

عنوان

شبیه‌سازی عملکرد برنج در مدیریت‌های مختلف کشت-آبیاری با استفاده از مدل آکواکراپ (AquaCrop)..... ۱۱۱  
پروین ذوالفقاری، ابوطالب هزارجریبی، محمداسماعیل اسدی و ابراهیم امیری

شبیه‌سازی تغییرات رطوبت و شوری خاک به‌وسیله نرم‌افزار HYDRUS-2D با لوله‌های PVC سوراخ‌دار در باغ‌های پسته  
استان کرمان..... ۱۲۷  
حسین شیرانی، حسام نجات، عیسی اسفندیارپور، ناصر صداقتی، سید جواد حسینی‌فرد و سمیه صدر

ردپای آب و کارایی تغذیه‌ای آبیاری در تولید سیب‌زمینی در شرایط بحرانی منابع آب: مطالعه موردی  
دشت قروه- دهگلان..... ۱۴۹  
شایسته عبدی، محمدعلی اسعدی، سیدحبیب‌اله موسوی و حامد نجفی علمدارلو

بررسی عوامل مؤثر بر میزان برداشت آب زیرزمینی در چاه‌های کشاورزی: مطالعه موردی استان گلستان..... ۱۶۳  
علی کرامت‌زاده، سیدمصطفی حسینی، فرشید اشراقی و مسعود عنایت

ارزیابی اقتصادی محرک‌های آلی رشد بر عملکرد، درصد روغن و کارایی مصرف آب کلزا در تیمارهای مختلف آبیاری..... ۱۷۷  
محمد پسندیده و رضا محمدی‌کیا

تحلیل روابط علی و تعیین اهمیت معیارهای حکمروایی مطلوب منابع آب کشاورزی با استفاده از تکنیک دیمتل و تحلیل فرآیند  
شبکه‌ای (DANP)..... ۱۹۵  
زینب فیض‌الهی، محسن آقایی‌هیر، ابوالقاسم تقی‌زاد فانی و محمدرضا شهبازبگیان

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

جلد ۳۹ شماره (۲)  
۱۴۰۴

مدیر مسئول: دکتر هادی اسدی رحمانی  
سر دبیر: دکتر حمید سیادت  
رئیس مؤسسه تحقیقات خاک و آب  
استاد پژوهش مؤسسه تحقیقات خاک و آب

اعضاء هیأت تحریریه (به ترتیب حروف الفبا):

|                                                     |                            |
|-----------------------------------------------------|----------------------------|
| دانشیار پژوهشی مؤسسه تحقیقات خاک و آب               | دکتر نیاز علی ابراهیمی پاک |
| مدرس دانشگاه                                        | دکتر محمد بای بوردی        |
| استاد واحد علوم و تحقیقات دانشگاه آزاد اسلامی تهران | دکتر ابراهیم پذیرا         |
| دانشیار مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی          | دکتر نادر حیدری            |
| دانشیار پژوهشی مؤسسه تحقیقات خاک و آب               | دکتر ناصر دواتگر           |
| استاد واحد علوم تحقیقات دانشگاه آزاد اسلامی خوزستان | دکتر حیدرعلی کشکولی        |
| استاد دانشگاه تهران                                 | دکتر عبدالمجید لیاقت       |
| دانشیار دانشگاه تربیت مدرس                          | دکتر سید مجید میرلطیفی     |
| استاد مدعو دانشگاه سمنان                            | دکتر سید فرهاد موسوی       |
| استاد سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی         | دکتر محمد حسین مهدیان      |

چهار شماره  
دکتر حمید سیادت  
مهندس فاطمه آقاجانی

تعداد انتشار در سال:  
ویراستار انگلیسی:  
صفحه آرایی:

پایگاه الکترونیکی نشریه پژوهش آب در کشاورزی: <http://www.wra.areo.ir>  
پایگاه الکترونیکی مؤسسه تحقیقات خاک و آب: [www.swri.ir](http://www.swri.ir)  
آدرس الکترونیکی مجله: [journalwater@yahoo.com](mailto:journalwater@yahoo.com)  
این نشریه در پایگاه‌های علمی زیر نمایه می‌شود:  
پایگاه اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی: [www.sid.ir](http://www.sid.ir)  
پایگاه استنادی علوم جهان اسلام (ISC): [www.isc.gov.ir](http://www.isc.gov.ir)  
پایگاه سیویلیکا: [https://civilica.com](http://civilica.com)  
پایگاه با نك اطلاعات نشریات کشور (Magiran): [https://www.magiran.com](http://www.magiran.com)

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

- شبیه‌سازی عملکرد برنج در مدیریت‌های مختلف کشت-آبیاری با استفاده از مدل آکواکراپ (AquaCrop)..... ۱۱۱  
 پروین ذوالفقاری، ابوطالب هزارجریبی، محمداسماعیل اسدی و ابراهیم امیری
- شبیه‌سازی تغییرات رطوبت و شوری خاک به‌وسیله نرم‌افزار HYDRUS-2D با لوله‌های PVC سوراخ‌دار در باغ‌های پسته  
 استان کرمان..... ۱۲۷  
 حسین شیرانی، حسام نجات، عیسی اسفندیارپور، ناصر صداقتی، سید جواد حسینی‌فرد و سمیه صدر
- ردپای آب و کارایی تغذیه‌ای آبیاری در تولید سیب‌زمینی در شرایط بحرانی منابع آب: مطالعه موردی  
 دشت قروه- دهگلان..... ۱۴۹  
 شایسته عبدی، محمدعلی اسعدی، سیدحبیب‌اله موسوی و حامد نجفی علمدارلو
- بررسی عوامل مؤثر بر میزان برداشت آب زیرزمینی در چاه‌های کشاورزی: مطالعه موردی استان گلستان..... ۱۶۳  
 علی کرامت‌زاده، سیدمصطفی حسینی، فرشید اشراقی و مسعود عنایت
- ارزیابی اقتصادی محرک‌های آلی رشد بر عملکرد، درصد روغن و کارایی مصرف آب کلزا در تیمارهای مختلف آبیاری..... ۱۷۷  
 محمد پسندیده و رضا محمدی‌کیا
- تحلیل روابط علّی و تعیین اهمیت معیارهای حکمروایی مطلوب منابع آب کشاورزی با استفاده از تکنیک دیمتل و تحلیل فرآیند  
 شبکه‌ای (DANP)..... ۱۹۵  
 زینب فیض‌الهی، محسن آقایی‌هیر، ابوالقاسم تقی‌زاد فانی و محمدرضا شهبازیگان

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

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

### الف) اصول کلی

- ۱- این مجله صرفاً مقالات پژوهشی منتج از پژوهش‌های نویسنده و یا نویسندگان در زمینه علوم آب و خاک در کشاورزی را منتشر می‌نماید.
- ۲- مقاله باید به زبان فارسی روان و پیراسته از غلط‌های نگارشی و نوشتاری باشد. از آوردن واژه‌های بیگانه که معادل شناخته شده فارسی دارند جداً خودداری گردد.
- ۳- مسئولیت صحت و سقم مطالب، نظرات و عقاید مندرج در مقالات به عهده نویسندگان مقاله می‌باشد. حقوق معنوی مقالات برای نویسندگان محفوظ می‌باشد.
- ۴- مقاله نباید در هیچ یک از نشریات کشور به چاپ رسیده یا همزمان برای مجلات دیگر ارسال شده باشد این مسئله باید با تأیید و تعهد کتبی نویسنده مسئول باشد.

### ب) نحوه تهیه و ارسال مقاله

#### نحوه نگارش مقاله

- ۱- مقاله حداکثر در ۱۵ صفحه A4 با فاصله خطوط ۱/۵ و حاشیه‌های ۳ سانتی‌متر از هر طرف و به صورت تک ستونی تایپ شود.
- ۲- نوع قلم فارسی و انگلیسی و اندازه آنها مطابق جدول (۱) استفاده شود.
- ۳- پیش از نقطه (.) و کاما (,) گذاشتن فاصله لازم نیست، لیکن پس از آنها، یک فاصله لازم است.
- ۴- اصول نگارش زبان فارسی به طور کامل رعایت شده و از به کاربردن اصطلاحات انگلیسی که معادل فارسی آنها در فرهنگستان زبان فارسی تعریف شده‌اند، حتی الامکان پرهیز گردد.

| جدول ۱- نوع قلم و اندازه   |                 |                                           |
|----------------------------|-----------------|-------------------------------------------|
| موقعیت استفاده             | نام قلم         | اندازه قلم                                |
| عنوان مقاله                | B Lotus پر رنگ  | 14                                        |
| متن مقاله                  | B Lotus         | 12                                        |
| عناوین بخش های مقاله       | B Lotus پر رنگ  | 12                                        |
| نام مؤلفان                 | B Lotus پر رنگ  | 12                                        |
| کلمه چکیده و کلمات کلیدی   | B Lotus پر رنگ  | 12                                        |
| عناوین جداول و اشکال       | B Lotus پر رنگ  | 11                                        |
| متن جداول و شکل ها و منابع | B Lotus         | 11                                        |
| متن انگلیسی                | Times New Roman | یک واحد کمتر از اندازه فارسی در هر موقعیت |

نویسنده(گان) موظف هستند حداکثر ۱۵ روز پس از دریافت نظرات داوران اصلاحات لازم و یا پاسخ را ارسال نمایند. ضمناً ارسال چکیده لاتین مقاله به همراه مقاله الزامی است. ارسال نامه درخواست چاپ مقاله در مجله پژوهش آب در کشاورزی به همراه فرم تعهد نامه الزامی است. کلیه مقالات پس از دریافت اعلام وصول گردیده و جهت ارزیابی برای داوران مجله ارسال خواهد شد و پس از اتخاذ رأی داوران و تأیید هیئت تحریریه، مقاله در نوبت چاپ قرار خواهد گرفت.

### شناسنامه مقاله

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

### برگ شناسه

عنوان مقاله، نام، نام خانوادگی، موقعیت شغلی نگارنده(گان)، نام دانشگاه یا مؤسسه پژوهشی که نگارنده(گان) در آن اشتغال دارند، نشانی کامل نگارنده(گان) و نام و مشخصات نگارنده مسئول مکاتبات (به هر دو زبان فارسی و انگلیسی)، در یک صفحه جداگانه تایپ شود. \* نگارنده مسئول باید فرم تعهدنامه را که به امضای کلیه نگارندگان رسیده به همراه مقاله ارسال کند.

### عنوان مقاله

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

### چکیده

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

### واژه‌های کلیدی

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

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

### مقدمه

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

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

## مواد و روشها

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

## نتایج

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

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

## بحث

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

## تشکر و قدردانی

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

## فهرست منابع

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

- نتایج مشابهی توسط برخی پژوهشگران نیز گزارش شده است (کریمی و احمدی، ۱۳۸۹)

- نتایج مشابهی توسط سایر محققان گزارش شده است (آلوی و همکاران، ۲۰۱۰)

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

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

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

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

## مثال‌های برای تنظیم منابع

### مقاله از مجله

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

### مقاله از کارگاه آموزشی یا علمی

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

### مطلب از کتاب

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

### مطلب نقل شده یک نویسنده در یک مجموعه مقالات

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

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

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

ذکر مطلب از اینترنت

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

مقاله با یک نویسنده

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

مقاله با دو نویسنده

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

مقاله با سه نویسنده

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

مقاله با بیش از سه نویسنده

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

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

منابع مورد استفاده در متن بدین صورت نگاشته شوند:

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

اسمیت (۲۰۰۲) گزارش کرد ...

اسمیت و جونز (۲۰۰۲) گزارش کردند...

اسمیت و همکاران (۲۰۰۲) گزارش کردند...

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

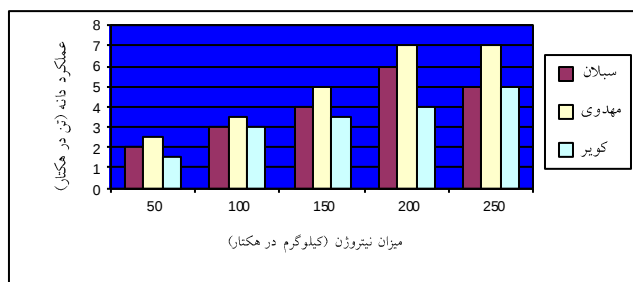
### جدول نامناسب

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

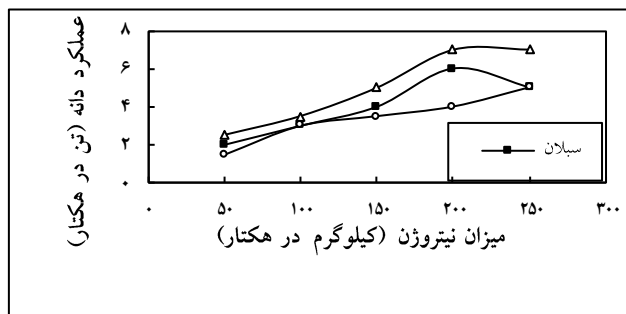
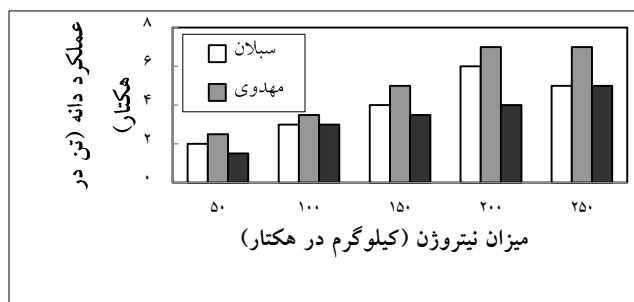
## جدول مناسب

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

## شکل نامناسب



## شکل مناسب



نشریه علمی پژوهش آب در کشاورزی

|                           |         |
|---------------------------|---------|
| دکتر محمدرضا بلالی.....   | ۱ دآوری |
| دکتر مهدی پناهی.....      | ۲ دآوری |
| دکتر آرشد تافته.....      | ۲ دآوری |
| دکتر هوشنگ خسروی.....     | ۲ دآوری |
| دکتر ناصر دوات گر.....    | ۲ دآوری |
| دکتر فرهاد رجالی.....     | ۱ دآوری |
| دکتر حامد رضایی.....      | ۱ دآوری |
| دکتر علی شاهنظری.....     | ۳ دآوری |
| دکتر حیدرعلی کشکولی.....  | ۱ دآوری |
| دکتر عبدالمجید لیاقت..... | ۲ دآوری |
| دکتر سیدفرهاد موسوی.....  | ۴ دآوری |
| دکتر میلاد نوری.....      | ۱ دآوری |
| دکتر شادمان ویسی.....     | ۱ دآوری |

## فرم تعهد نامه

نشریه پژوهش‌های آب در کشاورزی

اینجانب ..... نویسنده مسئول مقاله زیر:

- سال‌های اجراء آزمایش ذکر شود

موارد زیر را به آگاهی می‌رسانم:

۱. کلیه تهیه کنندگان مقاله از ارسال آن به دفتر مجله شما آگاهند
۲. مقاله قبلاً در هیچ مجله داخلی و خارجی منتشر نشده است
۳. مقاله تا زمان پایان بررسی در آن مجله به مجله دیگری ارسال نخواهد شد.
۴. هیچگونه تغییری در تعداد نویسندگان یا ترتیب ذکر اسامی انجام نخواهد شد.

نام نام خانوادگی نویسنده اول: امضاء نویسنده اول مقاله

نام نام خانوادگی نویسنده دوم: امضاء نویسنده دوم مقاله

نام نام خانوادگی نویسنده سوم: امضاء نویسنده سوم مقاله

نام نام خانوادگی نویسنده چهارم: امضاء نویسنده چهارم مقاله

## شبیه‌سازی عملکرد برنج در مدیریت‌های مختلف کشت-آبیاری با استفاده از مدل

### آکواکراپ (AquaCrop)

پروین ذوالفقاری، ابوطالب هزارجریبی\* , محمداسماعیل اسدی و ابراهیم امیری

دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.

[parniyan.zolfaghary@gmail.com](mailto:parniyan.zolfaghary@gmail.com)

دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.

[hezab10@yahoo.com](mailto:hezab10@yahoo.com)

استادیار پژوهش و کارشناس ارشد بخش تحقیقات فنی و مهندسی، بخش فنی و مهندسی، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی گلستان، گرگان، ایران.

[iwc977127@yahoo.com](mailto:iwc977127@yahoo.com)

استاد، گروه مهندسی آب، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران.

[eamiri57@yahoo.com](mailto:eamiri57@yahoo.com)

دریافت: فروردین ۱۴۰۴ و پذیرش: شهریور ۱۴۰۴

#### چکیده

با توجه به نیاز آبی زیاد برنج، اطلاع از عملکرد آن در روش‌های مختلف کشت - آبیاری بسیار اهمیت دارد و نیازمند آزمایش است. از آنجا که انجام این آزمایش‌های میدانی بسیار زمان‌بر و پُر هزینه هستند، استفاده از مدل‌های گیاهی در این زمینه می‌تواند راهگشا باشد. مدل‌های گیاهی، شناخت فرآیند پیچیده پاسخ محصول به شرایط محیطی را ساده می‌کنند و از این نظر بسیار کاربردی هستند. مدل آکواکراپ ارائه شده توسط فائو (AquaCrop) یک مدل مبتنی بر آب است که به عنوان یک ابزار پشتیبانی در برنامه‌ریزی و تحلیل سناریوهای مختلف مدیریت زراعی توسعه داده شده است. در این تحقیق از مدل آکواکراپ (AquaCrop) برای واسنجی و صحت‌سنجی نظام‌های مختلف کشت - آبیاری شامل نشایی - غرقابی، خشکه کاری - بارانی و خشکه کاری - قطره‌ای استفاده شد. نتایج بررسی آماره‌های ارزیابی خطا شامل میانگین خطای نرمال شده (NRMSE) و شاخص ویلموت (d) برای شاخص سطح برگ ( $0.16 < \text{NRMSE} < 0.25$  و  $0.98 < d < 0.96$ ) نشان داد که آکواکراپ در مدل‌سازی تاج پوشش به خوبی عمل می‌کند. همچنین، آماره‌های خطا برای شاخص‌های عملکرد دانه و زیست‌توده (NRMSE و d در عملکرد دانه برابر ۵/۱۲ و ۰/۹۵ و برای زیست‌توده برابر با ۱۲/۳۸ و ۰/۸۹ بود) به ترتیب در محدوده بسیار خوب و خوب قرار گرفتند. بنابراین مدل مزبور را می‌توان به عنوان مدلی با دقت مناسب، برای بررسی گزینه‌های مدیریتی در نظام‌های مختلف کشت-آبیاری و برای بهبود بهره‌وری آب در کشت برنج استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: خشکه کاری برنج، کشت نشایی، مدل‌سازی گیاهی، روش‌های نوین آبیاری

\* - آدرس ایمیل نویسنده مسئول: [hezab10@yahoo.com](mailto:hezab10@yahoo.com)



## مقدمه

برنج (*Oryza sativa* L.) دومین غله تولید شده در جهان است و نقش مهمی در امنیت غذایی دارد (پوراس و همکاران، ۲۰۲۰). در ایران، برنج با سطح زیر کشت ۷۹۱ هزار هکتار، دومین گیاه زراعی مهم پس از گندم محسوب می‌شود. بیشترین سطح زیر کشت به ترتیب مربوط به استان‌های مازندران، گیلان، خوزستان و گلستان است که در مجموع ۹۱ درصد از سطح زیر کشت و ۹۰ درصد از تولید کل کشور را به خود اختصاص می‌دهند (آمارنامه جهاد کشاورزی، ۱۴۰۱). کشت برنج از دیرباز به صورت نشایی بوده است که دو تا سه برابر دیگر غلات به آب نیاز دارد (تانگ و همکاران، ۲۰۰۲). افزون بر مصرف زیاد آب (ادهیکاری و همکاران، ۲۰۲۱)، ایجاد شرایط غرقابی و عملیات گلخراپی نیاز به مصرف آب و انرژی زیادی دارد و یک عمل طاقت‌فرسا است. کشت سنتی برنج همچنین به نیروی کار برای پرورش خزانه، ریشه‌کن کردن علف‌های هرز، حمل و نقل و نشاکاری نیاز دارد که در بازه اوج فعالیت در دسترس نیست. تأمین برق نامطمئن و گران‌قیمت نیز بر حیات روش سنتی تأثیر می‌گذارد. از این رو، کمبود آب، انرژی و نیروی کار عوامل محدودکننده اصلی هستند که تولیدکنندگان را وادار می‌کند تا به سمت روش‌های کارآمد، جدید و صرفه‌جویانه حرکت کنند (اسلام و همکاران، ۲۰۰۸).

کشت مستقیم برنج شامل کشت مستقیم برنج در مزارع، بدون خزانه‌گیری و انجام عمل گلخراپی است (فاروق و همکاران ۲۰۱۱؛ اشفق و همکاران ۲۰۱۸). کاشت در بستر خشک<sup>۱</sup>، کاشت در بستر مرطوب<sup>۲</sup> و کاشت در بستر اشباع<sup>۳</sup> سه روش اصلی کاشت مستقیم بذر برنج هستند (ادهیکاری و همکاران، ۲۰۲۱). این روش مزایای بسیاری را نسبت به روش نشایی سنتی فراهم می‌کند، مانند استفاده کارآمد از آب یا افزایش بهره‌وری آب (ژو و همکاران، ۲۰۱۹)، کاهش گازهای گلخانه‌ای، آسانی توسعه برای مکانیزاسیون (فاروق و همکاران ۲۰۱۱) و بازده اقتصادی

بالتر (بوشان و همکاران ۲۰۰۷). همچنین ممکن است عملکرد و کیفیت بالاتری را فراهم کند، استقرار بوته را بهبود بخشد (اشفق و همکاران ۲۰۱۸) و نمو زودتر را تضمین کند (فاروق و همکاران ۲۰۱۱). افزون بر این، کاشت به موقع محصول بعدی را آسان می‌کند و از ناسازگاری‌های خاک (سدافیک) در اثر تناوب کشت جلوگیری می‌کند؛ بنابراین پایداری سیستم کشت برنج-گندم را بهبود می‌بخشد (انجوم و همکاران، ۲۰۱۹).

با توجه به کاهش منابع آب در ایران، مطالعات متعددی در رابطه با خشکه‌کاری انجام شده است. کیانی و همکاران (۱۴۰۰) در پژوهشی، با مقایسه روش‌های مستقیم و نشایی برنج در روش‌های مختلف آبیاری در استان گلستان گزارش کردند که با تبدیل کشت نشایی سنتی و روش آبیاری غرقابی به کشت مستقیم بذر و روش آبیاری قطره‌ای اگرچه در مصرف آب در حدود ۴۸ درصد صرفه جویی شد، اما عملکرد هم در حدود ۴۵ درصد کاهش یافت. ذوالفقاری و همکاران (۱۴۰۱) گزارش کردند که کشت مستقیم با استفاده از آبیاری بارانی با ۶۱ درصد صرفه جویی آب، در صورت مدیریت صحیح مزرعه می‌تواند تا ۷۰ درصد عملکرد داشته باشد. البته شناخت بیشتر ابعاد این موضوع نیاز به اندازه‌گیری‌های میدانی بسیار گسترده‌ای دارد که معمولاً زمان‌بر و پرهزینه است. برای رفع این مشکلات می‌توان از مدل‌های گیاهی برای شبیه‌سازی فرآیند رشد محصول استفاده نمود (موسوی و همکاران، ۱۴۰۱).

مدل‌سازی محصول می‌تواند برای تعیین کمیت اثرات تغییر شرایط محیطی بر عملکرد محصول استفاده شود (پریرا و همکاران، ۲۰۰۹؛ گیرتس و همکاران، ۲۰۰۹؛ شفیعی و همکاران، ۲۰۱۴). مدل‌های شبیه‌سازی ابزارهای اساسی برای بهبود رویکردهای مدیریتی مختلف در مناطق خشک و نیمه‌خشک برای دستیابی به حداکثر تولید با راندمان کاربرد آب مناسب هستند (تومی و همکاران، ۲۰۱۶). در این راستا، مدل‌های متعددی توسعه یافته‌اند.

<sup>3</sup> -Water- seeded<sup>1</sup> -Dry-seeded<sup>2</sup> -Wet-seeded

امیری و همکاران (۲۰۱۴) ضمن مقایسه عملکرد مدل‌های ORYZA2000، CERES-RICE، AquaCrop و CERES-Rice بیشترین صحت را گزارش کردند که مدل CERES-Rice در شبیه‌سازی عملکرد دانه نشان داد (مقدار ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) برابر ۱۶ درصد بود). با این حال، مدل AquaCrop عملکرد بیولوژیکی را در مقایسه با مدل‌های دیگر صحیح‌تر تخمین زد ( $NRMSE = 15$ ).

مدل شبیه‌سازی AquaCrop در کتابچه‌های خود روشی را برای بررسی عملکرد محصول توسعه می‌دهد. این مدل رشد و عملکرد محصولات را به‌طور کامل در شرایط مختلف آب‌وهوا، خاک و مدیریت آبیاری برای کشت برنج شبیه‌سازی کرده است (رائس و همکاران، ۲۰۱۸). مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی توسعه و عملکرد برنج در شرایط غرقابی در برخی مناطق جهان واسنجی و صحت سنجی شده است (عبدالغنی و همکاران، ۲۰۱۸؛ لین و همکاران، ۲۰۱۲).

سعادت و همکاران (۲۰۱۱) برای شبیه‌سازی برنج از مدل AquaCrop استفاده کردند و نشان دادند این مدل به‌خوبی می‌تواند عملکرد محصول را تعیین نماید. امیری (۲۰۱۶) گزارش کرد که این مدل زیست‌توده کل و خوشه را به‌دقت و با  $R^2$  نسبتاً بالا ( $\geq 0.90$ ) شبیه‌سازی کرده است. همچنین مدل NRMSE را برای زیست‌توده کل و متوسط خوشه (به ترتیب ۶٪ و ۳۶٪) نشان داد و برآورد مناسبی از تاج پوشش با NRMSE و  $R^2$  به ترتیب ۲۸ و ۸۲٪ داشت. وی عملکرد دانه برنج پیش‌بینی‌شده و مشاهده‌شده و زیست‌توده نهایی را به ترتیب با  $R^2$  برابر ۸۱٪ و ۸۲٪ و NRMSE برابر ۱۳ و ۱۰ درصد گزارش کرد. پیرمادیان و همکاران (۲۰۲۰) به شبیه‌سازی بهره‌وری آب برنج شلتوک با استفاده از مدل AquaCrop در دو منطقه مرطوب و نیمه‌خشک ایران پرداختند. بر اساس این مطالعات، تاج پوشش و زیست‌توده برنج با معیار خوب ( $10 < NRMSE < 20$ ) شبیه‌سازی شد؛ درحالی‌که شبیه‌سازی عملکرد دانه توسط مدل عالی بود ( $NRMSE < 10$ ).

امیری و همکاران (۱۳۹۸) عملکرد مدل AquaCrop را در شرایط مدیریت تنش شوری و خشکی مطالعه کردند. نتایج نشان داد که این مدل زیست‌توده کل را به‌طور میانگین با ضریب همبستگی و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده‌ی ۰/۸۳ و ۱۱٪ در تیمارهای شوری کمتر از آستانه تحمل گیاه و تا ۰/۶ و ۳۸٪ در تیمارهای شوری بیشتر از آستانه و عملکرد دانه را برای همین تیمارها به ترتیب از ۰/۸۵ و ۹٪ تا ۰/۴۳ و ۳۳٪ شبیه‌سازی کرد که عملکرد قابل قبولی است. الصادق و همکاران (۲۰۲۳) با بررسی تعادل آب در مزرعه خشکه‌کاری برنج در رژیم‌های مختلف آبیاری نشان دادند که نتایج شبیه‌سازی AquaCrop همبستگی خوبی بین عملکرد برنج مشاهده شده و شبیه‌سازی شده در هر دو فصل نشان داد (به ترتیب ۰/۹۹ و  $R^2 = 0.98$  در سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰). همچنین این مدل عملکرد عالی در شبیه‌سازی پوشش تاج پوشش و زیست‌توده ( $5 \leq NRMSE \leq 15$ )، شاخص ویلموت (d) ۰/۹۹ تا ۰/۹۷،  $R^2 \leq 0.99$  و ضریب عملکرد (EF) بین ۰/۹۹ تا ۰/۹۲ نشان داد. موسوی و همکاران (۱۴۰۱) از AquaCrop به‌منظور شبیه‌سازی اثر روش کاشت شامل نشایی، مستقیم رایج در منطقه و خشکه‌کاری بر عملکرد، زیست‌توده، روند توسعه گیاه و کارایی مصرف آب سه رقم مختلف گیاه برنج استفاده نمودند. نتایج نشان‌دهنده دقت کافی AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد، زیست‌توده و کارایی مصرف آب برنج بود.

در واقع، آسانی مدل AquaCrop، تعداد محدود پارامترهای ورودی و دقت تخمین‌ها، آن را به‌عنوان مدلی مناسب برای شبیه‌سازی رشد محصول در مدیریت‌های مختلف آبیاری معرفی می‌کند. اگرچه کارایی این مدل روی برنج آزمایش شده است، ولی مطالعات محدود اطلاعات مناسبی را برای ارزیابی عملکرد مدل در شبیه‌سازی تولید برنج در روش‌های مختلف کشت - آبیاری با استفاده از مدل این نرم‌افزار ارائه کرده‌اند. از این رو، این تحقیق با هدف شبیه‌سازی تاج پوشش، زیست‌توده و عملکرد دانه در روش‌های مختلف کشت - آبیاری اعم از کشت نشایی - آبیاری

غرقابی، کشت مستقیم- آبیاری بارانی و کشت مستقیم- آبیاری قطره‌ای با استفاده از مدل AquaCrop انجام شد.

### مواد و روش‌ها

#### موقعیت منطقه مورد مطالعه

آزمایش مزرعه‌ای در استان گلستان، شهرستان گرگان، شهر سرخنگلاته در سه مزرعه مجاور که هریک دارای مساحت یک هکتار بودند در سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ انجام گردید. طول جغرافیایی منطقه مورد مطالعه از ۲۸° ۳۰' شمالی تا ۲۸° ۴۰' شرقی و عرض جغرافیایی آن ۳۰° ۲۸' شمالی با ارتفاع ۱۰۲ متر از سطح دریا است. رقم فجر که به‌عنوان یک رقم اصلاح‌شده و پرمحصول شناخته می‌شود، در آزمایش در قالب طرح کاملاً تصادفی مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش، تأثیر دو روش کاشت (نشایی و خشکه‌کاری) و همچنین روش‌های مختلف آبیاری غرقابی (TFGF)، بارانی (DSGF) و قطره‌ای (DTGF)، در هر نوع کاشت بررسی شد. در روش نشایی، بذرها ۳۵ روز پیش از انتقال به مزرعه در خزانه کشت شدند و سپس به مزارعی که از پیش آماده‌سازی (گلخراب) شده بودند، منتقل شدند. در روش خشکه‌کاری، از روش کشت بذر در بستر خشک استفاده شد. روش‌های آبیاری مزارع خشکه‌کاری شامل آبیاری قطره‌ای و بارانی بود، درحالی‌که در مزارع نشایی از آبیاری غرقابی استفاده شد.

نیاز آبی برنج با استفاده از نرم‌افزار CropWat محاسبه گردید. سپس بر اساس هر روش آبیاری، مشخصات سیستم آبیاری تعیین و برنامه‌ریزی آبیاری تهیه گردید. در روش آبیاری قطره‌ای، نوارهای تیپ درزدار با فاصله ۵۰ سانتی‌متر از یکدیگر، فاصله مجاری ۲۰ سانتی‌متر، قطر ۱۶ میلی‌متر و دبی سه لیتر در ساعت استفاده شد. آبیاری بارانی نیز به‌صورت سیستم کلاسیک ثابت با آب‌پاش متحرک انجام شد. برای اندازه‌گیری حجم آب مصرفی، پیش از شروع خاک‌ورزی، کنتور حجمی نصب و میزان آب مصرفی هر مزرعه از ابتدا ثبت شد. همچنین، شیرهای کنترلی روی لوله‌های ورودی زمین نصب شدند تا کنترل جریان آب ممکن شود.

خاک مزرعه دارای بافت سیلتی - لوم بود. پیش از آغاز عملیات کشاورزی و در فروردین‌ماه سال ۱۴۰۰، نمونه‌گیری از خاک برای انجام آزمون‌های خاک و تعیین توصیه‌های کودی در دو عمق صفر تا ۳۰ و ۳۰ تا ۶۰ سانتی‌متر انجام شد. ویژگی‌های خاک منطقه در جدول ۱ ارائه شده است. با توجه به نتایج آزمایش‌های خاک و توصیه‌های کودی ارائه‌شده، کوددهی مناسب در مزارع انجام شد. برای کنترل آفات و علف‌های هرز، از علف‌کش‌های پیش از کشت و پیش از نشاکاری بذرها از قارچ‌کش استفاده شد. در مرحله داشت، عملیات کنترل شامل چهار مرحله سم‌پاشی با حشره‌کش و یک مرحله وجین‌دستی انجام گردید.

جدول ۱- ویژگی‌های خاک مزرعه مطالعاتی

| عمق<br>Depth | شوری<br>EC | اسیدیته<br>pH | مقدار خشتی‌کننده<br>کل<br>TNV | کربن<br>آلی<br>OC | نیتروژن<br>کل<br>Total N | فسفر<br>P (avg) | پتاسیم<br>K (avg) | رس<br>Clay | سیلت<br>Silt | شن<br>Sand | بافت<br>Texture |
|--------------|------------|---------------|-------------------------------|-------------------|--------------------------|-----------------|-------------------|------------|--------------|------------|-----------------|
| cm           | dS/m       | -             | %                             | %                 | %                        | mg/kg           | mg/kg             | %          | %            | %          | -               |
| 0-30         | 2.8        | 7.3           | 24                            | 2.37              | 0.24                     | 111             | 900               | 22         | 54           | 24         | Si - L          |
| 30-60        | 2.2        | 7.5           | 24                            | 1.63              | 0.16                     | 72              | 600               | 24         | 54           | 22         | Si - L          |

برای نمونه‌برداری از مزارع، پیش از برداشت محصول و در مرحله رسیدن فیزیولوژیک، هر مزرعه به‌عنوان یک تیمار مستقل در نظر گرفته و برای هر تیمار، سه کرت به‌عنوان تکرار مشخص شدند. در هر کرت، ۱۰

بوته به‌صورت تصادفی انتخاب و مشخصه‌هایی مانند میانگین ارتفاع گیاه، طول خوشه و تعداد دانه‌های سالم و پوک اندازه‌گیری شدند.

(T/ETc) در طول دوره‌های رشد محصول استفاده می‌شود (هسیائو و همکاران، ۲۰۰۹).

داده‌های ورودی به مدل در چهار گروه هواشناسی، گیاهی، خاک و مدیریت مزرعه طبقه‌بندی می‌شوند. داده‌های هواشناسی شامل دمای حداقل و حداکثر روزانه، رطوبت نسبی هوا، بارندگی روزانه، سرعت باد، ساعات آفتابی و میزان تبخیر تعرق مرجع روزانه گیاه بودند. داده‌های هواشناسی بلندمدت برای دوره زمانی ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۰، شامل حداقل و حداکثر دما، میزان بارش، سرعت باد، رطوبت نسبی و ساعات آفتابی، از ایستگاه هواشناسی هاشم‌آباد گرگان که در ۲۰ کیلومتری غرب مزارع مورد مطالعه قرار دارد، گردآوری شد. این اطلاعات از سازمان هواشناسی استان گلستان دریافت و بر اساس آن‌ها، تبخیر-تعرق روزانه به روش پنمن-مانیتث محاسبه گردید. همچنین مدل میانگین سالانه غلظت CO<sub>2</sub> نیاز دارد. غلظت CO<sub>2</sub> اتمسفر نیز از مقادیر محاسبه‌شده در مدل (اندازه‌گیری و تخمین زده‌شده تا سال ۲۰۹۹ در رصدخانه‌ی Mauna Loa در هاوایی) به دست آمد. بارندگی به‌صورت روزانه به مدل داده شد.

داده‌های خاک بر اساس آزمایش‌های خاک صورت گرفته به مدل داده شد. این داده‌ها شامل بافت خاک در اعماق مختلف ۰-۳۰ و ۳۰-۶۰ سانتی‌متر و جرم مخصوص ظاهری خاک بود که بر اساس آن و با استفاده از نرم‌افزار RETC دیگر مؤلفه‌های خاک محاسبه و به مدل معرفی شدند.

داده‌های گیاهی به دو صورت ثابت و غیرثابت هستند. پارامترهای ثابت با گذشت زمان یا تغییر موقعیت جغرافیایی تغییر نمی‌کنند و با استفاده از داده‌های رشد بدون محدودیت و در شرایط بدون تنش واسنجی می‌شوند. دیگر مشخصات گیاهی مانند حداکثر عمق ریشه، تراکم گیاه، زمان کاشت و مدیریت آبیاری که بسته به نوع تیمار ممکن است کاملاً متفاوت باشند جزو گروه غیرثابت قرار می‌گیرند (حسنلی و همکاران، ۱۳۹۴). داده‌های گیاهی بر اساس نوع تیمار به نرم‌افزار معرفی گردید. همچنین داده‌های مدیریتی

هنگام برداشت محصول، نمونه‌گیری با رعایت فاصله‌ای حداقل پنج متر از لبه‌های مزرعه انجام شد. نقاط نمونه‌برداری شامل میانه کرت‌ها، محل اتصال لوله‌های تیپ به مینیفولد و اطراف ریزرهای آب‌پاش بود. برای هر مزرعه، سه نمونه به مساحت یک متر مربع جمع‌آوری شدند. پس از خشک‌کردن نمونه‌ها در معرض نور خورشید، متغیرهای مرتبط با بازدهی محصول و اجزای عملکرد آن اندازه‌گیری شدند.

### مدل آکواکراپ (AquaCrop)

مدل AquaCrop چگونگی تعامل محصولات و آب در سیستم آب، خاک-محصول را توصیف می‌کند. این مدل برای اجرای شبیه‌سازی به ورودی‌های داده‌های آب و هوایی محلی، ویژگی‌های محصول و شیوه‌های مدیریتی نیاز دارد (روشن و همکاران، ۲۰۱۹). مدل AquaCrop تبخیر و تعرق واقعی محصول (ETa) را محاسبه می‌کند و آن را به تعرق (T) و تبخیر (E) متناسب با سطح خاک پوشیده و بدون پوشش بر اساس تعادل روزانه خاک و آب نشان می‌دهد. جدا نمودن ETa به E<sub>a</sub> و T<sub>a</sub> سبب می‌شود که بخش غیر مؤثر آب در تولید محصول (تبخیر) در نظر گرفته نشود. این موضوع به‌ویژه زمانی که هنوز پوشش گیاهی تکمیل نشده، اهمیت دارد (ذبیحی و همکاران، ۱۳۹۵). این مدل می‌تواند میزان عملکرد را در شرایط تنش و شوری نیز تخمین بزند و برای محاسبه میزان عملکرد محصول از رابطه زیر استفاده می‌کند:

$$\frac{Y_x - Y_a}{Y_x} = K_y \left( \frac{ET_x - ET_a}{ET_x} \right) \quad (1)$$

که در آن، Y<sub>a</sub> و Y<sub>x</sub> به ترتیب مقدار بیشینه و واقعی محصول، ET<sub>x</sub> و ET<sub>a</sub> به ترتیب مقادیر بیشینه و واقعی تبخیر و تعرق و K<sub>y</sub> ضریب نسبی میزان کاهش محصول نسبت به میزان کاهش تبخیر-تعرق است (پور غلام آمیجی و همکاران، ۱۳۹۹). همچنین در این مدل، یک مدل نرمال شده بهره‌وری آب محصول (WP\*) برای تخمین تولید زیست‌توده محصول و نسبت تعرق به تبخیر-تعرق

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\bar{O}} \quad (3)$$

شاخص توافق ویلموت (d) یک معیار استاندارد شده از خطای پیش‌بینی مدل و از صفر تا یک متغیر است. این شاخص نشان‌دهنده نسبت میانگین مربعات خطا و خطای بالقوه است. مقدار ۱ نشان‌دهنده توافق کامل است؛ درحالی‌که مقدار صفر نشان‌دهنده عدم توافق است. با توجه به ریشه تفاوت‌ها، شاخص توافق نسبت به مقادیر شدید در میانگین‌ها و واریانس‌های مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده بیش از اندازه حساس است. شاخص توافق، d، به‌صورت زیر بیان می‌شود:

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

که در آن  $\bar{O}$  میانگین عملکرد برنج است. همچنین ضریب کارایی مدل دقت پیش‌بینی‌های مدل را نسبت به داده‌های واقعی اندازه‌گیری می‌کند و هرچه مقدار آن به یک نزدیکتر باشد، نشان‌دهنده کارایی بهتر و بیشتر مدل خواهد بود.

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (5)$$

### نتایج و بحث

#### نیاز آبی و آب مصرفی در هر تیمار

نیاز آبی و میزان آب مصرفی دوره رشد گیاه در جدول ۲ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، حجم آب مورد استفاده در آبیاری غرقابی به ترتیب ۲/۶ و ۲/۲۸ برابر حجم آب مصرفی در روش‌های خشکه‌کاری با آبیاری بارانی و قطره‌ای است. یکی از دلایل مصرف زیاد آب در روش نشایی، مصرف زیاد آب در فرآیند آماده‌سازی زمین یا گلخراپی می‌باشد. نتایج اندازه‌گیری‌های میزان مصرف حدود  $3000 \text{ m}^3/\text{ha}$  آب برای عملیات گلخراپی را نشان داد که با استفاده از روش‌های خشکه‌کاری می‌توان در مصرف آن صرفه‌جویی نمود.

شامل مدیریت مزرعه و حاصلخیزی و مدیریت آبیاری می‌شوند. بنا بر شرایط خاک مزرعه (جدول ۱)، حاصلخیزی مزرعه بدون هیچ محدودیتی در نظر گرفته شد. داده‌های مدیریت آبیاری بر اساس تیمار آبیاری به مدل معرفی شد. برای واسنجی مدل AquaCrop از داده‌های برداشت‌شده توسط مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان گلستان (رزاقی و همکاران، ۱۳۹۹؛ کریمی فرد و همکاران، ۱۳۹۹؛ کیانی و همکاران، ۱۴۰۰) استفاده شد. این داده‌های برداشت‌شده شامل آزمایش‌های متوالی بر خشکه‌کاری برنج در استان گلستان بود که بین سال‌های ۱۳۹۷ تا ۱۳۹۹ توسط مرکز تحقیقات کشاورزی انجام شده بود.

برای اعتبارسنجی مدل AquaCrop از ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE)، شاخص توافق ویلموت (d) و ضریب کارایی مدل (EF) استفاده شد. تفاوت بین مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط مدل و مقادیر مشاهده‌شده یک پارامتر را اندازه‌گیری می‌کند. تفاوت‌های فردی که باقیمانده نامیده می‌شوند، توسط RMSE در یک مقیاس واحد از قدرت پیش‌بینی جمع می‌شوند. این میزان اختلاف بین دو مجموعه داده را اندازه‌گیری می‌کند و یک معیار مفید برای مقایسه صحت مدل‌های مختلف در زمینه مقایسه خطاهای پیش‌بینی است. RMSE به‌صورت زیر بیان می‌شود:

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

که در آن Si عملکرد برنج شبیه‌سازی‌شده، Oi عملکرد برنج مشاهده‌شده و n تعداد مشاهدات است. ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) از حاصل تقسیم آماره RMSE بر میانگین داده‌های مشاهداتی حاصل می‌شود:

جدول ۲- نیاز آبی و آب مصرفی در مزارع ( $m^3/ha$ )

| نیاز خالص آبیاری<br>IRRn | حجم باران مؤثر<br>Effective Rain | تبخیر تعرق<br>گیاهی<br>ETc | حجم آب مصرفی برای<br>آبیاری<br>Irrigation | حجم آب<br>مصرفی برای<br>گلخراپی<br>Puddling | حجم آب<br>مصرفی در<br>خزان<br>Nursery | حجم آب مصرفی<br>Water<br>consumption | تیمار<br>Treatment |
|--------------------------|----------------------------------|----------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|--------------------|
| 6698.9                   | 120.8                            | 6819.7                     | 10465.3                                   | 0                                           | 0                                     | 10465.3                              | DSGF               |
| 6698.9                   | 120.8                            | 6819.7                     | 9608                                      | 0                                           | 0                                     | 9608.0                               | DTGF               |
| 7581.1                   | 96.8                             | 7677.9                     | 23750                                     | 3152                                        | 263                                   | 27165.0                              | TFGF               |

## واسنجی مدل AquaCrop

پس از ورود داده‌ها و اجرای مدل، ضرایب گیاهی و پارامترهای مدل با استفاده از روش سعی و خطا به نحوی واسنجی شدند که نتایج دارای کمترین میزان خطا با داده‌های اندازه‌گیری شده در مزرعه را باشد. پارامترهای واسنجی شده مدل در جدول ۳ ارائه شده است (رائس و همکاران، ۲۰۱۸).

مدل گیاهی در هر دو روش نشایی و خشکه‌کاری (آبیاری بارانی و قطره‌ای) با استفاده از اطلاعات دریافتی از مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان گلستان برای عملکرد دانه و زیست‌توده واسنجی شد. نتایج واسنجی در جداول ۴ و ۵ نشان داده شده‌اند. شبیه‌سازی عملکرد دانه و زیست‌توده را به ترتیب برابر  $8/402$  و  $14/652$  تن در هکتار تخمین زد. با نگاهی بر آماره‌های ارزیابی خطا برای واسنجی مدل  $R^2 > 0/9$ ،  $d > 0/9$  می‌توان عملکرد مدل را مناسب ارزیابی نمود. همچنین مقدار

NRMSE برای عملکرد دانه و زیست‌توده به ترتیب  $3/73$ 

و  $13/17$  بود که به ترتیب در رده بسیار خوب و خوب قرار می‌گیرد. از آنجاکه مدل AquaCrop مقدار زیست‌توده را بر اساس توسعه‌ی پوشش گیاهی تعیین می‌کند و در داده‌های دریافتی از مرکز تحقیقات پوشش گیاهی در دوران رشد به‌طور کامل اندازه‌گیری نشده بود، از این‌رو دقت شبیه‌سازی زیست‌توده دارای خطای نسبی بیشتری نسبت مقدار واقعی آن بود. موسوی و همکاران (۱۴۰۱) ضمن بررسی شبیه‌سازی روند رشد گیاه برنج در روش‌های کشت مختلف با استفاده از مدل AquaCrop، گزارش کردند که مقادیر آماره‌های میانگین قدر مطلق خطا (MAE) و میانگین اریب خطا (MBE) و NRMSE برای عملکرد دانه برابر  $0/25$ ،  $1/0$  تن در هکتار و  $0/10$  بود. این مقادیر برای زیست‌توده به ترتیب برابر  $0/3$ ،  $1/15$  و  $0/05$  بود که همه این موارد توانایی کافی مدل را در شبیه‌سازی عملکرد و زیست‌توده نشان می‌دهد.

جدول ۳- پارامترهای واسنجی شده در مدل AquaCOP

| معیار<br>Parameters                                                                           | توضیحات<br>Description                                                            | واحد<br>Unit     | رقم فجر. کشت نشایی<br>Fajr Cult.<br>Transplanted method | رقم فجر. کشت مستقیم<br>Fajr Cult.<br>Direct seeding method |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------|---------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| Base Temperature                                                                              | دمای پایه                                                                         | °C               | 10                                                      | 10                                                         |
| Maximum Temperature                                                                           | دمای بیشینه                                                                       | °C               | 40                                                      | 40                                                         |
| Maximum Temperature for Pollination                                                           | بیشینه دما برای گرده‌افشانی                                                       | °C               | 35                                                      | 35                                                         |
| Maximum Root's depth                                                                          | بیشینه عمق ریشه                                                                   | m                | 0.35                                                    | 0.35                                                       |
| (CC <sub>0</sub> ) Initial canopy cover                                                       | پوشش گیاهی اولیه                                                                  | Cm <sup>2</sup>  | 9.0                                                     | 0.55                                                       |
| (CGC) Crop growth coefficient                                                                 | ضریب رشد گیاه                                                                     | %                | 12.9                                                    | 10.4                                                       |
| (CC <sub>x</sub> ) Maximum canopy cover                                                       | بیشینه پوشش گیاهی                                                                 | %                | 80                                                      | 75                                                         |
| (CDC) Crop decline coefficient                                                                | ضریب کاهش گیاه                                                                    | %                | 15.3                                                    | 15.1                                                       |
| Crop productivity                                                                             | بهره‌وری گیاه                                                                     | g/m <sup>2</sup> | 20                                                      | 20                                                         |
| Soil water depletion factor for leaf expansion (upper limit)                                  | ضریب کاهش آب خاک برای توسعه برگ (حد بالا)                                         | -                | 0                                                       | 0                                                          |
| Soil water depletion factor for leaf expansion (lower limit)                                  | ضریب کاهش آب خاک برای توسعه برگ (حد پایین)                                        | -                | 0.4                                                     | 0.4                                                        |
| Shape factor for water stress coefficient for leaf expansion                                  | ضریب تنش گیاه برای توسعه برگ                                                      | -                | 3                                                       | 3                                                          |
| Soil water depletion fraction for stomatal control                                            | جزء کاهش آب خاک برای کنترل روزنه                                                  | -                | 0.5                                                     | 0.5                                                        |
| Shape factor for water stress coefficient for stomatal control                                | ضریب شکل تنش آب برای کنترل روزنه                                                  | -                | 3                                                       | 3                                                          |
| Soil water depletion factor for canopy senescence                                             | جزء کاهش آب خاک برای پیری تاج پوشش                                                | -                | 0.6                                                     | 0.6                                                        |
| (upper limit) ECE Thresholds                                                                  | شوری عصاره اشباع (حد بالا)                                                        | -                | 11                                                      | 11                                                         |
| (lower limit) ECE Thresholds                                                                  | شوری عصاره اشباع (حد پایین)                                                       | dS/m             | 3                                                       | 3                                                          |
| Ece for for 25% yield loss                                                                    | شوری عصاره اشباع برای افت عملکرد ۲۵٪                                              | dS/m             | 5.1                                                     | 5.1                                                        |
| Coefficient, adjustment of HI to water stress during flowering                                | ضریب تصحیح شاخص برداشت (HI) برای تنش آبی در طوی گلدهی                             | -                | 0.75                                                    | 0.75                                                       |
| Coefficient, HI increased due to inhibition of leaf growth before flowering                   | افزایش شاخص برداشت (HI) برای مهار رشد برگ قبل از گلدهی                            | %                | 0                                                       | 0                                                          |
| HI decreased caused by water stress during yield formation                                    | کاهش شاخص برداشت (HI) به دلیل تنش آبی در طول دوره تشکیل محصول                     | -                | 5                                                       | 5                                                          |
| Coefficient, HI increased due to water stress on crop growth during the crop formation period | ضریب افزایش شاخص برداشت (HI) به دلیل تنش آبی بر رشد محصول در طول دوره تشکیل محصول | -                | 4                                                       | 4                                                          |
| Air stress in flooded conditions                                                              | تنش هوایی در شرایط غرقابی                                                         | %                | 0                                                       | 0                                                          |
| Reference harvest index (HI)                                                                  | شاخص برداشت مرجع (HI)                                                             | %                | 50                                                      | 50                                                         |

جدول ۴- مقادیر زیست توده و عملکرد اندازه گیری و شبیه سازی شده گیاه برنج (رقم فجر) در دو روش کشت برای مرحله واسنجی

| تیمار<br>Treatment      | عملکرد دانه<br>Yeild(ton/ha) |                            |                             | عملکرد زیست توده<br>Biomass(ton/ha) |                            |                             |
|-------------------------|------------------------------|----------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|----------------------------|-----------------------------|
|                         | خطا<br>Error (%)             | شبیه سازی شده<br>Simulated | اندازه گیری شده<br>Measured | خطا<br>Error (%)                    | شبیه سازی شده<br>Simulated | اندازه گیری شده<br>Measured |
| Fajr Cul. Transplanted  | -0.302                       | 8.402                      | 8.1                         | 2.223                               | 14.652                     | 16.875                      |
| Fajr Cul. Direct seeded | 0.22                         | 5.978                      | 6.00                        | 0.690                               | 11.852                     | 12.542                      |

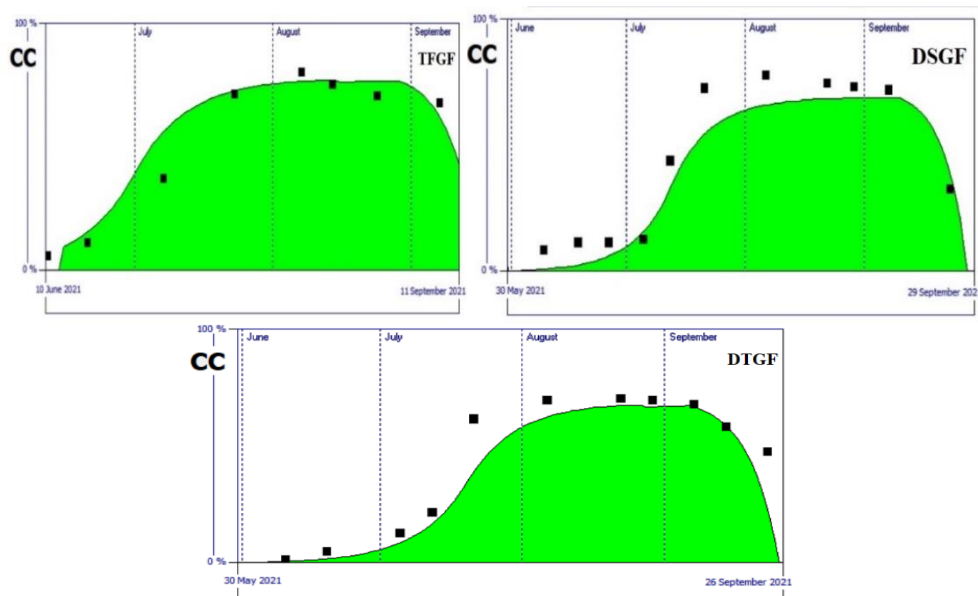
جدول ۵- نتایج واسنجی مدل AquaCrop برای گیاه برنج (رقم فجر) در دو روش کشت

| شاخص ها<br>Parameter | ضریب تبیین<br>R <sup>2</sup> | ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده<br>NRMSE | شاخص توافق و بلموت<br>d | ضریب کفایت<br>EF |
|----------------------|------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------|------------------|
| Yield                | 0.98                         | 3.73                                        | 0.97                    | 0.99             |
| Biomass              | 0.95                         | 13.17                                       | 0.9                     | 0.96             |

## صحت سنجی مدل AquaCrop

از داده های برداشت شده در سال ۱۳۹۹-۱۴۰۰ برای صحت سنجی استفاده شد. این داده ها شامل تاج پوشش، عملکرد دانه و زیست توده بودند. شکل ۲ وضعیت شبیه سازی تاج پوشش گیاهی را برای سه تیمار مورد مطالعه نشان می دهد. چنانچه مشاهده می شود، مدل به خوبی توانست شرایط رشد گیاه را شبیه سازی کند، به طوری که دوره رویشی در تیمارهای خشکه کاری طولانی تر و کشیده تر است، در صورتی که در روش نشایی دوران خزان وجود دارد که در شکل نشان داده نشده است و پوشش گیاهی پس

از انتقال نشا به زمین با سرعت بیشتری توسعه می یابد. به طوری که دوره رشد آن ۱۳۰ روزه (با احتساب زمان خزان) به پایان می رسد؛ ولی تیمارهای خشکه کاری ۱۲۰ روزه به رسیدگی فنولوژیک خود رسیدند. همچنین تاریخ گلدهی آن نسبت به شرایط خشکه کاری طولانی تر می باشد به طوری که از ابتدای بذریزی تا گلدهی در تیمار نشایی ۸۵ روز و در تیمارهای خشکه کاری حدود ۷۵ روز زمان نیاز است. این موضوع که در شرایط خشکه کاری گیاه حتی با وجود دریافت آبیاری کامل در معرض تنش خشکی و حرارتی بیشتری قرار دارد را می توان بر کوتاه شدن دوره رویش تا بلوغ مؤثر دانست.



شکل ۲- نمودار صحت سنجی مدل سازی پوشش گیاهی برای مدل AquaCrop (آبیاری بارانی (DSGF)، آبیاری غرقابی (TFGF) و آبیاری قطره ای (DTGF))

آماره‌های ارزیابی صحت شبیه‌سازی تاج پوشش در جدول ۶ ارائه شده است. نتایج نشان داد که مدل AquCarop برای هر دو روش کاشت از صحت مناسبی برخوردار است. مقادیر ضریب همبستگی برای تمامی تیمارها بیش از ۰/۹ بود که نشان دهنده همبستگی خطی مناسب داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده است. همچنین مقادیر NRMSE در تمامی تیمارها کمتر از ۳۰ به

دست آمد که نشان می‌دهد مدل‌سازی متوسط و در برخی موارد (مقادیر بین ۱۰ تا ۲۰) شبیه‌سازی خوب بوده است. مقادیر شاخص ویلموت نیز همگی قابل قبول بوده و بنابراین می‌توان ادعا کرد که شبیه‌سازی تاج پوشش با استفاده از AquaCrop به خوبی انجام گرفته است (ذکری، ۱۳۹۱؛ پورغلام آمیجی و همکاران، ۱۳۹۹؛ هما و همکاران، ۲۰۲۱؛ میرفندرسکی، ۱۳۹۸؛ سعادت و همکاران، ۱۳۹۱).

جدول ۶- پارامترهای ارزیابی صحت در شبیه‌سازی تاج پوشش در تیمارهای مختلف در مدل AquaCrop

| شماره<br>N | تیمار<br>Treatment | ضریب تبیین<br>R | ریشه میانگین<br>مربعات خطا<br>RMSE | ریشه میانگین<br>مربعات خطای<br>نرمال شده<br>NRMSE | شاخص توافق ویلموت<br>d | ضریب کفایت<br>EF |
|------------|--------------------|-----------------|------------------------------------|---------------------------------------------------|------------------------|------------------|
| 1          | TFGF               | 0.96            | 8.6                                | 16.4                                              | 0.98                   | 0.91             |
| 2          | DSGF               | 0.98            | 7.9                                | 19.4                                              | 0.98                   | 0.93             |
| 3          | DTGF               | 0.95            | 11.1                               | 25.2                                              | 0.96                   | 0.83             |

ویبیهوته و همکاران (۲۰۲۲) با استفاده از مدل گیاهی AquaCrop، روند رشد گیاه تحت دو روش کشت نشایی و کشت به صورت تشدید شده (SRI<sup>۴</sup>) را مطالعه کردند. نتایج نشان داد که مدل گیاهی دقت بالایی در شبیه‌سازی هر دو روش داشته است. پورغلام آمیجی و همکاران (۱۳۹۹) با استفاده از مدل AquaCrop به شبیه‌سازی آبیاری تناوبی پرداختند. نتایج نشان داد که مدل با دقت بالایی ( $d < 0/81$  و  $R^2 > 0/86$ ) موفق به شبیه‌سازی شده است.

نتایج ارزیابی صحت شبیه‌سازی عملکرد دانه و زیست‌توده برای تیمارهای مختلف، در جدول ۷ ارائه شده است. این نتایج نشان داد اگرچه صحت‌سنجی پوشش گیاهی نتایج مطلوبی داشت اما تخمین زیست‌توده با خطای بیشتری نسبت به عملکرد دانه همراه بود. مقادیر زیست‌توده برای آبیاری بارانی با ۱/۵ درصد خطا بیشترین اختلاف را نشان داد و پس از آن آبیاری قطره‌ای و غرقابی با درصد خطای ۰/۹۸ و ۰/۶۲ قرار گرفتند و همگی کمتر از مقادیر واقعی بودند. با این وجود بر اساس شاخص‌های سنجش ارائه شده در جدول ۸ می‌توان ادعا کرد که شبیه‌سازی برای زیست‌توده و عملکرد به خوبی انجام شده است، به طوری

که NRMSE برای عملکرد دانه برابر ۵/۱۲ و در رده بسیارخوب و برای زیست‌توده با مقدار ۱۲/۳۸ در رده خوب قرار گرفت. همچنین شاخص توافق برای هر عملکرد دانه و زیست‌توده به ترتیب برابر ۰/۹۵ و ۰/۸۹ بود که در محدوده تخمین مناسب قرار دارد. همچنین سعادت و همکاران (۱۳۹۱) با استفاده از AquaCrop به شبیه‌سازی تاج پوشش، زیست‌توده و عملکرد برنج تحت تیمارهای مختلف آبیاری پرداختند. آن‌ها در پژوهش مذکور مدل AquaCrop را به عنوان یک ابزار پشتیبان قوی در تصمیم‌گیری برای افزایش بهره‌وری آب معرفی نمودند. میرفندرسکی (۱۳۹۸) از مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد و زیست‌توده برنج تحت مدیریت‌های آبیاری متناوب و زهکشی میان‌فصل استفاده نمود و با توجه به شاخص‌های خطای به دست آمده گزارش نمود که این مدل قدرت شبیه‌سازی خوبی برای محصول و زیست‌توده با خطای کم را داراست. میراشارد و همکاران (۱۳۹۲) پس از ارزیابی مدل AquaCrop نتیجه گرفتند که این مدل با RMSE برابر ۰/۳۵ و ۰/۶۵ تن در هکتار صحت مناسبی داشت که با نتایج تحقیق حاضر همخوانی دارد.

جدول ۷- مقادیر زیست توده و عملکرد اندازه گیری و شبیه سازی شده برای مرحله ارزیابی

| تیمار<br>Treatment | Yeild(ton/ha)               |                            | Biomass(ton/ha)             |                            | Error (%) |
|--------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------|
|                    | عملکرد دانه                 |                            | عملکرد زیست توده            |                            |           |
|                    | اندازه گیری شده<br>Measured | شبیه سازی شده<br>Simulated | اندازه گیری شده<br>Measured | شبیه سازی شده<br>Simulated |           |
| TFGF               | 8.05                        | 7.859                      | 16.711                      | 17.327                     | -0.62     |
| DSGF               | 5.6                         | 5.598                      | 12.678                      | 14.181                     | -1.50     |
| DTGF               | 4.89                        | 4.884                      | 11.372                      | 12.352                     | -0.98     |

جدول ۸- ارزیابی کارایی مدل AquaCrop

| شاخص ها<br>Parameters | ریشه میانگین مربعات خطا<br>RMSE | ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده<br>NRMSE | شاخص توافق ویلموت<br>d | ضریب کفایت<br>EF |
|-----------------------|---------------------------------|---------------------------------------------|------------------------|------------------|
| Yield                 | 0.27                            | 5.12                                        | 0.95                   | 1.00             |
| Biomass               | 1.56                            | 12.38                                       | 0.89                   | 0.98             |

با دقت در نتایج به دست آمده مشاهده می شود بیشترین عملکرد مربوط به تیمار نشایی با آبیاری غرقابی و برابر ۷/۸۵۹ تن بر هکتار تخمین زده شد. پس از آن تیمارهای خشکه کاری آبیاری بارانی و قطره ای به ترتیب با عملکردهای دانه تخمینی ۵/۵۹۸ و ۴/۸۸۴ قرار گرفتند. نسبت عملکرد به آب مصرفی (بهره وری فیزیکی آب) و نیز نسبت ارزش ریزش ریالی عملکرد به حجم آب مصرفی در جدول ۹ ارائه شده است. اگرچه فرصت کافی برای رشد و نمو نشاها در خزانه و در نتیجه استقرار مطلوب تر در زمین، دسترسی بهتر و بیشتر به مواد غذایی، عدم وجود تنش آبی و کاهش تنش های محیطی به دلیل تعدیل دمایی توسط آب،

باعث برتری عملکرد برنج در شرایط کشت نشایی و آبیاری غرقابی می شوند، ولی همانطور که مشاهده می شود کشت نشایی بهره وری فیزیکی آب (WP) و بهره وری اقتصادی آب (EWP) بسیار کمتری نسبت به روش های خشکه کاری دارد. بیشترین حجم آب مصرفی مربوط به کشت نشایی و کمترین آن مربوط به روش کشت مستقیم و روش آبیاری قطره ای می باشد. این تفاوت در اندازه ای است که می توان ادعا کرد با ۶۱ درصد صرفه جویی آب می توان به ۷۰ درصد عملکرد در شرایط غرقابی دست یافت که به نظر رویکردی قابل قبول است.

جدول ۹- نیاز آبی و آب مصرفی در مزارع (m<sup>3</sup>/ha) (منبع: ذوالفقاری و همکاران، ۱۴۰۱)

| تیمار<br>Treatment | بهره وری فیزیکی<br>WP (kg/m <sup>3</sup> ) | بهره وری اقتصادی<br>EWP (Rial/m <sup>3</sup> ) |
|--------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------|
| DSGF               | 0.53                                       | 117.079.43                                     |
| DTGF               | 0.51                                       | 141.791.9                                      |
| TFGF               | 0.3                                        | 82.704.88                                      |

کیازرمانی (۱۳۸۹) با تأکید بر نقش مهم مدیریت آبیاری در استفاده بهینه از منابع و افزایش بازده تولید و ضرورت توجه بیشتر به روش های صرفه جویانه نشان دادند که لازم است از منابع آب موجود به بهترین شکل استفاده شده و با اعمال مدیریت صحیح آبیاری، بهره وری آب در بخش کشاورزی در حد ممکن افزایش داده شود. در این راستا استفاده از مدل هایی همچون AquaCrop می تواند بسیار مفید و کاربردی باشد. تافته و همکاران (۲۰۲۵) با

تلفیق مدل AquaCrop با WinSRFR توانستند بهره وری را برای کشاورزان منطقه حمیدیه استان خوزستان تا ۴۵ درصد افزایش دهند. همچنین امداد و تافته (۲۰۱۷) با استفاده از مدل AquaCrop و با بررسی اثرات تغییر تاریخ کاشت بر عملکرد محصول به خوبی عملکرد گیاه را در شرایط مختلف تنش آبی ارزیابی نمودند. ابراهیمی پاک و همکاران (۲۰۲۲) در پژوهشی گزارش کردند که تنظیم دقیق میزان آبیاری و کوددهی می تواند تأثیر قابل توجهی بر

افزایش عملکرد محصول و بهره‌وری مصرف آب داشته باشد. آنها برای شبیه‌سازی آزمایش از نرم‌افزار AquaCrop استفاده نمودند و نتایج ارزیابی آماره‌های خطا این مدل را مناسب نشان داد. امداد و تافته (۲۰۱۷) همچنین از این مدل برای شبیه‌سازی مدیریت دقیق عمق آب آبیاری استفاده کردند و با افزایش عملکرد محصول و کاهش مصرف آب، بهره‌وری آبی گندم را از ۰/۳۲ به ۰/۷۸ افزایش دادند. تمامی این پژوهش‌ها بر اهمیت وجود مدل‌های قوی برای شبیه‌سازی محصولات کشاورزی تأکید می‌کنند. این مدل‌ها ابزارهای بسیار کارآمدی برای شبیه‌سازی شرایط مختلف مدیریتی و افزایش میزان بهره‌وری محصول هستند.

