



پژوهش آب در کشاورزی

Wra.areeo.ac.ir



ISSN: 2228-7140

ب / جلد ۳۵ / شماره ۲ / سال ۱۴۰۰

صفحه

عنوان

اثر تنش خشکی و شوری در برآورد عملکرد ذرت علوفه‌ای از طریق تبخیر-تعرق دوره‌ای، با استفاده از مدل‌های مختلف.....۱۰۷
رضا سعیدی

توسعه توابع تولید غلات مهم دشت قزوین در شرایط کم آبی و تنش شوری با استفاده از مدل AquaCrop و شبکه عصبی مصنوعی.....۱۲۳
سارا بلوک آذری، حسین بابازاده، نیازعلی ابراهیمی‌پاک، سیدحبيب موسوی‌جهرمی و هادی رضائیان/اعتدالی

فرا تحلیل اثربخشی کود آبیاری سطحی و قطره‌ای بر شاخص‌های عملکرد محصول و بهره‌وری آب و کود.....۱۳۹
رضا دلپاز، حامد ابراهیمیان، فربرز عباسی و آرزو نازی قمشلو

تحلیل عدم قطعیت مدل SWAP در یک مزرعه نیشکر با زهکشی زیرزمینی کنترل شده در کشت و صنعت شعیبیه.....۱۵۱
فرزین پرچی عراقی و عدنان صادقی لاری

اثرات سطوح مختلف بیوپار گندم و تنش آبی بر ویژگی‌های کمی و کیفی کارلا (خریزه تلخ) در شرایط گلدانی.....۱۶۹
اسماعیل میر، حلیمه پیری و امیر ناصرین

ارزیابی عملکرد برخی گونه‌ها و اکوتیپ‌های سالیکورنیا آبیاری شده با آب دریا و آب شور زیرزمینی.....۱۸۷
غلامحسن رنجبر، فرهاد دهقانی، آرش علاءالدین، ولی سلطانی گردفرامرزی و سردار کشتکار

تحلیلی بر بحران آب در بخش کشاورزی منطقه سیستان در سناریوهای مختلف: رهیافت آینده پژوهی.....۲۰۱
زهرا غفاری مقدم، ابراهیم مرادی، محمود هاشمی‌تبار و علی سردار شهرکی

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

جلد ۳۵ شماره (۲)
۱۴۰۰

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 میر لطیفی
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
آدرس الکترونیکی مجله: journalwater@yahoo.com
این نشریه در پایگاه‌های علمی زیر نمایه می‌شود:
پایگاه اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی: www.sid.ir
پایگاه استنادی علوم جهان اسلام (ISC): www.isc.gov.ir
پایگاه سیولیکا: <https://civilica.com>
پایگاه با نك اطلاعات نشریات کشور (Magiran): <https://www.magiran.com>

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

اثر تنش خشکی و شوری در برآورد عملکرد ذرت علوفه‌ای از طریق تبخیر-تعرق دوره‌ای، با استفاده از مدل‌های مختلف..... ۱۰۷
رضا سعیدی

توسعه توابع تولید غلات مهم دشت قزوین در شرایط کم آبی و تنش شوری با استفاده از مدل AquaCrop و شبکه عصبی مصنوعی..... ۱۲۳

سارا بلوک آذری، حسین بابازاده، نیازعلی ابراهیمی‌پاک، سیدحبیب موسوی‌جهرمی و هادی رضوانی‌اعتدالی

فرا تحلیل اثربخشی کودآبیاری سطحی و قطره‌ای بر شاخص‌های عملکرد محصول و بهره‌وری آب و کود..... ۱۳۹
رضا دل‌باز، حامد ابراهیمیان، فریبرز عباسی و آرزو نازی قمشلو

تحلیل عدم قطعیت مدل SWAP در یک مزرعه نیشکر با زهکشی زیرزمینی کنترل شده در کشت و صنعت شعبیه..... ۱۵۱
فرزین پرچی عراقی و عدنان صادقی لاری

اثرات سطوح مختلف بیوچار گندم و تنش آبی بر ویژگی‌های کمی و کیفی کارلا (خربزه تلخ) در شرایط گلدانی..... ۱۶۹
اسماعیل میر، حلیمه پیری و امیر ناصرین

ارزیابی عملکرد برخی گونه‌ها و اکوتیپ‌های سالیکورنیا آبیاری شده با آب دریا و آب شور زیرزمینی..... ۱۸۷
غلامحسن رنجبر، فرهاد دهقانی، آرشد علاءالدین، ولی سلطانی گردفرامرزی و سردار کشتکار

تحلیلی بر بحران آب در بخش کشاورزی منطقه سیستان در سناریوهای مختلف: رهیافت آینده پژوهی..... ۲۰۱
زهرا غفاری مقدم، ابراهیم مرادی، محمود هاشمی‌تبار و علی سردار شهرکی

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

مجله علمی-پژوهشی "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 در نرم افزار Word 2007 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	Nazanin پررنگ	14
متن مقاله	Nazanin	12
عناوین بخش‌های مقاله	Nazanin پررنگ	12
نام مؤلفان	Nazanin پررنگ	12
کلمه چکیده و کلمات کلیدی	Nazanin پررنگ	12
عناوین جداول و اشکال	Nazanin پررنگ	11
متن جداول و شکل‌ها و منابع	Nazanin	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:

واژه‌های 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 نمونه گیری، اندازه گیریهای 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 عنوان هایی مانند نمودار، عکس و نقشه خودداری و کلیه آنها با عنوان " شکل " درج شوند. نتایج ارائه شده در جداول یا شکلها نباید به صورت دیگری مانند منحنی و یا متن نوشتاری در مقاله تکرار گردد. هر جدول از شماره، عنوان، سرستون ها و متن جدول تشکیل می شود. 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 نشانه های Δ $\square$ $\bullet$ $\blacktriangle$ 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

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

تشکر و قدردانی

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

فهرست منابع

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

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

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

فهرست منابع مورد استفاده در پایان متن به صورت پیوسته و به ترتیب منابع فارسی و انگلیسی ارائه شوند. منابع مورد استفاده به ترتیب حروف الفبای نام خانوادگی نگارنده، (یا اولین نگارنده برای منابعی که بیش

از یک نگارنده دارند) زیر هم آورده شوند. چنانچه از یک نگارنده چندین منبع ذکر شود، ترتیب درج آن‌ها بر حسب سال انتشار، از جدید به قدیم است. اگر از نگارنده‌ای چندین منبع همسال وجود داشته باشد، با گذاشتن حروف a, b و c پس از سال انتشار منابع از یکدیگر متمایز شوند. چنانچه مقالات منفرد و مشترک از یک نگارنده ارائه شود، نخست مقالات منفرد و سپس مقاله‌های مشترک به ترتیب حروف الفبای نام نگارندگان بعدی مرتب شوند.

برای یک مقاله به ترتیب نام خانوادگی نگارنده، حرف اول اسم کوچک نگارنده، تاریخ انتشار، عنوان مقاله عنوان کامل مجله، شماره جلد، و اولین و آخرین صفحه مقاله ارائه شود. برای یک کتاب به ترتیب نام خانوادگی و سپس حرف اول نام کوچک نگارنده، تاریخ انتشار، عنوان کامل کتاب، شماره جلد، نام ناشر، محل انتشار و تعداد کل صفحات ارائه شود. در مورد مقاله یا کتاب‌هایی که بیش از یک نویسنده دارند به ترتیب نام خانوادگی و حرف 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 W.L. Lindsay. 1998. Reduction and oxidation effect on the solubility and transformation of iron oxides. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62:930–937.

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 D.A. Laird. 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 L.E. Sommers. 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.

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.

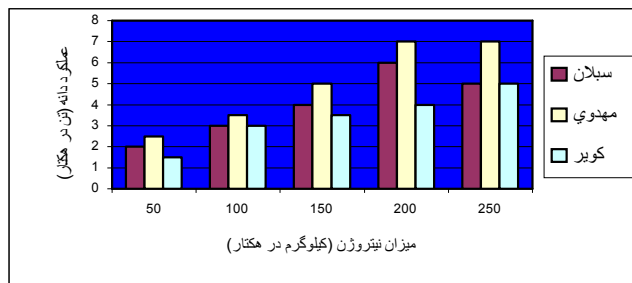
جدول نامناسب

بافت	<i>Mge xch</i>	<i>Kavail</i> .	<i>Pava il</i>	OC (%)	TNV (%)	EC (dS. m- 1)	pH	عمق (cm)
	(Mg.kg-1)							
لومی رسی	۳۰۰	۲۹۰	۳/۶	۰/۶۲	۲۸	۷/۶	۸/۲	۰-۳۰
لومی رسی	۳۰۵	۲۹۵	۰/۶	۰/۵۰	۳۰	۷/۲	۸/۲	۳۰-۶۰
لومی شنی	۲۸۶	۳۳۲	۰/۵	۰/۲۱	۳۳	۹/۵	۸/۷	۶۰-۹۰

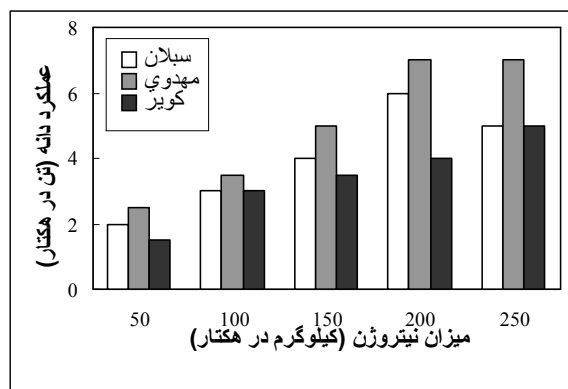
جدول مناسب

بافت	Mgex	Kav	Pav	OC (%)	TNV (%)	EC (dS.m ⁻¹)	pH	عمق (cm)
	(mg.kg ⁻¹)							
لومی رسی	۳۰۰	۲۹۰	۳/۶	۰/۶۲	۲۸	۷/۶	۸/۳	۰-۳۰
لومی رسی	۳۰۵	۲۹۵	/۶۰	۰/۵۰	۳۰	۷/۲	۸/۲	۳۰-۶۰
لومی شنی	۲۸۶	۲۳۲	/۵۰	۰/۲۱	۳۳	۹/۵	۷/۸	۶۰-۹۰

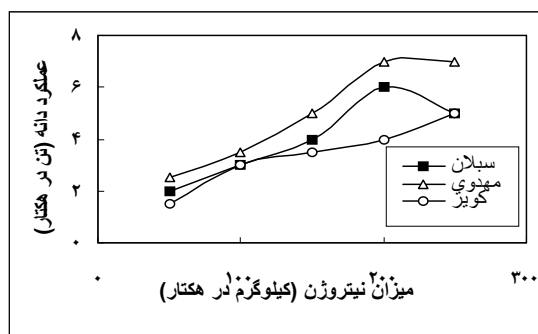
نامناسب



مناسب



مناسب



دکتر حامد ابراهیمیان.....	۱ داورى
دکتر جواد باغانی.....	۱ داورى
دکتر محمد باى بوردى.....	۱ داورى
دکتر مهدى پناهى.....	۱ داورى
دکتر سيد على محمد چراغى.....	۲ داورى
دکتر پيمان دانشكار آراسته.....	۱ داورى
دکتر ناصر دوات گر.....	۳ داورى
دکتر وحيد رضاوردینژاد.....	۲ داورى
دکتر حامد رضايى.....	۱ داورى
دکتر على اکبر عزيزى زهان.....	۳ داورى
مهندس سعيد غالبى.....	۱ داورى
دکتر محمد فيضى.....	۱ داورى
مهندس فاطمه كيخايى.....	۱ داورى
دکتر سينا ملاح.....	۳ داورى
دکتر محمد حسين مهديان.....	۱ داورى
دکتر فرهاد ميرزاىى.....	۳ داورى
دکتر شادمان ويسى.....	۲ داورى

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

اثر تنش خشکی و شوری در برآورد عملکرد ذرت علوفه‌ای از طریق تبخیر-تعرق دوره‌ای، با استفاده از مدل‌های مختلف

رضا سعیدی^۱

دکترای آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی^(ه)، قزوین، ایران.

saeidi@org.ikiu.ac.ir

دریافت: تیر ۱۴۰۰ و پذیرش: شهریور ۱۴۰۰

چکیده

تعیین حساسیت درون فصلی تبخیر-تعرق ذرت نسبت به تنش‌های محیطی، اثر مهمی بر مدل‌سازی دقیق‌تر عملکرد محصول می‌گذارد. در این پژوهش، اثر تنش‌های خشکی و شوری بر تبخیر-تعرق نسبی (در مراحل اولیه، توسعه، میانی و پایانی رشد) و عملکرد نسبی ذرت در مزرعه‌ای با خاک لومی شنی بررسی شد. تیمارهای شوری از طریق آب دارای هدایت الکتریکی (S_0) ، $1/5$ ، $2/1$ ، $3/5$ و $5/7$ دسی زیمنس بر متر اعمال شد. تیمارهای خشکی نیز شامل چهار سطح آبیاری بر اساس (I_0) ، 10% ، 80% ، 60% و 40% نیاز آبی گیاه ذرت در نظر گرفته شد. آزمایش به صورت فاکتوریل، در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی و با سه تکرار انجام شد. مقدار تبخیر-تعرق نسبی ذرت در مراحل اولیه، توسعه، میانی و پایانی رشد به ترتیب بین $100 - 63/5\%$ ، $100 - 62/6\%$ ، $100 - 55/2\%$ و $100 - 66/4\%$ برآورد شد. مقدار عملکرد نسبی ذرت نیز در تیمارهای I_0S_0 تا I_3S_3 بین $100 - 42/6\%$ محاسبه شد. نتایج نشان داد تنش‌های شوری و خشکی باعث کاهش تبخیر-تعرق و عملکرد ذرت شد و همچنین در مراحل حساس رشد، تبخیر-تعرق با شیب بیشتری کاهش یافت. اعمال تنش‌های مذکور در مراحل حساس رشد باعث اختلال در گل‌دهی و میوه‌دهی ذرت شد. در این پژوهش با استفاده از مدل‌های جمع‌پذیر بلنک، استوارت، سینگ و مدل‌های ضرب‌پذیر جنسن، رائو و مینهاس، عملکرد نسبی ذرت مدل‌سازی شد. نتایج نشان داد، مدل استوارت با ضرایب حساسیت (در چهار مرحله رشد) برابر با $0/227$ ، $0/416$ ، $0/604$ ، $0/14$ و مدل جنسن با ضرایب حساسیت $0/301$ ، $0/41$ ، $0/608$ ، $0/147$ به عنوان مدل‌های بهینه انتخاب شدند. اما مدل‌های رائو، بلنک، سینگ و مینهاس در اولویت‌های بعدی قرار گرفتند. بنابراین در شرایط تنش‌های شوری و خشکی، عملکرد نسبی ذرت بر اساس مقدار تبخیر-تعرق آن در مراحل رشد مدل‌سازی شد.

واژه‌های کلیدی: تبخیر-تعرق نسبی، ضرایب حساسیت، عملکرد نسبی، مدل‌های تجربی، مراحل رشد

^۱ - آدرس نویسنده مسئول: گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی^(ه)، قزوین، ایران.

مقدمه

برآورد دقیق نیاز آبی واقعی گیاه مبتنی بر شرایط محیطی منطقه تحت کشت، مُنجر به افزایش بهره‌وری مصرف آب می‌شود. در هر منطقه‌ای ممکن است عواملی در قالب تنش‌های محیطی باعث کاهش تبخیر-تعرق و عملکرد زیست‌توده گیاه شوند. لذا با در نظر گرفتن اثر تنش‌ها در شرایط غیراستاندارد محیطی، از مصرف بیش‌ازاندازه آب در آبیاری جلوگیری به عمل می‌آید (سعیدی و همکاران، ۱۳۹۷). البته اثر کاهشی تنش‌ها بر تبخیر-تعرق گیاهان در مراحل مختلف رشد متفاوت است (سعیدی و ستوده‌نیا، ۱۴۰۰)؛ اما با شناخت دقیق حساسیت درون‌فصلی تبخیر-تعرق گیاهان نسبت به تنش‌های محیطی و مدیریتی، می‌توان عملکرد محصول را بر اساس آن مدل‌سازی کرد و مدلی تجربی مطابق آن ارائه نمود. تنش‌های شوری و خشکی از جمله تنش‌هایی هستند که در محیط کشت گیاه، تبخیر-تعرق و عملکرد آن را تحت تأثیر قرار می‌دهند. از این‌رو در زراعت گیاهان زیر کشت آبی با نیاز آبی بالا (مانند ذرت)، ارائه راه‌کار عملی برای مدیریت کم‌آبایی و استفاده بهینه از آب‌های نامتعارف شور اهمیت زیادی دارد (سعیدی و همکاران، ۱۳۹۹). در پژوهشی گزارش شد که دوره رشد ذرت شامل مراحل استقرار گیاهیچه، مرحله رشد سریع، گرده‌افشانی و پُر شدن دانه است که از لحاظ فرایندهای فیزیولوژیکی و حساسیت گیاه، متفاوت می‌باشد. به‌طوری‌که اعمال تنش خشکی در مراحل مذکور، تأثیر متفاوتی بر روی مقدار عملکرد محصول دارد (نیلسن، ۲۰۰۲). در پژوهش دیگر در منطقه شاهرود، اثر تنش خشکی در قالب حذف یک مرحله آبیاری در مراحل رشد رویشی، گل‌دهی و دانه‌بندی ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۴ بررسی شد. عملکرد زیست‌توده تر ذرت در تیمارهای مذکور به‌ترتیب برابر با ۶۸، ۶۲/۲ و ۶۶/۴۷ تن بر هکتار اندازه‌گیری شد که نشان‌دهنده اثر بیشینه تنش خشکی بر کاهش عملکرد محصول در مرحله گل‌دهی بود. به دلیل توقف رشد رویشی و ورود گیاه به مرحله زایشی، حساسیت گیاه ذرت در مرحله گل‌دهی از سایر مراحل رشد

بیشتر است (محمدی بهمدی و آرمین، ۱۳۹۶). در پژوهشی بر روی ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۴ در استان فارس، تنش خشکی در سطح ۲۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه، در مراحل رشد استقرار تا ظهور گل تاجی، ظهور گل تاجی تا خمیری شدن دانه و از خمیری شدن دانه تا رسیدگی کامل اعمال شد. نتایج نشان داد اعمال تنش ۵۰ درصد نیاز آبی در مرحله رشد رویشی، آسیب جبران‌ناپذیری بر عملکرد محصول وارد آورد. همچنین مرحله گل‌دهی و اوایل پر شدن دانه، حساس‌ترین مرحله رشد ذرت به تنش خشکی شناخته شد (همتی و همکاران، ۱۳۹۳). علاوه بر عملکرد محصول، اعمال یک حد ثابت از تنش خشکی در مراحل رشد چهار برگگی، ۱۲ برگگی، گل‌دهی و خمیری شدن دانه‌های گیاه ذرت، تأثیر متفاوتی بر مقدار تبخیر-تعرق گیاه داشت. نتایج نشان داد کم‌ترین مقدار تبخیر-تعرق مربوط به مرحله گل‌دهی بود که علت آن حساسیت بیشتر ذرت به تنش خشکی در این مرحله رشد می‌باشد (سعیدی و ستوده‌نیا، ۱۴۰۰). از سوی دیگر با افزایش تنش شوری در منطقه توسعه ریشه گیاه، پتانسیل آب موجود در خاک کاهش یافته و جذب آب توسط گیاه کم شد. از این‌رو با کاهش کیفیت آب آبیاری از طریق افزایش شوری از ۰/۵ به ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر، مقدار تبخیر-تعرق و عملکرد گیاه ذرت به‌ترتیب ۳۱ و ۶۰ درصد کاهش یافت (لاکردا و همکاران، ۲۰۱۶). در پژوهشی دیگر گزارش شد تنش شوری باعث کاهش رشد برگ و کاهش انرژی لازم برای فتوسنتز گیاه شد. در نتیجه از تشکیل اندام گیاهی، رشد محصول و مصرف آب توسط گیاه کاسته شد (شین و همکاران، ۲۰۱۶). تحقیق دیگر با اعمال سه تیمار شوری آب برابر با $(S_1) 0/6$ ، $(S_2) 2$ و $(S_3) 4$ دسی‌زیمنس بر متر و سه سطح آبیاری $(I_1) 100$ ، $(I_2) 75$ و $(I_3) 50$ درصد نیاز آبی گیاه، بر روی ذرت انجام شد. نتایج نشان داد با افزایش شوری آب از سطح S_1 به S_3 و کاهش مقدار آبیاری از سطح I_1 به I_3 ، به‌ترتیب ۱۲ و ۴۳ درصد از مقدار تعرق ذرت کاهش یافت. همچنین بهره‌وری مصرف آب برای دانه ذرت از تیمار S_1 به S_3 با کاهش ۲۶ درصدی همراه بود

رشد مورد مطالعه قرار گرفت و مدل سازی عملکرد نسبی ذرت براساس اجزای تبخیر-تعرق در مراحل رشد انجام شده است. با این کار حساسیت تبخیر-تعرق گیاه ذرت در مراحل مختلف رشد تعیین شد و مدلی جامع تر برای تخمین عملکرد محصول در شرایط تحت تنش معرفی شد.

مواد و روش ها

تشریح کلیات پژوهش

پژوهش حاضر در سال ۱۳۹۹ و در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه بین المللی امام خمینی^(۹) انجام شد. محل مطالعه در منطقه قزوین با اقلیم نیمه خشک سرد و در موقعیت جغرافیایی با طول شرقی $50^{\circ}09'$ و عرض شمالی $36^{\circ}19'29''$ قرار دارد. گیاه مورد مطالعه، ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۴ بود که در کرت هایی با ابعاد 3×3 متر و با فاصله دو متر از هم کاشته شد. بذرها با تراکم ۸۰۰۰۰ بوته در هکتار و در کرت های محصور، به روش جویچه ای کاشته شد. هر کرت دارای پنج ردیف کشت با فاصله ی ۶۰ سانتی متر از هم بود و به صورت غرقابی آبیاری شد. آب لازم برای آبیاری از آب چاه با هدایت الکتریکی ۰/۵ دسی زیمنس بر متر و اسیدپته ۷/۱ تأمین شد. با توجه به هدف برداشت علوفه ای محصول ذرت، تاریخ کاشت و برداشت به ترتیب ۱۳۹۹/۰۳/۱۵ و ۱۳۹۹/۰۸/۰۱ و دوره رشد گیاه ۱۴۰ روز در نظر گرفته شد. علت ۱۴۰ روزه بودن دوره رشد این بود که در گزارش فائو ۵۶، مراحل رشد اولیه ۱، توسعه ۲، میانی ۳ و پایانی ۴ ذرت به ترتیب برابر با ۲۵، ۴۰، ۴۵ و ۳۰ روز (جمعاً ۱۴۰ روز) اعلام شده بود (آلن و همکاران، ۱۹۹۸). از این رو طول دوره رشد مربوط به زمان کاشت و برداشت محصول در پژوهش حاضر، بر اساس گزارش فائو ۵۶ تطبیق داده شده است. در طول دوره رشد گیاه، مقدار بارندگی بسیار ناچیز بود و از سوی ایستگاه هواشناسی منطقه، گزارشی در مورد بارندگی در این بازه زمانی داده نشد. از این رو نیاز آبی گیاه صرفاً از طریق انجام آبیاری تأمین شد. از طریق آزمایش خاک، مشخصات

(عزیزیان و سپاسخواه، ۲۰۱۴)؛ اما همانند تنش خشکی، حساسیت متفاوتی به تنش شوری در مراحل رشد گیاه ذرت وجود دارد. به طوری که اثر چهار سطح شوری آب شامل ۰/۵، ۲/۱، ۳/۵ و ۵/۷ دسی زیمنس بر متر، باعث کاهش ضریب تنش تبخیر-تعرق (K_s) از عدد ۱ به ۰/۵۷ طی مراحل مختلف رشد ذرت در منطقه قزوین گزارش شده است (سعیدی و همکاران، ۱۳۹۷). پژوهش های گذشته نشان داد که تنش های خشکی و شوری، هر دو از عوامل محدودکننده جذب آب و تعرق گیاه به شمار می روند. البته اثر زیانبار تنش های مذکور در مراحل مختلف رشد گیاه می تواند متفاوت باشد. از این رو با مدیریت تنش ها و حذف یا کاهش اثر آن ها در مراحل حساس رشد، می توان تبخیر-تعرق و عملکرد محصولات را در راستای افزایش بهره وری مصرف آب، مدیریت نمود. همچنین در شرایط وجود تنش های خشکی و شوری، از طریق کمی نمودن مقدار حساسیت گیاه در مراحل رشد، می توان مقدار عملکرد محصول را بر اساس مقدار تبخیر-تعرق گیاه تخمین زد. در پژوهش های گذشته و در شرایط تنش خشکی، مدل های بلنک (بلنک، ۱۹۷۵)، استوارت (استوارت و همکاران، ۱۹۷۶)، سینگ (سینگ و همکاران، ۱۹۸۷)، جنسن (جنسن، ۱۹۶۸)، راثو (راثو و همکاران، ۱۹۸۸) و مینهاس (مینهاس و همکاران، ۱۹۷۴)، برای تخمین عملکرد محصول از روی مقدار تبخیر-تعرق گیاه طی دوره رشد، ارائه شده است؛ بنابراین هدف از پژوهش حاضر، مدل سازی عملکرد ذرت بر اساس تبخیر-تعرق دوره ای در شرایط تنش های شوری و خشکی، با استفاده از مدل های مذکور می باشد. لازم به ذکر است در پژوهش های گذشته اثر تنش های محیطی (مانند شوری و حاصلخیزی) بر عملکرد و تبخیر-تعرق ذرت در کل دوره رشد بررسی شده است و مدل سازی عملکرد محصول بر اساس مقدار تبخیر-تعرق در کل دوره رشد صورت گرفته است؛ اما در پژوهش حاضر و تحت تنش های شوری و خشکی، مقدار تبخیر-تعرق ذرت علوفه ای به صورت مجزا و جداگانه، در مراحل مختلف

فیزیکی و شیمیایی اعماق خاک مزرعه در جدول ۱ ارائه شد و نیازهای کودی گیاه براساس آن توصیه شد. تیمارهای پژوهش با هدف اعمال تنش‌های شوری و خشکی بر گیاه انتخاب شدند. تیمارهای شوری از طریق آب آبیاری در چهار سطح با هدایت الکتریکی $(S_0) 0/5$ ، $(S_1) 2/1$ ، $(S_2) 3/5$ و $(S_3) 5/7$ دسی‌زیمنس بر متر اعمال شدند. تیمارهای شوری با توجه به پتانسیل ۱۰۰، ۹۰، ۷۵ و ۵۰ درصدی عملکرد ذرت در شوری‌های مذکور (برای آب آبیاری) انتخاب شد (دورنبوس و پریوت، ۱۹۷۷). آب شور مورد نیاز برای آبیاری، از طریق اضافه کردن نمک صنعتی به آب باکیفیت چاه تهیه شد. عناصر موجود در نمک صنعتی شامل سدیم، کلسیم، منیزیم، سولفات و پتاسیم با درجه خلوص به ترتیب برابر با ۹۲، ۳/۸۴، ۱/۸۹، ۱/۷۳ و ۰/۵۴ درصد بودند. در پژوهش‌های گذشته وجود عناصر مذکور در آب‌های شور طبیعی ۵۰ نقطه از منطقه قزوین گزارش

شد (محمدی و همکاران، ۱۳۹۰). از این‌رو آب شور تولید شده، ماهیت آب شور طبیعی را داشت. قبل از هر نوبت آبیاری، مقدار مورد نیاز آب شور بر اساس شوری مدنظر در تیمارها، در مخازن بزرگ تهیه شد و پس از کنترل هدایت الکتریکی (EC^e) مورد استفاده قرار گرفت. تیمارهای خشکی نیز شامل چهار سطح آبیاری بر اساس $(I_0) 100$ ، $(I_1) 80$ ، $(I_2) 60$ و $(I_3) 40$ درصد نیاز آبی گیاه ذرت در نظر گرفته شد. در مجموع تعداد ۱۶ تیمار در سه تکرار، به صورت آزمایش فاکتوریل و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی اجرا شد. داده‌های پژوهش شامل مقادیر تبخیر-تعرق در دوره رشد گیاه و عملکرد نهایی زیست‌توده بود که تجزیه واریانس و مقایسه میانگین آن‌ها توسط نرم‌افزار SPSS و با آزمون چند دامنه‌ای دانکن انجام شد.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه

عمق خاک (سانتی‌متر)			واحد	پارامتر
۶۰-۹۰	۳۰-۶۰	۰-۳۰		
۰/۵۵	۰/۵۶	۰/۵۳	$dS.m^{-1}$	هدایت الکتریکی اولیه عصاره اشباع خاک
۷/۴	۷/۳	۷/۳	-	اسیدیته خاک (pH)
لوم شنی	لوم شنی	لوم شنی	-	بافت خاک
۱۱	۸	۱۰	%	رس
۲۷	۲۵	۳۳	%	سیلت
۶۲	۶۷	۵۷	%	شن
۲۴	۲۳	۲۴	%	رطوبت وزنی حد ظرفیت مزرعه
۱۲/۵	۱۲	۱۳	%	رطوبت وزنی در نقطه پژمردگی دائم
۱/۳۷	۱/۴	۱/۳۳	$g.cm^{-3}$	چگالی ظاهری
۰/۰۶	۰/۱	۰/۰۷	%	نیترژن کل
۱۲۱	۱۶۳	۲۷۲	p.p.m	پتاسیم قابل جذب
۲	۳	۵	p.p.m	فسفر قابل جذب
۰/۰۳	۰/۱	۰/۰۹	%	کربن آلی

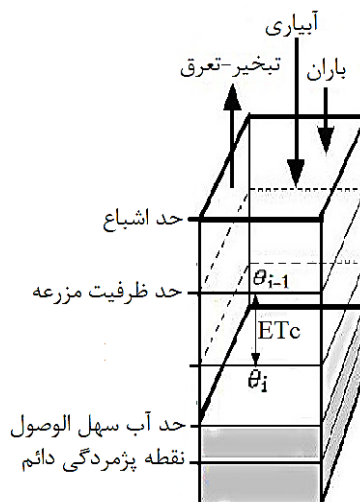
اندازه‌گیری تبخیر-تعرق

در این پژوهش رطوبت عمق خاک منطقه ریشه گیاه، به صورت روزانه با دستگاه بازتاب زمانی امواج (TDR^v) مدل TRIME-FM اندازه‌گیری شد. به منظور حذف اثرات حاشیه‌ای، محل برداشت داده‌های رطوبت خاک در مرکز سطح کرت‌ها تعیین شد. از سوی دیگر

کارگذاری لوله‌های مخصوص دستگاه TDR در عمق یک متری از سطح زمین، امکان اندازه‌گیری رطوبت خاک تا عمق مذکور را فراهم نمود. قبل از شروع آزمایش، اعداد قرائت شده توسط دستگاه TDR نسبت به مقادیر واقعی رطوبت وزنی خاک واسنجی شدند. به این صورت که برای هر داده‌ی واقعی رطوبت خاک (از حد اشباع تا حالت

پژوهش حاضر متوسط عمق توسعه ریشه ذرت، عدد ۷۰ سانتی متر در نظر گرفته شد (ابراهیمی زاده و حسن لی، ۱۳۸۷) که با اندازه گیری عمق ریشه در پایان دوره رشد از طریق حفر گودال در خاک مزرعه مطابقت داشت. از سوی دیگر با توجه به نبود درز و ترک در اعماق خاک و یا جریان های ترجیحی در آن، اطمینان حاصل شد که روند کاهش مقدار رطوبت خاک (منطقه ریشه) در روزهای پس از آبیاری، صرفاً متأثر از فرایند تبخیر-تعرق گیاهان بوده است.

خشک)، یک داده نیز توسط دستگاه ثبت شد. سپس در یک نمودار، داده های واقعی در محور عمودی و داده های ثبت شده توسط دستگاه در محور افقی قرار داده شد. از این رو یک خط بین داده ها برازش داده شد و منحنی اشیل (با معادله مشخص) برای تبدیل داده های دستگاه به داده های واقعی تشکیل داده شد. در این شرایط از طریق پایش روزانه رطوبت خاک در عمق توسعه ریشه گیاه و محاسبه بیلان آب (شکل ۱) در فاصله بین دو آبیاری، امکان برآورد مقدار تبخیر-تعرق روزانه گیاه توسط رابطه (۱) فراهم شد. در



شکل ۱- بیلان آب خاک تحت تأثیر تبخیر-تعرق گیاه

سرعت جریان آب خاک به سمت ریشه گیاه برای تأمین آب مورد نیاز تعرق کاهش می یابد. با کاهش رطوبت خاک نسبت به حد RAW، گیاه وارد فاز تنش خشکی می شود (آلن و همکاران، ۱۹۹۸). برای اندازه گیری مقدار حد RAW از رابطه (۲) استفاده شد.

$$RAW = \frac{\theta_{FC} - \theta_i}{\theta_{FC} - \theta_{PWP}} \quad (2)$$

در رابطه ۲، RAW: حد آب سهل الوصول، θ_{FC} :

رطوبت وزنی خاک در حد ظرفیت مزرعه (درصد)، θ_i :

رطوبت وزنی خاک (درصد) در زمان انجام آبیاری و θ_{PWP} :

رطوبت وزنی خاک در حد نقطه پژمردگی دائم (درصد) می باشد.

لازم به ذکر است حد آب سهل الوصول خاک برای

گیاه ذرت، در طول دوره رشد مقدار ثابتی نداشته و بین ۴۰

$$(ET_c)_i = \frac{(\theta_{i-1} - \theta_i)}{100} \cdot \rho_b \cdot D_{rz} \quad (1)$$

$(ET_c)_i$: تبخیر-تعرق روزانه گیاه (cm)، θ : مقدار رطوبت وزنی خاک (درصد)، i : شمارنده روزهای بین دو آبیاری، $(\theta_{i-1} - \theta_i)$: اختلاف رطوبت روزانه خاک (درصد)، ρ_b : چگالی ظاهری خاک ($g \cdot cm^{-3}$)، D_{rz} : عمق توسعه ریشه گیاه (cm).

تعیین زمان و حجم آب آبیاری

زمان انجام آبیاری گیاهان بر اساس زمان اتمام آب سهل الوصول خاک (RAW^A) در تیمار آبیاری کامل (تأمین ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه) تعیین شد. این نقطه رطوبتی کسری از رطوبت بین دو حد ظرفیت مزرعه (FC^A) و نقطه پژمردگی دائم (PWP^{10}) است که با رسیدن به آن،

نسبی محصول ($\frac{Y_s}{Y_m}$) بر اساس مقدار تبخیر-تعرق نسبی گیاه در مراحل رشد ($\frac{ET_{si}}{ET_{mi}}$) و در شرایط تیمارهای مختلف تنش‌های شوری و خشکی بود. در این شرایط، پارامترهای تبخیر-تعرق نسبی در مراحل رشد به‌عنوان متغیرهای مستقل و پارامتر عملکرد نسبی به‌عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شد. برای هدف مذکور، از روابط (۴) الی (۹) که به‌ترتیب شامل مدل‌های جمع‌پذیر بلنک، استوارت، سینگ و مدل‌های ضرب‌پذیر جنسن، راثو و مینهایس استفاده شد؛ بنابراین لازم بود که ضرایب حساسیت درون‌فصلی تبخیر-تعرق در مدل‌ها، مدل‌سازی شده و مدل بهینه برای تخمین عملکرد در شرایط تنش‌های شوری و خشکی معرفی شود. با استفاده از مقادیر واقعی تبخیر-تعرق و عملکرد محصول، ضرایب حساسیت در هر مدل به‌وسیله نرم‌افزار SPSS برآورد شد. به‌طور کلی در هر مدل، تعداد چهار ضریب حساسیت (مربوط به چهار مرحله رشد ذرت)، برای تعداد ۱۶ تیمار مورد نظر در این پژوهش مدل‌سازی شد.

$$\frac{Y_s}{Y_m} = \sum_{i=1}^n A_i \left(\frac{ET_{si}}{ET_{mi}} \right) \quad (4)$$

$$\frac{Y_s}{Y_m} = 1 - \sum_{i=1}^n B_i \left(1 - \frac{ET_{si}}{ET_{mi}} \right) \quad (5)$$

$$\frac{Y_s}{Y_m} = \sum_{i=1}^n C_i \left(1 - \left(1 - \frac{ET_{si}}{ET_{mi}} \right)^2 \right) \quad (6)$$

$$\frac{Y_s}{Y_m} = \prod_{i=1}^n \left(\frac{ET_{si}}{ET_{mi}} \right)^{\lambda_i} \quad (7)$$

$$\frac{Y_s}{Y_m} = \prod_{i=1}^n \left(1 - \gamma_i \left(1 - \frac{ET_{si}}{ET_{mi}} \right) \right) \quad (8)$$

$$\frac{Y_s}{Y_m} = \prod_{i=1}^n \left(1 - \left(1 - \frac{ET_{si}}{ET_{mi}} \right)^2 \right)^{\delta_i} \quad (9)$$

در روابط (۴) الی (۹)؛ Y_s : عملکرد ذرت در تیمارهای مختلف شوری و خشکی ($kg \cdot ha^{-1}$)؛ Y_m : عملکرد بیشینه ذرت در شرایط استاندارد یا تیمار I_0S_0 ($kg \cdot ha^{-1}$)؛ ET_s : تبخیر-تعرق ذرت در تیمارهای مختلف شوری و خشکی (mm)؛ ET_m : تبخیر-تعرق بیشینه ذرت در شرایط استاندارد یا تیمار I_0S_0 (mm)؛ i : شمارنده مراحل

تا ۸۰ درصد گزارش شده است (جاراللهی، ۱۳۸۰). در این شرایط برای اطمینان از این‌که به گیاهان شاهد (تیمار آبیاری کامل) در حساس‌ترین دوره رشد هم تنش آبی وارد نمی‌شود، حد آب سهل‌الوصول خاک مقدار ۴۰ درصد در نظر گرفته شد. به‌طوری‌که پس از اتمام ۴۰ درصد از رطوبت بین دو حد FC و PWP در کرت شاهد، عملیات آبیاری انجام شد. درصد رطوبت وزنی خاک در حد FC و PWP با استفاده از دستگاه صفحات فشاری (به‌ترتیب تحت فشارهای مکشی یک سوم و ۱۵ اتمسفر) و خشک کردن خاک در گرم‌خانه، محاسبه و در جدول (۱) ارائه شد. حجم آب آبیاری در تیمارهای I_1 ، I_2 و I_3 به‌ترتیب مقدار ۸۰، ۶۰ و ۴۰ درصد حجم آب در تیمار I_0 در نظر گرفته شد؛ اما حجم آب آبیاری در تیمار I_0 (آبیاری کامل)، با توجه به مقدار کمبود رطوبت خاک (در زمان اتمام حد سهل‌الوصول) تا حد FC، عمق مؤثر ریشه و مساحت خاک کرت، بر اساس رابطه (۳) تعیین شد. برای آبیاری کرت‌ها، آب از مخازن تیمارها توسط شیلنگ و به‌صورت غرقابی به کرت‌ها داده شد و مقدار حجم آب با کنتور حجمی کنترل شد. لازم به‌ذکر است که آب به شکل یکنواخت در سطح هر کرت توزیع شد و با توجه به کفایت آب برای منطقه ریشه، محصور بودن کرت‌ها توسط پشته‌ها و عدم ایجاد رواناب، راندمان کاربرد آبیاری صد در صد در نظر گرفته شد.

$$V = \frac{(\theta_{FC} - \theta_i)}{100} \cdot \rho_b \cdot D_{rz} \cdot A \quad (3)$$

V : حجم آب آبیاری (θ_{FC} : رطوبت وزنی خاک در نقطه ظرفیت مزرعه (درصد)؛ θ_i : رطوبت وزنی خاک در زمان اتمام آب سهل‌الوصول خاک و قبل از انجام آبیاری (درصد)؛ ρ_b : چگالی ظاهری خاک ($g \cdot cm^{-3}$)؛ D_{rz} : عمق مؤثر ریشه گیاه (m) و A : مساحت کرت (m^2).

معرفی مدل‌های کاربردی

در پژوهش‌های گذشته گزارش شد که تنش‌های شوری و خشکی، بر مقدار تبخیر-تعرق و عملکرد محصول ذرت تأثیرگذار بود. هدف از این پژوهش، تخمین عملکرد

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}) \cdot (P_i - \bar{P}))^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \quad (12)$$

$$R^2_{adj} = 1 - \frac{(1 - R^2)(n - 1)}{n - t - 1} \quad (13)$$

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (14)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (15)$$

نتایج و بحث

تبخیر-تغرق نسبی

مقدار تبخیر-تغرق ذرت در شرایط اعمال تنش‌های خشکی و شوری، در مراحل مختلف رشد اندازه‌گیری شدند. هر دو عامل خشکی و شوری باعث کاهش تبخیر-تغرق نسبت به شرایط استاندارد (تیمار I_0S_0) شد. مقدار تبخیر-تغرق از تیمار I_0S_0 تا I_3S_3 (بیشترین تا کم‌ترین مقدار تنش)، در بازه ۷۸/۷ تا ۵۰ میلی‌متر (در مرحله اولیه رشد)، ۲۰۱/۲ تا ۱۲۶ میلی‌متر (در مرحله توسعه)، ۱۲۷/۵ تا ۷۰/۴ میلی‌متر (در مرحله میانی رشد) و ۱۴ تا ۹/۳ میلی‌متر (در مرحله پایانی رشد) قرار داشت. به‌طوری که مقدار تبخیر-تغرق در مراحل اولیه، توسعه، میانی و پایانی رشد، به‌ترتیب ۲۸/۷، ۷۵/۲، ۵۷/۱ و ۴/۷ میلی‌متر نسبت به تیمار I_0S_0 کاهش یافت. کاهش مقدار و پتانسیل آب موجود در خاک، از علل کاهش جذب آب و مقدار تبخیر-تغرق ذرت تحت تنش‌های مذکور بود. با توجه به هدف پژوهش، مقدار تبخیر-تغرق نسبی ذرت (نسبت به شرایط استاندارد منطقه) در تیمارهای مختلف بین ۱۰۰-۶۳/۵ درصد (مرحله اولیه)، ۱۰۰-۶۲/۶ درصد (مرحله توسعه)، ۱۰۰-۵۵/۲ درصد (مرحله میانی) و ۱۰۰-۶۶/۴ درصد (مرحله پایانی) برآورد شد (شکل ۲). تأثیر دو عامل شوری و خشکی و اثر متقابل آن‌ها در تمام مراحل رشد باعث کاهش و ایجاد تفاوت معنی‌دار در مقدار تبخیر-تغرق

رشد ذرت، n : تعداد مراحل رشد ذرت که در این پژوهش برابر با عدد چهار است، A_i : ضریب حساسیت به تنش در مدل بلنک (بلنک، ۱۹۷۵)، B_i : ضریب حساسیت به تنش در مدل استوارت (استوارت و همکاران، ۱۹۷۶)، C_i : ضریب حساسیت به تنش در مدل سینگ (سینگ و همکاران، ۱۹۸۷)، λ_i : ضریب حساسیت به تنش در مدل جنسن (جنسن، ۱۹۶۸)، γ_i : ضریب حساسیت به تنش در مدل رائو (رائو و همکاران، ۱۹۸۸) و δ_i : ضریب حساسیت به تنش در مدل مینهاس (مینهاس و همکاران، ۱۹۷۴) می‌باشد.

ارزیابی مدل‌ها

در این مرحله با استفاده از مدل‌های تولید شده در پژوهش، عملکرد نسبی تحت تنش‌های شوری و خشکی تخمین زده شد. سپس با داشتن داده‌های (عملکرد نسبی) مشاهده‌ای در مزرعه و تخمین زده شده توسط مدل‌ها، اعتبار مدل‌های مختلف ارزیابی شد. برای این کار از آماره‌های ارزیابی شامل حداکثر خطا^{۱۱} (ME)، ریشه میانگین مربعات خطا^{۱۲} ($RMSE$)، ضریب تعیین^{۱۳} (R^2)، ضریب تعیین تنظیم شده^{۱۴} (R^2_{adj})، کارایی مدل‌سازی^{۱۵} (EF) و ضریب باقیمانده^{۱۶} (CRM) استفاده شد. معادلات مربوط به آماره‌های مذکور در روابط (۱۰) الی (۱۵) ارائه شد. حداقل (نزدیک به صفر) بودن آماره‌های ME ، $RMSE$ و CRM و نزدیک به یک بودن آماره‌های R^2 ، R^2_{adj} و EF ، نشان‌دهنده همبستگی بهتر بین داده‌های مشاهده‌ای و تخمینی است. در روابط (۱۰) الی (۱۵)، حروف O^{17} و P^{18} به‌ترتیب بیانگر داده‌های مشاهده‌ای در مزرعه و پیش‌بینی شده توسط مدل‌ها بود. حروف n و t نیز به‌ترتیب بیانگر تعداد تیمارها و تعداد فاکتورها (شوری و خشکی) بود.

$$ME = \max |P_i - O_i|_{i=1}^n \quad (10)$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

15 - Efficiency of modeling

16 - Coefficient of residual mass

17 - Observed

18 - Predicted

11 - Maximum error

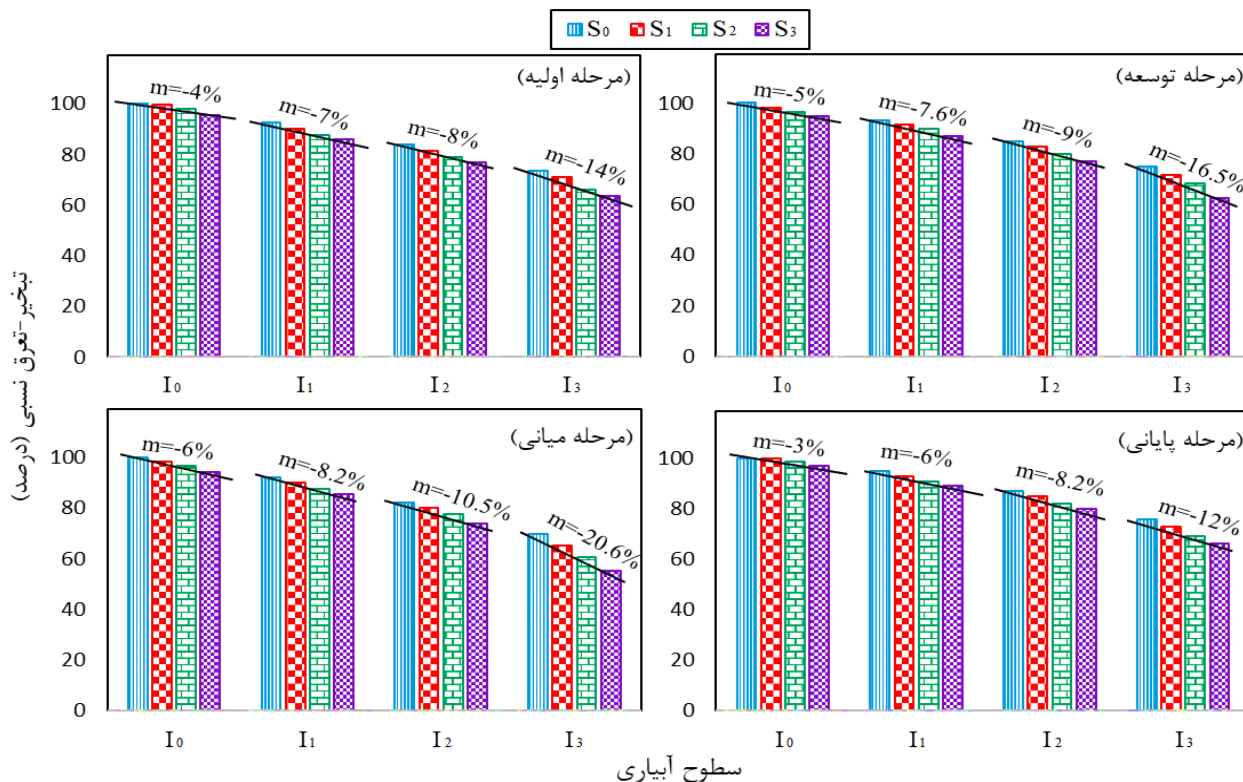
12 - Root of mean squared error

13 - Coefficient of determination

14 - Adjusted coefficient of determination

نسبی ذرت، در سطح احتمال یک درصد شد (جدول ۲). همچنین بررسی‌ها نشان داد که تأثیر توأمان تنش‌ها بر مقادیر تبخیر-تعرق نسبی در همه مراحل رشد به صورت ضرب‌پذیر بوده است. از سوی دیگر، نتایج نشان داد تأثیر سطوح مختلف تنش بر مقدار تبخیر-تعرق نسبی، در مراحل مختلف رشد متفاوت بود (جدول ۳). با توجه به شکل (۲)، شیب کاهش تبخیر-تعرق در اثر افزایش تنش‌های شوری و خشکی و همچنین افزایش حساسیت گیاه در دوره رشد، افزایش یافت. نتیجه حاصل از رویداد فوق این است که در مراحل حساس رشد ذرت می‌توان از طریق مدیریت کاهش تنش‌های مذکور، نقش به‌سزایی در افزایش تبخیر-تعرق گیاه ایفا نمود. نتایج به‌دست آمده از پژوهش‌های گذشته نیز روند مشابهی با نتایج پژوهش کنونی داشت. در پژوهشی در منطقه اهواز، مقدار تبخیر-تعرق ذرت در کل دوره رشد، تحت سه تیمار تنش شوری آب شامل S_1 ، S_2 و S_3 (۷ دسی‌زیمنس بر متر بررسی شد. در این شرایط مقدار تبخیر-تعرق نسبی ذرت (نسبت به تیمار S_1) در تیمارهای S_2 و S_3 به ترتیب برابر با ۸۷/۵ و ۷۵/۲ برآورد

شد. افزایش غلظت املاح در خاک در اثر آبیاری با آب شور، علت کاهش قابلیت جذب آب توسط گیاه و کاهش تبخیر-تعرق ذرت بود (حیدری‌نیا و همکاران، ۱۳۹۶). در پژوهشی دیگر در منطقه قزوین، مقدار تبخیر-تعرق ذرت در شرایط اعمال تنش آبی در مراحل مختلف رشد بررسی شد. تیمارها شامل اعمال تنش آبی در مراحل رشد چهار برگی، ۱۲ برگی، گل‌دهی، خمیری شدن دانه‌ها و یک تیمار شاهد تحت آبیاری کامل بود. مقدار تبخیر-تعرق نسبی در مراحل رشد مذکور به ترتیب برابر با ۸۶/۸، ۶۹/۸، ۶۵/۹ و ۷۶/۸ درصد برآورد شد. میزان حساسیت متفاوت گیاه ذرت نسبت به انجام تعرق در مراحل مختلف رشد، از علل کاهش متفاوت مقدار تبخیر-تعرق در دوره رشد ذرت گزارش شد (سعیدی و ستوده‌نیا، ۱۴۰۰). در پژوهش مذکور نیز نتیجه‌ای مشابه پژوهش حاضر به‌دست می‌آید. به این صورت که شناخت حساسیت مرحله رشد ذرت و کاستن از تنش آبی در مراحل حساس رشد (از طریق آبیاری کامل)، کمک شایانی در مدیریت آبیاری و افزایش تعرق گیاه می‌کند.