### نتیجه‌گیری

با توجه به کمبود منابع آب، استفاده از روش‌های نوین آبیاری برنج ناگزیر خواهد بود و لذا استفاده از مدل‌های گیاهی در این زمینه کمک شایانی است. نتایج این پژوهش نشان داد که مدل AquaCrop به خوبی توانست تاج پوشش، زیست‌توده و عملکرد برنج را تحت رژیم‌های مختلف آبیاری شبیه‌سازی کند، به طوری که  $25/2 < NRMSE < 0/27$  در محدوده قابل قبول قرار گرفت. شاخص توافق با قرار گرفتن در بازه‌ی ۰/۹۸ تا ۰/۸۹ ارزیابی را مناسب نشان داد. از این رو، مدل AquaCrop می‌تواند به عنوان یک ابزار پشتیبان تصمیم‌گیری اطلاعات ارزشمندی را در طراحی شیوه‌های مدیریت کشت و آبیاری

ارائه دهد. با توجه به شرایط کمبود روز افزون منابع آب سطحی و زیرزمینی، استفاده از مدل‌هایی که دقت مناسبی در شبیه‌سازی عملکرد محصول با بهره‌وری آب بیشتر بسیار ارزشمند خواهد بود. این یافته‌ها همچنین می‌تواند به عنوان راهنمایی برای توجیه کشاورزان نسبت به استفاده از روش‌های صرفه‌جویانه‌تر و افزایش بهره‌وری آب توسط مدیران پروژه، مشاوران، مهندسان آبیاری مورد استفاده قرار گیرد. توسعه کاربرد چنین مدل‌هایی برای رسیدن به بهره‌وری آب بیشتر می‌تواند برنامه‌ریزان و سیاست‌گذاران در امر کشت برنج را راهنمایی کرده و چشم‌انداز خوبی برای امنیت غذایی آینده کشور خشک و نیمه‌خشک ایران در راستای پایداری سرزمین فراهم نماید.

### تشکر و قدردانی

در این بخش، از همکاری و مساعدت مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و سازمان جهاد کشاورزی استان گلستان برای حمایت‌های معنوی و ارائه آمار و اطلاعات مربوط به خشکه‌کاری برنج در سال‌های ۱۳۹۷-۱۳۹۹ برای واسنجی مدل AquaCrop سپاسگزاریم.

### تعارض منافع

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

### فهرست منابع

۱. امیری، ابراهیم، رضایی، مجتبی. و شیرشاهی، فهیمه. ۱۳۹۸. بررسی عملکرد مدل AquaCrop در شرایط مدیریت تنش شوری و خشکی برنج. نشریه مدیریت آب در کشاورزی، ۶(۱): ۱۳-۲۲.
۲. پورغلام امیجی، مسعود، لیاقت، عبدالمجید. و خوش‌روش، مجتبی. ۱۳۹۹. ارزیابی مدل AquaCrop در تخمین عملکرد برنج تحت کشت آبیاری تناوبی. مهندسی آبیاری و آب ایران، ۱۱(۴۱): ۳۰۵-۳۲۰.  
doi: 10.22125/iwe.2020.114972
۳. حسنی، محمد، افراسیاب، پیمان. و ابراهیمیان، حامد. ۱۳۹۴. ارزیابی مدل‌های AquaCrop و SALTMED در تخمین عملکرد محصول ذرت و شوری خاک. تحقیقات آب و خاک ایران، ۴۶(۳): ۴۹-۴۸.

۴. ذبیحی، ابوالفضل، درزی نفت چالی، عبدالله. و خوش-روش، مجتبی. ۱۳۹۵. آنالیز اثر تنش خشکی بر عملکرد، کارایی مصرف آب و شوری ناحیه ریشه برنج. تنش‌های محیطی در علوم زراعی، ۹ (۴):  
<https://doi.org/10.22077/escs.2017.465>
۵. ذکری، فاطمه. ۱۳۹۱. شبیه‌سازی اثر نوسانات اقلیمی بر عملکرد برنج رقم هاشمی با استفاده از مدل AquaCrop در منطقه رشت. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران
۶. ذوالفقاری، پروین، هزارجریبی، ابوطالب، اسدی، محمداسماعیل. و امیری، ابراهیم. ۱۴۰۱. ارزیابی بهره‌وری فیزیکی- اقتصادی آب در روش‌های مختلف کاشت و آبیاری برنج رقم فجر در استان گلستان. پژوهش آب در کشاورزی، ۳۶ (۴): ۳۹۱-۴۰۴. doi: 10.22092/jwra.2023.360212.946
۷. رزاقی، محمد حسین، کیانی. علیرضا. و آبیاری، نور محمد. ۱۳۹۹. کشت نشایی و خشکه‌کاری برنج، راهکاری فنی و اقتصادی برای تولید برنج در شرایط استان گلستان، ۷ (۱): ۳۳-۴۴.  
**DOR: 20.1001.1.24764531.1399.7.1.4.1**
۸. سعادت، زهرا، پیرمردیان، نادر، امیری، ابراهیم. و رضایی. مجتبی. ۱۳۹۱. ارزیابی مدل WOFOST در شبیه‌سازی عملکرد دو رقم برنج تحت رژیم‌های مختلف آبیاری. مجله پژوهش آب در کشاورزی. ۲۶ (۳): ۳۲۳-۳۳۷  
doi:10.22092/jwra.2012.118985.۳۳۷
۹. کریمی فرد، مریم، ذاکری‌نیا، مهدی، کیانی، علیرضا، و فیض‌بخش، محمدتقی. ۱۳۹۹. تأثیر سامانه‌های آبیاری قطره‌ای و بارانی بر عملکرد برنج و بهره‌وری آب در دو روش کشت نشانی و کشت مستقیم بذر. آب و خاک، ۳۴ (۵): ۱۰۱۹-۱۰۳۲. <https://doi.org/10.22067/jsw.v34i5.84952>
۱۰. کیا زرماني، حجت. ۱۳۸۹. بررسی تأثیر تاریخ کاشت و خشکی آخر فصل بر خصوصیات کمی و کیفی شش رقم برنج در شمال ایران. پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته زراعت دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه شاهد. ۱۳۳ صفحه.
۱۱. کیانی، علیرضا، یزدانی، محمدرضا. و فیض‌بخش، محمدتقی. ۱۴۰۰. مقایسه روش‌های مستقیم و نشایی برنج تحت روش‌های مختلف آبیاری. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۳۵ (۶): ۷۷۹-۷۹۰.  
<https://doi.org/10.22067/jsw.2021.69302.1036>
۱۲. معاونت آمار مرکز آمار، فناوری اطلاعات و ارتباطات. ۱۴۰۲. آمارنامه کشاورزی سال ۱۴۰۱، ج. اول: محصولات زراعی.
۱۳. موسوی، امیرحسین، اگدرنژاد، اصلا. و گیلانی، عبدالعلی. ۱۴۰۱. ارزیابی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی واکنش ارقام مختلف برنج به روش کاشت. نشریه رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط‌زیست، ۱ (۱): ۶۴-۷۴.  
<https://doi.org/10.22034/nawee.2022.153890>
۱۴. میراشد، سحر، امیری، ابراهیم. و عاشوری، مجید. ۱۳۹۲. شبیه‌سازی عملکرد دانه برنج رقم بهار با استفاده از مدل AquaCrop. دومین کنگره ملی کشاورزی ارگانیک. <https://civilica.com/doc/271928>
۱۵. میرفندرسکی، رامتین. ۱۳۹۸. تحلیل تأثیر تغییر اقلیم بر عملکرد و بهره‌وری مصرف آب برنج تحت مدیریت های آبیاری و زهکشی متناوب و زهکشی میان فصل. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.
16. Abdul-Ganiyu, S., Kyei-Baffour, N., Agyare, W.A., et al. 2018. Evaluating the effect of irrigation on paddy rice yield by applying the AquaCrop model in Northern Ghana. In Strategies for Building Resilience Against Climate and Ecosystem Changes in Sub-Saharan Africa. Springer, Singapore. 93-116 pp.

- [https://doi.org/10.1007/978-981-10-4796-1\\_6](https://doi.org/10.1007/978-981-10-4796-1_6)
17. Adhikari, B. B. 2021. Review on scope and challenges of direct seeded rice in Nepal. *Agronomy Journal of Nepal*, 5(01), 88-96. <https://doi.org/10.3126/aj.n.v5i01.44786>
18. Amiri, E., 2016. Calibration and testing of the AquaCrop model for rice under water and nitrogen management. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 47(3), 387-403. <https://doi.org/10.1080/00103624.2015.1123719>
19. Amiri, E., Rezaei, M., Rezaei, E. E., and Bannayan, M. 2014. Evaluation of Ceres-Rice, AquaCrop and Oryza2000 models in simulation of rice yield response to different irrigation and nitrogen management strategies. *Journal of Plant Nutrition*, 37(11), 1749-1769. <https://doi.org/10.1080/01904167.2014.888750>
20. Anjum, S. A., Akbar, N., Ashraf, U., Khan, I., Shakoor, A., Ishfaq, M., Hanif, M. S., Shahid, M., and Shareef, M. 2019. Interactive effect of rice production systems and tillage systems in rice-wheat cropping system. *Pakistan Journal of Science*, 71, 21-27. <https://nja.pastic.gov.pk/PJS/index.php/PJS/article/view/1467>
21. Aslam, M., Hussain, S., Ramzan, M., and Akhter, M. 2008. Effect of different stand establishment techniques on rice yields and its attributes. *Journal of Animal and Plant Sciences*, 18, 80-82. [https://thejaps.org.pk/docs/18\\_2-3\\_2008/08-828.pdf](https://thejaps.org.pk/docs/18_2-3_2008/08-828.pdf)
22. Bhushan, L., Ladha, J. K., Gupta, R. K., Singh, S., Tirol-Padre, A., Saharawat, Y., Gathala, M., and Pathak, H. 2007. Saving of water and labor in a rice-wheat system with no-tillage and direct seeding technologies. *Agronomy Journal*, 99, 1288-1296. <https://doi.org/10.2134/agronj2006.0227>
23. Ebrahimipak, N., Egdarnejad, A., Tafteh, A., and Ansari, M. A. 2022. The effect of irrigation water management and fertilizer amount on AquaCrop accuracy and efficiency for tomato yield and water use efficiency simulation. *Irrigation and Water Engineering*, 12(3), 121-136. <https://doi.org/10.22125/iwe.2022.146391>
24. Elsadek, E., Zhang, K., Mousa, A., Ezaz, G. T., Tola, T. L., Shaghaleh, H., Hamad, A. A. A. and Alhaj Hamoud, Y. 2023. Study on the in-field water balance of direct-seeded rice with various irrigation regimes under arid climatic conditions in Egypt using the AquaCrop model. *Agronomy*, 13(2), 609. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020609>
25. Emdad, M. R. and Tafteh, A. 2017. Evaluation of AquaCrop model for decreasing water stress effects due to different wheat planting date. *Journal of Agronomy and Plant Breeding*, 13(4), 75-83.
26. Emdad, M. R. and Tafteh, A. 2019. Determining the most suitable depth of irrigation water of wheat plant using the AquaCrop model in order to increase water use efficiency. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 13(2), 417-425. <https://doi.org/20.1001.1.20087942.1398.13.2.13.1>
27. Farooq, M., Kadambot, S. H. M., Rehman, H., Aziz, T., Lee, D., and Wahid, A. 2011. Rice direct seeding: Experiences, challenges and opportunities. *Soil and Tillage Research*, 111, 87-98. <https://doi.org/10.1016/j.still.2010.10.008>
28. Geerts, S., Raes, D., Garcia, M., et al. 2009. Simulating yield response of quinoa to water availability with AquaCrop. *Agronomy Journal*, 101, 499-508. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0137s>
29. Houma, A. A., Kamal, M. R., Mojid, M. A., Zawawi, M. A. M., and Rehan, B. M. 2021. Predicting climate change impact on water productivity of irrigated rice in Malaysia using FAO-AquaCrop model. *Applied Sciences*, 11(23), 11253. <https://doi.org/10.3390/app112311253>
30. Hsiao, T.C., Heng, L., Steduto, P., Rojas-Lara, B., Raes, D. and Fereres, E., 2009. AquaCrop—the FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. *Agronomy Journal*, 101(3), pp.448-459. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0218s>
31. Ishfaq, M., Akbar, N., Khan, I., Anjum, S. A., Zulfikar, U., Ahmad, M., Ahmad, M. and Chattha, M. U. 2018. Optimizing row spacing for direct seeded aerobic rice under dry and moist fields. *Pakistan Journal of Agricultural Research*, 31(4), 291-299. <https://doi.org/10.17582/journal.pjar/2018/31.4.291.299>

32. Lin, L., Zhang, B., and Xiong, L. H. 2012. Evaluating yield response of paddy rice to irrigation and soil management with application of the AquaCrop model. *American Society of Agricultural and Biological Engineers* 55, 839-848.  
**<https://doi.org/10.13031/2013.41518>**
33. Pereira, L. S., Paredes, P., Sholpankulov, E. D., et al. 2009. Irrigation scheduling strategies for cotton to cope with water scarcity in the Fergana Valley, Central Asia. *Agricultural Water Management* 96, 723-735. **<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.10.013>**
34. Pirmoradian, N., Saadati, Z., Rezaei, M. and Khaledian, M.R., 2020. Simulating water productivity of paddy rice under irrigation regimes using AquaCrop model in humid and semiarid regions of Iran. *Applied Water Science*, 10(7), 1-8.  
**<https://doi.org/10.1007/s13201-020-01249-5>**
35. Porras-Jorge, R., Ramos-Fernández, L., Ojeda-Bustamante, W. and Ontiveros-Capurata, R. E. 2020. Performance assessment of the AquaCrop model to estimate rice yields under alternate wetting and drying irrigation in the coast of Peru. *Scientia Agropecuaria*, 11(3), 309-321. **<https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2020.03.03>**
36. Raes, D., Steduto, P., Hsiao, et al. 2018. AquaCrop Version 6.0 - 6.1 Reference Manual June, FAO, Rome, Italy.
37. Rowshon, M. K., Dlamini, N. S., Mojid, M. A., Adib, M. N. M., Amin, M. S. M. and Lai, S. H. 2019. Modeling climate-smart decision support system (CSDSS) for analyzing water demand of a large-scale rice irrigation scheme. *Agricultural Water Management*, 216, 138-152. **<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.01.002>**
38. Saadati, Z., Pirmoradian, N., and Rezaei, M. 2011. Calibration and evaluation of AquaCrop model in rice growth simulation under different irrigation managements. 21th International Congress on Irrigation and Drainage, October 19-23, Tehran, Iran, pp. 589-600. URI: **<http://hdl.handle.net/123456789/4389>**
39. Shafiei, M., Ghahraman, B., Saghafian, B., et al. 2014. Uncertainty assessment of the agro-hydrological SWAP model application at field scale: a case study in a dry region. *Agricultural Water Management*, 146, 324-334.  
**<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.09.008>**
40. Taftah, A., Emdad, M. R. and Sedaghat, A. 2025. Improving irrigation management in wheat farms through the combined use of the AquaCrop and WinSRFR models. *Journal of Arid Land*, 17(2), 245-258. **<https://doi.org/10.1007/s40333-025-0005-y>**
41. Toumi, J., Er-Raki, S., Ezzahar, J., et al. 2016. Performance assessment of AquaCrop model for estimating evapotranspiration, soil water content and grain yield of winter wheat in Tensift Al Haouz (Morocco): Application to irrigation management. *Agricultural Water Management*, 163, 219-235. **<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.09.007>**
42. Tuong, T. P., Castillo, E. G., Cabangon, R. C., Boling, A. and Singh, U. 2002. The drought response of lowland rice to crop establishment practices and N-fertilizer sources. *Field Crops Research*, 74, 243-257. **[https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(01\)00213-1](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(01)00213-1)**
43. Vibhute, S. D., Sarangi, A., Singh, D. K., Bandyopadhyay, K. K., Parihar, S. S. and Kumar, D. 2022. Performance evaluation of AquaCrop model for rice (*Oryza sativa*) crop in Trans-Gangetic plains. *The Indian Journal of Agricultural Sciences*, 92(2), 199-202.
44. Xu, J., Bai, W., Li, Y., Wang, H., Yang, S. and Wei, Z. 2019. Modeling rice development and field water balance using AquaCrop model under drying-wetting cycle condition in eastern China. *Agricultural Water Management*, 213, 289-297.  
**<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.10.028>**



## شبیه سازی تغییرات رطوبت و شوری خاک به وسیله نرم افزار HYDRUS-2D با

### لوله های PVC سوراخ دار در باغ های پسته استان کرمان

حسین شیرانی، حسام نجات، عیسی اسفندیارپور، ناصر صداقتی، سید جواد حسینی فرد و

سمیه صدر \*

استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ولی عصر رفسنجان، ایران. [Shirani@vru.ac.ir](mailto:Shirani@vru.ac.ir)

دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشگاه ولی عصر رفسنجان، ایران. [Hesam.nejat@gmail.com](mailto:Hesam.nejat@gmail.com)

استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ولی عصر رفسنجان، ایران. [esfandiarpoor@vru.ac.ir](mailto:esfandiarpoor@vru.ac.ir)

استادیار پژوهش، پژوهشکده پسته، موسسه تحقیقات و علوم باغبانی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، رفسنجان، ایران.

[n-sedaghati@pri.ir](mailto:n-sedaghati@pri.ir)

دانشیار پژوهش، پژوهشکده پسته، موسسه تحقیقات و علوم باغبانی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، رفسنجان، ایران.

[hosseinifard@pri.ir](mailto:hosseinifard@pri.ir)

استادیار پژوهش، پژوهشکده پسته، موسسه تحقیقات و علوم باغبانی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، رفسنجان، ایران.

[sadr@pnu.ac.ir](mailto:sadr@pnu.ac.ir)

دریافت: آذر ۱۴۰۳ و پذیرش: شهریور ۴۰۴

#### چکیده

به منظور شبیه سازی دوبعدی حرکت آب و املاح در خاک، با استفاده از مدل عددی HYDRUS-2D، عملکرد سامانه آبیاری زیرسطحی کم فشار با لوله های PVC سوراخ دار در باغ های پسته شهرستان انار (استان کرمان) بررسی شد. تیمارهای آزمایشی از ترکیب چهار فاکتور هر کدام در دو سطح شامل عمق کانال (۴۰ و ۶۰ سانتی متر)، قطر لوله (۱۱۰ و ۱۶۰ میلی متر)، فاصله سوراخ روی لوله (۱۵ و ۲۵ سانتی متر) و قطر سوراخ های روی لوله (۹ و ۱۲ میلی متر) بود. مقدار شاخص ارزیابی NRMSE نشان داد که مدل HYDRUS-2D توانایی خوبی در شبیه سازی توزیع رطوبت و غلظت املاح در این سامانه دارد. نتایج شبیه سازی نشان داد که تیمار عمق کانال ۶۰ سانتی متر، قطر لوله ۱۱۰ میلی متر، قطر شکاف ۹ میلی متر و فاصله سوراخ ها ۱۵ سانتی متر (تیمارهای T<sub>15</sub> و T<sub>16</sub>)، بهترین توزیع شوری را در خاک ایجاد کرد و با کاهش تجمع شوری در ناحیه ریشه نسبت به سایر تیمارها برتری داشت. همچنین، تیمارهای با قطر لوله ۱۶ سانتی متر، قطر شکاف ۱۲ میلی متر، عمق کانال ۶۰ سانتی متر و فاصله سوراخ ۱۵ و ۲۵ سانتی متر (T<sub>9</sub> و T<sub>10</sub>) توزیع رطوبت مناسب تری نسبت به بقیه تیمارها داشت و ترکیب مورد استفاده این خصوصیات طراحی سیستم نتایج بهتری از نظر توزیع شوری و رطوبت در سامانه آبیاری زیرسطحی با لوله های PVC سوراخ دار نشان داد. در مقابل، تیمار T<sub>4</sub> (عمق کانال ۴۰ سانتی متر، قطر لوله ۱۶۰ میلی متر، قطر سوراخ نه میلی متر، فاصله سوراخ ها ۲۵ سانتی متر) عملکرد ضعیف تری از نظر یکنواختی توزیع رطوبت و کنترل شوری نشان داد. پیشنهاد می شود در طراحی سامانه های آبیاری زیرسطحی پسته، پارامترهای بهینه شناسایی شده در این مطالعه، با توجه به شرایط منطقه، مورد استفاده قرار گیرند.

واژه های کلیدی: حرکت املاح، آبشویی، الگوی توزیع رطوبت، مدیریت آبیاری

\* - آدرس ایمیل نویسنده مسئول: [sadr@pnu.ac.ir](mailto:sadr@pnu.ac.ir)



## مقدمه

پسته (*Pistacia vera* L.) یکی از مهم‌ترین محصولات ارزآور کشاورزی محسوب شده و به‌عنوان یک محصول راهبردی جایگاه خاصی را در بین تولیدات کشاورزی دارا است. این محصول در بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران به‌صورت باغ‌های تجاری (به‌ویژه در ۴۰ سال اخیر) کشت شده است. با توجه به روند رو به رشد ایجاد باغ‌های پسته در شرق و مرکز ایران، مصرف بهینه آب برای این گیاه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در دهه‌های اخیر، شور شدن خاک به‌عنوان تهدیدی برای امنیت غذایی جهانی و بهره‌وری کشاورزی، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، شناخته شده است (آل‌تابال و الزبون، ۲۰۲۱). این فرآیند با فعالیت‌هایی مانند مدیریت اشتباه آبیاری تسریع می‌شود (نینگ و همکاران، ۲۰۲۰). از این‌رو، استفاده بهینه از منابع آب به‌عنوان محور اصلی توسعه بایستی مورد توجه قرار گیرد. یکی از سامانه‌های آبیاری که در سال‌های اخیر بیشتر مورد توجه قرار گرفته است، سامانه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی است (سیفی و صداقتی، ۱۳۹۹). استفاده از لوله‌های PVC سوراخ‌دار به‌عنوان یک روش آبیاری زیرسطحی، روشی جدید است که تقریباً از حدود سال ۱۳۸۹ در باغ‌های پسته استان کرمان (شهرستان انار) مورد استفاده قرار گرفته است (صداقتی و همکاران، ۱۳۹۸). صداقتی و همکاران (۱۳۹۳) نشان دادند که تغییر روش آبیاری از غرقابی به آبیاری زیرسطحی با لوله‌های پی‌وی‌سی سوراخ‌دار در باغ‌های پسته، تقریباً تمام صفات کمی و کیفی محصول را تحت تأثیر قرار داد؛ به‌گونه‌ای که باعث افزایش ۰/۸ تا ۱/۶ کیلوگرمی وزن محصول خشک هر درخت (افزایش ۴۵۷ تا ۹۱۴ کیلوگرمی محصول در هکتار)، کاهش ۱/۷ تا ۴/۲۵ درصدی پوکی، افزایش ۳/۵ تا ۶ درصدی خندانی، کاهش ۱/۳ تا ۲ واحدی در انس (افزایش اندازه میوه پسته) و افزایش ۴۱/۴ تا ۶۱/۶ درصدی بهره‌وری مصرف آب گردید. ضمن اینکه میزان مصرف آب نسبت به آبیاری غرقابی تا ۲۵ درصد کاهش یافت.

لذا طراحی صحیح سامانه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی به‌گونه‌ای که آب در محیط ریشه به‌طور یکنواخت و به‌اندازه کافی توزیع گردد، ضروری است. در نتیجه، شناخت الگوی خیس شدن خاک و حرکت آن، نقش مهمی در تصمیم‌گیری عمق و فاصله لوله‌های قطره‌چکان‌دار، طراحی و برنامه‌ریزی آبیاری و بهبود کارایی آبیاری قطره‌ای زیرسطحی دارد (فول و همکاران، ۲۰۱۲). در سال‌های اخیر، تحقیقات بسیاری در رابطه با جبهه رطوبتی و توزیع شوری زیر یک قطره‌چکان صورت گرفته و مدل‌های عددی، ریاضی و تجربی مختلفی برای شبیه‌سازی الگوی خیس‌شدگی خاک، ابعاد جبهه رطوبتی و توزیع شوری برای سامانه‌های آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی ارائه شده است (باجپای و کاوشالم، ۲۰۲۰). مدل HYDRUS-2D یکی از مدل‌های پیشرفته در ارتباط با حرکت دوئیدی آب، املاح و گرما در یک محیط متخلخل (مانند خاک) محسوب می‌شود (رمضانی اعتدالی و همکاران، ۱۴۰۱).

حسینی و همکاران (۱۴۰۲) به‌منظور شبیه‌سازی حرکت آب و شوری در آبیاری قطره‌ای نواری در کشت ذرت از مدل HYDRUS-2D استفاده کردند. شاخص‌های آماری NRMSE و RMSE نشان از شبیه‌سازی عالی مدل بوده است. نتایج این مطالعه نشان داد که HYDRUS-2D توانایی بالایی در شبیه‌سازی حرکت آب در محیط‌های متخلخل دارد و در شبیه‌سازی توزیع رطوبت در خاک بهتر از توزیع شوری عمل کرده است.

شینی دشتگل و همکاران (۱۴۰۰) برای بررسی توانایی مدل HYDRUS-2D در شبیه‌سازی چگونگی توزیع رطوبت در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با توجه به عمق قرارگیری لوله‌ها (۱۵، ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متر) با فاصله ۶۰ سانتی‌متر روی لوله‌های آبد، توانایی مدل را در شبیه‌سازی توزیع رطوبت در عمق ۲۰ سانتی‌متر، خوب و در عمق‌های ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متر، متوسط ارزیابی کردند.

حیدری و همکاران (۱۳۹۷) به‌منظور بررسی اثر دبی قطره‌چکان بر الگوی خیس شده در روش آبیاری

می‌گذارد. همچنین، بافت خاک به دلیل ارتباط با هدایت هیدرولیکی خاک و تأثیر بر نگهداری آب خاک، اثر بیشتری بر هندسه ناحیه خیسیدگی خاک داشت. به‌طورکلی، گسترش افقی این ناحیه، در خاک‌های با بافت ریز و یا در لایه‌های با بافت ریزتر موجود در خاک‌های لایه‌ای، بیشتر بود.

با مدل کردن آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و مقایسه نتایج حاصل با مدل تحلیلی و عددی HYDRUS-2D مشاهده شد که روند تغییرات دبی بر الگوی رطوبتی و نفوذ عمقی تأثیرگذار بود؛ اما بر مقدار تبخیر و تعرق تأثیری نداشت. همچنین، نشان داد که تأثیر خصوصیات هیدرولیکی خاک برای هندسه خیس شده توسط قطره‌چکان تأثیرگذار است (المالوگلو و دیامانتوپولو، ۲۰۰۹).

تافته و امداد (۱۴۰۳) به‌منظور ارائه مدیریت مناسب آبیاری برای دستیابی به عملکرد قابل قبول و شبیه‌سازی شوری خاک، سه باغ پسته که نماینده غالب باغ‌های منطقه دامغان بوده و با آبیاری قطره‌ای سطحی آبیاری می‌شدند را انتخاب کردند. مدیریت آبیاری و تغییرات شوری خاک در این باغ‌ها با استفاده از مدل HYDRUS-2D، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که میزان شوری در نزدیکی قطره‌چکان‌ها کمتر بوده و با دور شدن از آن‌ها افزایش یافت. با توجه به اینکه دوره معمول آبیاری این باغ‌ها در محدوده ۱۰ تا ۱۵ روز و زمان آبیاری حدود ۱۲ ساعت (میانگین تبخیر و تعرق استاندارد و عملکرد به ترتیب ۶۳۵ میلی‌متر و ۱/۷ تن در ساعت) بود، مشخص شد که با سناریوی سیکل آبیاری حدود ۲۰ روز و زمان آبیاری حدود ۸ تا ۱۰ ساعت عملکرد مشابهی به دست خواهد آمد و کاهش مصرف آب حدود ۳۰ درصد نسبت به شرایط معمول اتفاق خواهد افتاد. دهقانی سانچ و همکاران (۱۳۹۸) در پژوهشی به شبیه‌سازی توزیع رطوبت خاک در منطقه ریشه گیاه پسته تحت سامانه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با استفاده از مدل HYDRUS-2D پرداختند. تیمارهای پژوهش شامل سه رژیم آبیاری منطبق

قطره‌ای با مدل HYDRUS-2D از یک مدل فیزیکی از جنس پالکسی گلاس، پر شده با خاک لوم رسی سیلتی و قطره‌چکان‌های تنظیم‌شونده دستی با آبدهی دو، چهار، شش و هشت لیتر در ساعت استفاده کردند. ایشان از بررسی نتایج ارائه‌شده توسط مدل و الگوهای مشاهداتی ثبت‌شده به این نتیجه رسیدند که هرچه داده‌های ورودی به Rosetta بیشتر باشد، نتایج ارائه‌شده توسط مدل به الگوهای مشاهداتی شبیه‌تر خواهد بود و همچنین اعلام داشتند که مدل HYDRUS-2D در دبی‌های کمتر با دقت بیشتری عمل کرده است.

خلیلی و همکاران (۱۳۹۵) مدل HYDRUS-2D را به‌منظور تعیین پروفیل رطوبتی در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در شرایط لایسیمتری در خاک لوم با دو عمق نصب ۴۰ و ۵۰ سانتی‌متر و دبی قطره‌چکان برابر ۵/۳ لیتر در ساعت بر لوله‌های لترال با فاصله ۵۰ و ۷۵ سانتی‌متری از یکدیگر مورد بررسی قرار داده و اعلام داشتند که نتایج نشان از برازش خوب بین داده‌های برآورد شده توسط مدل و مقادیر اندازه‌گیری شده دارد. به‌علاوه، به دلیل تشکیل پروفیل رطوبتی پیوسته که نشان‌دهنده مناسب بودن فاصله قطره‌چکان‌ها از یکدیگر است، رطوبت کمتر در نزدیکی سطح خاک با عمق ۵۰ سانتی‌متر و فاصله ۷۵ سانتی‌متری قطره‌چکان‌ها از یکدیگر اتفاق افتاد که به‌عنوان عمق و فاصله بهینه معرفی گردید.

سیال و اسکگز (۲۰۰۹) به بررسی الگوهای خیسیدگی خاک شبیه‌سازی‌شده با نرم‌افزار HYDRUS-2D در یک سامانه آبیاری زیرسطحی پرداختند. نتایج نشان داد که پیش‌بینی‌های محتوای آب خاک، تطابق قابل قبولی  $R^2 = 0.98$  با داده‌های مشاهداتی داشت. این پژوهشگران همچنین اثرات پارامترهای مختلف طراحی سامانه آبیاری مذکور را بر الگوی مرطوب‌شدن خاک توسط نرم‌افزار HYDRUS-2D شبیه‌سازی و مطالعه نمودند. نتایج حاکی از آن بود که افزایش فشار سامانه باعث افزایش محیط ناحیه خیس‌شده گردید. به‌علاوه، آن‌ها نتیجه گرفتند که عمق نصب لوله‌ها تأثیر قابل توجهی بر میزان اتلاف آب و تبخیر

بر مدیریت زارع ( $I_1$ )، نیاز آبی ( $I_2$ ) و نیاز آبی و آبشویی ( $I_3$ )، سه عمق نمونه‌برداری ۲۵، ۵۰ و ۷۵ سانتی‌متر و در زمان قبل و بعد از آبیاری بود. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که در منطقه ریشه گیاه، درصد رطوبت حجمی مشاهداتی و برآوردشده، نسبتاً به هم نزدیک بودند و حاکی از آن بود که این مدل قادر به شبیه‌سازی میزان رطوبت خاک در منطقه ریشه گیاه پسته است و این توانایی را دارد که شرایط رطوبتی خاک را در طول دوره آبیاری و تحت شرایط رژیم‌های مختلف آبیاری و در اعماق مختلف خاک با دقت بالایی تخمین بزند. روند برآورد مدل در توزیع افقی و عمودی رطوبت نسبت به مقادیر مشاهده‌ای، حالت بیش‌برآورد داشت. ارزیابی‌های آماری نیز با توجه به شاخص‌های ضریب تبیین بین ۰/۷۶ تا ۰/۹۰ و RMSE بین ۲/۲۳ تا ۴/۰۱، حاکی از دقت خوب مدل عددی HYDRUS-2D و توانایی خوب آن در پیش‌بینی مقدار رطوبت در شرایط مزرعه‌ای بود.

با توجه به توانایی خوب مدل HYDRUS-2D در شبیه‌سازی توزیع آب خاک و نیز نقش مهم آن در تصمیم‌گیری عمق و فاصله لوله‌های قطره چکاندار طراحی و برنامه‌ریزی آبیاری و با در نظر گرفتن اهمیت سامانه قطره‌ای زیرسطحی و کارایی خوب این سامانه آبیاری در شرایط کمبود آب در مقایسه با دیگر روش‌های آبیاری، در این تحقیق با استفاده از این مدل به شبیه‌سازی تغییرات رطوبت و شوری خاک در سامانه آبیاری زیرسطحی با لوله‌های PVC در اراضی پسته‌کاری پرداخته شده است.

## روش بررسی

### منطقه مورد مطالعه

پژوهش حاضر در قطعه باغی به مساحت تقریبی دو هکتار در شهرستان انار (استان کرمان) اجرا شد. در انتخاب باغ سعی شد تا شرایط غالب باغ‌های منطقه از نظر وضعیت رشد درختان و نحوه مدیریت باغی (تغذیه، مبارزه با آفات و بیماری‌ها، هرس و ...) در نظر گرفته شود. رقم مورد مطالعه، رقم اکبری با دور آبیاری ۲۴ روز انتخاب گردید. قبل از اجرای پروژه، خصوصیات فیزیکی و

شیمیایی آب و خاک محل اجرای پژوهش مورد بررسی قرار گرفت. بر این اساس، خصوصیات شیمیایی آب قطعه آزمایشی در جدول ۱ و خصوصیات شیمیایی خاک در جدول ۲ ارائه شده است.

نکته قابل ذکر در جدول ۲ این است که معمولاً در شرایط مزرعه‌ای، تمام آب بین دو حد ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم (آب قابل دسترس)، به سهولت قابل استفاده نبوده و بسته به نوع گیاه، بین ۳۰ تا ۷۵ درصد آن می‌تواند بدون صرف انرژی، جذب گیاه شود که به آن رطوبت سهل‌الوصول (RAW) می‌گویند (علیزاده، ۱۳۹۱). بنابراین با توجه به مقاومت بالای گیاه پسته به شرایط خشکی، برای محاسبه RAW، مقدار حداکثر تخلیه مجاز رطوبتی (MAD)، معادل ۷۵ درصد در نظر گرفته شده است. برای اجرای طرح از لوله‌های زیرسطحی پی‌وی‌سی استفاده گردید. در این سامانه، آب از منبع تأمین آب آبیاری (چاه یا استخر ذخیره آب)، با استفاده از سامانه پمپاژ، در لوله‌های تحت فشار تا ابتدای قطعات باغ منتقل شده و سپس توسط شیرفلکه‌ها یا دربندهای مخصوص به داخل حوضچه تقسیم آب می‌ریزد. بنابراین در این قسمت از سامانه آبیاری، آب از حالت تحت فشار خارج می‌گردد و توسط نیروی ثقل و بر اساس شیب زمین، در داخل لوله‌های آبد به حرکت در می‌آید. در داخل هر حوضچه، لوله‌های آبد به تعداد آن‌ها بستگی به ابعاد حوضچه، قطر لوله‌های آبد و دبی سامانه آبیاری دارد، وظیفه انتقال آب به زیر خاک و محدوده ریشه درختان را بر عهده دارند. انتهای لوله‌های آبد نیز باز بوده و توسط یک زانویی به یک لوله عمودی (هواکش) متصل می‌گردد. این هواکش علاوه بر تخلیه هوای داخل لوله و سهولت جریان آب داخل آن، باعث می‌شود که جریان در لوله از حالت تحت فشار خارج‌شده و تنها در هنگامی که لوله‌ها پر از آب شوند، کمی تحت فشار قرار می‌گیرند. به همین دلیل هم به این سامانه آبیاری، کم‌فشار اطلاق می‌گردد (صداقتی و همکاران، ۱۳۹۸). شکل ۱، نمای کلی از یک سامانه آبیاری زیرسطحی کم‌فشار با لوله‌های پی‌وی‌سی را نشان می‌دهد که در آن سه ردیف

درخت با شش خط لوله و از طریق یک حوضچه، آبیاری می‌شوند.

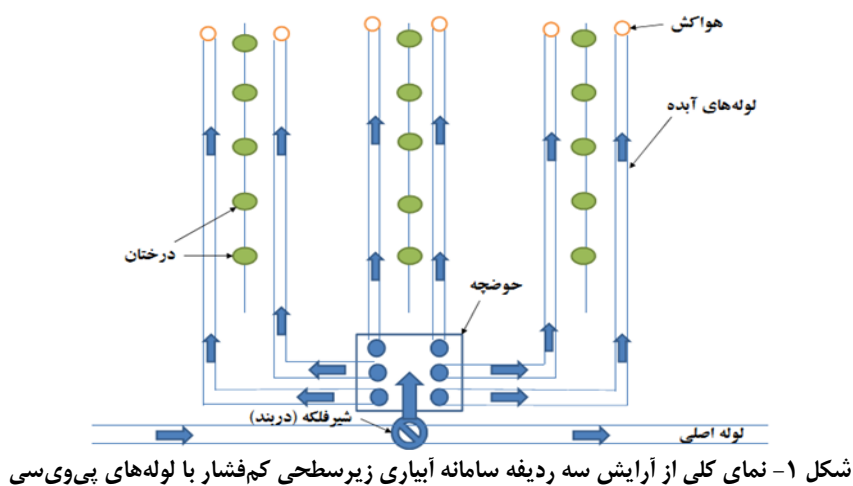
جدول ۱- نتایج تجزیه آب آبیاری مورد استفاده در آزمایش

| نسبت جذب سدیم SAR | سدیم $\text{Na}^+$ | منیزیم $\text{Mg}^{+2}$ | کلسیم $\text{Ca}^{+2}$ | کلر $\text{Cl}^-$ | بیکربنات $\text{HCO}_3^-$ | سولفات $\text{SO}_4^{-2}$ | اسیدیته pH | قابلیت هدایت الکتریکی آب آبیاری $\text{EC}_w$ (dS/m) |
|-------------------|--------------------|-------------------------|------------------------|-------------------|---------------------------|---------------------------|------------|------------------------------------------------------|
| 7.62              | 45.11              | 40.0                    | 30.0                   | 107.5             | 3.2                       | 4.3                       | 7.4        | 11.5                                                 |

جدول ۲- خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک محل اجرای پروژه در شروع آزمایش

| عمق خاک (سانتی‌متر)<br>Soil depth (cnt) |         |         | علامت اختصاری<br>Abbreviation symbol | خصوصیت خاک<br>Soil characteristics  |
|-----------------------------------------|---------|---------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| 80-120                                  | 40-80   | 0-40    |                                      |                                     |
| 8.72                                    | 4.55    | 5.12    | $\text{EC}_e$ (dS/m)                 | قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع   |
| 8.05                                    | 8.11    | 8.3     | pH                                   | اسیدیته                             |
| 31.5                                    | 9       | 12      | $\text{Ca}^{2+}$ (meq/l)             | کلسیم                               |
| 25                                      | 11      | 12.5    | $\text{Mg}^{2+}$ (meq/l)             | منیزیم                              |
| 30.5                                    | 25      | 26.5    | $\text{Na}^+$ (meq/l)                | سدیم                                |
| 5.74                                    | 7.91    | 7.57    | SAR (meq/l)0.5                       | نسبت جذبی سدیم                      |
| 320                                     | 264     | 260     | $\text{K}^+$ (mg/kg)                 | پتاسیم                              |
| 30.04                                   | 27.97   | 28.98   | P (mg/kg)                            | فسفر                                |
| 20                                      | 10      | 12      | Silt (%)                             | سیلت                                |
| 21                                      | 9       | 11      | Clay (%)                             | رس                                  |
| 59                                      | 81      | 77      | Sand (%)                             | شن                                  |
| لوم رسی شنی                             | شن لومی | لوم شنی | Soil Texture                         | بافت خاک                            |
| 1.27                                    | 1.35    | 1.3     | pb (gr/cm3)                          | وزن مخصوص ظاهری                     |
| 35                                      | 31      | 33      | FC (%)                               | رطوبت حجمی خاک در ظرفیت زراعی       |
| 11                                      | 9       | 10      | PWP (%)                              | رطوبت حجمی خاک در نقطه پژمردگی دائم |
| 24                                      | 22      | 23      | TAW (%)                              | کل رطوبت حجمی قابل استفاده خاک      |
| 18                                      | 16.5    | 17.25   | RAW (%)                              | کل رطوبت حجمی سهل الوصول خاک*       |

\*این پارامتر با در نظر گرفتن ۷۵ درصد حداکثر تخلیه مجاز رطوبتی (MAD) از کل آب قابل استفاده به‌دست آمده است



مرکز سایه‌انداز (فاصله ۱۲۰ سانتی‌متری از تنه درختان)، در دو طرف و در عمق‌های کانال مورد نظر (۴۰ و ۶۰

برای این پژوهش، لوله‌های با قطرهای ۱۱ و ۱۶ سانتی‌متر استفاده شده است. لوله‌های پی‌وی‌سی تقریباً در

سانتی‌متر) از سطح خاک کارگذاری شدند. بر روی لوله‌های پی‌وی‌سی، سوراخ‌هایی به قطرهای مورد نظر (۹ و ۱۲ میلی‌متر) به‌صورت کمی مورب در قسمت زیرین لوله و به فواصل تیمارهای آزمایشی (۱۵ و ۲۵ سانتی‌متر از یکدیگر) تعبیه شده است. در تمام تیمارها، به فاصله هر ۵۰ تا ۶۰ سانتی‌متر (بسته به فاصله سوراخ‌های مورب اصلی) یک سوراخ در کف لوله‌ها به‌منظور تخلیه کامل آب از لوله‌ها تعبیه گردید. برای کاهش خطرات انسداد سوراخ‌ها به‌وسیله ذرات خاک و نیز جلوگیری از شست‌وشوی خاک در هنگام آبیاری، یک لایه سنگریزه (با قطر ذرات ۶ تا ۱۲ میلی‌متر) به ضخامت تقریبی ۱۰ سانتی‌متر دور تا دور لوله‌ها (غیر از بالای لوله‌ها) به‌صورت فیلتر قرار گرفت. بنابراین، با توجه به ضخامت ۱۰ سانتی‌متری فیلتر، عمق نصب لوله‌ها ۳۰ و ۵۰ سانتی‌متر بود (شکل ۲). حجم آبیاری برای همه تیمارها ثابت در نظر گرفته شد و بر اساس دبی آب خروجی از چاه و وسعت کرت محاسبه گردید. طول لوله ۵۰ و شیب منطقه ۰/۱ درصد بوده و عرض کانال برای همه تیمارها برابر با ۳۵ سانتی‌متر بوده است.

از آنجاکه بر اساس سامانه نیاز آبی مؤسسه تحقیقات خاک و آب کشور، نیاز خالص آبیاری درختان پسته در روش آبیاری غرقابی در شهرستان انار، ۵۱۱۲ مترمکعب در هکتار در طول هشت ماه فصل رشد است. برای انجام آبیاری بر اساس این حجم آب، ابتدا با توجه به تعداد نوبت آبیاری در طول فصل رشد (۱۰ نوبت)، حجم آب آبیاری در هر نوبت در هکتار (۵۰۰ مترمکعب) تعیین گردید. سپس با توجه به سطح آبیاری مربوط به هر حوضچه، حجم آب مورد نیاز در هر نوبت آبیاری برای یک حوضچه مشخص شد. در نهایت نیز با توجه به حجم آب مورد نیاز و دبی آب ورودی به هر حوضچه، مدت زمان آبیاری هر حوضچه در هر نوبت آبیاری، مشخص گردید و بر این اساس تخصیص آب به کرت‌ها انجام گرفت. لازم به ذکر است که آبتوی زمستانه در دو نوبت آبیاری و با حجم تقریبی ۱۵۰۰ مترمکعب در هکتار در هر نوبت آبیاری (در مجموع ۳۰۰۰ مترمکعب در هکتار در زمستان) انجام گردید.



شکل ۲- نحوه اجرا و کارگذاری لوله‌ها در مزرعه

در مجموع، این پژوهش شامل ۱۶ تیمار آزمایشی شد که مشخصات هر تیمار در جدول ۳ آمده است. برای بررسی اثر پارامترهای طراحی سامانه بر وضعیت توزیع رطوبت در خاک، اندازه‌گیری رطوبت خاک با انجام نمونه‌برداری در اعماق مختلف خاک (عمق‌های صفر، ۴۰، ۸۰ و ۱۲۰ سانتی‌متر) و نیز فواصل مختلف نسبت به درخت شامل کنار درخت (فاصله صفر)، محل استقرار خط لوله

(فاصله ۱۲۰ سانتی‌متری از ردیف درختان) و کنار پشته بین ردیف‌های درختان (فاصله ۲۴۰ سانتی‌متری از ردیف درختان) انجام شده است. در خصوص شوری خاک نیز نمونه‌برداری در عمق‌های مزبور در دو زمان مهرماه (قبل از آبتوی زمستانه) و اسفندماه (بعد از آبتوی زمستانه) انجام شده است.

جدول ۳- مشخصات تیمارهای آبیاری زیرسطحی بر اساس پارامترهای طراحی چهارگانه در نظر گرفته شده برای پژوهش

| سطح هر فاکتور<br>Level of each factor                                          |                                                                    |                                           |                                             | تیمار آبیاری<br>Irrigation treatment |
|--------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------|
| فاصله سوراخ‌های روی لوله (میلی‌متر)<br>Distance between holes on the pipe (mm) | قطر سوراخ روی لوله (میلی‌متر)<br>Diameter of hole on the pipe (mm) | قطر لوله (میلی‌متر)<br>Pipe diameter (mm) | عمق کانال (سانتی‌متر)<br>Channel depth (cm) |                                      |
| 15                                                                             | 12                                                                 | 160                                       | 40                                          | T <sub>1</sub>                       |
| 25                                                                             | 12                                                                 | 160                                       | 40                                          | T <sub>2</sub>                       |
| 15                                                                             | 9                                                                  | 160                                       | 40                                          | T <sub>3</sub>                       |
| 25                                                                             | 9                                                                  | 160                                       | 40                                          | T <sub>4</sub>                       |
| 15                                                                             | 12                                                                 | 110                                       | 40                                          | T <sub>5</sub>                       |
| 25                                                                             | 12                                                                 | 110                                       | 40                                          | T <sub>6</sub>                       |
| 15                                                                             | 9                                                                  | 110                                       | 40                                          | T <sub>7</sub>                       |
| 25                                                                             | 9                                                                  | 110                                       | 40                                          | T <sub>8</sub>                       |
| 15                                                                             | 12                                                                 | 160                                       | 60                                          | T <sub>9</sub>                       |
| 25                                                                             | 12                                                                 | 160                                       | 60                                          | T <sub>10</sub>                      |
| 15                                                                             | 9                                                                  | 160                                       | 60                                          | T <sub>11</sub>                      |
| 25                                                                             | 9                                                                  | 160                                       | 60                                          | T <sub>12</sub>                      |
| 15                                                                             | 12                                                                 | 110                                       | 60                                          | T <sub>13</sub>                      |
| 25                                                                             | 12                                                                 | 110                                       | 60                                          | T <sub>14</sub>                      |
| 15                                                                             | 9                                                                  | 110                                       | 60                                          | T <sub>15</sub>                      |
| 25                                                                             | 9                                                                  | 110                                       | 60                                          | T <sub>16</sub>                      |

#### مدل HYDRUS-2D

HYDRUS مدلی تحت ویندوز، برای شبیه‌سازی حرکت آب، گرما و املاح، جذب آب توسط ریشه و همچنین رشد ریشه در محیط‌های متخلخل دوبعدی و سه بعدی است. این نرم‌افزار برای شبیه‌سازی جریان در محیط های اشباع از معادله‌های ریچاردز و برای شبیه‌سازی انتقال املاح و گرما از معادله‌های انتقال- انتشار استفاده می‌کند (سیمونک و همکاران، ۲۰۱۱). یکی از ویژگی‌های این مدل، تخمین پارامترهای هیدرولیکی خاک و انتقال املاح به روش حل معکوس است. این مدل برای حل عددی معادله‌های حاکم از روش اجزای محدود خطی نوع گالرکین (Galerkin) و برای بهینه‌سازی پارامترها از روش لونبرگ-مارکوارت (Levenberg-Marquardt) استفاده می‌کند. پارامترهای هیدرولیکی خاک توسط مدل Rosetta (مدل داخلی HYDRUS) و بر اساس شبکه عصبی مصنوعی کار می‌کند، تعیین می‌شوند. به دیگر سخن، با وارد کردن داده‌های بافت خاک، درصد دانه‌بندی خاک، درصد رطوبت خاک در حد ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم، پارامترهای هیدرولیکی خاک از طریق مدل اخیر برآورد می‌شوند. لازم به ذکر است که در اختیار داشتن مقدار عددی

این پارامترها برای اجرای مدل HYDRUS-2D ضروری

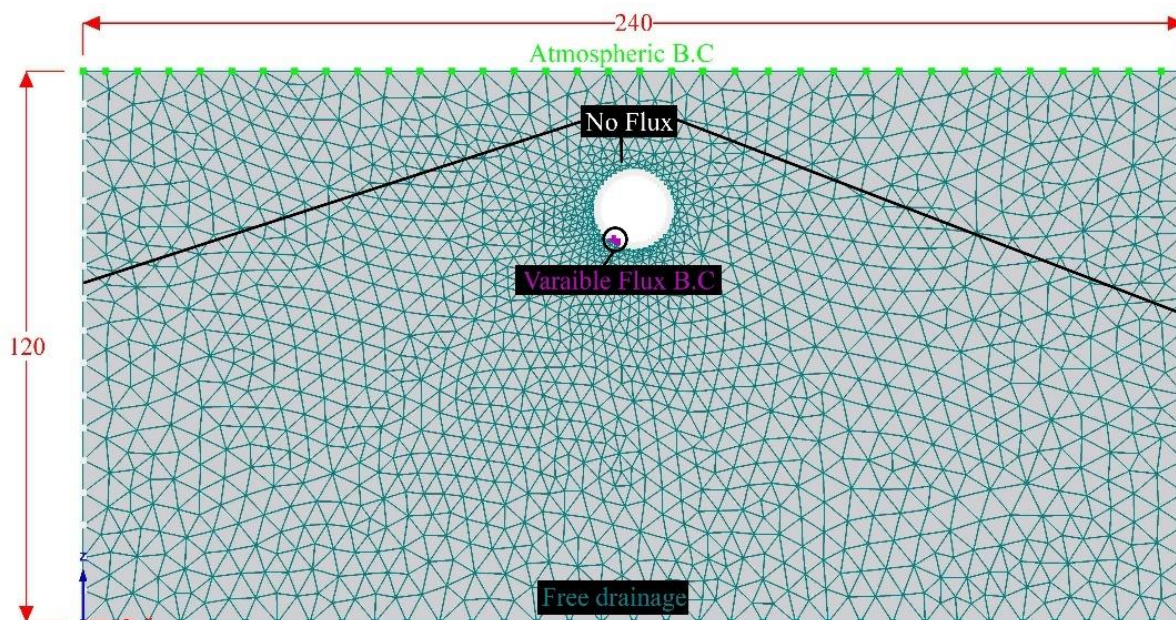
است (میرزایی و ناظمی، ۱۳۹۰).

حل معکوس این مدل در بسیاری از مطالعه‌های مزرعه‌ای و آزمایشگاهی برای بهینه‌سازی و تخمین پارامترها به کار رفته و نتایج آن نسبتاً رضایت‌بخش بوده است (برونتی و همکاران، ۲۰۱۶؛ برونتی و همکاران، ۲۰۱۸؛ اوتوینو و همکاران، ۲۰۱۸). جوزی و همکاران (۱۴۰۰) به منظور شبیه‌سازی پروفیل رطوبتی خاک در آبیاری قطره‌ای با استفاده از مدل HYDRUS-2D توزیع رطوبت خاک تا ۷۲ ساعت پس از آبیاری را با سه روش حل معکوس با داده‌های منحنی مشخصه رطوبتی، حل معکوس با داده‌های رطوبت خاک پس از آبیاری و Rosetta مدل‌سازی کرده و مشاهده نمودند که روش اول از دقت بیشتری در برآورد داده‌ها برخوردار است.

برای حل معادلات دیفرانسیل با مشتق جزئی که معادله ریچارد و انتقال انتشار از آن حیث می‌باشند، نیاز به شرایط مرزی و اولیه است. شرط مرزی با توجه به شرایط واقعی آزمایش شده باید تعریف شود. با توجه به شرایط انجام آزمایش که تشریح گردید، مرز بالا به دلیل تبخیر و تعریق از سطح خاک شرط مرزی اتمسفر یک انتخاب شد

سیستم زیرسطحی کم‌فشار است طول شکاف‌های هر تیمار به‌عنوان مرز ورودی جریان آب در نظر گرفته شد که در مدل HYDRUS به‌صورت شار متغیر معرفی گردید. شرایط مرزی جریان آب برای یکی از تیمارها در شکل ۳ قابل مشاهده است.

که معادل شرط مرزی نوع سوم به‌دلیل مشخص بودن نرخ تبخیر یا بارش است. در سمت راست و چپ هندسه جریان، مرز بدون جریان در نظر گرفته شد و مرز پایین به‌دلیل حرکت آزادانه آب به‌صورت زهکشی آزاد اعمال گردید. با توجه به ماهیت آزمایش که آبیاری به‌وسیله



شکل ۳- شرایط مرزی جریان آب اعمال‌شده در تیمار اول

که در آن‌ها:  $\bar{p}$ ,  $\bar{O}$ ,  $\bar{O}$ ,  $\bar{p}$  و  $i$  به‌ترتیب مقادیر برآورد شده، متوسط مقادیر برآورد شده، مقادیر اندازه‌گیری‌شده، متوسط مقادیر اندازه‌گیری‌شده، تعداد داده‌ها و شماره هر یک از داده‌ها است. هرچه میزان شاخص RMSE به صفر نزدیک‌تر باشد، مبین این مطلب است که مدل در پیش‌بینی داده‌های مورد نظر موفق‌تر بوده است و این دو شاخص نشان‌دهنده دقت مدل در پیش‌بینی داده‌ها هستند. چنانچه مقدار شاخص NRMSE کمتر از ۱۰ درصد باشد نشان دهنده پیش‌بینی عالی مدل است و چنانچه این شاخص بین ۱۰ تا ۲۰ درصد باشد نشان‌دهنده پیش‌بینی خوب مدل و در صورتی که مقدار آن بین ۲۰ تا ۳۰ درصد باشد نشان از عملکرد متوسط مدل دارد. مقادیر بیشتر از ۳۰ درصد نشان دهنده شبیه‌سازی ضعیف مدل است (جمیسون و همکاران، ۱۹۹۱؛ بنایان و هوگنبوم، ۲۰۰۹).

#### ارزیابی مدل

ارزیابی مدل با مقایسه نتایج حاصل از مدل و داده‌های مشاهداتی صورت گرفت. برای مقایسه بین داده‌ها، از میانگین خطا (ME)، ضریب تبیین ( $R^2$ )، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) استفاده شده است (روابط ۱ تا ۴).

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

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

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2} \quad (3)$$

$$NRMSE\% = \frac{RMSE \times 100}{\bar{O}} \quad (4)$$

## یافته‌ها

در این بخش، ابتدا نتایج حاصل از واسنجی و صحت‌سنجی مدل HYDRUS-2D برای شبیه‌سازی توزیع رطوبت و شوری در سامانه آبیاری زیرسطحی کم‌فشار مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس نتایج الگوی توزیع رطوبت و شوری در این سامانه‌ها به وسیله خروجی مدل HYDRUS-2D ارائه می‌شود.

## شبیه‌سازی هیدرولیکی

شبیه‌سازی هیدرولیکی شامل یافتن ضرایب ثابت منحنی مشخصه خاک و سپس مقایسه بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده است.

## حدس اولیه ضرایب برای حل معکوس

برای حل معکوس و یافتن ضرایب ثابت (شامل رطوبت اشباع  $(\theta_s)$ ، رطوبت باقی‌مانده  $(\theta_r)$ ، هدایت هیدرولیکی اشباع  $(K_s)$ ،  $n$  و  $\alpha$  در معادله ون‌گنوختن) نیاز به فرض اولیه برای بهینه‌سازی است که از مدل Rosetta استفاده شد که نرم‌افزار HYDRUS-2D با مدل Rosetta Lite به صورت دینامیک مرتبط شده است. برای این منظور، مقادیر شن، رس و سیلت (برحسب درصد) و مقدار رطوبت ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم (جدول ۲) به نرم‌افزار Rosetta داده شده و مقدار اولیه ضرایب (جدول ۴) به دست آمد. پس از یافتن فرض اولیه برای ضرایب ثابت، ابتدا مدل با استفاده از داده‌های برداشت‌شده قبل و بعد از آبیاری واسنجی و صحت‌سنجی شده و سپس مدل شوری و رطوبت ارزیابی شده است.

جدول ۴- مقادیر ثابت اندازه‌گیری شده

| پارامتر | رطوبت اشباع                                    | ضرایب ثابت معادله ون‌گنوختن | رطوبت باقی‌مانده                 | هدایت هیدرولیکی اشباع                      |
|---------|------------------------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|--------------------------------------------|
|         | $\theta_s$<br>( $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ ) | $n$<br>(-)                  | $\alpha$<br>( $\text{cm}^{-1}$ ) | $K_s$<br>( $\text{cm}^3.\text{day}^{-1}$ ) |
| مقدار   | 0.433                                          | 1.6011                      | 0.0037                           | 1.45                                       |

## واسنجی و صحت‌سنجی مدل

به دلیل این که تعداد داده‌های برداشت‌شده یک تیمار برای واسنجی و صحت‌سنجی کافی نبود، لذا واسنجی با یک تیمار و صحت‌سنجی با تیمار مشابه با آن انجام شده است. بدین صورت که با تیمارهایی که فاصله شکاف روی لوله ۱۵ سانتی‌متر بوده واسنجی و با تیمارهایی که فاصله شکاف روی لوله ۲۵ سانتی‌متر بود، صحت‌سنجی انجام شده است. در جدول ۵، ضرایب واسنجی شده به همراه شاخص‌های ارزیابی در مرحله واسنجی برای تیمارهای مختلف آورده شده است. مقدار ضریب  $R^2$  در همه تیمارهای واسنجی بیشتر از ۰/۹۱ است که نشان از

همبستگی مناسب مقادیر شبیه‌سازی شده با اندازه‌گیری شده دارد. همچنین، بیشترین مقدار ضریب NRMSE برابر با ۲۱/۸۲ درصد محاسبه شد که در محدوده شبیه‌سازی قابل قبول قرار می‌گیرد (جمیسون و همکاران، ۱۹۹۱). با توجه به شاخص NRMSE بهترین عملکرد مدل در شبیه‌سازی رطوبت در مرحله واسنجی مربوط به تیمار T<sub>9</sub> (قطر لوله ۱۶ سانتی‌متر، طول شکاف ۱۲ میلی‌متر، عمق کانال ۶۰ سانتی‌متر و فاصله شکاف روی لوله ۱۵ سانتی‌متر) با NRMSE برابر با ۱۱/۰۱ درصد به دست آمد. مقادیر مثبت شاخص ME نشان‌دهنده بیش برآورد و مقادیر منفی نشان‌دهنده کم برآورد است. با توجه به جدول ۵، مقادیر ناچیزی بیش برآورد در مدل به دست آمد.

جدول ۵- پارامترهای هیدرولیکی بهینه‌شده و شاخص‌های ارزیابی در تیمارهای مختلف

| شاخص‌های آماری<br>Statistical indices |                                      |                                      |                | پارامترهای هیدرولیکی بهینه‌شده<br>Optimized hydraulic parameters |                             |                     |                                      |                                      | تیمار           |
|---------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|----------------|------------------------------------------------------------------|-----------------------------|---------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-----------------|
| NRMSE                                 | RMSE                                 | ME                                   | R <sup>2</sup> | K <sub>s</sub>                                                   | n                           | $\alpha$            | $\theta_s$                           | $\theta_r$                           |                 |
| ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده    | ریشه میانگین مربعات خطا              | میانگین خطا                          | ضریب تبیین     | هدایت هیدرولیکی اشباع                                            | ضرایب ثابت معادله ون گنوختن | رطوبت اشباع         | رطوبت باقی‌مانده                     |                                      |                 |
| %                                     | (cm <sup>3</sup> .cm <sup>-3</sup> ) | (cm <sup>3</sup> .cm <sup>-3</sup> ) |                | (cm.day <sup>-1</sup> )                                          | (-)                         | (cm <sup>-1</sup> ) | (cm <sup>3</sup> .cm <sup>-3</sup> ) | (cm <sup>3</sup> .cm <sup>-3</sup> ) |                 |
| 14.75                                 | 0.03                                 | 0.000                                | 0.93           | 3.29                                                             | 2.54                        | 0.003               | 0.49                                 | 0.02                                 | T <sub>1</sub>  |
| 12.64                                 | 0.03                                 | 0.004                                | 0.96           | 4.35                                                             | 2.58                        | 0.005               | 0.58                                 | 0.062                                | T <sub>3</sub>  |
| 19.34                                 | 0.04                                 | 0.004                                | 0.94           | 1.34                                                             | 0.02                        | 0.005               | 0.46                                 | 89E-06                               | T <sub>5</sub>  |
| 21.82                                 | 0.03                                 | 0.023                                | 0.91           | 1.95                                                             | 1.79                        | 0.004               | 0.41                                 | 7.7E-05                              | T <sub>7</sub>  |
| 11.01                                 | 0.03                                 | 0.001                                | 0.95           | 2.73                                                             | 2.80                        | 0.004               | 0.61                                 | 0.024                                | T <sub>9</sub>  |
| 16.93                                 | 0.03                                 | 0.017                                | 0.94           | 0.71                                                             | 2.36                        | 0.004               | 0.41                                 | 0.0005                               | T <sub>11</sub> |
| 18.32                                 | 0.04                                 | 0.001                                | 0.92           | 2.67                                                             | 2.26                        | 0.004               | 0.53                                 | 0.0001                               | T <sub>13</sub> |
| 13.79                                 | 0.03                                 | 0.014                                | 0.92           | 1.81                                                             | 1.71                        | 0.004               | 0.42                                 | 0.00009                              | T <sub>15</sub> |

شد و در غالب تیمارها مقدار NRMSE در محدوده ۱۰ تا ۲۰ درصد بوده که نتایج خوبی را نشان می‌دهد (بنیان و هوگنبوم، ۲۰۰۹). از آنجاکه آزمایش‌ها در شرایط طبیعی باغ و تحت آبیاری قطره‌ای زیرسطحی انجام گرفته و نه در شرایط کنترل شده، مقادیر NRMSE قابل قبول است (جمیسون و همکاران، ۱۹۹۱).