شکل ۲- تأثیر سطوح آبیاری و شوری بر مقدار تبخیر-تعرق نسبی ذرت، در مراحل مختلف رشد (m ، شیب خط است)

جدول ۲- تجزیه واریانس صفات مورد بررسی در طرح

منبع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات				عملکرد نسبی
		تبخیر-تعرق نسبی				
		مرحله اولیه	مرحله توسعه	مرحله میانی	مرحله پایانی	
تکرار	۲	۰/۱۴ ^{NS}	۰/۰۹ ^{NS}	۰/۰۵ ^{NS}	۰/۰۰۳ ^{NS}	۰/۰۱۷ ^{NS}
تنش خشکی	۳	۱۹۱۶/۲۵ ^{**}	۱۷۴۵/۱۵ ^{**}	۲۶۸۵ ^{**}	۱۷۳۲/۶ ^{**}	۴۳۳۰/۴ ^{**}
تنش شوری	۳	۱۲۱/۷۶ ^{**}	۱۳۶/۲۹ ^{**}	۱۷۵/۲۷ ^{**}	۸۹/۹ ^{**}	۲۸۸ ^{**}
تنش خشکی× تنش شوری	۹	۳/۹۷ ^{**}	۵/۹۵ ^{**}	۸/۲۲ ^{**}	۴/۴۶ ^{**}	۱۰/۴۶ ^{**}
خطا	۳۰	۰/۰۳۲	۰/۰۳۶	۰/۰۳۹	۰/۰۴۳	۰/۰۴۱

NS و **: به ترتیب عدم معنی داری و معنی داری در سطح احتمال یک درصد

جدول ۳- مقایسه میانگین اثر متقابل تنش های خشکی و شوری بر صفات مورد بررسی در طرح

تیمار	تبخیر-تعرق نسبی (درصد)				عملکرد نسبی (درصد)
	اولیه	توسعه	میانی	پایانی	
I ₀ S ₀	۱۰۰ ^{a*}	۱۰۰ ^a	۱۰۰ ^a	۱۰۰ ^a	۱۰۰ ^a
I ₀ S ₁	۹۹/۷۴ ^a	۹۷/۹ ^b	۹۸/۴ ^b	۱۰۰ ^a	۹۷/۷۴ ^b
I ₀ S ₂	۹۷/۷۹ ^b	۹۶/۴ ^c	۹۶/۷ ^c	۹۸/۹ ^b	۹۵ ^c
I ₀ S ₃	۹۵/۲۹ ^c	۹۴/۹ ^d	۹۴/۱ ^d	۹۷/۱۴ ^c	۹۲/۷۵ ^d
I ₁ S ₀	۹۲/۷۵ ^d	۹۲/۹۴ ^e	۹۲/۱۵ ^e	۹۵ ^d	۸۹/۱۳ ^e
I ₁ S ₁	۹۰/۱۶ ^e	۹۱/۶ ^f	۹۰/۱۶ ^f	۹۲/۸۵ ^e	۸۶/۱ ^f
I ₁ S ₂	۸۷/۶۷ ^f	۸۹/۷۴ ^g	۸۷/۴۲ ^g	۹۰/۷ ^f	۸۲/۷ ^g
I ₁ S ₃	۸۵/۷۶ ^g	۸۶/۷۶ ^h	۸۵/۵ ^h	۸۹/۲۸ ^g	۷۹/۹ ^h
I ₂ S ₀	۸۳/۸۱ ^h	۸۴/۹۴ ⁱ	۸۲/۳۲ ⁱ	۸۷/۱۴ ^h	۷۸/۱۸ ⁱ
I ₂ S ₁	۸۱/۳۷ ⁱ	۸۲/۷۵ ^j	۸۰ ^j	۸۵ ⁱ	۷۴/۹ ^j
I ₂ S ₂	۷۸/۷۸ ^j	۸۰ ^k	۷۷/۵ ^k	۸۲/۱۴ ^j	۷۱/۲۷ ^k
I ₂ S ₃	۷۶/۸۷ ^k	۷۷/۰۷ ^l	۷۳/۷ ^l	۸۰ ^k	۶۶/۴۶ ^l
I ₃ S ₀	۷۳/۶۹ ^l	۷۵/۰۵ ^m	۶۹/۵۶ ^m	۷۵/۷ ^l	۵۹/۷ ^m
I ₃ S ₁	۷۱/۱۵ ^m	۷۱/۵۷ ⁿ	۶۵/۱ ⁿ	۷۲/۸۵ ^m	۵۵/۴۵ ⁿ
I ₃ S ₂	۶۶/۰۷ ⁿ	۶۸/۳۴ ^o	۶۰/۴ ^o	۶۹/۲۸ ⁿ	۴۹/۴ ^o
I ₃ S ₃	۶۳/۵۳ ^o	۶۲/۶۲ ^p	۵۵/۲۱ ^p	۶۶/۴۲ ^o	۴۲/۶۵ ^p

*: حروف غیر مشترک، نشان دهنده تفاوت معنی دار در بین تیمارهاست

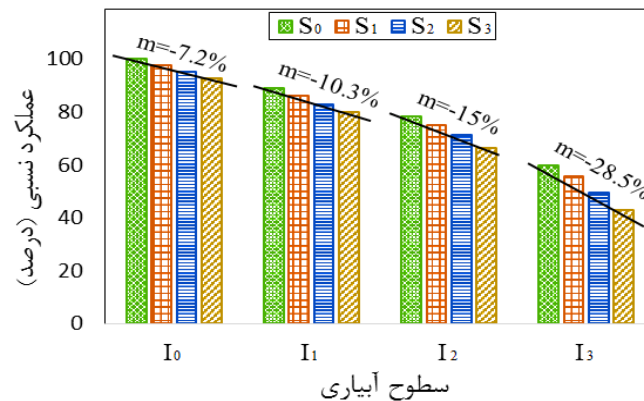
عملکرد نسبی

در تیمارهای مختلف شوری (از تیمار S₀ تا S₃) مقدار عملکرد زیست توده خشک ذرت به ترتیب برابر با ۱۵۳۸۵، ۱۵۰۳۷، ۱۴۶۱۵ و ۱۴۲۶۹ تن بر هکتار (در تیمار I₀)، ۱۳۷۱۴، ۱۳۲۴۵، ۱۲۷۲۵ و ۱۲۲۹۳ تن بر هکتار (در تیمار I₁)، ۱۲۰۲۹، ۱۱۵۲۵، ۱۰۹۶۶ و ۱۰۲۲۵ تن بر هکتار (در تیمار I₂)، ۹۱۸۵، ۸۵۳۰، ۷۶۰۰ و ۶۵۶۳ تن بر هکتار (در تیمار I₃) اندازه گیری شد. با اعمال تنش شوری، مقدار عملکرد ذرت نسبت به شرایط استاندارد منطقه (عملکرد نسبی) در تیمارهای I₀ تا I₃ به ترتیب در بازه ۱۰۰-۹۲/۷، ۸۹/۱-۷۸/۱، ۶۶/۴-۵۹/۷ و ۴۲/۶ درصد برآورد شد. نتایج نشان داد اعمال تنش های شوری و خشکی و اثر

متقابل آن ها باعث کاهش معنی دار مقدار عملکرد زیست توده خشک ذرت در سطح احتمال یک درصد شد (جدول ۲). تأثیر توأمان تنش ها و آندرکنش بین آن ها بر عملکرد محصول نیز به صورت ضرب پذیر بود. همچنین با افزایش تنش های خشکی و شوری، شیب کاهش عملکرد نسبی محصول افزایش یافت (شکل ۳). تنش های مذکور به واسطه تأثیر بر کاهش جذب آب و تبخیر-تعرق گیاه، موجب کاهش تولید اندام های گیاهی شدند. از سوی دیگر اعمال تنش های فوق در زمان های حساس رشد (مانند گل دهی ذرت) باعث اختلال در عمل گرده افشانی، عقیم شدن گیاه و مانعی در تولید بلال و دانه ذرت بود. در پژوهش های گذشته نیز، از تنش های شوری و خشکی به عنوان عوامل

کاهش عملکرد محصول ذرت یاد شده است. در پژوهشی در شمال منطقه شاهرود، در اثر حذف یک مرحله آبیاری در مراحل رشد رویشی، گل‌دهی و دانه‌بندی ذرت، مقدار عملکرد بیولوژیکی ذرت به ترتیب ۳۲/۸۲، ۳۸/۰۹ و ۱۸/۴۹ کاهش یافت. نتایج نشان داد اعمال تنش آبی در مرحله دانه‌بندی و گل‌دهی به ترتیب کمترین و بیشترین اثر را بر مقدار عملکرد بیولوژیک ذرت داشت (محمدی بهمدی و آرمین، ۱۳۹۶). طبق نتایج پژوهش مذکور، مرحله گل‌دهی حساس‌ترین مرحله رشد ذرت به تنش آبی بوده و با اعمال مدیریت آبیاری (انجام آبیاری کامل) در این مرحله رشد، می‌توان از کاهش شدید عملکرد محصول جلوگیری کرد. در پژوهشی در منطقه لرستان، مقدار عملکرد ماده خشک ذرت علوفه‌ای در شرایط تأمین ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز

آبی گیاه، به ترتیب برابر با ۲۱۵۶۰، ۱۹۵۰۰ و ۱۲۵۶۰ کیلوگرم در هکتار برآورد شد (سعیدی‌نیا و همکاران، ۱۳۹۸). در پژوهش دیگر گزارش شد که اعمال تنش آبی قبل از مرحله گل‌دهی ذرت، بر مقدار عملکرد و بهره‌وری مصرف آب بسیار مؤثر بود. به طوری که افزایش تنش قبل از گل‌دهی، بر شدت کاهش عملکرد و بهره‌وری مصرف آب نسبت به مراحل دیگر رشد افزود (اکبری نودهی، ۱۳۹۶). در پژوهشی در منطقه قزوین، عملکرد ذرت تحت چهار سطح تنش شوری آب شامل ۰/۵، ۲/۱، ۳/۵ و ۵/۷ دسی‌زیمنس بر متر بررسی شد. بر اساس نتایج به دست آمده، مقدار عملکرد زیست توده خشک ذرت تحت تیمارهای مذکور به ترتیب ۱۵/۲۱، ۱۴/۳۲، ۱۳/۰۸ و ۱۱/۲۹ تن بر هکتار برآورد شد (سعیدی و همکاران، ۲۰۲۱).



شکل ۳- تأثیر سطوح آبیاری و تنش شوری بر مقدار عملکرد نسبی ذرت، در مراحل مختلف رشد

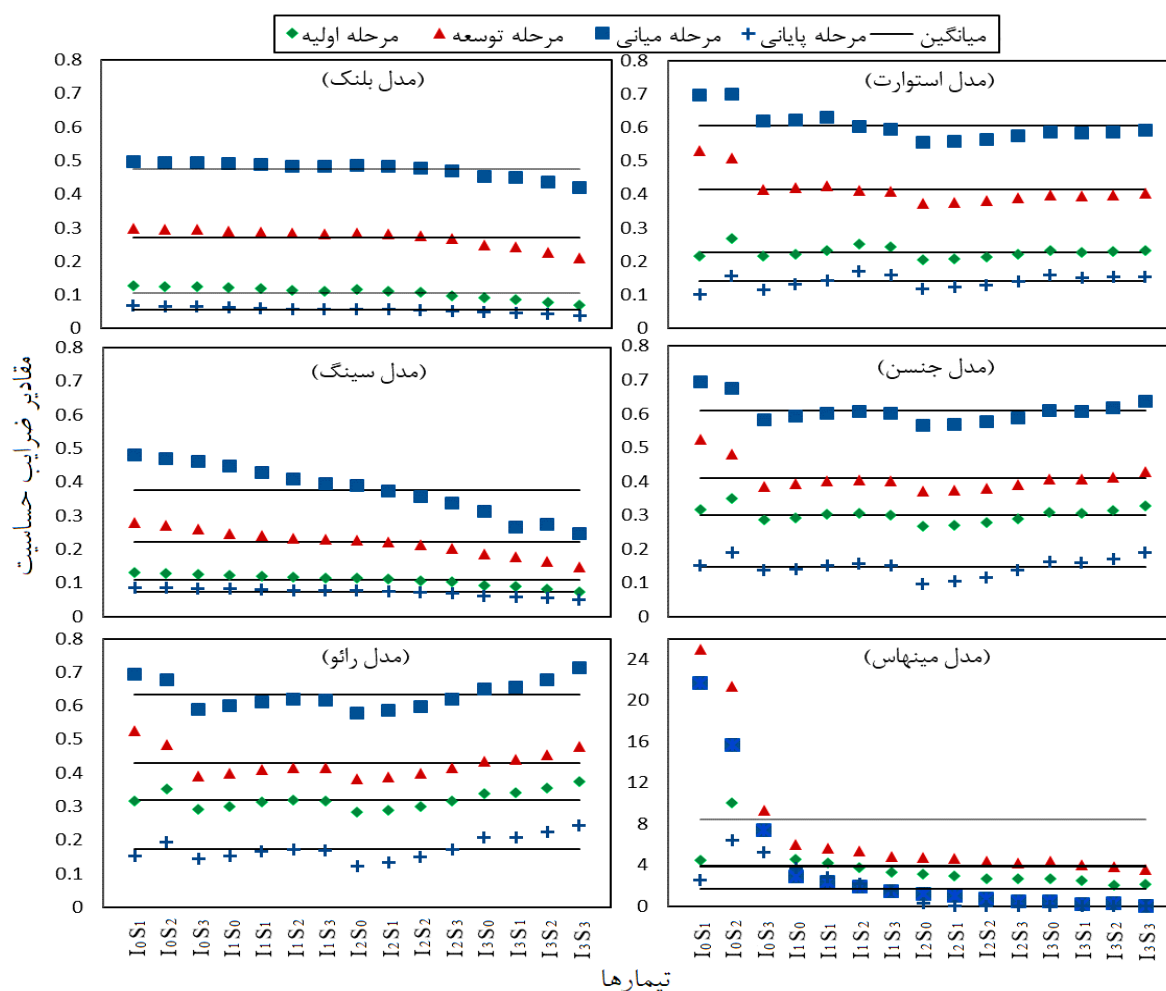
مدل‌سازی ضرایب حساسیت درون فصلی

با عنایت به معادلات مدل‌های مختلف در روابط (۴) الی (۹)، ضرایب این معادلات توسط نرم‌افزار SPSS برای تیمارهای پژوهش حاضر برآورد شد. در تیمارهای مختلف مقدار ضرایب حساسیت در مدل‌های بلنک (A)، استوارت (B)، سینگ (C)، جنسن (λ)، راثو (γ) و مینهاس (δ) به ترتیب در بازه ۰/۰۷ - ۰/۱۲۸، ۰/۲۰۵ - ۰/۲۶۸، ۰/۰۷ - ۰/۱۳، ۰/۲۷۱ - ۰/۳۴۹، ۰/۲۸۲ - ۰/۳۷۴، ۰/۰۸ - ۰/۱۰۵ (مرحله اولیه رشد)، ۰/۲۰۹ - ۰/۲۹۸، ۰/۳۷۴ - ۰/۵۳۱، ۰/۱۴۸ - ۰/۲۸، ۰/۳۷ - ۰/۵۲۵، ۰/۳۸۳ - ۰/۵۲۷، ۰/۳۵۵ - ۰/۷۰۱ (مرحله توسعه)، ۰/۴۲ - ۰/۴۹۸، ۰/۷۰۱ - ۰/۷۱۲، ۰/۲۴۷ - ۰/۴۸، ۰/۶۹۳ - ۰/۵۶۵، ۰/۵۷۹ - ۰/۷۱۲

۰/۰۳۹ - ۰/۰۶۸ (مرحله میانی رشد) و ۰/۰۳۸ - ۰/۰۶۹ (مرحله پایانی رشد) برآورد شد (شکل ۴). نتایج نشان داد که مقادیر ضرایب در مدل‌های و مراحل مختلف رشد یکسان نبود. هر مرحله‌ای از رشد ذرت که نسبت به تیمارهای تنش حساس‌تر بود، مقدار ضرایب حساسیت در آن مرحله بیشتر بود. به این دلیل که در مرحله حساس رشد، تأثیر تنش‌ها بر کاهش مقدار تبخیر-تعرق واقعی گیاه و عملکرد محصول بیشتر بوده است. در این پژوهش مراحل رشد میانی، توسعه، اولیه و پایانی رشد از حساسیت بیشتر به کمتر رتبه‌بندی شد. از این رو اعمال تنش‌های شوری و خشکی در مراحل میانی و

پایانی رشد ذرت، به ترتیب بیشترین و کمترین تأثیر را بر کاهش تبخیر-تعرق و عملکرد نسبی محصول داشت. علت این بود که در مرحله میانی رشد به دلیل آغاز تشکیل میوه، حساسیت گیاه بیشتر بود و در مرحله پایانی رشد نیز به دلیل رسیدگی محصول و تکمیل دوره رشد، حساسیت گیاه کمتر بود. از سوی دیگر در شکل (۴) مشاهده شد که با تغییر مقدار تنش در تیمارهای مختلف، مقدار ضرایب حساسیت با نوسان همراه بود. البته مقدار پراکندگی ضرایب در مدل‌های مختلف، متفاوت بود. به طوری که انحراف از میانگین مقادیر ضرایب در مدل‌های بلنک، استوارت، جنسن، رائو و مینهاس به ترتیب برابر با ۰/۱۰۷، ۰/۲۲۷، ۰/۱۰۸، ۰/۳۰۱، ۰/۳۲ و ۳/۹۰۲ (مرحله اولیه)، ۰/۲۷۱، ۰/۴۱۶، ۰/۲۲، ۰/۴۱، ۰/۴۲۹ و ۸/۴۲۲ (مرحله توسعه)، ۰/۴۷۳، ۰/۶۰۴، ۰/۳۷۶، ۰/۶۰۸، ۰/۶۳۲ و ۳/۸۴۶ (مرحله میانی) و ۰/۵۵، ۰/۱۴، ۰/۰۷۲، ۰/۱۴۷، ۰/۱۷۳ و ۱/۶۴۴ (مرحله پایانی) برآورد شد. در نهایت میانگین ضرایب (در تیمارها) در روابط (۴) الی (۹) وارد شد و مدل‌های مورد نظر به شرح جدول (۴) تولید شد.

پایانی رشد ذرت، به ترتیب بیشترین و کمترین تأثیر را بر کاهش تبخیر-تعرق و عملکرد نسبی محصول داشت. علت این بود که در مرحله میانی رشد به دلیل آغاز تشکیل میوه، حساسیت گیاه بیشتر بود و در مرحله پایانی رشد نیز به دلیل رسیدگی محصول و تکمیل دوره رشد، حساسیت گیاه کمتر بود. از سوی دیگر در شکل (۴) مشاهده شد که با تغییر مقدار تنش در تیمارهای مختلف، مقدار ضرایب حساسیت با نوسان همراه بود. البته مقدار پراکندگی ضرایب در مدل‌های مختلف، متفاوت بود. به طوری که انحراف از میانگین مقادیر ضرایب در مدل‌های بلنک، استوارت، جنسن، رائو و مینهاس به ترتیب برابر با ۰/۱۰۷، ۰/۰۱۶، ۰/۰۱۷، ۰/۰۲۱، ۰/۰۲۷ و ۲/۱۵ (مرحله اولیه)، ۰/۰۴۵، ۰/۰۳۸، ۰/۰۴۱، ۰/۰۴۱ و ۹/۸۱۵ (مرحله توسعه)، ۰/۰۲۳، ۰/۰۴۴، ۰/۰۷۶، ۰/۰۳۶، ۰/۰۴۲ و ۶/۳۹ (مرحله میانی) و ۰/۰۰۸، ۰/۰۱۹، ۰/۰۱۱، ۰/۰۲۷، ۰/۰۳۵ و ۲/۱۳ (مرحله



شکل ۴- مقادیر ضرایب حساسیت برآورد شده مدل‌ها، در تیمارها و مراحل مختلف رشد

جدول ۴- معادلات تولید شده برای مدل‌های مورد بررسی در این پژوهش

نام مدل	معادله مدل
بلنک	$\frac{Y_s}{Y_m} = 0.107 \left(\frac{ET_{s1}}{ET_{m1}} \right) + 0.271 \left(\frac{ET_{s2}}{ET_{m2}} \right) + 0.473 \left(\frac{ET_{s3}}{ET_{m3}} \right) + 0.055 \left(\frac{ET_{s4}}{ET_{m4}} \right)$
استوارت	$\frac{Y_s}{Y_m} = 1 - \left[0.227 \left(1 - \frac{ET_{s1}}{ET_{m1}} \right) + 0.416 \left(1 - \frac{ET_{s2}}{ET_{m2}} \right) + 0.604 \left(1 - \frac{ET_{s3}}{ET_{m3}} \right) + 0.14 \left(1 - \frac{ET_{s4}}{ET_{m4}} \right) \right]$
سینگ	$\frac{Y_s}{Y_m} = 0.108 \left(1 - \left(1 - \frac{ET_{s1}}{ET_{m1}} \right)^2 \right) + 0.22 \left(1 - \left(1 - \frac{ET_{s2}}{ET_{m2}} \right)^2 \right) + 0.376 \left(1 - \left(1 - \frac{ET_{s3}}{ET_{m3}} \right)^2 \right) + 0.072 \left(1 - \left(1 - \frac{ET_{s4}}{ET_{m4}} \right)^2 \right)$
جنسن	$\frac{Y_s}{Y_m} = \left(\frac{ET_{s1}}{ET_{m1}} \right)^{0.301} \times \left(\frac{ET_{s2}}{ET_{m2}} \right)^{0.41} \times \left(\frac{ET_{s3}}{ET_{m3}} \right)^{0.608} \times \left(\frac{ET_{s4}}{ET_{m4}} \right)^{0.147}$
رائو	$\frac{Y_s}{Y_m} = \left(1 - 0.32 \left(1 - \frac{ET_{s1}}{ET_{m1}} \right) \right) \times \left(1 - 0.429 \left(1 - \frac{ET_{s2}}{ET_{m2}} \right) \right) \times \left(1 - 0.632 \left(1 - \frac{ET_{s3}}{ET_{m3}} \right) \right) \times \left(1 - 0.173 \left(1 - \frac{ET_{s4}}{ET_{m4}} \right) \right)$
مینهایس	$\frac{Y_s}{Y_m} = \left(1 - \left(1 - \frac{ET_{s1}}{ET_{m1}} \right)^2 \right)^{3.902} \times \left(1 - \left(1 - \frac{ET_{s2}}{ET_{m2}} \right)^2 \right)^{8.422} \times \left(1 - \left(1 - \frac{ET_{s3}}{ET_{m3}} \right)^2 \right)^{3.846} \times \left(1 - \left(1 - \frac{ET_{s4}}{ET_{m4}} \right)^2 \right)^{1.644}$

اعتبارسنجی مدل‌ها

برای ارزیابی مدل‌های ارائه شده در جدول (۴)، مقدار تبخیر-تعرق نسبی واقعی در چهار مرحله رشد ذرت، در مدل‌های مذکور قرار داده شد و مقدار عملکرد نسبی محصول تخمین زده شد. برای اعتبارسنجی توان مدل‌ها در تخمین عملکرد نسبی، از آماره‌های ارزیابی R^2_{adj} ، R^2 ، EF ، ME ، $RMSE$ و CRM استفاده شد و مدل‌ها در جدول (۵) رتبه‌بندی شدند. نتایج نشان داد در مدل‌های جمع‌پذیر، مدل استوارت با آماره‌های ارزیابی ME ، R^2_{adj} ، R^2 ، $RMSE$ و EF به ترتیب برابر با ۰/۰۲۴، ۰/۰۱۲، ۰/۹۹۶، ۰/۹۹۵، ۰/۹۹۴ و ۷۲×۱۰^{-۴} به عنوان مدل بهینه انتخاب شد. در مدل‌های ضرب‌پذیر نیز مدل جنسن با آماره‌های مذکور برابر با ۰/۰۲۹، ۰/۰۱۵، ۰/۹۹۲، ۰/۹۹۱، ۰/۹۹۲ و ۳۱×۱۰^{-۴} به عنوان مدل بهینه معرفی شد. آماره CRM نشان داد مدل رائو، مدل بیش برآورد و مدل‌های بلنک، استوارت، سینگ، جنسن و مینهایس مدل‌های کم

برآورد بودند. کارایی مدل‌سازی نشان داد که در شرایط پژوهش حاضر، برای انتخاب مدل بهینه به ترتیب مدل‌های استوارت، جنسن، رائو، بلنک، سینگ و مینهایس دارای اولویت بودند. از این‌رو در شکل (۵)، صحت اولویت‌بندی مدل‌های مذکور قابل مشاهده است. در نتیجه دستاورد کاربردی پژوهش این بود که با استفاده از مدل بهینه، می‌توان عملکرد نسبی ذرت را در شرایط تنش‌های شوری و خشکی تخمین زد. همچنین در صورت مدیریت مقدار تنش‌های شوری و خشکی در مراحل رشد، امکان تخمین عملکرد نسبی ذرت براساس مقدار تبخیر-تعرق نسبی آن فراهم شد. در گذشته نیز پژوهش‌های مشابهی در این زمینه انجام شد. به‌طوری که برای انتخاب رقم مناسب ذرت در نواحی خشک چین، پاسخ عملکرد ذرت به تنش خشکی در مراحل مختلف رشد مدل‌سازی شد. تنش خشکی (با ۱۶ تیمار آبیاری) در مراحل رشد رویشی، گل‌دهی و پُر شدن دانه‌ها اعمال شد. برای مدل‌سازی توابع تولید-آب،

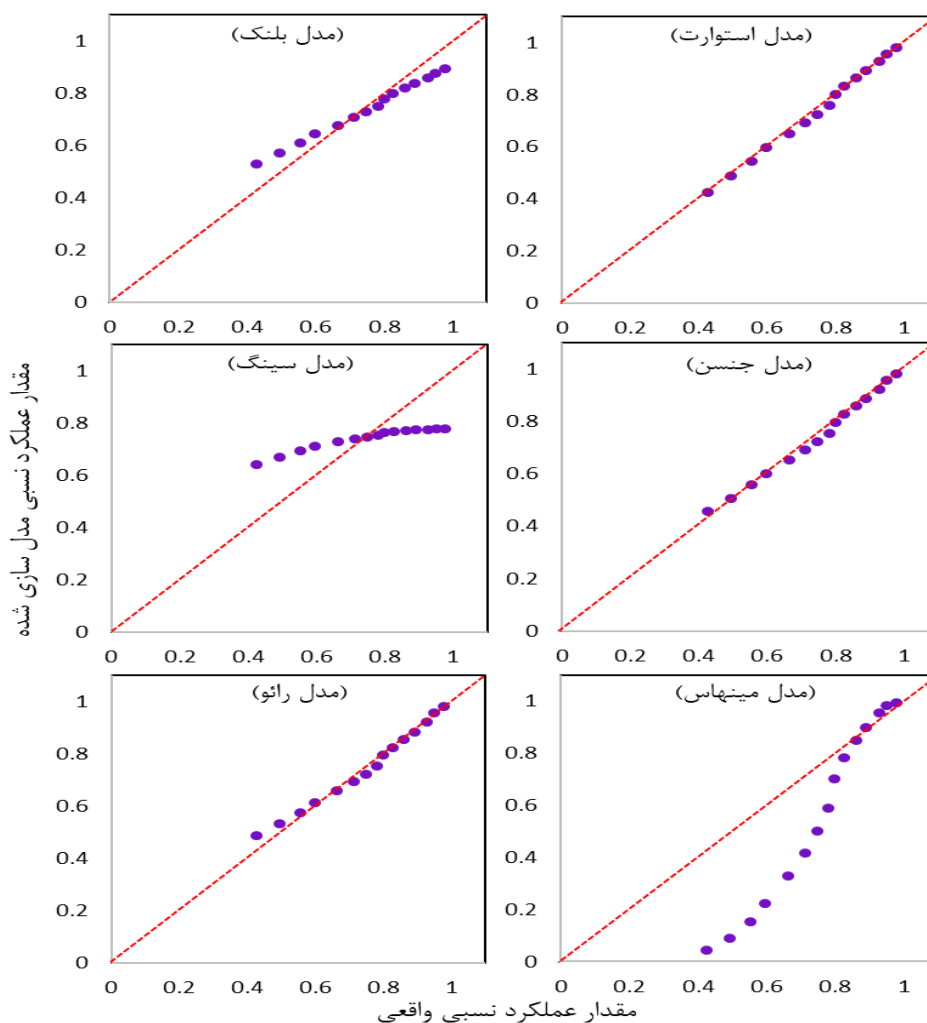
در سایر اقلیم‌ها (مانند اقلیم چین) داشته است. در پژوهش دیگر در بلژیک، عملکرد نسبی ذرت در شرایط تنش خشکی توسط مدل جنسن مدل‌سازی شد. نتایج نشان داد ضرایب حساسیت λ در هفته‌های ۴-۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰-۱۲ و ۱۳-۱۴ رشد ذرت، به ترتیب برابر با ۰/۰۸۸، ۰/۳۸۳، ۱/۱۲۱، ۰/۵۴۷، ۰/۱۱۷ و ۰/۰۷۶ برآورد شد (کیپکوریر و ریس، ۲۰۰۲).

از مدل‌های بلنک، استوارت، رائو، جنسن و مینهاس استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل رائو با ضرایب حساسیت ۰/۷۷۲، ۰/۳۴۳ و ۰/۹۱۶، بهترین مدل برای انتخاب رقم بذر مناسب در شرایط کم آبی بود. همچنین تأمین کمبود آب و جلوگیری از تنش خشکی در مرحله گل‌دهی ذرت توصیه شد (شی و همکاران، ۲۰۲۰). نتایج پژوهش مذکور نشان داد که مدل‌های استفاده شده در پژوهش حاضر، قابلیت مطلوبی برای تخمین عملکرد ذرت تحت تنش آبی

جدول ۵- آماره‌های ارزیابی اعتبار مدل‌ها

نام مدل	ME	RMSE	R ²	R ² _{adj}	EF	CRM
بلنک	۰/۱۰۱ ^{(۳)*}	۰/۰۵۵ ^(۴)	۰/۹۹۷ ^(۱)	۰/۹۹۶ ^(۱)	۰/۸۸۵ ^(۳)	۱۲۶×۱۰ ^{-۴} ^(۳)
استوارت	۰/۰۲۴ ^(۱)	۰/۰۱۲ ^(۱)	۰/۹۹۶ ^(۲)	۰/۹۹۵ ^(۲)	۰/۹۹۴ ^(۱)	۷۲×۱۰ ^{-۴} ^(۳)
سینگ	۰/۲۱۴ ^(۵)	۰/۱۲۴ ^(۵)	۰/۹۴۴ ^(۵)	۰/۹۳۵ ^(۵)	۰/۴۲۴ ^(۵)	۱۲۰×۱۰ ^{-۴} ^(۳)
جنسن	۰/۰۲۹ ^(۲)	۰/۰۱۵ ^(۲)	۰/۹۹۲ ^(۳)	۰/۹۹۱ ^(۳)	۰/۹۹۲ ^(۳)	۳۱×۱۰ ^{-۴} ^(۱)
رائو	۰/۰۶۱ ^(۳)	۰/۰۲۳ ^(۳)	۰/۹۸۶ ^(۴)	۰/۹۸۴ ^(۴)	۰/۹۸ ^(۳)	۳۱×۱۰ ^{-۴} ^(۱)
مینهاس	۰/۴۰۵ ^(۶)	۰/۲۴۸ ^(۶)	۰/۷۷ ^(۶)	۰/۷۶۶ ^(۶)	۰/۱۲۸ ^(۶)	۲۴۱۱×۱۰ ^{-۴} ^(۵)

*: اعداد داخل پرانتز نشان‌دهنده اولویت انتخاب مدل‌ها بر اساس شاخص‌های آماری است



شکل ۵- مقایسه توان انواع مدل‌ها در تخمین عملکرد نسبی ذرت، تحت شرایط شوری و خشکی

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، عملکرد نسبی و تبخیر-تعرق نسبی ذرت در چهار مرحله رشد اولیه، توسعه، میانی و پایانی، تحت تنش‌های شوری و خشکی بررسی شد. مقدار تبخیر-تعرق نسبی ذرت از تیمار I_0S_0 تا I_3S_3 بین ۱۰۰-۶۳/۵ درصد (مرحله اولیه)، ۱۰۰-۶۲/۶ درصد (مرحله توسعه)، ۱۰۰-۵۵/۲ درصد (مرحله میانی) و ۱۰۰-۶۶/۴ درصد (مرحله پایانی) برآورد شد. مقدار عملکرد نسبی نیز در تیمارهای مذکور در بازه ۱۰۰-۴۲/۶ درصد قرار گرفت. تنش‌های خشکی و شوری به دلیل کاهش مقدار و پتانسیل آب موجود در خاک، باعث کاهش جذب آب و تبخیر-تعرق گیاه و کاهش تولید زیست توده و عملکرد محصول شد. در این بین، تنش آبی نسبت به تنش شوری تأثیر بیشتری داشت. نتایج نشان داد اگر امکان کاهش تنش‌های مذکور در مراحل حساس رشد ذرت (مرحله میانی یا زمان گل‌دهی و بلال‌دهی) وجود داشته باشد، افزایش چشمگیری

در مقدار تبخیر-تعرق و عملکرد محصول ایجاد می‌شود. از سوی دیگر با هدف مدل‌سازی عملکرد نسبی بر اساس تبخیر-تعرق نسبی (در مراحل رشد)، مدل‌های بلنک، استوارت، سینگ، جنسن، رائو و میناس به کار گرفته شد. نتایج نشان داد در هر مرحله‌ای از رشد ذرت که نسبت به تیمارهای تنش حساس‌تر بود، مقدار ضرایب حساسیت مدل‌ها بیشتر بود. به طوری که در مرحله حساس میانی رشد، تأثیر تنش‌ها بر کاهش مقدار تبخیر-تعرق واقعی گیاه و عملکرد محصول بیشتر بود. در مرحله انتخاب مدل‌های بهینه، مدل استوارت و مدل جنسن به عنوان مدل‌های بهینه معرفی شدند. نتیجه کلی این‌که با استفاده از مدل‌های استوارت و جنسن، می‌توان عملکرد نسبی ذرت را برای شرایط تنش‌های شوری و خشکی در منطقه قزوین تخمین زد. همچنین در صورت مدیریت متفاوت کم‌آبیاری و شوری آب در مراحل مختلف رشد، امکان تخمین عملکرد نسبی ذرت بر اساس مقدار تبخیر-تعرق نسبی آن فراهم شد.

فهرست منابع

۱. ابراهیمی زاده، م. ع. و ع. م. حسن‌لی. ۱۳۸۷. بررسی توسعه ریشه ذرت و تأثیر آن بر کاهش مصرف آب در روش‌های مختلف آبیاری با پساب در دشت نیمه‌خشک کربال در استان فارس. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. ۱۲(۴۴): ۸۲-۶۹.
۲. اکبری نوده‌ی، د. ۱۳۹۶. تأثیر تنش خشکی در مراحل مختلف رشد بر عملکرد و بهره‌وری مصرف آب ذرت. مجله مدیریت آب و آبیاری. ۷(۲): ۳۰۵-۳۰۸.
۳. جارالهی، ر. ۱۳۸۰. تعیین ضریب آب سهل‌الوصول در مراحل مختلف رشد برای ذرت دانه‌ای در کرج. مجله علوم آب و خاک. ۱۵(۲): ۲۹۸-۲۹۰.
۴. حیدری‌نیا، م. ناصری، ع. برومندنسب، س. و م. الباجی. ۱۳۹۶. تأثیر آبیاری با آب شور بر تبخیر و تعرق و کارایی مصرف آب ذرت در مدیریت‌های مختلف زراعی. مجله علوم و مهندسی آبیاری. ۴۰(۱/۱): ۹۹-۱۱۰.
۵. سعیدی، ر. ستوده‌نیا، ع. رمضان‌ی اعتدالی، ه. کاویانی، ع. و ب. نظری. ۱۳۹۷. مطالعه تأثیر تنش‌های شوری آب و حاصلخیزی خاک، بر تبخیر و تعرق ذرت علوفه‌ای. مجله تحقیقات آب و خاک ایران. ۴۹(۴): ۹۴۵-۹۵۴.
۶. سعیدی، ر. رمضان‌ی اعتدالی، ه. ستوده‌نیا، ع. نظری، ب. و ع. کاوریانی. ۱۳۹۹. مدیریت مصرف آب شور و کود نیتروژن در کشت ذرت. مجله آب و خاک. ۳۴(۴): ۸۶۱-۸۷۷.
۷. سعیدی، ر. و ع. ستوده‌نیا. ۱۴۰۰. واکنش عملکرد به تبخیر-تعرق ذرت، تحت تأثیر تنش آبی در مراحل مختلف رشد (در دشت قزوین). مجله تحقیقات آب و خاک ایران. ۵۲(۳): ۶۱۱-۶۲۰.

۸. سعیدی نیا، م. نصراللهی، ع. ح. و م. شریفی پور. ۱۳۹۸. بررسی توانایی شاخص تنش آبی گیاه در برنامه ریزی آبیاری و برآورد میزان عملکرد ذرت علوفه ای. مجله تحقیقات آب و خاک ایران. ۵۰(۳): ۵۵۵-۵۶۵.
۹. محمدی، م. محمدی قلعه نی، م. و ک. ابراهیمی. ۱۳۹۰. تغییرات زمانی و مکانی کیفیت آب زیرزمینی دشت قزوین. مجله پژوهش آب ایران. ۵(۸): ۴۱-۵۲.
۱۰. محمدی بهمدی، م. و م. آرمین. ۱۳۹۶. اثر تنش خشکی بر عملکرد و اجزای عملکرد ارقام مختلف ذرت در شرایط کشت تأخیری. نشریه تحقیقات کاربردی اکوفیزیولوژی گیاهی. ۴(۱): ۱۷-۳۴.
۱۱. همتی، ر. مقصودی، ک. و ا. یحیی. ۱۳۹۳. پاسخ مورفولوژیک ذرت به تنش خشکی در مراحل مختلف رشد در منطقه نیمه خشک شمال فارس. مجله تولید و فراوری محصولات زراعی و باغی. ۴(۱۱): ۶۷-۷۴.
12. Allen, R. G. Pereira, L. S. Raes, D. and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation Drainage Paper No.56, 1-326.
13. Azizian, A. and A. R. Sepaskhah. 2014. Maize response to water, salinity and nitrogen levels: yield-water relation, water-use efficiency and water uptake reduction function. Journal of Plant Production. 8(2): 183- 214.
14. Blank, H. 1975. Optimal irrigation decisions with limited water. Ph. D. dissertation, Colorado State University, Fort Collins, CO.
15. Doorenbos, J. and W. O. Pruitt. 1977. Guidelines for predicting crop water requirements, Food and agriculture organization (FAO) of the United Nations, Irrigation and drainage paper No. 24. Rome, Italy.
16. Jensen, M. E. 1968. Water consumption by agricultural plants. In: T.T. Kozlowski (ed.), Water deficits in plant growth. (pp. 1-22). Academic Press, New York, NY.
17. Kipkorir, E. D. and D. Raes. 2002. Transformation of yield response factor into Jensen's sensitivity index. Journal of Irrigation and Drainage Systems. 16: 47-52.
18. Lacerda, C. F. Ferreira, J. F. S. Liu, X. and D. L. Suarez. 2016. Evapotranspiration as a criterion to estimate nitrogen requirement of maize under salt stress. Journal of Agronomy and Crop Science. 202 (2016): 192-202.
19. Minhas, B. Parikh, K. and T. Srinivasan. 1974. toward the structure of a production function for wheat yields with dated inputs of irrigation water. Journal of Water Resource. 10(3): 383-393.
20. Nielsen, R. L. 2002. Drought and heat stress effects on corn pollination. Journal of Agronomy (Purdue). 196: 19-25.
21. Rao, N. Sarma, P. and S. Chander. 1988. A simple dated water-production function for use in irrigated agriculture. Journal of Agriculture water management. 13(1): 25-32.
22. Saeidi, R. Ramezani Etedali, H. Sotoodenia, A. Kaviani, A. and B. Nazari. 2021. Salinity and Fertility Stresses modifies K_s and Readily Available Water Coefficients in Maize (Case study: Qazvin region). Journal of Irrigation Science. 39: 299- 313.
23. She, R. Tong, L. Du, T. and M. Shukla. 2020. Response and Modeling of Hybrid Maize Seed Vigor to Water Deficit at Different Growth Stages. Journal of Water. 12(11): 1-20.
24. Singh, P. Wolkewitz, H. and R. Kumar. 1987. Comparative performance of different crop production functions for wheat (*Triticum aestivum* L.). Journal of Irrigation Science, 8(4): 273-290.
25. Stewart, J. Hagan, R. and W. Pruitt. 1976. Production functions and predicted irrigation programmers for principal crops as required for water resources planning and increased water use efficiency. Final Report. Department of Interior, Washington, D.C.
26. Xin, H. Peiling, Y. Shumei, R. Yankai L. Guangyu, J. and L. Lianhao. 2016. Quantitative response of oil sunflower yield to evapotranspiration and soil salinity with saline water irrigation. Journal of Agriculture and Biology Engineering. 9(2): 63-73.

توسعه توابع تولید غلات مهم دشت قزوین در شرایط کم آبی و تنش شوری با استفاده از مدل AquaCrop و شبکه عصبی مصنوعی

سارا بلوک آذری، حسین بابازاده^۱، نیازعلی ابراهیمی پاک، سیدحبیب موسوی جهرمی و

هادی رمضانی اعتدالی

دانشجوی دکتری، گروه علوم و مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

sara.bulukazari@yahoo.com

استاد، گروه علوم و مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

h_babazadeh@srbiau.ac.ir

دانشیار، بخش آبیاری موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

nebrahimipak@yahoo.com

استاد، گروه عمران-مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرقدس، تهران، ایران.

h-mousavi@srbiau.ac.ir

دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

ramezani@eng.ikiu.ac.ir

دریافت: اردیبهشت ۱۴۰۰ و پذیرش: شهریور ۱۴۰۰

چکیده

در بهره‌برداری از آب‌های با کیفیت پایین در مناطق خشک و نیمه‌خشک، مدیریت آبیاری برای افزایش بهره‌وری مصرف آب ضروری می‌باشد. تعیین تابع تولید آب-شوری- عملکرد ابزار مهمی برای مدیریت آبیاری است. در این پژوهش، توانایی مدل گیاهی AquaCrop در مدیریت‌های مختلف آبیاری و در سطوح مختلف شوری برای غلات عمده دشت قزوین شامل گندم، جو و ذرت ارزیابی شد. نتایج بررسی، ضریب تبیین را برای عملکرد گندم، جو و ذرت به ترتیب ۰/۹۷، ۰/۸۶ و ۰/۹۱ نشان داد. بنابراین مدل مزبور در شرایط شوری و کم‌آبیاری با تقریب خوبی می‌تواند عملکرد را ارزیابی نماید. برای تعیین توابع تولید بهینه هر محصول نتایج مدل گیاهی با سه مدل رگرسیون خطی، غیرخطی و همچنین شبکه عصبی مصنوعی مقایسه گردید. نتایج نشان داد که مدل شبکه عصبی توانست عملکرد را نسبت به مدل AquaCrop با همبستگی بالا (۰/۹۹) برآورد نماید. در صورتی که این مقادیر در تابع خطی برای گیاه گندم و جو و ذرت به ترتیب ۰/۹۸، ۰/۹۵، ۰/۷۸ و در تابع نمایی ۰/۹۲، ۰/۸۶ و ۰/۸۱ بود. همچنین، خطای محاسبه شده در روش شبکه عصبی برای گیاه گندم، جو، ذرت به ترتیب ۴۰/۱۶، ۶۲/۰۹ و ۵۷/۰۸ کیلوگرم بود که این میزان به ترتیب در مقایسه با مدل خطی ۷۵٪، ۷۰٪ و ۹۵٪ و نسبت به مدل نمایی ۹۰٪، ۸۵٪ و ۹۳٪ کاهش داشت. بهترین شبکه آموزش دیده برای تعیین تابع تولید آب-شوری برای جو و گندم پنج نرون و برای ذرت هفت نرون در ساختار شبکه‌ای تک لایه معرفی گردید. تحلیل حساسیت به کار رفته برای گیاهان گندم و جو نشان داد که مدل‌های رگرسیون خطی، نمایی و شبکه عصبی نسبت به پارامتر مقدار آب آبیاری و میزان شوری آب و خاک حساسیت کم دارند و تنها حساسیت گیاه ذرت نسبت به پارامتر شوری خاک در محدوده متوسط قرار گرفت.

واژه‌های کلیدی: تحلیل حساسیت، گندم، جو، ذرت، مدیریت آبیاری

^۱ - آدرس نویسنده مسئول: گروه علوم و مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

مقدمه

امروزه در بسیاری از مناطق خشک و نیمه خشک، کاهش کمیت منابع آبی با شور شدن منابع آب و خاک همراه شده است (فلاح و همکاران، ۱۳۹۱). به طوری که محدودیت منابع آب با کیفیت مناسب باعث شده است تا کشاورزان برای دستیابی به تولید محصولات، آب‌های با کیفیت نامناسب را برای آبیاری به کار برند. در نتیجه استفاده مداوم از این منابع موجب تجمع بیش از حد نمک‌ها در خاک شده به طوری که در برخی مناطق بسیاری از گیاهان زراعی با مشکلاتی مواجه شده است (آمزکاتا و همکاران، ۲۰۰۶). شوری آب و خاک‌های زراعی و کمبود آب از محدودیت‌های عمده تولید محصولات زراعی در این مناطق می‌باشند و گیاهان بر حسب کمیت و کیفیت آب ممکن است تحت تاثیر همزمان شوری و خشکی قرار گیرند (کمالی و همکاران، ۱۳۹۶: جیانگ و همکاران، ۲۰۱۶). به گونه‌ای که براساس گزارش فائو در مناطق شور، این مساله سبب کاهش ۱۰ الی ۶۰ درصدی عملکرد گیاهان زراعی شده است (فائو، ۲۰۰۸). تاثیر توأم تنش شوری و کم‌آبی بر جذب آب و در نتیجه آن بر عملکرد محصولات در یک مکان خاص به نوع گیاه، تناوب آبیاری، خصوصیات شیمیایی و فیزیکی خاک، اقلیم و کیفیت آب آبیاری بستگی دارد (شهیدی و همکاران، ۱۳۸۹). تنش آبی ناشی از کم‌آبیاری با استفاده از آب شور، جذب آب توسط گیاه را محدود می‌کند (فرهنگیان و همکاران، ۲۰۱۰). شوری خاک فاکتور اثرگذار در تولید محصول است که کمتر مورد توجه قرار می‌گیرد (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۸). تاثیر شوری تنها به یک مرحله خاص از رشد گیاه محدود نمی‌شود بلکه در تمام طول دوره رشد گیاه موثر بوده و در نهایت به کاهش عملکرد محصول منجر می‌شود. در این شرایط راهکار مناسب برای مقابله با کاهش عملکرد استفاده از ارقام مقاوم به شوری می‌باشد. البته شایان ذکر است حتی ژنوتیپ‌های مقاوم به شوری در مرحله جوانه زنی به شوری حساس می‌باشند (فرهنگیان و همکاران، ۲۰۱۰). آگاهی دقیق از

رابطه بین کمیت و کیفیت آب مصرفی و عملکرد (CWPFs) محصول در شرایط توأم شوری و کم‌آبی ضروری می‌باشد (یزدانی و همکاران، ۱۳۹۳: شین و همکاران، ۲۰۱۶: فاستر و همکاران ۲۰۱۸). روش‌های تعیین تابع تولید (CWPFs) شامل آزمایش‌های مزرعه‌ای و مدل‌سازی می‌باشد که پرهزینه و زمانبر است. توابع تجربی مرسوم نیز از لحاظ منطقه‌ای قابل گسترش نمی‌باشند (برامبلو و جورگاکالئوس، ۲۰۰۷: داتا و همکاران، ۱۹۹۸: ژانگ و همکاران، ۲۰۱۸). مدل‌های شبیه‌ساز گیاه مانند APSIM و swap و CERES، WOFOST و AquaCrop و ... جایگزین مناسب برای تخمین عملکرد در برابر آب و شرایط محیطی می‌باشند. مدل AquaCrop به نسبت مدل‌های شبیه‌ساز دیگر، پارامترها و داده‌های ورودی کمتری برای شبیه‌سازی واکنش گیاه به آب احتیاج دارد و برای اغلب محصولات گیاهی و زراعی در سراسر جهان قابل استفاده است. در مطالعات متعددی از مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد در شرایط تنش شوری استفاده شده است. نتایج حاکی از کارایی قابل قبول و مناسب مدل در شبیه‌سازی عملکرد محصولات بوده است (خرسند و همکاران، ۱۳۹۳؛ مهرآذر و همکاران، ۱۳۹۴؛ حیدری نیا و همکاران، ۱۳۹۶: گارسیا ویلا و همکاران، ۲۰۱۲: کیم و همکاران، ۲۰۱۲: محمدی و همکاران، ۲۰۱۶). اجرای مدل‌های شبیه‌ساز گیاهان و لینک شدن آن‌ها با سایر مدل‌ها دارای معضلات و مشکلات می‌باشد. به همین دلیل گاهی مدل‌هایی مانند مدل‌های رگرسیونی و انواع پیچیده‌تر آن براساس جهت شبیه‌سازی عملکرد گیاهان استفاده می‌شوند. مدل‌های جایگزین ارائه شده در مطالعات مختلف دارای خطای شبیه‌سازی مشابه با مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان می‌باشند که با کاهش خطای آن‌ها می‌توان به کارایی آن‌ها بیشتر اتکا نمود (حیدری نیا و همکاران، ۱۳۹۶: کیم و همکاران، ۲۰۱۵: محمدی و همکاران ۲۰۱۶). یکی از روش‌های مدل‌سازی که در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری از محققین در علوم مختلف واقع شده است، مدل‌سازی به روش شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌باشد.

شبکه‌های عصبی مصنوعی یک تکنیک محاسباتی بسیار قدرتمند برای مدل‌سازی روابط پیچیده غیرخطی، به خصوص در شرایطی که در آن به شکل صریح و روشن از رابطه بین متغیرهای درگیر ناشناخته است (اسمیت و همکاران، ۱۹۹۳: ملک محمدی و همکاران، ۲۰۱۱). تحقیقات انجام گرفته در این حوزه می‌توان به پیش‌بینی تغییرات کیفیت آب سطحی (محتشم و همکاران، ۱۳۹۵: نیکو و همکاران، ۱۳۹۰: سینگ و کانوار، ۲۰۰۹: چترجی، ۲۰۱۷: نوری و همکاران، ۲۰۲۰) تجزیه و تحلیل شوری (هالکی و همکاران، ۲۰۱۷: روستایی و همکاران، ۲۰۱۸)، تخمین تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع (پیری و همکاران، ۱۳۹۷، نورانی و سیاح فرد، ۱۳۹۰: کریمی پور و بنی طالبی، ۱۳۹۹: گوپال و همکاران، ۲۰۱۴) اشاره نمود. انواع شبکه‌های عصبی مصنوعی در زمینه علوم کشاورزی نیز پر کاربرد بوده است. محققان کشاورزی به منظور برآورد شاخص سطح برگ (LAI) از شبکه عصبی بسیار استفاده نمودند که از آن میان می‌توان به تحقیقات ماهانتی و همکاران (۲۰۲۰) و وازکز کروز (۲۰۱۲) اشاره کرد که به ترتیب برای ارزیابی شاخص سطح برگ گیاهان اسفناج، ذرت و گوجه فرنگی استفاده نمودند. در تولیدات کشاورزی اعم از میوه‌ها و غلات نیز این شاخه از هوش مصنوعی مورد توجه قرار گرفته است. برای پیش‌بینی وزن میوه‌ها که توسط شبکه عصبی مصنوعی انجام شده می‌توان برای نمونه به تحقیق راد و همکاران (۲۰۱۵) برای میوه هندوانه و سوارس و همکاران (۲۰۱۳) برای موز اشاره نمود. براساس مطالعات پیشین شبکه عصبی مصنوعی در پیش‌بینی عملکرد نسبت به مدل‌های رگرسیونی دقت بیشتری دارد. به عنوان مثال میزان خطا و ضریب تبیین در پیش‌بینی عملکرد ذرت درمقایسه با رگرسیون خطی به ترتیب ۳۰٪ کاهش و ۰/۴۲ افزایش داشته است (کائول و همکاران، ۲۰۰۵) و عملکرد گندم ۷۰ درصد کاهش خطا و ۷۵ درصد افزایش همبستگی را نسبت به رگرسیون غیرخطی نشان دادند (منتظر و همکاران، ۱۳۸۸). آلوارز و همکاران (۲۰۰۹) میزان خطای حاصل از شبیه سازی

عملکرد گندم توسط این روش را بسیار ناچیز برآورد نمودند (RMSE=۰/۰۵) و همچنین عملکرد جو با چهار لایه پنهان و میزان خطای ۳۳/۱۲ و ضریب تبیین ۰/۸۱ بهترین شرایط توسط شبکه عصبی برای شبیه سازی برآورد گردید (چوپان و امامی، ۲۰۱۹) در حالی که کمترین میزان خطا برای شبیه سازی عملکرد گوجه فرنگی در شرایط سه لایه پنهان می‌باشد (لوپز آگیلار، ۲۰۲۰). از آن جایی که امکان بررسی هم زمان اثرات آب، اقلیم، کود، زمان کاشت، تراکم و نوع خاک بر روی گیاه در روش میدانی وجود ندارد، بنابراین معرفی مدلی موفق و قابل اعتماد کمک شایانی برای این مشکل می‌باشد. از طرفی دقت تمامی مدل‌ها تابعی از ورودی‌های آن‌ها می‌باشد. بنابراین شناسایی پارامترهای ورودی مؤثر از اهمیت ویژه ای برخوردار است از طرفی مدل‌هایی که با پارامترهای ورودی کمتر قادر به ارائه نتایج نزدیک‌تری نسبت به واقعیت باشند، گزینه‌های مطلوب تر به شمار می‌روند. بررسی‌ها نشان داده است مطالعات نسبتاً محدودی در خصوص تولید تابع تولید در شرایط توام شوری و کم‌آبی توسط مدل‌های مختلف و مقایسه آن‌ها انجام شده است. لذا در این مطالعه ابتدا مدل AquaCrop به کمک چندین سری داده میدانی از چندین نوع خاک با شوری‌های مختلف برای سه محصول غالب در دشت قزوین شامل گندم، جو و ذرت واسنجی می‌گردد، سپس به کمک الگوریتم مونت کارلو به تعداد مورد نیاز برای تولید مجموعه داده‌های لازم برای آموزش شبکه عصبی مصنوعی جهت جایگزینی مدل AquaCrop در شرایط تنش‌آبی و شوری پرداخته شد و در نهایت پارامترهایی که تاثیر بیشتری بر عملکرد گیاه دارند به عنوان ورودی مدل انتخاب شده و میزان عملکرد با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی شبیه سازی و آنالیز حساسیت مدل انجام خواهد گرفت.