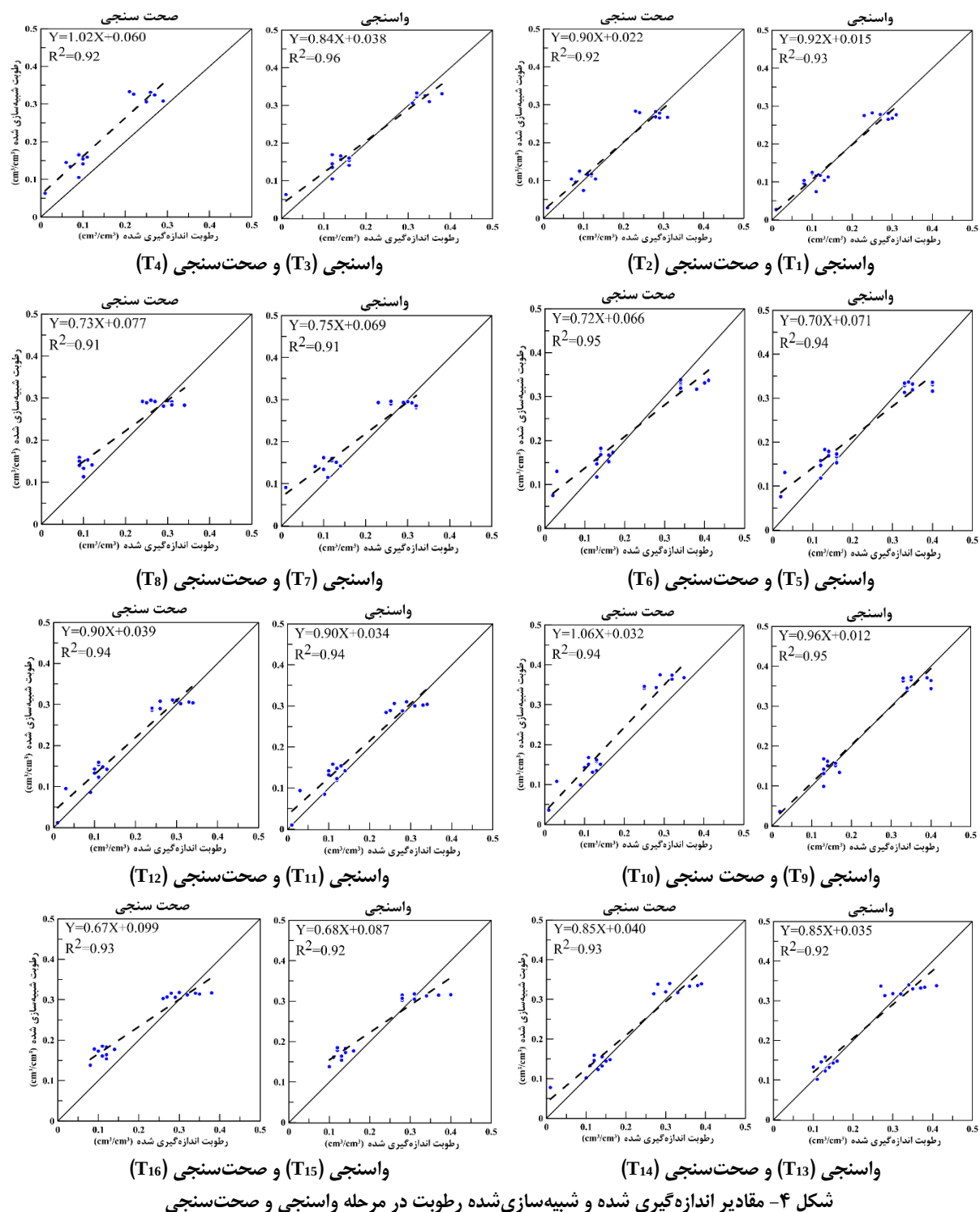
پس از انجام واسنجی برای اطمینان از درستی پارامترهای بهینه‌شده و نتایج مدل، اقدام به صحت‌سنجی مدل گردید. برای این منظور، ضرایب هیدرولیکی به‌دست آمده از مرحله قبل در مدل HYDRUS وارد شده و مدل با شرایط تیمار دیگر مقایسه می‌گردد. در جدول ۶، نتایج شاخص‌های ارزیابی مرحله صحت‌سنجی آورده شده است. بیشترین مقدار NRMSE برابر با ۲۷/۷۰ درصد محاسبه

جدول ۶- شاخص‌های ارزیابی مرحله صحت‌سنجی

| T <sub>16</sub> | T <sub>14</sub> | T <sub>12</sub> | T <sub>10</sub> | T <sub>8</sub> | T <sub>6</sub> | T <sub>4</sub> | T <sub>2</sub> | شاخص‌های ارزیابی                          |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------------------------------------------|
| 0.93            | 0.93            | 0.94            | 0.94            | 0.91           | 0.94           | 0.92           | 0.92           |                                           |
| 0.05            | 0.03            | 0.03            | 0.05            | 0.04           | 0.04           | 0.03           | 0.03           |                                           |
| 23.6            | 15.1            | 18.8            | 27.7            | 21.8           | 17.9           | 25.6           | 16.2           |                                           |
| 0.030           | 0.007           | 0.022           | 0.043           | 0.024          | 0.001          | 0.062          | 0.01           | شاخص‌های ارزیابی                          |
|                 |                 |                 |                 |                |                |                |                | R <sup>2</sup>                            |
|                 |                 |                 |                 |                |                |                |                | RMSE (cm <sup>3</sup> .cm <sup>-3</sup> ) |
|                 |                 |                 |                 |                |                |                |                | NRMSE (%)                                 |
|                 |                 |                 |                 |                |                |                |                | ME (cm <sup>3</sup> .cm <sup>-3</sup> )   |

۲۰۲۳). این موضوع در تحقیقات تافته و امداد (۱۴۰۳) در سامانه آبیاری قطره‌ای سطحی نیز گزارش شده است. در بررسی ایشان، به‌طور متوسط، NRMSE شوری خاک در باغ‌های منتخب حدود ۱۸ درصد، شاخص توافق ۹۴ درصد و بازده مدل ۷۸ درصد بود که نشان‌دهنده کارایی مدل HYDRUS-2D برای شبیه‌سازی شوری خاک است.

نمودارهای یک‌به‌یک مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده رطوبت در شکل ۴ در دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی آورده شده است. با توجه به شکل‌ها، مقادیر شبیه‌سازی شده رطوبت همبستگی خوبی با مقادیر اندازه‌گیری شده دارد. به‌طور کلی می‌توان بیان کرد که مدل HYDRUS توانایی شبیه‌سازی رطوبت را در سامانه آبیاری زیرسطحی کم‌فشار دارد (موریانو و همکاران،



### شبیه‌سازی حرکت آب و املاح

شبیه‌سازی شوری شامل یافتن ضرایب ثابت مؤثر در حرکت املاح شامل، ضرایب انتشارپذیری طولی و عرضی است. والتسنجی شبیه‌سازی حرکت آب و املاح هم به‌طور هم‌زمان و هم به‌طور جداگانه انجام می‌شود. حسن تخمین هم‌زمان پارامترهای شوری و حرکت آب در این

است که تأثیر متقابل آن‌ها روی هم دیده‌شده و از معایب آن نیز این است که تعداد محدودی از پارامترهای هیدرولیکی و انتقال املاح باید انتخاب شوند (عباسی، ۱۳۹۴). در این پژوهش، ابتدا پارامترهای هیدرولیکی بهینه شدند و سپس با استفاده از داده‌های شوری که در فصل زمستان قبل و بعد از آبیاری برداشت شده بودند، مدل

که در این معادله  $EC_w$ ، قابلیت هدایت الکتریکی محلول خاک،  $\theta_s$ ، رطوبت اشباع،  $EC_e$ ، قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع و  $\theta$  رطوبت خاک است.

با توجه به اینکه داده‌برداری شوری در فصل غیر از زمان آبیاری انجام شده بود، بعد از اطمینان از نتایج مدل هیدرولیکی، مدل برای شرایط زمان داده‌برداری شوری (فصل‌های پاییز و زمستان)، اجرا شد و مقادیر رطوبت در زمان و نقاط داده‌برداری شوری از مدل استخراج گردیده و در رابطه فوق قرار داده شد. مقدار فرض اولیه برای ضرایب انتشارپذیری طولی و عرضی به ترتیب ۱۰ درصد طول مسیر و ۱۰ درصد انتشارپذیری طولی است (عباسی، ۱۳۹۴). لذا مقدار ضریب انتشارپذیری طولی (DL) برابر با ۲۴ سانتی‌متر و ضریب انتشارپذیری عرضی (DT) برابر ۲/۴ سانتی‌متر لحاظ گردید. در جدول ۷، مقادیر پارامترهای بهینه‌شده به همراه شاخص‌های ارزیابی در مرحله واسنجی آورده شده است. کمترین مقدار ضریب خطای به‌دست آمده (NRMSE) برابر با ۲/۴۸ درصد است که در محدوده

شبیه‌سازی خیلی خوب قرار می‌گیرد.

جدول ۷- پارامترهای بهینه‌شده انتقال املاح و نتایج شاخص‌های ارزیابی

| شاخص‌های آماری<br>Statistical indicators |              |                               |                | پارامترهای انتقال املاح بهینه‌شده<br>Optimized solute transport parameters |                                    | تیمار           |
|------------------------------------------|--------------|-------------------------------|----------------|----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|-----------------|
| ME<br>(dS.m <sup>-1</sup> )              | NRMSE<br>(%) | RMSE<br>(dS.m <sup>-1</sup> ) | R <sup>2</sup> | ضریب انتشارپذیری عرضی (Dr)<br>(cm)                                         | ضریب انتشارپذیری طولی (DL)<br>(cm) |                 |
| 0.02                                     | 9.25         | 1.28                          | 0.88           | 0.73                                                                       | 16.13                              | T <sub>1</sub>  |
| 0.08                                     | 2.48         | 0.33                          | 0.97           | 0.02                                                                       | 44.69                              | T <sub>5</sub>  |
| -0.39                                    | 9.63         | 1.36                          | 0.68           | 5.00                                                                       | 28.42                              | T <sub>9</sub>  |
| -0.09                                    | 2.75         | 0.38                          | .97            | 4.26                                                                       | 33.87                              | T <sub>13</sub> |

است. با توجه به شاخص‌های ارزیابی، مدل HYDRUS توانایی شبیه‌سازی شوری در سامانه آبیاری کم‌فشار زیرسطحی را دارد و می‌توان به نتایج حاصل از آن اعتماد نمود.

به‌صورت معکوس شده و پارامترهای ثابت انتقال املاح به‌دست آمدند. به‌دلیل این‌که داده‌های شوری در فصل زمستان برداشت‌شده بود و آبشویی به‌صورت غرقابی و سطحی انجام‌شده بود، لذا تیمارهای مورد استفاده برای واسنجی و صحت‌سنجی با توجه به قطر لوله و عمق کانال انتخاب شدند. به‌طوری‌که با تیمارهای  $T_1$ ،  $T_5$ ،  $T_9$  و  $T_{13}$  واسنجی انجام‌شده و با تیمارهای بعدی هر تیمار واسنجی، صحت‌سنجی انجام شده است. دلیل این امر جلوگیری از پیچیدگی مدل و مقایسه با تعداد داده‌های بیشتر بوده تا عدم قطعیت کاهش یابد. از آنجاکه مدل HYDRUS برای ارزیابی به شوری محلول خاک نیاز دارد، با توجه به اینکه داده‌های شوری گزارش شده به‌صورت عصاره اشباع بود، با استفاده از رابطه (۵) به شوری محلول خاک تبدیل شد (عطایی و همکاران، ۱۳۹۹؛ سیمپونک و همکاران، ۲۰۱۲).

$$EC_w = \frac{\theta_s EC_e}{\theta} \quad (5)$$

مشابه با مدل هیدرولیکی ساخته‌شده، پس از واسنجی مدل شوری، ضرایب به‌دست آمده در تیمارهای دیگر قرار گرفته و صحت‌سنجی مدل انجام شد. نتایج ارزیابی مدل در مرحله صحت‌سنجی در جدول ۸ ارائه شده

جدول ۸- شاخص‌های ارزیابی در مرحله صحت‌سنجی

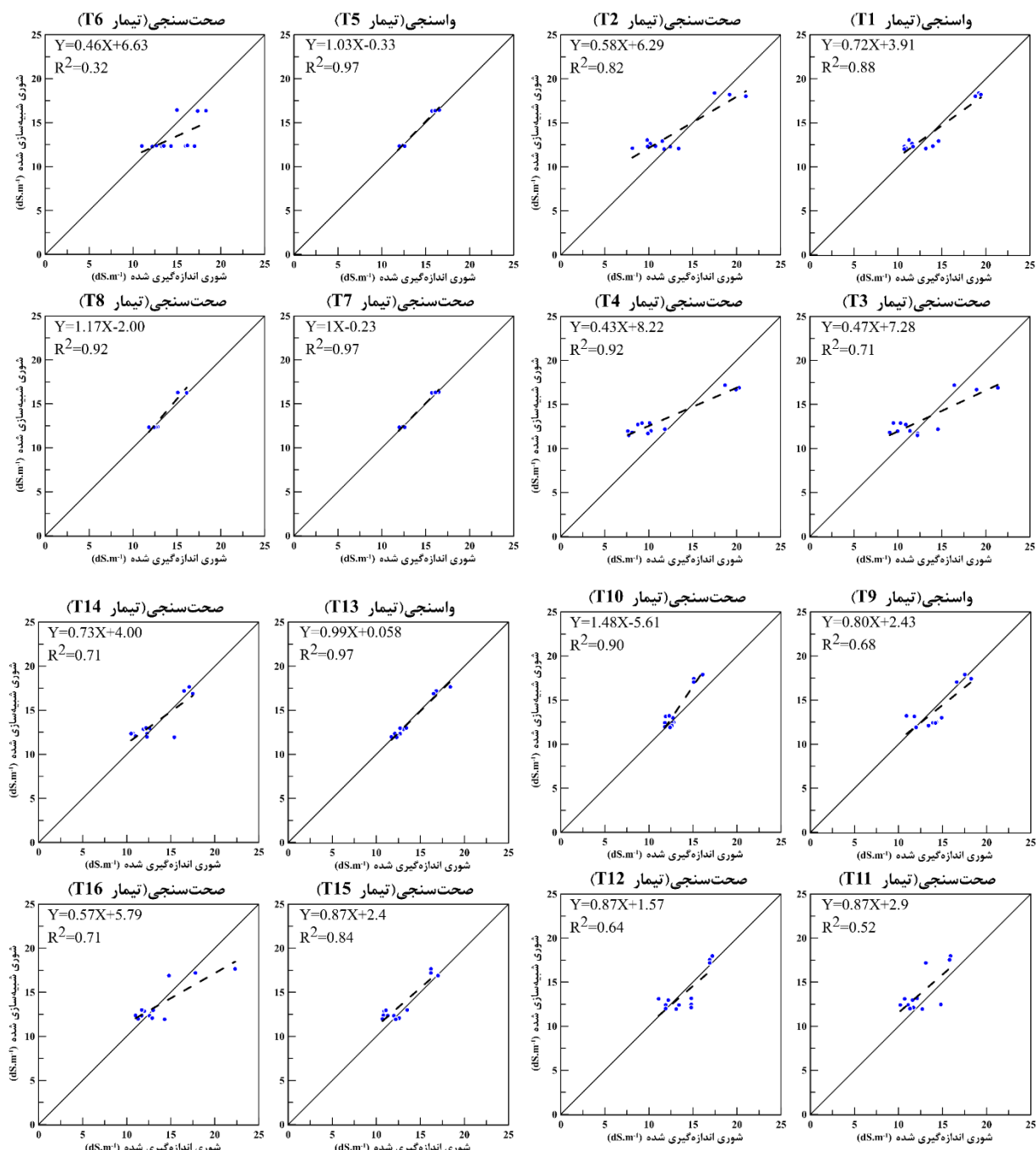
| شاخص‌های آماری<br>Statistical indicators |              |                               |                | تیمار           |
|------------------------------------------|--------------|-------------------------------|----------------|-----------------|
| ME<br>(dS.m <sup>-1</sup> )              | NRMSE<br>(%) | RMSE<br>(dS.m <sup>-1</sup> ) | R <sup>2</sup> |                 |
| 0.89                                     | 16.55        | 2.15                          | 0.81           | T <sub>2</sub>  |
| 0.30                                     | 17.91        | 2.34                          | 0.71           | T <sub>3</sub>  |
| 1.50                                     | 25.96        | 3.08                          | 0.92           | T <sub>4</sub>  |
| -1.39                                    | 15.77        | 2.32                          | 0.32           | T <sub>6</sub>  |
| 0.04                                     | 2.36         | 0.31                          | 0.97           | T <sub>7</sub>  |
| 0.22                                     | 4.53         | 0.59                          | 0.92           | T <sub>8</sub>  |
| 0.65                                     | 8.81         | 1.15                          | 0.90           | T <sub>10</sub> |
| 0.19                                     | 15.58        | 1.96                          | 0.52           | T <sub>11</sub> |
| 0.31                                     | 9.97         | 1.4                           | 0.64           | T <sub>12</sub> |
| 0.30                                     | 1.23         | 1.36                          | 0.71           | T <sub>14</sub> |
| 0.76                                     | 9.06         | 1.17                          | 0.84           | T <sub>15</sub> |
| -0.15                                    | 12.89        | 1.78                          | 0.71           | T <sub>16</sub> |

#### بررسی الگوی توزیع شوری و رطوبت

پس از اطمینان از ارزیابی مدل HYDRUS در شبیه‌سازی رطوبت و شوری برای سامانه آبیاری زیرسطحی با لوله‌های PVC سوراخ‌دار، خروجی‌های مد نظر از مدل دریافت شد. در شکل ۶، توزیع شوری در تیمارهای آبیاری T<sub>1</sub> تا T<sub>16</sub> ارائه شده است. برای تولید این شکل‌ها، فاصله زمانی بین یک رویداد آبیاری تا قبل از شروع رویداد آبیاری بعدی شبیه‌سازی شده است. شکل بالایی نشان‌دهنده توزیع غلظت خاک در زمان اتمام آبیاری و شکل پایینی نشان‌دهنده توزیع غلظت خاک در ۲۴ روز بعد و قبل از شروع آبیاری بعدی است. غلظت نمایش داده شده در این شکل‌ها غلظت محلول خاک است. لذا قبل از شروع آبیاری بعدی، به دلیل تبخیر از سطح خاک و جذب آب توسط ریشه، در حوالی ریشه گیاه که جذب آب بیشینه است، غلظت افزایش یافته است.

نمودارهای یک به یک مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شوری در شکل ۵ در دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی آورده شده است. با توجه به شکل‌ها، مقادیر شبیه‌سازی‌شده شوری همبستگی نسبتاً خوبی با مقادیر اندازه‌گیری شده دارند.

به‌طورکلی، در ارزیابی مدل هیدرولیکی بهترین نتیجه مربوط به تیمار T<sub>9</sub> (قطر لوله ۱۶۰ میلی‌متر، قطر سوراخ ۱۲ میلی‌متر، عمق کانال ۶۰ سانتی‌متر و فاصله سوراخ ۱۵ سانتی‌متر روی لوله) با NRMSE برابر ۱۱/۰۱ درصد بود. همچنین در ارزیابی مدل شوری، بهترین عملکرد مدل مربوط به تیمار T<sub>7</sub> (قطر لوله ۱۱۰ سانتی‌متر، قطر سوراخ ۹ میلی‌متر، عمق کانال ۴۰ سانتی‌متر و فاصله سوراخ ۱۵ سانتی‌متر روی لوله) با NRMSE برابر ۲/۳۷ درصد به‌دست آمد.



شکل ۵- مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده شوری

۱۲ میلی‌متر به نه میلی‌متر (افزایش فلاکس ورودی) ناحیه دارای غلظت ۲۰-۱۵ دسی‌زیمنس بر متر، به سمت سطح خاک حرکت کرده و شوری و غلظت نیم‌رخ خاک کاهش پیدا کرده است.

بین تیمارهای T<sub>5</sub> تا T<sub>8</sub> که قطر لوله و عمق یکسانی دارند، فلاکس ورودی از زیاد به کم به‌ترتیب مربوط به تیمارهای T<sub>5</sub>، T<sub>7</sub>، T<sub>6</sub> و T<sub>8</sub> است. با افزایش

بررسی الگوی توزیع شوری در سامانه آبیاری زیرسطحی با لوله‌های PVC سوراخ‌دار پس از اطمینان به مقدار فاصله بین سوراخ‌ها و قطر سوراخ‌ها تأثیر مستقیم بر فلاکس ورودی دارد و در نتیجه بر توزیع غلظت در خاک نیز تأثیر مستقیم دارد. در تیمارهای T<sub>1</sub> تا T<sub>4</sub> عمق کارگذاری یکسان است. با مقایسه توزیع غلظت در این چهار تیمار، مشخص می‌شود که با کاهش قطر سوراخ‌ها از

فلاکس ورودی، مقدار نمک ورودی به خاک افزایش می‌یابد. از طرفی افزایش فلاکس ورودی باعث می‌شود که املاح به سمت پایین نیم‌رخ خاک حرکت کنند. لذا افزایش فلاکس ورودی و مقدار نمک تأثیر دوگانه بر توزیع شوری در نیم‌رخ خاک دارد. در تیمار T7 ناحیه شوری ۱۵-۲۰ دسی‌زیمنس بر متر در انتهای دوره شبیه‌سازی از نظر عمودی و افقی توسعه کمتری پیدا کرده است. لذا بین چهار تیمار مذکور مقدار نمک در نیم‌رخ خاک کمتر است.

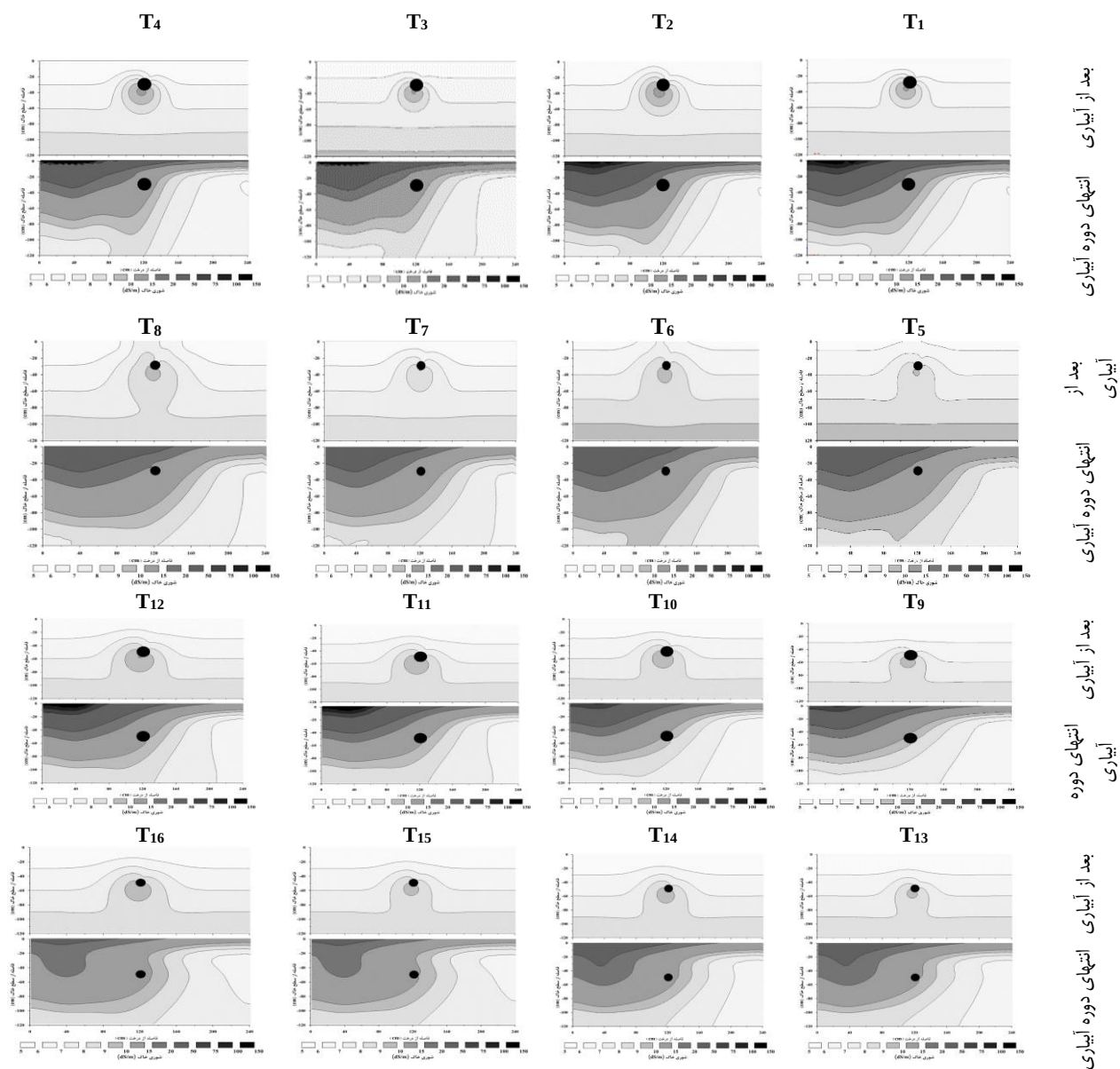
در تیمارهای بعدی (T9 تا T16) عمق کانال از ۴۰ سانتی‌متر به ۶۰ سانتی‌متر افزایش می‌یابد که باعث تغییر در الگوی توزیع شوری می‌گردد. بارزترین تفاوت بین تیمارهای T9 تا T16 با تیمارهای T1 تا T8 این است که در هشت تیمار سری دوم، بعد از اتمام آبیاری، نمک ورودی بر سطح خاک تأثیر نگذاشته و شوری سطح خاک افزایش نیافته است. در صورتی که در هشت تیمار اول، جبهه شوری بر غلظت سطح خاک تأثیر گذاشته است. غلظت سطحی خاک در اطراف درخت در تیمارهای T11 و T12 از دو تیمار T9 و T10 بیشتر شده است که به دلیل افزایش فلاکس ورودی است. همچنین این دو تیمار از نظر عمودی و افقی نیز توسعه بیشتری دارند و افزایش غلظت ناحیه پایین نیم‌رخ خاک از دو تیمار T9 و T10 بیشتر است. به‌طور کلی، بین چهار تیمار T9، T10، T11 و T12، تیمار T9 پراکنش شوری کمتری نسبت به سه تیمار دیگر دارد.

تحلیل توزیع شوری (شکل ۶) نشان می‌دهد که عمق نصب لوله نقش کلیدی در جابه‌جایی املاح دارد؛ تیمارهای با عمق ۶۰ سانتی‌متر (T9 تا T16) در مقایسه با عمق ۴۰ سانتی‌متر (T1 تا T8) تمایل داشتند نمک را در لایه‌های عمقی‌تر متمرکز کنند و از تجمع شوری در سطح و ناحیه‌ی فعال ریشه جلوگیری نمایند. همچنین پارامترهای طراحی مانند قطر و فاصله‌ی سوراخ‌ها بر فلاکس محلی و در نتیجه الگوی شوری تأثیر می‌گذارند؛ در شرایط ثابت فشار، افزایش اندازه‌ی شکاف‌ها معمولاً جریان هر شکاف

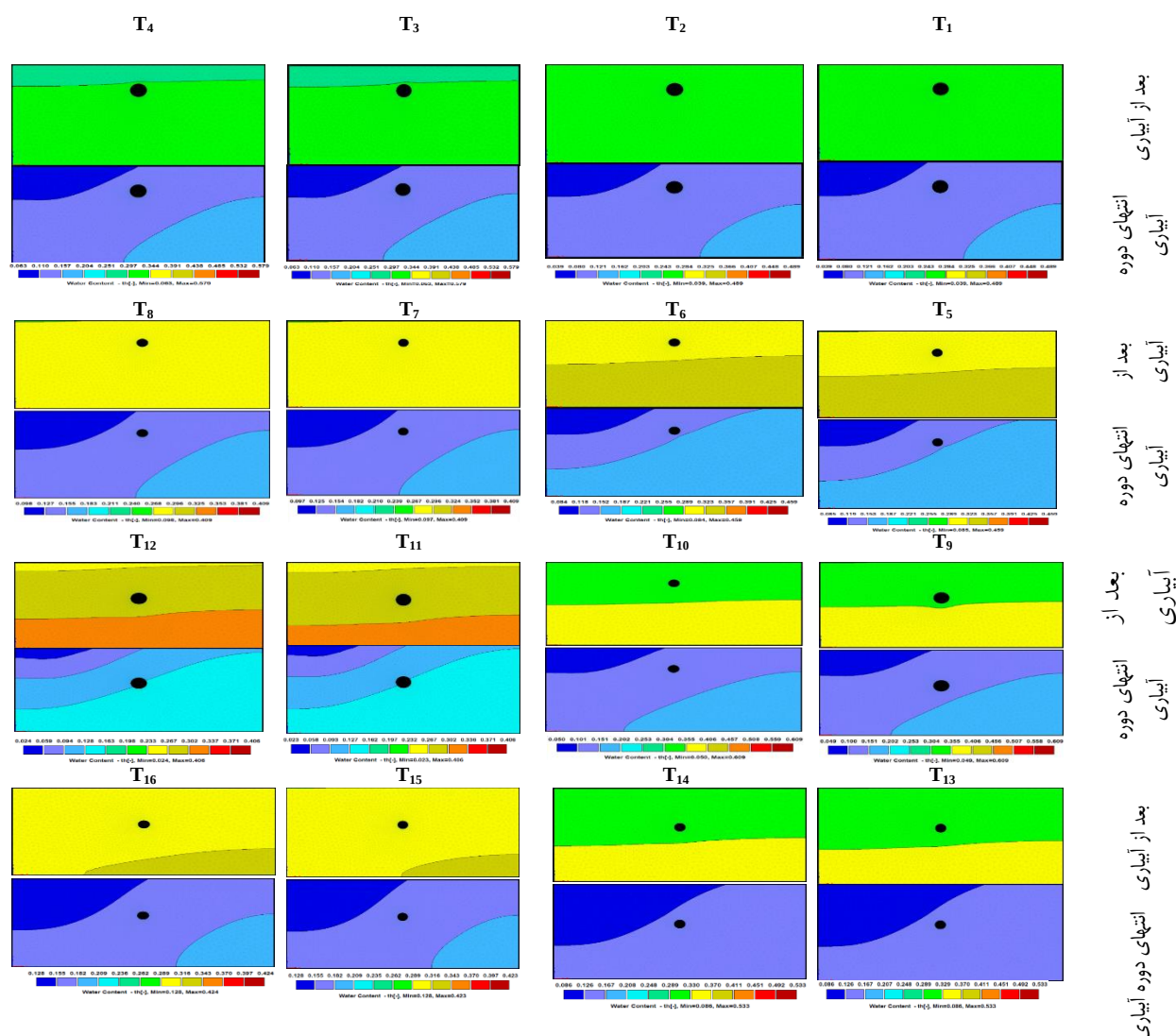
را افزایش می‌دهد و این امر می‌تواند هم منجر به ورود نمک بیشتر به پروفیل و هم به تسهیل انتقال عمقی نمک شود؛ بنابراین اثر نهایی روی شوری ناحیه‌ی ریشه تابعی از توازن بین «نمک واردشده» و «انتقال عمقی» است. بر اساس شاخص‌های مقایسه‌ای استخراج‌شده، ترکیب‌های T15 و T16 عملکرد مطلوب‌تری در کاهش شوری ناحیه‌ی ریشه نشان دادند.

در شکل ۷، توزیع رطوبت در تیمارهای آبیاری T1 تا T16 ارائه شده است. برای تولید این شکل‌ها نیز، فاصله زمانی بین یک رویداد آبیاری تا قبل از شروع رویداد آبیاری بعدی شبیه‌سازی شده است. شکل بالایی نشان‌دهنده توزیع رطوبت خاک در زمان اتمام آبیاری و شکل پایینی نشان‌دهنده توزیع رطوبت خاک در ۲۴ روز بعد و قبل از شروع آبیاری بعدی است. در این شکل‌ها نیز مانند شکل‌های بالا، نقاط تیره‌ی نشان داده شده، محل نصب لوله‌های سوراخ‌دار است.

نتایج نشان می‌دهد که در تیمارهای T1 و T2 حجم آب پس از آبیاری، ۲۴ تا ۲۸ درصد مشاهده می‌شود و این در حالی است که در انتهای دوره آبیاری در محدوده اطراف سوراخ‌های آبدۀ که در فاصله ۱۲۰ سانتی‌متری از درخت قرار دارند رطوبت از ۸ تا ۱۲ درصد مشاهده می‌شود. در تیمارهای T3 و T4 که تفاوت آن‌ها با دو تیمار اول (T1 و T2) در قطر سوراخ کوچک‌تر است، مشاهده می‌شود که رطوبت پس از آبیاری در زیر ناحیه سوراخ‌های آبدۀ که ۲۹ تا ۳۴ درصد رسیده است و در بالای سوراخ‌های آبدۀ ۲۵ تا ۲۹ درصد رطوبت در خاک را نشان می‌دهد که وضعیت مناسب‌تری است. این امر می‌تواند به دلیل فلاکس ورودی بالاتر آب به دلیل قطر کمتر سوراخ آبدۀ باشد. در این تیمارها در انتهای دور آبیاری رطوبت در اطراف سوراخ‌های آبدۀ تا حدود ۱۲ درصد و در اعماق بیشتر در حدود ۱۶ تا ۲۰ درصد می‌رسد.



شکل ۶- توزیع شوری در تیمار مختلف بعد از آبیاری و انتهای دوره آبیاری تیمارهای T<sub>1</sub> تا T<sub>16</sub>



شکل ۷- توزیع رطوبت در تیمار مختلف بعد از آبیاری و انتهای دوره آبیاری تیمارهای (T1 تا T16)

بزرگتر باشد، باعث بالاتر رفتن رطوبت خاک پس از آبیاری می‌شود؛ اما در انتهای دور آبیاری تأثیری در میزان رطوبت ندارد. در تیمارهای T9 و T10 پس از آبیاری، رطوبت به ۳۰ تا ۴۰ درصد در خاک می‌رسد و در انتهای دور آبیاری محدوده رطوبت خاک از ۱۰ درصد در اطراف سوراخ‌های آبد به ۲۰ درصد در حدود ۶۰ تا ۸۰ سانتی‌متری خاک را نشان می‌دهد. در تیمارهای T11 و T12 علی‌رغم تنوع رنگی که در توزیع رطوبت نشان داده می‌شود پس از آبیاری میزان رطوبت از ۲۶ تا ۳۳ درصد و در انتهای دور آبیاری محدوده رطوبت در زیر سوراخ‌های آبد به ۱۲ تا ۱۶ درصد را نشان می‌دهد. در تیمارهای T13 و T14 محدوده رطوبت پس از آبیاری از حدود ۲۸ تا ۳۸ درصد و

در تیمارهای T5 تا T8 عمق کانال مشابه چهار تیمار قبل است؛ اما قطر لوله آبد از ۱۶۰ به ۱۱۰ میلی‌متر کاهش پیدا کرده است. در تیمارهای T5 و T6 رطوبت خاک در ناحیه بالای سوراخ‌های آبد پس از آبیاری، به ۲۸ تا ۳۲ درصد و در زیر آن تا ۳۵ درصد نیز افزایش پیدا می‌کند و در انتهای دوره آبیاری رطوبت در زیر سوراخ‌های آبد به واقع محدوده تراکم ریشه ۱۲ تا ۱۸ درصد را نشان می‌دهد. در تیمارهای T7 و T8 رطوبت پس از آبیاری در هر دو حدود ۲۶ تا ۲۹ درصد است. در انتهای دور آبیاری در حدود ۱۲ تا ۱۸ درصد را نشان می‌دهد که در مقایسه با تیمارهای T5 و T6 که خصوصیات طراحی بسیار نزدیکی دارند به نظر می‌رسد که هرچه قطر سوراخ‌های روی لوله

در انتهای دوره آبیاری ۱۲ تا ۲۰ درصد را نشان می‌دهد این توزیع رطوبت برای تیمارهای T<sub>15</sub> و T<sub>16</sub> در حدود ۲۸ تا ۳۴ درصد پس از آبیاری و ۱۵ تا ۲۰ درصد در انتهای دوره آبیاری است. بر اساس این نتایج به نظر می‌رسد که شبیه‌سازی توزیع رطوبت نشان می‌دهد که تیمارهای T<sub>9</sub> و T<sub>10</sub> و با فاصله اندک از آن‌ها تیمارهای T<sub>13</sub> و T<sub>14</sub> بهترین توزیع رطوبت را در اطراف سوراخ‌های آبدۀ که در فاصله ۱۲۰ سانتی‌متری از درخت قرار دارند را ایجاد می‌کند.

صدقاتی و همکاران (۱۴۰۳)، عمق کانال ۴۰ سانتی‌متر، قطر لوله ۱۱۰ میلی‌متر، قطر سوراخ‌های روی لوله ۱۲ میلی‌متر و فاصله سوراخ‌های ۱۵ یا ۲۵ میلی‌متر را به‌عنوان بهترین فاکتورهای طراحی برای افزایش شاخص‌های رشدی و شاخص‌های کمی و کیفی محصول معرفی کردند (صدقاتی و همکاران، ۱۳۹۸)؛ که با نتایج شبیه‌سازی در این مطالعه تطابق دارد.

## بحث

نتایج حاصل از شبیه‌سازی با مدل HYDRUS-2D در سامانه آبیاری زیرسطحی با لوله‌های PVC سوراخ‌دار نشان داد که طراحی صحیح پارامترهای سامانه آبیاری تأثیر چشمگیری بر توزیع رطوبت و شوری در خاک دارد. یکی از عوامل کلیدی در این پژوهش، عمق کارگذاری لوله‌ها بود. نتایج نشان داد که افزایش عمق کارگذاری لوله‌ها از ۴۰ به ۶۰ سانتی‌متر منجر به پایداری بیشتر رطوبت در ناحیه توسعه ریشه، کاهش تبخیر سطحی و کاهش انتقال املاح به سطح خاک شد. این نتایج با یافته‌های خلیلی و همکاران (۱۳۹۵) و سیال و اسکگر (۲۰۰۹) مطابقت دارد که نشان دادند عمق بیشتر لوله‌ها منجر به شکل‌گیری جبهه رطوبتی یکنواخت‌تر و کاهش تلفات سطحی می‌شود.

از سوی دیگر، قطر سوراخ‌ها و فاصله آن‌ها بر فلاکس ورودی و نحوه پخش آب و نمک در خاک تأثیرگذار بودند. نتایج نشان داد که تیمارهای دارای قطر سوراخ کمتر (نه میلی‌متر) و فاصله کمتر (۱۵ سانتی‌متر)، با ایجاد جریان متمرکزتر آب به‌واسطه افزایش فلاکس ورودی آب به خاک در ناحیه اطراف سوراخ‌ها، از انباشت نمک در

نزدیکی ریشه جلوگیری کرده‌اند. این موضوع در تیمارهای T<sub>15</sub> و T<sub>16</sub> به‌وضوح مشهود بود.

در خصوص تأثیر قطر سوراخ‌ها بر توزیع رطوبت، نتایج حکم به برتری قطر سوراخ ۱۲ میلی‌متر داد. در خصوص فاصله سوراخ‌های روی لوله‌ها، به نظر می‌رسد که برتری قابل‌توجهی بین فاصله سوراخ ۱۵ cm بر فاصله ۲۵ cm وجود ندارد. صدقاتی و همکاران (۱۴۰۳) اشاره کردند که نحوه ترکیب قطر سوراخ‌ها و فاصله آن‌ها از یکدیگر اهمیت زیادی در طراحی سامانه‌های آبیاری زیرسطحی کم‌فشار با لوله‌های PVC دارد. نتایج ایشان نشان داد که در صورتی که قطر سوراخ ۹ mm باشد، حتماً باید فاصله سوراخ کمتر (۱۵ cm) در نظر گرفته شود. درحالی‌که برای قطر سوراخ ۱۲ mm، امکان افزایش فاصله سوراخ‌ها تا ۲۵ cm نیز است.

در زمینه تأثیر قطر لوله‌ها بر توزیع نمک در خاک، نتایج نشان داد که احتمالاً به دلیل تأثیر بر افزایش فلاکس ورودی آب به خاک در ناحیه اطراف سوراخ‌های آبدۀ، تیمارهایی که بهترین توزیع شوری را در خاک نشان دادند دارای قطر لوله ۱۱۰ سانتی‌متر بودند. با افزایش فلاکس ورودی، سرعت نفوذ آب در پروفیل خاک افزایش یافته و آب توان بیشتری برای انتقال عمقی املاح دارد. این فرایند بخصوص در آبیاری‌های زیرسطحی می‌تواند باعث تشکیل یک جبهه مرطوب فعال و پیوسته شود و منجر به کاهش غلظت نمک در ناحیه ریشه و تجمع آن در لایه‌های عمقی تر می‌شود (تافته و امداد، ۱۴۰۳).

در رابطه با تأثیر قطر لوله‌ها بر توزیع رطوبت، نتایج نشان داد که تیمارهای منتخب (T<sub>9</sub> و T<sub>10</sub>) دارای قطر لوله ۱۶۰ سانتی‌متر بودند این نتایج با نتایج مطالعات صدقاتی و همکاران (۱۳۹۸) نیز مطابقت دارد؛ اما مشاهده می‌شود که تفاوت بین این دو تیمار بر رطوبت خاک در انتهای دور آبیاری نسبت به تیمارهای T<sub>13</sub> و T<sub>14</sub> که قطر لوله ۱۱۰ سانتی‌متر دارند بسیار اندک است. لذا با در نظر گرفتن جنبه‌های اقتصادی اجرای سیستم آبیاری زیرسطحی و اینکه هزینه خرید لوله‌های ۱۶۰ میلی‌متری به‌مراتب بیشتر

از لوله‌های با قطر ۱۱۰ میلی‌متر است، بنابراین انتخاب قطر لوله ۱۱۰ میلی‌متر منطقی‌تر به نظر می‌رسد.

همچنین لازم به ذکر است که مدل HYDRUS-2D در شرایط واقعی منطقه انار، توانست با ضریب تبیین بیش از ۰/۹ و NRMSE کمتر از ۲۰ درصد، هم توزیع رطوبت و هم شوری را با دقت مناسبی شبیه‌سازی کند؛ که این موضوع تطابق خوبی با یافته‌های مطالعات مشابه (مانند تافته و امداد، ۱۴۰۳؛ حسینی و همکاران، ۱۴۰۲) دارد.

از جنبه مدیریتی، پیشنهاد می‌شود برای باغ‌های پسته در مناطق با شرایط مشابه منطقه انار، از لوله‌هایی با قطر ۱۱۰ میلی‌متر، عمق نصب ۶۰ سانتی‌متر، سوراخ‌هایی با قطر نه میلی‌متر و فاصله ۱۵ سانتی‌متر استفاده گردد. این ترکیب نه تنها باعث افزایش ذخیره رطوبت در ناحیه ریشه می‌شود، بلکه با هدایت املاح به لایه‌های پایین‌تر خاک، در کنترل تجمع نمک در ناحیه ریشه نیز مؤثر است.

در نهایت، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از مدل‌های عددی مانند HYDRUS-2D در طراحی و بهینه‌سازی سامانه‌های آبیاری زیرسطحی به‌ویژه در محصولات حساس به شوری، نقش بسیار مؤثری در افزایش راندمان آب و پایداری تولید دارد.

### نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش علاوه بر تأیید نقش مثبت و مؤثر مدل HYDRUS-2D در شبیه‌سازی شوری و

رطوبت در منطقه مورد مطالعه، به ارائه بهترین پارامتر طراحی سیستم آبیاری زیرسطحی با لوله‌های PVC سوراخ دار که در این مطالعه بررسی شده است می‌پردازد. لازم به ذکر است که اعداد و ارقام بدست‌آمده در این پروژه تحقیقاتی برای فاکتورهای طراحی این سیستم آبیاری، اعداد مطلق و ثابتی نبوده و لازم است با در نظر گرفتن این نتایج، برای هر باغ با توجه به بافت خاک، طول و فاصله ردیف درختان، دبی آب آبیاری، شیب زمین و ... این پارامترها بهینه‌سازی گردند اما بر اساس شرایط آب‌و‌خاک منطقه مورد مطالعه، بهترین عمق کانال قرارگیری لوله‌های PVC، ۶۰ سانتی‌متر و بهترین قطر سوراخ روی لوله آبدار نه میلی‌متر معرفی می‌گردد. قطر لوله آبدار برای کنترل شوری بهتر است ۱۱۰ میلی‌متر در نظر گرفته شود و در صورتی که مشکل شوری مطرح نباشد و تنها استفاده بهینه از آب مد نظر باشد و البته با قبول تفاوت مبلغ تأمین بودجه، قطر لوله ۱۶۰ میلی‌متر توصیه می‌گردد. فاصله بین سوراخ‌ها در محدوده مقادیر مطالعه شده در این پژوهش تفاوت قابل توجهی را نشان نداد.

### تعارض منافع

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

### فهرست منابع

۱. تافته، آرش، و امداد، محمدرضا، ۱۴۰۳. استفاده از مدل Hydrus 2D در ارائه برنامه مناسب آبیاری باغات و شبیه‌سازی شوری خاک (مطالعه موردی باغات پسته سمنان). نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب/ایران، ۱۵(۱)، صص. ۳۷-۵۴. 10.22125/IWE.2024.446730.1795
۲. دهقانی سانج، حسین، حاجی آقا بزرگی، حمیدرضا، کنعانی، الهه، و دهقانی سانج، غزل، ۱۳۹۸. کاربرد مدل Hydrus-2D در بررسی تغییرات رطوبت خاک زیر درختان پسته با سیستم قطره‌ای زیرسطحی. مجله آبیاری و زهکشی/ایران، ۱۳(۶)، صص. ۱۵۳۸-۱۵۴۹. 20.1001.1.20087942.1398.13.6.1.7
۳. جوزی، مهدی، مهدوی مقدم، نرجس، و زارع ابیانه، حمید، ۱۴۰۰. شبیه‌سازی پروفیل رطوبتی خاک در آبیاری قطره‌ای با مدل HYDRUS-2D. مهندسی آبیاری و آب/ایران، ۱۲(۱)، صص. ۲۴۱-۲۵۶.

۴. حسینی، سیدتقی، رمضان‌ی اعتدالی، هادی، کاویانی، عباس، سلطانی، مسعود، و نظری، بیژن، ۱۴۰۲. شبیه‌سازی حرکت آب و شوری در آبیاری قطره‌ای نواری در کشت ذرت با استفاده از نرم‌افزار HYDRUS-2D. نشریه دانش آب‌و خاک. ۳۳(۴)، صص. ۵۵-۷۰. 10.22034/ws.2021.47124.2425
۵. حیدری، زینب، فراستی، معصومه، و قبادیان، رسول، ۱۳۹۷. بررسی اثر دبی بر الگوی خیس شده تحت آبیاری قطره‌ای سطحی و شبیه‌سازی با مدل HYDRUS-2D. مهندسی آبیاری و آب ایران، ۸(۴)، صص. ۱۳۲-۱۴۴.
۶. خلیلی، مژده، اکبری، مهدی، هزارجریبی، ابوطالب، ذاکری‌نیا، مهدی، عباسی، فریرز، و کولانیان، علی، ۱۳۹۵. مدل کردن نیم‌رخ رطوبتی در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با استفاده از HYDRUS-2D، نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۱۰(۲)، صص. ۱۳۶-۱۴۴.
۷. رمضان‌ی اعتدالی، هادی، کریمی، شیما، و فخار، محدثه‌السادات، ۱۴۰۱. شبیه‌سازی اثر پوشش بر توزیع رطوبت و املاح خاک با استفاده از دو مدل HYDRUS-2D و AquaCrop. هیدروژئولوژی، ۷(۱)، صص. ۱-۱۰. 10.22034/HYDRO.2022.12702
۸. سیفی، اکرم، و صداقتی، ناصر، ۱۳۹۹. ارزیابی اولویت سامانه‌های آبیاری قطره‌ای و لوله‌های کم‌فشار PVC سوراخ‌دار در باغ‌های پسته استان کرمان مبتنی بر مدل تصمیم‌گیری بهینه‌سازی غیرخطی. علوم و فناوری پسته، ۵(۱)، صص. ۲۱-۴۴.
۹. شینی دشتگل، علی، کرمان‌نژاد، جلیل، حمودی، مجید، و قنبری عدیوی، الهام. ۱۴۰۰. بررسی چگونگی توزیع رطوبت در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و مقایسه داده‌ها با نتایج HYDRUS 2D. دانش آب‌و خاک، ۳۱(۲)، صص. ۱۰۳-۱۱۵. 10.22034/WS.2021.12155
۱۰. صداقتی، ناصر، ۱۴۰۳. تعیین بهترین پارامترهای طراحی سیستم آبیاری زیرسطحی با استفاده از لوله‌های پی‌وی سی در باغ‌های پسته. سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی. شماره فروست سامانه فیپاک: ۶۵۶۳۵.
۱۱. صداقتی، ناصر، حسینی فرد، سیدجواد، و عبدالهی عزت‌آبادی، محمد، ۱۳۹۳. بررسی امکان تغییر سیستم آبیاری سطحی غرقابی و زیرسطحی با لوله‌های PVC در باغ‌های پسته. گزارش نهایی پروژه تحقیقاتی پژوهشکده پسته رفسنجان، ۲۶ صفحه.
۱۲. صداقتی، ناصر، حسینی فرد، سیدجواد، عبدالهی عزت‌آبادی، محمد، محمدی محمدآبادی، اکبر، و نیکوئی دستجردی، محمدرضا. ۱۳۹۸. اثر تغییر سیستم آبیاری از روش سطحی (غرقابی) به زیرسطحی با لوله‌های پی وی‌سی (PVC) بر شوری خاک، رشد و عملکرد درختان پسته. علوم و فناوری پسته، ۴(۸)، صص. ۲۸-۴۲.
۱۳. عباسی، فریرز. ۱۳۹۴. فیزیک خاک پیشرفته. چاپ سوم، انتشارات دانشگاه تهران.
۱۴. عطایی، علی، نیشابوری، محمدرضا، اکبری، مهدی، آگدرنژاد، اصلان، و اسدی، صفورا، ۱۳۹۹. کاربرد معیارهای PAW و IWC در مدیریت آبیاری و نقش آن بر توزیع شوری خاک و جذب آب گیاه. تحقیقات آب‌و خاک ایران، ۵۱(۱۱)، صص. ۲۷۷۳-۲۷۸۶. 10.22059/IJSWR.2020.305248.668657
۱۵. میرزایی، علی‌اصغر، و ناظمی، امیرحسین. ۱۳۹۰. شبیه‌سازی حرکت شوری در خاک با استفاده از مدل HYDRUS-2D. مهندسی آبیاری و آب ایران، ۱(۳)، صص. ۵۹-۷۰.
16. Al-Tabbal, J. and Al-Zboon, K.K., 2021. Impact of boric acid and saline water irrigation on germination and seedling establishment of wheat. *Irrigation and Drainage*, 70(5), pp. 1183-1192. <https://doi.org/10.1002/ird.2603>

17. Autovino, D., Rallo, G. and Provenzano, G., 2018. Predicting soil and plant water status dynamic in olive orchards under different irrigation systems with hydrus-2d model performance and scenario analysis. *Agricultural Water Management*, 203, pp. 225-235. **<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.03.015>**
18. Bajpai, A. and Kaushal, A., 2020. Soil moisture distribution under trickle irrigation: A review. *Water Supply*, 20(3), pp. 761-772. <https://doi.org/10.2166/ws.2020.005>
19. Bannayan M and Hoogenboom G., 2009. Using pattern recognition for estimating cultivar coefficients of a crop simulation model. *Field Crops Research*, 111, pp. 290-302. **<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.01.007>**
20. Brunetti, G., Šimůnek, J. and Piro, P., 2016. A comprehensive numerical analysis of the hydraulic behavior of a permeable pavement. *Journal of Hydrology*, 540, pp. 1146-1161.
21. Brunetti, G., Porti, M. and Piro, P., 2018. Multi-level numerical and statistical analysis of the hygrothermal behavior of a non-vegetated green roof in a mediterranean climate. *Applied Energy*, 221, pp. 204-219. **<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.07.030>**
22. Elmaloglou, S. and Diamantopoulos, E. 2009. Simulation of soil water dynamics under subsurface drip irrigation from line sources. *Agricultural water management*, 96(11), 1587-1595. **<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.06.010>**
23. Jamieson, P.D., Porter, J.R. and Wilson, D.R., 1991. A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. *Field crops research*, 27(4), pp. 337-350. **[https://doi.org/10.1016/0378-4290\(91\)90040-3](https://doi.org/10.1016/0378-4290(91)90040-3)**
24. Morianou, G., Kourgialas, N.N. and Karatzas, G.P., 2023. A Review of HYDRUS 2D/3D Applications for Simulations of Water Dynamics, Root Uptake and Solute Transport in Tree Crops under Drip Irrigation. *Water*, 15(4), pp. 741.
25. Ning, S., Zhou, B., Wang, Q., and Tao, W., 2020. Evaluation of irrigation water salinity and leaching fraction on the water productivity for crops. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 13(1), pp. 170-177. **[10.25165/j.ijabe.20201301.5047](https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20201301.5047)**
26. Phull, A.M. and Babar, M.M., 2012. Simulation of soil wetting pattern of subsurface drip irrigation system. In Sixteenth International Water Technology Conference, IWTC (Vol. 16, p. 2012).
27. Šimůnek, J., Sejna, M., and van Genuchten, M., 2011. User Manual. *SpringerReference*. 322 p.
28. Šimůnek, J., Van Genuchten, M.T., and Šejna, M., 2012. The HYDRUS software package for simulating the two-and three-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated porous media. Technical manual.
29. Siyal, A.A. and Skaggs, T.H., 2009. Measured and simulated soil wetting patterns under porous clay pipe sub-surface irrigation. *Agricultural Water Management*, 96(6), pp. 893–904. **<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.11.013>**
30. Skaggs, T.H., Trout, T.J., Šimůnek, J. and Shouse, P.J., 2004. Comparison of HYDRUS-2D simulations of drip irrigation with experimental observations. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 130(4), pp. 304–310. 10.1061/ (ASCE) 0733-9437(2004)130:4(304)



## ردپای آب<sup>۱</sup> و کارایی تغذیه‌ای آبیاری<sup>۲</sup> در تولید سیب‌زمینی در شرایط بحرانی منابع

### آب: مطالعه موردی دشت قروه- دهگلان

شایسته عبدی، محمدعلی اسعدی، سیدحبیب‌اله موسوی \*  و حامد نجفی علمدارلو

دانش‌آموخته کارشناسی ارشد اقتصاد کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس.

[shayeste.abdi@modares.ac.ir](mailto:shayeste.abdi@modares.ac.ir)

دانش‌آموخته دکتری اقتصاد کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس.

[a.asadi@modares.ac.ir](mailto:a.asadi@modares.ac.ir)

دانشیار گروه اقتصاد کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس .

[shamosavi@modares.ac.ir](mailto:shamosavi@modares.ac.ir)

دانشیار گروه اقتصاد کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس.

[hamed\\_najafi@modares.ac.ir](mailto:hamed_najafi@modares.ac.ir)

دریافت: خرداد ۱۴۰۴ و پذیرش: شهریور ۱۴۰۴

#### چکیده

این پژوهش با هدف ارزیابی جامع ردپای آب و کارایی تغذیه‌ای آبیاری (IDE) محصول سیب‌زمینی در دشت قروه-دهگلان استان کردستان طی سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰ انجام شد. در این بررسی، شاخص‌های ردپای آب (آبی، سبز و خاکستری)، بهره‌وری اقتصادی آب (NPBD<sup>۳</sup>) و کارایی تغذیه‌ای آبیاری با بهره‌گیری از داده‌های سازمان جهاد کشاورزی، سازمان هواشناسی، FAO و پایگاه ترکیب مواد غذایی USDA محاسبه شد. نتایج حاکی از آن است که میانگین ردپای کل آب برای تولید هر تن سیب‌زمینی در مناطق قروه و دهگلان به ترتیب ۴۳۱ و ۴۴۶ مترمکعب بوده است؛ به عبارت دیگر، تولید هر تن محصول نیازمند مصرف قابل توجه منابع آبی است که این امر نشان‌دهنده فشار بالا بر منابع محدود آب منطقه می‌باشد. همچنین بهره‌وری اقتصادی آب در قروه (۳۸۸ تومان بر مترمکعب) نسبت به دهگلان (۳۷۲ تومان بر مترمکعب) است. تحلیل شاخص‌های تغذیه‌ای نیز نشان داد که هر لیتر آب مصرفی در قروه به طور میانگین ۵/۹۵ کیلوکالری انرژی و ۰/۱۶ گرم پروتئین تولید می‌کند، در حالی که این مقادیر در دهگلان به ترتیب ۵/۷۳ کیلوکالری و ۰/۱۴ گرم است. همچنین، بررسی روند زمانی شاخص‌ها حاکی از کاهش چشمگیر بهره‌وری در سال‌های خشکسالی است که آسیب‌پذیری سامانه کشاورزی منطقه را در برابر تغییرات اقلیمی نمایان می‌سازد. این پژوهش ضرورت گذار بنیادی از رویکرد «تأمین آب بیشتر» به سمت «مدیریت کارآمدتر آب موجود» را برجسته می‌سازد و با ارائه شواهد مبتنی بر داده‌های میدانی، مبنای علمی مناسبی برای سیاست‌گذاری منابع آب و کشاورزی در مناطق بحرانی کشور فراهم می‌آورد.

واژه‌های کلیدی: امنیت غذایی، بهره‌وری اقتصادی آب، پایداری منابع آب، ردپای آب

1- Water footprint  
2- Irrigation Dietary Efficiencies  
3- Net production benefit per drop

\* - آدرس ایمیل نویسنده مسئول: [shamosavi@modares.ac.ir](mailto:shamosavi@modares.ac.ir)



## مقدمه

بحران آب به‌عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های جهانی در قرن بیست‌ویکم، دیگر صرفاً یک مسئله محیط-زیستی محسوب نمی‌شود، بلکه به موضوعی راهبردی در ابعاد مختلف حیات بشری از جمله امنیت غذایی، پایداری اقتصادی، عدالت اجتماعی و ثبات سیاسی تبدیل شده است (فائو، ۲۰۲۳). طبق پیش‌بینی‌های سازمان ملل متحد تا سال ۲۰۵۰ بیش از دو سوم جمعیت جهان در مناطقی زندگی خواهند کرد که با درجات مختلفی از کم‌آبی روبرو هستند (بورتی و رزا، ۲۰۱۹). در این میان، کشورهای دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک مانند ایران، در معرض بیشترین آسیب قرار دارند. شرایط اقلیمی خاص ایران، با میانگین بارندگی حدود ۲۵۰ میلی‌متر در سال-یعنی یک‌سوم متوسط جهانی- و نرخ تبخیر بالا، موجب شده است که بخش قابل توجهی از منابع آبی کشور در معرض تهدید جدی قرار گیرد (اسعدی و همکاران، ۲۰۲۱).

تنش آبی در ایران تنها به کاهش بارندگی محدود نمی‌شود، بلکه با افت مداوم سطح آب‌های زیرزمینی، نابودی تالاب‌ها، شوری و آلودگی منابع آب و کاهش کیفیت منابع قابل‌استفاده، به بحرانی چندلایه بدل شده است. بخش کشاورزی، به‌عنوان اصلی‌ترین مصرف‌کننده منابع آبی کشور با سهمی بالغ بر ۹۰ درصد از مصرف آب تجدیدپذیر، بیشترین نقش را در این بحران ایفا می‌کند؛ اما متأسفانه، این بخش از کمترین بهره‌وری در مصرف آب برخوردار است؛ مسئله‌ای که به‌دلائل متعددی از جمله روش‌های سنتی آبیاری، الگوی نادرست کشت و ناهماهنگی میان ظرفیت‌های اکولوژیکی مناطق و نوع محصولات زراعی پدید آمده است. این شرایط، لزوم تغییر نگرش از مدیریت کمی منابع آب به مدیریت کیفی و کارآمدتر را دوچندان کرده است.

در پاسخ به این چالش‌ها، استفاده از شاخص‌های علمی و جامع برای ارزیابی بهره‌وری مصرف آب، به یکی از رویکردهای مهم در تحقیقات و سیاست‌گذاری‌های اخیر

تبدیل شده است. در این میان، مفهوم ردپای آب<sup>۱</sup> به‌عنوان ابزاری نوین و قدرتمند برای تحلیل میزان و نوع مصرف آب در تولید محصولات کشاورزی مورد توجه قرار گرفته است (دیهیمفرد و همکاران، ۲۰۲۲). این شاخص، برخلاف معیارهای سنتی، کل چرخه مصرف آب را در بر می‌گیرد و به سه مؤلفه اصلی ردپای آبی (مصرف آب آبیاری)، ردپای سبز (مصرف آب بارندگی ذخیره‌شده در خاک) و ردپای خاکستری (حجم آبی که برای رقیق‌سازی آلاینده‌های ناشی از تولید مورد نیاز است) تقسیم می‌شود (وو و همکاران، ۲۰۲۲؛ میزید و همکاران، ۲۰۲۵).

تحلیل ردپای آب، امکان مقایسه کارایی مصرف آب در محصولات مختلف و در مناطق گوناگون را فراهم می‌سازد و نقش مهمی در شناسایی الگوهای ناکارآمد، ارتقای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی و تدوین سیاست‌های سازگار با پایداری ایفا می‌کند (صفدری و همکاران، ۱۴۰۰). این ابزار به‌ویژه در کشورهایی مانند ایران که با محدودیت منابع و تنوع اقلیمی روبرو هستند، می‌تواند به اولویت‌بندی کشت محصولات و اصلاح سامانه‌های آبیاری کمک شایانی کند؛ اما برای ارزیابی جامع‌تر، کافی نیست که فقط به کمیت آب مصرفی توجه شود، بلکه باید کیفیت و ارزش تغذیه‌ای محصولات نیز مدنظر قرار گیرد. در همین راستا، شاخص کارایی تغذیه‌ای آبیاری (IDE) ۲ به‌عنوان مکملی مهم برای ارزیابی پایداری کشاورزی معرفی شده است (دراستیگ و همکاران، ۲۰۲۳). این شاخص، نسبت مقدار مواد مغذی تولیدشده مانند انرژی، پروتئین، ویتامین‌ها یا فیبر به حجم آب مصرفی را محاسبه می‌کند و به‌جای تمرکز صرف بر بازده حجمی یا وزنی، کیفیت تغذیه‌ای محصولات را نیز در محاسبات لحاظ می‌کند (کهرمان‌اوغلو و همکاران، ۲۰۲۰). بدین ترتیب، این شاخص نه‌تنها ابزاری برای سنجش بهره‌وری در مصرف آب است، بلکه به‌طور مستقیم با امنیت غذایی و تغذیه جامعه نیز پیوند دارد. ترکیب این شاخص با ردپای آب، بستری مناسب برای تحلیل چندبعدی سامانه‌های زراعی فراهم می‌آورد که برای تدوین راهبردهای

بلندمدت مدیریت منابع آبی و امنیت غذایی در سطح ملی بسیار مفید خواهد بود.

در میان محصولات زراعی کشور، سیب‌زمینی از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. این محصول به دلیل سازگاری نسبتاً بالا با شرایط اقلیمی متنوع، نیاز آبی متوسط و همچنین ارزش غذایی بالا، یکی از منابع مهم تغذیه‌ای خانوارهای ایرانی به‌شمار می‌رود (اسعدی و همکاران، ۱۳۹۸). سیب‌زمینی سرشار از کربوهیدرات، پتاسیم و فیبر است و در امنیت غذایی و تنوع سفره خانوار نقشی تعیین‌کننده دارد. درعین‌حال، روش‌های کشت و آبیاری آن می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر مصرف منابع آبی داشته باشد (کونز و همکاران، ۲۰۲۴). از این‌رو، بررسی ردپای آب و بهره‌وری تغذیه‌ای این محصول در مناطق مختلف، به‌ویژه مناطق بحرانی از نظر منابع آبی، اهمیت خاصی دارد. یکی از مناطقی که به‌طور خاص با بحران شدید منابع آبی مواجه است، دشت قروه-دهگلان در استان کردستان است. این دشت به‌دلیل بهره‌برداری بیش از حد از منابع آب زیرزمینی، کاهش نزولات جوی و توسعه بی‌رویه فعالیت‌های کشاورزی، دچار افت سطح آب‌های زیرزمینی و کاهش کیفیت منابع آب شده است. هم‌زمان، اهمیت اقتصادی و معیشتی کشاورزی برای ساکنان این منطقه بسیار بالا است و بخش عمده‌ای از درآمد خانوارها از طریق تولیدات زراعی تأمین می‌شود. از این‌رو، بحران آب در این دشت نه تنها یک تهدید محیط‌زیستی، بلکه چالشی جدی برای توسعه پایدار منطقه نیز محسوب می‌شود.

مطالعات داخلی متعددی به بررسی بهره‌وری آب و ردپای آبی محصولات کشاورزی پرداخته‌اند. کریمی و همکاران (۱۴۰۲) با محاسبه حجم آبیاری و بهره‌وری آب در مزارع جو خراسان رضوی، میانگین بهره‌وری آب را ۰/۴۵ کیلوگرم بر مترمکعب گزارش کردند. در پژوهش شاهرخ‌نیا و باغانی (۱۴۰۰) درباره سیب‌زمینی در استان فارس، بهره‌وری آب برابر با ۴/۸۷ کیلوگرم بر مترمکعب برآورد شد و مشخص شد که آبیاری قطره‌ای و بارانی، با وجود افزایش عملکرد و کاهش مصرف آب، تفاوت

معنی‌داری در سطح پنج درصد ایجاد نکردند. پیری و سارانی (۱۳۹۹) با رویکرد ردپای آب، بهره‌وری اقتصادی محصولات را بررسی کردند و نشان دادند که ذرت خوشه‌ای در میان محصولات زراعی و موز در میان محصولات باغی دارای بیشترین بهره‌وری اقتصادی هستند. همچنین، فتحی‌تیلکو و همکاران (۱۳۹۵) در پژوهشی درباره سیب‌زمینی در دشت دهگلان، تأثیر معنی‌دار عمق آبیاری و جایگذاری نوار آبیاری را بر عملکرد و بهره‌وری آب گزارش کردند.

در حوزه مطالعات خارجی، هوکسترا و چاپاگان (۲۰۰۷) برای نخستین‌بار ردپای آب را در سطح جهانی محاسبه کرده و تفاوت چشمگیر این شاخص را میان کشورها مانند ردپای بالای آب در آمریکا (۲۴۸۰ مترمکعب بر تن در سال) و ردپای پایین آب در چین (۷۰۰ مترمکعب بر تن در سال) را نشان دادند. لیو و همکاران (۲۰۲۰) در چین با استفاده از مفاهیم ردپای آب و آب مجازی، تأثیر عواملی چون رشد جمعیت و توسعه صنعت انرژی بر امنیت غذایی و منابع آب را بررسی کردند و افزایش رقابت بین بخش‌ها بر سر منابع آبی را برجسته نمودند. در نهایت، کهرمان‌اوغلو و همکاران (۲۰۲۰) بهره‌وری‌های مختلف آبیاری را برای محصولات متنوع بررسی کرده و نشان دادند که کشت محصولات کم‌مصرف مانند خرنوب و انجیر می‌تواند به کاهش مصرف آب و حفظ امنیت غذایی کمک کند. این یافته‌ها، بر ضرورت بازنگری سیاست‌های آبیاری و اولویت‌بندی کشت محصولات سازگار با شرایط کم‌آبی تأکید دارند.