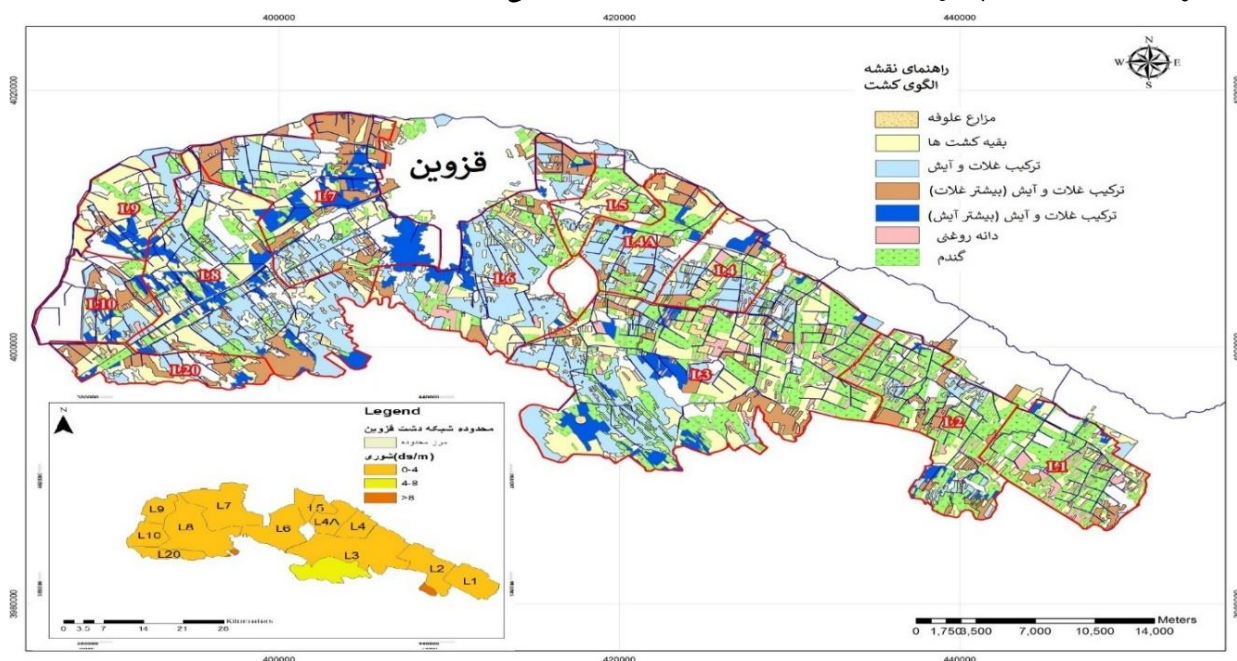
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

دشت قزوین در محدوده ۳۵ درجه و ۳۰ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۳۰ دقیقه عرض جغرافیایی و ۵۰ درجه طول

چاه‌های تلفیقی موجود در سطح شبکه تامین می‌گردد. سه محصول عمده این دشت گندم، جو و ذرت می‌باشد که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت. اطلاعات شوری خاک منطقه از مطالعات صورت گرفته در استان قزوین استخراج گردید (پاک‌نهاد، ۱۳۸۶). شکل ۱ موقعیت شبکه آبیاری و زهکشی دشت قزوین و پراکندگی الگوی کشت را در منطقه نشان می‌دهد.

جغرافیایی قرار گرفته است. منبع آب سطحی موجود، آب انتقالی از سد مخزنی طالقان می‌باشد. بر اساس دوره آماری ۳۰ ساله (۱۳۶۸-۱۳۹۸) متوسط بارندگی در دشت قزوین حدود ۲۵۰ میلی‌متر در سال و متوسط دمای ماهانه ۱۴ درجه می‌باشد. اقلیم منطقه بر اساس روش دو مارتن نیمه خشک می‌باشد. وسعت شبکه آبیاری دشت قزوین حدود ۵۷ هزار هکتار است که آب مورد نیاز آن از سد طالقان و



شکل ۱- محدوده شبکه آبیاری و زهکشی قزوین و تقسیم بندی کانال‌ها و شوری خاک

بدین منظور لازم است مطالعات مزرعه‌ای که در منطقه مورد نظر یا مناطق مجاور بر روی محصولات انتخابی، جمع آوری شود. این مطالعات مزرعه‌ای بایستی شامل تیمارهای مختلف آبیاری باشند تا امکان واسنجی مناسب و همچنین اعتبارسنجی وجود داشته باشد. در این تحقیق برای واسنجی مدل AquaCrop از نتایج مطالعات گلکار (۱۳۷۷) برای گندم و محمدی و همکاران (۱۳۹۴)، فرهادی بانسوله (۱۳۷۷) و پیرسته انوشه و همکاران (۱۳۹۶) برای جو، میرلطیفی و ستوده‌نیا (۱۳۸۱) و حیدری‌نیا و همکاران برای ذرت استفاده شد. تیمارهای مطالعات گلکار (۱۳۷۷) شامل ۱۱۰، ۱۰۰، ۹۰، ۸۰، ۷۰، ۶۰، ۵۰، ۴۰، ۳۰، ۲۰ و ۱۰ درصد نیاز آبی گیاه (به ترتیب تیمارهای T100، T110، T90، T80، T70، T60، T50، T40، T30، T20 و T10) و تیمار دیم با دو آبیاری در زمان کاشت (۱۵ آبان) و اولین آبیاری

واسنجی مدل AquaCrop و بیان تیمارهای تحقیق

استفاده از مدل‌های شبیه‌ساز گیاهی به دلیل هزینه کم، سرعت زیاد و در اختیار قرار دادن اطلاعات کامل، گزینه مناسبی برای تکمیل و توسعه نتایج آزمایش‌های مزرعه‌ای محسوب می‌شود (سینگ و همکاران، ۲۰۰۸). در این تحقیق از مدل AquaCrop برای محاسبه عملکرد گیاهان گندم، جو و ذرت دانه ای استفاده شد. ورودی‌های اصلی مدل اطلاعات مربوط به اقلیم، خاک، گیاه و روش مدیریتی می‌باشد. در بخش مربوط به هواشناسی، داده‌های بارش، دمای هوا و تبخیر و تعرق مرجع به عنوان ورودی مدل وارد می‌گردد. برای واسنجی پارامترهای مدل تحت تنش آبی و شوری نیاز به چند سری داده میدانی است که از داده‌های حاصل از مطالعات گذشته جمع آوری گردید. واسنجی مدل بیشتر شامل واسنجی پارامترهای گیاهی است.

بهاره (۲۰ فروردین) قبل از اعمال تنش بود (T0). تیمارهای مطالعات محمدی و همکاران (۱۳۹۴) شامل سطوح مختلف شوری آب آبیاری (S3, S2, S1) به ترتیب معادل ۹/۴، ۶/۱، ۵/۴ دسی زیمنس بر متر) بود. تیمارهای مطالعات فرهادی بانسوله (۱۳۷۷) شامل ۱۰۰، ۹۰، ۸۰، ۷۰، ۶۰، ۵۰، ۴۰، ۳۰ و ۱۰ درصد نیاز آبی گیاه (به ترتیب تیمارهای T20, T30, T40, T50, T60, T70, T80, T90, T100 و T10) و تیمار دیم با دو آبیاری در زمان کاشت (۱۰ آبان) و اولین آبیاری بهار (۲۰ فروردین) قبل از اعمال تنش بود (T0). تیمارهای مطالعات پیرسته انوشه و همکاران (۱۳۹۶) شامل سطوح مختلف شوری آب آبیاری (S2, S1) به ترتیب معادل ۲، ۱۲ دسی زیمنس بر متر) بود. تیمارهای مطالعات میرلطیفی و ستوده‌نیا (۱۳۸۱) شامل آبیاری در نقاط ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۸۰ درصد آب قابل دسترس گیاه در نظر گرفته شد (به ترتیب تیمارهای T40, T50, T60 و T80)؛ و تیمارهای حیدری نیا و همکاران (۱۳۹۴) شامل سطوح مختلف شوری آب آبیاری (S3, S2, S1) به ترتیب معادل ۲، ۴/۵، ۷ دسی زیمنس بر متر) بود. مقادیر اصلی پارامترهای

ورودی و عملکرد واقعی دانه و سال اجرای آزمایش در جدول (۱) ارائه شده است. برای کالیبره مدل گیاهی از تیمارهای شوری و کم آبیاری و عملکرد متناظر آنها که به طور همزمان در مطالعات مربوطه اندازه گیری شده است، استفاده گردید و سری‌های به کار رفته برای صحت‌سنجی و واسنجی غیر از تصادفی بودن به گونه‌ای انتخاب شد که از هر مجموعه مطالعات حداقل یک سری برای صحت سنجی به کار رفته باشد و همچنین ۷۰ درصد داده های برای واسنجی و ۳۰ درصد تیمارها برای صحت‌سنجی استفاده گردید. در نهایت واسنجی عملکرد گیاهان بررسی گردید و پارامترهای گیاهی به‌نحوی تغییر یافت که در عملکرد مقادیر تخمین زده شده و مقادیر واقعی کمترین میزان خطا مشاهده شود؛ بنابراین مدل گیاهی برای گیاهان مختلف کالیبره گردید و می‌توان در دشت قزوین با توجه به محدوده های شوری منتخب در خاک‌های قزوین (جدول ۲) از این مدل استفاده گردد تا عملکرد متناظر در هر محدوده شوری به شکل تقریباً نزدیک به واقعیت برآورد گردد.

جدول ۱- مقادیر اصلی میزان آب آبیاری، شوری آب آبیاری، شوری خاک، عملکرد واقعی و زیست توده

گیاه	واريته	سال آزمایش	تاریخ کشت	مشخصات خاک ۳۰-۰	رطوبت در pwp	رطوبت در fc	موقعیت جغرافیایی طرح	میزان آب آبیاری (mm)	شوری اولیه آب آبیاری (dS/m)	شوری اولیه خاک (dS/m)	عملکرد (Kg/ha)
گندم	قدس	۷۶-۷۷	۱۵ آبان	لومی	۱۶/۱	۳۲/۲	۵۱°E, ۳۵°N ۴۸° و ۳۵°	۴۰۰	۰/۴	۵/۳	۵۶۲۵
"	"	۱۳۸۴	۲۳ آبان	کلی لوم	۱۹/۷	۳۳/۴	۵۵°E, ۵۳°N ۱۳° و ۵۳°	۶۶۰	۱/۴	۲/۱	۴۴۰۰
جو	والفجر	۷۶-۷۷	۱۰ آبان	لومی	۱۶/۱	۳۲/۲	۵۱°E, ۳۵°N ۴۸° و ۳۵°	۳۱۹	۰/۴	۵/۳	۶۰۰۰
"	"	۹۱-۹۲	۲۸ آبان	لومی شنی	۳/۷	۲۱/۶	۵۲°E, ۲۹°N ۱۳° و ۲۹°	۶۵۰	۲	۵	۶۸۲۶
ذرت	Sc704	۷۹-۸۰	۵ خرداد	لومی	۱۲	۲۴	۵۰°E, ۳۶°N ۱۹° و ۳۶°	۷۶۳	۰/۴	۰/۹۳	۱۲۶۲۴
"	"	۹۴	۱ مرداد	لومی سیلتی	۱۸	۳۴	۵۵°E, ۳۲°N ۱۳° و ۳۲°	۷۴۲	۲	۳	۵۷۰۰

در ادامه برای تعیین تابع عملکرد محصول به دامنه گسترده‌ای از داده‌های عملکرد متناسب با مقادیر شوری و عمق آبیاری مورد نیاز است. با توجه به اینکه داده های موجود برای تخمین این توابع معمولاً کم می‌باشد برای

افزایش دقت از مدل واسنجی شده استفاده شد. سپس سناریوهای مربوط به طرح با توجه به ملاحظات شوری خاک و احتمال تغییرات شوری آب تیمارهای مطالعه در چهار سطح شوری خاک منطقه (S1=۰/۴،

فائو محاسبه شد. براساس گزارشات موجود منطقه راندمان آبیاری ۳۵ درصد در نظر گرفته شد (نجارچی، ۱۳۹۰). برای مشخصات خاک منطقه نیز از جدول (۲) استفاده شد. در نهایت از طریق برازش رگرسیون های خطی، غیرخطی و روش شبکه عصبی مصنوعی بهترین روش برای تهیه تابع تولید انتخاب شد. از طرفی متغیرهای مستقل میزان آب آبیاری، شوری آب و شوری خاک می باشد و تابع عملکرد به صورت تابعی از این سه متغیر محاسبه گردید. برای واسنجی روابط رگرسیونی غیرخطی و خطی بین متغیرهای ورودی و عملکرد محصولات نرم افزار آماری SPSS و Excel مورد استفاده قرار گرفت.

بر اساس مقادیر کم آبیاری در ماه های مختلف در چهار سطح (S4=۱۲, S3=۸, S2=۴ و همچنین SW4=۴, SW3=۳, SW2=۲, SW1=۰/۶۷) و همچنین مقادیر مختلف کم آبیاری در ماه های مختلف و با تغییر عمق آبیاری و شوری آب و خاک، با اجرای روش مونت کارلو اعداد تصادفی تولید و مدل اجرا شد. به این ترتیب توابع تولید آب-محصول به کمک مدل AquaCrop که در آن عملکرد تابعی از میزان آب آبیاری و شوری آب و خاک می باشد توسعه یافت. ابتدا برای اجرای مدل AquaCrop از اطلاعات و آمار ۱۵ ساله داده هواشناسی (۱۳۸۰-۱۳۹۵) استفاده شد. تبخیر و تعرق با استفاده از روش پنمن مونتیت

جدول ۲- ویژگی های فیزیکی غالب خاک در منطقه (عمق ۰-۳۰ سانتی متر)

بافت خاک	رس (%)	سیلت (%)	شن (%)	EC (dS/m)	نقطه پژمردگی (درصد حجمی)	ظرفیت زراعی (درصد حجمی)
سیلتی-لوم	۴۱	۴۴	۱۵	۰/۴	۱۶/۳	۲۶/۷
سیلتی-لوم	۳۹	۴۶	۱۵	۴	۱۶	۳۲
کلی-لوم	۳۷/۶	۳۲	۳۰/۴	۸	۱۹/۲	۳۵/۲
کلی-لوم	۳۳/۶	۳۴/۲	۳۲/۲	۱۲	۱۵	۳۲/۲

شبکه عصبی مصنوعی (ANN)

شبکه عصبی مصنوعی ابزاری قدرتمند برای شبیه سازی سامانه های پیچیده غیرخطی می باشد. در این تحقیق از شبکه عصبی مصنوعی چندلایه با معماری پرسپترون استفاده شد که متشکل از یک لایه ورودی، لایه یا لایه های پنهان و لایه خروجی می باشد (شکل ۲). این شبکه دارای سه لایه نرون است. تعداد نرون در لایه اول برابر با تعداد عناصر ورودی و در لایه سوم یک نرون برای خروجی استفاده شد. ورودی های شبکه به صورت دسته ای و همزمان به شبکه اعمال شدند. لایه ورودی تنها اطلاعات را دریافت کرده و مشابه متغیر مستقل عمل می کند بنابراین تعداد نرون های لایه ورودی بر اساس طبیعت مسئله تعیین میشود و بستگی به تعداد متغیر مستقل بستگی دارد. و تعداد لایه خروجی نیز بستگی به متغیر وابسته دارد. برخلاف لایه ورودی و خروجی لایه پنهان تنها وظیفه تنظیم وزن و یادگیری را دارد و تنها یک نتیجه میانی در فرایند محاسبه

شکل کلی تابع عملکرد به ازای شوری های مختلف و مقادیر متفاوت آب آبیاری بصورت $Y=f(AW, EC)$ در نظر گرفته شد که در آن: Y مقدار عملکرد برحسب تن در هکتار، I مجموع عمق آب آبیاری در طول دوره رشد بر حسب سانتی متر و EC متوسط شوری آب آبیاری بر حسب dS/m بود. توابع تولید آب - شوری بکار برده شده در این تحقیق عبارتند از:

$$Y = a_0 + a_1 \times I + a_3 \times EC \quad (1)$$

$$Y = a_0 \times I^{a_1} \times EC^{a_2} \quad (2)$$

نمایی (کاپ داگلاس) - لگاریتمی

(۳) تابع عملکرد بر اساس معماری شبکه عصبی مصنوعی (ANN): توضیحات کامل در قسمت تعریف شبکه عصبی بیان گردیده است

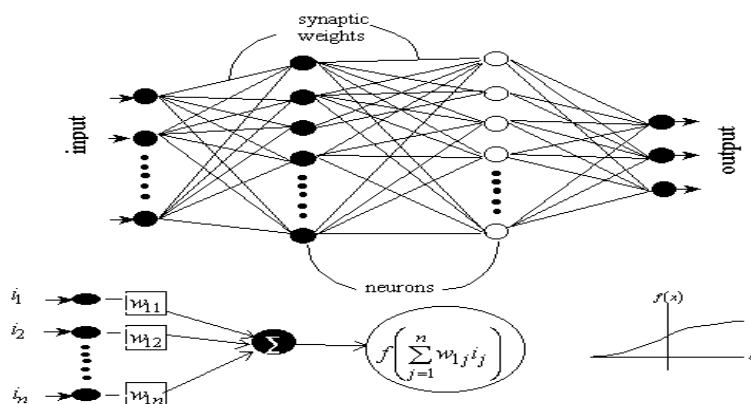
یک تبدیل شوند، زیرا در این پژوهش برای عناصر پردازش گر لایه مخفی تابع آستانه سیگموئیدی انتخاب گردید. شکل ریاضی تابع سیگموئیدی در معادله ۴ نشان داده شده است. (منتظر و همکاران، ۱۳۸۹)

$$F(x) = \frac{1}{1+e^x} \quad (4)$$

همچنین برای استفاده داده در شبکه با تابع فعالیت سیگموئیدی، کلیه داده ها قبل از اعمال به شبکه با استفاده از تابع ۵ نرمال شدند.

$$x_n = 0.5 \left(\frac{x_0 - x_{mean}}{x_{max} - x_{min}} \right) + 0.5 \quad (5)$$

x_n مقدار نرمال شده x_0 ورودی x_{mean} میانگین داده ها و x_{max} و x_{min} به ترتیب میزان حداکثر و حداقل داده ها می باشد.



شکل ۲- شبکه عصبی مصنوعی با معماری پرسپترون

خروجی مورد بررسی قرار گرفت. با علم به این مطلب که با افزایش مقدار آبیاری در محدوده مورد نیاز گیاه باید عملکرد گیاه افزایش و با افزایش شوری آب و خاک باید مقدار عملکرد گیاه کاهش یابد، شبکه‌هایی که از این اصل تبعیت نکردند به عنوان شبکه معیوب که تحت پدیده over fitting قرار گرفته از بررسی‌ها حذف شد. قابل ذکر است که برای آموزش شبکه‌ها، ۸۰٪ داده‌ها برای آموزش، ۱۰٪ داده‌ها برای اعتبارسنجی و ۱۰٪ باقیمانده برای تست به کار گرفته شد.

ارزش خروجی می باشد. (منتظر و همکاران، ۱۳۸۹) عامل ورودی عبارت است از مقدار آب مصرفی در طول فصل رشد (I) و میزان شوری خاک و میزان شوری آب آبیاری. اما برخلاف لایه ورودی و ساختار شبکه با افزودن یا کاستن تعداد نرون‌ها تغییر یافت. تابع غیرخطی سیگموئید به عنوان توابع انتقال شبکه در لایه مخفی و تابع خطی در لایه خروجی مورد استفاده قرار گرفت. روال آموزش و اعتبارسنجی برای هراساختار تکرار شد. در هر دوره، الگوریتم آموزش سعی در کم کردن خطای مجموعه داده‌های شبیه‌سازی شده به کمک شبکه و مجموعه داده‌های مشاهداتی می‌نماید. بنابراین در هر دوره وزن‌ها به گونه‌ای تغییر می‌نمایند که این خطا را کمتر نمایند. پس از جمع‌آوری اطلاعات، نرمال‌سازی داده‌ها انجام گرفت. هدف از نرمال‌سازی آن است که داده‌ها به اعدادی مابین صفر تا

در نهایت ساختاری که نتایج آن بر مبنای شاخص‌های آماری اختلاف حداقل را با مقادیر مشاهده‌ای داشت به عنوان ساختار بهینه معرفی شد. مقایسه بین نتایج ANN و روش‌های کلاسیک صورت گرفته در شرایط یکسان، شبکه عصبی با کاهش طول داده‌ها و صرف زمان کمتر مقادیر واقعی‌تری را پیش‌بینی میکند (توکار و همکاران، ۱۹۹۹). آموزش و ارزیابی عملکرد مدل شبکه عصبی مصنوعی در محیط نرم افزار MATLAB انجام گرفت. برای مقابله با پدیده‌ی over fitting پس از اتمام فرایند آموزش، هر شبکه به وسیله‌ی تغییر در مقادیر ورودی‌ها آنالیز حساسیت شده و تغییرات در مقدار

ارزیابی مدل و تحلیل حساسیت

شاخص‌های ارزیابی مدل برای ارزیابی و سنجش اعتبار مدل AquaCrop و نیز برای ارزیابی رگرسیون‌های خطی و غیرخطی و شبکه عصبی به کار گرفته شد. این شاخص‌ها شامل ضریب تبیین (R^2) و ریشه میانگین مربع خطا (RMSE)، ریشه میانگین مربع خطای نرمال شده (NRMSE) و میانگین خطای مطلق (AME) است. نحوه محاسبه‌ی شاخص‌های ذکر شده در روابط (۶) تا (۹) ارائه شده است:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (6)$$

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

$$NRMSE = \frac{1}{\bar{O}} \times \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \times 100 \quad (8)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |P_i - O_i|}{n} \quad (9)$$

که در آنها:

P_i مقادیر پیش‌بینی شده، O_i مقادیر اندازه‌گیری شده (مشاهده‌ای)، n تعداد نمونه‌های به کار رفته، $\bar{O}$ مقدار متوسط پارامتر مشاهده شده می‌باشد.

برای تعیین میزان حساسیت خروجی مدل AquaCrop و مدل‌های جایگزین رگرسیون‌های خطی و غیرخطی و همچنین شبکه عصبی مصنوعی نسبت به داده‌های ورودی ابتدا پارامترهای اندازه‌گیری شده مانند عملکرد به عنوان خروجی پایه در نظر گرفته شده و با هر بار اجرای مدل، یکی از داده‌های ورودی تا $\pm 25\%$ درصد تغییر داده شد و بقیه ثابت نگه داشته شدند. سپس با استفاده از رابطه ۱۰ تحلیل حساسیت شدند. (لو و همکاران، ۲۰۰۷).

$$Sc = \frac{\frac{\Delta W}{\bar{W}}}{\frac{\Delta P}{\bar{P}}} \quad (10)$$

که در این رابطه:

ΔW اختلاف مقدار پارامتر خروجی، قبل و بعد از تغییر پارامتر ورودی، $\bar{W}$ متوسط مقدار پارامتر خروجی قبل و بعد از تغییر پارامتر ورودی، ΔP اختلاف مقدار پارامتر ورودی و $\bar{P}$ متوسط مقادیر ورودی هر پارامتر به مدل را نشان می‌دهد. دامنه تغییرات ضریب حساسیت در جدول (۳) نشان داده شده است.

جدول ۳- دامنه تغییرات ضریب حساسیت (Sc)

$Sc > 1/5$	$0/3 < Sc < 1/5$	$0 < Sc < 0/3$	$Sc = 0$	دامنه تغییرات
حساسیت زیاد	حساسیت متوسط	حساسیت کم	بدون حساسیت	شدت حساسیت

پارامترهایی که برای واسنجی مدل در این تحقیق مد نظر قرار گرفت عبارت است از پارامترهای کم‌آبیاری و شوری. مدل برای پارامترهای گیاهی و عملکرد محصول واسنجی شد. به طوری که اختلاف بین عملکرد شبیه‌سازی و مشاهده ای حداقل گردد. در جدول (۴) مقادیر برخی پارامترهای واسنجی شده برای هر محصول ارائه شده است.

نتایج و بحث

واسنجی مدل AquaCrop

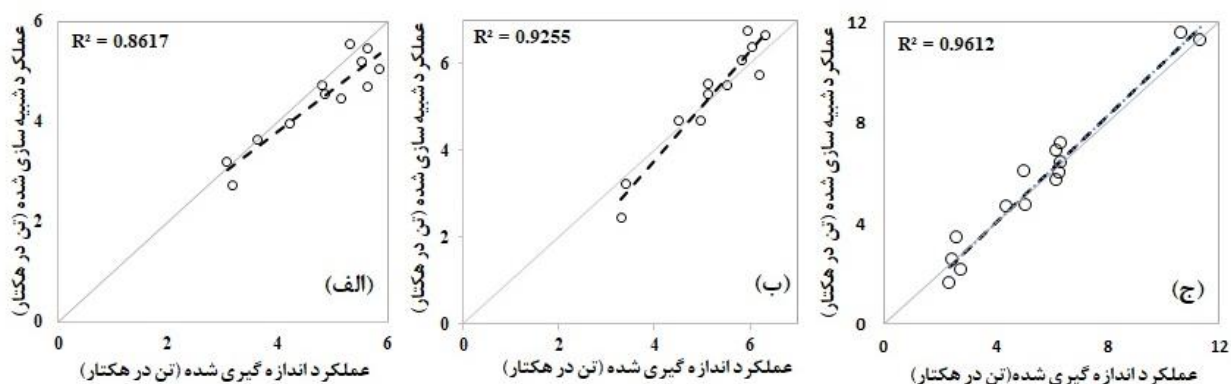
در مدل AquaCrop ضرایب مختلفی برای هر گیاه تعریف شده است که باید به کمک داده‌های میدانی واسنجی شود. در این مطالعه مدل AquaCrop بر اساس داده‌هایی که کلیات آن در بخش پیش‌بین ارائه شد، برای سه غله‌ی مهم یعنی گندم، جو و ذرت دانه‌ای واسنجی شد.