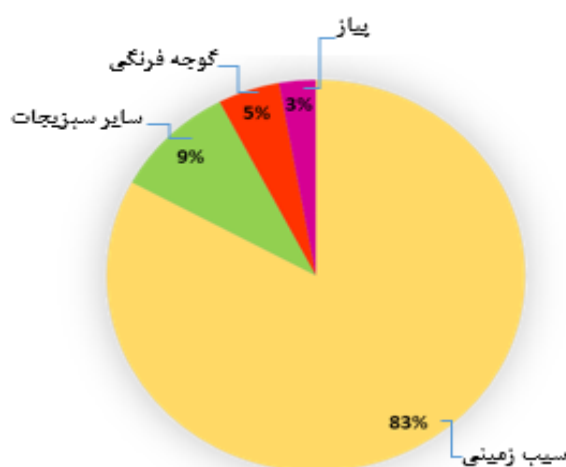
جمع‌بندی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که تاکنون پژوهش‌های متعددی در داخل و خارج از کشور به بررسی ردپای آب، بهره‌وری اقتصادی و عملکرد آبیاری محصولات مختلف کشاورزی پرداخته‌اند. در سطح ملی، تمرکز اغلب مطالعات بر سنجش بهره‌وری آب در محصولات عمده‌ای همچون جو، سیب‌زمینی و ذرت بوده و نقش الگوهای آبیاری و تکنولوژی در بهینه‌سازی مصرف آب بررسی شده است. در سطح بین‌المللی نیز مطالعات با

## روش پژوهش

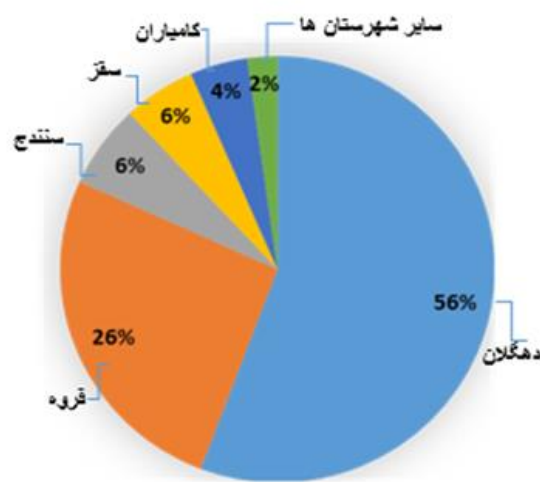
## منطقه مورد مطالعه

مطالعه حاضر در دشت قروه- دهگلان، واقع در شرق استان کردستان و در بخش سراب حوضه سفیدرود، انجام شده است. استان کردستان با تولید سالانه ۲۴۱۸۹۲ تن سیب‌زمینی در سال ۱۴۰۰ و سطح زیر کشت ۶۹۲۱ هکتار، رتبه پنجم تولید این محصول در کشور را به خود اختصاص داده است. نزدیک به ۹۰ درصد از این میزان تولید در دشت قروه-دهگلان صورت می‌گیرد (شکل ۱) که به‌عنوان بزرگ‌ترین دشت استان با وسعتی معادل ۱۳۱۴٫۲ کیلومترمربع، نقش مهمی در کشاورزی منطقه ایفا می‌کند. این دشت دارای سه آبخوان مهم به نام‌های قروه، دهگلان و چهاردولی است که در سال‌های اخیر با برداشت‌های فزاینده از منابع آب زیرزمینی مواجه شده‌اند. به‌دلیل برهم خوردن توازن میان تغذیه و برداشت، این آبخوان‌ها به ترتیب از سال‌های ۱۳۷۲، ۱۳۸۲ و ۱۳۸۳ در شمار مناطق ممنوعه قرار گرفته‌اند (شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان کردستان، ۱۴۰۰). این شرایط بحرانی، ضرورت ارزیابی دقیق شاخص‌هایی چون ردپای آب، بهره‌وری اقتصادی و کارایی تغذیه‌ای در تولید سیب‌زمینی را دوچندان کرده و نیاز به بازنگری در مدیریت منابع و الگوهای بهره‌برداری را به‌روشنی نشان می‌دهد.

نگاهی گسترده‌تر به تحلیل ردپای آب، بهره‌وری زمین و چالش‌های کلان امنیت غذایی ناشی از فشار بر منابع آبی پرداخته‌اند و بر لزوم اصلاح سیاست‌های مدیریت آب و کشت محصولات کم‌مصرف تأکید داشته‌اند. باوجود پیشرفت‌های حاصل‌شده در حوزه سنجش بهره‌وری مصرف آب و تحلیل ردپای آبی محصولات زراعی، هنوز خلأهای مهمی در ادبیات پژوهش وجود دارد. یکی از این خلأها، کمبود مطالعاتی است که به‌طور هم‌زمان دو جنبه «کارایی تغذیه‌ای» و «ردپای آب» را برای یک محصول مهم غذایی در یک منطقه بحرانی بررسی کنند. اگرچه شاخص ردپای آب به‌تنهایی می‌تواند میزان فشار واردشده بر منابع آبی را نشان دهد، اما در غیاب شاخص‌هایی نظیر کارایی تغذیه‌ای آبیاری (IDE)، نمی‌توان به ارزیابی دقیقی از کارایی واقعی مصرف آب در تأمین نیازهای غذایی جامعه دست یافت. از این‌رو، سؤال اصلی این پژوهش آن است که وضعیت ردپای آب و کارایی تغذیه‌ای آبیاری محصول سیب‌زمینی در دشت بحرانی قروه-دهگلان چگونه است و چه راهبردهایی می‌توان برای ارتقای کارایی مصرف آب و بهبود پایداری غذایی در این منطقه پیشنهاد داد؟



(ب)



(الف)

شکل ۱- (الف) سهم تولید شهرستان‌های استان و (ب) میزان تولید سیب‌زمینی در مقایسه با چهار محصول برتر زراعی در استان کردستان (سازمان جهاد کشاورزی استان کردستان، ۱۴۰۱)

## محاسبات ردپای آب

در این پژوهش، به منظور ارزیابی مصرف آب در تولید محصول سیب زمینی، از رویکرد جامع محاسبه ردپای آب بهره گرفته شد. ردپای آب به عنوان یک شاخص بین المللی شناخته شده برای تحلیل کمی و کیفی مصرف منابع آب در طول زنجیره تأمین محصول، به سه مؤلفه اصلی تقسیم می شود:

**ردپای آبی<sup>۱</sup>** نمایانگر میزان مصرف آب های آبی (سطحی و زیرزمینی) است که مستقیماً برای آبیاری محصول مورد استفاده قرار می گیرد.

**ردپای سبز<sup>۲</sup>** به میزان استفاده از آب باران ذخیره شده در خاک (رطوبت خاک) در فرآیند رشد گیاه اشاره دارد و در واقع مؤلفه ای از منابع طبیعی تجدیدپذیر به شمار می رود. **ردپای خاکستری<sup>۳</sup>** بیانگر حجم آبی است که برای رقیق سازی آلاینده ها، به ویژه کودهای نیتروژن دار تا سطح استانداردهای محیط زیستی مورد نیاز است و از آن به عنوان شاخصی از فشار آلودگی کشاورزی بر منابع آب یاد می شود.

محاسبه اجزای مختلف ردپای آب در این پژوهش بر اساس چارچوب مفهومی و فرمول بندی ارائه شده توسط هوکسترا و چاپاگن (۲۰۰۷) انجام شد. این چارچوب در حال حاضر به عنوان مبنای علمی معتبر در سطح جهانی برای محاسبه و مقایسه ردپای آب در محصولات کشاورزی محسوب می شود. در این پژوهش، اطلاعات مربوط به سطح زیر کشت، میزان تولید، قیمت محصول و هزینه های تولید در واحد سطح (یک هکتار) از محصول سیب زمینی، از سازمان جهاد کشاورزی استان کردستان اخذ شد داده های اقلیمی شامل میانگین حداقل و حداکثر دمای روزانه در ماه، میانگین حداقل و حداکثر رطوبت نسبی روزانه، میانگین سرعت باد و متوسط ساعات آفتابی ماهانه نیز از سازمان هواشناسی کشور تأمین شده است. همچنین، ضرایب گیاهی مربوط به مراحل مختلف رشد محصول از نشریات سازمان خواربار و کشاورزی مل

متحد (فائو) استخراج شد. این محاسبات برای دوره آماری ده ساله ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰ انجام شده تا روند تغییرات ردپای آب طی زمان نیز بررسی شود.

مقدار کل ردپای آب<sup>۴</sup> محصول سیب زمینی از مجموع سه مؤلفه آبی، سبز و خاکستری مطابق با روابط ارائه شده در معادلات (۱) تا (۳) محاسبه شد.

$$WF_{blue} = \frac{10 \times Irr}{Y} \quad (1)$$

$$WF_{green} = \frac{10 \times P_{eff}}{Y} \quad (2)$$

$$WF_{grey} = \frac{a \times AR}{C_{max} - C_{nat}} \times \frac{1}{Y} \quad (3)$$

$$WF_{total} = WF_{blue} + WF_{green} + WF_{grey} \quad (4)$$

که در آن ها:  $WF_{total}$  نمایانگر ردپای کل آب و شامل سه مؤلفه  $WF_{Blue}$  (ردپای آب آبی)،  $WF_{green}$  (ردپای آب سبز) و  $WF_{grey}$  (ردپای آب خاکستری) است که همگی بر حسب مترمکعب به ازای هر تن محصول بیان می شوند. متغیر  $Y$  عملکرد محصول (تن در هکتار) را نشان می دهد.

$a$  ضریب تلفات کود نیتروژن مصرفی است که عددی بین صفر تا یک بوده و بیانگر نسبت نیتروژن وارد شده به سیستم زراعی است که به منابع آب نشت می یابد. بر اساس پژوهش پراسد و همکاران (۲۰۱۵)، مقدار این ضریب برای محصول سیب زمینی برابر با ۰/۲۵ (بدون واحد) در نظر گرفته شده است.  $AR$ ، مقدار مصرف کود نیتروژن بر حسب کیلوگرم در هکتار،  $C_{max}$  غلظت مجاز نیتروژن در منابع آب (برابر با ۱۰ میلی گرم در لیتر) و  $C_{Nat}$  نشان دهنده غلظت طبیعی نیتروژن در منابع آب دریافت کننده است. در این پژوهش، به دلیل نبود داده های معتبر و قابل استناد درباره غلظت واقعی نیتروژن در منابع آب سطحی و زیرزمینی دشت قروه-دهگلان، مقدار این پارامتر مطابق با رویکرد پیشنهادی مکنون و هوکسترا (۲۰۱۰) برابر با صفر در نظر گرفته شده است. هرچند ممکن است در شرایط واقعی منطقه، آبخوان ها دارای سطوحی از آلودگی نیتراتی باشند، اما در نبود داده های دقیق، استفاده از این فرضیه باعث حفظ انسجام روش شناسی و امکان مقایسه پذیری نتایج با مطالعات مشابه بین المللی می شود. بدین ترتیب، هرچند این

تغذیه‌ای و زیست‌محیطی تولید را فراهم می‌کنند. این شاخص می‌تواند به‌عنوان معیاری برای ارزیابی پایداری سامانه‌های تولید کشاورزی مورد استفاده قرار گیرند. بر اساس این شاخص‌ها، می‌توان استراتژی‌های مدیریتی مناسبی برای بهبود بهره‌وری آب و افزایش ارزش تغذیه‌ای محصولات کشاورزی تدوین کرد.

شاخص‌های محاسبه‌شده در این بخش شامل کارایی تغذیه‌ای بر اساس انرژی، پروتئین، کربوهیدرات، فیبر و قند می‌باشند که با استفاده از روابط (۶) تا (۱۰) به‌دست آمده‌اند (که‌رمان‌اوغلو و همکاران، ۲۰۲۰).

$$DE - \text{Energy (kcal/L)} = \frac{(y \times \text{USDA ref for Energy} \times 10)}{WF \times 1000} \quad (6)$$

$$IDE - \text{Protein (g/L)} = \frac{(y \times \text{USDA ref for Protein} \times 10)}{WF \times 1000} \quad (7)$$

$$IDE - \text{Sugar (g/L)} = \frac{(y \times \text{USDA ref Sugar} \times 10)}{WF \times 1000} \quad (8)$$

که در آن‌ها: Y بیانگر عملکرد محصول (تن در هکتار)، USDA ref مقدار مرجع محتوای آن مواد تغذیه‌ای در هر ۱۰۰ گرم سیب‌زمینی و WF نیز مجموع کل ردپای آب (مترمکعب در هکتار) می‌باشند. این شاخص‌ها به تصمیم‌گیران امکان می‌دهد تا نه تنها از منظر اقتصادی و زیست‌محیطی، بلکه از نظر تغذیه‌ای نیز اثربخشی سامانه‌های تولیدی را ارزیابی کرده و در راستای امنیت غذایی و استفاده پایدار از منابع، راهبردهای مناسب‌تری اتخاذ کنند. برای محاسبه شاخص‌های کارایی تغذیه‌ای آبیاری، مقادیر مرجع مربوط به انرژی، پروتئین، کربوهیدرات، فیبر و قند موجود در سیب‌زمینی از پایگاه داده ترکیب مواد غذایی (USDA 2020) مورد استفاده قرار گرفته است.

فرض می‌تواند بر مقدار برآوردی ردپای آب خاکستری اثر اندکی داشته باشد، ولی چارچوب تحلیلی مورد استفاده همچنان معتبر و قابل اتکا باقی می‌ماند. همچنین، ضریب ۱۰ در روابط شماره (۱) و (۲) به‌منظور تبدیل عمق آب از میلی‌متر به حجم آب برحسب مترمکعب در واحد سطح (هکتار) استفاده شد.

### بهره‌وری اقتصادی آب

بهره‌وری اقتصادی آب یکی از شاخص‌های کلیدی در تحلیل پایداری سامانه‌های تولید کشاورزی به‌شمار می‌رود. در این مطالعه، شاخص بهره‌وری اقتصادی آب برای محصول سیب‌زمینی در دشت قروه-دهگلان طی دوره آماری مورد نظر محاسبه شد. این شاخص تحت عنوان خالص سود به‌ازای واحد حجم آب مصرفی (NBPD)<sup>۱</sup> تعریف می‌شود و بر اساس رابطه زیر محاسبه شد (بهرامی و همکاران، ۱۳۹۹):

$$NBPD = \frac{NB}{TWF} \quad (5)$$

که در آن: NBPD نمایانگر بهره‌وری اقتصادی آب (تومان بر مترمکعب)، NB سود خالص حاصل از تولید در یک هکتار (بر حسب تومان) و TWF مقدار کل ردپای آب (مجموع اجزای آبی، سبز و خاکستری بر حسب مترمکعب) است. محاسبه این شاخص امکان مقایسه کارایی اقتصادی مصرف آب در تولید سیب‌زمینی را فراهم کرده و می‌تواند مبنایی برای تصمیم‌گیری در زمینه بهینه‌سازی مصرف منابع آب و افزایش تاب‌آوری سامانه‌های زراعی منطقه باشد.

### کارایی تغذیه‌ای آبیاری

در این پژوهش، به‌منظور تحلیل جامع‌تری از پایداری سامانه تولید سیب‌زمینی، شاخص‌های کارایی تغذیه‌ای آبیاری (IDE)<sup>۲</sup> نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند. این شاخص‌ها بیانگر میزان مواد مغذی تأمین‌شده از محصول به‌ازای هر لیتر آب مصرف‌شده (شامل اجزای ردپای آب) هستند و امکان ارزیابی هم‌زمان جنبه‌های

## نتایج و بحث

ردپای آب سیب‌زمینی به تفکیک اجزای آن طی دوره موردبررسی در جدول (۱) ارائه شده است. در دوره آماری مورد بررسی، میانگین ردپای کل آب برای تولید سیب‌زمینی در منطقه قروه ۴۳۱ مترمکعب بر تن و در منطقه دهگلان ۴۴۶ مترمکعب بر تن بوده است. این ارقام نشان می‌دهد که به‌طور متوسط، تولید سیب‌زمینی در منطقه دهگلان نسبت به قروه، ردپای آب بیشتری داشته است. ردپای آب به تفکیک اجزای آن شامل آب آبی، سبز و خاکستری در هر دو منطقه قابل توجه است. در منطقه قروه، میانگین ردپای آب آبی، سبز و خاکستری به ترتیب ۷/۱ و ۲۲۱ مترمکعب بر تن و در منطقه دهگلان به ترتیب ۲۲۸، ۵/۴۵ و ۲۱۲ مترمکعب بر تن بوده است. روند تغییرات ردپای آب طی سال‌های مختلف نشان می‌دهد که در منطقه قروه، بیشترین ردپای کل آب مربوط به سال ۱۳۹۲ با ۵۵۰ مترمکعب بر تن و کمترین آن مربوط به سال ۱۳۹۸ با ۳۶۹ مترمکعب بر تن بوده است. همچنین، در منطقه دهگلان، بیشترین ردپای کل آب در سال ۱۳۹۷ با ۵۳۶ مترمکعب بر تن و کمترین آن در سال ۱۳۹۸ با ۳۷۶ مترمکعب بر تن مشاهده شده است. این تغییرات می‌تواند ناشی از شرایط اقلیمی، مدیریت آبیاری و روش‌های کشت در سال‌های مختلف باشد.

بررسی اجزای ردپای آب نشان می‌دهد که در هر دو منطقه، سهم ردپای آب آبی و خاکستری بیشتر از ردپای آب سبز بوده است. این موضوع نشان‌دهنده وابستگی بالای تولید سیب‌زمینی در این مناطق به منابع آب آبیاری و همچنین تأثیر قابل توجه کودها و آفت‌کش‌ها در ایجاد آلودگی‌های آبی است. کمترین سهم در هر دو منطقه مربوط به ردپای آب سبز (بارندگی مؤثر) است که نشان می‌دهد تولید سیب‌زمینی در این مناطق عمدتاً متکی به آبیاری بوده و سهم بارندگی در تأمین نیاز آبی این محصول کمتر است. لازم به ذکر است که تاریخ کشت سیب‌زمینی در منطقه مورد مطالعه معمولاً در نیمه دوم اردیبهشت آغاز می‌شود و برداشت آن نیز در اواخر شهریور تا اوایل مهرماه صورت می‌گیرد. این زمان‌بندی در محاسبه نیاز آبی، تبخیر و تعرق و نیز تفکیک اجزای ردپای آب لحاظ شده است.

مقایسه دو منطقه قروه و دهگلان نشان می‌دهد که اگرچه ردپای کل آب در دهگلان بیشتر است، اما ترکیب اجزای ردپای آب در دو منطقه متفاوت است. در منطقه دهگلان، سهم ردپای آب آبی بیشتر از منطقه قروه است، در حالی که سهم ردپای آب خاکستری در منطقه قروه بیشتر است. این تفاوت‌ها می‌تواند ناشی از تفاوت در شیوه‌های مدیریت آبیاری، شرایط خاک و استفاده از نهاده‌های شیمیایی در دو منطقه باشد.

جدول ۱- ردپای آب سیب‌زمینی به تفکیک اجزای آن طی دوره آماری ۱۳۹۰-۱۴۰۰ (مترمکعب بر تن)

| سال     | قروه |     |         |             | دهگلان |      |         |             |
|---------|------|-----|---------|-------------|--------|------|---------|-------------|
|         | آبی  | سبز | خاکستری | ردپای کل آب | آبی    | سبز  | خاکستری | ردپای کل آب |
| 1390    | 211  | 6   | 202     | 419         | 242    | 3    | 202     | 447         |
| 1391    | 245  | 14  | 193     | 451         | 276    | 13   | 186     | 474         |
| 1392    | 209  | 12  | 329     | 550         | 249    | 4    | 161     | 415         |
| 1393    | 207  | 3   | 220     | 430         | 210    | 3    | 220     | 433         |
| 1394    | 208  | 4   | 210     | 423         | 255    | 4    | 204     | 463         |
| 1395    | 204  | 7   | 208     | 419         | 239    | 7    | 208     | 454         |
| 1396    | 176  | 10  | 212     | 398         | 186    | 3    | 212     | 401         |
| 1397    | 232  | 6   | 292     | 530         | 238    | 6    | 292     | 536         |
| 1398    | 177  | 11  | 181     | 369         | 188    | 7    | 181     | 376         |
| 1399    | 178  | 6   | 259     | 443         | 186    | 5    | 259     | 450         |
| 1400    | 223  | 4   | 179     | 406         | 224    | 4    | 190     | 419         |
| میانگین | 202  | 7.1 | 221     | 431         | 228    | 5.45 | 212     | 446         |

آبی: نمایانگر میزان مصرف آب‌های آبی (سطحی و زیرزمینی) است  
 سبز: میزان استفاده از آب باران ذخیره‌شده در خاک (رطوبت خاک)  
 خاکستری: بیانگر حجم آبی است که برای رقیق‌سازی آلاینده‌ها

در جدول (۲)، نتایج بهره‌وری اقتصادی آب (تومان بر مترمکعب) و شاخص‌های کارایی تغذیه‌ای آبیاری در تولید سیب‌زمینی طی دوره آماری ۱۳۹۰-۱۴۰۰ ارائه شده است. شاخص میانگین بهره‌وری اقتصادی آب در تولید سیب‌زمینی طی دوره مورد مطالعه در منطقه قروه ۳۸۸ تومان بر مترمکعب و در منطقه دهگلان ۳۷۲ تومان بر مترمکعب محاسبه شده است. این تفاوت ۱۶ تومانی در بهره‌وری اقتصادی نشان‌دهنده برتری نسبی منطقه قروه از نظر ارزش اقتصادی تولید شده به ازای هر واحد آب مصرفی است. عوامل متعددی از جمله مدیریت بهتر آبیاری، کیفیت بالاتر محصول، بازاریابی مناسب‌تر و یا هزینه‌های تولید پایین‌تر در منطقه قروه می‌تواند در این تفاوت مؤثر باشد. همچنین بررسی روند تغییرات سالانه بهره‌وری اقتصادی آب نشان می‌دهد که این شاخص در هر دو منطقه نوسانات قابل توجهی داشته است. در منطقه دشت قروه، بهره‌وری اقتصادی آب از ۲۸۱ تومان در سال ۱۳۹۰ به ۵۱۸ تومان بر مترمکعب در سال ۱۳۹۶ افزایش یافته که نشان‌دهنده رشد چشمگیر ۸۴/۳ درصدی است. پس از آن، این شاخص روند نزولی داشته و در سال ۱۴۰۰ به ۳۱۷ تومان بر مترمکعب کاهش یافته است. در منطقه دهگلان نیز روند مشابهی مشاهده می‌شود، به‌طوری‌که بهره‌وری اقتصادی آب از ۳۷۸ تومان در سال ۱۳۹۰ به ۴۸۵ تومان بر مترمکعب در سال ۱۳۹۶ افزایش یافته (رشد ۲۸/۳ درصدی) و سپس با نوساناتی به ۳۴۷ تومان بر مترمکعب در سال ۱۴۰۰ رسیده است.

جالب توجه است که در هر دو منطقه، سال ۱۳۹۶ نقطه اوج بهره‌وری اقتصادی آب بوده است. این هم‌زمانی می‌تواند ناشی از شرایط بازار مطلوب، قیمت‌های بالاتر محصول و یا شرایط اقلیمی مناسب در آن سال باشد. همچنین، پس از سال ۱۳۹۶، هر دو منطقه با کاهش بهره‌وری اقتصادی مواجه شده‌اند که می‌تواند به دلیل تغییرات اقلیمی، افزایش هزینه‌های تولید، کاهش قدرت خرید مصرف‌کنندگان و یا تغییرات قیمت بازار باشد. به‌منظور افزایش دقت تحلیل اقتصادی و مقایسه بین‌ساله،

قیمت‌های مربوط به محصول سیب‌زمینی و هزینه‌های تولید در تمامی سال‌های مورد بررسی، با استفاده از نرخ رسمی تورم توسط بانک مرکزی، به سال پایه ۱۴۰۰ تعدیل شده‌اند. بر اساس نتایج جدول (۲)، شاخص‌های کارایی تغذیه‌ای آبیاری در تولید سیب‌زمینی در دو منطقه قروه و دهگلان نشان می‌دهد که میانگین کارایی انرژی در منطقه قروه ۵/۹۵ کیلوکالری بر لیتر و در منطقه دهگلان ۵/۷۳ کیلوکالری بر لیتر بوده است. این اختلاف نشان می‌دهد که به‌طور متوسط، هر لیتر آب مصرفی در منطقه قروه حدود ۳/۸ درصد انرژی غذایی بیشتری نسبت به منطقه دهگلان تولید می‌کند. روند تغییرات این شاخص در طول دوره مطالعه نشان می‌دهد که بیشترین میزان کارایی انرژی در هر دو منطقه مربوط به سال ۱۳۹۸ با مقادیر ۸/۰۳ کیلوکالری بر لیتر در قروه و ۷/۲۱ کیلوکالری بر لیتر در دهگلان بوده است، این افزایش چشمگیر می‌تواند ناشی از بهبود تکنیک‌های آبیاری، استفاده از ارقام پرمحصول و توسعه تدریجی سامانه‌های آبیاری نوین در منطقه باشد. اگرچه داده‌های مربوط به سطح دقیق اراضی تحت پوشش آبیاری نوین برای برخی سال‌ها دارای ناپیوستگی و پراکندگی آماری بوده، اما اطلاعات دریافتی از جهاد کشاورزی شهرستان‌های قروه و دهگلان نشان می‌دهد که سطح بهره‌برداری از سامانه‌های تحت فشار در سال‌های اخیر روندی افزایشی داشته است. همچنین، استفاده از ارقام پرمحصول نیز نقش مهمی در افزایش عملکرد داشته است. در مناطق مورد مطالعه، ارقام رایج سیب‌زمینی شامل آگربا، پانامرا، اسپریت، ساگیتا، کولومبا، سیفرا، جلی و سانیتا می‌باشند که با توجه به سازگاری اقلیمی و پتانسیل تولید بالا، مورد استقبال کشاورزان قرار گرفته‌اند. دیگر نتایج جدول نشان می‌دهد که کمترین میزان کارایی انرژی در منطقه قروه مربوط به سال ۱۳۹۷ و در منطقه دهگلان نیز مربوط به همان سال با ۴/۱۵ کیلوکالری بر لیتر بوده است. این کاهش هم‌زمان در هر دو منطقه می‌تواند نشان‌دهنده شرایط نامساعد اقلیمی یا چالش‌های مدیریتی مشترک در آن سال باشد.

جدول ۲- محاسبه بهره‌وری اقتصادی آب و شاخص‌های کارایی تغذیه‌ای آبیاری در دشت قروه-دهگلان (\* برحسب تومان بر مترمکعب)

| سال     | بهره‌وری | قروه                       |         |            |       |       | دهگلان                     |         |            |       |       |          |       |       |       |      |
|---------|----------|----------------------------|---------|------------|-------|-------|----------------------------|---------|------------|-------|-------|----------|-------|-------|-------|------|
|         |          | شاخص‌های کارایی رژیم غذایی |         |            |       |       | شاخص‌های کارایی رژیم غذایی |         |            |       |       |          |       |       |       |      |
|         |          | انرژی                      | پروتئین | کربوهیدرات | فیبر  | قند   | انرژی                      | پروتئین | کربوهیدرات | فیبر  | قند   |          |       |       |       |      |
| آب*     | (kcal/L) | (g/L)                      | (g/L)   | (g/L)      | (g/L) | آب*   | (kcal/L)                   | (g/L)   | (g/L)      | (g/L) | آب*   | (kcal/L) | (g/L) | (g/L) | (g/L) |      |
| 1390    | 281      | 4.47                       | 0.011   | 0.09       | 0.011 | 0.004 | 378                        | 5.41    | 0.014      | 0.12  | 0.015 | 0.006    | 378   | 5.41  | 0.014 | 0.12 |
| 1391    | 466      | 6.63                       | 0.018   | 0.15       | 0.019 | 0.007 | 308                        | 4.40    | 0.012      | 0.10  | 0.012 | 0.005    | 308   | 4.40  | 0.012 | 0.10 |
| 1392    | 350      | 5.08                       | 0.014   | 0.12       | 0.014 | 0.007 | 391                        | 5.64    | 0.015      | 0.13  | 0.016 | 0.006    | 391   | 5.64  | 0.015 | 0.13 |
| 1393    | 396      | 6.06                       | 0.017   | 0.14       | 0.017 | 0.006 | 374                        | 5.69    | 0.013      | 0.13  | 0.016 | 0.006    | 374   | 5.69  | 0.013 | 0.13 |
| 1394    | 395      | 5.89                       | 0.016   | 0.13       | 0.017 | 0.007 | 342                        | 5.01    | 0.015      | 0.11  | 0.014 | 0.006    | 342   | 5.01  | 0.015 | 0.11 |
| 1395    | 395      | 5.78                       | 0.016   | 0.13       | 0.016 | 0.007 | 367                        | 5.49    | 0.019      | 0.13  | 0.016 | 0.006    | 367   | 5.49  | 0.019 | 0.13 |
| 1396    | 518      | 7.57                       | 0.02    | 0.17       | 0.021 | 0.006 | 485                        | 7.18    | 0.011      | 0.17  | 0.020 | 0.008    | 485   | 7.18  | 0.011 | 0.17 |
| 1397    | 273      | 4.37                       | 0.012   | 0.10       | 0.012 | 0.008 | 259                        | 4.15    | 0.019      | 0.09  | 0.012 | 0.005    | 259   | 4.15  | 0.019 | 0.09 |
| 1398    | 520      | 8.03                       | 0.022   | 0.19       | 0.023 | 0.005 | 455                        | 7.21    | 0.017      | 0.17  | 0.020 | 0.008    | 455   | 7.21  | 0.017 | 0.17 |
| 1399    | 362      | 6.18                       | 0.017   | 0.14       | 0.018 | 0.009 | 390                        | 6.49    | 0.017      | 0.15  | 0.018 | 0.007    | 390   | 6.49  | 0.017 | 0.15 |
| 1400    | 317      | 5.80                       | 0.016   | 0.13       | 0.016 | 0.007 | 347                        | 6.37    | 0.015      | 0.13  | 0.018 | 0.007    | 347   | 6.37  | 0.015 | 0.13 |
| میانگین | 388      | 5.95                       | 0.016   | 0.14       | 0.016 | 0.007 | 372                        | 5.73    | 0.016      | 0.14  | 0.016 | 0.006    | 372   | 5.73  | 0.016 | 0.14 |

میانگین کارایی پروتئین در منطقه قروه ۰/۰۱۶ گرم بر لیتر و در منطقه دهگلان ۰/۰۲ گرم بر لیتر بوده است که نشان می‌دهد منطقه دهگلان حدود ۲۵ درصد کارایی بالاتری در تولید پروتئین به ازای واحد آب مصرفی دارد. بیشترین میزان کارایی پروتئین در منطقه قروه در سال ۱۳۹۸ و در منطقه دهگلان در سال‌های ۱۳۹۶ و ۱۳۹۸ مشاهده شده است. تفاوت در کارایی تولید پروتئین بین دو منطقه می‌تواند ناشی از عوامل مختلفی از جمله تفاوت در ویژگی‌های خاک، تنوع ارقام مورد استفاده، مدیریت تغذیه گیاهی و شرایط اقلیمی باشد. بررسی‌های میدانی و گزارش‌های جهاد کشاورزی نشان داد که در منطقه دهگلان، مصرف نیتروژن به صورت هدفمندتر و مطابق با مراحل رشدی حساس گیاه انجام می‌شود و کشاورزان از تجربه بالاتری در کاربرد مؤثر کودهای ازته و مرغی برخوردارند. این مسئله می‌تواند منجر به بهبود جذب نیتروژن و افزایش کیفیت پروتئینی محصول شود. در مقابل، در منطقه قروه علی‌رغم مصرف بالاتر کودهای پایه، بهره‌گیری از نیتروژن بهینه نبوده که ممکن است بر کارایی نهایی تولید پروتئین تأثیر منفی داشته باشد.

همچنین با توجه به نتایج جدول (۲) مشاهده می‌شود که میانگین کارایی کربوهیدرات در هر دو منطقه ۰/۱۴ گرم بر لیتر بوده است که نشان می‌دهد علی‌رغم تفاوت‌ها در سایر شاخص‌ها، از نظر تولید کربوهیدرات به ازای واحد

آب مصرفی، هر دو منطقه عملکرد مشابهی دارند. بیشترین میزان کارایی کربوهیدرات در منطقه قروه مربوط به سال ۱۳۹۸ با ۰/۱۹ گرم بر لیتر و در منطقه دهگلان نیز مربوط به سال‌های ۱۳۹۶ و ۱۳۹۸ با ۰/۱۷ گرم بر لیتر بوده است. کمترین مقدار این شاخص نیز در قروه مربوط به سال ۱۳۹۰ با ۰/۰۹ گرم بر لیتر و در دهگلان مربوط به سال ۱۳۹۷ با ۰/۰۹ گرم بر لیتر است. این تشابه در کارایی کربوهیدرات می‌تواند نشان‌دهنده اثرات مشابه شرایط محیطی و مدیریتی بر تجمع نشاسته در سیب‌زمینی در هر دو منطقه باشد. از آنجاکه کربوهیدرات‌ها مهم‌ترین ترکیب مغذی در سیب‌زمینی هستند، این یافته از اهمیت زیادی برخوردار است.

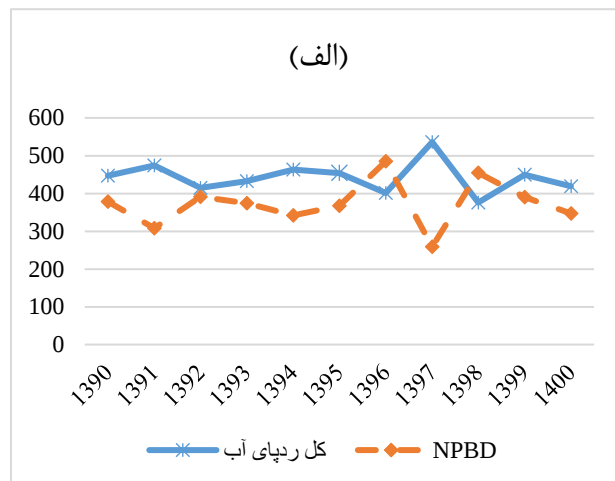
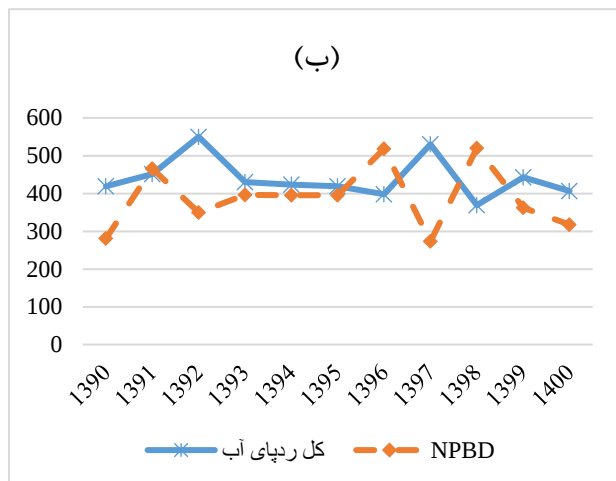
میانگین کارایی فیبر نشان می‌دهد که در منطقه قروه ۰/۰۱۶ گرم بر لیتر و در منطقه دهگلان ۰/۰۲ گرم بر لیتر بوده است که نشان‌دهنده برتری ۲۵ درصدی منطقه دهگلان در این شاخص است. فیبر رژیمی یک ترکیب مهم از نظر سلامتی است و کارایی بالاتر تولید آن در منطقه دهگلان می‌تواند یک مزیت از نظر تغذیه‌ای محسوب شود. این تفاوت می‌تواند ناشی از تفاوت در ارقام کشت‌شده، شرایط خاک و یا مدیریت زراعی در دو منطقه باشد. همچنین میانگین کارایی قند در منطقه قروه برابر ۰/۰۰۷ گرم بر لیتر و در منطقه دهگلان ۰/۰۱ گرم بر لیتر بوده است. این مقادیر نشان‌دهنده برتری قابل توجه (حدود ۴۳

درصدی) منطقه دهگلان در این شاخص است. بیشترین میزان کارایی قند در منطقه قروه در سال ۱۳۹۹ با ۰/۰۰۹ گرم بر لیتر و در منطقه دهگلان در سال‌های ۱۳۹۶ و ۱۳۹۸ با ۰/۰۰۸ گرم بر لیتر مشاهده شده است. این تفاوت چشمگیر در کارایی قند نیز می‌تواند به دلیل تفاوت در شرایط اقلیمی، خصوصیات خاک و یا مدیریت آبیاری باشد که بر متابولیسم قندها در گیاه تأثیر می‌گذارد. از آنجا که میزان قند سیب‌زمینی بر طعم و بافت آن تأثیر می‌گذارد، این یافته می‌تواند از نظر کیفیت محصول نیز حائز اهمیت باشد.

مقایسه شاخص‌های کارایی تغذیه‌ای بین دو منطقه نشان می‌دهد که به‌جز شاخص انرژی که در منطقه قروه بیشتر است، سایر شاخص‌های کارایی تغذیه‌ای شامل پروتئین، فیبر و قند در منطقه دهگلان بیشتر از منطقه قروه بوده است. این الگوی متفاوت می‌تواند ناشی از مجموعه‌ای از عوامل محیطی، مدیریتی و ژنتیکی باشد. به‌عنوان مثال، تفاوت در نوع خاک، ارقام کشت‌شده، الگوی آبیاری، مدیریت کود و حاصلخیزی خاک و شرایط اقلیمی می‌تواند بر ترکیب شیمیایی سیب‌زمینی و در نتیجه شاخص‌های کارایی تغذیه‌ای تأثیر بگذارد. این یافته‌ها می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های آبی برای مدیریت پایدار منابع آب، افزایش بهره‌وری اقتصادی و بهبود ارزش تغذیه‌ای محصولات کشاورزی در این منطقه مورد استفاده قرار گیرد. همچنین، بررسی روند تغییرات سالانه شاخص‌ها نشان می‌دهد که در هر دو منطقه، سال‌های ۱۳۹۶ و ۱۳۹۸ از نظر اکثر شاخص‌های کارایی تغذیه‌ای، سال‌های برتر بوده‌اند. در مقابل، سال ۱۳۹۷ در هر دو منطقه با افت قابل توجه در اکثر شاخص‌ها همراه بوده است. این کاهش چشمگیر در شاخص‌های کارایی تغذیه‌ای در سال ۱۳۹۷ را می‌توان به

وقوع خشکسالی شدید در این سال نسبت داد. خشکسالی ۱۳۹۷ یکی از شدیدترین خشکسالی‌های دهه اخیر بود که با کاهش قابل توجه بارندگی و افزایش دما، تأثیر منفی قابل توجهی بر تولیدات کشاورزی منطقه گذاشت. همچنین، روند کلی شاخص‌ها نشان می‌دهد که در سال‌های اخیر، به‌ویژه پس از سال ۱۳۹۸، اکثر شاخص‌ها در هر دو منطقه روند نزولی داشته‌اند. این می‌تواند هشدار برای سیاست‌گذاران و کشاورزان منطقه باشد که نیاز به بازنگری در روش‌های مدیریت آب، تغذیه گیاهی و سایر عملیات زراعی وجود دارد.

ارتباط بین شاخص ردپای آب و بهره‌وری اقتصادی آب (NPBD) برای دشت‌های قروه و دهگلان در شکل (۲) نشان داده شده است. بر اساس نتایج در هر دو منطقه، شاخص کل ردپای آب و بهره‌وری اقتصادی نوسانات قابل توجهی داشته‌اند. نکته قابل تأمل آنکه در سال ۱۳۹۷، هر دو منطقه کاهش چشمگیری در شاخص NPBD را نشان می‌دهند که می‌تواند مرتبط با خشکسالی این سال باشد. در منطقه دهگلان (نمودار الف)، نوسانات شاخص ردپای آب ملایم‌تر بوده، درحالی‌که در قروه (نمودار ب) نوسانات شدیدتری به‌ویژه افزایش قابل توجه در سال ۱۳۹۲ مشاهده می‌شود. همچنین، در سال‌های ۱۳۹۸ و ۱۳۹۶، هر دو منطقه افزایش قابل توجهی در شاخص NPBD نشان می‌دهند که نشان‌دهنده بهبود بهره‌وری اقتصادی در این سال‌هاست. این تحلیل نشان می‌دهد که عوامل اقلیمی مانند خشکسالی می‌توانند تأثیر مستقیمی بر بهره‌وری اقتصادی در هر دو منطقه داشته باشند، اگرچه الگوی پاسخ در دو منطقه کمی متفاوت است.



شکل ۲- ارتباط بین ردپای آب و بهره‌وری اقتصادی برای دشت‌های الف) دهگلان و ب) قروه

آبیاری در قروه است. بررسی روند تاریخی این شاخص‌ها آشکار می‌سازد که بهره‌وری اقتصادی آب در سال‌های خشکسالی (به‌ویژه سال ۱۳۹۷) با افت چشمگیری مواجه شده که هم‌زمانی آن با نوسانات قیمت سیب‌زمینی و افزایش هزینه‌های تولید، آسیب‌پذیری سامانه کشاورزی منطقه را در برابر تغییرات اقلیمی و اقتصادی نمایان می‌سازد.

ارزیابی شاخص‌های کارایی تغذیه‌ای آبیاری نیز ابعاد جدیدی از اهمیت بهینه‌سازی مصرف آب را آشکار می‌کند. هر لیتر آب مصرفی در قروه به‌طور میانگین ۵/۹۵ کیلوکالری انرژی و ۰/۰۱۶ گرم پروتئین تولید می‌کند، درحالی‌که این مقادیر در دهگلان به ترتیب ۵/۷۳ کیلوکالری و ۰/۰۲ گرم است. این اختلاف، متأثر از تفاوت در سامانه‌های آبیاری، کیفیت خاک و راهبردهای مدیریت مزرعه است. یافته‌های این پژوهش، همسو با نتایج پژوهش‌های ژنگ و همکاران (۲۰۱۶) و کهرمان‌اوغلو و همکاران (۲۰۲۰)، بر اهمیت رویکرد تلفیقی در ارزیابی پایداری سامانه‌های کشاورزی تأکید می‌ورزد.

بر اساس یافته‌های این پژوهش، پیشنهاد می‌شود به‌منظور ارتقای پایداری مصرف آب در منطقه، اقدامات اصلاحی بر مبنای نتایج واقعی شاخص‌ها صورت گیرد. با توجه به عملکرد بالاتر شاخص‌های تغذیه‌ای (به‌ویژه پروتئین و کربوهیدرات) در منطقه دهگلان، الگوبرداری از

### نتیجه‌گیری و پیشنهادها

پژوهش حاضر با رویکردی جامع‌نگر به ارزیابی شاخص‌های ردپای آب، بهره‌وری اقتصادی و کارایی تغذیه‌ای آبیاری در تولید سیب‌زمینی دشت قروه-دهگلان در استان کردستان پرداخته است. یافته‌های این پژوهش، تصویری چندبعدی از وضعیت بحرانی منابع آبی و چالش‌های پیش روی کشاورزی پایدار در این منطقه ارائه می‌دهد. نتایج پژوهش نشان‌دهنده میانگین ردپای کل آب معادل ۴۳۱ و ۴۴۶ مترمکعب بر تن به ترتیب برای مناطق قروه و دهگلان است. حدود ۸۰ درصد از این مقدار را ردپای آب آبی (عمدتاً منابع آب زیرزمینی) تشکیل می‌دهد. این وابستگی شدید به آب‌های زیرزمینی، در راستای ممنوعیت بهره‌برداری از آبخوان‌های منطقه از دهه ۱۳۷۰، بیانگر فشار فزاینده بر منابع تجدیدنپذیر و روند نگران‌کننده تخلیه ذخایر استراتژیک آب است. علاوه بر این، افزایش معنادار ردپای آب خاکستری در سال‌های خشک (به‌ویژه سال ۱۳۹۲)، پیامد مستقیم کاربرد بی‌رویه کودهای شیمیایی در واکنش به تنش آبی است که آلودگی منابع آب را تشدید می‌کند. از دیدگاه اقتصادی، بهره‌وری آب در منطقه قروه با میانگین ۳۸۸ تومان بر مترمکعب، از دهگلان با میانگین ۳۷۲ تومان بر مترمکعب پیشی گرفته است. این تفاوت معنادار عمدتاً ناشی از عملکرد بالاتر محصول، مدیریت مؤثرتر نهاده‌ها و بهینه‌سازی هزینه‌های

کمی اکتفا نشود و ارزش تغذیه‌ای محصولات نیز در سیاست‌گذاری‌های کشاورزی مدنظر قرار گیرد. این پژوهش ضرورت گذار پارادایمی از رویکرد «تأمین آب بیشتر» به سمت «مدیریت کارآمدتر آب موجود» را برجسته می‌سازد. رویکرد مذکور می‌تواند الگویی کاربردی برای سایر دشت‌های بحرانی کشور باشد و در راستای تحقق اهداف توسعه پایدار، به‌ویژه هدف ششم (آب پاک و بهداشت) و دوم (گرسنگی صفر)، گامی مؤثر محسوب می‌شود.

### تعارض منافع

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

مدیریت تغذیه‌ای مؤثر این منطقه می‌تواند به سایر مناطق نیز تعمیم یابد. نوسانات شدید بهره‌وری اقتصادی آب در سال‌های خشک مانند ۱۳۹۷ نیز لزوم طراحی سازوکارهای حمایتی اقتصادی از جمله بیمه کشاورزی یا صندوق‌های جبرانی را آشکار می‌سازد. همچنین سهم بالای ردپای آب خاکستری در هر دو منطقه نشان می‌دهد که بهینه‌سازی مصرف کودهای شیمیایی و به‌ویژه نیتروژنی، از طریق آموزش و زمان‌بندی صحیح، می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی در کاهش بار آلودگی و افزایش کارایی زیست‌محیطی داشته باشد. اختلاف ردپای کل آب بین دو منطقه نیز ضرورت برنامه‌ریزی منطقه‌ای برای اصلاح مدیریت آبیاری و بهره‌وری منابع آب را نشان می‌دهد. افزون بر این، با توجه به تفاوت شاخص‌های تغذیه‌ای در سال‌های مختلف، توصیه می‌شود در ارزیابی عملکرد زراعی، صرفاً به تولید

### فهرست منابع

۱. اسعدی، محمدعلی، وکیل‌پور، محمدحسن، مرتضوی، سید ابوالقاسم و نعمتی فرج، طاهره. ۱۳۹۸. برآورد ارزش اقتصادی آب مصرفی از رهیافت‌های تمایل به پرداخت کشاورزان سیب‌زمینی‌کار و ارزش تولید نهایی. مجله تحقیقات آب‌وخاک ایران، ۵۰(۴): ۱۰۳۷-۱۰۲۳.
۲. بهرامی، مهدی، اسعدی، محمدعلی و خلیلیان، صادق. ۱۳۹۹. ارزیابی شاخص‌های بهره‌وری آب با تأکید بر آبیاری‌های نوین و سنتی در محصولات زراعی شهرستان شهریار. مجله محیط‌زیست و مهندسی آب، ۶(۳): ۲۹۳-۱۸۵. <https://doi.org/10.22034/jewe.2020.225362.1354>
۳. پیری، حلیمه و سارانی، رامین. ۱۳۹۵. بررسی بهره‌وری اقتصادی محصولات کشاورزی استان سیستان و بلوچستان با رویکرد ردپای آب. مجله تحقیقات آب‌وخاک ایران، ۵۱(۵)، ۱۱۰۴-۱۰۹۳.
۴. سازمان جهاد کشاورزی استان کردستان. ۱۴۰۱. گزارش‌های سالیانه. <http://kurdistan.agri-jahad.ir> <https://doi.org/10.22059/ijswr.2020.289567.668325>
۵. شاهرخ نیا، محمدعلی و باغانی، جواد. ۱۴۰۰. بررسی میزان آب کاربردی و بهره‌وری آب مزارع سیب‌زمینی در شرایط زارعین استان فارس. مجله آبیاری و زهکشی ایران، ۱۵(۳): ۶۳۵-۶۲۴.
۶. شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان کردستان. ۱۴۰۰. گزارش‌های امور آب استان. <https://www.kdrw.ir>
۷. صفدری، مهدی، حکمت‌نیا، مهران و خواجه دادمیری، الهه. ۱۴۰۰. کارایی مصرف آب گندم از دیدگاه ردپای آب (مطالعه موردی: استان سیستان و بلوچستان). نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۱۵(۶): ۱۴۸۰-۱۴۶۹.
۸. فتحی تیلکو، زینب، فتحی، پرویز و حسین پناهی، فرزاد. ۱۳۹۵. تأثیر عمق جایگذاری نوار آبیاری و میزان آب کاربردی بر عملکرد و بهره‌وری آب سیب‌زمینی در دشت دهگلان. مجله آب‌وخاک، ۳۰(۵): ۱۴۰۲-۱۳۹۴.

<https://doi.org/10.22067/jsv.v0i0.45453>

۹. کریمی، محمد، حقایقی مقدم، سید ابوالقاسم و جلینی، محمد. ۱۴۰۲. بررسی حجم آب آبیاری و بهره‌وری آب کاربردی در مزارع جو استان خراسان رضوی (سبزوار و نیشابور). تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی،

<https://doi.org/10.22092/idser.2023.363803.1561> ۸۶-۷۰: (۹۱)۲۴

10. Asaadi, M. A., Khalilian, S. and Mousavi, S. H. 2021. Evaluation of agricultural sustainability indicators and determination of cropping patterns with emphasis on deficit irrigation strategy: The case of the Qazvin irrigation network, Iran. *Water Conservation Science and Engineering*, 6(1):11-23.
11. Boretti, A. and Rosa, L. 2019. Reassessing the projections of the world water development report. *NPJ Clean Water*, 2(1), 15.
12. Deihimfard, R., Rahimi-Moghaddam, S., Collins, B. and Azizi, K. 2022. Future climate change could reduce irrigated and rainfed wheat water footprint in arid environments. *Science of the Total Environment*, 807, 150991.
13. Drastig, K., Singh, R., Telesca, F. M., Carra, S. Z. and Jordan, J. 2023. A review of nutritional water productivity (NWP) in agriculture: why it is promoted and how it is assessed? *Water*, 15(24), 4278.
14. FAO. 2023. The state of food security and nutrition in the world 2023. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy
15. Hoekstra, A. Y. and Chapagain, A. K. 2007. Water footprints of nations: water use by people as a function of their consumption pattern. *Water resources management*, 21(1): 35-48.
16. Kahramanoğlu, İ., Usanmaz, S. and Alas, T. 2020. Water footprint and irrigation use efficiency of important crops in Northern Cyprus from an environmental, economic and dietary perspective. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 27(1): 134-141.
17. Kahramanoğlu, İ., Usanmaz, S. and Alas, T. 2020. Water footprint and irrigation use efficiency of important crops in Northern Cyprus from an environmental, economic and dietary perspective. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 27(1): 134-141.
18. Kunz, R., Reddy, K., Mthembu, T., Lake, S., Mabhaudhi, T., Chimonyo, V. and Naiken, V. 2024. Crop and Nutritional Water Productivity of Sweet Potato and Taro (No. 3124/1, p. 24). WRC Report.
19. Liu, X., Shi, L., Engel, B. A., Sun, S., Zhao, X., Wu, P. and Wang, Y. 2020. New challenges of food security in Northwest China: Water footprint and virtual water perspective. *Journal of Cleaner Production*, 245, 118939.
20. Mekonnen, M. M. and Hoekstra, A. Y. 2010. A global and high-resolution assessment of the green, blue and grey water footprint of wheat. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(7): 1259-1276.
21. Mizyed, A., Mogheir, Y. and Hamada, M. 2025. Assessment of blue and green agricultural water footprint in the Gaza Strip, Palestine. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 21(2): 326-334.
22. Prasad, R., Hochmuth, G. J. and Boote, K. J. 2015. Estimation of nitrogen pools in irrigated potato production on sandy soil using the model SUBSTOR. *PloS One*, 10(1), e0117891.
23. USDA. 2020. USDA FoodData Central. Printed at. (Accessed 12 March 2020). <https://ndb.nal.usda.gov/ndb/nutrients/index>
24. Wu, M., Li, Y., Xiao, J., Guo, X. and Cao, X. 2022. Blue, green, and grey water footprints assessment for paddy irrigation-drainage system. *Journal of Environmental Management*, 302, 114116.
25. Zhang, Y., Sun, M., Hong, J., Han, X., He, J., Shi, W. and Li, X. 2016. Environmental footprint of aluminum production in China. *Journal of Cleaner Production*, 133: 1242-1251.



## بررسی عوامل مؤثر بر میزان برداشت آب زیرزمینی در چاه‌های کشاورزی:

### مطالعه موردی استان گلستان

علی کرامت‌زاده\* , سیدمصطفی حسینی، فرشید اشراقی و مسعود عنایت

دانشیار، گروه مهندسی اقتصاد کشاورزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

[alikeramatzadeh@gau.ac.ir](mailto:alikeramatzadeh@gau.ac.ir)

دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی اقتصاد کشاورزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

[hsmh24ll@gmail.com](mailto:hsmh24ll@gmail.com)

دانشیار، گروه مهندسی اقتصاد کشاورزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

[eshraghi@gau.ac.ir](mailto:eshraghi@gau.ac.ir)

دانش آموخته دکتری، گروه زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.

[enayat@gmail.com](mailto:enayat@gmail.com)

دریافت: فروردین ۱۴۰۴ و پذیرش: تیر ۱۴۰۴

#### چکیده

این پژوهش به بررسی عوامل مؤثر بر میزان برداشت آب زیرزمینی توسط کشاورزان و بهره‌برداران در استان گلستان پرداخته است. اطلاعات چاه‌های عمیق کشاورزی استان در سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۱ از طریق تکمیل تعداد ۱۳۱ پرسشنامه با استفاده از روش نمونه‌گیری تصادفی طبقه‌ای جمع‌آوری شد. سپس عوامل مؤثر بر میزان برداشت آب چاه در استان گلستان از طریق فرم‌های مختلف توابع برآورد و پس از ارزیابی فرم تابع کاب-داگلاس به‌عنوان فرم برتر انتخاب گردید. نتایج نشان داد کاهش یک درصدی دبی چاه‌های کشاورزی در منطقه، منجر به کاهش ۰/۹۷ درصد در میزان برداشت آب از چاه‌ها توسط بهره‌برداران و کشاورزان منطقه می‌شود. با کاهش یک درصدی از اراضی تحت پوشش هر چاه، برداشت آب از چاه به میزان ۰/۰۳ درصد کاهش می‌یابد. همچنین، الزام بهره‌برداران به کاهش یک درصدی ساعت استفاده از چاه در طول روز، میزان برداشت آب از چاه را ۰/۹۵ درصد کاهش و کاهش یک درصدی تعداد روزهای استفاده از چاه در طول سال میزان برداشت آب از چاه را ۰/۹۶ درصد کاهش می‌دهد. ولی به دلیل پایین بودن هزینه برق مصرفی، ارتباط میان هزینه برق مصرفی و میزان برداشت آب چاه مثبت است و تا زمانی که سهم هزینه برق مصرفی از کل هزینه تولید افزایش نیابد، افزایش قیمت برق منجر به کاهش برداشت آب زیرزمینی نخواهد شد؛ بنابراین سیاست‌گذاران حوزه منابع آب می‌توانند از ترکیبی از ابزارهای مختلف اقتصادی و فنی برای دستیابی به طرح تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی در آبخوان‌های استان استفاده کنند.

واژه‌های کلیدی: آبخوان، مدیریت منابع آب، مدل رگرسیونی، هزینه برق مصرفی کشاورزی

\* - آدرس ایمیل نویسنده مسئول: [alikeramatzadeh@gau.ac.ir](mailto:alikeramatzadeh@gau.ac.ir)



## مقدمه

بخش کشاورزی تکیه‌گاه اساسی در تأمین نیازهای اقتصادی و امنیت غذایی کشور بوده و نهاده آب نیز به‌عنوان نهاده اصلی در تولید محصولات کشاورزی، جایگاه ویژه‌ای در توسعه پایدار بخش کشاورزی و توسعه اقتصادی سایر بخش‌ها دارد (کرامت‌زاده و همکاران، ۱۳۸۵). سهم بخش کشاورزی از آب مصرفی در سطح دنیا معادل ۶۹ درصد، در خاورمیانه معادل ۸۴ درصد و در ایران معادل ۹۲ درصد است (مرزبان و همکاران، ۱۳۹۸). آمارها نشان می‌دهد که حدود ۴۶ درصد از تولیدات محصولات زراعی جهان از اراضی آبی به دست می‌آید. ولی در ایران در سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۱ از حدود ۸۴ میلیون تن انواع محصولات زراعی برداشت شده، حدود ۷۶ میلیون تن (۹۰/۱۶ درصد) متعلق به اراضی آبی است (وزارت جهاد کشاورزی، ۱۴۰۳). این آمار بیانگر وابستگی شدید تولیدات محصولات زراعی ایران به منابع آب است. از یک سو، ایران در منطقه خشک و نیمه‌خشک کره زمین قرار گرفته و کشاورزی در این مناطق بیشتر به منابع آب‌های زیرزمینی وابسته است (صبوحی و همکاران، ۱۳۸۶) و از سوی دیگر نیز رشد فزاینده جمعیت و در پی آن، نیاز به افزایش تولید محصولات کشاورزی و همچنین رشد صنایع، گسترش شهرنشینی همراه با ارتقاء بهداشت و رفاه عمومی سبب افزایش مصرف آب به‌ویژه، منابع آب زیرزمینی شده است (کرامت‌زاده و همکاران، ۱۴۰۲).

استان گلستان یکی از استان‌های در معرض خشک‌سالی است و طی سالیان اخیر برداشت بیش از اندازه از منابع آب زیرزمینی موجب کاهش شدید سطح ایستابی و افت کیفیت آب زیرزمینی شده است (پاکدل و همکاران، ۱۳۹۹). بررسی سطح آب زیرزمینی در آبخوان دشت گرگان برای بازه زمانی ۳۰ ساله نشان می‌دهد که بیشترین افت صورت گرفته در سال‌های ۱۳۸۲-۱۳۷۲ رخ داده است، به‌طوری‌که در این دهه، سطح آب زیرزمینی حدود ۱۲ متر کاهش داشته است. سطح و حجم آب زیرزمینی در آبخوان‌های عمیق استان گلستان به‌طور میانگین در سال

۱۴۰۲ نسبت به سال ۱۴۰۱ به ترتیب ۲/۷۱ متر و ۳۱ میلیون مترمکعب کاهش داشته است. بیشترین کاهش سطح و حجم آب زیرزمینی در ماه‌های سال ۱۴۰۲ نسبت به ماه مشابه سال گذشته مربوط به خردادماه، معادل ۴/۲ متر و ۴۸/۴ میلیون مترمکعب است (شرکت سهامی آب منطقه‌ای گلستان، ۱۴۰۳). با توجه به روند کاهشی ذخیره آبخوان‌های استان گلستان و وابستگی کشاورزی استان به منابع آب زیرزمینی، کاهش سطح آبخوان‌ها یکی از چالش‌های پیش‌روی مدیران و سیاست‌گذاران در استان است. استحصال بی‌رویه آب زیرزمینی بر کیفیت، کمیت و مکان آب و به گونه‌ای بر دیگر مصرف‌کنندگان و محیط‌زیست اثر می‌گذارد. نتیجه این اثرات در طول زمان، افزایش هزینه‌های عمیق کردن چاه و شور شدن آب‌ها به دلیل کاهش سطح آب زیرزمینی است (لیندگرن، ۱۹۹۹). این موضوع موجب افزایش هزینه‌های مالی برداشت آب‌های زیرزمینی می‌شود. از جنبه سرمایه‌گذاری، افزایش هزینه‌های حفاری، لوله‌گذاری، موتورپمپ، از جنبه بهره‌برداری، افزایش هزینه انرژی بیشتر برای پمپاژ حجم معینی آب (افزایش هزینه‌های متغیر پمپاژ آب ناشی از افزایش عمق چاه) و همچنین از جنبه زیست‌محیطی چالش‌هایی همچون خشک شدن چاه‌های آب و فرونشست زمین را به دنبال دارد (سیدان و همکاران، ۱۳۹۵). با توجه به روند افزایشی کاهش سطح آب‌های زیرزمینی دشت گرگان و لزوم اجرای طرح تعادل-بخشی منابع آب زیرزمینی در استان گلستان، شناخت و بررسی اثر عوامل مؤثر بر میزان برداشت آب از چاه‌های عمیق کشاورزی در این استان می‌تواند کمک مؤثری به شناسایی سیاست‌های مناسب در راستای جلوگیری از برداشت بیش‌ازحد از آبخوان دشت گرگان و توقف روند افزایشی برداشت آب از منابع آب زیرزمینی کند. در این راستا، هدف این پژوهش، بررسی عوامل مؤثر بر میزان برداشت آب زیرزمینی توسط کشاورزان و بهره‌برداران در استان گلستان است.

توانا و صبوحی (۱۳۸۶) در مطالعه خود به بررسی راهکارهای کاهش بهره‌برداری منابع آب زیرزمینی

در مزارع کشاورزی استان فارس و شناسایی عوامل ایجاد آثار جانبی برداشت بیش از حد از سفره‌های آب زیرزمینی با استفاده از معادله تابع کاب-داگلاس پرداختند. نتایج نشان داد، احداث چاه در جایی از مزرعه که حداقل فاصله را نسبت به حدود زمین زراعی داشته باشد، از مصرف بیش از حد آب و در نتیجه ایجاد آثار جانبی منفی جلوگیری می‌کند. نتایج همچنین نشان داد که با افزایش قیمت آب نمی‌توان به هدف کاهش مصرف آب دست یافت و هزینه استحصال آب تأثیر چندانی بر بازده خالص مزرعه و در نتیجه دسترسی اقتصادی به منابع آب زیرزمینی ندارد اما می‌توان با افزایش نیروی کار در مزرعه و کاهش آب مصرفی، افت بازده خالص مزرعه ناشی از کاهش مصرف آب را جبران کرد.

صبوحی و همکاران (۱۳۸۶) در پژوهش خود به ارزیابی راهکارهای مدیریت منابع آب زیرزمینی در دشت نریمانی در استان خراسان پرداختند. در این بررسی، راهکارهای مختلف مدیریت منابع آب زیرزمینی شامل برداشت آزاد (کنترل نشده)، کنترل بهینه برداشت از آب‌های زیرزمینی، سیاست مالیاتی، دخالت دولت، کنترل قانونی و همکاری دولت و تشکل‌های بهره‌برداران مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که راهکار بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی و سیاست مالیاتی (مالیات بر اساس ارزش و مالیات به‌ازای هر واحد مصرف از منبع) نسبت به گزینه‌های دیگر امکان رسیدن به بهره‌برداری پایدار از آب‌های زیرزمینی را فراهم می‌کند. همچنین بر اساس نتایج این مطالعه، دولت می‌تواند از طریق اتخاذ سیاست مناسب مالیاتی هزینه‌های جانبی بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی را به خود بهره‌برداران منطقه منتقل نماید.

در مطالعه باقری و بخشوده (۱۳۸۹)، به بررسی انگیزه گرایش به حفر چاه غیرمجاز و برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی در دشت برازجان پرداختند. نتایج نشان داد که از نظر تأثیر سیاست‌های بازدارنده، بین دو گروه از بهره‌برداران، مجاز و غیرمجاز، اختلاف معنی‌داری وجود

دارد. هرچند که از نظر تأثیر سایر معیارها مانند نظارت و ساماندهی، سیاست تشویقی، رسانه‌های گروهی و آگاهی اختلاف معنی‌داری وجود ندارد. همچنین اثر متغیرهایی نظیر سن، میزان درآمد، میزان وام و میزان شرکت در کلاس‌های ترویجی بر گرایش به حفر چاه غیرمجاز معنی‌دار است.

در پژوهشی، رضایی و همکاران (۱۳۹۱) عوامل مؤثر بر بهره‌برداری از منابع آب و پایداری آن را در شرایط جغرافیایی متفاوت استان فارس بررسی کردند. نتایج نشان داد که متغیرهای تعداد اعضای خانوار، نظام بهره‌برداری از اراضی، سطح درآمد خانوار، دبی آب، هزینه تأسیسات انتقال آب و شاخص مدیریت تأثیر معناداری بر بهره‌برداری از منابع آب دارد.

یزدی و جبلی (۱۳۹۲) در مطالعه‌ای اثرات برداشت بی‌رویه و مدیریت بهره‌برداری پایدار از منابع آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک در حوضه آبریز یزد و اردکان بررسی کردند. نتایج نشان داد که اثرات برداشت بی‌رویه آب در منطقه علاوه بر افت سطح آب زیرزمینی باعث نشست زمین و تغییر ویژگی‌های کمی و کیفی آب‌وخاک شده و در مهاجرت و تسریع روند تمرکزگرایی جمعیت و تخلیه روستاهای کویری نیز تأثیر بسزایی دارد.

با استفاده از مدل لوجیت<sup>۱</sup>، اسد فلسفی‌زاده و همکاران (۱۳۹۳) به تعیین سهم عوامل مؤثر بر اضافه برداشت منابع آب زیرزمینی در شهرستان مرودشت پرداختند. نتایج نشان داد که به ترتیب متغیرهای سطح درآمد و نوع کانال انتقال آب زیرزمینی دارای اثر مثبت و متغیرهای مجوز بهره‌برداری از منبع آب زیرزمینی، کارایی زیربرداری آب<sup>۲</sup>، بازده آب (متغیر بازده آب از تقسیم حجم تحویلی آب به بازده برنامه‌ای در هر مزرعه محاسبه شد)، شرکت در کلاس‌های آموزشی، فاصله مزرعه تا منبع و سطح تسهیلات دارای اثر منفی و معنی‌داری بر متغیر اضافه برداشت منابع آب زیرزمینی داشته است. اجرای سیاست‌های حمایتی از جمله ایجاد تسهیلات مناسب برای تجهیز

کانال‌ها و سامانه‌های آبیاری متناسب با شرایط توپوگرافی به‌منظور بهبود کارایی مزارع و اعمال پرداخت جریمه برای حفر چاه‌های غیرمجاز به‌عنوان راهکار مناسب برای کاهش اضافه برداشت در منطقه پیشنهاد شد.

مقامی مقیم و تقی‌پور (۱۳۹۸) به بررسی عوامل مؤثر در تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی دشت صفی‌آباد در شهرستان اسفراین پرداختند. سطح آب‌های زیرزمینی در دشت صفی‌آباد اسفراین طی سال‌های ۱۳۶۸ الی ۱۳۹۵ بیش از ۹ متر افت داشته است. عواملی چون خشک‌سالی، افزایش جمعیت، تبدیل شدن صفی‌آباد از روستا به شهر، بازدارنده نبودن جریمه‌های مربوط به تخلقات اضافه برداشت و مسائل فرهنگی سبب افزایش برداشت و عواملی نظیر استفاده از شیوه‌های نوین آبیاری، تغییر نوع کشت و استفاده از کتورهای هوشمند، باعث کاهش برداشت از آب های زیرزمینی شده است.

با استفاده از مدل توبیت<sup>۳</sup>، مقیمی و همکاران (۱۳۹۹) به بررسی عوامل مؤثر بر اضافه برداشت کشاورزان از منابع آب زیرزمینی در دشت زاوه-تربت حیدریه پرداختند. نتایج نشان داد که متغیرهای توضیحی نوع کشت غالب، مالکیت شخصی و مالکیت سهم‌بری چاه آب با اثر نهایی ۰/۳۵، ۰/۴۳ و ۰/۴۱، رابطه مستقیم و متغیرهای عمق چاه، نوع کانال انتقال آب و کشت محصولات کم‌آب رابطه معکوس با اضافه برداشت داشتند. رابطه متغیرهای فاصله مزرعه تا چاه، درآمد سالانه کشاورز و نوع کشت غالب با میزان اضافه برداشت، رابطه‌ای مستقیم معنی‌دار در سطح پنج درصد دارد.

ریاحی‌زمین و ترکمانی (۱۴۰۲) به بررسی تأثیر بهره‌برداری‌های بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی بر رفاه کشاورزان گندم‌کار شهرستان مرودشت پرداختند. با استفاده از الگوهای اقتصادسنجی تابع تولید محصول با فرم‌های مختلف تخمین زده شد که در نهایت فرم ترانسلوگ به‌عنوان فرم برتر انتخاب شد. همچنین تابع هزینه استحصال آب برای چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق جهت تخمین تابع رفاه

برآورد شد. نتایج نشان داد که به علت برداشت بیش از حد از منابع آب زیرزمینی، کاهش رفاه هر کشاورز برای چاه های عمیق و نیمه‌عمیق به ترتیب ۱۸۲۷۸۰ و ۲۹۴۹۱۰ میلیون ریال به ازای هر متر افت سطح سفره‌های آب زیرزمینی است. ایزرار و همکاران (۲۰۱۳) در دشت گانگار هند با هدف تجزیه و تحلیل برداشت آب‌های زیرزمینی به‌عنوان یک کالا در چارچوب اجتماعی منطقه، به این نتیجه رسیدند که اضافه برداشت از آب‌های زیرزمینی علاوه بر تحمیل بار اضافی اقتصادی به بهره‌برداران از طریق افزایش هزینه پمپاژ و سرمایه‌گذاری در زمینه حفر و عمیق کردن چاه، آثار زیست‌محیطی و اقتصادی-اجتماعی را به دنبال دارد.

میترو و اشمید (۲۰۲۱) با استفاده از چارچوب مدل‌سازی یکپارچه، به بررسی سیاست‌های منابع آب زیرزمینی در بخش کشاورزی تحت تأثیرات سناریوی اقلیمی در اتریش پرداخته‌اند. نتایج مدل نشان داد که با افزایش محدودیت منابع آب زیرزمینی برای آبیاری، کاربری اراضی از زمین‌های آبی به زمین‌های عمدتاً دیم با کاهش سود خالص منطقه‌ای تغییر می‌کند. همچنین افزایش هزینه استحصال آب زیرزمینی برای آبیاری به میزان ۰/۱ یورو به ازای هر مترمکعب، منجر به کاهش متوسط حجم استحصال آب زیرزمینی به میزان ۱۷/۲ میلیون مترمکعب در مناطق خشک و ۶/۴ میلیون مترمکعب در مناطق مرطوب می‌شود. به تبع آن سود خالص منطقه‌ای برای تولید محصولات کشاورزی به‌طور متوسط ۳/۴ میلیون یورو در مناطق خشک و ۱/۶ میلیون یورو در مناطق مرطوب کاهش می‌یابد.

ابورمان و همکاران (۲۰۲۴) در مطالعه‌ای به بررسی اثربخشی سیاست‌های مرتبط با آب‌های زیرزمینی در راستای کاهش برداشت بی‌رویه از این منابع در کشور اردن پرداختند. در این مطالعه، سیاست‌های آب‌های زیرزمینی در کشور اردن در دو بازه زمانی ۱۹۸۵-۱۹۹۸ (پیش از سیاست) و ۱۹۹۸-۲۰۱۵ (پس از سیاست) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که برخلاف انتظارات،

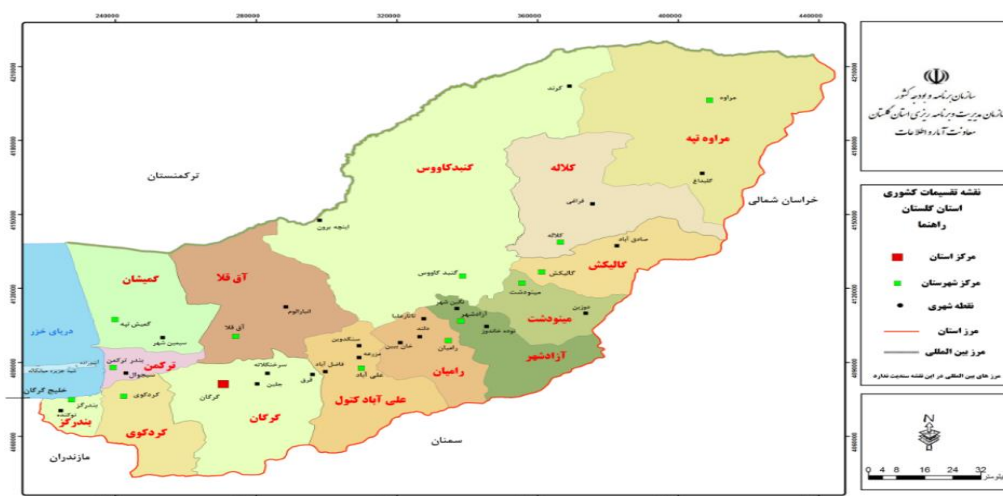
قانون‌گذاری ۱۹۹۸ تأثیر قابل توجهی بر میزان استحصال آب زیرزمینی نداشت و استحصال آب زیرزمینی برای استفاده در بخش کشاورزی پس از اعمال سیاست‌های کنترل مصرف بی‌رویه آب افزایش یافت. همچنین، نتایج نشان داد که نظارت پیشرفته بر میزان استحصال آب زیرزمینی از طریق نصب کنتورهای هوشمند، کشت محصولات آب‌بر، اصلاحات قانونی و افزایش تعرفه‌ها برای پایداری آب‌های زیرزمینی امری حیاتی است.

لامبرت و همکاران (۲۰۲۵) در مطالعه‌ای به بررسی الگوهای بهینه کشت و تخصیص بهینه آب‌های زیرزمینی تحت محدودیت‌های برداشت در ایالت اکلاهما در آمریکا پرداختند. در این مطالعه، استفاده از آب‌های زیرزمینی در یک دوره ده‌ساله تحت تأثیر نرخ‌های مختلف برداشت آب، نرخ‌های تنزیل و قیمت‌های انرژی با استفاده از یک مدل هیدرو-اقتصادی پویا<sup>۴</sup> مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که اگرچه نرخ‌های بالاتر برداشت آب ممکن است منافع اقتصادی کوتاه‌مدت داشته باشند، اما در نهایت تخلیه سریع‌تر سفره‌های آب زیرزمینی را تسریع می‌کنند که این امر هزینه‌های آبیاری در آینده را افزایش و سود بلندمدت را کاهش می‌دهد. مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی نه تنها از تخلیه سریع سفره‌های آب جلوگیری می‌کند، بلکه در بلندمدت می‌تواند سودآوری کشاورزان را نیز بهبود بخشد.

هرچند استان گلستان از مستعدترین استان‌های کشور برای فعالیت‌های کشاورزی به شمار می‌رود ولی مطالعات چندانی در خصوص وضعیت منابع آب زیرزمینی و دلایل کاهش سطح آبخوان‌ها در این استان صورت نگرفته است. بررسی پژوهش‌های انجام شده در زمینه مدیریت منابع آب زیرزمینی نشان می‌دهد که برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی یکی از اصلی‌ترین دلایل کاهش سطح آب زیرزمینی در آبخوان‌هاست. لذا، بررسی عوامل مؤثر بر میزان برداشت آب زیرزمینی و ارائه راهکارهای مدیریت میزان برداشت از این منابع از اهمیت بالایی برخوردار است.

### مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه، استان گلستان واقع در شمال کشور است که از شمال به جمهوری ترکمنستان، از شرق به استان خراسان شمالی، از جنوب به استان سمنان و از غرب به استان مازندران و دریای خزر محدود می‌شود. استان گلستان دارای چهارده شهرستان به نام‌های آزادشهر، آق‌قلا، گرگان، گنبد، بندرترکمن، گمیشان، رامیان، کردکوی، بندرگز، گالیکش، علی‌آباد کتول، کلالة، مراوه‌تپه و مینودشت و ۲۷ بخش، ۳۵ شهر، ۶۰ دهستان و ۱۰۴۰ آبادی است (شکل ۱) (مرکز آمار ایران، ۱۴۰۳).



شکل ۱- نقشه تقسیمات کشوری استان گلستان

درصد مساحت استان را شامل می‌شوند و از لحاظ پتانسیل تأمین منابع آب نیز حوضه گرگانرود ۷۴ درصد، اترک ۱۲ درصد، قره‌سو ۱۱ درصد، خلیج گرگان سه درصد و نکارود یک درصد منابع آب استان را تأمین می‌کنند (شرکت سهامی آب منطقه‌ای گلستان، ۱۳۹۹).

استان گلستان مطابق شکل (۲) دارای پنج حوضه آبریز شامل حوضه‌های آبریز اترک سفلی، گرگانرود، قره‌سو، شرق خلیج گرگان و نکارود علیا است. از لحاظ وسعت، حوضه گرگانرود ۵۰ درصد، اترک ۳۶ درصد، قره‌سو هشت درصد، نکارود پنج درصد و خلیج گرگان دو



شکل ۲ - نقشه حوضه‌های آبریز استان گلستان

(۱۵ درصد) از طریق چشمه و ۱۳ میلیون مترمکعب (۱ درصد) از طریق قنات برداشت می‌شود (شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان گلستان، ۱۴۰۱).

با توجه به اینکه در استان گلستان چاه‌های عمیق سهم عمده‌ای (حدود ۶۰ درصد) در برداشت منابع آب زیرزمینی را دارند و بیشتر از ۹۵ درصد آن‌ها در بخش کشاورزی کاربرد دارد (شرکت سهامی آب منطقه‌ای گلستان، ۱۳۹۹) و همچنین بیشترین کاهش در سطح منابع آب زیرزمینی از طریق چاه‌های عمیق اتفاق می‌افتد، لذا جامعه آماری تحقیق حاضر، کل چاه‌های عمیق استان گلستان است.

در این بررسی، اطلاعات چاه‌های آب کشاورزی استان گلستان در سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۲ از طریق پرسشنامه جمع‌آوری شد و به دلایل قابلیت‌های کاهش جانب‌داری، تعمیم‌پذیری نتایج، پایداری نتایج آماری و کاهش هزینه و زمان از روش نمونه‌گیری تصادفی طبقه‌ای در این مطالعه استفاده شد. پرسشنامه چاه‌های آب شامل اطلاعات مربوط به سال حفر، عمق چاه، هزینه برق

استان گلستان دارای پتانسیل منابع آب سالانه معادل ۲۴۸۵ میلیون مترمکعب هست که از این میزان ۵۰/۳ درصد آب زیرزمینی (چاه، چشمه و قنات) و ۴۹/۷ درصد آب سطحی (رودخانه، آب‌بندان و سد) است. بر اساس نتایج آماربرداری سراسری منابع و مصارف آب سطحی و زیرزمینی استان گلستان در سال آبی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ در کل استان گلستان در مجموع تعداد ۴۶۲۶۹ منبع آب زیرزمینی وجود دارد که شامل ۳۹۷۵۶ حلقه چاه (۸۵/۹ درصد)، ۶۱۶۱ دهنه چشمه (۱۳/۳ درصد) و ۳۵۴ رشته قنات (۰/۸ درصد) است. همچنین، در کل استان در مجموع (شرب، صنعت و کشاورزی) به میزان ۱۲۱۰ میلیون مترمکعب از منابع آب زیرزمینی و ۸۸۰ میلیون مترمکعب از منابع آب سطحی برداشت می‌شود که سهم بخش کشاورزی استان گلستان از کل میزان برداشت، ۸۰۲/۵ میلیون مترمکعب (۹۱ درصد) از منابع آب سطحی و ۹۳۹ میلیون مترمکعب (۷۸ درصد) از منابع آب زیرزمینی است. از کل میزان برداشت منابع آب زیرزمینی در استان، حدود ۱۰۱۶ میلیون مترمکعب (۸۴ درصد) از طریق چاه، ۱۸۱ میلیون مترمکعب

$$D = \frac{B^2}{4} \quad (۳)$$

که در آن‌ها،  $n$  حجم نمونه،  $N_i$  حجم کل جامعه  $\lambda_i$ ،  $\sigma_i$  واریانس طبقه  $\lambda_i$ ،  $W_i$  وزن طبقه  $\lambda_i$ ،  $D$  دامنه تغییرات و  $B$  مقدار خطای برآورد (معادل ۷/۵ درصد) است.

فرم توابع مورد استفاده در این پژوهش برای برآورد تابع میزان برداشت آب چاه در جدول (۱) ارائه شده است که در آن  $a_0$  عرض از مبدأ تابع،  $a_i$  یا  $\beta_i$  ضرایب مربوط به متغیرهای مورد استفاده در تابع میزان برداشت آب از چاه و  $X_i$  بیانگر مقادیر متغیرها در توابع میزان برداشت از آب چاه است. پس از برآورد توابع میزان برداشت از آب چاه، به منظور انتخاب بهترین شکل تابع از آزمون‌های اقتصادسنجی و نقض فرض‌های اساسی رگرسیون کلاسیک استفاده شد. جدول (۲)، متغیرهای مورد استفاده برای برآورد فرم‌های مختلف تابع میزان برداشت از آب چاه را نشان می‌دهد.

مصرفی، دبی چاه، اراضی تحت پوشش چاه‌ها، تعداد روزهای کارکرد در سال و تعداد ساعات کارکرد در روز است. با توجه به تفاوت اقلیم در محدوده مورد مطالعه برای طبقه‌بندی در روش نمونه‌گیری تصادفی طبقه‌ای از شاخص دومارتون<sup>۱</sup> استفاده شد. شاخص دومارتون شاخصی برای مشخص نمودن اقلیم یک منطقه بر اساس دما و بارندگی سالانه است:

$$I_{DM} = \frac{P}{T + 10} \quad (۱)$$

که در آن،  $P$  میانگین بارندگی سالانه برحسب میلی‌متر،  $T$  میانگین دمای سالانه هوا برحسب درجه سانتی‌گراد است (ارباب‌زایی‌مقدم و همکاران، ۱۴۰۲).

برای تعیین حجم نمونه در روش نمونه‌گیری تصادفی طبقه‌ای از روابط (۲) و (۳) استفاده شد و تعداد ۱۳۱ پرسشنامه چاه آب تکمیل شد.

$$n = \frac{\frac{\sum_{i=1}^n N_i^2 \sigma_i^2}{W_i}}{N^2 D + \sum_{i=1}^n N_i^2 \sigma_i^2} \quad (۲)$$

جدول ۱ - فرم توابع استفاده شده برای برآورد تابع میزان برداشت از آب چاه

| نام تابع                          | شکل تابع                                                                                                                             |
|-----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| نیمه لگاریتمی<br>Semi-logarithmic | $\log(Y) = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i X_i$                                                                                               |
| کاب-داگلاس<br>Cobb-Douglas        | $Y = a_0 \prod_i X_i^{a_i} \quad i = 1, \dots, n$                                                                                    |
| ترانسندنتال<br>Transcendental     | $Y = a_0 \prod_i X_i^{a_i} \cdot e^{\sum_i b_i X_i} \quad i = 1, \dots, n$                                                           |
| ترانسلوگ<br>Translog              | $Y = a_0 \prod_i X_i^{a_i} \prod_i x_i^{\frac{1}{2} \sum_j (b_{ij} \log X_j)} \quad i, j = 1, \dots, n$                              |
| درجه دوم<br>Quadratic             | $Y = \alpha + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \gamma_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=2}^n \gamma_{ij} x_i x_j$ |

ماخذ: (گریفین و همکاران، ۱۹۸۷)

جدول ۲ - متغیرهای مورد استفاده در تابع میزان برداشت از آب چاه

| متغیر                                  | معرفی                               |
|----------------------------------------|-------------------------------------|
| Extracted water (W)                    | میزان آب استحصالی (مترمکعب)         |
| Flow (DE)                              | دبی (لیتر بر ثانیه)                 |
| Well depth (R)                         | عمق چاه (متر)                       |
| Land under cultivation of wells (A)    | اراضی تحت پوشش چاه‌ها (هکتار)       |
| Number of operating hours per day (HO) | تعداد ساعت کارکرد در طول روز (ساعت) |
| Number of operating days per year (DA) | تعداد روزهای کارکرد در سال (روز)    |
| Electricity cost (E)                   | هزینه برق (۱۰ ریال)                 |

در این پژوهش نتایج توصیفی با استفاده از تحلیل‌های آماری ساده (حداکثر، میانگین و حداقل) و نتایج تحلیلی از طریق مدل‌های رگرسیونی چند متغیره ارائه شد. همچنین در این پژوهش میزان آب استحصالی هر چاه بر اساس زمین‌های تحت پوشش هر چاه (هکتار) و نیاز ناخالص آبی محصولات (با استفاده از نرم‌افزار نت وات<sup>۱</sup>) تحت پوشش هر چاه محاسبه شد.

### نتایج و بحث

نتایج توصیفی چاه‌های آب کشاورزی استان گلستان بر اساس اطلاعات پرسشنامه‌ای شامل سال حفر،

عمق چاه (متر)، دبی چاه (لیتر بر ثانیه)، تعداد روزهای کارکرد در سال، تعداد ساعت کارکرد در طول روز و زمین تحت پوشش (هکتار) است که در جدول (۳) ارائه شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد، عمق چاه‌های آب کشاورزی مورد بررسی در استان گلستان به‌طور متوسط ۱۹۶ متر، متوسط دبی چاه ۱۱ لیتر بر ثانیه و به‌طور میانگین میزان استفاده از چاه ۹۰ روز در سال با ۲۰ ساعت کارکرد در طول روز است. همچنین، به‌طور میانگین زمین تحت پوشش هر چاه شش هکتار است.

جدول ۳ - اطلاعات توصیفی چاه‌های آب کشاورزی در استان گلستان

| شرح                          | حداقل | میانگین | حداکثر |
|------------------------------|-------|---------|--------|
| سال حفر چاه                  | 1345  | 1388    | 1397   |
| عمق چاه (متر)                | 110   | 196     | 320    |
| دبی چاه (لیتر بر ثانیه)      | 2     | 11      | 40     |
| تعداد روزهای کارکرد در سال   | 65    | 90      | 180    |
| تعداد ساعت کارکرد در طول روز | 6     | 20      | 23     |
| زمین تحت پوشش هر چاه (هکتار) | 1     | 6       | 20     |

مأخذ: یافته‌های تحقیق

نتایج تحلیلی بر اساس نتایج حاصل از برآورد فرم‌های مختلف توابع میزان برداشت آب چاه در استان گلستان نظیر خطی-لگاریتمی، لگاریتمی-خطی، کاب-

داگلاس، درجه دوم، ترانسندنتال و ترانسلوگ، در جدول (۴) ارائه شده است.

جدول ۴ - نتایج برآورد توابع میزان برداشت آب چاه در استان گلستان

| متغیر<br>Variable  | خطی _ لگاریتمی<br>Lin-Log | لگاریتمی _ خطی<br>Log-Lin | کاب _ داگلاس<br>Cobb-Douglas | درجه دوم<br>Quadratic | ترانسندنتال<br>Transcendental | ترانسلوگ<br>Translog |
|--------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------------|-----------------------|-------------------------------|----------------------|
| C عرض از مبدأ      | 477973.67***              | 8.23***                   | 1.57***                      | 79770.41***           | -576912.09***                 | -0.32                |
| DE                 | -                         | 0.06***                   | -                            | -4223.59***           | 1244.04***                    | -                    |
| R                  | -                         | NS                        | -                            | NS                    | NS                            | -                    |
| A                  | -                         | 0.04***                   | -                            | NS                    | 8651.44***                    | -                    |
| HO                 | -                         | 0.05***                   | -                            | -4337.31***           | NS                            | -                    |
| DA                 | -                         | 0.01***                   | -                            | -893.36***            | NS                            | -                    |
| E                  | -                         | NS                        | -                            | NS                    | 0.00053***                    | -                    |
| لگاریتم DE         | 65381.87***               | -                         | 0.97***                      | -                     | 61777.56***                   | 1.79***              |
| لگاریتم R          | -28937.45***              | -                         | NS                           | -                     | NS                            | 0.91***              |
| لگاریتم A          | NS                        | -                         | 0.03***                      | -                     | -57887.97***                  | -0.78***             |
| لگاریتم HO         | 54800.03***               | -                         | 0.95***                      | -                     | 73356.47***                   | NS                   |
| لگاریتم DA         | 52840.16***               | -                         | 0.96***                      | -                     | 78494.92***                   | 1.31***              |
| لگاریتم E          | 10096.41***               | -                         | 0.004*                       | -                     | -2477.69**                    | NS                   |
| مجذور DE           | -                         | -                         | -                            | -39.93***             | -                             | NS                   |
| مجذور R            | -                         | -                         | -                            | NS                    | -                             | NS                   |
| مجذور A            | -                         | -                         | -                            | -113.55***            | -                             | NS                   |
| مجذور HO           | -                         | -                         | -                            | NS                    | -                             | NS                   |
| مجذور DA           | -                         | -                         | -                            | NS                    | -                             | NS                   |
| مجذور E            | -                         | -                         | -                            | NS                    | -                             | NS                   |
| اثر متقابل DE و R  | -                         | -                         | -                            | -1.63***              | -                             | -0.16***             |
| اثر متقابل DE و A  | -                         | -                         | -                            | 138.95***             | -                             | NS                   |
| اثر متقابل DE و HO | -                         | -                         | -                            | 220.67***             | -                             | NS                   |
| اثر متقابل DE و DA | -                         | -                         | -                            | 69.11***              | -                             | NS                   |
| اثر متقابل DE و E  | -                         | -                         | -                            | NS                    | -                             | NS                   |
| اثر متقابل R و A   | -                         | -                         | -                            | 3.93***               | -                             | 0.16***              |
| اثر متقابل R و HO  | -                         | -                         | -                            | 2.52***               | -                             | NS                   |
| اثر متقابل R و DA  | -                         | -                         | -                            | -0.62***              | -                             | -0.18***             |
| اثر متقابل R و E   | -                         | -                         | -                            | NS                    | -                             | NS                   |
| اثر متقابل A و HO  | -                         | -                         | -                            | NS                    | -                             | NS                   |
| اثر متقابل A و DA  | -                         | -                         | -                            | NS                    | -                             | NS                   |
| اثر متقابل A و E   | -                         | -                         | -                            | NS                    | -                             | NS                   |
| اثر متقابل HO و DA | -                         | -                         | -                            | 48.84***              | -                             | 0.19***              |
| اثر متقابل HO و E  | -                         | -                         | -                            | NS                    | -                             | NS                   |
| اثر متقابل DA و E  | -                         | -                         | -                            | NS                    | -                             | NS                   |

مجذور و اثرات متقابل ذکر شده متناسب با فرم‌های تابعی مختلف، متفاوت است. علائم \*\*\* و \*\* و \* به ترتیب معنی‌دار بودن در سطح 1، 5 و 10 درصد را نشان می‌دهد

جدول ۵ - انواع توابع میزان برداشت از آب چاه در استان گلستان از نظر خصوصیات و ویژگی‌های آزمون شده

| تابع                                                       | خطی - لگاریتمی<br>Lin-Log | لگاریتمی - خطی<br>Log-Lin | کاب - داگلاس<br>Cobb-Douglas | درجه دوم<br>Quadratic | ترانسندنتال<br>Transcendental | ترانسلوگ<br>Translog |
|------------------------------------------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------------|-----------------------|-------------------------------|----------------------|
| تعداد کل ضرایب                                             | 6                         | 6                         | 6                            | 27                    | 12                            | 27                   |
| تعداد ضرایب معنی‌دار                                       | 5                         | 4                         | 5                            | 13                    | 8                             | 8                    |
| درصد ضرایب معنی‌دار                                        | 83.3                      | 66.6                      | 83.3                         | 48.1                  | 66.6                          | 29.6                 |
| F statistic (Prob.)                                        | 186.14<br>(0.00)          | 220.98<br>(0.00)          | 26283.41<br>(0.00)           | 12232.03<br>(0.00)    | 2397.98<br>(0.00)             | 18741.40<br>(0.00)   |
| R <sup>2</sup>                                             | 0.88                      | 0.87                      | 0.99                         | 0.99                  | 0.99                          | 0.99                 |
| آزمون نرمال بودن<br>JB Statistics (Prob.)                  | 167.59<br>(0.00)          | 193.16<br>(0.00)          | 285.23<br>(0.00)             | 1480.63<br>(0.00)     | 296.38<br>(0.00)              | 144.00<br>(0.00)     |
| آزمون واریانس ناهمسانی<br>White Test Statistics<br>(Prob.) | 3.36<br>(0.01)            | 3.63<br>(0.01)            | 1.84<br>(0.11)               | 2.28<br>(0.01)        | 5.61<br>(0.00)                | 1.99<br>(0.03)       |
| آزمون خودهمبستگی<br>Lagrange multiplier<br>test (Prob.)    | 0.31<br>(0.57)            | 1.97<br>(0.16)            | 0.07<br>(0.78)               | 0.00<br>(0.98)        | 0.00<br>(0.96)                | 0.19<br>(0.66)       |
| آزمون خطای تصریح<br>Ramsey Reset test<br>(Prob.)           | 1771.45<br>(0.00)         | 250.19<br>(0.00)          | 0.001<br>(0.97)              | 0.03<br>(0.87)        | 10.47<br>(0.00)               | 0.13<br>(0.72)       |
| معیار آکائیک<br>Akaike information<br>criterion            | 21.97<br>(6)              | -0.34<br>(3)              | -5.20<br>(1)                 | 17.01<br>(4)          | 19.09<br>(5)                  | -1.31<br>(2)         |
| معیار شوارتز<br>Schwarz criterion                          | 22.10<br>(6)              | -0.23<br>(3)              | -5.07<br>(1)                 | 17.32<br>(4)          | 19.28<br>(5)                  | -1.11<br>(2)         |

بعد از برآورد فرم‌های مختلف توابع، انجام آزمون‌های نقض فروض اساسی رگرسیون کلاسیک جهت انتخاب تابع برتر ضروری است که در جدول (۵) ارائه شده است.

همان‌گونه که در جداول ۴ و ۵ ملاحظه می‌شود، اکثر ضرایب تابع کاب-داگلاس با احتمال ۹۹ درصد معنی‌دار هستند. بیشترین تعداد ضرایب معنی‌دار متعلق به تابع درجه دوم با ۱۳ ضریب و بیشترین درصد ضرایب معنی‌دار متعلق به تابع کاب-داگلاس با ۸۳/۳ درصد است. در فرم‌های برآوردی از نظر آماره  $R^2$  تعدیل‌شده به غیر از دو تابع لگاریتمی-خطی و خطی-لگاریتمی، سایر توابع مشابه یکدیگر بوده و برتری قابل توجهی نسبت به یکدیگر ندارند و ۹۹ درصد از تغییرات متغیر وابسته توسط متغیرهای مستقل توضیح داده می‌شود. برای آزمون نرمال

بودن جملات اخلاص از آماره جاکو برا استفاده شد و با توجه به سطح معنی‌داری آماره جاکو برا، هیچ کدام از توابع برآوردی، شرط نرمال بودن را ندارند که البته در نمونه‌های بزرگ ( $n > 100$ ) این مشکل قابل اغماض است (گجراتی، ۱۹۹۵). با توجه به آماره آزمون وایت جهت بررسی ناهمسانی واریانس، به غیر از تابع کاب-داگلاس، سایر توابع مشکل ناهمسانی واریانس دارند. برای تشخیص خودهمبستگی بین اجزای اخلاص در مدل، از آزمون LM استفاده شد که آماره آزمون نشان‌دهنده عدم مشکل خودهمبستگی بین اجزای اخلاص هست. همچنین، با توجه به آماره آزمون ریست رمزی، به غیر از سه تابع لگاریتمی-خطی، خطی-لگاریتمی و ترانسندنتال سایر توابع مشکل خطای تصریح ندارند؛ بنابراین از میان توابع مختلف برآوردی، تابع کاب-داگلاس شرط عدم وجود

کاب-داگلاس کمترین معیار را نیز دارا است که می‌تواند به‌عنوان فرم برتر برای بررسی عوامل مؤثر بر میزان برداشت آب چاه استفاده شود.

خودهمبستگی، واریانس همسان، عدم وجود خطای تصریح، عدم وجود مشکل هم‌خطی (ضرایب همبستگی بین متغیرها کمتر از ۰/۸ است). (جدول ۶) و از لحاظ معیار آکائیک و شوارتز (معیار سنجش نیکویی برازش) نیز تابع

جدول ۶ - ماتریس ضرایب همبستگی عوامل مؤثر بر میزان برداشت آب

| متغیر | DE    | A    | HO    | DA    | E    |
|-------|-------|------|-------|-------|------|
| DE    | 1     | 0.78 | -0.13 | -0.28 | 0.32 |
| A     | 0.78  | 1    | 0.13  | 0     | 0.35 |
| HO    | -0.13 | 0.13 | 1     | 0.01  | 0.05 |
| DA    | -0.28 | 0    | 0.01  | 1     | 0.10 |
| E     | 0.32  | 0.35 | 0.05  | 0.10  | 1    |

برداشت آب از چاه به میزان ۰/۰۳ درصد کاهش می‌دهد. همچنین الزام بهره‌برداران به کاهش یک‌درصدی ساعت استفاده از چاه در طول روز، میزان برداشت آب از چاه را معادل ۰/۹۵ درصد کاهش و کاهش یک‌درصدی تعداد روزهای استفاده از چاه در طول سال میزان برداشت آب از چاه را معادل ۰/۹۶ درصد کاهش می‌دهد. همچنین ارتباط میان هزینه برق مصرفی و میزان برداشت آب چاه نیز مثبت و معنی‌دار است، به‌طوری‌که یک درصد کاهش در هزینه برق مصرفی (ناشی از میزان برق مصرفی) باعث می‌شود میزان برداشت آب از چاه‌های نمونه معادل ۰/۰۰۴ درصد کاهش یابد. نتایج کلی پژوهش حاضر با نتایج مطالعات توانا و صبحی (۱۳۸۶)، صبحی و همکاران (۱۳۸۶)، رضایی و همکاران (۱۳۹۱)، مقامی‌مقیم و تقی‌پور (۱۳۹۸)، مقیمی و همکاران (۱۳۹۹)، ابورمان و همکاران (۲۰۲۴) و لامبرت و همکاران (۲۰۲۵) مطابقت دارد. البته عوامل مؤثر بر برداشت از منابع آب زیرزمینی با توجه به شرایط اقلیمی منطقه، شرایط فرهنگی، وضع اقتصادی و معیشتی کشاورزان، الگوی کشت منطقه و زمان انجام پژوهش متفاوت است.

#### نتیجه‌گیری

استحصال بی‌رویه منابع آب زیرزمینی یکی از چالش‌های مهم در دشت‌های کشور به شمار می‌رود. در حال حاضر با توجه به روند افزایشی کاهش سطح آب‌های

با توجه به نتایج تابع برتر (کاب-داگلاس)، تابع عوامل مؤثر بر میزان برداشت آب در چاه‌های نمونه استان گلستان به‌صورت رابطه (۴) است.

$$\text{Log}(W) = 1.57 + 0.97 \text{Log}(DE) + 0.03 \text{Log}(A) + 0.95 \text{Log}(HO) + 0.96 \text{Log}(DA) + 0.004 \text{Log}(E) \quad (4)$$

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، متغیرهای لگاریتم دبی چاه، لگاریتم اراضی تحت پوشش چاه‌ها، لگاریتم تعداد ساعت کارکرد در طول روز، لگاریتم تعداد روزهای کارکرد در سال و لگاریتم هزینه برق مصرفی تأثیر مثبت و معنی‌داری بر میزان برداشت آب از چاه دارند و متغیر لگاریتم عمق چاه به علت معنی‌دار نشدن از مدل حذف شده است. متغیر عمق چاه با توجه به اینکه اکثر کشاورزان برای افزایش یا کاهش میزان استحصال آب از چاه ساعات برداشت آب را کم یا زیاد می‌کنند، تأثیر معنی‌داری بر میزان استحصال آب از چاه ندارد و این متغیر در مطالعات توانا و صبحی (۱۳۸۶)، رضایی و همکاران (۱۳۹۱) و مقیمی و همکاران (۱۳۹۹) هم معنی‌دار نشده است. ضرایب در تابع کاب-داگلاس که همان کشش‌ها هستند نشان می‌دهند که با ثابت بودن سایر متغیرها، کاهش یک‌درصدی دبی چاه‌های کشاورزی در منطقه مورد مطالعه منجر به کاهش ۰/۹۷ درصد در میزان برداشت آب از چاه توسط بهره‌برداران و کشاورزان منطقه می‌گردد، این مقدار در مطالعه رضایی و همکاران (۱۳۹۱) ۱/۴۴ درصد است. با کاهش یک‌درصدی از اراضی تحت پوشش هر چاه،

زیرزمینی دشت گرگان و لزوم اجرای طرح تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی در استان گلستان، شناخت و بررسی اثر عوامل مؤثر بر میزان برداشت آب از آبخوان‌های استان می‌تواند کمک مؤثری به شناسایی سیاست‌های مناسب در راستای جلوگیری از برداشت بیش‌ازحد از آبخوان دشت گرگان و توقف روند افزایشی برداشت آب از منابع آب زیرزمینی کند. در این پژوهش، به منظور بررسی عوامل مؤثر بر میزان برداشت آب زیرزمینی در استان گلستان از فرم‌های مختلف توابع برای تخمین تابع میزان برداشت آب چاه در منطقه مورد مطالعه استفاده شد. نتایج مقایسه فرم‌های مختلف توابع که به وسیله آزمون‌های مختلف (ناهمسانی واریانس بر اساس آزمون وایت، نرمال بودن جملات اخلال بر اساس آماره جاکو برا، خطای تصریح بر اساس آزمون ریست رمزی، خودهمبستگی بر اساس آزمون LM و عدم وجود مشکل هم خطی با بررسی ماتریس همبستگی) انجام شد نشان داد که فرم تابع کاب-داگلاس فرم برتر است. نتایج تابع برتر کاب-داگلاس نشان داد که با کاهش میزان برق مصرفی، دبی چاه‌های کشاورزی (مجوز برداشت)، ساعت کارکرد در طول روز و تعداد روزهای کارکرد در طول سال، میزان استحصال آب توسط بهره‌برداران و کشاورزان استان گلستان کاهش می‌یابد. به دلیل پایین بودن هزینه برق مصرفی، ارتباط میان هزینه برق مصرفی و میزان برداشت آب چاه مثبت است و تا زمانی که سهم هزینه برق مصرفی از کل هزینه تولید افزایش نیابد، افزایش قیمت برق منجر به کاهش برداشت آب زیرزمینی نخواهد شد. بر اساس نتایج با کاهش مجوز برداشت آب، کشاورزان می‌توانند با تغییر الگوی کشت به سمت محصولات سودآور نیازی کمتر و بازده بالاتری دارد. همچنین در صورت سودآور نبودن تولید محصولات می‌توانند از طریق ایجاد بازار آب، با کاهش استحصال آب، فرصت استفاده کارای منابع آب زیرزمینی را برای کشاورزان دیگر یا بهره‌برداران

سایر بخش‌ها نظیر صنعت فراهم نمایند. با این راهکارها علاوه بر حفظ درآمد کشاورزان، برداشت آب زیرزمینی کاهش یافته و پایداری منابع آب نیز محقق می‌گردد؛ بنابراین سیاست‌گذاران حوزه منابع آب می‌توانند از ترکیبی از ابزارهای مختلف اقتصادی و فنی به منظور دستیابی به طرح تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی در آبخوان‌های استان استفاده کنند. با توجه به نتایج پیشنهاد می‌شود که دولت سیاست‌های حمایتی خود را در حوزه منابع آب زیرزمینی در استان گلستان تغییر داده و بخشی از یارانه انرژی برق را به صورت تدریجی حذف کند و این حمایت را با ایجاد تسهیلات کم بهره و مناسب جهت تجهیز کانال‌ها و سامانه‌های آبیاری متناسب با شرایط منطقه اعمال کند. همچنین دولت می‌تواند از طریق کاهش صدور پروانه بهره‌برداری حفر چاه، جلوگیری از حفر چاه‌های غیرمجاز و نصب کنتورهای هوشمند برای کنترل میزان حجم آب استحصالی چاه، از برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی جلوگیری کند. اجرای سیاست‌های دستوری کاهش یا کنترل میزان برداشت از منابع آب زیرزمینی، نیاز شدید به سامانه‌های نظارتی قوی دارد و البته، نیازمند برخورد جدی با متخلفان نیز است. بر اساس سند راهبردی احیا و تعادل بخشی آب‌های زیرزمینی کشور، علاوه بر اقدامات کوتاه مدت نظیر تشکیل کارگروه احیا و تعادل بخشی، تعیین شاخص‌های نهایی و انتخاب دشت پایلوت، مهم‌ترین اقدامات میان مدت شامل پایداری حوضه آبریز و ایجاد و استقرار بازار محلی آب است که با نتایج این مطالعه مطابقت دارد.

### تعارض منافع

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

## فهرست منابع

۱. ارباب‌زایی مقدم، آتنا، کرامت‌زاده، علی، اشراقی، فرشید و شیرانی بیدآبادی، فرهاد. ۱۴۰۲. برآورد ارزش اقتصادی آب در تولید محصول چغندر قند در استان گلستان. نشریه چغندر قند، ۱(۳۹)، صص. ۱۰۱-۱.
- DOI: 10.22092/jsb.2023.360462.1313.۱۱۴**
۲. اسد فلسفی‌زاده، ندا، صبوحی‌صابونی، محمود و مسنن مظفری، مهدیه. ۱۳۹۳. تعیین سهم عوامل مؤثر بر اضافه برداشت منابع آب زیرزمینی (مطالعه موردی: شهرستان مرو دشت). اقتصاد کشاورزی، ۳(۳)، صص. ۱۱۶-۱۰۳.
۳. باقری، مهرداد و بخشوده، محمد. ۱۳۸۹. هزینه‌های جانبی برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی و تعیین عوامل مؤثر بر آن در شهرستان ممسنی. اقتصاد کشاورزی، ۴(۱)، صص. ۷۹-۹۹.
۴. پاکدل، مریم، قره‌محمودلو، مجتبی، جندقی، نادر، فتح‌آبادی، ابوالحسن و نیک‌قوجق، یعقوب. ۱۳۹۹. بررسی عوامل مؤثر بر تغییرات سطح آب زیرزمینی دشت گرگان. هفتمین همایش علمی پژوهشی توسعه و ترویج علوم کشاورزی و منابع طبیعی/ایران. تهران.
۵. توانا، حمید و صبوحی، محمود. ۱۳۸۶. راهکارهای کاهش بهره‌برداری منابع آب زیرزمینی در کشاورزی. اولین همایش سازگاری با کم‌آبی، تهران.
۶. رضایی، محمد رضا، محمدی، حمید و کرمی، آیت‌الله. ۱۳۹۱. بررسی عوامل مؤثر بر بهره‌برداری از منابع آب و پایداری آن در شرایط جغرافیایی متفاوت در استان فارس. مجله محیط‌شناسی (مجموعه پژوهش‌های محیط-زیست)، ۴(۴)، صص. ۶۷-۷۸. **DOI: 10.22059/jes.2013.29864**
۷. ریاحی‌زمین، ریحانه و ترکمانی، جواد. ۱۴۰۲. تأثیر بهره‌برداری‌های بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی بر رفاه کشاورزان: مطالعه موردی گندم‌کاران شهرستان مرو دشت. پانزدهمین کنفرانس بین‌المللی علوم صنایع غذایی، کشاورزی/ارگانیک و امنیت غذایی، سازمان بین‌المللی مطالعات دانشگاهی، تهران.
۸. سیدان، سید محسن، کهنسال، محمد رضا. و قربانی، محمد. ۱۳۹۵. بررسی آثار رفاهی بهره‌برداران بیش از حد مجاز از منابع آب زیرزمینی در دشت همدان - بهار. مجله اقتصاد کشاورزی، ۱۰(۳)، صص. ۱۲۹-۱۵۳.
- DOI: 10.22034/iaes.2016.21431**
۹. سیدان، سید محمد و بهراملو، رضا. ۱۳۹۷. تأثیر اضافه برداشت آب از منابع آب زیرزمینی بر رفاه کشاورزان در دشت ملایر. نشریه علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی)، ۲۲(۴)، صص. ۳۷۰-۳۵۷.
- DOI: 10.29252/jstnar.22.4.357**
۱۰. شرکت سهامی آب منطقه‌ای گلستان. ۱۳۹۹. گزارش آماربرداری دور سوم.
۱۱. شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان گلستان. ۱۴۰۱. اداره آمار و اطلاعات، گزارش بررسی وضعیت منابع آب استان گلستان.
۱۲. شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان گلستان. ۱۴۰۳. مطالعات پایه منابع آب، گروه تلفیق و بیلان، گزارشات بررسی وضعیت منابع آب استان گلستان.
۱۳. صبوحی، محمود، سلطانی، غلامرضا و زیبایی، منصور. ۱۳۸۶. بررسی اثر قیمت آب آبیاری بر منافع خصوصی و اجتماعی با استفاده از الگوی برنامه‌ریزی ریاضی مثبت. نشریه علوم و صنایع کشاورزی، ۱(۲۱)، صص. ۵۳-۵۳.
- DOR: 20.1001.1.20086407.1388.1.1.4.9.۷۱**

۱۴. کرامت‌زاده، علی، چیدری، امیرحسین و میرزایی، احمد. ۱۳۸۵. تعیین ارزش اقتصادی آب کشاورزی با استفاده از مدل الگوی کشت بهینه تلفیق زراعت و باغداری: مطالعه موردی سد بارزو شیروان. *اقتصاد کشاورزی و توسعه*، ۱۴(۵۴)، صص. ۳۵-۶۰. DOI: 10.30490/aead.2006.58914
۱۵. کرامت‌زاده، علی، قربانی نصرآبادی، خلیل، حسینی، سید مصطفی، ارباب‌زایی، آتنا و میرزایی، احمد. ۱۴۰۲. ارزش گذاری اقتصادی آب مصرفی در محصولات کشاورزی، بهینه‌یابی قیمت آب مصرفی و ارزیابی توجیه کشت با توجه به وضعیت بازدهی آن‌ها. طرح پژوهشی، وزارت امور اقتصاد و دارایی، اداره کل اقتصاد و دارایی، استان خراسان شمالی.
۱۶. مرزبان، حسین، صدرایی، احمد، زیبایی، منصور، ناظم‌السادات، سیدمحمدجعفر و کریمی، لیلا. ۱۳۹۸. بررسی وضعیت منابع و مصارف آب در ایران و راهکارهای بهبود وضعیت. آب و فاضلاب، ۳۰(۴)، صص. ۱۶-۳۲. DOI: 10.22093/wwj.2018.126649.2663
۱۷. مقامی مقیم، غلامرضا و تقی‌پور، علی‌اکبر. ۱۳۹۸. بررسی عوامل مؤثر در تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی دشت صفی‌آباد شهرستان اسفراین. *مجله علمی مهندسی اکوسیستم بیابان*، ۸(۲۲)، صص. ۲۷-۴۲. DOI: 10.22052/deej.2018.7.22.11
۱۸. مقیمی، زهرا، کرباسی، علیرضا، محتشمی، تکتیم و علیزاده، امین. ۱۳۹۹. بررسی عوامل مؤثر بر اضافه برداشت کشاورزان از منابع آب زیرزمینی در دشت زاوه-تربت حیدریه. *نشریه پژوهش آب در کشاورزی*، ۳۴(۴)، صص. ۶۰۳-۶۱۴. DOI: 10.22092/jwra.2021.123502
۱۹. مرکز آمار ایران. ۱۴۰۳. سالنامه آماری کشور ۱۴۰۱.
۲۰. وزارت جهاد کشاورزی، آمارنامه کشاورزی سال ۱۴۰۲-۱۴۰۱، جلد اول: محصولات زراعی.
۲۱. یزدی، مهدی و جبلی، منصور. ۱۳۹۲. بررسی اثرات برداشت بی‌رویه و مدیریت بهره‌برداری پایدار از منابع آبی در مناطق خشک و نیمه‌خشک (مطالعه موردی: حوزه آبریز یزد- اردکان). *اولین کنفرانس ملی هیدرولوژی مناطق نیمه‌خشک، سنندج، ایران*.
22. Abu Romman, Z., Al-Smadi, B. and Weshah, A. 2024. A statistical analysis of the effectiveness of groundwater-related policies in mitigating over-extraction in arid regions: Challenges and impacts. *Groundwater for Sustainable Development*, 26(1), pp. 7-15. DOI:10.1016/j.gsd.2024.101203
23. Griffin, R., Montgomery, J. and Edward Rister, M. 1987. Selecting functional form in production function analysis. *Western Journal of Agricultural Economics*, 12(2), pp. 216-227. DOI: 10.22004/ag.econ.32240
24. Gujarati, D. 1995. Basic econometrics. 3<sup>rd</sup>. United States Military Academy, West Point.
25. Izrar, A., Abdulaziz, A. and Al-Othman, R. 2013. Is shrinking groundwater resources leading to socioeconomic and environmental degradation in Central Ganga plain, India. *Arab Journal of Geosciences*, Saudi Society for Geosciences.
26. Lambert, L, H., Yao, Y. and Levers, L, R. 2025. Optimal cropping patterns and intertemporal groundwater usage under extraction constraints in Oklahoma's panhandle. *Agricultural Water Management*, 313(1), pp.20-35. Doi: 10.1016/j.agwat.2025.109472
27. Lindgren, A. 1999. The value of water: A study of the Stamp Riet Aquifer in Namibia. Master Thesis, Umea University, Department of Economics.
28. Mitter, H. and Schmid, E. 2021. Informing groundwater policies in semi-arid agricultural production regions under stochastic climate scenario impacts. *Ecological Economics*, 180(1), pp. 34-52. Doi: 10.1016/j.ecolecon.2020.106908

## ارزیابی اقتصادی محرک‌های آلی رشد بر عملکرد، درصد روغن و کارایی مصرف آب

### کلزا در تیمارهای مختلف آبیاری

محمد پسندیده و رضا محمدی کیا\*

استادیار، بخش شیمی، حاصلخیزی خاک و تغذیه گیاهی، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

[mpassandideh@yahoo.com](mailto:mpassandideh@yahoo.com)

محقق بخش مدیریت آب در مزرعه، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

[rmswri@gmail.com](mailto:rmswri@gmail.com)

دریافت: تیر ۱۴۰۴ و پذیرش: شهریور ۱۴۰۴

#### چکیده

این پژوهش با هدف بررسی تأثیر محرک‌های آلی رشد شامل اسید هیومیک، اسید آمینه، اسید فولویک و عصاره جلبک دریایی بر عملکرد دانه، درصد روغن و کارایی مصرف آب (WUE) کلزا با دو تیمار آبیاری (آبیاری بعد از ۸۰-۷۰ میلی‌متر تبخیر تجمعی (آبیاری نرمال یا شاهد) و آبیاری بعد از ۱۴۰-۱۳۰ میلی‌متر تبخیر تجمعی (تنش خشکی) انجام شد. آزمایش به صورت طرح کرت‌های خرد شده در قالب بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار و به مدت دو فصل زراعی در منطقه مغان اجرا گردید. نتایج نشان داد که تمام تیمارهای محرک رشد نسبت به شاهد در بهبود صفات مورد مطالعه مؤثر بودند، اما اثربخشی تیمارها تحت تأثیر تعامل با تیمار آبیاری قرار داشت. در شرایط آبیاری نرمال، تیمار اسید هیومیک با عملکرد دانه ۳۸۰۲ کیلوگرم در هکتار، روغن ۴۳/۸ درصد و کارایی مصرف آب برابر ۱/۱۷ کیلوگرم بر مترمکعب بهترین عملکرد را داشت. در مقابل، در تیمار تنش خشکی، اسید آمینه با کارایی مصرف آب معادل ۱/۷۵ و عملکرد دانه ۳۶۸۲ کیلوگرم در هکتار برتر بود. نتایج تحلیل اقتصادی با استفاده از روش بودجه‌بندی جزئی نیز مؤید سودآوری تیمار اسید هیومیک در شرایط نرمال و اسید آمینه در شرایط خشکی بیشتر بود. تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) با استفاده از روش تاپسیس نشان داد که انتخاب تیمار برتر باید با توجه به اولویت‌های زراعی (عملکرد، کیفیت یا بهره‌وری آب) و شرایط محیطی صورت گیرد؛ بر اساس اولویت‌های زراعی کشاورز مزبور، در شرایط عادی، اسید هیومیک در رتبه نخست قرار گرفت، در حالی که در شرایط خشکی، اسیدهای آمینه و گاهی عصاره جلبک دریایی در اولویت اول قرار داشت. نتایج پژوهش حاکی از آن است که کاربرد محرک‌های آلی رشد، به‌ویژه در شرایط محدودیت منابع آب، موجب افزایش عملکرد، کیفیت روغن و کارایی مصرف آب کلزا می‌شود و می‌تواند به عنوان راهکار پایدار و اقتصادی در مناطق نیمه‌خشک ایران مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: اسید آمینه، اسید هیومیک، تنش خشکی، روش تاپسیس، عصاره جلبک دریایی، کشاورزی پایدار

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



## مقدمه

با توجه به محدودیت منابع آب در ایران و اهمیت کلزا به عنوان یک منبع روغنی با کیفیت، شناسایی محرک‌های رشد مؤثر در افزایش عملکرد و بهره‌وری آب ضروری است. کلزا (*Brassica napus L.*) به عنوان یکی از مهم‌ترین گیاهان روغنی در سطح جهان، به دلیل دارا بودن اسیدهای چرب غیراشباع، فقدان کلسترول و کیفیت تغذیه‌ای بالای روغن آن، از جایگاه ویژه‌ای در رژیم‌های غذایی سالم برخوردار است (شین و همکاران، ۲۰۲۳). در مقایسه با روغن‌هایی نظیر آفتابگردان، ذرت و سویا، روغن کلزا به دلیل ترکیب مطلوب اسیدهای چرب و پایداری اکسیداتیو، اولویت بالاتری برای مصرف انسانی دارد. در ایران نیز کلزا به عنوان محصولی استراتژیک و جایگزین مناسب برای واردات روغن خوراکی، مورد توجه برنامه‌های توسعه کشاورزی قرار گرفته است (امیری اوغان، ۱۴۰۲). در ایران، سطح زیر کشت کلزا در سال ۲۰۲۱ به ۱۱۲/۷ هکتار رسید که نشان‌دهنده رشد قابل توجهی در تولید این محصول است. در منطقه مغان، به‌ویژه شهرستان بيله‌سوار، سطح زیر کشت کلزا در سال‌های اخیر افزایش یافته و به حدود ۳/۴ هکتار رسیده است. عملکرد متوسط برداشت کلزا در این منطقه بیش از ۲/۵ تن در هکتار گزارش شده است. درصد روغن دانه کلزا در ایران به‌طور میانگین حدود ۴۰ درصد است. این اطلاعات نشان‌دهنده پتانسیل بالای تولید کلزا در ایران و به‌ویژه در منطقه مغان است (هاشمی و همکاران، ۲۰۲۴). با این حال، در بسیاری از مناطق کشت کلزا، به‌ویژه در نواحی نیمه‌خشک مانند شمال غرب کشور، تنش‌هایی نظیر کم‌آبی و شوری، تولید پایدار این محصول را با چالش‌هایی مواجه کرده است (شبنانی و همکاران، ۲۰۱۲). اقلیم ایران با متوسط بارندگی سالانه حدود ۲۵۰ میلی‌متر که تنها یک سوم میانگین جهانی است و نرخ تبخیر سالانه‌ای تا سه برابر متوسط جهانی، شرایط ناپایداری برای تأمین آب در زراعت دیم و آبی فراهم آورده است (شیروانی، ۲۰۱۷). در چنین شرایطی، افزایش تاب‌آوری

گیاهان زراعی نسبت به تنش خشکی، یکی از محورهای کلیدی کشاورزی پایدار و هوشمند اقلیمی به‌شمار می‌رود. از جمله راهکارهای مؤثر برای کاهش اثرات منفی خشکی، استفاده از محرک رشد گیاهی است که بدون افزایش مستقیم عناصر غذایی، موجب بهبود فرآیندهای فیزیولوژیکی، افزایش کارایی مصرف آب<sup>۱</sup> و ارتقای کیفیت محصول می‌شوند (دوجاردین، ۲۰۱۵). محرک‌های رشد گیاهی موادی با منشأ طبیعی شامل ترکیبات آلی و زیستی مانند اسیدهای هیومیک و فولویک، اسیدهای آمینه و عصاره‌های جلبک دریایی هستند که توانایی ارتقاء رشد و مقاومت گیاه را در برابر تنش‌های زیستی و غیرزیستی دارند (روفائل و کولا، ۲۰۲۰). اسید فولویک نیز با وزن مولکولی کمتر نسبت به هیومیک اسید، جذب و تحرک سریع‌تری در بافت‌های گیاهی دارد و در افزایش کارایی مصرف عناصر غذایی و کیفیت محصول نقش دارد (شهرجیان و سان، ۲۰۲۴). پژوهش‌های متعددی کارایی این مواد را در افزایش عملکرد دانه و کیفیت کلزا گزارش کرده‌اند. به‌طور مثال، میرزاپور و نورقلی‌پور (۲۰۲۲) نشان دادند که تیمار اسید هیومیک موجب افزایش ۱۵/۸ درصدی عملکرد و تیمار اسید فولویک بیشترین افزایش در درصد روغن (۹/۱ درصد) را به همراه داشت. در پژوهشی مشابه، رئیسی ساداتی و همکاران (۲۰۲۱) تأکید کردند که در شرایط نرمال، اسید آمینه و در شرایط خشکی، فولویک اسید اثربخشی بیشتری دارد. این تفاوت پاسخ‌ها به محرک‌ها، بسته به شرایط محیطی، مرحله فیزیولوژیکی، ساختار خاک و هدف تولید (عملکرد کمی یا کیفیت روغن)، تصمیم‌گیری درباره انتخاب تیمار مناسب را پیچیده می‌سازد. با توجه به این چالش، بهره‌گیری از رویکردهای تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره مانند روش تاپسیس<sup>۲</sup>، ابزار مناسبی برای ارزیابی هم‌زمان چند شاخص و اولویت‌بندی تیمارها در شرایط مختلف فراهم می‌آورد (هوانگ و یون، ۱۹۸۱). این رویکردها مانند فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) و ترکیب آن با مدل‌هایی همچون DEA قبلاً برای تحلیل

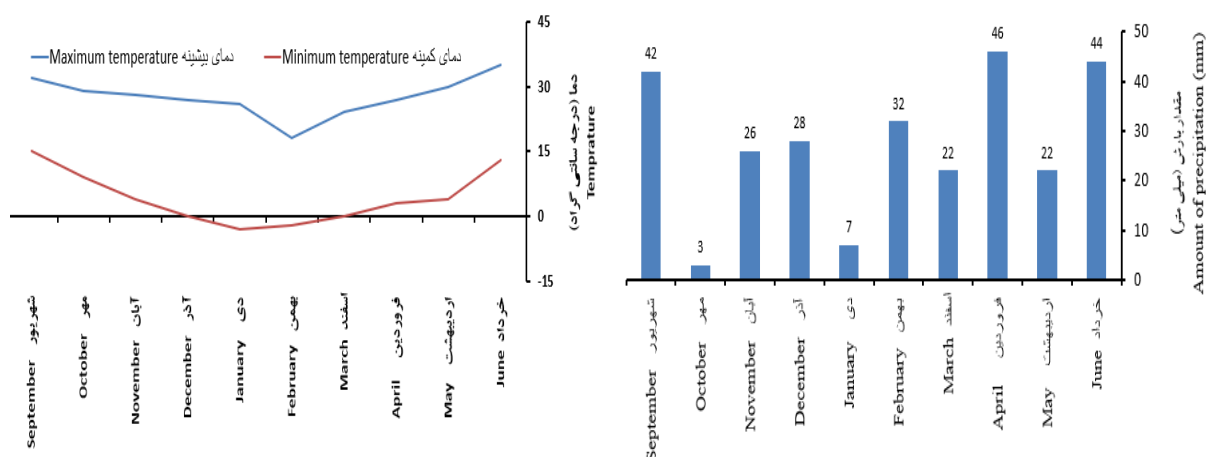
تعیین تیمار برتر از دیگر نوآوری‌های این مطالعه به‌شمار می‌رود. این پژوهش تلاش می‌کند تا با ادغام رویکردهای آلی، اقتصادی و تصمیم‌سازی مدیریتی، چارچوبی کاربردی برای ارتقای بهره‌وری کلزا در مناطق نیمه‌خشک کشور ارائه دهد.

### مواد و روش‌ها

#### منطقه مورد مطالعه

آزمایش طی دو فصل زراعی (۱۴۰۰ و ۱۳۹۹) در مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل (ایستگاه تحقیقاتی مغان) واقع در بین عرض‌های جغرافیایی ۳۹ درجه و ۱۲ دقیقه تا ۳۹ درجه و ۴۲ دقیقه شمالی و طول‌های جغرافیایی ۴۷ درجه و ۱۰ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۲۱ دقیقه شرقی انجام شد. منطقه پارس‌آباد مغان دارای اقلیم نیمه‌خشک و معتدل بوده و تابستان‌هایی گرم و مرطوب و زمستان‌هایی معتدل و مرطوب دارد. براساس داده‌های اقلیمی میان‌مدت در دشت مغان، میانگین بارندگی سالانه منطقه حدود ۲۹۱ میلی‌متر بوده است. میانگین دمای سالانه تقریباً ۲۰/۷ درجه سانتی‌گراد است؛ دمای حداکثر تابستان‌ها گاهی تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد یا بیشتر می‌رسد و دمای حداقل زمستان‌ها ممکن است به ۱۶- درجه سانتی-گراد نیز کاهش یابد. دامنه سالانه بارندگی نیز بین ۷۹ تا ۵۲۳ میلی‌متر نوسان دارد (شرکت آب و فاضلاب مغان، ۱۴۰۲). طی دوره رشد گیاه کلزا، دمای هوا در هیچ‌یک از روزهای سال به کمتر از ۵- درجه سانتی‌گراد نرسید، دمایی که می‌تواند برای گیاه کلزا خسارت‌زا باشد (امیری اوغان، ۱۴۰۲). باین‌حال، تعداد روزهایی با دمای زیر صفر در ماه‌های آذر، دی، بهمن و اسفند به ترتیب یک، سیزده، هشت و سه روز ثبت شد. میانگین نمودار تغییرات روزانه دما و بارش دو سال طی فصل رشد در شکل ۱ ارائه شده است.

کارایی مصرف آب در بخش کشاورزی به‌کار رفته‌اند (به‌عنوان مثال، در مطالعات منطقه سین‌کیانگ چین در سال ۲۰۲۰ و همچنین در مطالعات مربوط به منابع آبی تحت تغییرات اقلیمی در سال ۲۰۲۳) (سونگ و همکاران، ۲۰۲۰). چنین روش‌هایی قادرند با وزن‌دهی مناسب، معیارهایی مانند عملکرد، درصد روغن و کارایی مصرف آب را ترکیب کرده و بسته به اهداف زراعی، تیمار بهینه را مشخص کنند. افزون بر این، ترکیب تاپسیس با روش‌های وزن‌دهی عینی مانند روش اهمیت معیارها از طریق همبستگی بین معیارها<sup>۳</sup> دقت تصمیم‌گیری را در شرایط تضاد میان شاخص‌ها افزایش می‌دهد. از سوی دیگر، اغلب مطالعات پیشین تمرکز خود را بر یک یا دو جنبه عملکردی قرار داده و از تحلیل هم‌زمان مؤلفه‌های زیستی، کیفی و اقتصادی غافل بوده‌اند. با این حال، بیشتر پژوهش‌ها در حوزه کلزا (*Brassica napus L.*) در ایران در شرایط کنترل‌شده مانند گلخانه یا آزمایشگاه انجام شده‌اند، درحالی‌که مطالعات میدانی واقعی در مقیاس مزرعه‌ای بسیار محدود است. برای نمونه، تحقیقاتی مانند مطالعه بر ۱۳۰ مزرعه واقعی در استان گلستان با استفاده از DEA<sup>۴</sup> (تحلیل پوششی داده‌ها) برای بررسی بهره‌وری مصرف انرژی در تولید کلزا و ارزیابی مصرف آب و عملکرد در دشت مغان، در استان اردبیل، به‌عنوان نمونه‌هایی برجسته از پژوهش در شرایط واقعی مزرعه‌ای قابل ذکر هستند (موسوی اول و همکاران، ۲۰۱۱). این محدودیت، تعمیم نتایج و ارائه توصیه‌های فنی مؤثر را برای کشاورزان دشوار می‌سازد. در این راستا، پژوهش حاضر با هدف بررسی اثرات چهار محرک آلی شامل اسید هیومیک، فولویک، آمینه و عصاره جلبک دریایی، در دو تیمار آبیاری نرمال و تنش خشکی، بر عملکرد، درصد روغن و بهره‌وری مصرف آب کلزا انجام شده است. تحلیل اقتصادی با استفاده از روش بودجه‌بندی جزئی و تلفیق نتایج با مدل تاپسیس به‌منظور



شکل ۱- نمودار میانگین بارش و دمای محل اجرای پژوهش در طول دوره رشد کلزا

### طرح آزمایشی

این آزمایش در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی به صورت کرت‌های خردشده در سه تکرار اجرا شد. عامل اصلی شامل دو تیمار آبیاری (آبیاری پس از ۷۰ تا ۸۰ میلی‌متر تبخیر تجمعی از تشت تبخیر کلاس A (آبیاری نرمال) و آبیاری پس از ۱۳۰ تا ۱۴۰ میلی‌متر تبخیر تجمعی (تنش آبی) که بر اساس مطالعات پیشین تعیین شده بود. آبیاری پس از رسیدن تبخیر تجمعی حدود ۷۰-۸۰ میلی‌متر از تشت تبخیر کلاس A به عنوان آبیاری نرمال در نظر گرفته می‌شود، درحالی‌که اگر آبیاری پس از تبخیر تجمعی بیشتری انجام شود، شرایط تنش آبی ایجاد می‌کند و می‌تواند عملکرد محصول و کیفیت دانه‌ها را کاهش دهد (طاها و همکاران، ۲۰۱۱ و لاخاوات و همکاران، ۲۰۲۴). مقدار آب مصرفی در هر نوبت آبیاری بر اساس پایش رطوبت خاک با دستگاه TDR<sup>۵</sup> در عمق توسعه ریشه (حدود یک متر) و با هدف رساندن رطوبت به ظرفیت زراعی تعیین گردید. عامل فرعی شامل پنج تیمار کودی بود که در دو مرحله فنولوژیکی خروج از روزت و شروع گلدهی و با غلظت پنج در هزار به گیاه اعمال شدند. تیمارها شامل: (۱) شاهد (بدون استفاده از محرک رشد، تنها مصرف کود شیمیایی طبق آزمون خاک ۲) تیمار شاهد + محلول‌پاشی اسید آمینه؛ (۳) تیمار شاهد + مصرف اسید هیومیک از طریق کودآبیاری (پنج کیلوگرم در هکتار؛ (۴)

تیمار شاهد + محلول‌پاشی اسید فولویک؛ (۵) تیمار شاهد + محلول‌پاشی عصاره جلبک دریایی بودند.

### اجرای آزمایش

پیش از اعمال تیمارهای آزمایشی، ترکیب شیمیایی محرک‌های رشد مورد استفاده در آزمایشگاه مؤسسه تحقیقات خاک و آب مورد آنالیز قرار گرفت. بر اساس نتایج این آنالیز، اسید هیومیک مصرفی دارای ۵۳ درصد اسید هیومیک، اسید فولویک دارای ۲۲/۱ درصد اسید فولویک، اسید آمینه حاوی ۳۶/۸ درصد اسید آمینه آزاد و عصاره جلبک دریایی دارای ۱۰ درصد اسید آلجینیک بود. گیاه مورد مطالعه، کلزا رقم آزاد گرده‌افشان دلگان بود که هر سال در اواسط مهرماه در مزرعه کشت شد. هر کرت آزمایشی دارای ابعاد پنج متر در ۲/۴ متر و شامل چهار ردیف کاشت بود. در تیمار سوم (کاربرد اسید هیومیک)، در هر کرت مقدار شش گرم اسید هیومیک به صورت کودآبیاری در دو مرحله رشدی خروج از روزت و شروع گلدهی به خاک داده شد. پیش از اجرای آزمایش، از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متری خاک نمونه مرکبی تهیه گردید. نمونه‌ها پس از هوا خشک شدن و عبور از الک دو میلی‌متری، برای اندازه‌گیری برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی از جمله بافت خاک (جی و بایدر، ۱۹۸۶)، درصد کربن آلی (نلسون و سامرز، ۱۹۹۶)، عناصر غذایی کم‌مصرف (لیندسی

و نورویل، ۱۹۷۸)، کربنات کلسیم معادل (لوپیرت و سنوارز، ۱۹۹۶)، اسیدیته و هدایت الکتریکی (رودس، ۱۹۸۲)، پتاسیم قابل جذب (هلمک و اسپارک، ۱۹۹۶) و فسفر قابل جذب (اولسین و سامیرز، ۱۹۸۲) مورد تجزیه قرار گرفتند. نتایج این آزمون‌ها در جدول یک ارائه شده است.