جدول ۴- پارامترهای واسنجی شده مربوط به غلات منتخب

گیاه	جو	گندم	ذرت
حداکثر پوشش گیاهی	۸۲/۵	۸۶	۸۷/۳۳
ضریب رشد پوشش	۵/۵۶	۴/۵۳	۱۵/۴۴
ضریب کاهش پوشش	۶/۴۴	۹/۷۷	۱۱/۳۳
ضریب بسته شدن روزنه	۰/۵۲	۰/۵۴	۰/۷۹
حد پایین شوری	۷	۶	۲
حد بالای شوری	۲۰	۱۹	۹
طول دوره گلدهی (روز)	۱۳	۱۳	۱۰
حداکثر عمق ریشه (cm)	۱۰۰	۱۰۵	۲۳۵
بهره وری آب نرمال شده	۱۴/۳۳	۱۵	۳۳/۸۵

مزرعه نشان داد که همبستگی خوبی بین مقادیر شبیه سازی و واقعی وجود دارد.

در شکل ۳ عملکرد شبیه سازی و مشاهده ای برای محصولات انتخابی ارائه شده است. مقایسه عملکردهای به دست آمده از مدل و عملکرد های اندازه گیری شده در



شکل ۳- عملکرد شبیه سازی و مشاهده شده محصولات زراعی: الف: جو، ب: گندم، ج: ذرت

محصول در بازه قابل قبول می باشد. همچنین، کمترین مقدار آماره MAE نیز برای جو به میزان ۰/۳۷ کیلوگرم برآورد شد (جدول ۵).

شاخص های آماری نیز نشان دهنده برآورد مناسب مدل در تعیین عملکرد محصولات بود. بر اساس نتایج بیشترین و کمترین ضریب همبستگی به ترتیب مربوط به گندم و ذرت می باشد. مقادیر NRMSE نیز برای هر سه

جدول ۵- مقادیر پارامترهای آماری برای ارزیابی مدل

محصول	R ²	NRMSE	MAE (kg/ha)
واسنجی جو	۰/۸۶	۷/۹۱	۰/۳۷
صحت سنجی واسنجی گندم	۰/۷۳	۸/۷۹	۰/۴
صحت سنجی واسنجی ذرت	۰/۹۳	۵/۲۷	۰/۳۵
صحت سنجی واسنجی صحت سنجی	۰/۸۷	۸/۱۸	۰/۴۵
صحت سنجی واسنجی صحت سنجی	۰/۹۶	۹/۱۴	۰/۵۱
صحت سنجی واسنجی صحت سنجی	۰/۹۵	۰/۵۳	۰/۶

نتایج این تحقیق با سایر تحقیقات مشابه درخصوص واسنجی مدل آکواکراپ در شرایط تنش خشکی و شوری مورد بررسی قرار گرفت. محمدی و همکاران (۱۳۹۴) مدل را برای شبیه‌سازی عملکرد گندم ارزیابی نمودند نتایج آن‌ها نیز نشان داد خطای برآورد $0/89$ می‌باشد. المخ و همکاران (۲۰۱۶) دقت شبیه‌سازی مدل را برای برآورد گیاه جو در شرایط شوری آب و کم‌آبی در اقلیم خشک تونس مناسب ارزیابی نمودند $0/97$ - $R^2=0/88$. حیدری نیا و همکاران (۱۳۹۶) نیز خطای به‌کارگیری مدل را در برآورد عملکرد ذرت در شرایط مشابه $0/93$ گزارش کردند. با توجه به نتایج حاصل از مدل می‌توان اظهار داشت که مدل توانسته است روند کاهش این پارامترها در اثر تنش‌های شوری و آبی نیز به‌خوبی شبیه‌سازی کند.

مقایسه مدل شبکه عصبی با مدل‌های رگرسیون غیرخطی

برای تعیین تابع تولید از مدل خطی، غیرخطی و شبکه عصبی مصنوعی استفاده شد. توابع تولید بصورت تابعی از میزان آب آبیاری، میزان شوری آب آبیاری و شوری خاک بیان گردید. سپس برای تعیین تابع تولید بهینه، توابع بر اساس آماره‌ها درجه‌بندی شدند. به منظور مقایسه‌ی کارایی (performance) شبکه‌های آموزش داده شد. در این مطالعه، تابع خطی و نمایی مربوط به هر گیاه نیز توسط نرم افزار SPSS تهیه شد که مقدار خطای آن در جدول (۶) گزارش شد سپس مدل‌های شبکه عصبی با نتایج معادلات رگرسیون غیرخطی و خطی مورد مقایسه قرار گرفتند. نتایج نشان داد شبکه عصبی مصنوعی با کمترین میزان خطا و بیشترین همبستگی توانایی زیادی در تولید تابع عملکرد-آب دارد. تعیین تابع تولید کاربردی‌ترین نتایج این مطالعه می‌باشد که برای تعیین عمق آبیاری هر محصول مدیریت و برنامه‌ریزی آبیاری در شرایط محدودیت کمی و کیفی آب کاربرد دارد. کیانی و عباسی (۱۳۸۵)، شیرمحمدی و همکاران (۱۳۹۲)، پیری و همکاران (۱۳۹۷) و داتا و

همکاران، (۱۹۹۸) توابع غیرخطی را به عنوان بهترین الگو برای تابع تولید ارزیابی نمودند. این درحالی است که پیش‌بینی عملکرد توسط شبکه عصبی مصنوعی با دقت بالا، کاهش خطا و با سرعت قابل قبول همراه می‌باشد (حسینی و همکاران، ۱۳۸۶، منتظر و همکاران، ۱۳۸۸، سجادی و همکاران، ۱۳۹۱، صفری و همکاران، ۱۳۹۸).

نتایج حاصل از این مطالعه با تحقیقات قبلی انجام شده در این زمینه مطابقت دارد. حسینی و همکاران (۱۳۸۶) دقت پیش‌بینی عملکرد گندم را در قروه کردستان با استفاده از شبکه مصنوعی برابر $0/99$ برآورد نموده است. منتظر و همکاران (۱۳۸۸) در مقایسه مدل رگرسیون غیرخطی و شبکه عصبی برای پیش‌بینی عملکرد گندم افزایش 18% در ضریب تبیین و کاهش 33% خطا را برآورد نمودند. باقری و همکاران (۱۳۹۱) نیز عملکرد گندم را با خطای بسیار ناچیز توسط شبکه عصبی برآورد نمود. شیردلی و توسلی (۱۳۹۴) ضریب تبیین را در پیش‌بینی عملکرد زعفران توسط شبکه عصبی $0/97$ برآورد نمودند. علت عملکرد بهتر شبکه عصبی را می‌توان به هوشمند بودن فرآیند آنالیز داده‌ها دانست طی فرآیند آموزش، شبکه عصبی قادر خواهد بود روابطی منطقی میان ورودی و خروجی را آموزش دهد و از آن برای محاسبه داده‌هایی که در آموزش شبکه به کار نرفته‌اند استفاده کند. در حالی که آنالیز رگرسیونی تنها قادر به برقراری تعدادی از مفاهیم ریاضی و آماری میان داده‌ها است.

تعیین توابع تولید آب - شوری

در این بخش نتایج مدل‌های شبکه عصبی با نتایج معادلات رگرسیونی غیرخطی و خطی برازش شده بر داده‌های استخراج شده از مدل گیاهی AquaCrop ارائه می‌شود. معادلات رگرسیونی خطی و غیرخطی (نمایی) استخراج شده برای محاسبه عملکرد دانه (Y)، به صورت تابعی از میزان آب آبیاری (I)، شوری آب آبیاری (EC) به صورت زیر (جدول ۷) هستند.

جدول ۶- مقادیر خطای مدل‌های جایگزین مورد بررسی در تحقیق

محصول	تابع	ورودی	تعداد نرون	R ²	NRMSE	AME (kg)	RMSE (kg)	خروجی
گندم	Linear	میزان آبیاری دوره میانی رشد-	-	۰/۹۸	۰/۰۳	۱۳۶/۰۳	۱۷۶/۱۹	عملکرد
	Non-Linear	میزان آبیاری دوره انتهایی رشد-	-	۰/۹۲	۰/۰۷	۳۱۱/۱۳	۳۹۲/۳۱	
	ANN	میزان شوری خاک- میزان شوری آب آبیاری	۴	۰/۹۹	۰/۰۱	۴۷/۷۸	۶۲/۹۱	
			۵	۰/۹۸	۰/۰۱	۲۸/۷۳	۴۰/۱۶	
			۶	۰/۹۸	۰/۰۱	۳۲/۳۴	۴۰/۳۲	
			۷	۰/۹۹	۰/۰۱	۳۱/۲۶	۴۳/۹۲	
			۸	۰/۹۸	۰/۰۱	۱۳/۲۷	۲۴/۱۳	
جو	Linear	میزان آبیاری دوره میانی رشد-	-	۰/۹۵	۰/۰۴	۱۷۵/۴۸	۲۲۸/۲۰	
	Non-Linear	میزان آبیاری دوره انتهایی رشد-	-	۰/۸۷	۰/۰۸	۳۱۶/۵۵	۳۹۵/۲۳	
	ANN	میزان شوری خاک-میزان شوری آب آبیاری	۳	۰/۹۸	۰/۰۲	۷۹/۱۳	۱۲۲/۴۳	
			۴	۰/۹۹	۰/۰۲	۴۵/۳۴	۷۶/۷۹	
			۵	۰/۹۹	۰/۰۱	۲۴/۲۰	۶۲/۰۹	
			۶	۰/۹۹	۰/۰۱	۲۵/۲۰	۶۳/۶۱	
ذرت	Linear	میزان آبیاری در دوره اولیه رشد-	-	۰/۷۹	۰/۱۱	۷۷۳/۳۸	۱۲۶۲/۲۰	
	Non-Linear	میزان آبیاری دوره میانی رشد- میزان آبیاری دوره انتهایی رشد-	-	۰/۸۲	۰/۰۸	۷۲۰/۲۲	۹۰۴/۶۲	
	ANN	میزان شوری خاک میزان شوری آب آبیاری	۳	۰/۹۹	۰/۰۲	۱۱۳/۴۸	۱۵۴/۵۶	
			۴	۰/۹۹	۰/۰۱	۶۹/۸۰	۹۵/۳۷	
			۵	۰/۹۹	۰/۰۱	۵۶/۳۳	۷۶/۱۱	
			۶	۰/۹۹	۰/۰۱	۵۲/۷۶	۷۲/۵۲	
			۷	۰/۹۹	۰/۰۱	۴۳/۹۲	۵۷/۰۸	
			۸	۰/۹۹	۰/۰۱	۳۵/۸۸	۶۰/۶۸	

جدول ۷- ضرایب رگرسیونی توابع خطی و نمایی برای سه محصول جو، ذرت و گندم

گیاه	ضرایب	S ₁ =۰/۴	S ₂ =۴	S ₃ =۸	S ₄ =۱۲
		تابع خطی	تابع نمایی	تابع خطی	تابع نمایی
جو	C	۱/۵۱	۰/۷۷۴	۱/۵۱۹	۰/۷۶۴
	a ₁	۰/۰۱۴	۰/۳۲۶	۰/۰۱۴۵	۰/۳۲۶
	a ₂	-۰/۰۰۸۱۲	-۰/۰۰۷۷۸	-۰/۰۰۱۶	-۰/۰۲۳۶۴
ذرت	C	۱/۵۳۳	۰/۹۴۲	۱/۶۴۴	۰/۹۶۵
	a ₁	۰/۰۱۱	۰/۳۳۸	۰/۰۰۹۳	۰/۳۱۲
	a ₂	-۰/۰۴۰۹	-۰/۰۱۶۴	-۰/۰۱۰۶	-۰/۰۵۱
گندم	C	۱/۹۶۴	۱/۴۷۷	۱/۹۷۸	۱/۴۴
	a ₁	۰/۰۱۱۷	۰/۲۰۹	۰/۱۱۳۱۵	۰/۲۰۹
	a ₂	-۰/۰۱۴۴	-۰/۰۱۱	-۰/۰۳۲۹	-۰/۰۲۷

محصولات دارد. در شبکه‌های تک لایه، به طور کلی با افزایش تعداد نرون، مقدار خطای ایجاد شده در شبکه کاهش می‌یافت. ولی پس از یک مقدار بهینه، با افزایش نرون‌ها خطای شبکه‌ها افزایش یافت. همچنین با افزایش

از طرفی مقدار بهینه نرون در بهترین شبکه آموزش دیده برای جو و گندم پنج نرون و برای ذرت هفت نرون در ساختار شبکه‌ی تک لایه بود. نتایج کلیه‌ی شبکه‌ها برای گیاهان گندم، جو و ذرت نشان داد که شبکه عصبی به صورت کل توانایی زیادی در شبیه‌سازی عملکرد

نرونها، شبکه‌ها در فرایند آموزش تمایل زیادی به فراآموزی پیدا می‌کردند. (جدول ۶)

تحلیل حساسیت توابع مختلف تولید نسبت به داده‌های ورودی

میزان حساسیت توابع مختلف نسبت به داده‌های ورودی مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج در جدول (۷) ارائه شده است. گیاه جو نسبت به پارامتر میزان آب آبیاری از حساسیت تقریباً مشابهی در تمام مدل‌ها برخوردار می‌باشد ($S_e=0.12$). همچنین، کلیه مدل‌ها حساسیت کمی نسبت به شوری آب و خاک را نشان دادند، ولی حساسیت آن‌ها نسبت به پارامترهای آبیاری به مراتب کمتر بود. آنالیز حساسیت گیاه گندم و ذرت نشان داد که ورودی‌های آبیاری نسبت به گیاه جو از حساسیت بیشتری برخوردار بودند. ولی همچنان در محدوده حساسیت کم قرار می‌گیرند و باز می‌توان اذعان نمود متغیرها از حساسیت یکسانی برخوردار می‌باشند. در این میان گیاه ذرت بیشترین و گیاه جو از کمترین حساسیت در میان ورودی‌های گروه آبیاری برخوردار بودند. ورودی شوری آب و خاک برای گیاهان گندم و ذرت نیز مانند گیاه جو از ورودی‌های آبیاری حساس‌تر بودند. همچنین، در تمام مدل‌ها، حساسیت کلیه گیاهان به شوری خاک بیشتر از شوری آب آبیاری می‌باشد. در این میان حساسیت گیاه ذرت نسبت به شوری خاک متوسط می‌باشد.

در این میان مدل شبکه عصبی از میان سایر مدل‌ها از نظر حساسیت بسیار شبیه مدل AquaCrop بود. به همین صورت کم و بیش برای ضرایب حساسیت گیاه گندم نیز مشاهده شد. گیاه گندم نیز نسبت به ورودی‌های آبیاری حساسیت کمی برخوردار بود. در گندم نیز شبکه عصبی حساسیت بسیار نزدیک به مدل AquaCrop نشان داد. ولی مدل نمایی اختلاف بسیار فاحشی با مدل AquaCrop داشت. وضعیت مقادیر حساسیت گیاه ذرت به ورودی‌ها مانند گیاه گندم و جو در گروه ضرایب با حساسیت کم قرار گرفت با این تفاوت که با تحلیل حساسیت گیاه در مدل AquaCrop، ضرایب حساسیت گیاه ذرت نسبت به ورودی‌های شوری آب و خاک بیشتر از حساسیت این گیاه نسبت به ورودی‌های آبیاری بود. گلابی و همکاران (۱۳۹۲) در تحقیقی پارامترهای مربوط به آب (میزان آب آبیاری و هدایت الکتریکی آب) را در مقایسه با پارامترهای هواشناسی بر عملکرد نیشکر موثرتر دانستند. باقری و همکاران (۱۳۹۰) نیز پارامتر آبیاری و کود نیتروژن و درجه روز را پارامترهای موثر بر پیش‌بینی عملکرد دانستند و متغیر آبیاری در درجه اهمیت دوم قرار دارد. آلوارز و همکاران (۲۰۰۹) پارامتر نسبت بارندگی به تبخیر و تعرق پتانسیل را به عنوان مهمترین پارامتر در پیش‌بینی عملکرد گندم توسط شبکه عصبی دانستند کائول و همکاران (۲۰۰۵) میزان باران در ماه‌های ژوئن تا آگوست و خصوصیات خاک را به عنوان مهمترین پارامترها برای پیش‌بینی عملکرد ذرت و سویا در نظر گرفتند.

جدول ۷- میانگین ضریب حساسیت پارامترهای مختلف ورودی

مدل	پارامترهای ورودی	ضریب حساسیت		
		گندم	جو	ذرت دانه ای
AquaCrop	میزان آب آبیاری	۰/۱۷	۰/۱۲	۰/۱۶
	شوری آب آبیاری	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۲۴
	شوری خاک	۰/۱۲	۰/۰۹	۰/۳۱
تابع خطی	میزان آب آبیاری	۰/۱۷	۰/۱۳	۰/۱۸
	شوری آب آبیاری	۰/۱۰	۰/۱۵	۰/۱۵
	شوری خاک	۰/۱۰	۰/۱۳	۰/۲۱
تابع غیرخطی	میزان آب آبیاری	۰/۲۱	۰/۱۵	۰/۲۵
	شوری آب آبیاری	۰/۱۳	۰/۱۴	۰/۱۴
	شوری خاک	۰/۱۷	۰/۱۴	۰/۲۷
شبکه عصبی	میزان آب آبیاری	۰/۱۷	۰/۱۲	۰/۱۲
	شوری آب آبیاری	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۲۶
	شوری خاک	۰/۱۲	۰/۰۹	۰/۳۲

نتیجه گیری

در این تحقیق، ابتدا به کمک داده‌های مزرعه‌ای مربوط به سه گیاه گندم، جو و ذرت در کلاس‌های مختلف تنش شوری و آبیاری، مدل AquaCrop واسنجی شد. سپس کارایی شبکه‌های عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی عملکرد محصولات گندم، جو و ذرت بررسی گردید. برای ارزیابی کارایی شبکه عصبی مصنوعی، بهترین شبکه‌ی آموزش دیده‌ی هر گیاه، نسبت به ورودی‌های تنش آبیاری و شوری مورد تحلیل حساسیت قرار گرفت. در این مطالعه نرم افزار AquaCrop با توجه به کمیت و کیفیت متفاوت منابع آب و تغییرات مکانی خصوصیات خاک در مناطق مختلف دشت قزوین با استفاده از اطلاعات میدانی اعتبارسنجی شد. خطاهای ایجاد شده بین شبیه‌سازی‌های مدل و داده‌های مشاهداتی نشان داد که می‌توان از مدل‌های شبیه‌سازی به عنوان یک ابزار مناسب جهت پیش‌بینی عملکرد محصول تحت کمیت و کیفیت‌های مختلف آب آبیاری استفاده نمود. گندم در بین گیاهان مورد بررسی بهترین پاسخ و ذرت بیشتر خطا را در شبیه‌سازی نشان داد. برای آموزش شبکه نیاز به مجموعه داده‌های بیشتر از داده‌ها میدانی به کار رفته در واسنجی مدل AquaCrop بود. برای ایجاد داده‌های مورد نیاز با پراکندگی لازم که فضای حالت ورودی‌های مدل را پوشش دهد از نوع خاصی از شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده شد. به کمک داده‌ها تولید شده برای هر گیاه چند معماری از شبکه‌های تک لایه و دو

لایه با تعداد نرون‌های مخالف آموزش داده شد. به منظور مقایسه شبکه‌ها آموزش داده شده، R^2 ، MAR، NRMSE و RMSE بین خروجی‌های محاسباتی توسط شبکه‌ها و خروجی‌های AquaCrop محاسبه شد. نتایج نشان داد که با افزایش تعداد نرون‌ها خطای ایجاد شده کمتر می‌شود؛ که این پدیده را می‌توان در پیچیده‌تر شدن شبکه‌ها دانست. برای مقایسه ارزیابی شبکه‌ها به عنوان یک مدل جایگزین، بر اساس مجموعه‌های تولید شده به کمک داده‌هایی که از طریق مونت کارلو تولید شد، رگرسیون خطی و نمایی نیز محاسبه شد. خطاهای ایجاد شده بین خروجی‌های شبیه‌سازی شده توسط رگرسیون خطی و نمایی نشان داد در صورتی که میزان آبیاری و شوری آب و خاک به عنوان ورودی مدل باشد، مدل شبکه عصبی نسبت به رگرسیون خطی و نمایی بسیار قدرتمندتر است. مناسبترین تابع تولید در شرایط شوری و کم آبیاری در بهترین شبکه آموزش دیده برای جو و گندم پنج نرون و برای ذرت هفت نرون در ساختار شبکه‌ی تک لایه بود. از طرف دیگر نتایج آنالیز حساسیت نشان داد که حساسیت مدل‌های شبکه عصبی به جز گیاه ذرت، بسیار به حساسیت مدل AquaCrop نزدیک است و با آن همخوانی دارد. حساسیت گیاهان گندم و جو نسبت به پارامترهای میزان آبیاری و شوری آب و خاک در محدوده حساسیت کم قرار می‌گیرند، در این در حالی است که گیاه ذرت نسبت به پارامتر شوری حساسیت بیشتری دارد.

فهرست منابع

۱. پیری، ح.، انصاری، ح. و پارسا، م. ۱۳۹۷. تعیین تابع تولید آب- شوری- عملکرد با در نظر گرفتن زمان برداشت علوفه و ارزیابی شاخص‌های تولید در ذرت خوشه‌ای. مجله‌ی مهندسی منابع آب، ۱۱: ۱۵-۲۶.
۲. تافته، آ.، بابازاده، ح.، ابراهیمی پاک، ن.ع. و کاوه، ف. ۱۳۹۳. بهینه سازی تخصیص آب ماهانه برای بیشینه‌سازی کارایی مصرف آب بر اساس تابع تولید محصول. (مطالعه موردی دشت قزوین). رساله دکتری دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران.
۳. حیدری نیا، م.، برومندنسب، س. و ناصری، ع. ۱۳۹۶. ارزیابی مدل AquaCrop در تخمین عملکرد ذرت و شوری خاک تحت شرایط مدیریت‌های مختلف زراعی و آبیاری با آب شور. تحقیقات آب و خاک ایران، ۴۸(۱): ۴۹-۶۱.

۴. خرسند، ا.، رضاوردی نژاد، و. شهیدی، ع. ۱۳۹۳. ارزیابی عملکرد مدل AquaCrop در پیش‌بینی عملکرد گندم، رطوبت و شوری نیم‌رخ خاک تحت تنش‌های شوری و کم آبی. مدیریت آب آبیاری، ۴(۱): ۸۹-۱۰۴.
۵. رضوانی اعتدالی، ه.، لیاقت، ع.، پارسی نژاد، م. و توکلی، ع. ۱۳۹۵. واسنجی و اعتبارسنجی مدل AquaCrop در مدیریت آبیاری غلات مهم. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۳(۱۰): ۳۸۹-۳۹۷.
۶. شیرمحمدی، ع. اکبرخانی، ز. انصاری، ح. علیزاده، ا. کافی، م. ۱۳۹۲. ارزیابی توابع تولید آب شوری عملکرد در ذرت علوفه‌ای در استان خراسان رضوی نشریه آبیاری زهکشی ایران، ۴(۷): ۵۳۵-۵۴۳.
۷. صفری، ف.، رضوانی اعتدالی، ه.، کاویانی، ع.، آبابایی، ب. ۱۳۹۸. امکان‌سنجی شبکه آموزش‌های عصبی مصنوعی مدل با استفاده از مدل‌های گیاهی برای پیش‌بینی عملکرد و طول دوره‌های رشد گندم. مجله علمی و ترویجی نیوار، ۱۰۴-۱۰۵: ۱۱۲-۱۰۱.
۸. کریمی اورگانی، ح.، رحیمی خوب، ع. و نظری فر، م. ح. ۱۳۹۶. ارزیابی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی زیست توده جو در شرایط کم‌آبیاری. نشریه پژوهش آب در کشاورزی، ۳۱(۳): ۳۴۱-۳۵۳.
۹. محمدی، م.، داوری، ک.، قهرمان، انصاری، ح. و حق‌وردی، ا. ۱۳۹۴. واسنجی و صحت‌سنجی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد گندم بهار تحت تنش همزمان شوری و خشکی، پژوهش آب در کشاورزی، ۲۹(۳): ۲۷۷-۲۹۵.
۱۰. مهرآذر، آ.، سلطانی، ج. رحمتی، ا. ۱۳۹۴. ارزیابی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد ذرت تحت شرایط تنش شوری، نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۳۰(۵): ۱۴۳۹-۱۴۲۶.
۱۱. یزدانی، و. داوری، ک. قهرمان، ب. و کافی، م. ۱۳۹۳. ارزیابی عملکرد کلزا به صورت تابعی از ارتفاع آب آبیاری و شوری در منطقه مشهد. فصلنامه علوم پژوهشی علوم آبیاری و آب، ۵(۱۸): ۵۳-۳۲.
12. Alvarez, A. 2009. Predicting average regional yield and production of wheat in the Argentine Pampas by an artificial neural network approach. *Eur J. Agron*, 30: 70-77.
13. Brumbelow, K. and Georgakakos, A. 2007. Determining crop-water production functions using yield-irrigation gradient algorithms. *Agricultural Water Management* 87: 151-161.
14. Choopan, Y. and Emami, S. 2019. Estimation of barley yield under irrigation with wastewater using RBF and GFF models of artificial neural network. *Journal of Applied Research in Water and Wastewater*, 6(1): 73-79.
15. Farhangian Kashani, S. and Monem, R. 2010. Effect of salt stress on seed germination characters of ten St. John's wort (*hypericum perforatum* L.) genotypes. *Journal of Crop Production Research (Environmental Stresses in Plant Sciences)*, 2(1): 75-81.
16. Foster, T. and Brozović, N. 2018. Simulating crop-water production functions using crop growth models to support water policy assessments. *Ecological Economics*, 152: 9-21.
17. Gandhi, N. and Armstrong, L. J. 2016. Rice crop yield forecasting of tropical wet and dry climatic zone of India using data mining techniques. In 2016 IEEE International Conference on Advances in Computer Applications (ICACA) (pp. 357-363). IEEE.
18. García-Vilaa, M. and Fereres, E. 2012. Combining the simulation crop model AquaCrop with an economic model for the optimization of irrigation management at farm level. *Europ. J. Agronomy* 36: 21- 31.
19. Hsiao, T. C., Heng, L. K., 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: 448-459.
20. Hussain, S. and Hatibaruah, D. 2015. Modeling for prediction of tomato yield and its deviation using artificial neural network. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 29: 102-108.