جدول ۱- برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک قطعات آزمایشی

| بافت خاک | مس  | منگنز | روی  | آهن | پتاسیم قابل جذب     | فسفر قابل جذب | ماده آلی | کربنات کلسیم معادل | هدایت الکتریکی (dS.m <sup>-1</sup> ) | اسیدیته |
|----------|-----|-------|------|-----|---------------------|---------------|----------|--------------------|--------------------------------------|---------|
|          |     |       |      |     |                     |               |          |                    |                                      |         |
|          |     |       |      |     | mg.kg <sup>-1</sup> |               | %        |                    |                                      |         |
| لوم رسی  | 1.6 | 10.6  | 0.13 | 3.2 | 521                 | 15.2          | 0.9      | 5.7                | 1.34                                 | 7.8     |

هکتار) به کار برده شد. همچنین، به منظور رفع کمبود عناصر ریزمغذی، محلول پاشی سولفات روی و سولفات آهن با غلظت سه در هزار در دو مرحله فنولوژیکی خروج از ریزت و پیش از گلدهی صورت گرفت تا از بروز کمبود این عناصر و اثرات منفی آن بر رشد و عملکرد گیاه جلوگیری شود. در پایان فصل رشد، میزان آب مصرفی و برخی شاخص‌های کلیدی رشد از جمله عملکرد دانه، درصد روغن و کارایی مصرف آب مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. عملکرد دانه با جمع‌آوری و وزن کردن کل دانه‌های برداشت‌شده از سطحی معادل ۱/۵ متر مربع تعیین شد. درصد روغن دانه با استفاده از روش سوکسله<sup>۶</sup> و در شرایط دمای ۴۵ درجه سانتی‌گراد و به کارگیری حلال دی اتیل اتر خشک تعیین گردید (حسینی، ۱۹۹۴). همچنین، کارایی مصرف آب که نشان‌دهنده میزان محصول تولیدشده به ازای هر واحد آب مصرفی است، از تقسیم عملکرد دانه (کیلوگرم بر هکتار) بر حجم آب مصرفی (مترمکعب بر هکتار) محاسبه شد (یاداو و همکاران، ۲۰۲۴).

#### آنالیز آماری

قبل از انجام آنالیز واریانس، ابتدا وجود یا عدم وجود داده‌های پرت با استفاده از آزمون گرابز (۱۹۶۹) بررسی شد. سپس، نرمال بودن توزیع داده‌ها توسط آزمون شاپیرو-ویلک (۱۹۶۵) ارزیابی گردید. پس از تأیید فرضیات مربوطه، تحلیل واریانس (ANOVA) روی داده‌ها انجام شد و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از روش حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح اطمینان یک

ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک مورد مطالعه نشان داد که خاک دارای واکنش نسبتاً قلیایی (pH=7.8) است که می‌تواند بر قابلیت جذب برخی عناصر ریزمغذی به‌ویژه روی و آهن تأثیر منفی داشته باشد. هدایت الکتریکی خاک (۱/۳۴ دسی‌زیمنس بر متر) در محدوده غیرشور قرار گرفته و از این منظر محدودیتی برای رشد گیاهان ایجاد نمی‌کند. میزان آهک معادل (۵/۷ درصد) و ماده آلی پایین (۰/۹ درصد) بیانگر حاصلخیزی نسبتاً ضعیف خاک و نیاز به مدیریت بهبود مواد آلی است. غلظت فسفر قابل جذب (۱۵/۲ mg/kg) در حد مناسب و پتاسیم قابل جذب (۵۲۱ mg/kg) در سطح نسبتاً بالا قرار دارد، درحالی‌که غلظت آهن (۳/۲ mg/kg) و به‌ویژه روی (۰/۱۳ mg/kg) کمتر از حد بحرانی گزارش شده و احتمال بروز کمبود این عناصر در گیاهان وجود دارد. در مقابل، منگنز (mg/kg) و مس (۱۰/۶ mg/kg) در محدوده مطلوب قرار دارند. با توجه به بافت لومی رسی خاک، ظرفیت نگهداری رطوبت و مواد غذایی مطلوب است، با این حال محدودیت اصلی خاک در زمینه عناصر کم‌مصرف، به‌ویژه روی، قابل توجه بوده و نیازمند برنامه‌ریزی دقیق تغذیه‌ای است.

پس از انجام عملیات آماده‌سازی زمین شامل شخم، دیسک و تسطیح، برای کنترل علف‌های هرز از علف‌کش پیش‌رویشی ترفلان به میزان دو لیتر در هکتار استفاده شد. به منظور تأمین نیتروژن مورد نیاز گیاه، کود اوره در مجموع به مقدار ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار و در سه مرحله زمان آماده‌سازی بستر بذر (قبل از کاشت بصورت پایه)، مرحله ریزت و مرحله ساقه رفتن (هر بار ۵۰ کیلوگرم در

درصد انجام گرفت. تمامی تحلیل‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۴ صورت پذیرفت.

### ارزیابی اقتصادی

روش بودجه‌بندی جزئی<sup>۷</sup> یکی از روش‌های اقتصادی مؤثر و ساده برای ارزیابی سودآوری تغییرات مدیریتی یا تیمارهای جدید در کشاورزی است که تنها هزینه‌ها و منافع مرتبط با تغییر مورد نظر را مورد بررسی قرار می‌دهد. در این روش، ابتدا منافع افزایشی شامل افزایش درآمدها یا کاهش هزینه‌ها و سپس هزینه‌های افزایشی شامل هزینه‌های اضافی اجرای تیمار جدید شناسایی می‌شود؛ همچنین منافع کاهش‌یافته و هزینه‌های کاهش‌یافته نیز مدنظر قرار می‌گیرد. در نهایت، تفاوت بین مجموع منافع و هزینه‌ها تعیین‌کننده توجیه‌پذیری اقتصادی تیمار خواهد بود؛ به‌گونه‌ای که در صورت برتری منافع نسبت به هزینه‌ها، اجرای تیمار جدید از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه می‌باشد. این روش به دلیل سادگی و تمرکز بر عوامل مؤثر در تغییر عملکرد و هزینه‌ها، به‌طور گسترده‌ای در تحلیل اقتصادی اصلاحات کشاورزی کاربرد دارد (روو و همکاران، ۲۰۲۱).

درصد روغن و کارایی مصرف آب به‌عنوان معیارهای ارزیابی تحت دو تیمار آبیاری بودند. در گام دوم، برای مقایسه‌پذیری معیارها، ماتریس تصمیم به روش برداری نرمال‌سازی گردید. سپس در مرحله سوم، اوزان معیارها با توجه به اهداف کشاورز تعیین و در ماتریس نرمال‌شده اعمال گردید. در ادامه، مقادیر ایده‌آل (بهترین حالت برای هر معیار) و ضد ایده‌آل (بدترین حالت ممکن) تعیین و فاصله هر تیمار از این دو وضعیت به کمک فاصله اقلیدسی محاسبه شد. در مرحله پنجم شاخص شباهت هر گزینه بر اساس این فاصله‌ها برآورد گردید که مقدار آن میزان نزدیکی گزینه به راه‌حل ایده‌آل را نشان می‌دهد. این شاخص با رابطه (۱) محاسبه شد:

$$C_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \quad (1)$$

$d_i^+$  و  $d_i^-$  به ترتیب فاصله گزینه  $i$  از ایده‌آل منفی و مثبت است.

در نهایت، تیمارها بر اساس مقدار شاخص شباهت رتبه‌بندی شدند؛ بدین معنا که تیمار مطلوب گزینه‌ای بود که بیشترین نزدیکی را به حالت ایده‌آل و بیشترین فاصله را از حالت ضد ایده‌آل داشت.

### نتایج و بحث

نتایج این پژوهش با هدف بررسی تأثیر محرک‌های آلی رشد بر عملکرد، درصد روغن و کارایی مصرف آب کلزا تحت شرایط آبیاری نرمال و تنش خشکی ارائه می‌شود. از آنجاکه پاسخ گیاهان زراعی به این مواد به‌شدت تحت تأثیر وضعیت رطوبتی خاک و نوع محرک قرار دارد، انتظار می‌رود اثر تیمارها در شرایط مختلف متفاوت باشد. از سوی دیگر، محرک‌های آلی معمولاً اثرات چندبعدی دارند و می‌توانند هم بر صفات کمی مانند عملکرد دانه و هم بر صفات کیفی نظیر درصد روغن تأثیرگذار باشند. همچنین ارزیابی کارایی مصرف آب در کنار این شاخص‌ها، دیدگاه جامع‌تری از کارایی این مواد در نظام‌های کشاورزی منابع محدود فراهم می‌آورد. بر این اساس، در ادامه ابتدا اثر

### تصمیم‌گیری چند معیاره<sup>۸</sup> (MCDM) به روش TOPSIS

در این پژوهش به‌منظور شناسایی مناسب‌ترین تیمار، از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره تاپسیس بهره گرفته شد (هوانگ و یون، ۱۹۸۱). این روش به دلیل قابلیت ارزیابی هم‌زمان شاخص‌های متعدد با مقیاس‌ها و اوزان متفاوت، ابزاری کارآمد در مسائل مرتبط با کشاورزی محسوب می‌شود. فرایند اجرای تاپسیس شامل شش مرحله اصلی بود: در گام نخست، ماتریس تصمیم شامل گزینه‌ها به‌صورت سطر و معیارها به‌صورت ستون تشکیل شد؛ به‌گونه‌ای که هر سلول نشان‌دهنده عملکرد یک گزینه در یک معیار مشخص بود. پنج تیمار کودی محرک رشد به‌عنوان گزینه‌های ماتریس تصمیم‌گیری و عملکرد دانه،

تیمارهای مختلف بر شاخص‌های اصلی ارائه شده و سپس با مقایسه و تحلیل نتایج بر مبنای مطالعات پیشین، جایگاه هر ترکیب در شرایط نرمال و تنش خشکی تبیین می‌گردد.

### اثر تیمارهای آبیاری و محرک‌های رشد بر عملکرد دانه، درصد روغن و کارایی مصرف آب کلزا

آنالیز واریانس نشان داد که محرک رشد تأثیر معنی‌داری در سطح یک درصد بر کارایی مصرف آب،

جدول ۲- آنالیز واریانس (میانگین مربعات) کارایی مصرف آب و برخی خصوصیات گیاه کلزا

| میانگین مربعات       |                    |                    | درجه آزادی | منابع تغییر         |
|----------------------|--------------------|--------------------|------------|---------------------|
| عملکرد دانه          | روغن دانه          | کارایی مصرف آب     |            |                     |
| 27240 <sup>ns</sup>  | 1.2 <sup>ns</sup>  | 0.03 <sup>ns</sup> | 2          | بلوک                |
| 126736 <sup>ns</sup> | 25.3 <sup>ns</sup> | 0.42 <sup>ns</sup> | 1          | آبیاری (کرت اصلی)   |
| 48154                | 3.8                | 0.06               | 2          | خطا (کرت اصلی)      |
| 465997 <sup>**</sup> | 18.7 <sup>**</sup> | 0.41 <sup>**</sup> | 5          | محرک رشد (کرت فرعی) |
| 80579 <sup>**</sup>  | 4.2 <sup>ns</sup>  | 0.07 <sup>ns</sup> | 5          | آبیاری × محرک رشد   |
| 9942                 | 2.1                | 0.04               | 20         | خطا (کرت فرعی)      |
| 2.80                 | 3.20               | 3.54               | -          | ضریب تغییرات (%)    |

ns و \*\* به ترتیب نشان دهنده عدم معنی‌داری، اثر معنی‌دار در سطح یک درصد می‌باشد

مترمکعب) را نشان داد. درصد روغن دانه و عملکرد دانه نیز تحت تأثیر محرک رشد افزایش یافته و بالاترین مقادیر به ترتیب با اسید هیومیک و عصاره جلبک دریایی مشاهده شد، در حالی که کمترین مقادیر مربوط به تیمار شاهد بود (جدول ۳).

بررسی اثرات اصلی تیمارها نشان داد که کارایی مصرف آب با استفاده از محرک‌های رشد به طور قابل توجهی افزایش یافت؛ به طوری که بیشترین کارایی مربوط به اسید آمینه (۱/۴) کیلوگرم بر مترمکعب و اسید هیومیک و عصاره جلبک دریایی (۱/۳۸) کیلوگرم بر مترمکعب بود، در حالی که شاهد کمترین مقدار (۱/۲۳) کیلوگرم بر

جدول ۳- اثر اصلی تیمارهای آبیاری و محرک رشد بر کارایی مصرف آب و برخی خصوصیات گیاه کلزا

| فاکتورها     | تیمار             | کارایی مصرف آب<br>(کیلوگرم بر متر مکعب) | درصد روغن دانه     | عملکرد دانه<br>(کیلوگرم در هکتار) |
|--------------|-------------------|-----------------------------------------|--------------------|-----------------------------------|
| تیمار آبیاری | نرمال             | 1.11                                    | 43.2               | 3620                              |
|              | خشکی              | 1.08                                    | 39.8               | 3502                              |
| محرک رشد     | شاهد              | 1.23 <sup>c</sup>                       | 38.5 <sup>c</sup>  | 3181 <sup>c</sup>                 |
|              | اسید آمینه        | 1.40 <sup>a</sup>                       | 41.7 <sup>ab</sup> | 3560 <sup>a</sup>                 |
|              | اسید هیومیک       | 1.38 <sup>a</sup>                       | 42.3 <sup>a</sup>  | 3588 <sup>a</sup>                 |
|              | اسید فولویک       | 1.35 <sup>b</sup>                       | 40.2 <sup>b</sup>  | 3467 <sup>b</sup>                 |
|              | عصاره جلبک دریایی | 1.38 <sup>a</sup>                       | 41.9 <sup>a</sup>  | 3528 <sup>ab</sup>                |

میانگین‌هایی که در هر ستون دارای حروف آماری مشترک هستند، بر اساس آزمون LSD، تفاوت آماری معنی‌داری در سطح یک درصد ندارند

این اختلاف‌ها معنی‌دار نبودند، اما در بررسی تعامل آبیاری × محرک رشد مشخص شد که در شرایط خشکی، تیمار

اگرچه میانگین‌های مربوط به آبیاری نرمال و تنش خشکی برای کارایی مصرف آب تفاوت کمی داشتند،

اسید آمینه بیشترین کارایی مصرف آب (۱/۷۵) کیلوگرم بر متر مکعب) و عملکرد دانه بالاتر را ایجاد کرد، در حالی که کمترین مقادیر مربوط به شاهد در هر دو تیمار آبیاری بود (جدول ۴). این نتایج نشان می‌دهد که محرک رشد عامل اصلی تغییرات صفات کلزا است و اعمال آن، به ویژه در شرایط تنش خشکی، می‌تواند موجب بهبود کارایی مصرف آب و افزایش عملکرد دانه و درصد روغن شود.

جدول ۴- تأثیر برهمکنش تیمارهای آبیاری و محرک رشد بر کارایی مصرف آب و برخی خصوصیات گیاه کلزا

| تیمار آبیاری | معیار یا محرک‌های رشد | کارایی مصرف آب (کیلوگرم بر متر مکعب) | درصد روغن دانه | عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار) |
|--------------|-----------------------|--------------------------------------|----------------|--------------------------------|
| نرمال        | شاهد                  | 1.03                                 | 40.1           | 3326 <sup>c</sup>              |
|              | اسید آمینه            | 1.06                                 | 42.5           | 3438 <sup>b</sup>              |
|              | اسید هیومیک           | 1.17                                 | 43.8           | 3802 <sup>a</sup>              |
|              | اسید فولویک           | 1.09                                 | 41.2           | 3539 <sup>ab</sup>             |
|              | عصاره جلبک دریایی     | 1.09                                 | 42.7           | 3537 <sup>ab</sup>             |
| خشکی         | شاهد                  | 1.44                                 | 36.9           | 3036 <sup>c</sup>              |
|              | اسید آمینه            | 1.75                                 | 40.9           | 3682 <sup>a</sup>              |
|              | اسید هیومیک           | 1.60                                 | 40.8           | 3374 <sup>b</sup>              |
|              | اسید فولویک           | 1.61                                 | 39.2           | 3395 <sup>b</sup>              |
|              | عصاره جلبک دریایی     | 1.67                                 | 41.1           | 3519 <sup>ab</sup>             |

میانگین‌هایی که در هر ستون دارای حروف آماری مشترک هستند، بر اساس آزمون LSD، تفاوت آماری معنی‌داری در سطح یک درصد ندارند

محلول‌پاشی اسیدهای آمینه در شرایط تنش کم‌آبی آخر فصل موجب بهبود برخی فرآیندهای فیزیولوژیک کلزا می‌شود. بنابراین، نتایج حاضر با مطالعات مشابه تناقض آشکاری ندارد و تفاوت‌های جزئی مشاهده شده احتمالاً به تفاوت در شرایط خاک، اقلیم، مقدار کاربرد مواد محرک و واریته‌های کلزا بازمی‌گردد.

نتایج فیزیولوژیکی نشان داد که اسید هیومیک در شرایط آبیاری کامل با بهبود ساختار خاک، افزایش تبادل کاتیونی و تحریک فعالیت میکروبی موجب افزایش راندمان تغذیه‌ای و رشد عمومی می‌شود، در حالی که اسیدهای آمینه در شرایط تنش خشکی با تنظیم اسمزی، فعال‌سازی آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و کاهش رادیکال‌های آزاد به مقاومت گیاه کمک می‌کنند. عصاره جلبک دریایی نیز با دارا بودن اکسین، جیبرلین و بتائین موجب افزایش سنتز کلروفیل و تبادل گازی شده و رشد گیاه را حفظ می‌کند. این یافته‌ها با مطالعات ما و همکاران (۲۰۲۲)، کومار و همکاران (۲۰۲۴)، فکری اجیرلو و همکاران (۱۴۰۲) و ریسی ساداتی و همکاران (۲۰۲۱) همخوانی دارد.

مطالعات پیشین نیز با این نتایج همخوانی دارند. امپونگ و همکاران (۲۰۲۲) و انجم و همکاران (۲۰۱۴) گزارش کردند که هیومیک اسید در شرایط تغذیه‌ای بهینه و اسیدهای آمینه در شرایط تنش زیستی مؤثرترند. استفاده از محرک‌های رشد شامل اسیدهای آمینه، عصاره جلبک دریایی و هیومیک اسید در شرایط تنش خشکی موجب بهبود عملکرد و کیفیت گیاهان می‌شود. برای مثال، نتایج مطالعه‌ای در ایستگاه تحقیقات کشاورزی مغان نشان داد که کاربرد محرک‌های رشد در شرایط کم‌آبی عملکرد کلزا را افزایش می‌دهد (پسندیده و همکاران، ۲۰۲۲). مطالعات مشابه بر روی گیاه کلم بروکلی نشان داد که محلول‌پاشی یا کودآبیاری با این مواد باعث بهبود صفات فیزیولوژیکی، افزایش محتوای کلروفیل، عملکرد و کیفیت محصول و پایداری عملکرد در شرایط تنش خشکی می‌شود (کالوزویچ و همکاران، ۲۰۱۷). رافائل و کولا (۲۰۲۰) نیز تأکید کردند که محرک‌های رشد با تنظیم پاسخ‌های فیزیولوژیک و متابولیک گیاه، نقش کلیدی در تحمل تنش‌های غیرزیستی ایفا می‌کنند. مطالعه فیاض و همکاران (۱۴۰۱) نشان داد که

قابل توجه است که تیمارهایی با عملکرد متوسط اما هزینه پایین‌تر (مانند عصاره جلبک) نیز در برخی شرایط اقتصادی‌تر از تیمارهای پرهزینه‌تر بودند. یافته‌های این پژوهش تأیید می‌کنند که صرف بررسی عملکرد بیولوژیکی کافی نیست و انتخاب تیمار بهینه باید با در نظر گرفتن هزینه-فایده و هدف زراعی انجام شود؛ نتیجه‌ای که با مطالعات یوسفی و همکاران (۲۰۱۷) و امپونگ و همکاران (۲۰۲۲) مطابقت دارد. از این رو، ترکیب داده‌های زراعی با تحلیل‌های اقتصادی ابزاری کلیدی در توصیه فنی و مدیریتی برای کشاورزان در مناطق نیمه‌خشک محسوب می‌شود.

در شرایط آبیاری نرمال، تیمار اسید هیومیک بیشترین سود خالص را به همراه داشت که این امر ناشی از بهبود ساختار خاک، افزایش جذب عناصر غذایی و در نهایت افزایش عملکرد دانه و کیفیت محصول است. بهبود ساختار خاک باعث افزایش ظرفیت نگهداری آب و بهبود تهویه ریشه می‌شود که در نهایت منجر به رشد بهتر گیاه و افزایش عملکرد می‌گردد. این بهبودها باعث کاهش نیاز به مصرف کودهای شیمیایی و آبیاری مکرر شده و هزینه‌های تولید را کاهش می‌دهد.

در شرایط تنش خشکی نیز تیمار اسید آمینه به دلیل نقش مؤثر آن در افزایش مقاومت گیاه به استرس آبی و حفظ عملکرد، بیشترین بازده اقتصادی را ایجاد کرد. اسیدهای آمینه با تنظیم اسمزی سلولی، فعال‌سازی سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی و کاهش آسیب‌های اکسیداتیو، به گیاه کمک می‌کنند تا در شرایط کم‌آبی عملکرد خود را حفظ کند. این موضوع باعث کاهش خسارات ناشی از تنش و حفظ درآمد کشاورزان می‌شود. این یافته‌ها اهمیت در نظر گرفتن هم‌زمان جنبه‌های اقتصادی و زیستی در انتخاب تیمار بهینه را برجسته می‌کند، به‌ویژه در نظام‌های زراعی منابع محدود که کشاورزان با محدودیت‌های مالی و محیطی مواجه‌اند. در چنین شرایطی، انتخاب تیماری که هم عملکرد را بهبود دهد و هم هزینه‌های تولید را کنترل کند، از اهمیت بالایی برخوردار است. مطالعات پیشین نیز بر ضرورت

بررسی الگوی بارش منطقه نشان داد که وقوع چند بارش مؤثر در حوالی فازهای حساس زایشی و پر شدن دانه کلزا، شدت واقعی تنش آبی را کاهش داده و آثار فیزیولوژیکی آن را تخفیف داده است. یافته‌های مشابهی در هند و بنگلادش گزارش شده است که بارش‌های غیرمنتظره در دوره‌های حساس رشد می‌تواند اثرات منفی تنش آبی را کاهش دهد و عملکرد محصول را بهبود بخشد (سیرینی‌دی و همکاران، ۲۰۲۳؛ احامید و همکاران، ۲۰۱۹). بنابراین، تحلیل هم‌زمان پارامترهای اقلیمی و بیولوژیکی برای ارزیابی دقیق تنش ضروری است.

به طور کلی، استفاده از اسید هیومیک در شرایط آبیاری کافی و اسید آمینه یا عصاره جلبک دریایی در شرایط تنش خشکی، استراتژی مناسبی برای ارتقای عملکرد، درصد روغن و کارایی مصرف آب کلزا است و می‌تواند در طراحی سیستم‌های کشت پایدار برای مناطق نیمه‌خشک و تحت تأثیر تغییر اقلیم مورد استفاده قرار گیرد. این نتایج نشان می‌دهد که محرک‌های رشد به عنوان یک راهکار کم‌هزینه، مؤثر و سازگار با محیط‌زیست، نقش کلیدی در بهبود عملکرد و بهره‌وری مصرف آب کلزا ایفا می‌کنند.

### تحلیل اقتصادی

تحلیل اقتصادی تیمارهای محرک رشد با استفاده از روش بودجه‌بندی جزئی (جدول ۵) نشان داد که تمامی تیمارها نسبت به شاهد از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر بودند، چراکه نسبت منفعت به هزینه (Benefit-Cost Ratio (BCR)) در همه آن‌ها بزرگ‌تر از یک بود. در شرایط آبیاری نرمال، تیمار اسید هیومیک با توجه به عملکرد بالای دانه و افزایش کیفیت روغن، بالاترین سود خالص و بالاترین نسبت منفعت به هزینه را به خود اختصاص داد. این نتایج هماهنگ با برتری آبی این تیمار در شرایط بدون تنش هستند. در مقابل، در شرایط تنش خشکی، تیمار اسید آمینه به دلیل توانایی در حفظ عملکرد و ارتقای بهره‌وری مصرف آب، بالاترین بازده اقتصادی را ایجاد کرد که نشان‌دهنده سازگاری آن با شرایط محدودیت آبی است.

تلفیق تحلیل عملکرد و هزینه تأکید داشته‌اند. یوسفی و همکاران (۲۰۱۷) نشان دادند که ارزیابی اقتصادی همراه با تحلیل فیزیولوژیکی و عملکردی، راهنمایی دقیق‌تری برای انتخاب بهینه محرک رشد فراهم می‌آورد و می‌تواند به کشاورزان کمک کند تا تصمیمات بهتری در مدیریت منابع خود اتخاذ کنند.

در کشاورزی کلزا، افزایش عملکرد دانه به‌طور مستقیم با درآمد اقتصادی کشاورز مرتبط است و عواملی مانند بهبود ساختار خاک، مدیریت بهینه آب و تغذیه گیاه نقش کلیدی در این افزایش دارند. همچنین، مصرف محرک‌های رشد می‌تواند هزینه‌های ورودی کشاورزی را کاهش داده و در عین حال عملکرد و کیفیت محصول را افزایش دهد (پسندیده و همکاران، ۲۰۲۲؛ رفیع و همکاران، ۱۴۰۰؛ خودشناس و همکاران، ۱۴۰۱). این کاهش هزینه‌ها از طریق کاهش مصرف کودهای شیمیایی، کاهش دفعات آبیاری و بهبود کارایی استفاده از منابع آبی و غذایی محقق می‌شود که در نهایت به سودآوری بیشتر منجر می‌شود.

از سوی دیگر، در شرایط تنش خشکی، استفاده از محرک‌های رشد مانند اسید آمینه، اسید هیومیک و عصاره جلبک دریایی می‌تواند به‌طور مؤثری عملکرد دانه کلزا را افزایش دهد و مقاومت گیاه را به کم‌آبی بهبود بخشد. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که مصرف توأم این محرک‌ها در شرایط تنش خشکی، افزایش عملکرد دانه را به‌طور معنی‌داری نسبت به تیمار شاهد به همراه داشته است. به‌عنوان مثال، در تحقیقی در ایستگاه تحقیقات کشاورزی مغان، مصرف توأم این محرک‌ها موجب افزایش ۳۱/۹ درصدی عملکرد دانه کلزا در شرایط تنش خشکی نسبت به شاهد شده است (پسندیده و همکاران، ۲۰۲۲). همچنین، در مطالعه‌ای در استان قم، استفاده از این محرک‌ها

در خاک‌های آهکی و شور باعث بهبود عملکرد کلزا و افزایش مقاومت گیاه به تنش‌های محیطی شده است (میرزاپور و نورقلی‌پور، ۱۴۰۱). این نتایج نشان می‌دهند که استفاده از محرک‌های آلی رشد می‌تواند به‌عنوان استراتژی مؤثری برای افزایش عملکرد و کیفیت محصول کلزا در شرایط تنش خشکی و کاهش هزینه‌های کشاورزی در مناطق نیمه‌خشک و تحت تأثیر تغییر اقلیم توصیه شود.

علاوه بر این، کاهش خسارات ناشی از تنش خشکی به معنای کاهش نیاز به هزینه‌های جبرانی مانند کوددهی اضافی یا آبیاری اضطراری است که می‌تواند فشار مالی بر کشاورزان را کاهش دهد؛ بنابراین، در نظام‌های کشاورزی منابع محدود، انتخاب تیمار محرک رشد باید با در نظر گرفتن تحلیل اقتصادی دقیق همراه باشد تا ضمن افزایش عملکرد و کیفیت محصول، از نظر هزینه نیز بهینه باشد. بهره‌گیری از مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و ابزارهای بودجه‌بندی کشاورزی می‌تواند به کشاورزان و تصمیم‌گیرندگان کمک کند تا بهترین گزینه را با توجه به شرایط محیطی، هدف تولید و محدودیت‌های مالی انتخاب کنند (یوسفی و همکاران، ۲۰۱۷؛ وانگ و یون، ۱۹۸۱). این رویکرد جامع، تضمین‌کننده پایداری اقتصادی و زیستی در تولید کلزا و سایر محصولات کشاورزی است و می‌تواند به بهبود امنیت غذایی و حفظ منابع طبیعی کمک کند. در نهایت، توجه به جنبه‌های اقتصادی در کنار جنبه‌های فیزیولوژیکی و محیطی، کلید موفقیت در کشاورزی پایدار و بهره‌ور است. کشاورزان و مدیران کشاورزی با استفاده از داده‌های اقتصادی و علمی می‌توانند تصمیمات بهینه‌تری اتخاذ کنند که ضمن افزایش بهره‌وری، ریسک‌های مالی و زیست‌محیطی را کاهش دهد و به توسعه پایدار بخش کشاورزی کمک کند.

جدول ۵- انتخاب سودآورترین تیمار براساس روش بودجه‌بندی جزئی

| تیمار آبیاری | محرك رشد          | عملکرد دانه<br>(کیلوگرم در هکتار) | هزینه محرك‌های آلی<br>استفاده شده<br>(هزار ریال در هکتار) | درآمد ناخالص<br>کشاورز<br>(هزار ریال در هر<br>هکتار) | هزینه‌ها/ منافع<br>(هزار ریال در هر هکتار) | منفعت<br>خالص<br>(هزار ریال<br>در هر هکتار) | نسبت<br>منفعت به<br>هزینه |
|--------------|-------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------|
| نرمال        | شاهد              | 3326                              | -                                                         | 1230620                                              | -                                          | -                                           | -                         |
|              | اسیدآمین          | 3438                              | 7000                                                      | 1272060                                              | منافع<br>1272060                           | 34441                                       | 1.1                       |
|              | اسید هیومیک       | 3802                              | 4500                                                      | 1406740                                              | منافع<br>1406741                           | 171621                                      | 1.1                       |
|              | اسید فولویک       | 3539                              | 6000                                                      | 1309430                                              | منافع<br>1309431                           | 72811                                       | 1.1                       |
|              | عصاره جلبک دریایی | 3537                              | 5000                                                      | 1308690                                              | منافع<br>1308691                           | 73071                                       | 1.1                       |
|              | شاهد              | 3036                              | -                                                         | 1123320                                              | -                                          | -                                           | -                         |
|              | اسیدآمین          | 3682                              | 7000                                                      | 1362340                                              | منافع<br>1362341                           | 232021                                      | 1.2                       |
|              | اسید هیومیک       | 3374                              | 4500                                                      | 1248380                                              | منافع<br>1248381                           | 120561                                      | 1.1                       |
|              | اسید فولویک       | 3395                              | 6000                                                      | 1256150                                              | منافع<br>1256151                           | 126831                                      | 1.1                       |
|              | عصاره جلبک دریایی | 3519                              | 5000                                                      | 1362340                                              | منافع<br>1302031<br>1128320                | 173711                                      | 1.2                       |
|              | شاهد              | 3036                              | -                                                         | 1123320                                              | -                                          | -                                           | -                         |
|              | اسیدآمین          | 3682                              | 7000                                                      | 1362340                                              | منافع<br>1362341                           | 232021                                      | 1.2                       |
| خشکی         | اسید هیومیک       | 3374                              | 4500                                                      | 1248380                                              | منافع<br>1248381                           | 120561                                      | 1.1                       |
|              | اسید فولویک       | 3395                              | 6000                                                      | 1256150                                              | منافع<br>1256151                           | 126831                                      | 1.1                       |
|              | عصاره جلبک دریایی | 3519                              | 5000                                                      | 1362340                                              | منافع<br>1302031<br>1128320                | 173711                                      | 1.2                       |
|              | شاهد              | 3036                              | -                                                         | 1123320                                              | -                                          | -                                           | -                         |
|              | اسیدآمین          | 3682                              | 7000                                                      | 1362340                                              | منافع<br>1362341                           | 232021                                      | 1.2                       |
|              | اسید هیومیک       | 3374                              | 4500                                                      | 1248380                                              | منافع<br>1248381                           | 120561                                      | 1.1                       |

## تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) با استفاده از

روش تاپسیس برای انتخاب تیمار برتر

تحلیل عملکرد تیمارهای محرك رشد در شرایط آبیاری نرمال (بدون تنش)

در شرایط آبیاری کامل که عامل محدودکننده‌ای مانند کم‌آبی وجود ندارد، عملکرد دانه به‌عنوان معیار اصلی برتری تیمارها خودنمایی می‌کند. طبق داده‌های جدول ۶، تیمار اسید هیومیک در تمامی سناریوهای اولویت‌دهی که در آن وزن عملکرد دانه بالا (تا ۱۰۰ درصد) بوده، بالاترین

شاخص شباهت را داشته و به‌عنوان رتبه اول انتخاب شده است. به‌عنوان مثال، در ترکیب با وزن عملکرد ۱۰۰ درصد (ردیف دوم جدول ۶)، اسید هیومیک با شاخص ۰/۵۱۱ در صدر قرار دارد. برتری اسید هیومیک به دلیل توانایی آن در بهبود جذب عناصر غذایی، توسعه ریشه، تحریک فعالیت میکروبی و افزایش ظرفیت نگهداشت رطوبت خاک است. استفاده از اسید هیومیک موجب بهبود ساختار خاک، افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی و تسهیل جذب مواد مغذی می‌شود که در نهایت رشد گیاه و عملکرد محصول را

افزایش می‌دهد (شان و همکاران، ۲۰۲۴؛ کانیلز و اولیورز، ۲۰۱۴). همچنین، تحریک فعالیت میکروبی و بهبود سلامت خاک توسط اسید هیومیک باعث مقاومت بیشتر گیاهان در شرایط تنش خشکی می‌شود (روی و همکاران، ۲۰۲۴).

#### تحلیل عملکرد تیمارهای محرک رشد در شرایط آبیاری با تنش خشکی

در وضعیت تنش خشکی، الگوی برتری تیمارها تغییر یافته و به سمت تیمارهای آلی تطابق‌پذیری مانند عصاره جلبک دریایی و اسید آمینه متمایل می‌شود. این دو تیمار در سناریوهایی که وزن عملکرد دانه کاهش یافته و سهم بیشتری به کیفیت محصول (درصد روغن) و کارایی مصرف آب داده شده، در رتبه اول قرار گرفته‌اند. برای نمونه، در ردیف یک جدول ۶ که همه معیارها وزن مساوی دارند، عصاره جلبک و اسید آمینه به‌صورت مشترک با شاخص ۰/۵۳۱ در صدر قرار گرفته‌اند. مکانیسم‌های دفاعی این مواد شامل تحریک سنتز آنتی‌اکسیدان‌ها، بهبود تنظیم اسمزی و تقویت فتوسنتز تحت استرس می‌باشد (کالوو و همکاران، ۲۰۱۴). در شرایط تنش خشکی، استفاده از محرک‌های آلی رشد مانند عصاره جلبک دریایی و اسید آمینه باعث تقویت مکانیسم‌های دفاعی گیاه می‌شود. این مواد با افزایش سنتز آنتی‌اکسیدان‌ها، بهبود تنظیم اسمزی و تقویت فتوسنتز، مقاومت گیاهان را در برابر کم‌آبی افزایش می‌دهند (آدی‌بایو و همکاران، ۲۰۲۲؛ کوکیرا و همکاران، ۲۰۲۰). عصاره جلبک دریایی موجب افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند کاتالاز و سوپراکسید دیسموتاز و کاهش آسیب‌های اکسیداتیو می‌شود (آدی‌بایو و همکاران، ۲۰۲۲)، درحالی‌که اسید آمینه با تحریک فعالیت آنتی‌اکسیدانی و تنظیم اسمزی، مقاومت گیاه را در برابر تنش خشکی بهبود می‌بخشد (کوکیرا و همکاران، ۲۰۲۰).

#### تحلیل ترکیبی چندمعیاره با رویکرد مدیریتی

در اغلب سناریوها، زمانی که وزن معیارها به‌طور متعادل میان عملکرد، روغن و کارایی مصرف آب توزیع شده است (مثلاً ردیف‌های پنج تا هفت)، فاصله شاخص شباهت تیمارها کاهش یافته و رقابت نزدیک‌تری میان تیمارهای آلی مشاهده می‌شود. در این وضعیت، برتری مطلق وجود ندارد، اما تیمار اسید آمینه و جلبک دریایی غالباً در رتبه اول یا دوم دیده می‌شوند، درحالی‌که شاهد همواره در پایین‌ترین رده قرار دارد. در پژوهش حاضر، به‌کارگیری مدل TOPSIS تصویری واقع‌گرایانه و چندبُعدی از کارایی تیمارها ارائه داد و استفاده از آن در تصمیم‌سازی زراعی برای شرایط تنش‌زا توصیه می‌شود. این مدل، با مقایسه گزینه‌ها بر اساس فاصله از راه‌حل ایده‌آل مثبت و منفی، به اولویت‌بندی مؤثر گزینه‌ها کمک می‌کند (هوانگ و یون، ۱۹۸). این نتایج اهمیت رویکرد تلفیقی در انتخاب تیمارها را نشان می‌دهد؛ به‌گونه‌ای که اگر کشاورز به دنبال بیشینه‌سازی عملکرد دانه در شرایط آبیاری کامل است، اسید هیومیک پیشنهاد می‌شود؛ ولی اگر هدف افزایش کارایی آب و پایداری تولید در شرایط تنش باشد، اسید آمینه یا عصاره جلبک انتخاب بهتری خواهد بود. این استراتژی با اصول کشاورزی هوشمند از نظر اقلیمی و پایدار هماهنگ است (فائو، ۲۰۲۱). نتایج به‌روشنی نشان می‌دهد که استفاده از محرک‌های آلی، بسته به شرایط آبیاری و اهداف زراعی، می‌تواند منجر به بهبود قابل توجه در عملکرد و بهره‌وری مصرف آب شود. انتخاب صحیح و موقع‌شناسانه این تیمارها، نه تنها افزایش عملکرد بلکه ارتقاء تاب‌آوری سیستم زراعی را تضمین می‌کند. توصیه می‌شود در برنامه‌ریزی‌های کلان مدیریت مزرعه، از مدل‌های چندمعیاره مانند تاپسیس برای انتخاب تیمارهای بهینه بهره گرفته شود. این نتیجه نشان می‌دهد که هیچ تیماری در همه شرایط و اهداف، برتر مطلق نیست و باید از ابزارهای تصمیم‌سازی دقیق برای تعیین گزینه مطلوب استفاده کرد؛ همان‌گونه که وانگ و یون (۱۹۸۱) نیز تأکید کرده‌اند.

جدول ۶- رتبه‌بندی تیمارهای محرک رشد به روش تاپسیس با توجه به درصد اولویت‌بندی معیارها

| ردیف | معیار موردنظر<br>کشاورز | درصد<br>اهمیت در<br>تولید | رتبه‌بندی بر اساس نظر کشاورز | آبیاری بدون تنش خشکی                                                              | آبیاری با تنش خشکی                                            |
|------|-------------------------|---------------------------|------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| ۱    | عملکرد دانه             | یکسان                     |                              | رتبه اول: اسید هیومیک (0.533)                                                     | رتبه‌های اول: عصاره جلبک دریایی (0.531) و اسید آمینه (0.531)  |
|      | درصد روغن               |                           |                              | رتبه دوم: عصاره جلبک دریایی (0.529)                                               | رتبه دوم: اسید هیومیک (0.529)                                 |
|      | کارایی مصرف آب          |                           |                              | رتبه سوم: اسید آمینه (0.527)                                                      | رتبه سوم: اسید فولویک (0.526)                                 |
|      |                         |                           |                              | رتبه چهارم: اسید فولویک (0.526)                                                   | رتبه چهارم: شاهد (0.512)                                      |
| ۲    | عملکرد دانه             | 100                       |                              | رتبه اول: اسید هیومیک (0.511)                                                     | رتبه‌های اول: اسید آمینه (0.510) و عصاره جلبک دریایی (0.510)  |
|      | درصد روغن               | 0                         |                              | رتبه‌های دوم: عصاره جلبک دریایی (0.510)، اسید فولویک (0.510) و اسید آمینه (0.510) | رتبه دوم: اسید هیومیک (0.509)، اسید فولویک (0.509)            |
|      | کارایی مصرف آب          | 0                         |                              | رتبه سوم: شاهد (0.509)                                                            | رتبه سوم: شاهد (0.508)                                        |
|      |                         |                           |                              |                                                                                   |                                                               |
| ۳    | عملکرد دانه             | 0                         |                              | رتبه‌های اول: اسید هیومیک (0.508)، اسید آمینه (0.508)                             | رتبه‌های اول: اسید آمینه (0.508)، اسید هیومیک (0.508)         |
|      | درصد روغن               | 100                       |                              | رتبه‌های دوم: عصاره جلبک دریایی (0.508)                                           | رتبه‌های دوم: عصاره جلبک دریایی (0.508)                       |
|      | کارایی مصرف آب          | 0                         |                              | رتبه‌های دوم: اسید فولویک (0.507) و شاهد (0.507)                                  | رتبه دوم: اسید فولویک (0.507)                                 |
|      |                         |                           |                              | رتبه سوم: شاهد (0.505)                                                            |                                                               |
| ۴    | عملکرد دانه             | 0                         |                              | رتبه اول: اسید هیومیک (0.496)                                                     | رتبه اول: اسید آمینه (0.496)                                  |
|      | درصد روغن               | 0                         |                              | رتبه‌های دوم: اسید آمینه (0.495)، عصاره جلبک دریایی (0.495)                       | رتبه دوم: عصاره جلبک دریایی (0.495)                           |
|      | کارایی مصرف آب          | 100                       |                              | رتبه‌های سوم: اسید فولویک (0.495) و شاهد (0.494)                                  | رتبه‌های سوم: اسید فولویک (0.494) و اسید هیومیک (0.494)       |
|      |                         |                           |                              | رتبه سوم: شاهد (0.494)                                                            | رتبه چهارم: شاهد (0.493)                                      |
| ۵    | عملکرد دانه             | 25                        |                              | رتبه اول: اسید هیومیک (0.504)                                                     | رتبه اول: اسید آمینه (0.504)                                  |
|      | درصد روغن               | 25                        |                              | رتبه‌های دوم: عصاره جلبک دریایی (0.501) و اسید فولویک (0.501)                     | رتبه دوم: عصاره جلبک دریایی (0.503)                           |
|      | کارایی مصرف آب          | 50                        |                              | رتبه سوم: اسید آمینه (0.500)                                                      | رتبه‌های سوم: اسید فولویک (0.501) و اسید هیومیک (0.501)       |
|      |                         |                           |                              | رتبه چهارم: شاهد (0.498)                                                          | رتبه چهارم: شاهد (0.495)                                      |
| ۶    | عملکرد دانه             | 25                        |                              | رتبه اول: اسید هیومیک (0.553)                                                     | رتبه اول: اسید آمینه (0.553)                                  |
|      | درصد روغن               | 50                        |                              | رتبه‌های دوم: عصاره جلبک دریایی (0.551) و اسید فولویک (0.551)                     | رتبه دوم: عصاره جلبک دریایی (0.552)                           |
|      | کارایی مصرف آب          | 25                        |                              | رتبه سوم: اسید آمینه (0.549)                                                      | رتبه‌های سوم: اسید فولویک (0.550) و اسید هیومیک (0.550)       |
|      |                         |                           |                              | رتبه چهارم: شاهد (0.545)                                                          | رتبه چهارم: شاهد (0.538)                                      |
| ۷    | عملکرد دانه             | 50                        |                              | رتبه اول: اسید هیومیک (0.535)                                                     | رتبه‌های اول: اسید هیومیک (0.535) و عصاره جلبک دریایی (0.535) |
|      | درصد روغن               | 25                        |                              | رتبه‌های دوم: عصاره جلبک دریایی (0.534) و اسید آمینه (0.534)                      | رتبه دوم: اسید آمینه (0.534)                                  |
|      | کارایی مصرف آب          | 25                        |                              | رتبه سوم: اسید فولویک (0.532)                                                     | رتبه سوم: اسید فولویک (0.533)                                 |
|      |                         |                           |                              | رتبه چهارم: شاهد (0.530)                                                          | رتبه چهارم: شاهد (0.526)                                      |

استان‌های خراسان رضوی، خراسان جنوبی، فارس، مرکزی و کرمان به کار رفت. نتایج نشان داد که این روش با دقت بالایی توانست اراضی مناسب را بر اساس معیارهای متعدد فیزیکی و شیمیایی خاک و عملکرد زعفران اولویت‌بندی کند و ضریب تبیین ۰/۹۱ را در مقایسه با عملکرد واقعی محصول به دست آورد که بیانگر توانمندی بالای TOPSIS در تحلیل چندمعیاره است. همچنین، در

نتایج به دست آمده از تحلیل با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره تاپسیس در پژوهش حاضر، با نتایج تحقیقات متعددی که در زمینه کاربرد این روش در حوزه کشاورزی و مدیریت منابع طبیعی انجام شده است، تطابق قابل توجهی دارد. برای مثال، در مطالعه‌ای که توسط اسکندری و همکاران (۲۰۲۲) انجام شد، این مدل برای اولویت‌بندی اراضی مناسب برای کشت زعفران در

تصمیمات بهینه‌تری اتخاذ کنند. این امر به‌ویژه در شرایطی که معیارهای متضاد (مانند افزایش عملکرد و کاهش مصرف منابع) وجود دارد، اهمیت دوچندانی پیدا می‌کند و تضمین‌کننده پایداری و بهره‌وری در کشاورزی است.

#### نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان داد که استفاده از محرک‌های آلی رشد می‌تواند به‌طور قابل توجهی عملکرد و کیفیت دانه کلزا را تحت هر دو شرایط آبیاری افزایش دهد. در شرایط آبیاری نرمال، هیومیک اسید بیشترین اثر مثبت را بر افزایش عملکرد و درصد روغن داشت، در حالی که تحت تنش خشکی، آمینو اسیدها و عصاره جلبک دریایی عملکرد بهتری ارائه کردند. تحلیل اقتصادی نشان داد که همه تیمارها از نظر سوددهی مقرون‌به‌صرفه بودند و بالاترین نسبت سود به هزینه به ترتیب برای هیومیک اسید در شرایط آبیاری نرمال و آمینو اسید در تنش خشکی حاصل شد. روش تصمیم‌گیری چندمعیاره تاپسیس، تفاوت اثر تیمارها را بسته به اهداف زراعی و شرایط محیطی برجسته نمود و نشان داد که انتخاب تیمار برتر نمی‌تواند صرفاً بر مبنای یک شاخص انجام گیرد. در مجموع، نتایج تحقیق بر اهمیت استفاده از رویکردهای تحلیلی ترکیبی (زیستی، اقتصادی و تصمیم‌گیری چندمعیاره) در توسعه سیستم‌های زراعی پایدار در مناطق خشک و نیمه‌خشک تأکید دارد. توصیه می‌شود که در سیاست‌گذاری‌ها و برنامه‌ریزی‌های کلان کشاورزی، به‌ویژه در مناطق با منابع محدود، محرک‌های آلی رشد با توجه به شرایط اقلیمی و هدف‌گذاری تولید انتخاب و به‌کار گرفته شوند.

#### تعارض منافع

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

مطالعه‌ای دیگر توسط سرمیدان و قوامی (۱۳۹۸)، روش TOPSIS برای ارزیابی تناسب اراضی برای کشت ذرت در بخشی از اراضی قزوین به‌کار رفت. در این پژوهش، مقادیر شاخص تناسب اراضی با میزان عملکرد ذرت علوفه‌ای در واحدهای مورد مطالعه برای روش‌های استوری، ریشه دوم و TOPSIS مورد مقایسه قرار گرفت و مقدار ضریب تبیین آن‌ها به ترتیب ۰/۰۷۶، ۰/۰۷۶ و ۰/۰۷۸ به دست آمد. نتایج این پژوهش نشان داد که روش ریشه دوم از اعتبار بیشتری نسبت به دو روش دیگر برخوردار است. سیدمحمدی و همکاران (۱۳۹۶) نشان دادند که روش‌های TOPSIS، AHP و ریشه دوم توانایی مؤثری در تعیین اولویت کشت محصولات زراعی مانند گندم، جو و ذرت در دشت مغان دارند. به همین ترتیب، محسن‌زاده و همکاران (۱۳۹۶) با استفاده از تکنیک TOPSIS به رتبه‌بندی اقتصادی ارقام مختلف گندم پرداختند و کاربرد عملی این روش را در تحلیل اقتصادی محصولاتی کشاورزی تأیید کردند؛ بنابراین، این مطالعات بر اهمیت TOPSIS و سایر روش‌های چندمعیاره در تصمیم‌گیری‌های بهینه در زمینه کشاورزی و محیط‌زیست تأکید دارند.

با توجه به مطالعات صورت‌گرفته، روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره به‌ویژه تکنیک TOPSIS، ابزاری کارآمد در اولویت‌بندی و رتبه‌بندی گزینه‌ها در حوزه‌های مختلف کشاورزی و مدیریت منابع طبیعی محسوب می‌شوند. این مطالعات نشان می‌دهد که تاپسیس نه تنها در تحلیل فنی و زیستی، بلکه در ارزیابی اقتصادی و اجتماعی نیز کاربرد گسترده‌ای دارد که اهمیت انتخاب هدف‌محور و شرایط‌محور را در تصمیم‌گیری‌های کشاورزی برجسته می‌کند. در نهایت، مقایسه نتایج پژوهش حاضر با مطالعات دیگر نشان می‌دهد که استفاده از تاپسیس به عنوان ابزاری علمی و سیستماتیک، امکان تحلیل دقیق و جامع گزینه‌ها را فراهم می‌کند و می‌تواند به کشاورزان و مدیران کمک کند تا با در نظر گرفتن معیارهای متنوع و وزن‌دهی مناسب،

## فهرست منابع

۱. اسکندری، مهناز، زین الدینی میمند، علی، نویدی، میرناصر و سلمان پور، آناهید، ۲۰۲۲. بررسی کارایی روش TOPSIS در اولویت بندی اراضی برای کشت زعفران. *فصلنامه آب و خاک*، ۳۶(۲)، صص. ۲۳۷-۲۴۹.  
<https://doi.org/10.22067/jsw.2022.74195.1125>
۲. امیری اوغان، حسن، ۲۰۲۳. دانش تولید کلزا در ایران. تهران، مرکز نشر دانشگاهی.
۳. پسندیده، محمد، رجبی، مهدی و زین العابدین تبریزی، حسن، ۲۰۲۲. اثر برخی محرک های رشدی رشد گیاهی بر افزایش تحمل کلزا (*Brassica napus L.*) به تنش خشکی. *مجله تنش های محیطی در علوم زراعی*، ۱۵(۴)، صص. ۱۰۲۳-۱۰۳۵.  
<https://doi.org/10.22077/escs.2021.4209.1988>
۴. فکری اجیرلو، توکل، فرزانه، سلیم، توبه، احمد، سیدشریفی، رئوف و نوری، محسن، ۱۴۰۲. تأثیر کاربرد عصاره جلبک دریایی و اسید هیومیک بر عملکرد کمی و کیفی چغندر قند تحت شرایط تنش خشکی در مغان. *سومین کنفرانس بین المللی و هفتمین کنفرانس ملی کشاورزی ارگانیک و مرسوم*، اردبیل.  
<https://civilica.com/doc/1775830>
۵. حسینی، زهرا، ۱۹۹۴. روش های متداول تجزیه مواد غذایی. شیراز، انتشارات دانشگاه شیراز.
۶. خودشناس، محمدعلی، قدبیکلو، جواد و نورقلی پور، فریدون، ۱۴۰۱. تأثیر مواد محرک رشد گیاهی بر عملکرد و اجزاء عملکرد کلزا. *پژوهش های خاک*، ۳۶(۳)، صص. ۲۲۵-۲۴۱.  
<https://doi.org/10.22092/ijsr.2022.358562.665>
۷. رفیع، محمدرضا، صلحی، محمود و جوادزاده، مریم، ۱۴۰۰. بررسی تأثیر کاربرد اسید آمینه، اسید فولویک و عصاره جلبک دریایی در شرایط نرمال و تنش خشکی بر خصوصیات کمی و کیفی گندم در منطقه بهبهان. *تنش های محیطی در علوم زراعی*، ۱۴(۱)، صص. ۱۳۱-۱۴۱.  
<https://doi.org/10.22077/escs.2019.2702.1707>
۸. رئیسی ساداتی، سیده یلدا، جهان بخش گده کهریز، سدابه، عبادی، علی و صدقی، محمد، ۲۰۲۱. تأثیر نانوذره اکسید روی بر برخی ویژگی های بیوشیمیایی و مورفولوژیکی گندم در شرایط خشکی. *دانش کشاورزی و تولید پایدار*، ۳۱(۲)، صص. ۲۳۳-۲۵۰.  
<https://doi.org/10.22034/saps.2021.13106>
۹. سرمیدیان، فریدون و قوامی، محمدسجاد، ۱۳۹۸. ارزیابی تناسب اراضی با استفاده از روش TOPSIS و مقایسه آن با روش های پارامتریک برای محصول ذرت در بخشی از اراضی قزوین. *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۰(۹)، صص. ۲۲۷۵-۲۲۸۷.  
<https://doi.org/10.22059/ijswr.2019.273788.668095>
۱۰. سیدمحمدی، جواد، جعفرزاده، علی اصغر، سرمیدیان، فریدون، شهبازی، فرزین و قربانی، محمدعلی، ۱۳۹۶. مقایسه کارایی روش های TOPSIS، AHP و ریشه دوم در تعیین اولویت کشت گندم، جو و ذرت تحت آبیاری بارانی در دشت مغان. *دانش آب و خاک*، ۲۷(۲)، صص. ۴۵-۵۹.
۱۱. محسن زاده، ساسان، نمازی، نویدرضا، کاردانی اصفهانی، عارفه سادات و آهومنش، زینب. (۱۳۹۶). کاربرد فن تاپسیس در رتبه بندی اقتصادی برخی رقم های گندم کشت شده در ایران. *فصلنامه اقتصاد کشاورزی*، دوره یازدهم، شماره ۱، صص. ۱۶۳-۱۸۳.
۱۲. فیاض، اسماعیل، سروش زاده، علی و حیدرزاده، علی، ۱۴۰۳. تأثیر محلول پاشی اسیدهای آمینه در شرایط تنش کم آبی آخر فصل بر برخی از فرآیندهای فیزیولوژیک گیاه کلزا (*Brassica napus L.*). *تولیدات گیاهی*، ۴۷(۱)، صص. ۶۵-۸۳.  
<https://doi.org/10.22055/ppd.2024.45873.2138>

۱۳. گوشه، محی‌الدین، صارمی، منصور و وزیری، ژاله. (۱۳۸۵). تعیین دور و عمق مناسب آبیاری کلزا به روش تشت تبخیر در استان خوزستان. *مجله علوم خاک و آب*، ۲۰(۱)، صص. ۱۱۹-۱۲۸.  
<https://doi.org/10.22092/ijsr.2006.127193>
۱۴. میرزاپور، محمدهادی و نورقلی‌پور، فریدون، ۱۴۰۱. اثر برخی مواد محرک رشد گیاهی بر عملکرد و اجزای عملکرد کلزا در خاک آهکی شور. *پژوهش‌های خاک*، ۳۶(۲)، صص. ۱۶۳-۱۷۶.  
<https://doi.org/10.22092/ijsr.2022.357414.650>
۱۵. یوسفی، عبدالله، ۲۰۱۷. ارزیابی شاخص‌های تحمل به خشکی در سه گونه کلزا (*Brassica spp.*) تحت شرایط محدودیت آبیاری. *تنش‌های محیطی در علوم زراعی*، ۱۰(۲)، صص. ۲۵۷-۲۶۷.  
[https://escs.birjand.ac.ir/article\\_582.html](https://escs.birjand.ac.ir/article_582.html)
16. Adebayo, T.S., Akadiri, S.S., Radmehr, M. et al., 2023. Re-visiting the resource curse hypothesis in the MINT economies. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, pp.9793–9807. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22785-4>
17. Ahammed, S.J., Homsy, R., Khan, N., Shahid, S., Shiru, M.S., Mohsenipour, M., Ahmed, K., Nawaz, N., Alias, N.E. & Yuzir, A., 2019. Assessment of changing pattern of crop water stress in Bangladesh. *Environment, Development and Sustainability*, 21(6), pp.2557–2573. <https://doi.org/10.1007/s10668-019-00400-w>
18. Ampong, K., Thilakarathna, M.S. & Gorim, L.Y., 2022. Understanding the role of humic acids on crop performance and soil health. *Frontiers in Agronomy*, 4, 848621. <https://doi.org/10.3389/fagro.2022.848621>
19. Anjum, N.A., Gill, S.S. & Gill, R. (Eds.), 2014. Plant adaptation to environmental change: significance of amino acids and their derivatives. Wallingford: CABI.
20. Anjum, S.A., Wang, L., Farooq, M., Xue, L. & Ali, S., 2011. Fulvic acid application improves the maize performance under well-watered and drought conditions. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 197(6), pp.409–417.
21. Calvo, P., Nelson, L. & Kloepper, J.W., 2014. Agricultural uses of plant biostimulants. *Plant and Soil*, 383(1), pp.3–41. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2131-8>
22. Canellas, L.P. & Olivares, F.L., 2014. Physiological responses to humic substances as plant growth promoter. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 1(1), pp.1–11. <https://doi.org/10.1186/s40538-014-0011-1>
23. Du Jardin, P., 2015. Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation. *Scientia Horticulturae*, 196, pp.3–14. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.021>
24. Eldardiry, E.I., Pipars, S.K.H. & Abd El Hady, M., 2012. Improving soil properties, maize yield components grown in sandy soil under irrigation treatments and humic acid application. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 6(7), pp.587–593.
25. Fan, D., Hodges, D.M., Critchley, A.T. & Prithiviraj, B., 2013. A commercial extract of brown macroalga (*Ascophyllum nodosum*) affects yield and the nutritional quality of spinach in vitro. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 44(12), pp.1873–1884.
26. Fan, D., Hodges, D.M., Zhang, J., Kirby, C.W., Ji, X., Locke, S.J., Critchley, A.T. & Prithiviraj, B., 2011. Commercial extract of the brown seaweed *Ascophyllum nodosum* enhances phenolic antioxidant content of spinach (*Spinacia oleracea* L.) which protects *Caenorhabditis elegans* against oxidative and thermal stress. *Food Chemistry*, 124(1), pp.195–202.
27. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2021. The state of the world's land and water resources for food and agriculture – Systems at breaking point. Rome: FAO.
28. Gee, G.W. & Bauder, J.W., 1986. Particle-size analysis. In: *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods*, Vol.5, pp.383–411.

29. Grubbs, F.E., 1969. Procedures for detecting outlying observations in samples. *Technometrics*, 11(1), pp.1–21.
30. Hashemi, P.S., Mohammadi, A., Alizadeh, B., Mostafavi, K. & Amiri Oghan, H., 2024. Enhancing yield and oil content in oilseed rape hybrids: Insights from line  $\times$  tester and SIIG approaches. *Food Science & Nutrition*, 12(5), pp.3628–3641.  
**<https://doi.org/10.1002/fsn3.4033>**
31. Helmke, P.A. & Sparks, D.L., 1996. Lithium, sodium, potassium, rubidium, and cesium. In: D.L. Sparks (Ed.), *Methods of soil analysis: Part 3. Chemical properties*, (pp. 551–575). Madison: Soil Science Society of America.
32. Hosseini, P., Mohsenifar, K., Rajaie, M. et al., 2023. Plant growth regulators affecting canola (*Brassica Napus* L.) biochemistry including oil yield under drought stress. *Physiol Mol Biol Plants*, 29, pp.1663–1674. **<https://doi.org/10.1007/s12298-023-01399-1>**
33. Hwang, C.L. & Yoon, K., 1981. *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications, A State-of-the-Art Survey*. Berlin: Springer-Verlag.
34. Kałużewicz, A., Krzesiński, W., Spizewski, T. & Zaworska, A., 2017. Effect of biostimulants on several physiological characteristics and chlorophyll content in broccoli under drought stress and re-watering. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 45(1), pp.197–202. **<https://doi.org/10.15835/nbha45110529>**
35. Kocira, S., Szparaga, A., Hara, P. et al., 2020. Biochemical and economical effect of application biostimulants containing seaweed extracts and amino acids as an element of agroecological management of bean cultivation. *Scientific Reports*, 10, 17759. **<https://doi.org/10.1038/s41598-020-74959-0>**
36. Kumar, G., Nanda, S., Singh, S.K., Kumar, S., Singh, D., Singh, B.N. & Mukherjee, A., 2024. Seaweed extracts: enhancing plant resilience to biotic and abiotic stresses. *Frontiers in Marine Science*, 11, 1457500. **<https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1457500>**
37. Lakhawat, S.S., Sharma, V., Singh, T., Patil, P., Priyadevi, S. & Gutam, S., 2024. Effects of pan evaporation-based drip irrigation levels on performance of guava grown in Udaipur and Rewa regions of India. *Journal of Agrometeorology*, 26(1), pp.69–73. **<https://doi.org/10.54386/jam.v26i1.2306>**
38. Li, G., Shan, Y., Nie, W., Sun, Y., Su, L., Mu, W., Qu, Z. & Yang, T., 2025. Humic acid improves water retention, maize growth, water use efficiency and economic benefits in coastal saline-alkali soils. *Agricultural Water Management*, 309, 109323. **<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109323>**
39. Lindsay, W.L. & Norvell, W.A., 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of America Journal*, 42, pp.421–428. **<https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x>**
40. Loeppert, R.H. & Suarez, D.L., 1996. Carbonate and gypsum. In: D.L. Sparks (Ed.), *Methods of soil analysis: Part 3. Chemical methods*, (pp. 437–474). Madison: Soil Science Society of America and American Society of Agronomy.
41. Ma, Y., Freitas, H. & Dias, M.C., 2022. Strategies and prospects for biostimulants to alleviate abiotic stress in plants. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1024243. **<https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1024243>**
42. Moghan Water & Hydraulic Company, 2023. Introduction of the Moghan Plain climate and irrigation. **<https://mwh.moghanind.com/en/about-company/main/introduction-of-a-company>**
43. Mousavi-Avval, S.H., Rafiee, S., Jafari, A. & Mohammadi, A., 2011. Improving energy use efficiency of canola production using data envelopment analysis (DEA) approach. *Energy*, 36(5), pp.2765–2772. **<https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.02.016>**
44. Nelson, D.W. & Sommers, L.E., 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: D.L. Sparks (Ed.), *Methods of soil analysis: Part 3. Chemical methods*, (pp. 961–1010). Madison: Soil Science Society of America and American Society of Agronomy.

45. Olsen, S.R. & Sommers, L.E., 1982. Phosphorus. In: A.L. Page, R.H. Miller & D.R. Keeney (Eds.), *Methods of soil analysis: Part 2. Chemical and microbiological properties*, (pp. 403–430). Madison: American Society of Agronomy and Soil Science Society of America.
46. Rathore, S.S., Chaudhary, D.R., Boricha, G.N., Ghosh, A., Bhatt, B.P., Zodape, S.T. & Patolia, J.S., 2009. Effect of seaweed extract on the growth, yield and nutrient uptake of soybean (*Glycine max*) under rainfed conditions. *South African Journal of Botany*, 75(2), pp.351–355.
47. Rhoades, J.D., 1982. Soluble salts. In: A.L. Page, R.H. Miller & D.R. Keeney (Eds.), *Methods of soil analysis: Part 2. Chemical and microbiological properties*, (pp. 167–179). Madison: American Society of Agronomy and Soil Science Society of America.
48. Rouphael, Y. & Colla, G., 2020. Biostimulants in agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 11, 40.
49. Rowe, S.M. et al., 2021. Partial budget analysis of culture-and algorithm-guided selective dry cow therapy. *Journal of Dairy Science*, 104(5), pp.5652–5664.
50. Rui, R., Hei, J., Li, Y. et al., 2024. Effects of humic acid fertilizer on the growth and microbial network stability of *Panax notoginseng* from the forest understorey. *Scientific Reports*, 14, 17816. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-68949-9>
51. Shabani, A., Sepaskhah, A. & Kamgar-Haghighi, A., 2012. Responses of agronomic components of rapeseed (*Brassica napus* L.) as influenced by deficit irrigation, water salinity and planting method. *International Journal of Plant Production*, 7(2), pp.313–340. <https://doi.org/10.22069/ijpp.2012.989>
52. Shahrajabian, M.H. & Sun, W., 2024. The importance of salicylic acid, humic acid and fulvic acid on crop production. *Letters in Drug Design & Discovery*, 21(9), pp.1465–1480.
53. Shapiro, S.S. & Wilk, M.B., 1965. An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 52(3–4), pp.591–611.
54. Shen, J., Liu, Y., Wang, X., Bai, J., Lin, L., Luo, F. & Zhong, H., 2023. A Comprehensive Review of Health-Benefiting Components in Rapeseed Oil. *Nutrients*, 15(4), 999. <https://doi.org/10.3390/nu15040999>
55. Shirvani, A., 2017. Change in annual precipitation in the northwest of Iran. *Meteorological Applications*, 24(2), pp.211–218.
56. Song, P., Wang, X., Wang, C., Lu, M., Chen, L., Kong, L., Lei, X. & Wang, H., 2020. Analysis of Agricultural Water Use Efficiency Based on Analytic Hierarchy Process and Fuzzy Comprehensive Evaluation in Xinjiang, China. *Water*, 12(11), 3266. <https://doi.org/10.3390/w12113266>
57. Sparks, D.L. & Huang, P.M., 1985. Physical chemistry of soil potassium. In: R.D. Munson (Ed.), *Potassium in agriculture*, (pp. 201–276). Madison: Soil Science Society of America.
58. Srinidhi, S., Shah, A. & Groot, A., 2023. Critical climate-stress moments for semi-arid farming systems in India. *Regional Environmental Change*, 23(1), pp.1–14. <https://doi.org/10.1007/s10113-024-02281-w>
59. Taha, A.A., Ibrahim, M.A.M. & Abdelkhalek, A.A., 2011. Irrigation scheduling for pea using evaporation pan under drip irrigation at North Nile Delta region. *Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering*, 2(2), pp.203–212. <https://doi.org/10.21608/jssae.2011.55426>
60. Tarakhovskaya, E.R., Maslov, Y.I. & Shishova, M.F., 2007. Phytohormones in algae. *Russian Journal of Plant Physiology*, 54(2), pp.163–170.
61. Yadav, M. et al., 2024. Improving water efficiencies in rural agriculture for sustainability of water resources: A review. *Water Resources Management*, 38(10), pp.3505–3526. <https://doi.org/10.1007/s11269-024-03526-9>
62. Yildirim, E., 2007. Foliar and soil fertilization of humic acid affect productivity and quality of tomato. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B*, 57(2), pp.182–186.