21. Jiang, Y., Xu, X., Huang, Q., Huo, Z. and Huang, G. 2016. Optimizing regional irrigation water use by integrating a two-level optimization model and an agro-hydrological model. *Agricultural water management*, 178: 76-88.
22. Kaul, M., Hill, R. L. and Walthall, C. 2005. Artificial neural networks for corn and soybean yield prediction. *Agricultural Systems*, 85(1): 1-18.
23. Kim, D. and Kaluarachchi, J. 2015. Validating FAO AquaCrop using Landsat images and regional crop information. *Agricultural Water Management*, 149 143–155.
24. Liu, H. F., Genard, M., Guichard, S. and Bertin, N. 2007. Model-assisted analysis of tomato fruit growth in relation to carbon and water fluxes, *Experimental Botany*, 58 (13): 3567-3580.
25. López-Aguilar, K., Benavides-Mendoza, A., González-Morales, S., Juárez-Maldonado, A., Chiñas-Sánchez, P. and Morelos-Moreno, A. 2020. Artificial neural network modeling of greenhouse tomato yield and aerial dry matter. *Agriculture*, 10(4): 97.
26. Mohammadi, M., Ghahraman, B., Davary, K., Ansari, H. Shahidi, A. and Bannayan, M. 2016. Nested Validation of AquaCrop Model for Simulation of Winter Wheat Grain Yield, Soil Moisture and Salinity Profiles under Simultaneous Salinity and Water Stress . *Irrigation and Drainage*, 65: 112–128.
27. Noori, N., Kalin, L. and Isik, S. 2020. Water quality prediction using SWAT-ANN coupled approach. *Journal of Hydrology*, 590: 125220.
28. Singh A. K., Tripathy, R. and Chopra, U. K. 2008. Evaluation of CERES-Wheat and CropSyst models for water-nitrogen interactions in wheat crop. *Agricultural Water Management*, 95: 776–786.
29. Xin, H., Peiling, Y., Shumei, R., Yunkai, L., Guangyu, J. and Lianhao, L. 2016. Quantitative response of oil sunflower yield to evapotranspiration and soil salinity with saline water irrigation. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 9(2): 63-73.
30. Zhang, B., Feng, G., Ahuja, L. R., Kong, X., Ouyang, Y., Adeli, A. and Jenkins, J. N. 2018. Soybean crop-water production functions in a humid region across years and soils determined with APEX model. *Agricultural Water Management*, 204: 180-191.

فرا تحلیل اثربخشی کودآبیاری سطحی و قطره‌ای بر شاخص‌های عملکرد محصول و بهره‌وری آب و کود

رضا دل‌باز، حامد ابراهیمیان^۱، فریبرز عباسی و آرزو نازی قمشلو

دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

reza.delbaz@ut.ac.ir

دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

ebrahimian@ut.ac.ir

استاد، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

fariborzabbasi@gmail.com

استادیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

a.ghameshlou@ut.ac.ir

دریافت: بهمن ۱۳۹۹ و پذیرش: شهریور ۱۴۰۰

چکیده

رشد سریع علم و انتشار نتایج مختلف در یک موضوع خاص باعث سردرگمی محققان در حوزه‌های مختلف شده است. امروزه بررسی و جمع‌بندی نتایج مطالعات مختلف در یک حوزه خاص، ضروری به نظر می‌آید. فرا تحلیل به عنوان روشی ساختارمند و با استفاده از روش‌های آماری به تجمیع نتایج مطالعات یک موضوع می‌پردازد. در این پژوهش به منظور ارزیابی اثربخشی کودآبیاری سطحی و قطره‌ای بر شاخص‌های عملکرد محصول، بهره‌وری کود، و بهره‌وری آب از رهیافت فرا تحلیل استفاده شد. به این منظور مقالات هشت پایگاه اطلاعاتی استخراج شد. پس از بررسی آن‌ها، ۲۱ مطالعه شرایط ورود به فرا تحلیل را دارا بودند. تلفیق یافته‌ها نشان داد که عملیات کودآبیاری در هر دو روش سطحی و قطره‌ای سبب افزایش معنی‌دار شاخص‌های عملکرد محصول، بهره‌وری کود و آب مورد استفاده شد. اندازه اثرات به دست آمده از تلفیق نتایج برای عملکرد محصول در روش‌های کودآبیاری سطحی و قطره‌ای نسبت به آبیاری سطحی با کوددهی به روش سنتی به ترتیب برابر ۱/۳۲ و ۱/۲۵ شد. در بهره‌وری کود، اندازه اثر به دست آمده برای کودآبیاری سطحی نسبت به آبیاری سطحی با کوددهی به روش سنتی برابر ۲/۱۲ و برای کودآبیاری قطره‌ای برابر ۱/۴۳ و اندازه اثر بهره‌وری آب برای کودآبیاری سطحی و قطره‌ای نسبت به آبیاری سطحی با روش کوددهی سنتی برابر ۱/۲۴ و ۱/۷۴ شد. بنابراین، کودآبیاری در هر دو روش سطحی و قطره‌ای سبب ارتقای عملکرد محصول، بهره‌وری آب، و بهره‌وری کود می‌شود. با توجه به آن که نتایج این مطالعه از داده‌های کمی مطالعات اولیه استخراج شده است، برای رسیدن به قطعیت بیشتر پیشنهاد می‌شود مطالعات بیشتری توسط فرا تحلیل مورد بررسی قرار گیرند.

واژه‌های کلیدی: متاآنالیز، مرور ساختارمند، آبیاری، اندازه اثر، کوددهی

^۱ - آدرس نویسنده مسئول: گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

مقدمه

به دلیل افزایش روز افزون جمعیت و نیاز غذایی، استفاده از کود غیر قابل اجتناب شده است. همین امر باعث شده است که مصرف کودهای شیمیایی در دهه‌های اخیر به طرز چشم‌گیری افزایش یابد. توسعه چشم‌گیر مصرف کودهای شیمیایی به نوبه خود مشکلاتی را در برداشته است. افزایش عملکرد گیاهان زراعی تا حد زیادی مرهون مصرف کودهای شیمیایی است به طوری که سهم این کودها در بهبود عملکرد مطالعات مختلف بین ۳۰ تا ۵۰ درصد گزارش شده است (گود^۱ و همکاران، ۲۰۰۴). بالا بودن غلظت نیترات در آب‌های سطحی و زیرزمینی، شاهی از تلفات کودهای ازته و کارایی مصرف پایین آن‌ها است (رستم‌زاده و همکاران، ۱۳۹۲). مصرف بیش از حد کودهای شیمیایی باعث اتلاف آن‌ها از طریق آبشویی و کاهش راندمان مصرف کود و همچنین آلودگی زیست محیطی می‌شود. برای افزایش بهره‌وری و کاهش تلفات کود و مشکلات زیست محیطی کودآبیاری به کشاورزان پیشنهاد می‌شود. به عمل تزریق کود در سامانه‌های آبیاری، کودآبیاری گویند (عباسی، ۱۳۹۶؛ ابراهیمیان، ۱۳۹۸). کودآبیاری از روش‌های نسبتاً جدید مصرف کود به همراه آب آبیاری است که برای افزایش کارایی مصرف کود در سامانه‌های آبیاری مورد استفاده قرار می‌گیرد (محسنی و همکاران، ۱۳۹۰). کودآبیاری نه تنها یک روش پرهزینه و پیچیده نیست، بلکه یک ضرورت است. در مناطق خشک و نیمه خشک که میزان بارندگی کم است و با کمبود آب مواجه هستیم، افزایش بهره‌وری آب، کود و عملکرد، در اولویت است. استفاده از این روش جذب عناصر غذایی را بهبود بخشیده و راهی است برای حفظ حاصلخیزی خاک، بنابراین افزایش کارایی مصرف آب و کود، سودآوری بیشتری را برای کشاورزان به دنبال خواهد داشت (رضایی و همکاران، ۱۳۸۹). مطالعه گرنبری^۲ و همکاران (۲۰۰۰) نشان داد که

با اجرای روش کودآبیاری می‌توان با مصرف ۲۰ تا ۵۰ درصد کود نسبت به روش‌های رایج کوددهی، عملکرد بیشتری به دست آورد. عزیزاده و همکاران (۱۳۸۸) با مقایسه کودآبیاری سطحی با کوددهی سنتی برکارایی مصرف آب، کود، عملکرد، اجزای عملکرد ذرت و تلفات عمقی نیترات به این نتیجه دست یافتند که میزان عملکرد تولید شده در تیمارهای کودآبیاری بالاتر از تیمار کوددهی سنتی بود. شیانگ^۳ و همکاران (۲۰۱۵) روش‌های مختلف آبیاری و کوددهی بر عملکرد گیاه ذرت در حوزه رود نیل را مطالعه کردند. سه نوع روش آبیاری (آبیاری قطره‌ای، آبیاری بابلری (آفشان) و آبیاری جویچه‌ای) و دو نوع کود (کود آلی مایع و کود شیمیایی^۴) در این مطالعه اعمال شد. برای هر سه روش آبیاری، کود آلی مایع در مقایسه با کود شیمیایی، عملکرد ذرت را ۱۸/۶ تا ۲۴/۴ درصد و بهره‌وری مصرف آب را ۱۸/۷ تا ۲۳/۴ درصد افزایش داد. ابراهیمیان و همکاران (۲۰۱۴) در تحقیقی به بررسی کودآبیاری سطحی، چالش‌ها و نیازهای مربوط به آن پرداختند. ایشان در این تحقیق به این نتیجه دست یافتند که برای رسیدن به یک کودآبیاری مناسب با راندمان بالا و رفع مشکلات آن نیاز به ترکیب روش‌های تجربی و مدل‌های ریاضی است.

فراتحلیل^۵ روشی برای مقایسه آماری نتایج حاصل از مطالعات مستقل از هم در خصوص یک موضوع است (کوچکی و همکاران، ۱۳۹۶). اصطلاح فراتحلیل اولین بار توسط گلاس^۶ (۱۹۷۶) مطرح شد. این روش آماری اولین بار در مطالعات روانشناسی و پزشکی مورد استفاده قرار گرفت و سپس با مطالعات هگز^۷ و همکاران (۱۹۹۹) در بوم‌شناسی نیز به کار گرفته شد اما در علوم کشاورزی روش نسبتاً جدیدی است که تاکنون کمتر به آن پرداخته شده است (روتوندو و وستگیت^۸، ۲۰۰۹؛

5. Meta-Analysis
6. Glass
7. Hedges
8. Rotundo and Westgate

1. Good
2. Granberry
3. Xiang
4. Liquid Organic and Chemical Fertilizer

عملکرد محصول، بهره‌وری کود و آب به کمک فراتحلیل است.

مواد و روش‌ها

جستجو و جمع‌آوری داده‌ها

برای انجام فراتحلیل و دریافت مقالات کودآبیاری سطحی و قطره‌ای در ۲۰ سال اخیر، استراتژی جستجو بر روی پایگاه‌های اطلاعاتی Scopus، Wiley، Springer، Web of Science و پایگاه‌های داخلی مرکز اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی، بانک اطلاعات نشریات کشور (مگیران)، پایگاه استنادی علوم جهان اسلام و پایگاه اطلاعات علمی ایران (ایران‌داک) انجام شد. استراتژی جستجو بر اساس کلمات کلیدی "کودآبیاری (fertigation)"، "آبیاری (irrigation)" (شامل سامانه‌های آبیاری سطحی و قطره‌ای)، "کوددهی" (fertilization)، "عملکرد (yield)" و "بهره‌وری یا کارایی (productivity یا efficiency)" طراحی شدند. از این پایگاه‌های اطلاعاتی در مجموع ۳۴۳۰ مقاله استخراج شد. در نهایت بر اساس پروتکل ROSES^۶، ۲۱ مطالعه شرایط ورود به فراتحلیل را دارا بودند. این پروتکل در سال ۲۰۱۷ توسط هادوی^۸ و همکاران برای مطالعات محیط زیستی و بوم‌شناسی معرفی شد و در حقیقت به وسیله آن مسیر غربالگری مطالعات به صورت ساختارمند و روشن مشخص می‌شود و به طور کلی شامل سه مرحله اساسی جستجو، غربالگری و آماده‌سازی مطالعات برای ورود به فرایند فراتحلیل است. هر کدام از مطالعات استخراج شده حداقل یکی از پارامترهای هدف یعنی عملکرد محصول، بهره‌وری آب و بهره‌وری کود را شامل می‌شوند. این مطالعات علاوه بر تیمار آزمایش (کودآبیاری)، نتایج تیمار کنترل (کوددهی سنتی) را که برای محاسبه اندازه اثر^۹ مورد نیاز است، گزارش کرده‌اند. به طور مشخص در تیمار آزمایش، مدیریت کوددهی به

روزنبرگ^۱ و همکاران، ۲۰۰۴). به طور کلی فراتحلیل یک روش کمی و عینی^۲ برای ترکیب نتایج مطالعات پیشین در یک موضوع خاص است. فراتحلیل روش مناسبی برای خلاصه نتایج تعداد زیادی از تحقیقات، در مقایسه با داوری ذهنی درباره تحقیقات است. مطالعات فراتحلیل به دلیل شیوه ساختارمند آن‌ها و نتایج قابل اطمینانی که ارائه می‌دهند در دهه‌های اخیر توجه بسیاری از محققین در رشته‌های مختلف را به خود جلب کرده‌اند. والکاما^۳ و همکاران (۲۰۰۹) در فنلاند، فراتحلیلی را بر روی تاثیر مصرف مقادیر مختلف کود فسفر بر عملکرد گیاهان زراعی انجام دادند. ایشان با بررسی ۴۰۰ مطالعه انجام شده به این نتیجه دست یافتند که کاربرد کود فسفر در اکثر گیاهان زراعی تا حدود ۱۱ درصد باعث افزایش عملکرد آنها می‌شود. لینگویست^۴ و همکاران (۲۰۱۳) در مطالعه‌ای اثرات کودهای مختلف نیتروژن با کارایی بالا (EENF^۵) را بر عملکرد و جذب نیتروژن در مزارع غرقابی زیرکشت برنج را بررسی کردند. ایشان تمامی مقالات ISI که قبل از سال ۲۰۱۲ منتشر شده بود را مورد مطالعه قرار دادند. در نهایت ایشان به این نتیجه دست یافتند که کاربرد کودهای EENF منجر به ۵/۷ درصد افزایش عملکرد و هشت درصد افزایش جذب نیتروژن توسط گیاه می‌شود. لی^۶ و همکاران (۲۰۲۱) در یک فراتحلیل ۱۳۰ مطالعه را با موضوع کودآبیاری قطره‌ای مورد بررسی قرار دادند. نتایج این مطالعه نشان داد که به طور کلی کودآبیاری قطره‌ای می‌تواند به طور میانگین عملکرد محصول را تا ۱۲ درصد، بهره‌وری آب را تا ۲۶ درصد و بهره‌وری کود را تا ۳۴/۳ درصد نسبت به روش‌های سنتی افزایش دهد. با توجه به پراکندگی مطالعات کودآبیاری سطحی و قطره‌ای دستیابی به یک نتیجه‌گیری نهایی ساختارمند در این زمینه ضروری به نظر می‌رسد؛ بنابراین، هدف اصلی این تحقیق بررسی اثربخشی کودآبیاری سطحی و قطره‌ای بر شاخص‌های

6. Li

7. Reporting standards for Systematic Evidence Syntheses

8. Haddaway

9. Effect Size

1. Rosenberg

2. Objective

3. Valkama

4. Linquist

5. Enhanced efficiency nitrogen fertilizers

لهستان، مصر، ترکیه، زیمباوه و استرالیا هرکدام یک مطالعه را داشتند. محصولات مورد مطالعه گندم، ذرت، پنبه، نیشکر، پیاز، کلم، آفتابگردان، سیب‌زمینی، بادام‌زمینی و گوجه‌فرنگی بودند.

روش کودآبیاری سطحی و یا قطره‌ای بوده و در تیمار کنترل، کوددهی به روش‌های سنتی انجام شد. جزئیات این مطالعات در جدول ۱ آمده است. در این بین چهار مطالعه مربوط به کشور ایران، سه مطالعه از سوریه، دو مطالعه از چین، شش مطالعه مربوط به هند بود و کشورهای مقدونیه،

جدول ۱- لیست مطالعات ورودی به فراتحلیل

شماره	نام مطالعه	سال انتشار	عملکرد محصول	بهره‌وری آب	بهره‌وری کود	نوع گیاه	تعداد داده استخراج شده	نوع کودآبیاری	کشور
۱	علیزاده و همکاران	۱۳۸۸	✓	✓	✓	ذرت	۳	سطحی	ایران
۲	محسنی و همکاران	۱۳۹۰	✓	✓	✓	ذرت	۳	سطحی	ایران
۳	عباسی و همکاران	۱۳۹۴	✓	✓	✓	نیشکر	۳	سطحی	ایران
۴	جنت و سومی ^۱	۲۰۰۱	✓	×	✓	پنبه	۱۲	قطره‌ای	سوریه
۵	هالیتلیگیلج ^۲ و همکاران	۲۰۰۳	✓	✓	✓	سیب زمینی	۳	قطره‌ای	ترکیه
۶	رامپل ^۳ و همکاران	۲۰۰۴	✓	×	✓	پیاز	۹	قطره‌ای	لهستان
۷	میسری ^۴ و همکاران	۲۰۰۵	✓	✓	×	کلم	۱	قطره‌ای	زیمباوه
۸	جنت	۲۰۰۷	✓	×	✓	سیب زمینی	۶	قطره‌ای	سوریه
۹	جنت	۲۰۰۸	✓	×	✓	پنبه	۶	قطره‌ای	سوریه
۱۰	بدر ^۵ و همکاران	۲۰۱۰	✓	✓	✓	گوجه فرنگی	۶	قطره‌ای	مصر
۱۱	تاناسکویک ^۶ و همکاران	۲۰۱۱	✓	✓	✓	گوجه فرنگی	۶	قطره‌ای	مقدونیه
۱۲	آنوریت ^۷ و همکاران	۲۰۱۲	✓	×	✓	پنبه	۳	قطره‌ای	هند
۱۳	آنتیله ^۸	۲۰۱۷	✓	×	×	پنبه	۱	سطحی	استرالیا
۱۴	سونی ^۹ و همکاران	۲۰۱۷	✓	×	×	بادام زمینی	۴	قطره‌ای	هند
۱۵	سینها ^{۱۰} و همکاران	۲۰۱۷	✓	✓	✓	آفتاب-گردان	۳	قطره‌ای	هند
۱۶	سینگ ^{۱۱} و همکاران	۲۰۱۸	✓	✓	✓	پنبه	۳	قطره‌ای	هند
۱۷	جین ^{۱۲} و همکاران	۲۰۱۸	✓	×	✓	بادام زمینی	۳	قطره‌ای	هند
۱۸	سونی و همکاران	۲۰۱۹	✓	✓	✓	بادام زمینی	۴	قطره‌ای	هند
۱۹	محمدی و همکاران	۲۰۱۹	✓	×	×	ذرت	۲	سطحی	ایران
۲۰	وو ^{۱۳} و همکاران	۲۰۱۹	✓	✓	✓	ذرت	۲	قطره‌ای	چین
۲۱	بای و همکاران	۲۰۲۰	✓	×	✓	گندم	۹	قطره‌ای	چین

8. Antille

9. Soni

10. Sinha

11. Singh

12. Jain

13. Wu

1. Mussaddak Janat and George Somi

2. HalitligilH

3. Rumpel

4. Maisiri

5. Badr

6. Tanaskovik

7. Anureet

تحلیل آماری

تحلیل آماری در فراتحلیل به طور کلی از دو بخش معناداری آماری و محاسبه اندازه اثر تشکیل می‌شود. معنی‌داری آماری نشان می‌دهد که آیا ارتباط و یا اختلاف مشاهده شده بین گروه‌های مطالعه تنها با شانس و تصادف بوده است (فرضیه صفر، H_0) یا خیر (فرضیه مخالف، H_1). برای مثال چنانچه میانگین عملکرد گیاه گندم در کودآبیاری قطره‌ای برابر $7/4$ و در آبیاری آبیاری سطحی با کوددهی به روش سنتی برابر $6/3$ تن باشد، این سؤال می‌تواند مطرح شود که آیا مشاهده اختلاف یک تن در هکتار بین عملکرد محصول در کودآبیاری قطره‌ای و در آبیاری سطحی با کوددهی به روش سنتی بر اساس شانس بوده است یا خیر؟ به عبارت دیگر تا چه میزان این اختلاف بر اساس تصادف و شانس در نمونه‌های مورد مطالعه بوده است؟ میزان این احتمال توسط p -value محاسبه شده و معنی آن این است که تفاوت یا ارتباط مشاهده‌شده تا چه میزان بر اثر شانس بوده است. لذا کوچک بودن مقدار p -value نشان‌دهنده اثر کمتر تصادفی بودن است و بیان می‌دارد که ارتباط یا اختلاف بین متغیرها ذاتی و معنادار است. این مقدار برای بیان عدم شانس به طور معمول باید کمتر از $0/05$ باشد.

وجود تفاوت بین گروه‌ها (کودآبیاری و آبیاری با H_0 :

کوددهی سنتی) عدم

وجود تفاوت بین گروه‌ها (کودآبیاری و آبیاری با H_1 :

کوددهی سنتی)

اندازه اثر در حقیقت تفاوت بین شاخص مورد

مطالعه در تیمار شاهد و آزمایش را نشان می‌دهد. برای

محاسبه اندازه اثر بر اساس نوع مطالعات ورودی

روش‌های مختلفی ارائه شده است. از انواع رایج داده‌ها در

مطالعات میانگین برآورد شده، اندازه نمونه‌ها و انحراف

معیار در گروه‌های مورد مطالعه می‌باشد. در حوزه

کشاورزی نیز بیشتر داده‌ها بر اساس میانگین گزارش

می‌شوند. به همین دلیل اندازه اثرات محاسبه شده در این

پژوهش بر اساس میانگین شاخص‌های گزارش شده در مطالعات است؛ بنابراین برای هر مطالعه یک اندازه اثر بر اساس رابطه (۱) محاسبه شد (برونستاین^۱ و همکاران، ۲۰۱۱).

$$R = \frac{\bar{X}_1}{\bar{X}_2} \quad (1)$$

که در آن:

$(\bar{X}_1)$ و $(\bar{X}_2)$ به ترتیب میانگین در گروه اول و گروه دوم هستند. دامنه اطمینان این دسته از شاخص‌ها متقارن نبوده و توزیع داده‌ها برای محاسبه دامنه اطمینان نیز نرمال نیستند. در حالت نسبت ساده، اندازه اثر تحت تاثیر بیشتر مخرج بوده که برای رفع این اربیی و نرمال‌سازی داده‌ها باید از لگاریتم طبیعی نسبت‌ها استفاده شود (شکل (۱) و رابطه (۲))؛ برونستاین و همکاران، ۲۰۱۱؛ ایالونگو^۲، ۲۰۱۶.

$$\ln R = \ln\left(\frac{\bar{X}_1}{\bar{X}_2}\right) = \ln \bar{X}_1 - \ln \bar{X}_2 \quad (2)$$

حدود اطمینان^۳ اندازه اثر بر اساس واریانس مطالعات و توسط رابطه ۳ محاسبه شد.

$$V_{\ln R} = S_{pooled}^2 \left(\frac{1}{n_1(\bar{X}_1)^2} + \frac{1}{n_2(\bar{X}_2)^2} \right) \quad (3)$$

در معادله (۳) $\bar{X}_1$ ، $\bar{X}_2$ و n_1 و n_2 به ترتیب

میانگین‌های گروه اول و دوم و حجم نمونه‌های گروه اول

و دوم می‌هستند. S_{pooled} نیز انحراف معیار ادغام شده دو

گروه است و از رابطه ۴ به دست می‌آید که در آن S_1 و S_2

انحراف معیار گروه اول و دوم هستند.

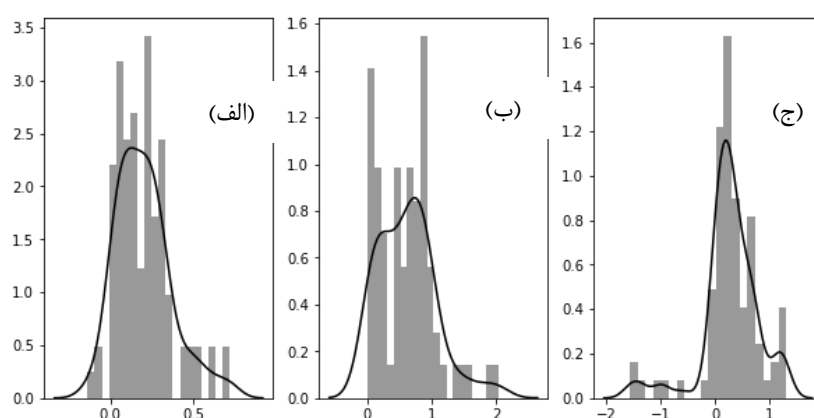
$$S_{pooled} = \sqrt{\frac{(n_1-1)S_1^2 + (n_2-1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2}} \quad (4)$$

پس از محاسبه اندازه اثر برای هر مطالعه،

میانگین وزن داده شده این اندازه اثرات محاسبه شد. برخی

از مطالعات وسیع‌تر بوده و بعضی کوچک‌تر هستند. طبیعی

فاصل اطمینان آن‌ها مشخص می‌شود. چنانچه این فواصل اطمینان با عدد یک همپوشانی داشته باشند، اندازه اثر موزون شده بی معنی بوده و شاهد و تیمار تفاوتی ندارند. برای انجام فراتحلیل نرم‌افزار CMA^۱ مورد استفاده قرار گرفت. این نرم افزار توسط برونستاین و همکاران در سال ۲۰۰۵ معرفی شد. از قابلیت‌های مهم این نرم افزار می‌توان به محاسبه اندازه اثر کلی، محاسبه اندازه اثر برای هر مطالعه، رسم نمودارهای مختلف فراتحلیل، تحلیل زیرگروه‌ها و رابط کاربری قوی اشاره کرد.