# تحلیل روابط علی و تعیین اهمیت معیارهای حکمروایی مطلوب منابع آب کشاورزی با استفاده از تکنیک دیمتل و تحلیل فرآیند شبکه‌ای (DANP)

زینب فیض‌الهی، محسن آقاییاری هیر\* , ابوالقاسم تقی‌زاد فانید و محمدرضا شهبازبگیان

دانشجوی دکتری رشته جغرافیا و برنامه ریزی روستایی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. [z.feyzollahi95@gmail.com](mailto:z.feyzollahi95@gmail.com)

دانشیار گروه جغرافیا و برنامه ریزی روستایی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. [aghayari@tabrizu.ac.ir](mailto:aghayari@tabrizu.ac.ir)

دانشیار گروه جغرافیا و برنامه ریزی روستایی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. [fanid@tabrizu.ac.ir](mailto:fanid@tabrizu.ac.ir)

دانشیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. [mr.shahbazbegian@modares.ac.ir](mailto:mr.shahbazbegian@modares.ac.ir)

دریافت: فروردین ۱۴۰۴ و پذیرش: شهریور ۱۴۰۴

## چکیده

حکمروایی به عنوان یکی از راه‌های کلیدی برای مدیریت بحران جهانی آب در دو دهه گذشته مطرح شده است. بنابراین، تحقیق حاضر بر آن است تا ضمن تحلیل عوامل مؤثر بر حکمروایی منابع آب کشاورزی، اهمیت آن‌ها را نیز مورد بررسی قرار دهد. برای این منظور، روش پژوهش حاضر از نظر ماهیت، توصیفی-تحلیلی و از لحاظ هدف، کاربردی است. جامعه آماری شامل ۳۰ نفر از خبرگان و متخصصان گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی روستایی دانشگاه‌های مختلف سطح کشور است. معیارهای نهایی با استفاده از ادبیات پژوهش موضوع مربوطه شناسایی و سپس بر اساس نظر خبرگان، روایی آن‌ها تأیید شد. به منظور تعیین اثرگذاری و اثرپذیری و همچنین تعیین اهمیت و وزن معیارها، از تکنیک ترکیبی دیمتل و تحلیل فرآیند شبکه‌ای DANP استفاده شد. نتایج تحلیل اثرات معیارها نشان داد که شاخص مشارکت بیشترین تأثیرگذاری و شاخص ظرفیت‌سازی بیشترین تأثیرپذیری را دارند. همچنین، شاخص کارایی و اثربخشی بیشترین وزن را به خود اختصاص داده که نشان‌دهنده اهمیت بالای آن در حکمروایی منابع آب است. ولی، شاخص کیفیت نظارت و کنترل کمترین وزن را در میان سایر شاخص‌ها کسب نمود.

**واژه‌های کلیدی:** بحران جهانی آب، شاخص‌های مدیریت آب کشاورزی، تحلیل ساختاری، تصمیم‌گیری چندشاخصه و شاخص کارایی

## مقدمه

آب، منبعی حیاتی، زیربنای زندگی، اقتصاد و محیط‌زیست سالم است. در دهه‌های اخیر، رشد فزاینده جمعیت، توسعه اقتصادی و گسترش سریع شهرها، منجر به کمبود فزاینده‌ی این منبع ارزشمند شده است (ژو و همکاران، ۲۰۲۱). طبق مطالعات، استفاده جهانی از آب شیرین طی ۱۰۰ سال گذشته به میزان شش برابر افزایش یافته و از دهه ۱۹۸۰ با نرخ تقریباً ۱٪ در سال به رشد خود ادامه می‌دهد (آکواستات، ۲۰۱۰). بخش عمده‌ای از این رشد را می‌توان به ترکیبی از رشد جمعیت، توسعه اقتصادی و تغییر الگوهای مصرف نسبت داد. در این میان، کشاورزی در حال حاضر ۶۹ درصد از برداشت جهانی آب را به خود اختصاص می‌دهد که عمدتاً برای آبیاری استفاده می‌شود؛ که این نسبت در برخی از کشورهای در حال توسعه به ۹۵٪ نیز می‌رسد (یونسکو، ۲۰۲۱). چنانچه یکی از عوامل افزایش سطح زیر کشت محصولات کشاورزی و اراضی آبی‌ر، بهره‌برداری از منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی با استفاده از سدسازی و افزایش تعداد چاه‌های آب در این کشورها است و این فعالیت‌ها منجر به افزایش سه برابری بهره‌برداری از این منابع در نیم قرن گذشته شده است (برحق و همکاران، ۲۰۲۱)؛ بنابراین، نگرانی در مورد آب به عنوان یک منبع خطر اجتماعی، افزایش یافته است؛ زیرا تغییرات آب و هوایی ممکن است دسترسی به منابع آب را به‌ویژه در مناطق خشک کاهش دهد و رقابت برای آب را در بین بخش کشاورزی، اکوسیستم‌ها، سکونتگاه‌ها، صنعت و تولید انرژی تشدید کند و بر آب و امنیت غذایی منطقه تأثیر منفی بگذارد (وود هاوس و مولر، ۲۰۱۷). در واقع، مسئله مدیریت تقاضای آب در مناطق خشک و نیمه-خشک جهان که در معرض خشکسالی دوره‌ای قرار دارند یکی از مسائل بسیار مهم و حساس به‌شمار می‌رود (فیض-الهی و همکاران، ۱۳۹۸). در این میان، با توجه به اهمیت منابع آب در جهان و شرایط جغرافیایی و اقلیمی خشک و نیمه‌خشک کشور ایران، این کشور در زمره‌ی کشورهای قرار دارد که با کمبود آب مواجه است. بر این اساس، کمبود

منابع آب چالش‌های پیچیده‌ای را در صنعت آب و بخش کشاورزی به وجود آورده است و انسان به دنبال یافتن روش‌های پایدار برای مقابله با این مشکل است (آقایاری هیر و همکاران، ۱۴۰۳-الف)؛ بنابراین، محدودیت‌های آبی موجود و وابستگی شدید تولید مواد غذایی و کشاورزی، همچنین ادامه حیات جوامع روستایی به منابع آب، ضرورت و اهمیت استفاده‌ی صحیح و منطقی از این منابع محدود را دوچندان کرده است (آقایاری هیر و همکاران، ۱۴۰۰). همچنین افزایش تقاضا، استفاده بیش از حد و سوءاستفاده از منابع آب گران‌بها به‌طور چشمگیری در دهه‌های اخیر تشدید یافته و در حال رسیدن به نقطه‌ای است که باعث کمبود آب، کاهش کیفیت آب و تخریب اکوسیستم آبی شده است (براتی و همکاران، ۲۰۱۹).

بنابراین افزایش تقاضای آب، دسترسی محدود به آب پاک، مدیریت ناکارآمد منابع آب را می‌توان به‌طور متناوب یک بحران حاکمیتی نامید (کاتوسیم و اسکات، ۲۰۲۰) و بسیاری از بحران‌ها و مسائل کمبود آب در اصل به خاطر ماهیت چند پاره و ضعف مدیریت این منابع است (یوسفیان و همکاران، ۱۴۰۰). متأسفانه امروزه یکی از مهم‌ترین مشکلات سیاست‌گذاری منابع آب در ایران، نگاه صرفاً مهندسی به این مسئله است و بسیاری از مسئولان و مدیران کشور تنها با دید مهندسی به بخش آب نگرسته و تمرکز خود را به مسائل فنی و سودآوری معطوف می‌کنند و به شرایط اجتماعی اعتنایی نمی‌شود (کریمی نژاد و همکاران، ۱۳۹۷). در واقع، مدیریت ضعیف و نادرست منابع آب، فساد، فقدان نهادهای مناسب، اینرسی بوروکراتیک، ظرفیت ناکافی و کمبود سرمایه‌گذاری‌های جدید از جمله عواملی هستند که حکمروایی مؤثر آب را در بسیاری از نقاط جهان تضعیف می‌کنند (جیکوبسون و همکاران، ۲۰۱۳).

حکمروایی یکی از راه‌های کلیدی برای بحران جهانی آب طی دو دهه گذشته معرفی شده است (یو و همکاران، ۲۰۱۶). در واقع در چالش پایداری آب، حکمروایی نقش مهمی ایفا می‌کند و همان‌طور که سازمان

آموزشی، علمی و فرهنگی ملل متحد (یونسکو) بیان می-کند: «بحران آب تا حد زیادی یک بحران حاکمیتی است» و حکمروایی خوب برای مدیریت مؤثر و بلندمدت منابع آب ضروری است (دیوایو، ۲۰۲۱). در این راستا برنامه توسعه سازمان ملل متحد (UNDP) آن را به عنوان «اعمال قدرت سیاسی، اقتصادی و اداری در مدیریت امور یک کشور در همه سطوح تعریف می-کند؛ که شامل مکانیسم‌ها، فرآیندها و نهادهای پیچیده‌ای است و از طریق آن‌ها شهروندان و گروه‌ها، منافع خود را بیان، اختلافات خود را میانجی‌گری و حقوق و تعهدات قانونی خود را اعمال می-کنند» (دی وایو، ۲۰۲۱). همچنین حکمروایی آب، کارکردی اجتماعی است که توسعه و مدیریت منابع آب را تنظیم و ارائه خدمات آب در سطوح مختلف جامعه و هدایت منابع به سمت وضعیت مطلوب و دور شدن از وضعیت نامطلوب تعریف می-شود؛ در واقع، سیستم حکمروایی آب مجموعه به هم پیوسته‌ای از عناصر سیاسی، اجتماعی، اقتصادی و اداری است که وظیفه حاکمیت آب را انجام می-دهد. این عناصر، نهادها و همچنین بازیگران و تعاملات بین آن‌ها را در بر می‌گیرد (پاهل وستل، ۲۰۱۹)؛ بنابراین، حکمروایی آب چارچوبی از ساختارهای سیاسی، اجتماعی، اقتصادی و قانونی است که در آن جوامع تصمیم می‌گیرند و می‌پذیرند تا امور مربوط به آب را خود مدیریت کنند؛ همچنین شامل دولت‌ها و نیروهای بازار است که کمک به تخصیص منابع آب و هر مکانیسم دیگری که تعاملات انسانی را تنظیم می‌کند (کرمانس، ۲۰۱۷)؛ بنابراین، با توجه به تعاریف حکمروایی مطلوب منابع آب، این مفهوم به معنای فراتر رفتن از مدیریت مصرف منابع آب است و باید عوامل غیرمستقیم مشکلات آب را نیز در نظر گرفت، عواملی مانند انگیزه‌های تولید محصولات آب‌بر در مناطق کم‌آب به منظور صادرات، برنامه‌های یارانه‌ای دولتی برای انتقال از سوخت‌های فسیلی به سوخت‌های زیستی و فقدان مکانیسم‌هایی برای کاهش هدررفت مواد غذایی در تمام مراحل. در مرحله بعد، باید روش‌های مناسبی بررسی

شود تا بازیگران خارج از حوزه آب نیز بتوانند به حل غیرمستقیم مشکلات آب کمک کنند (هوکسترا و همکاران، ۲۰۱۹). با توجه به این تعاریف، مشخص می‌شود که سامانه‌های حکمروایی آب پیچیده هستند. در واقع این سامانه‌ها طیف وسیعی از عناصر و فرایندها را در برمی‌گیرند و نیازمند نمونه‌های زیادی از مذاکره و درک متقابل هستند. با توجه به تعاریف حکمروایی آب، مجموعه‌ای از سامانه‌های سیاسی، اجتماعی، اقتصادی و اجرایی وجود دارد که توسعه، مدیریت منابع آب و ارائه خدمات آب در سطوح مختلف جامعه را تنظیم می‌کند. این سامانه‌ها نیاز به سازوکارهای متفاوت بر اساس ویژگی‌های خاص هر منطقه دارند و لذا مناطق روستایی نیز از این موارد مستثنی نیستند (نصیری زارع و طهماسبی، ۱۴۰۱). در واقع، پایداری در برنامه‌های تأمین آب روستایی همچنان یک چالش است (جیمز و پرز-فوگوت، ۲۰۱۳). همچنین در بحث حکمروایی منابع آب در مناطق روستایی، نقش کشاورزان نباید نادیده گرفته شود. چنانچه بر اساس رهیافت جهانی مدیریت مشارکت آبیاری، کشاورزان روستایی و بهره‌برداران آب که در قالب تشکلهای سازمان‌یافته فعالیت می-کنند، به عنوان بخش اصلی اقتصاد یک کشور، نقش محوری در مدیریت و بهره‌برداری از منابع آب را بر عهده دارند (علیلو و همکاران، ۱۳۹۷). همچنین اصلی‌ترین عامل در مدیریت مصرف منابع آب و تولید فراورده‌های کشاورزی به منظور دستیابی به توسعه محسوب می‌شوند و هر فرایند و اقدامی که در شبکه‌های آبیاری بدون توجه به نقش کشاورز و جوامع محلی انجام شود بازدهی کافی و مطلوبی نخواهد داشت. برای دستیابی به این هدف، تغییر دیدگاه نگاه بالا به پایین (که نوعی نگاه دولتی و فاقد مشارکت است) به تدوین راهبردهای اجتماع-محور و مبتنی بر جلب مشارکت‌های مردمی و اجتماعی ضروری است. در واقع در این رویکرد، جوامع محلی به عنوان جوامعی که توانایی عمل و مدیریت مبتنی بر مشارکت دارند، به عنوان بازوی اصلی مدیریت منابع آب در نظر گرفته می‌شوند (ابراهیمی آذر

خواران و همکاران، ۱۳۹۸). در این میان، در طول سال‌های اخیر، پژوهشگرانی در زمینه‌های مختلف در ارتباط با حکمروایی منابع آب مطالعاتی انجام داده‌اند که نتایج آن در جدول ۱ آورده شده است.

مطالعه و بررسی پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که در رابطه با حکمروایی منابع آب کشاورزی مطالعات متعددی صورت گرفته است؛ بنابراین با مروری بر سوابق و تجربیات به‌دست آمده در این زمینه در ایران و جهان، تلاش گردید تا مطالعاتی که به موضوع مورد نظر پرداخته‌اند، یا نزدیکی و مشابهت زیادی به موضوع دارند بررسی شوند و نتایج آن‌ها مورد بحث و ارزیابی قرار گیرد. بر اساس این مطالعات، بیشتر تحقیقات انجام‌شده در این زمینه به شاخص‌های حکمروایی که توسط سازمان همکاری و توسعه اقتصادی (OECD) پیشنهادشده، توجه داشته‌اند. این شاخص‌ها شامل مشارکت، توافق جمعی، پاسخگویی و شفافیت هستند. بر این اساس، پژوهش حاضر، ضمن مبنا قرار دادن مطالعات گذشته، به بررسی موضوع و شاخص‌های مؤثر بر حکمروایی مطلوب منابع آب پرداخته و پس از گردآوری داده‌ها، این شاخص‌ها توسط متخصصان مربوطه شناسایی شدند. لذا با بررسی شاخص‌های حکمروایی منابع آب اقدام به بررسی شاخص‌هایی گردید که بیشترین تأثیر را بر حکمروایی منطقه مورد مطالعه دارند. از سوی دیگر، این تحلیل برای اولین بار در زمینه بررسی شاخص‌های مؤثر حکمروایی با استفاده از تکنیک DANP انجام شده است. نتایج این تحقیق می‌تواند در شناسایی

معیارهای تأثیرگذار و همچنین بررسی روابط و اثرات معیارهای شناسایی‌شده در حکمروایی منابع آب کشاورزی مؤثر واقع شود. این عوامل می‌توانند زمینه‌ساز موفقیت و دستیابی به نتایج مطلوب برای کشاورزان و جامعه روستایی باشند. به همین دلیل، مطالعه رویکرد حکمروایی منابع آب کشاورزی در مناطق روستایی امری ضروری است و لازمه آن شناخت دقیق وضعیت شبکه اجتماعی ذینفعان محلی منابع آب است.

### روش‌شناسی

#### مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر از نظر ماهیت توصیفی-تحلیلی و از لحاظ هدف، کاربردی، از نظر داده‌های مورد استفاده جزو تحقیقات کیفی است. تحقیق حاضر ابتدا بر اساس روش کتابخانه‌ای و مطالعه اسناد و مدارک، چهارچوب نظری تدوین و سپس جهت عملیاتی نمودن مفاهیم و متغیرهای مطرح در سؤالات با استفاده از ادبیات تحقیق صورت گرفته است. در این راستا از مهم‌ترین شاخص‌هایی که مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته‌اند، می‌توان به شاخص مشارکت، پاسخگویی و مسئولیت‌پذیری، حاکمیت قانون و عدالت محوری اشاره کرد. بر اساس مطالعات صورت گرفته روی ادبیات تحقیق و جمع‌بندی از آن‌ها، پژوهش حاضر در قالب ۱۱ شاخص، انجام شده است (جدول ۲).

## جدول ۱- پیشینه مطالعات داخلی و خارجی در زمینه حکمروایی منابع آب

| نویسندگان                             | نتایج                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|---------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| قائمى و همکاران، (۱۳۹۵)               | نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که در حکمروایی پایدار به نقش کلیدی مشارکت مردمی و آموزش و ظرفیت‌سازی کلبه سیاست‌گذاران و ذی‌نفعان در فرایند تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی‌ها تأکید شده است.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| کریمی طریقه و همکاران، (۱۳۹۷)         | بر اساس نتایج، سطح حکمروایی خوب روستایی در مدیریت منابع آب کشاورزی مقدار فازی نهایی به‌عنوان خروجی سیستم استنتاج فازی در نرم‌افزار متلب برابر است با ۳۹/۰ که سطح استفاده کم را بر اساس شاخص‌های حکمروایی خوب روستایی مورد بررسی قرار می‌دهد. در ادامه نیز با استفاده از آزمون تحلیل مسیر به اثرات مستقیم و غیرمستقیم هر یک از شاخص‌های حکمروایی خوب روستایی پرداخته شد. نتایج نشان داد که در بین شاخص‌های بررسی‌شده، متغیر پاسخگویی با ضریب Beta به دست آمده (۴۳۲) بالاترین اثرات مستقیم را دارد. |
| ابراهیمی آذر خواران و همکاران، (۱۳۹۸) | نتایج پژوهش حاکی از تفکیک‌پذیری متوسط شبکه ذی‌نفعان محلی است که نشان‌دهنده وجود شکنندگی در حد متوسط در روابط مشارکت بین ذی‌نفعان محلی منابع است. همچنین، تحلیل‌ها نشان می‌دهد که برخی از بهره‌برداران منابع آب، از نظر شاخص‌های مرکزیت درجه و بینایی، نسبت به سایرین در موقعیت کلیدی‌تری قرار دارند.                                                                                                                                                                                              |
| تار محمدی قورچی و همکاران (۱۳۹۹)      | بیشتر پاسخگویان اعتقاد داشتند که مؤلفه‌های حکمروایی خوب در فرایند مدیریت مشارکتی آب از نظر توجه به هر پنج مؤلفه حکمروایی خوب یعنی مشارکت مردمی و توافق جمعی، مسئولیت‌پذیری و قانون‌محوری، پاسخگویی و شفافیت، انصاف و کارایی و اثربخشی در منطقه مورد مطالعه در سطح قابل قبولی مورد توجه قرار گرفته‌اند.                                                                                                                                                                                            |
| نصیری زارع و طهماسبی، (۱۴۰۱)          | مدیریت منابع آب کشاورزی در شهرستان طارم ناکارآمد بوده و تسهیل مشارکت و تمرکززدایی و تفویض اختیارات به سطوح محلی از مهم‌ترین پشوران‌های کلیدی شناسایی شدند.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| عامری گلستان و همکاران، (۱۴۰۲)        | حکمروایی همکارانه چه مؤلفه‌هایی را باید در نظر داشته باشد تا از طریق تعامل مؤثر و ایجاد انگیزه برای همکاری مشترک بین ذینفعان، به تحقق اهداف پایداری منابع آب کمک کند.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| سردار شهرکی و صفدری (۱۴۰۳)            | شش شاخص به‌عنوان شاخص‌های معرف اصول حکمروایی آب استخراج شدند و در نتیجه نهایی، شاخص مشارکت بهره‌برداران سستی به‌عنوان قوی‌ترین نظام و مشارکت شرکت‌های بهره‌بردار از شبکه آبیاری و زهکشی به‌عنوان ضعیف‌ترین نظام‌ها معرفی شده‌اند.                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| کوزداس و همکاران (۲۰۱۶)               | با استفاده از شاخص‌سازی، سناریوهای حکمروایی جایگزین، یافته‌ها نشان می‌دهد که رژیم‌های حکومتی با مشارکت منصفانه و مشورتی ذینفعان، ذخایر امن آب زیرزمینی و اکوسیستم‌های خشک استوایی سالم پایدار و عادلانه در نظر گرفته می‌شوند.                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| تاتار و همکاران (۲۰۱۹)                | با بررسی تحقیق مورد مطالعه، مؤلفه‌های حکمروایی و استخراج چالش‌های آن از جمله: فقدان مشارکت، عدالت، مسئولیت، پاسخگویی، مشروعیت، شفافیت و فرآیندهای اجماع محور؛ این نتیجه حاصل شد که این منطقه به دلیل چالش‌های حکمروایی ضعیف از مشکل اساسی برخوردار بوده و همچنین بررسی ساختار حکمروایی آب در منطقه مورد مطالعه، این واقعیت را برجسته می‌کند که موضوع مشارکت، در کنار سایر عوامل نام‌برده شده، چالش اصلی در شرایط کنونی است.                                                                       |
| کاتوسیم و اسکات (۲۰۲۰)                | در این پژوهش برای مقایسه وضعیت حکمروایی آب در دو حوضه آبریز مطالعه هدفمند انجام شد. یکی از حوضه‌های آبریز در معرض پروژه‌های مدیریت یکپارچه منابع آب بود، درحالی‌که دیگری در معرض پروژه‌های مدیریت یکپارچه منابع آب قرار نداشت. با بررسی شاخص‌های مرتبط با حکمروایی آب این نتیجه حاصل شد که عملکرد حکمروایی منابع آب در حوضه با شیوه‌های مدیریت یکپارچه منابع آب و با رویکرد مشارکتی به‌طور قابل توجهی بهتر از حوضه پایه است.                                                                      |
| نگوین و همکاران (۲۰۲۱)                | شاخص‌های حکمروایی آب مطرح‌شده در پژوهش نشان داد که بینشی در مورد قدرت، منافع و مسئولیت چندین آژانس برای بهبود انعطاف‌پذیری و سازگاری منطقه، توسعه سامانه‌های مدیریت آب پاسخگوتر و فراگیرتر، و هشدارهای اولیه و جریان‌های اطلاعاتی بهبودیافته در طول حوادث شدید، مورد نیاز است.                                                                                                                                                                                                                    |
| زییم بونی و همکاران (۲۰۲۲)            | در این تحقیق، با بررسی مؤلفه‌های حکمروایی آب، نقش جوامع در اداره و مدیریت سدهای آبیاری در مقیاس کوچک در منطقه شرق غنا مطالعه گردید. نتایج این پژوهش با استفاده از یک رویکرد موضوعی برای تجزیه و تحلیل نشان می‌دهد که کشاورزان کوچک با مشارکت انجمن‌های کاربران آب (WUAs) مرزهای کاربر را تعریف کرده‌اند و قوانین و مقررات اساسی را برای مدیریت پایدار این منابع آب برای فعالیتهای کشاورزی خود ایجاد کرده‌اند.                                                                                     |
| مارتین و لاسکو و همکاران (۲۰۲۳)       | در این پژوهش، با توجه اصول حکمروایی آب که توسط سازمان همکاری و توسعه اقتصادی (OECD) پیشنهاد شد، در مناطق روستایی مورد مطالعه آرژانتین ارائه و در نتیجه منجر به ایجاد سیاست‌های عمومی ملموس جهت اثربخشی، کارایی، قابلیت اطمینان و مشارکت شد و همچنین باعث شناسایی نقاط ضعف و قوت حکمروایی آب در مناطق روستایی مورد مطالعه آرژانتین گردید.                                                                                                                                                          |
| سوینو و همکاران (۲۰۲۴)                | در این پژوهش، با استفاده از تجزیه و تحلیل شبکه متنی (TNA) به شناسایی بازیگران کلیدی در حکمروایی آب محلی پرداخته شده است. یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد: بازیگران بانفوذ شناسایی‌شده توسط TNA شامل سامانه‌های آب آشامیدنی، ترتیبات مالی، مکانیسم‌های نظارت، نگرانی‌های زیست‌محیطی، دسترسی به آب و مدیریت آب سازگار با محیط‌زیست است و نقش حیاتی مشارکت و همکاری ذینفعان در رسیدگی به نیاز فوری به خدمات تأمین آب را برجسته ساخت.                                                                |

جدول ۲- استاندارد نظری شاخص‌های حکمروایی منابع آب کشاورزی

| شاخص مستندات                       | مشارکت | حاکمیت قانون | پاسخگویی و مسئولیت-پذیری | عدالت محوری | توافق جمعی | شفافیت | کارایی و اثربخشی | ظرفیت‌سازی | کیفیت نظارت و کنترل | سیاست‌گذاری اقتصادی | پیش راهبردی |
|------------------------------------|--------|--------------|--------------------------|-------------|------------|--------|------------------|------------|---------------------|---------------------|-------------|
| افتخاری و همکاران، ۱۳۹۱            | *      | *            | *                        | *           | *          | *      | *                |            |                     |                     |             |
| رحمانی فضلی و همکاران، ۱۳۹۳        | *      | *            | *                        | *           | *          | *      | *                |            |                     |                     |             |
| کریمی طرقله و همکاران، ۱۳۹۷        | *      | *            | *                        | *           | *          | *      | *                |            |                     |                     |             |
| بنی حبیب و غفوری خرائق، ۱۳۹۸       | *      | *            | *                        | *           |            |        |                  | *          | *                   |                     |             |
| دحیماوی و همکاران، ۱۳۹۷            | *      |              |                          |             |            | *      | *                |            | *                   |                     |             |
| سجاسی و همکاران، ۱۳۹۶              | *      |              | *                        | *           |            | *      | *                |            |                     |                     | *           |
| نوروزی و ابراهیمی، ۱۳۹۷            | *      | *            | *                        | *           |            | *      | *                |            |                     |                     |             |
| بدیسار و همکاران، ۱۳۹۷             | *      | *            | *                        | *           | *          | *      | *                |            |                     |                     |             |
| پایسته همکاران، ۱۳۹۹               | *      | *            | *                        | *           |            | *      | *                | *          |                     |                     | *           |
| صرافی فروشانی و همکاران، ۱۴۰۰      | *      | *            | *                        |             |            | *      |                  | *          | *                   |                     |             |
| رحیمی و همکاران، ۱۴۰۰              | *      | *            |                          |             | *          |        |                  |            | *                   |                     |             |
| نصیری زارع و طهماسبی، ۱۴۰۱         | *      |              | *                        |             |            | *      | *                |            |                     |                     |             |
| عامری گلستان و همکاران، ۱۴۰۲       | *      | *            | *                        | *           |            | *      | *                | *          | *                   |                     |             |
| قاسمی و عبدالهی، ۱۴۰۳              | *      | *            | *                        |             |            |        |                  | *          | *                   |                     |             |
| Knierper and Pahi Wostel, 2016     | *      | *            | *                        | *           | *          |        |                  |            |                     |                     | *           |
| Gain and Schwab, 2012              | *      | *            |                          |             |            |        |                  |            |                     |                     | *           |
| Langbein and Knack, 2008           | *      | *            | *                        |             |            |        | *                |            | *                   |                     |             |
| Akhmouch and Clavreul, 2016        | *      | *            | *                        |             |            | *      |                  | *          | *                   |                     |             |
| Cookey et al., 2016                | *      | *            |                          |             | *          |        |                  |            | *                   |                     |             |
| Özerol et al, 2018                 | *      | *            | *                        |             |            |        | *                |            |                     | *                   |             |
| Pahl Wostl, 2019                   | *      | *            | *                        | *           | *          | *      | *                |            |                     |                     | *           |
| Shanker Nah, 2019                  | *      | *            | *                        | *           | *          | *      | *                |            |                     |                     | *           |
| Schulz, 2019                       | *      | *            | *                        | *           |            |        |                  |            | *                   |                     | *           |
| Ahmad and Araral, 2019             | *      | *            | *                        |             |            |        | *                | *          |                     |                     | *           |
| liu et al., 2019                   | *      | *            | *                        | *           | *          | *      | *                |            | *                   |                     | *           |
| Katusime and Schutt, 2020          | *      | *            | *                        | *           | *          | *      | *                | *          |                     |                     | *           |
| Pahl Wostl et al., 2020            | *      | *            | *                        | *           | *          | *      | *                | *          | *                   |                     | *           |
| Bayu et al., 2020                  | *      | *            |                          |             |            |        | *                |            | *                   | *                   | *           |
| Shnglu et al., 2022                | *      | *            | *                        | *           | *          |        | *                | *          |                     |                     | *           |
| Salamanca Cano and Duran Dia, 2023 | *      | *            | *                        | *           | *          | *      | *                |            | *                   | *                   | *           |
| Suyeno et al., 2024                | *      | *            |                          | *           |            |        |                  |            | *                   | *                   | *           |

نفر از اساتید دانشگاه (دانشگاه اصفهان سه نفر، دانشگاه شهید بهشتی چهار نفر، دانشگاه تبریز ۱۰ نفر، دانشگاه تهران پنج نفر، دانشگاه تربیت مدرس چهار نفر، دانشگاه خوارزمی سه نفر، دانشگاه فردوسی مشهد یک نفر را شامل می‌شود.

سپس جهت روایی چارچوب عملیاتی شده با انجام مطالعات پیمایشی و نظرسنجی، مورد ارزیابی ۳۰ نفر از خبرگان و متخصصین گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی روستایی دانشگاه‌های مختلف سطح کشور به شرح جدول ۳ قرار گرفت. بدین ترتیب جامعه آماری تحقیق حاضر ۳۰

جدول ۳- مشخصات اعضای گروه خبرگان

| دانشگاه     | سطح تحصیلات | شغل       | جنسیت |     | فراوانی | درصد فراوانی | میانگین سنی |
|-------------|-------------|-----------|-------|-----|---------|--------------|-------------|
|             |             |           | زن    | مرد |         |              |             |
| اصفهان      | دکتر        | هیئت علمی | -     | 3   | 3       | 10           | 55          |
| شهید بهشتی  | دکتر        | هیئت علمی | 3     | 1   | 4       | 13.33        | 48          |
| تبریز       | دکتر        | هیئت علمی | 2     | 8   | 10      | 33.33        | 46          |
| تهران       | دکتر        | هیئت علمی | 2     | 3   | 5       | 16.68        | 50          |
| تربیت مدرس  | دکتر        | هیئت علمی | -     | 4   | 4       | 13.33        | 40          |
| خوارزمی     | دکتر        | هیئت علمی | -     | 3   | 3       | 10           | 50          |
| فردوسی مشهد | دکتر        | هیئت علمی | -     | 1   | 1       | 3.33         | 42          |
| جمع         |             |           | 7     | 23  | 30      | 100          | -           |

گردید. لازم به ذکر است که جهت پذیرفته شدن روایی محتوایی هر شاخص و عامل حداقل مقدار به دست آمده از CVR باید برابر ۲۹ و CVI باید بیشتر از ۷۹ به دست آمده باشد (فال سلیمان و همکاران، ۱۴۰۱).

$$CVR = \frac{n_E - \frac{N}{2}}{\frac{N}{2}} \quad (1)$$

در این رابطه،  $n_E$  تعداد افراد خبره‌ای است که به گزینه ضروری پاسخ داده‌اند و  $N$  بیانگر تعداد کل افراد خبره که برابر ۳۰ نفر است. وضعیت روایی مربوط به شاخص‌های حکمروایی منابع آب کشاورزی در قالب جدول ۴ ارائه شده است.

به منظور سنجش روایی چارچوب عملیاتی شده از روش اعتبار محتوا استفاده گردید. بر این اساس از اعضای هیئت علمی متخصص در زمینه موضوع و مسئله پژوهش درخواست شد جهت ضروری بودن، نسبت روایی محتوایی<sup>۱</sup> (CVR) هر کدام از شاخص‌ها، بر اساس طیف سه‌قسمتی («ضروری است»، «مفید است ولی ضروری نیست» و «ضرورتی ندارد») و برای بررسی مرتبط بودن، شاخص روایی محتوایی<sup>۲</sup> (CVI)، در یک طیف لیکرتی چهار قسمتی («غیر مرتبط»، «تا حدودی مرتبط»، «مرتبط» و «کاملاً مرتبط») مشخص نمایند. بدین ترتیب، با توجه به رابطه (۱)، نسبت روایی محتوایی شاخص‌ها مشخص

جدول ۴- روایی محتوایی شاخص‌های حکمروایی منابع آب کشاورزی

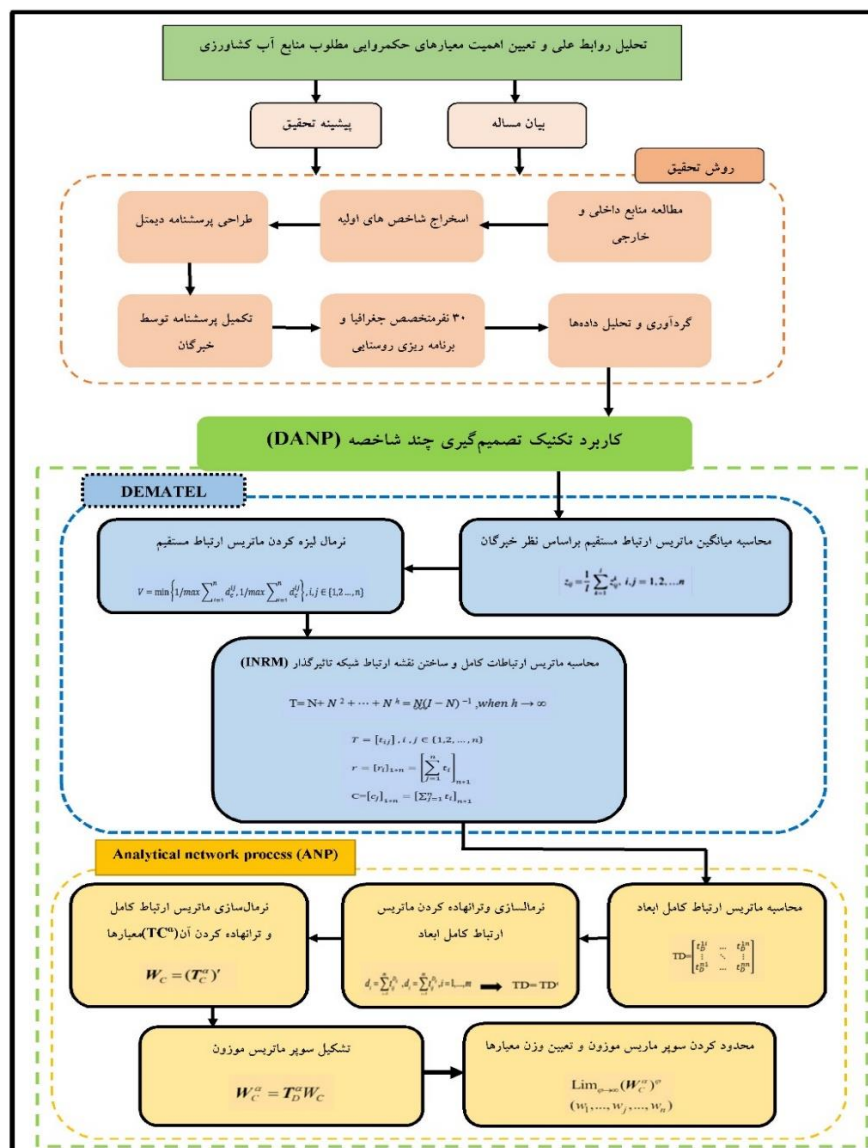
|         |    | CVR                      |                    | CVI                |         |     |                     |
|---------|----|--------------------------|--------------------|--------------------|---------|-----|---------------------|
| بعد     | کد | شاخص                     | نسبت روایی محتوایی | شاخص روایی محتوایی | بعد     | کد  | شاخص                |
| اجتماعی | A1 | مشارکت                   | 0.71               | 0.79               | اقتصادی | A7  | سیاست‌گذاری اقتصادی |
|         | A2 | پاسخگویی و مسئولیت‌پذیری | 0.67               | 0.80               | سیاسی   | A8  | حاکمیت قانون        |
|         | A3 | عدالت محوری              | 0.61               | 0.81               |         | A9  | شفافیت              |
|         | A4 | توافق جمعی               | 0.53               | 0.80               |         | A10 | کیفیت نظارت و کنترل |
|         | A5 | کارایی و اثربخشی         | 0.35               | 0.80               |         | A11 | بینش راهبردی        |
|         | A6 | ظرفیت‌سازی               | 0.65               | 0.85               |         | -   | -                   |
|         |    |                          |                    |                    |         |     |                     |

تأثیرگذاری و تأثیرپذیری بین معیارهای حکمروایی منابع آب پرداخته و سپس وزن و اهمیت هر یک از معیارها تعیین شد. دلیل استفاده از این تکنیک آن است که در تکنیک ANP، استفاده از روش میانگین‌گیری برای به دست آوردن سوپرماتریس وزن‌دار، غیرمنطقی به نظر می‌رسد، زیرا این

در مرحله بعد، بر اساس نظرسنجی مجدد، برای تحلیل روابط میان شاخص‌ها، پرسشنامه دوم توسط همان اساتید بر مبنای تکنیک دیمتل تکمیل گردید. در این پژوهش، با استفاده از تکنیک تلفیقی تصمیم‌گیری چند شاخصه ANP و Dematel (DANP) به بررسی

روش فرض می‌کند که تمام خوشه‌های معیارها، تأثیرگذاری یکسانی دارند (یانگ و همکاران، ۲۰۰۸). درحالی‌که تأثیر یک خوشه بر خوشه‌های دیگر ممکن است متفاوت باشد. همچنین از معایب دیگر این روش، آستانه گرفتن از ماتریس ارتباطات کل است که باعث حذف تعدادی از معیارها و روابط درونی میان آن‌ها می‌گردد؛ اما تکنیک DANP از ماتریس ارتباطات کل آستانه نمی‌گیرد؛ در نتیجه کلیه معیارها و روابط درونی بین آن‌ها حفظ می‌شود و با همان اعداد و معیارها، سوپرماتریس ناموزون اولیه تشکیل و سپس موزون شده و به توان بی‌نهایت می‌رسد تا وزن نهایی

هر شاخص مشخص گردد. در این روش بر اساس مفهوم ANP، ماتریس ارتباط کامل<sup>۱</sup> (TC) و ماتریس تأثیرات کل برای ابعاد<sup>۲</sup> (TD) با استفاده از دیمتل محاسبه می‌شوند. سپس از روش دیمتل، برای ساخت مدل روابط شبکه علی برای هر معیار استفاده می‌شود (چیو و همکاران، ۲۰۱۳). پس از ساخت روابط علت و معلولی شاخص‌ها، وزن ابعاد و شاخص‌های حکمروایی منابع آب کشاورزی بر مبنای تکنیک ANP محاسبه گردید. مراحل روش‌شناسی مقاله و مراحل انجام تکنیک DANP در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- مدل تحلیلی پژوهش

## یافته‌های پژوهش

از ارزیابی روایی و اعتبار سنجی نهایی به صورت جدول در قالب دو بعد اجتماعی و اقتصادی-سیاسی و ۱۱ معیار آورده شده است (جدول ۵). لازم به یادآوری است که تمام مراحل تکنیک DANP در محیط نرم افزار اکسل ۲۰۱۶ محاسبه شده است.

در این پژوهش، پس از استخراج و شناسایی نهایی شاخص‌های حکمروایی، روایی آن‌ها توسط خبرگان مورد تأیید قرار گرفت. در نهایت، بخش اول پژوهش پس

جدول ۵- ابعاد و معیارهای مؤثر حکمروایی مطلوب منابع آب کشاورزی

| بعد <sup>۱</sup> (D) | شاخص <sup>۲</sup> (C)    | علامت اختصاری | بعد          | شاخص                | علامت اختصاری |
|----------------------|--------------------------|---------------|--------------|---------------------|---------------|
| اجتماعی (D1)         | مشارکت                   | C1            | اقتصادی (D2) | سیاست‌گذاری اقتصادی | C7            |
|                      | پاسخگویی و مسئولیت‌پذیری | C2            | سیاسی (D3)   | حاکمیت قانون        | C8            |
|                      | عدالت محوری              | C3            |              | شفافیت              | C9            |
|                      | توافق جمعی               | C4            |              | کیفیت نظارت و کنترل | C10           |
|                      | کارایی و اثربخشی         | C5            |              | بیش راهبردی         | C11           |
|                      | ظرفیت‌سازی               | C6            |              |                     |               |

**گام اول:** در فرآیند محاسبه ماتریس ارتباط مستقیم، برای ارزیابی روابط میان معیارها (سطح تأثیرگذاری یک معیار بر معیار دیگر) از پرسشنامه مقایسات زوجی دیمتل و بر اساس نظرات خبرگان انجام می‌گیرد. در این پرسشنامه، میزان تأثیر در یک طیف شامل: بدون تأثیر

(صفر)، تأثیر خیلی کم (۱)، تأثیر کم (۲)، تأثیر زیاد (۳) و تأثیر خیلی زیاد (۴) مشخص می‌گردد. در نهایت، مجموع نظرات جمع‌آوری شده به صورت ماتریسی تحت عنوان ماتریس Z استخراج می‌شود. میانگین نظرات خبرگان در جدول ۶ قابل مشاهده است.

جدول ۶- میانگین معیارهای مؤثر ماتریس ارتباط مستقیم بر اساس نظرات خبرگان

| شاخص            | C <sub>1</sub> | C <sub>2</sub> | C <sub>3</sub> | C <sub>4</sub> | C <sub>5</sub> | C <sub>6</sub> | C <sub>7</sub> | C <sub>8</sub> | C <sub>9</sub> | C <sub>10</sub> | C <sub>11</sub> |
|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|
| C <sub>1</sub>  | 0.00           | 3.07           | 3.20           | 3.67           | 3.53           | 3.07           | 2.67           | 2.73           | 3.20           | 2.80            | 2.93            |
| C <sub>2</sub>  | 2.80           | 0.00           | 3.00           | 2.60           | 3.33           | 2.87           | 2.73           | 3.07           | 3.33           | 3.07            | 2.67            |
| C <sub>3</sub>  | 2.73           | 2.93           | 0.00           | 2.93           | 3.40           | 2.80           | 2.87           | 2.93           | 3.13           | 2.60            | 2.93            |
| C <sub>4</sub>  | 3.27           | 3.13           | 2.47           | 0.00           | 2.93           | 2.47           | 2.40           | 2.53           | 3.00           | 2.33            | 2.67            |
| C <sub>5</sub>  | 3.00           | 2.87           | 2.33           | 2.67           | 0.00           | 2.73           | 2.67           | 2.87           | 2.73           | 2.33            | 2.40            |
| C <sub>6</sub>  | 2.80           | 2.47           | 2.67           | 2.00           | 2.47           | 0.00           | 2.80           | 1.93           | 2.00           | 1.93            | 2.40            |
| C <sub>7</sub>  | 2.73           | 2.33           | 3.33           | 2.33           | 2.93           | 3.07           | 0.00           | 2.60           | 3.13           | 2.87            | 2.93            |
| C <sub>8</sub>  | 2.87           | 3.20           | 3.33           | 2.67           | 2.93           | 3.00           | 3.00           | 0.00           | 3.00           | 3.47            | 2.67            |
| C <sub>9</sub>  | 3.07           | 3.20           | 2.80           | 3.47           | 3.13           | 2.20           | 2.67           | 3.20           | 0.00           | 2.87            | 2.60            |
| C <sub>10</sub> | 2.00           | 2.93           | 3.07           | 2.93           | 2.80           | 2.53           | 2.87           | 2.80           | 2.80           | 0.00            | 2.47            |
| C <sub>11</sub> | 2.73           | 2.80           | 3.07           | 2.80           | 3.07           | 3.07           | 3.27           | 2.87           | 3.07           | 2.67            | 0.00            |

**گام دوم:** ماتریس Z را نرمال‌سازی کرده و آن را ماتریس نرمال شده<sup>۳</sup> (N) می‌نامیم. برای نرمال‌سازی، ابتدا مجموع سطرها و ستون‌های ماتریس Z محاسبه می‌شود و بزرگ‌ترین عدد حاصل از این مجموع‌ها انتخاب می‌گردد.

سپس، تمامی اعداد ماتریس Z بر این عدد تقسیم می‌شوند. در ماتریس ارتباط مستقیم، عدد ۸۶/۳۰ به عنوان بزرگ‌ترین حاصل جمع سطر شناسایی شده است؛ بنابراین، همه اعداد ماتریس ارتباط مستقیم بر این عدد تقسیم می‌گردند. نتایج حاصل از نرمال‌سازی در جدول ۷ نشان داده شده است.

1 - Dimension

2 - Criteria

3 - Normalized

جدول ۷- نرمال شده ماتریس ارتباط مستقیم (N)

| شاخص            | C <sub>1</sub> | C <sub>2</sub> | C <sub>3</sub> | C <sub>4</sub> | C <sub>5</sub> | C <sub>6</sub> | C <sub>7</sub> | C <sub>8</sub> | C <sub>9</sub> | C <sub>10</sub> | C <sub>11</sub> |
|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|
| C <sub>1</sub>  | 0.00           | 0.10           | 0.10           | 0.12           | 0.12           | 0.10           | 0.09           | 0.09           | 0.10           | 0.09            | 0.10            |
| C <sub>2</sub>  | 0.09           | 0.00           | 0.10           | 0.09           | 0.11           | 0.09           | 0.09           | 0.10           | 0.11           | 0.10            | 0.09            |
| C <sub>3</sub>  | 0.09           | 0.10           | 0.00           | 0.10           | 0.11           | 0.09           | 0.09           | 0.10           | 0.10           | 0.09            | 0.10            |
| C <sub>4</sub>  | 0.11           | 0.10           | 0.08           | 0.00           | 0.10           | 0.08           | 0.08           | 0.08           | 0.10           | 0.08            | 0.09            |
| C <sub>5</sub>  | 0.10           | 0.09           | 0.08           | 0.09           | 0.00           | 0.09           | 0.09           | 0.09           | 0.09           | 0.08            | 0.08            |
| C <sub>6</sub>  | 0.09           | 0.08           | 0.09           | 0.07           | 0.08           | 0.00           | 0.09           | 0.06           | 0.07           | 0.06            | 0.08            |
| C <sub>7</sub>  | 0.09           | 0.08           | 0.11           | 0.08           | 0.10           | 0.10           | 0.00           | 0.09           | 0.10           | 0.09            | 0.10            |
| C <sub>8</sub>  | 0.09           | 0.10           | 0.11           | 0.09           | 0.10           | 0.10           | 0.10           | 0.00           | 0.10           | 0.11            | 0.09            |
| C <sub>9</sub>  | 0.10           | 0.10           | 0.09           | 0.11           | 0.10           | 0.07           | 0.09           | 0.10           | 0.00           | 0.09            | 0.09            |
| C <sub>10</sub> | 0.06           | 0.10           | 0.10           | 0.10           | 0.09           | 0.08           | 0.09           | 0.09           | 0.09           | 0.00            | 0.08            |
| C <sub>11</sub> | 0.09           | 0.09           | 0.10           | 0.09           | 0.10           | 0.10           | 0.11           | 0.09           | 0.10           | 0.09            | 0.00            |

گام سوم: پس از نرمال سازی ماتریس Z و معیارهای مورد بررسی محاسبه شد. نتایج این محاسبات در تشکیل ماتریس N، ماتریس ارتباطات کامل (TC) برای جدول ۸ ارائه شده است.

جدول ۸- ماتریس ارتباطات کامل (TC)

| بعد            | شاخص            | D <sub>1</sub> |                |                |                |                |                | D <sub>2</sub> |                |                |                 |                 |
|----------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|
|                |                 | C <sub>1</sub> | C <sub>2</sub> | C <sub>3</sub> | C <sub>4</sub> | C <sub>5</sub> | C <sub>6</sub> | C <sub>7</sub> | C <sub>8</sub> | C <sub>9</sub> | C <sub>10</sub> | C <sub>11</sub> |
| D <sub>1</sub> | C <sub>1</sub>  | 1.12           | 1.25           | 1.26           | 1.24           | 1.32           | 1.21           | 1.20           | 1.19           | 1.27           | 1.17            | 1.16            |
|                | C <sub>2</sub>  | 1.15           | 1.11           | 1.21           | 1.16           | 1.27           | 1.16           | 1.16           | 1.16           | 1.23           | 1.13            | 1.11            |
|                | C <sub>3</sub>  | 1.15           | 1.19           | 1.11           | 1.16           | 1.26           | 1.15           | 1.15           | 1.15           | 1.21           | 1.11            | 1.11            |
|                | C <sub>4</sub>  | 1.09           | 1.13           | 1.12           | 1.01           | 1.18           | 1.07           | 1.07           | 1.07           | 1.14           | 1.04            | 1.04            |
|                | C <sub>5</sub>  | 1.06           | 1.10           | 1.09           | 1.07           | 1.07           | 1.06           | 1.06           | 1.06           | 1.11           | 1.02            | 1.01            |
|                | C <sub>6</sub>  | 0.95           | 0.98           | 0.99           | 0.94           | 1.02           | 0.87           | 0.96           | 0.92           | 0.98           | 0.90            | 0.91            |
| D <sub>2</sub> | C <sub>7</sub>  | 1.11           | 1.14           | 1.18           | 1.11           | 1.21           | 1.12           | 1.03           | 1.10           | 1.18           | 1.09            | 1.08            |
| D <sub>3</sub> | C <sub>8</sub>  | 1.18           | 1.23           | 1.24           | 1.18           | 1.28           | 1.18           | 1.19           | 1.09           | 1.24           | 1.16            | 1.13            |
|                | C <sub>9</sub>  | 1.16           | 1.20           | 1.20           | 1.18           | 1.26           | 1.13           | 1.15           | 1.15           | 1.12           | 1.12            | 1.10            |
|                | C <sub>10</sub> | 1.06           | 1.12           | 1.13           | 1.09           | 1.17           | 1.07           | 1.08           | 1.07           | 1.13           | 0.97            | 1.03            |
|                | C <sub>11</sub> | 1.15           | 1.19           | 1.21           | 1.16           | 1.26           | 1.16           | 1.17           | 1.15           | 1.22           | 1.12            | 1.03            |

گام چهارم: نخست باید ماتریس TD را از محاسبه می شود و بر این اساس، ماتریس TD تشکیل می گردد (جدول ۹). ماتریس ارتباط کامل TC استخراج کرد. برای این منظور، میانگین ابعاد مرتبط با هر شاخص در ماتریس ارتباط کامل

جدول ۹- ماتریس ارتباط کامل ابعاد (TD)

| TD             | D <sub>1</sub><br>اجتماعی | D <sub>2</sub><br>اقتصادی | D <sub>3</sub><br>سیاسی |
|----------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------|
| D <sub>1</sub> | 0.899                     | 0.837                     | 0.898                   |
| D <sub>2</sub> | 0.875                     | 0.732                     | 0.868                   |
| D <sub>3</sub> | 0.927                     | 0.852                     | 0.893                   |

در ادامه میزان شاخص r<sub>i</sub> و c<sub>j</sub> محاسبه شده است. در ماتریس روابط کامل، مجموع سطرها (r) و مجموع ستون ها (c) برای هر معیار یا شاخص به ترتیب نشانگر میزان تأثیرگذاری و تأثیرپذیری آن معیار بر سایر

می‌گردد که به آن نقشه روابط شبکه علی (NRM) می‌گویند. همچنین برای تعیین نقشه روابط شبکه (NRM) باید ارزش آستانه از طریق میانگین کل معیارهای ماتریس روابط کل محاسبه شود. بعد از تعیین مقدار آستانه، تمامی مقادیر کمتر از حد آستانه صفر در نظر گرفته می‌شوند و معیارهای بالاتر از حد آستانه روابط علی در نظر گرفته می‌شوند. در این پژوهش، حد آستانه محدوده ۱/۱۲ تعیین شده است (جدول ۱۰).

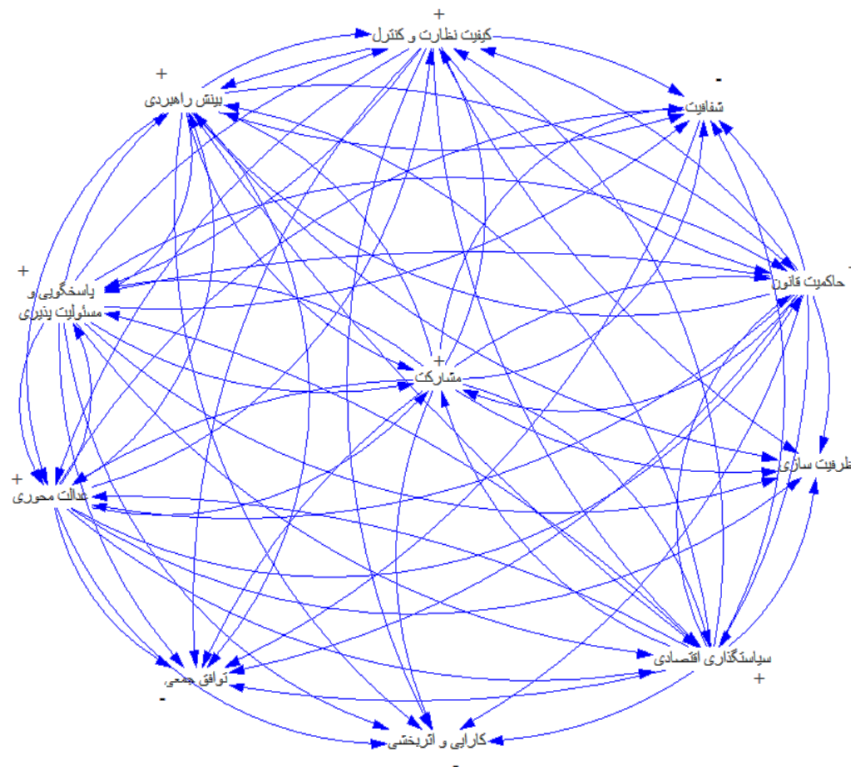
معیارها است. به عبارتی، شاخص  $ri$  نشان‌دهنده مجموع سطر  $i$  و  $Cj$  بیانگر مجموع ستون  $j$  است. به‌طورکلی، شاخص  $ri-Cj$  حاصل تفاضل جمع سطر  $i$  و جمع ستون  $j$  بوده و نشان‌دهنده تأثیرگذاری و یا تأثیرپذیری معیار  $i$  است؛ بنابراین اگر  $ri-Cj$  مثبت باشد، معیار  $i$  جزو معیارهای علی یا تأثیرگذار محسوب می‌شود و اگر  $ri-Cj$  منفی باشد، معیار  $i$  جزو معیارهای تأثیرپذیر قرار می‌گیرد. در نهایت نقشه روابط تأثیرگذاری و تأثیرپذیری هر یک از معیارها ترسیم

جدول ۱۰- مقادیر اثرات معیارهای حکمروایی مطلوب منابع آب بر اساس روش DANP

| اثرگذاری  | r-c   | r+c     | C           | r          | شاخص                     |
|-----------|-------|---------|-------------|------------|--------------------------|
|           |       |         | مجموع ستونی | مجموع سطری |                          |
| تأثیرگذار | 1.23  | 25.57   | 12.17       | 13.40      | مشارکت                   |
| تأثیرگذار | 0.19  | 25.50   | 12.65       | 12.84      | پاسخگویی و مسئولیت‌پذیری |
| تأثیرگذار | 0.01  | 25.52   | 12.75       | 12.77      | عدالت محوری              |
| تأثیرپذیر | -0.34 | 24.27   | 12.30       | 11.97      | توافق جمعی               |
| تأثیرپذیر | -1.59 | 25.00   | 13.30       | 11.71      | کارایی و اثربخشی         |
| تأثیرپذیر | -1.75 | 22.61   | 12.18       | 10.43      | ظرفیت‌سازی               |
| تأثیرگذار | 0.12  | 24.58   | 12.23       | 12.35      | سیاست‌گذاری اقتصادی      |
| تأثیرگذار | 1.01  | 25.21   | 12.10       | 13.11      | حاکمیت قانون             |
| تأثیرپذیر | -0.06 | 25.61   | 12.83       | 12.78      | شفافیت                   |
| تأثیرگذار | 0.10  | 23.77   | 11.84       | 11.93      | کیفیت نظارت و کنترل      |
| تأثیرگذار | 1.08  | 1124.54 | .73         | 12.81      | بینش راهبردی             |

و ارتباط با سایر شاخص‌ها هستند. از سوی دیگر، معیار ظرفیت‌سازی با درجه اهمیت ۱/۷۵-، کارایی و اثربخشی با درجه اهمیت ۱/۵۹- و معیار توافق جمعی با درجه اهمیت ۰/۳۴- کمترین تعامل و ارتباط را با سایر ابعاد دارند. پس از محاسبه جدول روابط معیارها، نمودار روابط و اهمیت معیارها مطابق شکل ۳ در محیط نرم‌افزار ونسیم ترسیم شده است.

در این پژوهش، به دلیل پیچیدگی جزئیات و پیشگیری از گنگ شدن مطالب، روابط معیارها از طریق میزان شاخص  $ri$  و  $Cj$  ترسیم شده است. همان‌طور که در جدول ۱۰ مشخص است، شاخص مشارکت با درجه اهمیت ۱/۲۳، بینش راهبردی با درجه اهمیت ۱/۰۸، حاکمیت قانون با درجه اهمیت ۱/۰۱ و پاسخگویی و مسئولیت‌پذیری با درجه اهمیت ۰/۱۹ دارای بیشترین تعامل



شکل ۳- ارتباطات معیارهای حکمروایی مطلوب منابع آب کشاورزی بر اساس نتایج تکنیک Dematel

**گام پنجم:** پس از محاسبه ماتریس ارتباط کامل ابعاد، نرمال سازی انجام می شود و سپس ماتریس ترانهاده ارتباط کامل ابعاد ( $TD^a$ ) محاسبه می گردد. ماتریس  $TD$  از میانگین ماتریس  $TC$  به دست می آید. برای نرمال سازی

ماتریس  $TD$ ، ابتدا حاصل جمع هر سطر محاسبه شده و سپس هر عنصر بر مجموع عناصر سطر مربوط به خود تقسیم می گردد. در مرحله بعد، جای سطر و ستون ماتریس حاصل تغییر می کند. ماتریس ارتباط کامل نرمال شده  $TD$  به صورت  $TD^a$  نشان داده می شود (جدول ۱۱).

جدول ۱۱- ماتریس ترانهاده شده ماتریس ارتباط ابعاد ( $TD^a$ )

| بعد   | $D_1$<br>اجتماعی | $D_2$<br>اقتصادی | $D_3$<br>سیاسی |
|-------|------------------|------------------|----------------|
| $D_1$ | 0.33             | 0.32             | 0.34           |
| $D_2$ | 0.31             | 0.27             | 0.31           |
| $D_3$ | 0.33             | 0.32             | 0.33           |

**گام ششم:** در این مرحله، نرمال سازی ماتریس ارتباط کامل معیارها ( $TC^a$ ) انجام می گردد. مشابه نرمال سازی ماتریس  $TD$ ، ماتریس ارتباط کامل معیارها ( $TC^a$ ) هم نرمال سازی می شود. ابتدا مجموع مقادیر هر سطر در

ماتریس  $TC^a$  محاسبه و سپس هر عنصر در ماتریس  $TC^a$  بر مجموع عناصر همان سطر تقسیم می گردد. نتیجه ی این فرآیند، یک ماتریس نرمال شده از  $TC^a$  خواهد بود که در جدول ۱۲ نمایش داده شده است.

جدول ۱۲- نرمال شده ماتریس ارتباط کامل معیارها ( $TC^a$ )

| شاخص            | C <sub>1</sub> | C <sub>2</sub> | C <sub>3</sub> | C <sub>4</sub> | C <sub>5</sub> | C <sub>6</sub> | C <sub>7</sub> | C <sub>8</sub> | C <sub>9</sub> | C <sub>10</sub> | C <sub>11</sub> |
|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|
| C <sub>1</sub>  | 0.083          | 0.093          | 0.094          | 0.092          | 0.099          | 0.090          | 0.090          | 0.089          | 0.095          | 0.087           | 0.087           |
| C <sub>2</sub>  | 0.090          | 0.087          | 0.094          | 0.090          | 0.099          | 0.090          | 0.090          | 0.090          | 0.096          | 0.088           | 0.087           |
| C <sub>3</sub>  | 0.090          | 0.093          | 0.087          | 0.091          | 0.099          | 0.090          | 0.090          | 0.090          | 0.095          | 0.087           | 0.087           |
| C <sub>4</sub>  | 0.091          | 0.094          | 0.094          | 0.084          | 0.098          | 0.090          | 0.090          | 0.089          | 0.095          | 0.087           | 0.087           |
| C <sub>5</sub>  | 0.091          | 0.094          | 0.093          | 0.091          | 0.091          | 0.090          | 0.091          | 0.090          | 0.095          | 0.087           | 0.087           |
| C <sub>6</sub>  | 0.091          | 0.094          | 0.095          | 0.090          | 0.098          | 0.083          | 0.092          | 0.089          | 0.094          | 0.087           | 0.087           |
| C <sub>7</sub>  | 0.090          | 0.092          | 0.095          | 0.090          | 0.098          | 0.091          | 0.084          | 0.089          | 0.095          | 0.088           | 0.087           |
| C <sub>8</sub>  | 0.090          | 0.094          | 0.095          | 0.090          | 0.098          | 0.090          | 0.091          | 0.083          | 0.095          | 0.089           | 0.086           |
| C <sub>9</sub>  | 0.090          | 0.094          | 0.094          | 0.092          | 0.098          | 0.089          | 0.090          | 0.090          | 0.088          | 0.088           | 0.086           |
| C <sub>10</sub> | 0.088          | 0.094          | 0.095          | 0.092          | 0.098          | 0.090          | 0.091          | 0.090          | 0.095          | 0.081           | 0.087           |
| C <sub>11</sub> | 0.090          | 0.093          | 0.094          | 0.091          | 0.098          | 0.090          | 0.091          | 0.090          | 0.095          | 0.087           | 0.080           |

گام هفتم: در گام بعدی نیز با تغییر جای سطر و ستون ماریس  $TC$ ، ترانهاده ماتریس ارتباط کامل نرمال شده  $TC^a$  محاسبه شده و ماتریس  $W$  حاصل می شود (جدول ۱۳).

جدول ۱۳- سوپر ماتریس ناموزون ( $W$ )

| شاخص            | C <sub>1</sub> | C <sub>2</sub> | C <sub>3</sub> | C <sub>4</sub> | C <sub>5</sub> | C <sub>6</sub> | C <sub>7</sub> | C <sub>8</sub> | C <sub>9</sub> | C <sub>10</sub> | C <sub>11</sub> |
|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|
| C <sub>1</sub>  | 0.083          | 0.086          | 0.085          | 0.082          | 0.079          | 0.071          | 0.083          | 0.088          | 0.086          | 0.079           | 0.086           |
| C <sub>2</sub>  | 0.093          | 0.083          | 0.089          | 0.084          | 0.082          | 0.073          | 0.085          | 0.092          | 0.090          | 0.084           | 0.089           |
| C <sub>3</sub>  | 0.094          | 0.090          | 0.083          | 0.084          | 0.082          | 0.074          | 0.088          | 0.093          | 0.090          | 0.085           | 0.090           |
| C <sub>4</sub>  | 0.092          | 0.087          | 0.087          | 0.075          | 0.080          | 0.070          | 0.083          | 0.088          | 0.088          | 0.082           | 0.087           |
| C <sub>5</sub>  | 0.099          | 0.095          | 0.094          | 0.088          | 0.080          | 0.076          | 0.090          | 0.096          | 0.094          | 0.087           | 0.094           |
| C <sub>6</sub>  | 0.090          | 0.086          | 0.086          | 0.080          | 0.079          | 0.065          | 0.084          | 0.088          | 0.085          | 0.080           | 0.086           |
| C <sub>7</sub>  | 0.090          | 0.086          | 0.086          | 0.080          | 0.079          | 0.071          | 0.077          | 0.089          | 0.086          | 0.081           | 0.087           |
| C <sub>8</sub>  | 0.089          | 0.086          | 0.085          | 0.080          | 0.079          | 0.069          | 0.082          | 0.081          | 0.086          | 0.080           | 0.086           |
| C <sub>9</sub>  | 0.095          | 0.092          | 0.091          | 0.085          | 0.083          | 0.073          | 0.088          | 0.093          | 0.084          | 0.085           | 0.091           |
| C <sub>10</sub> | 0.087          | 0.084          | 0.083          | 0.078          | 0.076          | 0.067          | 0.081          | 0.087          | 0.084          | 0.072           | 0.083           |
| C <sub>11</sub> | 0.087          | 0.083          | 0.083          | 0.078          | 0.076          | 0.068          | 0.081          | 0.085          | 0.082          | 0.077           | 0.077           |

گام هشتم: با توجه به جدول ۱۴، سوپر ماریس موزون برای شاخص های حکمروایی منابع آب کشاورزی، سوپر ماتریس ناموزون ( $W^a$ )، تشکیل شده است .

جدول ۱۴- سوپر ماتریس ناموزون ( $W^a$ )

| شاخص            | C <sub>1</sub> | C <sub>2</sub> | C <sub>3</sub> | C <sub>4</sub> | C <sub>5</sub> | C <sub>6</sub> | C <sub>7</sub> | C <sub>8</sub> | C <sub>9</sub> | C <sub>10</sub> | C <sub>11</sub> |
|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|
| C <sub>1</sub>  | 0.041          | 0.042          | 0.042          | 0.040          | 0.039          | 0.035          | 0.040          | 0.042          | 0.041          | 0.038           | 0.041           |
| C <sub>2</sub>  | 0.046          | 0.041          | 0.044          | 0.041          | 0.040          | 0.036          | 0.041          | 0.044          | 0.043          | 0.040           | 0.043           |
| C <sub>3</sub>  | 0.046          | 0.044          | 0.041          | 0.041          | 0.040          | 0.036          | 0.042          | 0.044          | 0.043          | 0.040           | 0.043           |
| C <sub>4</sub>  | 0.045          | 0.042          | 0.042          | 0.037          | 0.039          | 0.034          | 0.040          | 0.042          | 0.042          | 0.039           | 0.041           |
| C <sub>5</sub>  | 0.048          | 0.046          | 0.046          | 0.043          | 0.039          | 0.037          | 0.043          | 0.046          | 0.045          | 0.042           | 0.045           |
| C <sub>6</sub>  | 0.044          | 0.042          | 0.042          | 0.039          | 0.039          | 0.032          | 0.040          | 0.042          | 0.040          | 0.038           | 0.041           |
| C <sub>7</sub>  | 0.046          | 0.044          | 0.044          | 0.041          | 0.040          | 0.036          | 0.038          | 0.043          | 0.042          | 0.039           | 0.043           |
| C <sub>8</sub>  | 0.045          | 0.044          | 0.044          | 0.041          | 0.040          | 0.035          | 0.040          | 0.040          | 0.042          | 0.039           | 0.042           |
| C <sub>9</sub>  | 0.048          | 0.047          | 0.046          | 0.043          | 0.042          | 0.037          | 0.043          | 0.045          | 0.041          | 0.041           | 0.044           |
| C <sub>10</sub> | 0.045          | 0.043          | 0.042          | 0.040          | 0.039          | 0.034          | 0.040          | 0.042          | 0.041          | 0.035           | 0.041           |
| C <sub>11</sub> | 0.044          | 0.042          | 0.042          | 0.040          | 0.039          | 0.035          | 0.039          | 0.041          | 0.040          | 0.038           | 0.037           |

**گام نهم:** مطابق جدول ۱۵، سوپر ماتریس موزون به توان (متوالی اعداد فرد) رسانده شده است. این فرایند تا زمانی ادامه پیدا کرده است که مقادیر موجود در هر سطر از سوپر ماتریس به یک مقدار همگرا شوند (اعداد در هر سطر به یک مقدار نزدیک و تقریباً ثابت برسند). در این پژوهش، مشخص شده است که سوپر ماتریس موزون در توان سه به همگرایی رسیده است که به شرح جدول ۱۵ نشان داده شده است.

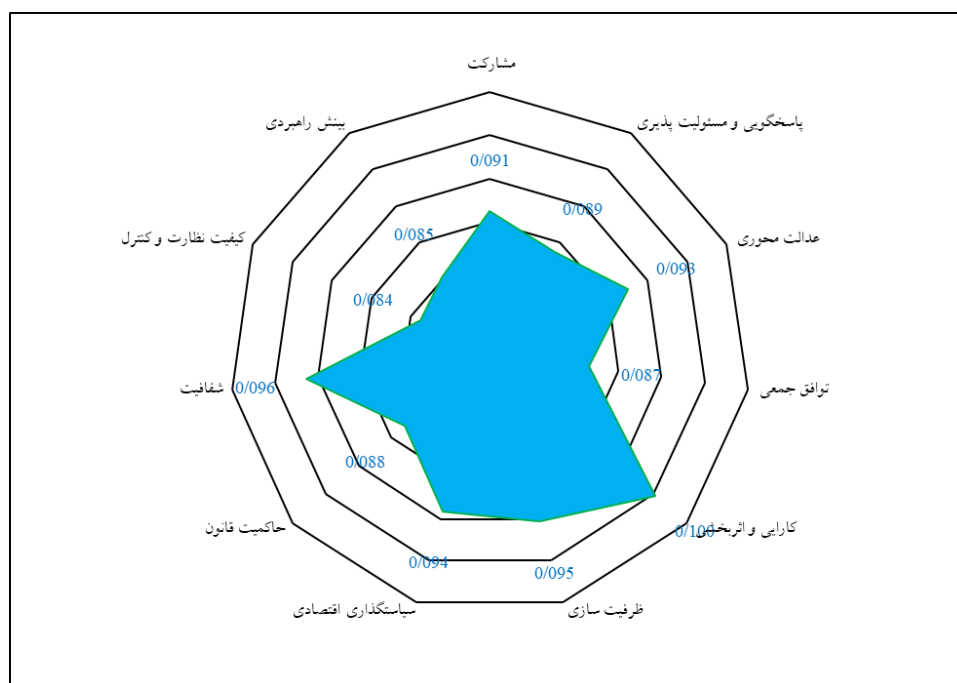
| جدول ۱۵- سوپر ماتریس موزون محدود شده $\lim w^a$ |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                 |                 |
|-------------------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|
| شاخص                                            | C <sub>1</sub> | C <sub>2</sub> | C <sub>3</sub> | C <sub>4</sub> | C <sub>5</sub> | C <sub>6</sub> | C <sub>7</sub> | C <sub>8</sub> | C <sub>9</sub> | C <sub>10</sub> | C <sub>11</sub> |
| C <sub>1</sub>                                  | 0.009          | 0.009          | 0.009          | 0.008          | 0.008          | 0.007          | 0.008          | 0.009          | 0.008          | 0.008           | 0.008           |
| C <sub>2</sub>                                  | 0.009          | 0.009          | 0.009          | 0.008          | 0.008          | 0.007          | 0.008          | 0.009          | 0.009          | 0.008           | 0.009           |
| C <sub>3</sub>                                  | 0.009          | 0.009          | 0.009          | 0.008          | 0.008          | 0.007          | 0.008          | 0.009          | 0.009          | 0.008           | 0.009           |
| C <sub>4</sub>                                  | 0.009          | 0.009          | 0.009          | 0.008          | 0.008          | 0.007          | 0.008          | 0.009          | 0.008          | 0.008           | 0.008           |
| C <sub>5</sub>                                  | 0.010          | 0.009          | 0.009          | 0.009          | 0.009          | 0.008          | 0.009          | 0.009          | 0.009          | 0.008           | 0.009           |
| C <sub>6</sub>                                  | 0.009          | 0.009          | 0.009          | 0.008          | 0.008          | 0.007          | 0.008          | 0.009          | 0.008          | 0.008           | 0.008           |
| C <sub>7</sub>                                  | 0.009          | 0.009          | 0.009          | 0.008          | 0.008          | 0.007          | 0.008          | 0.009          | 0.009          | 0.008           | 0.009           |
| C <sub>8</sub>                                  | 0.009          | 0.009          | 0.009          | 0.008          | 0.008          | 0.007          | 0.008          | 0.009          | 0.009          | 0.008           | 0.009           |
| C <sub>9</sub>                                  | 0.010          | 0.009          | 0.009          | 0.009          | 0.009          | 0.008          | 0.009          | 0.009          | 0.009          | 0.008           | 0.009           |
| C <sub>10</sub>                                 | 0.009          | 0.009          | 0.009          | 0.008          | 0.008          | 0.007          | 0.008          | 0.009          | 0.008          | 0.008           | 0.008           |
| C <sub>11</sub>                                 | 0.009          | 0.009          | 0.009          | 0.008          | 0.008          | 0.007          | 0.008          | 0.009          | 0.008          | 0.008           | 0.008           |

مطلوب منابع آب هستند. در مقابل، شاخص‌های کیفیت نظارت و کنترل با وزن ۰/۰۸۳، بینش راهبردی ۰/۰۸۵ و حاکمیت قانون با وزن ۰/۰۸۸ به ترتیب به عنوان کم‌اهمیت‌ترین شاخص‌ها در این بررسی معرفی شدند. در نهایت، بر اساس جدول ۱۶، نمودار راداری وزن‌های حکمروایی منابع آب کشاورزی به دست آمده از تکنیک DANP در شکل ۴ ترسیم گردید.

در این تحقیق، اوزان و اولویت‌بندی شاخص‌های استخراج شده از سوپر ماتریس حددار به اعداد قطعی تبدیل شد. برای این منظور، وزن هر شاخص بر مجموع اوزان تقسیم و به این ترتیب استانداردسازی انجام می‌شود. نتایج حاصل از جدول ۱۶ نشان می‌دهد که شاخص‌های کارایی و اثربخشی با وزن ۰/۱۰۰، شفافیت با وزن ۰/۰۹۶، ظرفیت‌سازی با وزن ۰/۰۹۵ و شاخص سیاست‌گذاری اقتصادی با وزن ۰/۰۹۵ به ترتیب مهم‌ترین شاخص‌ها در حکمروایی

جدول ۱۶- وزن و اهمیت شاخص‌های حکمروایی مطلوب منابع آب کشاورزی

| رتبه | وزن   | کد              | معیار                    |
|------|-------|-----------------|--------------------------|
| 6    | 0.091 | C <sub>1</sub>  | مشارکت                   |
| 7    | 0.089 | C <sub>2</sub>  | پاسخگویی و مسئولیت‌پذیری |
| 5    | 0.093 | C <sub>3</sub>  | عدالت محوری              |
| 10   | 0.087 | C <sub>4</sub>  | توافق جمعی               |
| 1    | 0.100 | C <sub>5</sub>  | کارایی و اثربخشی         |
| 3    | 0.095 | C <sub>6</sub>  | ظرفیت‌سازی               |
| 4    | 0.094 | C <sub>7</sub>  | سیاست‌گذاری اقتصادی      |
| 9    | 0.087 | C <sub>8</sub>  | حاکمیت قانون             |
| 2    | 0.096 | C <sub>9</sub>  | شفافیت                   |
| 11   | 0.083 | C <sub>10</sub> | کیفیت نظارت و کنترل      |
| 10   | 0.085 | C <sub>11</sub> | بینش راهبردی             |
|      | 1.000 |                 | جمع                      |



شکل ۴- نمودار راداری وزن نهایی شاخص‌های تأثیرگذار بر حکمروایی منابع آب کشاورزی

## بحث

مسئله کم‌آبی، در اصل یک پدیده طبیعی است که از تغییرات اقلیمی و کاهش بارش‌ها رخ می‌دهد؛ اما هنگامی که این مسئله در زمینه فرهنگی، اجتماعی، اقتصادی و سیاسی قرار می‌گیرد، پیچیدگی بیشتری پیدا می‌کند و از ماهیت طبیعی خود فاصله می‌گیرد. این پدیده به یک چالش اجتماعی تبدیل می‌شود که در جوامع محلی شکل گرفته و تداوم می‌یابد. در سال‌های اخیر، جوامع محلی به دلیل افزایش مصرف آب، به‌ویژه در بخش کشاورزی، با کمبود شدید منابع آب مواجه شده‌اند. این وضعیت باعث شده که دسترسی به منابع آب و مدیریت آن‌ها در مناطق روستایی به یک چالش بزرگ تبدیل شود. به همین دلیل، شناسایی مؤلفه‌های مؤثر در حکمروایی منابع آب، به‌ویژه در مدیریت منابع آب کشاورزی، از اهمیت بالایی برخوردار است. این مؤلفه‌ها می‌توانند به بهبود استراتژی‌های مدیریت آب و کاهش اثرات منفی کم‌آبی کمک کنند. با توجه به نتایج متفاوت پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه شناسایی معیارهای حکمروایی منابع آب، می‌توان به پژوهش‌های قائمی و همکاران (۱۳۹۶) اشاره کرد. در این تحقیق، نه شاخص شامل: مشارکت، دسترسی به اطلاعات، آموزش،

سیاست‌گذاری، ظرفیت‌سازی، اعمال نگرش سیستمی و حاکمیت قانون در یک فضای فازی رتبه‌بندی شدند. نتایج نشان داد که شاخص‌های مشارکت، آموزش و ظرفیت‌سازی به ترتیب بیشترین وزن را نسبت به سایر شاخص‌ها دارند؛ اما بدیهی است که این مطالعه، روابط و اثرگذاری و اثرپذیری متقابل شاخص‌ها را بررسی نکرده است. به همین دلیل، نتایج این تحقیق با یافته‌های این مقاله همسو نیست. همچنین دحیمای و همکاران (۱۳۹۷)، با استفاده از تکنیک بردار ویژه، ۱۶ شاخص از جمله شفافیت، مشارکت، پایداری، استانداردسازی، کیفیت نظارت و اثربخشی را رتبه‌بندی کردند. نتایج نشان داد که شفافیت، استانداردسازی و مشارکت به ترتیب از اهمیت بیشتری برخوردار هستند. در این تحقیق نیز روابط و اثرپذیری متقابل شاخص‌ها مورد بررسی قرار نگرفته است. نصیری زارع و طهماسبی (۱۴۰۱)، به تحلیل پیشران‌های حکمروایی منابع آب کشاورزی پرداخته و به بررسی اثرات متقابل شاخص‌های مشارکت، ترتیبات نهادی، تمرکززدایی، شفافیت، پاسخگویی و اثربخشی پرداخته‌اند. نتایج این تحقیق نشان داد که مشارکت و تمرکززدایی بیشترین ارتباط را با سایر معیارها دارند. این یافته با نتایج بخش مطالعه

روابط شاخص‌ها در این تحقیق همسو است، به‌ویژه به تأثیرگذاری بالای مشارکت می‌توان اشاره کرد. با این حال، این محققین به تحلیل اهمیت و وزن شاخص‌ها نپرداخته‌اند. در این راستا، کوکی و همکاران (۲۰۱۶)، ۱۵ مورد از شاخص‌های حکمروایی منابع آب را ارزیابی کردند. بر اساس نتایج، شاخص‌های سامانه‌های اداری، حاکمیت قانون و مشارکت به ترتیب مهم‌ترین معیارها شناسایی شدند. همچنین لی و همکاران (۲۰۲۲)، بر اساس اصول هفت‌گانه OECD، به بررسی شاخص‌های حاکمیت قانون، سیاست‌گذاری، تأمین مالی، اشتراک‌گذاری اطلاعات و ارتباطات، کارایی و اثربخشی، ظرفیت‌سازی و مسئولیت‌پذیری پرداخته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که مسئولیت‌پذیری، حاکمیت قانون و تأمین مالی بیشترین وزن را نسبت به سایر شاخص‌ها دارند. در این تحقیق نیز همانند مطالعات قبلی، به بررسی روابط و اثرات بین شاخص‌ها پرداخته نشده است. لذا نتایج پژوهش در اهمیت و وزن شاخص‌ها با یافته‌های این محققین مطابقت ندارد. به‌طورکلی با توجه به بحث و بررسی پژوهش‌های ذکرشده، مشخص گردید که شاخص‌هایی مانند مشارکت، حاکمیت قانون، سیاست‌گذاری، کارایی و اثربخشی، کیفیت نظارت و کنترل و شفافیت، به‌طور مکرر در تحقیقات مختلف به‌عنوان معیارهای مهم حکمروایی منابع آب شناسایی شده‌اند. این شاخص‌ها با معیارهای ارزیابی‌شده در تحقیق مورد مطالعه همپوشانی دارند. تفاوت اصلی این تحقیق با پژوهش‌های پیشین با پژوهش‌های پیشین در رویکرد مورد استفاده است. درحالی‌که بیشتر تحقیقات قبلی به بررسی جداگانه شاخص‌ها و وزن‌دهی آن‌ها بر اساس تکنیک‌های مختلف پرداخته‌اند، تحقیق مذکور با استفاده از سوپرماتریس به بررسی روابط و اثرات متقابل شاخص‌ها پرداخته و وزن نهایی آن‌ها را بر اساس این روابط محاسبه کرده است.

### نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر، اهمیت رویکرد حکمروایی منابع آب کشاورزی را برای رسیدگی به شکاف‌های مختلف آب در بخش کشاورزی شناسایی کرده است. حکمروایی

مطلوب بستری برای تعامل کارآمد میان مؤلفه‌های حکمروایی شامل بازیگران، مؤسسات و فرایندها فراهم می‌آورد تا هدف تأمین خدمات آب محقق شود. نهاد غیررسمی که در آن کشاورزان و جوامع روستایی در مرکز سیاست‌گذاری و مدیریت منابع آب قرار دارند، می‌تواند انسجام لازم برای چنین حکمروایی مؤثری را در طراحی و اجرای سیاست‌های صرفه‌جویی و حفظ آب فراهم کند. پژوهش حاضر با هدف شناسایی ابعاد و مؤلفه‌های مناسب و تأثیرگذار برای حکمروایی منابع آب کشاورزی انجام شده است. در این تحقیق، ابتدا با بهره‌گیری از ادبیات پژوهشی و استفاده از نظر خبرگان، مهم‌ترین شاخص‌های حکمروایی منابع آب شناسایی و در مرحله بعد با استفاده از تکنیک تلفیقی تصمیم‌گیری چندمعیاره (DANP)، تأثیرگذاری و تأثیرپذیری و اهمیت وزن شاخص‌ها بررسی شده است. در این راستا در تعیین جهت تأثیرگذاری یا تأثیرپذیری معیارها مشخص شد که شاخص مشارکت با درجه اهمیت ۱/۲۳، بیشترین تأثیرگذاری و شاخص ظرفیت‌سازی با ۱/۷۵- بیشترین تأثیرپذیری را در بین شاخص‌ها دارند. عدالت محوری با درجه اهمیت ۰/۰۱ کمترین تأثیرگذاری و شفافیت با ۰/۰۶- کمترین تأثیرپذیری را نسبت به سایر شاخص‌ها، به خود اختصاص دادند. همچنین بر اساس نتایج به دست آمده شاخص کارایی و اثربخشی با وزن نهایی ۰/۱۰۰ دارای بیشترین وزن است که از اهمیت بالایی در حکمروایی منابع آب برخوردار است و می‌بایست در برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری به آن توجه شود. همچنین معیار کیفیت نظارت و کنترل با وزن ۰/۰۸۳ دارای کمترین وزن در بین سایر شاخص‌ها است. به‌عنوان نتیجه نهایی از این پژوهش می‌توان گفت که از دیدگاه خبرگان تفاوت چندانی بین معیارهای مورد بررسی وجود نداشته و تفاوت امتیاز زیادی با یکدیگر ندارند و همه عوامل شناسایی‌شده از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند که توجه به این عوامل در ارزیابی حکمروایی مطلوب منابع آب کشاورزی در مناطق روستایی زمینه موفقیت و نتایج مطلوب را هم برای کشاورزان و هم برای جامعه روستایی به ارمغان خواهد

آورد. همچنین این الگو می‌تواند به مدیران و متخصصان حوزه منابع آب کشاورزی کمک کند که تا با غلبه بر ضعف الگوهای موجود به رفع نواقص و ضعف‌های حوزه حکمروایی مطلوب منابع آب کشاورزی در مناطق روستایی به‌صورت جامع و سیستمی بپردازند و در جهت شناسایی و تقویت عوامل مؤثر در حکمروایی مطلوب منابع آب کشاورزی مفید خواهد بود. لذا مواردی پیشنهاد می‌شود که پژوهش حاضر را از جنبه‌های بسیاری ادامه داد. با توجه به تکنیک‌های متعدد، با به‌کارگیری تکنیک‌های نوین تصمیم‌گیری چند معیاره در کنار مجموعه‌ای از شاخص‌های ارائه‌شده در این پژوهش می‌تواند جهت تحلیل حکمروایی منابع آب کشاورزی سایر نواحی روستایی مورد استفاده پژوهشگران قرار گیرد و نتایج چنین پژوهش‌هایی در استفاده بهینه و مدیریت مصرف منابع آب مناطق روستایی یاری نماید. همچنین با توجه به گستردگی و تنوع شاخص‌های حکمروایی منابع آب، می‌توان به‌طور مستقل و با عمق وسعت بیشتری توسط سایر محققین مورد ارزیابی قرار گیرند تا بتوان با اطلاعات دقیق‌تری جهت سیاست‌گذاری و اجرای طرح‌های راهبردی در بخش توسعه رویکرد حکمروایی منابع آب کشاورزی در مناطق روستایی اقدام کرد.

پژوهش حاضر با هدف شناسایی ابعاد و مؤلفه‌های مؤثر در حکمروایی منابع آب کشاورزی انجام شده است، زیرا این رویکرد برای رسیدگی به شکاف‌های مختلف آب در بخش کشاورزی حیاتی است. حکمروایی مطلوب، بستری برای تعامل کارآمد بین بازیگران، نهادها و فرآیندها فراهم می‌آورد تا هدف تأمین خدمات آب محقق شود. نهادهای غیررسمی که کشاورزان و جوامع روستایی را در مرکز سیاست‌گذاری و مدیریت منابع آب قرار می‌دهند، می‌توانند انسجام لازم را برای طراحی و اجرای سیاست‌های صرفه‌جویی و حفظ آب به وجود آورند. در این راستا، ابتدا با بهره‌گیری از ادبیات پژوهشی و نظرات خبرگان، مهم‌ترین شاخص‌های حکمروایی منابع آب شناسایی شده و سپس با استفاده از تکنیک تلفیقی

تصمیم‌گیری چند معیاره (DANP)، میزان تأثیرگذاری و تأثیرپذیری و همچنین اهمیت وزن شاخص‌ها بررسی شده است. در راستای تعیین جهت تأثیرگذاری و تأثیرپذیری معیارها، مشخص شد که شاخص مشارکت با درجه اهمیت  $1/23$  بیشترین تأثیرگذاری و شاخص ظرفیت‌سازی با درجه اهمیت  $1/75$  - بیشترین تأثیرپذیری را در میان سایر شاخص‌ها دارا هستند. همچنین، شاخص عدالت‌محوری با درجه اهمیت  $0/01$  کمترین تأثیرگذاری و شاخص شفافیت با درجه اهمیت  $0/06$  - کمترین تأثیرپذیری را نسبت به سایر شاخص‌ها به خود اختصاص دادند. همچنین بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، شاخص کارایی و اثربخشی با وزن نهایی  $0/100$  بیشترین وزن را به خود اختصاص داده است که نشان‌دهنده اهمیت بالای آن در حکمروایی منابع آب است و لازم است در برنامه‌ریزی‌ها و سیاست‌گذاری‌ها به آن توجه شود. درحالی‌که معیار کیفیت نظارت و کنترل با وزن  $0/083$  کمترین وزن را در میان سایر شاخص‌ها دارد. در نهایت، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که از دیدگاه خبرگان، تفاوت‌چندانی بین معیارهای مورد بررسی وجود ندارد و امتیازات آن‌ها تفاوت فاحشی با یکدیگر ندارند. به‌عبارت‌دیگر، تمامی عوامل شناسایی‌شده از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند و توجه به این عوامل در ارزیابی حکمروایی مطلوب منابع آب کشاورزی در مناطق روستایی می‌تواند زمینه موفقیت و دستیابی به نتایج مطلوب را هم برای کشاورزان و هم برای جامعه روستایی فراهم آورد. این الگو می‌تواند به مدیران و متخصصان حوزه منابع آب کشاورزی کمک کند تا با غلبه بر ضعف الگوهای موجود، به رفع نواقص و کاستی‌های حوزه حکمروایی مطلوب منابع آب کشاورزی در مناطق روستایی به‌صورت جامع و سیستمی بپردازند و در جهت شناسایی و تقویت عوامل مؤثر در حکمروایی مطلوب منابع آب کشاورزی گام بردارند. از این‌رو، پیشنهاد می‌شود که در تحقیقات آتی، از تکنیک‌های نوین تصمیم‌گیری چندمعیاره در کنار مجموعه‌ای از شاخص‌های ارائه‌شده در این پژوهش، برای تحلیل حکمروایی منابع آب کشاورزی در سایر نواحی

### تشکر و قدردانی

بر خود فرض می‌دانیم از زحمات تمامی اساتید بزرگوار که در تکمیل اطلاعات مورد نیاز این مطالعه همکاری نمودند نهایت تشکر خود را اعلام نماییم. همچنین دست‌اندرکاران فصلنامه وزین پژوهش آب در کشاورزی زحمات بررسی مقاله و امور مربوطه را بر عهده داشتند که جای بسی تقدیر و تشکر دارد.

### تعارض منافع

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

روستایی مورد استفاده قرار گیرد. همچنین، با توجه به گستردگی و تنوع شاخص‌های حکمروایی منابع آب، این شاخص‌ها می‌توانند به‌طور مستقل و با عمق و وسعت بیشتری توسط سایر محققان مورد ارزیابی قرار گیرند تا با اطلاعات دقیق‌تری جهت سیاست‌گذاری و اجرای طرح‌های راهبردی در بخش توسعه رویکرد حکمروایی منابع آب کشاورزی در مناطق روستایی اقدام شود و در استفاده بهینه و مدیریت مصرف منابع آب مناطق روستایی یاری‌رسان باشد.

### فهرست منابع

۱. آقایاری هیر، محسن، ظاهری، محمد، کریم‌زاده، حسین و مجنونی توتاخانه، علی. ۱۴۰۰. تحلیل عوامل مؤثر بر ارتقای بهره‌وری منابع آب در اقتصاد نواحی روستایی: حوضه آبریز قلعه چای. *فصلنامه اقتصاد فضا و توسعه روستایی*، ۳۶(۲): ۱-۲۲. <https://serd.khu.ac.ir/article-1-3694-fa.pdf>
۲. آقایاری هیر، محسن، تقی‌زاده فانی، ابوالقاسم، رضائی بنفشه درق، مجید و دیزجی، حمیده. ۱۴۰۳-الف. شناسایی الگوهای مدیریت پایدار منابع آب کشاورزی در سکونت‌گاه‌های روستایی شهرستان مراغه. *جغرافیا و روابط انسانی*، ۷(۲): ۱۱۹-۱۳۶. doi: 10.22034.gahr.2024.476940.2260
۳. آقایاری هیر، محسن، کریم‌زاده، حسین و رحیم‌زاده، ناهید. ۱۴۰۳-ب. تحلیل قابلیت دسترسی به خدمات در نقاط روستایی و مدل‌سازی ساختاری عوامل مؤثر بر آن، مطالعه موردی: بخش مرکزی شهرستان تبریز. *تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*، ۲۴: ۲۵۶-۲۳۴. 10.61186/jgs.24.73.234
۴. ابراهیمی‌آذر خواران، فریبا، قربانی، مهدی، ملکیان، آرش، سلاجقه، علی، علم‌پیگی، امیر و فهمی، هدایت. ۱۳۹۸. تحلیل موقعیت ذی‌نفعان در ساختار حکمرانی شبکه‌ای آب در حوزه آبخیز طالقان. *مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران*، ۱۳ (۴۶)، ۶۲-۷۳. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20089554.1398.13.46.9.5>
۵. بدیسار، سیدناصرالدین، احمدی، سیدمحمدصادق، و مدبرنژاد، عاطفه‌سادات. ۱۳۹۷. ارزیابی شاخص‌های حکمرانی خوب در بخش آب. *علوم و تکنولوژی محیط زیست*، ۲۲(۲)، ۲۷۵-۲۸۶. 10.22034/jest.2020.30675.3908
۶. بنی‌حبیب، محمد ابراهیم، غفوری خرائق، سمانه. ۱۳۹۸. ارزیابی ویژگی‌های حکمرانی سنتی آبخوان با استفاده از اصول حکمرانی مؤثر آب زیرزمینی، دو فصلنامه دانش‌های بومی ایران، ۶(۱۲)، ۳۰۷-۳۳۱. <https://doi.org/10.22054/qjik.2017.15160.1037>
۷. پایسته، مرضیه، کلاهی، مهدی، عمرانیان خراسانی، حمید. ۱۳۹۹. معیارها و شاخص‌ها: الزامی برای شناخت، بکارگیری و ارزیابی حکمرانی خوب در منابع طبیعی. *فصلنامه آب و توسعه پایدار*، ۷(۱)، ۱۳-۲۲. <https://doi.org/10.22067/jwsd.v7i1.81456>

۸. تارمحمدی قورچی، زهرا، عبداللهزاده، غلامحسین، شریفزاده، محمد شریف و قزل، عبدالوهاب. ۱۳۹۹. بررسی امکانپذیری حکمروایی خوب در فرآیند مدیریت مشارکتی آب در شهرستان آق‌قلا. نشریه پژوهش آب در کشاورزی، ۳۴(۲): ۲۸۷-۳۰۰. doi: 10.22092.jwra.2020.122264.
۹. رکن‌الدین افتخاری، عبدالرضا، عظیمی آملی، جلال، پورطاهری، مهدی، احمدی‌پور، زهرا. (۱۳۹۰). تبیین رابطه رهیافت حکمروایی خوب و توسعه پایدار روستایی در مناطق روستایی استان مازندران. نشریه پژوهش‌های روستایی، ۲(۴)، ۱-۳۴. [https://jrur.ut.ac.ir/article\\_24246.html](https://jrur.ut.ac.ir/article_24246.html)
۱۰. رحمانی فضلی، عبدالرضا؛ صادقی، مظفر، علیپوریان، جهانبخش. (۱۳۹۳)، بنیان‌های نظری حکمروایی خوب در فرایند مدیریت روستایی نوین. نشریه مدیریت شهری، ۱۴(۳۸)، ۴۳-۵۳. <https://ijurm.imo.org.ir/article-1-426-fa.pdf>
۱۱. رحیمی، مجید، ملکیان، آرش، علم‌بیگی، امیر. ۱۴۰۰. تعیین شیوه و رژیم حکمرانی آب در مواجهه با تغییرات محیطی از دیدگاه نهاد و ذینفعان محلی (مطالعه موردی: حوزه آبخیز دریاچه طشک-بختگان). نشریه علمی - پژوهشی مرتع و آبخیزداری، ۷۴(۱)، ۸۱-۱۰۲. <https://doi.org/10.22059/jrwm.2019.280359.1379>
۱۲. دحیماوی، عادل، آخوندعلی، علی محمد، شیروانیان، عبدالرسول، برومندنسب، سعید. ۱۳۹۷. استخراج و وزن-دهی شاخص‌های معرف اصول حکمرانی آب کشاورزی در شبکه‌های آبیاری و زهکشی خوزستان. تحقیقات منابع آب ایران، ۱۴(۴)، ۲۳۵-۲۴۵. [https://www.iwrr.ir/article\\_63712.html](https://www.iwrr.ir/article_63712.html)
۱۳. سازمان آب منطقه‌ای آذربایجان غربی. ۱۳۹۸. آمارنامه آب. سازمان آب منطقه‌ای استان آذربایجان غربی، ایران.
۱۴. سردارشرکی، علی و صفدری، مهدی. ۱۴۰۳. تدوین رهیافت نوین حکمرانی آب در توسعه نظام‌های بهره‌برداری آب در چابهار. مهندسی آبیاری و آب ایران، ۱۴(۴): ۲۴۸-۲۲۲. 10.22125/TWE.2023.382445.1702
۱۵. سجاسی، حمدالله، اسفرم، یعقوب، رهبری، مهناز. ۱۳۹۶. تحلیل نقش مدیریت محلی در کاهش آسیب پذیری کالبدی با رویکرد حکمروایی خوب (مطالعه موردی: دهستان بهمنی سرحدی غربی). راهبردهای توسعه روستایی، ۴(۳)، ۴۲۶-۴۰۵. <https://doi.org/10.22048/rdsj.2018.70269.1616>
۱۶. صرامی فروشانی، ترانه، بلالی، حمید، موحدی، رضا. ۱۴۰۰. ارزیابی شاخص‌های حکمرانی منابع آب زیرزمینی در بخش کشاورزی ایران: کاربرد چارچوب حکمرانی سازمان همکاری و توسعه اقتصادی در دشت همدان - بهار. نشریه تحقیقات اقتصاد و توسعه کشاورزی ایران، ۵۲(۳)، ۵۹۱-۶۱۵. <https://doi.org/10.22059/ijaedr.2021.313265.668972>
۱۷. عامری گلستان، متین، واعظی، رضا، الوانی، سیدمهدی و باقری، علی. ۱۴۰۲. حکمرانی همکارانه، راهکاری برای حل مسئله آب در ایران: شناسایی مؤلفه‌ها و تدوین چارچوب. مطالعات راهبردی سیاست‌گذاری عمومی، ۱۳(۴۸): ۲-۳۱. <https://doi.org/10.22034/sspp.2023.2010585.3479>
۱۸. علیلو، جمیله، چیدری، محمد و چوبچیان، شهلا. ۱۳۹۷. بررسی سازه‌های مؤثر بر مشارکت کشاورزان در مدیریت آبیاری (مورد مطالعه شهرستان خوی). راهبردهای توسعه روستایی، ۵(۳): ۲۸۹-۳۰۹. <https://doi.org/10.22048/rdsj.2019.119243.1712>
۱۹. فال سلیمان، محمود، خسروی، نرگس، شاطری، مفید و حجتی‌پور، محمد. ۱۴۰۱. روایی محتوایی مفهوم مشارکت در مدیریت روستایی. مهندسی جغرافیایی سرزمین، ۶(۱): ۸۵-۹۵. [https://www.jget.ir/article\\_151679.html](https://www.jget.ir/article_151679.html)

۲۰. فیض الهی، زینب، شهبازبگیان، محمدرضا، هاشمی، سید عبدالکریم و شایان، سیاوش. ۱۳۹۸. تحلیل آمایشی سازمان فضایی حاکم بر منابع آب دشت میناب با رویکرد پویایی سیستم‌ها. *فصلنامه علوم محیطی*، ۱۷(۴): ۲۳۱-۲۴۸. <https://doi.org/10.29252/envs.17.4.231>
۲۱. قائمی، آلاله، لاریجانی، مریم، شبیری، محمد و سرمدی، محمدرضا. ۱۳۹۵. تدوین الگوی آموزش محیط‌زیست جهت تقویت حکمرانی پایدار منابع آب کشور با تأکید بر مشارکت‌های مردمی. *نشریه مطالعات توسعه اجتماعی - فرهنگی*، ۵(۲): ۱۳۳-۱۵۷. <https://journals.sabz.ac.ir/scds/article-1-264-fa.html>
۲۲. قائمی، آلاله، لاریجانی، مریم، شبیری، سید محمد و سرمدی، محمدرضا. ۱۳۹۶. ارائه مدل مفهومی حکمرانی پایدار در مدیریت بهم پیوسته منابع آب کشور با تأکید بر آموزش و ظرفیت‌سازی. *مجله آب و فاضلاب*، ۲۸(۴): ۱۱۷-۱۱۲. <https://doi.org/10.22093/wwj.2016.16312>
۲۳. قاسمی، محمود، عبداللہی، عظیمه السادات. ۱۴۰۳. واکاوی همزیستی جمعی و حکمرانی اجتماعی آب (مطالعه شهروندان سمیرمی). *پژوهش‌های راهبردی مسائل اجتماعی*، ۱۳(۱)، ۱۰۱-۱۳۰. <https://doi.org/10.22108/srsp.2024.139147.1939>
۲۴. کریمی‌نژاد، مزده، گلشنی، علیرضا، بوستانی، فردین. ۱۳۹۷. آسیب‌شناسی سیاست‌گذاری بحران آب در ایران با رویکرد آینده‌نگری. *فصلنامه راهبرد*، ۲۷(۸۹): ۹۵-۱۲۴. [https://rahbord.csr.ir/article\\_117605.html](https://rahbord.csr.ir/article_117605.html)
۲۵. کریمی‌طرقبه، حسین، کردوانی، پرویز و مهدوی، مسعود. ۱۳۹۷. حکمروایی خوب روستایی راهکاری جهت مدیریت منابع آب کشاورزی مورد مطالعه: روستاهای شهرستان قوچان. *فصلنامه جغرافیا (برنامه‌ریزی منطقه‌ای)*، ۹(۱): ۷-۱۵. [https://www.jgeoqeshm.ir/article\\_83604.html](https://www.jgeoqeshm.ir/article_83604.html)
۲۶. نصیری زارع، سعید، طهماسبی، اصغر. ۱۴۰۱. تحلیلی بر پیشران‌های کلیدی حکمروایی منابع آب کشاورزی (مورد مطالعه: شهرستان طارم). *آب و توسعه پایدار*، ۹(۱): ۳۹-۵۲. <https://doi.org/10.22067/jwsd.v9i1.2111.1102>
۲۷. نوروزی، اصغر، ابراهیمی، الهه. (۱۳۹۷). تحقق‌پذیری شاخص‌های حکمروایی خوب در نواحی روستایی شهرستان لنجان، *نشریه برنامه‌ریزی توسعه کالبدی* ۲(۵): ۹۳-۱۰۹. [https://psp.journals.pnu.ac.ir/article\\_5027.html](https://psp.journals.pnu.ac.ir/article_5027.html)
۲۸. یوسفیان، الهه، فقیهی، ابوالحسن و دانشفرد، کرم‌الله. ۱۴۰۰. طراحی الگوی خط‌مشی منسجم حکمرانی آب در ایران. *فصلنامه انجمن علوم مدیریت ایران*، ۱۶(۶۴): ۱-۳۲. [https://journal.iams.ir/article\\_363.html](https://journal.iams.ir/article_363.html)
29. AQUASTAT. 2010. Global Water Withdrawal. Sito web dell'AQUASTAT. Roma, Organizzazione delle Nazioni Unite per l'alimentazione e l'agricoltura. <https://data.apps.fao.org/aquastat>
30. Akhmouch, A. and Clavreul, D., 2016. Towards inclusive water governance: OECD evidence and key principles of stakeholder engagement in the water sector. In *Freshwater Governance for the 21st Century* (pp. 29-49). Cham: Springer International Publishing. <https://library.oapen.org/bitstream/handle/20.500.12657/28098/1/1001896.pdf>
31. Ahmed, M. and Araral, E., 2019. Water governance in India: Evidence on water law, policy, and administration from eight Indian states. *Water*, 11(10), p.2071. <https://doi.org/10.3390/w11102071>
32. Barhagh, S. E., Zarghami, M., Ghale, Y. A. G., and Shahbazbegian, M. R. 2021. System dynamics to assess the effectiveness of restoration scenarios for the Urmia Lake: A prey-predator approach for the human-environment uncertain interactions. *Journal of Hydrology*, 593, 125891. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125891>
33. Barati, A. A., Azadi, H. and Scheffran, J. 2019. A system dynamics model of smart groundwater governance. *Agricultural Water Management*, 221, 502-518.

34. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.03.047>  
Bayu, T., Kim, H. and Oki, T., 2020. Water governance contribution to water and sanitation access equality in developing countries. *Water Resources Research*, 56(4).
35. <https://doi.org/10.1029/2019WR025330>  
Chiu, W. Y., Tzeng, G. H. and Li, H. L. 2013. A new hybrid MCDM model combining DANP with VIKOR to improve e-store business. *Knowledge-Based Systems*, 37 48-61.
36. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2012.06.017>  
Cookey, P. E., Darnsawadi, R., and Ratanachai, C. 2016. Performance evaluation of Lake Basin water governance using composite index. *Ecological Indicators*, 61, 466-482.
37. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.09.048>  
Di Vaio, A., Trujillo, L., D'Amore, G. and Palladino, R. 2021. Water governance models for meeting sustainable development Goals: A structured literature review. *Utilities Policy*, pp. 10-25. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2021.101255>
38. Gain, A.K. and Schwab, M., 2012. An assessment of water governance trends: The case of Bangladesh. *Water Policy*, 14(5), pp.821-840. <https://doi.org/10.2166/wp.2012.143>
39. Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., and Van Oel, P. R. 2019. Progress in water footprint assessment: Towards collective action in water governance. *Water*, 11(5), 1070. <https://doi.org/10.3390/w11051070>
40. Jiménez, A., and Pérez-Foguet, A. 2013. Challenges for water governance in rural water supply: lessons learned from Tanzania. In *Improving Water Policy and Governance*, pp. 107-120. Routledge. <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.4324/9781315874722-7/challenges-water-governance-rural-water-supply-lessons-learned-tanzania-jim%C3%A9nez-p%C3%A9rez-foguet>
41. Jacobson, M., Meyer, F., Oia, I., Reddy, P. and Tropp, H. 2013. User's guide on assessing water governance. *United Nations Development Programme: Stockholm, Sweden*. <https://www.undp.org/publications/users-guide-assessing-water-governance>
42. Katusiime, J. and Schütt, B. 2020. Integrated water resources management approaches to improve water resources governance. *Water*, 12, 24-34. <https://doi.org/10.3390/w12123424>
43. Keremane, G. 2017. *Governance of Urban Wastewater Reuse for Agriculture: A Framework for Understanding and Action in Metropolitan Regions*. Springer. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-55056-5>
44. Kuzdas, C., Warner, B. P., Wiek, A., Vignola, R., Yglesias, M., and Childers, D. L. 2016. Sustainability assessment of water governance alternatives: The case of Guanacaste Costa Rica. *Sustainability Science*, 11, 231-247. <https://doi.org/10.1007/s11625-015-0324-6>
45. Knieper, C. and Pahl-Wostl, C., 2016. A comparative analysis of water governance, water management, and environmental performance in river basins. *Water Resources Management*, 30(7), pp.2161-2177. <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1276-z>
46. Langbein, L. and Knack, S., 2008. The worldwide governance indicators and tautology. World Bank Policy Research working paper. <http://documents.worldbank.org/curated/en/771241468340867039>
47. Lee, S. G., Adelodun, B., Ahmad, M. J., and Choi, K. S. 2022. Multi-level prioritization analysis of water governance components to improve agricultural water-saving policy: A case study from Korea. *Sustainability*, 14(6), 3248. <https://doi.org/10.3390/su14063248>
48. Liu, X., Souter, N.J., Wang, R.Y. and Vollmer, D., 2019. Aligning the freshwater health index indicator system against the transboundary water governance framework of Southeast Asia's Sesan, Srepok, and Sekong River Basin. *Water*, 11(11), p.2307. <https://doi.org/10.3390/w11112307>
49. Martín Velasco, M. J., Calderon, G., Lima, M. L., Matencón, C. L., and Massone, H. E. 2023. Water governance challenges at a local level: Implementation of the OECD water governance indicator framework in the General Pueyrredon Municipality, Buenos Aires province, Argentina. *Water Policy*, 25(7), 623-638. <https://doi.org/10.2166/wp.2023.194>
50. Nguyen, M. N., Nguyen, P. T., Van, T. P., Phan, V. H., Nguyen, B. T., Pham, V. T. and Nguyen, T. H. 2021. An understanding of water governance systems in responding to

- extreme droughts in the Vietnamese Mekong Delta. *International Journal of Water Resources Development*, 37(2), 256-277.  
**<https://doi.org/10.1080/07900627.2020.1753500>**
51. Özerol, G., Vinke-de Kruijf, J., Brisbois, M.C., Flores, C.C., Deekshit, P., Girard, C., Knieper, C., Mirnezami, S.J., Ortega-Reig, M., Ranjan, P. and Schröder, N.J., 2018. Comparative studies of water governance. *Ecology and Society*, 23(4).  
**<https://www.jstor.org/stable/26796888>**
52. Pahl-Wostl, C. 2019. The role of governance modes and meta-governance in the transformation towards sustainable water governance. *Environmental Science & Policy*, 91, 6-16. **<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.10.008>**
53. Pahl-Wostl, C., Knieper, C., Lukat, E., Meergans, F., Schoderer, M., Schütze, N., Schweigatz, D., Dombrowsky, I., Lenschow, A., Stein, U. and Thiel, A., 2020. Enhancing the capacity of water governance to deal with complex management challenges: A framework of analysis. *Environmental Science & Policy*, 107, pp.23-35.  
**<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.02.011>**
54. Salamanca-Cano, A.K. and Durán-Díaz, P., 2023. Stakeholder engagement around water governance: 30 Years of decision-making in the Bogotá River Basin. *Urban Science*, 7(3), p.81. **<https://doi.org/10.3390/urbansci7030081>**
55. Suyeno, S., Sumartono, S., Haryono, B. S. and Amin, F. 2024. Water governance puzzle in Riau Province: Uncovering key actors and interactions. *Water Policy*, 26(1), 60-78. **<https://doi.org/10.2166/wp.2024.137>**
56. Schulz, C., 2019. Governance-related values as dimensions of good water governance. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 6(1), p.e1322.  
**<https://doi.org/10.1002/wat2.1322>**
57. Shunglu, R., Köpke, S., Kanoi, L., Nissanka, T.S., Withanachchi, C.R., Gamage, D.U., Dissanayake, H.R., Kibaroglu, A., Ünver, O. and Withanachchi, S.S., 2022. Barriers in participative water Governance: A critical analysis of community development approaches. *Water*, 14(5), p.762. **<https://doi.org/10.3390/w14050762>**
58. Tatar, M., Papzan, A. and Ahmadvand, M. 2019. Explaining the good governance of agricultural surface water resources in the Gawshan Watershed Basin. Kermanshah. Iran. *Journal of Agricultural Science and Technology* 21(6), 1379-1393.  
**[https://jast.modares.ac.ir/article\\_16347.html](https://jast.modares.ac.ir/article_16347.html)**
59. UNESCO. 2021. *The United Nations World Water Development Report 2021: Valuing Water*. United Nations.  
**<https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=dLRFEAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR9&dq=The+United+Nations+World+Water+Development+Report+2021:+Valuing+Water>**
60. Woodhouse, P. and Muller, M. 2017. Water governance-An historical perspective on current debates. *World Development*, 92, 225-241.  
**<https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2016.11.014>**
61. Yu, H. H., Edmunds, M., Lora-Wainwright, A. and Thomas, D. 2016. Governance of the irrigation commons under integrated water resources management—A comparative study in contemporary rural China. *Environmental Science & Policy*, 55, 65-74.  
**<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.08.001>**
62. Yang, Y. P. O., Shieh, H. M., Leu, J. D. and Tzeng, G. H. 2008. A novel hybrid MCDM model combined with DEMATEL and ANP with applications. *International Journal of Operations Research*, 5(3), 160-168. **[http://www.orstw.org.tw/ijor/vol5no3/paper-3-IJOR-vol5\\_3\\_-Yu-Ping\\_Ou\\_Yang.pdf](http://www.orstw.org.tw/ijor/vol5no3/paper-3-IJOR-vol5_3_-Yu-Ping_Ou_Yang.pdf)**
63. Zhou, X., Wang, F., Huang, K., Zhang, H., Yu, J. and Han, A. Y. 2021. System dynamics-multiple objective optimization model for water resource management: A case study in Jiaxing City. China. *Water*, 13(5), 671. **<https://doi.org/10.3390/w13050671>**
64. Ziem Bonye, S., Yenglier Yiridomoh, G. and Der Bebelleh, F. 2022. Common-pool community resource use: Governance and management of community irrigation schemes in rural Ghana. *Community Development*, 53(1), 39-56.  
**<https://doi.org/10.1080/15575330.2021.1937668>**

# Analysis of Causal Relationships and Determination of the Importance of Criteria for Optimal Governance of Agricultural Water Resources Using DANP

**Z. Feyzollahi, M. Aghayari Hir \* , A. Taghizadfanid, and M. R. Shahbazbegian**

PhD Candidate Geography and Rural Planning, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

[z.feyzollahi95@gmail.com](mailto:z.feyzollahi95@gmail.com)

Associate Prof., Department of Geography and Rural Planning, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

[aghayari@tabrizu.ac.ir](mailto:aghayari@tabrizu.ac.ir)

Associate Prof., Department of Geography and Rural Planning, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

[fanid@tabrizu.ac.ir](mailto:fanid@tabrizu.ac.ir)

Associate Prof., Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

[mr.shahbazbegian@modares.ac.ir](mailto:mr.shahbazbegian@modares.ac.ir)

Received: April 2025 and Accepted: September 2025

## Abstract

Governance has been proposed as one of the key ways to manage the global water crisis in the past two decades. Therefore, the present study aimed to analyze the factors affecting the governance of agricultural water resources and also examine their importance. For this purpose, the present research is descriptive-analytical in nature and applied in terms of the purpose. The statistical population includes 30 experts and specialists from the Department of Geography and Rural Planning of various universities across the Iran. The final criteria were identified using the relevant research literature, then, their validity was confirmed based on the experts' opinions. In order to determine the effectiveness and efficiency, as well as the importance and weight of the criteria, the combined Dematel and Analytical Network Process (DANP) technique was used. The analysis revealed that participation index exerted the greatest influence on other criteria, while the capacity-building index was the most influenced by them. Results of the criteria effect analysis indicated that participation index had the highest level of influence, and capacity-building index was the most influenced by other criteria. Also, efficiency and effectiveness index had the highest weight, which indicates its high importance in water resources governance, while the quality of monitoring and control index had the lowest weight among other indicators.

**Keywords:** Global water crisis, Agricultural Water Management Indicators, Structural Analysis, Multi-criteria Decision Making, Efficiency index

---

\* - Corresponding Author's email: [aghayari@tabrizu.ac.ir](mailto:aghayari@tabrizu.ac.ir)  
<https://doi.org/10.22092/jwra.2025.369018.1073>

## Economic Assessment of Organic Growth Stimulators on Yield, Oil Percentage, and Water Use Efficiency of Canola under Different Irrigation Levels

M. Passandideh and R. Mohammadikia\* 

Assistant Prof., Department of Soil Chemistry, Fertility and Plant Nutrition, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.

[mpassandideh@yahoo.com](mailto:mpassandideh@yahoo.com)

Researcher, On-Farm Water Management Department, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.

[rmswri@gmail.com](mailto:rmswri@gmail.com)

Received: July 2025 and Accepted: September 2025

### Abstract

This study aimed to evaluate the effects of humic acid, amino acid, fulvic acid, and seaweed extract on seed yield, oil content, and water use efficiency (WUE) of canola. Two irrigation treatments were considered: irrigation after 70–80 mm of cumulative evaporation (normal) and irrigation after 130–140 mm (drought stress). The experiment was conducted using a split-plot design, with three replications, in two years in Moghan area. Results showed that all bio-stimulant treatments outperformed the control in improving key agronomic traits, although their effectiveness varied depending on irrigation conditions. Under normal irrigation, humic acid led to the highest seed yield (3802 kg/ha), oil content (43.8 %), and WUE ( $1.17 \text{ kg m}^{-3}$ ). Under drought stress, the amino acid treatment achieved the highest WUE ( $1.75 \text{ kg m}^{-3}$ ) and a high seed yield (3682 kg/ha). Partial budgeting analysis showed that, under normal irrigation, humic acid was the most economically profitable treatment, while amino acid performed best under drought conditions. Multi-criteria decision analysis using the TOPSIS method revealed that the optimal treatment depended on the target criteria (yield, quality, or efficiency) and environmental conditions. Based on the farmer's agricultural priorities, under normal conditions humic acid ranked first, while under drought conditions amino acids, and sometimes seaweed extract, had the highest priority. The results suggest that using organic growth stimulants, especially under limited water availability, can improve canola (rapeseed) yield, oil quality, and WUE, offering a sustainable and economically viable management strategy for semi-arid regions of Iran.

**Keywords:** Amino acid, Drought stress, Humic acid, Seaweed extract, Sustainable agriculture, TOPSIS method

---

\* - Corresponding Author's email: [rmswri@gmail.com](mailto:rmswri@gmail.com)  
<https://doi.org/10.22092/jwra.2025.370029.1087>

## Analysis of Factors Influencing Groundwater Withdrawal Rates in the Agricultural Wells: A Case Study in Golestan Province

A. Keramatzadeh\* , S. M. Hosseini, F. Eshraghi, and M. Enayat

Associate Prof., of Agricultural Economics, Faculty of Agricultural Management, Gorgan University of Agricultural Science and Natural Resources. [alikeramatzadeh@gau.ac.ir](mailto:alikeramatzadeh@gau.ac.ir)

MSc student of Agricultural Economics, Gorgan University of Agricultural Science and Natural Resources. [hsmh24ll@gmail.com](mailto:hsmh24ll@gmail.com)

Associate Prof., of Agricultural Economics, Faculty of Agricultural Management, Gorgan University of Agricultural Science and Natural Resources. [eshraghi@gau.ac.ir](mailto:eshraghi@gau.ac.ir)

Ph.D. Graduate, Department of Engineering Geology, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. [enayat@gmail.com](mailto:enayat@gmail.com)

Received: April 2025 and Accepted: July 2025

### Abstract

This study investigates the factors influencing groundwater extraction by farmers and users in Golestan Province. Data were collected from 131 agricultural deep wells during the 2022–2023 crop year using stratified random sampling and structured questionnaires. Various functional forms of groundwater extraction were analyzed, with the Cobb-Douglas function identified as the best-fitting model. The findings indicate that a 1% decrease in the discharge rate of agricultural wells leads to a 0.97% reduction in water extraction. Similarly, a 1% reduction in land area per well results in a 0.03% decrease in water use. Reducing daily operation time by 1% lowers water extraction by 0.95%, while a 1% decrease in the number of annual operation days reduces extraction by 0.96%. Interestingly, due to the low cost of electricity, the relationship between electricity expenses and groundwater extraction is positive. Therefore, unless electricity costs become a more substantial share of total production expenses, increasing electricity prices alone are unlikely to curb over-extraction. The study concludes that policymakers should employ a combination of economic and technical measures to effectively implement the groundwater balancing plan in Golestan Province's aquifers.

**Keywords:** Aquifer, Water Resource Management, Regression Model, Agricultural Electricity Cost

---

\* - Corresponding Author's email: [alikeramatzadeh@gau.ac.ir](mailto:alikeramatzadeh@gau.ac.ir)  
<https://doi.org/10.22092/jwra.2025.369146.1075>

## Water Footprint and Irrigation Dietary Efficiency in Potato Production under Critical Water Resource Conditions: A Case Study in Ghorveh-Dehgolan Plain

Sh. Abdi, M. A. Asaadi, S. H. Mosavi\* , and H. Najafi Alamdarlo

MSc. Graduate in Agricultural Economics, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

shayeste.abdi@modares.ac.ir

PhD in Agricultural economics, Tarbiat Modares University Tehran, Iran.

a.asadi@modares.ac.ir

Associate Prof., Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

shamosavi@modares.ac.ir

Associate Prof., Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

hamed\_najafi@modares.ac.ir

Received: May 2025 and Accepted: September 2025

### Abstract

This research aimed to evaluate water footprint and irrigation dietary efficiency (IDE) of potato production in the Ghorveh-Dehgolan Plain of Kurdistan Province, during 2011 and 2021. In this study, water footprint indices (blue, green, and grey), net production benefit per drop (NPBD), and irrigation dietary efficiency (IDE) were calculated using data from the Agricultural Jihad Organization, Meteorological Organization, FAO, and the USDA Food Composition Database. The results indicate that the average total water footprint for each ton of potatoes in the Ghorveh and Dehgolan regions was 431 and 446 cubic meters, respectively; i.e. producing each ton of the product requires significant consumption of water, which indicates high pressure on the region's limited water resources. Additionally, the economic productivity of water in Ghorveh (388 Tomans/m<sup>3</sup>) is higher than in Dehgolan (372 Tomans/m<sup>3</sup>). Analysis of dietary indices also showed that each liter of water in Ghorveh produces an average of 5.95 k.cal. and 0.016 g of protein, while these values in Dehgolan are 5.73 k.cal. and 0.014 g, respectively. Furthermore, examining the temporal trend of indices reveals a significant decrease in productivity during drought years, highlighting the vulnerability of the region's agricultural system to climate change. This research emphasizes the necessity of a paradigm shift from the approach of "supplying more water" toward "more efficient management of existing water" and, by providing evidence based on field data, establishes an appropriate scientific foundation for water resource and agricultural policy-making in critical regions of the country.

**Keywords:** Food security, Water resource sustainability, Economic productivity, Water footprint

---

\*- Corresponding Author's email: [shamosavi@modares.ac.ir](mailto:shamosavi@modares.ac.ir)  
<https://doi.org/10.22092/jwra.2025.369543.1082>

## Simulation of Soil Moisture and Salinity Changes Using HYDRUS-2D Software with Perforated PVC Pipes in Pistachio Orchards in Kerman Province

H. Shirani, H. Nejat, I. Esfandiarpour, N. Sedaghati, S. Javad Hosseinifard, and S. Sadr\* 

Professor, Department of Soil Science, College of Agriculture, Vali-e-Asr University of Rafsanjan University, Iran. [Shirani@vru.ac.ir](mailto:Shirani@vru.ac.ir)

MSc Graduated, Department of Soil Science, College of Agriculture, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Iran. [Hesam.nejat@gmail.com](mailto:Hesam.nejat@gmail.com)

Professor, Department of Soil Science, College of Agriculture, Vali-e-Asr University of Rafsanjan University, Iran. [esfandiarpour@vru.ac.ir](mailto:esfandiarpour@vru.ac.ir)

Assistant prof., of Irrigation and Drainage, Pistachio Research Center, Horticultural Sciences Research Institute, Agriculture Research Education and Extension Organization (AREEO), Rafsanjan, Iran. [n-sedaghati@pri.ir](mailto:n-sedaghati@pri.ir)

Associate prof., of Soil Science, Pistachio Research Center, Horticultural Sciences Research Institute,

Agriculture Research Education and Extension Organization (AREEO), Rafsanjan, Iran. [hosseinifard@pri.ir](mailto:hosseinifard@pri.ir)

Assistant prof., of Soil Science, Pistachio Research Center, Horticultural Sciences Research Institute, Agriculture Research Education and Extension Organization (AREEO), Rafsanjan, Iran. [sadr@pnu.ac.ir](mailto:sadr@pnu.ac.ir)

Received: December 2024 and Accepted: September 2025

### Abstract

This study evaluated the performance of a low-pressure subsurface irrigation system using perforated PVC pipes in pistachio orchards of Anar County (Kerman Province), focusing on soil moisture and salinity distribution. The HYDRUS-2D numerical model was applied to simulate two-dimensional water and solute movement in the soil. Treatments were based on a factorial combination of four design parameters, each at two levels: channel depth (40 and 60 cm), pipe diameter (110 and 160 mm), hole spacing on perforated PVC pipes (15 and 25 cm), and hole diameter (9 and 12 mm). Model evaluation based on the NRMSE index confirmed the HYDRUS-2D model's strong ability to simulate both moisture and solute distribution in the system. Simulation results revealed that treatments with 60 cm channel depth, 110 mm pipe diameter, 9 mm hole diameter, and 15 or 25 cm hole spacing (T<sub>15</sub> and T<sub>16</sub>) achieved the most favorable salinity distribution by reducing salt accumulation in the root zone. Furthermore, treatments with 160 mm pipe diameter, 12 mm hole diameter, 60 cm channel depth, and 15 or 25 cm hole spacing on perforated PVC pipes (T<sub>9</sub> and T<sub>10</sub>) showed superior moisture distribution compared to other treatments. These configurations provided the best overall performance in terms of moisture and salinity distribution under subsurface irrigation using perforated PVC pipes. In contrast, treatment T<sub>4</sub> (40 cm channel depth, 160 mm pipe diameter, 9 mm hole diameter, 25 cm hole spacing) demonstrated the poorest performance regarding uniform water distribution and salinity control. Based on these findings, it is recommended that subsurface irrigation systems for pistachio orchards adopt the identified optimal design parameters, tailored to local soil and environmental conditions.

**Keywords:** Solute movement, Leaching, Soil moisture distribution pattern, Irrigation management

\* - Corresponding Author's email: [sadr@pnu.ac.ir](mailto:sadr@pnu.ac.ir)  
<https://doi.org/10.22092/jwra.2025.367832.1064>

## Simulation of Rice Yield in Different Cropping-Irrigation Managements Using AquaCrop Model

**P. Zolfaghary, A. HezarJeribi\*<sup>ID</sup>, M. I. Asadi, and E. Amiri**

PhD student in Irrigation and Drainage, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Water and Soil, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran. [parniyan.zolfaghary@gmail.com](mailto:parniyan.zolfaghary@gmail.com)  
Associate Prof., Department of Water Science and Engineering, Faculty of Water and Soil, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. [hezab10@yahoo.com](mailto:hezab10@yahoo.com)  
Research Assistant Prof., and Master of Science in Technical and Engineering Research Department, Golestan Agricultural and Natural Resources Research Center, Gorgan, Iran. [iwc977127@yahoo.com](mailto:iwc977127@yahoo.com)  
Professor, Department of Water Engineering Lahijan Branch, Islamic Azad University, Lahijan, Iran. [eamiri57@yahoo.com](mailto:eamiri57@yahoo.com)

Received: April 2025 and Accepted: April 2025

### Abstract

Given the high water requirement of rice, it is very important to know its performance under different cultivation-irrigation methods and requires numerous experiments. Since conducting numerous field experiments requires a lot of time and expenses, the use of plant models can be a solution in this respect. Plant models simplify the understanding of the complex process of crop response to environmental conditions and are very practical in this regard. The model provided by FAO (AquaCrop) is a water-based model that has been developed as a support tool in planning and analyzing various crop management scenarios. In this study, the AquaCrop model was used to calibrate and verify various cultivation-irrigation methods, including transplanting-flooding, dry seeding-irrigation, and dry seeding-drip irrigation. Results of error evaluation statistics, including normalized root mean square error (NRMSE) and Wilmot index (d) for leaf area index ( $2.25 < \text{NRMSE} < 4.16$  and  $0.96 < d < 0.98$ ), showed that the AquaCrop model performed well in canopy modeling. Also, the error statistics for grain yield and biomass indices (NRMSE and d for grain yield were 5.12 and 0.95, and for biomass were 12.38 and 0.89), respectively, which were in the “very good” and “good” range. Therefore, this model can be used with appropriate accuracy to investigate management options in different crop-irrigation systems to improve water productivity in rice cultivation.

**Keywords:** Rice direct seeding, Transplanting, Crop modelling, Modern irrigation methods

---

\* - Corresponding Author's email: [hezab10@yahoo.com](mailto:hezab10@yahoo.com)  
<https://doi.org/10.22092/jwra.2025.369011.1072>

|                                                                                                                                                                     |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Simulation of Rice Yield in Different Cropping-Irrigation Managements Using AquaCrop Model.....</b>                                                              | <b>7</b>  |
| P. Zolfaghary, A. HezarJeribi, M. I. Asadi, and E. Amiri                                                                                                            |           |
| <b>Simulation of Soil Moisture and Salinity Changes Using HYDRUS-2D Software with Perforated PVC Pipes in Pistachio Orchards in Kerman Province.....</b>            | <b>8</b>  |
| H. Shirani, H. Nejat, I. Esfandiarpour, N. Sedaghati, S. Javad Hosseinifard, and S. Sadr                                                                            |           |
| <b>Water Footprint and Irrigation Dietary Efficiency in Potato Production under Critical Water Resource Conditions: A Case Study in Ghorveh-Dehgolan Plain.....</b> | <b>9</b>  |
| Sh. Abdi, M. A. Asaadi, S. H. Mosavi, and H. Najafi Alamdarlo                                                                                                       |           |
| <b>Analysis of Factors Influencing Groundwater Withdrawal Rates in the Agricultural Wells: A Case Study in Golestan Province.....</b>                               | <b>10</b> |
| A. Keramatzadeh, S. M. Hosseini, F. Eshraghi, and M. Enayat                                                                                                         |           |
| <b>Economic Assessment of Organic Growth Stimulators on Yield, Oil Percentage, and Water Use Efficiency of Canola under Different Irrigation Levels.....</b>        | <b>11</b> |
| M. Passandideh and R. Mohammadikia                                                                                                                                  |           |
| <b>Analysis of Causal Relationships and Determination of the Importance of Criteria for Optimal Governance of Agricultural Water Resources Using DANP.....</b>      | <b>12</b> |
| Z. Feyzollahi, M. Aghayari Hir, A. Taghizadfanid, and M. R. Shahbazbegan                                                                                            |           |

**Ministry of Jihad-e-Agriculture**  
**Agricultural Research, Education, and Extension Organization**  
**Soil and Water Research Institute**

**Journal of Water Research in Agriculture**

**Vol. 39, No. 2**  
**2025**

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

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

***Editorial Board***

**Mohammad Bybordi, PhD**  
**Naser Davatgar, PhD**  
**Niaz Ali Ebrahimi Pak, PhD**  
**Nader Heydari, PhD**

**Heydar Ali Kashkuli, PhD**  
**Abdolmajid Liaghat, PhD**  
**Mohammad Hosein Mahdian, PhD**

**Seyed Majid Mirlatifi, PhD**  
**Seyed Farhad Moosavi, PhD**  
**Ebrahim Pazira, PhD**

**Senior University Lecturere**  
**Associate Prof., Soil and Water Research Ins**  
**Associate Prof., Soil and Water Research Ins**  
**Associate Prof., Iranian Agricultural Engineering Research**  
**Institute (AERI)**  
**Prof., Azad University, Ahvaz**  
**Prof., University of Tehran**  
**Prof., (research) of Agricultural Rersearch Education and**  
**Extention Organization**  
**Prof., Tarbiat Moddarres University, Tehran**  
**Invited Prof., Semnan University**  
**Prof., Azad University, Tehran**

**English Editor**  
**Design**

**Hamid Siadat, PhD**  
**Eng. Fatemeh Aghajani**

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



# Journal of Water Research in Agriculture

wra.areeo.ir

Volume 39/ No 2/ 2025

ISSN: 2228-7140

## Contents

### Subject

### Page

**Simulation of Rice Yield in Different Cropping-Irrigation Managements Using AquaCrop Model.....7**

P. Zolfaghary, A. HezarJeribi, M. I. Asadi, and E. Amiri

**Simulation of Soil Moisture and Salinity Changes Using HYDRUS-2D Software with Perforated PVC Pipes in Pistachio Orchards in Kerman Province.....8**

H. Shirani, H. Nejat, I. Esfandiarpour, N. Sedaghati, S. Javad Hosseini, and S. Sadr

**Water Footprint and Irrigation Dietary Efficiency in Potato Production under Critical Water Resource Conditions: A Case Study in Ghorveh-Dehgolan Plain.....9**

Sh. Abdi, M. A. Asaadi, S. H. Mosavi, and H. Najafi Alamdarlo

**Analysis of Factors Influencing Groundwater Withdrawal Rates in the Agricultural Wells: A Case Study in Golestan Province.....10**

A. Keramatzadeh, S. M. Hosseini, F. Eshraghi, and M. Enayat

**Economic Assessment of Organic Growth Stimulators on Yield, Oil Percentage, and Water Use Efficiency of Canola under Different Irrigation Levels.....11**

M. Passandideh and R. Mohammadikia

**Analysis of Causal Relationships and Determination of the Importance of Criteria for Optimal Governance of Agricultural Water Resources Using DANP.....12**

Z. Feyzollahi, M. Aghayari Hir, A. Taghizadfanid, and M. R. Shahbazbegian