شکل ۱- توزیع فراوانی اندازه اثرات استخراج شده از مطالعات

(الف) توزیع اندازه اثرات عملکرد محصول، (ب) توزیع اندازه اثرات بهره‌وری آب، (ج) توزیع اندازه اثرات بهره‌وری کود

روش‌های کودآبیاری در مطالعات متفاوت بودند، زیرگروه‌هایی بر اساس روش کودآبیاری در نظر گرفته شدند. این زیرگروه‌ها شامل کودآبیاری سطحی (SF) و کودآبیاری قطره‌ای (DF) بوده و تیمارهای کنترل نیز خود از دو گروه آبیاری سطحی (SC) و آبیاری قطره‌ای (DC) به همراه کوددهی سنتی تشکیل شدند. نتایج عملکرد در همه گروه‌ها در فاصله اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار شد. اندازه اثرات به‌دست آمده نشان داد که روش کودآبیاری سطحی نسبت به آبیاری سطحی با کوددهی سنتی (SF vs SC) به طور میانگین باعث افزایش ۳۲ درصدی، کودآبیاری قطره‌ای نسبت به آبیاری سطحی با کوددهی سنتی (DF vs SC) باعث افزایش ۲۵ درصدی و کودآبیاری قطره‌ای نسبت به آبیاری قطره‌ای با کوددهی به

است که به نتایج مطالعاتی که از وسعت و دقت بیشتری برخوردار هستند، توجه بیشتری شود. میانگین وزندهی شده مطالعات از طریق رابطه (۵) محاسبه شد.

$$W_m = \frac{\sum_{i=1}^n R_i W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (5)$$

که در آن:

R_i میزان اثر مشاهده شده در مطالعه i ، W_i وزن آن مطالعه و n تعداد مطالعات می‌باشد. وزن هر مطالعه با واریانس نسبت عکس دارد. آخرین مرحله از فراتحلیل رسم نمودار درختی است که در آن اندازه اثر هر مطالعه با

بهره‌وری کود از رابطه (۶) محاسبه می‌شود. در این رابطه Y و N به ترتیب عملکرد محصول و مقدار کود مصرفی بر حسب کیلوگرم بر هکتار هستند.

$$NUE = \frac{Y}{N} \quad (6)$$

بهره‌وری آب از رابطه ۷ نیز به دست می‌آید که در آن Y عملکرد محصول (کیلوگرم) و V مقدار آب مصرفی (مترمکعب) است.

$$WP = \frac{Y}{V} \quad (7)$$

نتایج و بحث

عملکرد محصول

در مجموع ۹۲ اندازه اثر برای عملکرد محصول از مطالعات وارده شده استخراج شد. با توجه به اینکه

مطالعات عباسی و همکاران (۱۳۹۴) و لی^۱ و همکاران (۲۰۲۱) مبنی بر افزایش عملکرد محصول در روش‌های کودآبیاری سطحی و قطره‌ای نسبت به روش‌های سنتی هم‌خوانی دارد.

صورت سنتی (DF vs DC) باعث افزایش ۱۷ درصدی عملکرد محصول می‌شود (جدول ۲). به طور متوسط در تمامی روش‌های کودآبیاری سطحی و قطره‌ای، عملکرد به میزان ۲۲ درصد افزایش می‌یابد. نتایج این پژوهش با نتایج

جدول ۲- اندازه اثرهای عملکرد محصول بر اساس روش‌های مختلف کودآبیاری

روش کودآبیاری	گروه کنترل	اندازه اثر	حد بالا	حد پایین	p-value
سطحی	سطحی	۱/۳۲	۱/۴۵	۱/۲۰	۰/۰۰
قطره‌ای	سطحی	۱/۲۵	۱/۳۲	۱/۱۸	۰/۰۰
قطره‌ای	قطره‌ای	۱/۱۷	۱/۲۳	۱/۱۱	۰/۰۰
	کلی	۱/۲۲	۱/۲۶	۱/۱۸	۰/۰۰

اثر ۲/۱۲ شد. به عبارتی کودآبیاری سطحی باعث افزایش دو برابری بهره‌وری کود در مقابل آبیاری سطحی با کوددهی سنتی شده است. پس از آن کودآبیاری قطره‌ای در برابر آبیاری سطحی با کوددهی سنتی با اندازه اثر ۱/۴۳ قرار گرفت. به آن معنا که کودآبیاری قطره‌ای باعث افزایش ۴۳ درصدی بهره‌وری کود در مقابل آبیاری سطحی با پخش کود به روش سنتی خواهد شد. در زیرگروه کودآبیاری قطره‌ای در مقابل آبیاری قطره‌ای با روش کوددهی سنتی، اندازه اثر برابر ۱/۱۸ شد. بر اساس نتایج این مطالعات در شاخص بهره‌وری کود، روش کودآبیاری سطحی در اولویت قرار گرفت. نتایج مطالعه لی و همکاران (۲۰۲۱) افزایش ۳۴/۳ درصدی بهره‌وری کود در کودآبیاری قطره‌ای را نشان داد. از لحاظ افزایش بهره‌وری کود در کودآبیاری سطحی نتایج این پژوهش با مطالعات عباسی و همکاران (۱۳۹۴) و محسنی و همکاران (۱۳۹۰) مطابقت داشت.

شکل ۲ (الف)، مربوط به نمودار جنگلی اندازه اثرهای فوق بوده و همانطور که مشاهده می‌شود هیچ‌کدام از این اندازه اثرها به همراه فواصل اطمینان آن‌ها محور عدد یک را قطع نمی‌کنند که بیانگر معنی‌دار بودن اختلاف میانگین عملکرد در بین روش‌های کودآبیاری نسبت به روش‌های کوددهی سنتی است.

بهره‌وری کود

برای شاخص بهره‌وری کود در مجموع ۸۱ اندازه اثر از مطالعات وارد شده به فراتحلیل استخراج شد. با توجه به جدول ۳ می‌توان مشاهده کرد که اندازه اثر بهره‌وری کود در کل مطالعات ۱/۴۴ است. این به آن معنا است که ۴۴ درصد افزایش بهره‌وری کود در روش‌های کودآبیاری در مقابل کوددهی به روش سنتی وجود دارد. با توجه به این نتایج بیشترین افزایش بهره‌وری کود مربوط به روش کودآبیاری سطحی است. در این زیرگروه اندازه

جدول ۳- اندازه اثرهای بهره‌وری کود بر اساس روش‌های مختلف کودآبیاری

روش کودآبیاری	گروه کنترل	اندازه اثر	حد بالا	حد پایین	p-value
سطحی	سطحی	۲/۱۲	۲/۶۸	۱/۶۸	۰/۰۰
قطره‌ای	سطحی	۱/۴۳	۱/۵۳	۱/۳۳	۰/۰۰
قطره‌ای	قطره‌ای	۱/۱۸	۱/۲۴	۱/۱۳	۰/۰۰
	کلی	۱/۴۴	۱/۵۳	۱/۳۶	۰/۰۰

یک تلاقی ندارند. به عبارتی اندازه اثرات حاصل شده از لحاظ آماری معنی‌دار هستند. بیشترین فاصله از عدد یک نیز مربوط به زیرگروه کودآبیاری سطحی است.

نمودار جنگلی این نتایج در شکل ۲ (ب) آورده شده است. با توجه به نمودار جنگلی کاملاً مشهود است که هیچ‌کدام از فواصل اطمینان اندازه اثرات با محور عدد

بهره‌وری آب

از مطالعات ذکر شده ۱۳۰ اندازه اثر برای بهره‌وری آب استخراج شد. نتایج نشان داد که به طور کلی کودآبیاری ۴۶ درصد باعث افزایش بهره‌وری آب شد.

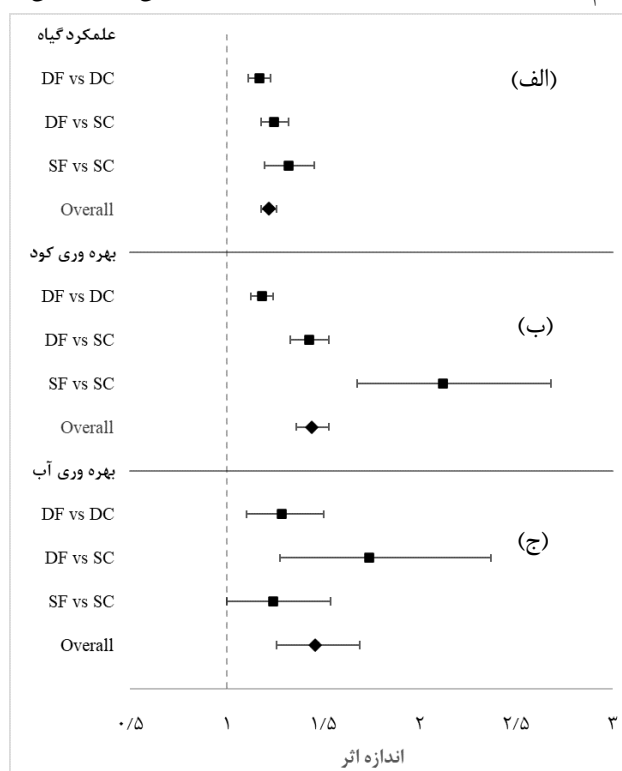
کودآبیاری قطره‌ای نسبت به آبیاری قطره‌ای و آبیاری سطحی با کوددهی سنتی به ترتیب بهره‌وری آب را به میزان ۲۹ و ۷۴ درصد افزایش می‌دهد. کودآبیاری سطحی نیز نسبت به آبیاری سطحی با کوددهی سنتی باعث افزایش ۲۴ درصدی بهره‌وری آب خواهد شد (جدول ۴).

جدول ۴- اندازه اثرهای بهره‌وری آب بر اساس روش‌های مختلف کودآبیاری

روش کودآبیاری	گروه کنترل	اندازه اثر	حد بالا	حد پایین	p-value
سطحی	سطحی	۱/۲۴	۱/۵۴	۱/۰۰	۰/۰۵
قطره‌ای	سطحی	۱/۷۴	۲/۳۷	۱/۲۷	۰/۰۰
قطره‌ای	قطره‌ای	۱/۲۹	۱/۵۰	۱/۱۰	۰/۰۰
	کلی	۱/۴۶	۱/۶۹	۱/۲۶	۰/۰۰

نتایج ذکر شده را می‌توان در شکل ۲ (ج) مشاهده کرد. تمامی اندازه اثرات در سطح پنج درصد معنی‌دار شدند و این بدان معنا است که هیچ کدام از حدود اطمینان خط

مربوط به عدد یک را قطع نکردند. بیشترین فاصله از خط یک مربوط به اندازه اثر گروه کودآبیاری قطره‌ای نسبت به آبیاری سطحی با کوددهی سنتی است.



شکل ۲- اندازه اثرات مبتنی بر روش‌های مختلف کودآبیاری

(الف) اندازه اثرات عملکرد محصول، (ب) اندازه اثرات بهره‌وری کود، (ج) اندازه اثرات بهره‌وری آب

نتیجه‌گیری

بررسی‌ها نشان می‌دهد که به طور کلی کودآبیاری سطحی و قطره‌ای بر شاخص‌های عملکرد محصول، بهره‌وری کود و بهره‌وری آب تاثیر مثبت دارد.

بر اساس نتایج ۲۱ مطالعه وارد شده به فراتحلیل، بالاترین افزایش عملکرد محصول مربوط روش کودآبیاری سطحی نسبت به آبیاری سطحی با کوددهی سنتی بود. به همین ترتیب در بهره‌وری کود، کودآبیاری سطحی نسبت

اما برای مناطقی که با کمبود منابع آبی روبرو هستند، کودآبیاری قطره‌ای با توجه به تاثیر مثبت بیشتر آن بر شاخص بهره‌وری آب پیشنهاد می‌شود. نتایج این تحقیق بر اساس مطالعات اولیه وارد شده به دست آمده است و نیاز است مطالعات بیشتری برای رسیدن به دقت و قطعیت بالاتر در تحقیقات آینده در فراتحلیل اثربخشی کودآبیاری در سامانه‌های مختلف آبیاری در نظر گرفته شوند.

به کودآبیاری قطره‌ای در اولویت قرار گرفت. بهره‌وری آب نیز در کودآبیاری قطره‌ای نسبت به کودآبیاری سطحی بالاتر بود که علت آن را می‌توان تفاوت در میزان آب مصرفی بین روش‌های آبیاری سطحی و قطره‌ای دانست. بر اساس نتایج این تحقیق در مناطقی که با کمبود منابع آبی روبرو نیستند، برای افزایش عملکرد محصول و بهره‌وری کود، کودآبیاری سطحی روش مناسب‌تری است؛

فهرست منابع

۱. ابراهیمیان، ح. ۱۳۹۸. شیماییاری. انتشارات دانشگاه تهران. ۱۷۶ صفحه.
۲. رستم‌زاده، ا.، گلچین، ا. و محمدی، ج. ۱۳۹۲. تاثیر منابع و مقادیر مختلف نیتروژن بر راندمان مصرف نیتروژن و عملکرد خیار سبز. مجله دانش آب و خاک، جلد ۲۳، شماره ۱، صفحه‌های ۱۵ تا ۲۶.
۳. رضایی، ح. لطفی، پ. یگانه مرکید، ز. ۱۳۸۹. کودآبیاری، مزایا و تاثیر آن در کشاورزی پایدار. اولین همایش کشاورزی پایدار و تولید محصول سالم، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی، اصفهان.
۴. عباسی، ف. ۱۳۹۶. فیزیک خاک پیشرفته. انتشارات دانشگاه تهران. ۳۲۰ صفحه، چاپ پنجم.
۵. عباسی، ف. شینی دشتگل، ع. سلامتی، ن. ۱۳۹۴. ارتقای بهره‌وری آب و کارایی مصرف کود در کودآبیاری جویچه ای نیشکر. نشریه آب و خاک، جلد ۲۹، شماره ۴، صفحه‌های ۹۳۳ تا ۹۴۲.
۶. عزیززاده، ح. لیاقت، ع. عباسی، ف. ۱۳۸۸. بررسی اثر کودآبیاری جویچه‌ای بر کارایی مصرف کود و آب، عملکرد و اجزای عملکرد ذرت دانه‌ای. نشریه آب و خاک، جلد ۲۳، شماره ۴، صفحه‌های ۱۳۷ تا ۱۴۷.
۷. کوچکی، ع. نصیری محلاتی، م. بخشائی، س. داوری، آ. ۱۳۹۶. فراتحلیل مصرف کود شیمیایی نیتروژن در تولید غلات در ایران. بوم شناسی کشاورزی، جلد ۹، شماره ۲، صفحه‌های ۲۹۶ تا ۳۱۳.
۸. محسنی، ا. میرسید حسینی، ح. عباسی، ف. ۱۳۹۰. مقایسه کودآبیاری با کوددهی سطحی بر کارایی مصرف آب، کود، عملکرد، اجزای عملکرد ذرت و تلفات نیترات. نشریه آب و خاک، جلد ۲۶، شماره ۵، صفحه‌های ۱۱۸۱ تا ۱۱۸۹.
9. Antille, D. L. 2017. Effect of fertigation on crop and soil established to cotton (*Gossypium hirsutum* L.) under furrow and overhead irrigation. In 2017 ASABE Annual International Meeting (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers.
10. Anureet, K., Sudeep, S., Sekhon, K. S., and Sidhu, B. S. 2012. Response of Bt cotton to nitrogen under drip and check basin method of irrigation under Punjab conditions. *Research on Crops*, 13(2): 708-710.
11. Badr, M. A., Abou Hussein, S. D., El-Tohamy, W. A., and Gruda, N. 2010. Nutrient uptake and yield of tomato under various methods of fertilizer application and levels of fertigation in arid lands. *Gesunde Pflanzen*, 62(1): 11-19.
12. Bai, S., Kang, Y., and Wan, S. 2020. Drip fertigation regimes for winter wheat in the North China Plain. *Agricultural Water Management*, 228: 105885.
13. Borenstein, M., Hedges, L., Higgins, J. and Rothstein, H. 2005. *Comprehensive Meta-analysis Version 2*. Englewood NJ Biostat.
14. Borenstein, M., Hedges, L. V., Higgins, J. P., and Rothstein, H. R. 2011. *Introduction to meta-analysis*. John Wiley & Sons.
15. Ebrahimian, H., Keshavarz, M. R., and Playán Jubillar, E. 2014. Surface fertigation: a review, gaps and needs. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 12(3): 820-837.
16. Granberry, D.M., Harrison, K.A., and Kelley, W.T. 2000. *Drip Irrigation*. Cooperative extension service university of Georgia, USA.

17. Glass, G. V. 1976. Primary, secondary, and meta-analysis of research. *Educational researcher*, 5(10), 3-8.
18. Good, A.G., Sherawat, A.K., and Muench, D.G. 2004. Can less yield more? Is reducing nutrient input into the environment compatible with maintaining crop production? *Trends in Plant Science* 9: 597-605.
19. Haddaway NR, Macura B, Whaley P, and Pullin AS. 2017. ROSES flow diagram for systematic reviews. Version 1.0.
20. Halitligil, M. B., Onaran, H., Munsuz, N., Kislal, H., Akin, A., Unlenen, A. L. ... and Kutuk, C. 2003. Drip irrigation and Fertigation of Potato under Light-textured soils of Cappadocia Region. In *Environmental Protection against Radioactive Pollution*. Springer, Dordrecht. 219-224.
21. Hedges, L.V., Gurevitch, J. and Curtis, P.S., 1999. The meta-analysis of response ratios in experimental ecology. *Ecology*, 80(4) :1150-1156.
22. Ialongo, C. 2016. Understanding the effect size and its measures. *Biochemia medica*, 26(2): 150-163.
23. Jain, N. K., Meena, H. N., Bhaduri, D., and Yadav, R. S. 2018. Drip fertigation and irrigation interval effects on growth, productivity, nutrient, and water economy in summer peanut. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 49(19): 2406-2417.
24. Janat, M., and Somi, G. 2001. Performance of cotton crop grown under surface irrigation and drip fertigation. II. Field water-use efficiency and dry matter distribution. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 32(19-20): 3063-3076.
25. Janat, M. 2007. Efficiency of nitrogen fertilizer for potato under fertigation utilizing a nitrogen tracer technique. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 38(17-18): 2401-2422.
26. Janat, M. 2008. Response of cotton to irrigation methods and nitrogen fertilization: yield components, water-use efficiency, nitrogen uptake, and recovery. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 39(15-16), 2282-2302.
27. Li, H., Mei, X., Wang, J., Huang, F., Hao, W., and Li, B. 2021. Drip fertigation significantly increased crop yield, water productivity and nitrogen use efficiency with respect to traditional irrigation and fertilization practices: A meta-analysis in China. *Agricultural Water Management*, 244: 106534.
28. Linqvist, B. A., Liu, L., van Kessel, C., and van Groenigen, K. J. 2013. Enhanced efficiency nitrogen fertilizers for rice systems: Meta-analysis of yield and nitrogen uptake. *Field Crops Research*, 154: 246-254.
29. Maisiri, N., Senzanje, A., Rockstrom, J., and Twomlow, S. J. 2005. On farm evaluation of the effect of low cost drip irrigation on water and crop productivity compared to conventional surface irrigation system. *Physics and Chemistry of the Earth, parts A/B/C*, 30(11-16): 783-791.
30. Mohammadi, A., Besharat, S., and Abbasi, F. 2019. Effects of irrigation and fertilization management on reducing nitrogen losses and increasing corn yield under furrow irrigation. *Agricultural Water Management*, 213: 1116-1129.
31. Rosenberg, M.S., Garrett, K.A., Su, Z. and Bowden, R.L. 2004. Meta-analysis in plant pathology: synthesizing research results. *Phytopathology*, 94(9): 1013-1017.
32. Rotundo, J.L. and Westgate, M.E., 2009. Meta-analysis of environmental effects on soybean seed composition. *Field Crops Research*. 110(2): 147-156.
33. Rumpel, J., Kaniszewski, S., and Dyśko, J. 2004. Effect of drip irrigation and fertilization timing and rate on yield of onion. *Journal of vegetable crop production*, 9(2): 65-73.
34. Singh, K., Brar, A. S., and Singh, H. P. 2018. Drip fertigation improves water and nitrogen use efficiency of Bt cotton. *Journal of Soil and Water Conservation*, 73(5): 549-557.
35. Sinha, I., Buttar, G. S., and Brar, A. S. 2017. Drip irrigation and fertigation improve economics, water and energy productivity of spring sunflower (*Helianthus annuus* L.) in Indian Punjab. *Agricultural Water Management*, 185: 58-64.
36. Soni, J. K., and Raja, N. A. 2017. Performance of groundnut (*Arachis hypogaea* L) under drip and micro sprinkler fertigation system. *Vegetos*, 30(2): 43-48.

37. Soni, J. K., Raja, N. A., and Kumar, V. 2019. Improving productivity of groundnut (*Arachis hypogaea* L.) under drip and micro sprinkler fertigation system. *Legume Research*, 42(1): 90-95.
38. Tanaskovik, V., Cukaliev, O., Romić, D., and Ondrašek, G. 2011. The influence of drip fertigation on water use efficiency in tomato crop production. *Agriculturae Conspectus Scientificus*, 76(1): 57-63.
39. Valkama, E., Uusitalo, R., Ylivainio, K., Virkajärvi, P., and Turtola, E. 2009. Phosphorus fertilization: A meta-analysis of 80 years of research in Finland. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 130(3-4):75-85.
40. Wu, D., Xu, X., Chen, Y., Shao, H., Sokolowski, E., and Mi, G. 2019. Effect of different drip fertigation methods on maize yield, nutrient and water productivity in two-soils in Northeast China. *Agricultural Water Management*, 213: 200-211.
41. Xiang Y, Zhang F, Rashad M. 2015. Effects of different irrigation and fertilization strategies on yield and water use efficiency of maize in Nile delta. *Trans. Chin. Soc. Agric. Mach* 46:116-26.

تحلیل عدم قطعیت مدل SWAP در یک مزرعه نیشکر با زهکشی زیرزمینی کنترل

شده در کشت و صنعت شعیبه

فرزین پرچمی عراقی و عدنان صادقی لاری

استادیار، بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل (مغان)، سازمان تحقیقات، آموزش و

ترویج کشاورزی، اردبیل، ایران.

f.parchamiaraghi@areeo.ac.ir

استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران.

adnansadeghi@yahoo.com

دریافت: فروردین ۱۴۰۰ و پذیرش: شهریور ۱۴۰۰

چکیده

از آنجا که نتایج شبیه‌سازی‌های زراعی-هیدرولوژیکی با درجات مختلفی از عدم قطعیت همراه است، لذا ارزیابی عدم قطعیت آن‌ها حایز اهمیت است. تحلیل عدم قطعیت نتایج مدل‌های زراعی-هیدرولوژیکی می‌تواند اطلاعات مفیدی در خصوص درجه اطمینان از نتایج مدل فراهم آورد. در این بررسی، تحلیل عدم قطعیت کاربرد توزیعی مدل SWAP برای یک مزرعه نیشکر با زهکشی زیرزمینی کنترل شده (واقع در کشت و صنعت نیشکر شعیبه، خوزستان) با استفاده از یک روش ترکیبی حا صل از تلفیق روش برآورد عدم قطعیت در ست‌نمایی تعمیم یافته (GLUE) با گونه یکپارچه سازی شده الگوریتم بهینه‌سازی رفتار جمعی اجزا (UPSO) انجام شد. نتایج حاکی از تغییرپذیری قابل توجه مقادیر رفتاری پارامترهای واسنجی و ضرورت ارزیابی عدم قطعیت شبیه‌سازی‌های مدل SWAP بود. وجود ضرایب همبستگی قوی بین مجموعه پارامترهای رفتاری، مبین ضرورت واسنجی هم‌زمان پارامترهای مختلف مدل به‌ازای داده‌های اندازه‌گیری شده معیار متنوع بود. محدوده‌های عدم قطعیت پیش‌بینی ۹۵ درصد (95PPU) محاسباتی برای شبیه‌سازی‌های هیدرولوژیکی (رطوبت خاک، نوسانات سطح ایستابی و جریان زه‌آب خروجی از زهکش زیرزمینی)، انتقال املاح (نیم‌رخ غلظت املاح آب خاک و شوری زه‌آب) و بیوفیزیکی (شاخص سطح برگ، عملکرد نی و عملکرد ساکارز) به ترتیب، بین ۸۰-۷۳٪، ۵۸-۴۵٪ و ۱۰۰-۷۵٪ از کل داده‌های اندازه‌گیری شده (مشمول بر هردو مجموعه داده‌های واسنجی و صحت‌سنجی) را با r-factor (نسبت متوسط ضخامت محدوده 95PPU به انحراف معیار داده مشاهداتی متناظر آن) بین ۰/۸۳ تا ۰/۹۸، ۱/۴۳ تا ۱/۹۶ و ۰/۷۵ تا ۱/۱۱ در بر گرفتند. میزان ضخامت محدوده 95PPU محاسباتی برای شبیه‌سازی‌های بیوفیزیکی در طول دوره شبیه‌سازی دارای روندی افزایشی بود.

واژه‌های کلیدی: برآورد عدم قطعیت درست‌نمایی تعمیم یافته، بهینه‌سازی رفتار جمعی اجزای یکپارچه، پارامترهای هیدرولوژیکی خاک،

شوری خاک

مقدمه

نتایج شبیه‌سازی‌های مدل‌های شبیه‌سازی زراعی-هیدرولوژیکی تعیینی همواره تحت تاثیر منابع مختلف عدم قطعیت، شامل عدم قطعیت ناشی از ساختار مدل شبیه‌سازی، پارامترهای مجهول مدل، داده‌های ورودی، شرایط اولیه و مرزی و نیز داده‌های مورد استفاده در واسنجی و صحت‌یابی مدل قرار قرار دارد (بی‌ون، ۲۰۰۶). از این رو، ارزیابی درجه عدم قطعیت نتایج مدل‌های زراعی-هیدرولوژیکی اهمیت پیدا می‌کند (وسلینگ و همکاران، ۲۰۲۰a). عدم قطعیت ناشی از ساختار مدل شبیه‌سازی با فرضیات ساده‌سازی اتخاذ شده در توسعه مدل، شرایط اولیه و مرزی انتخابی، نحوه منفصل‌سازی معادلات دیفرانسیلی در حوزه زمان/مکان و روش حل عددی مورد استفاده در مدل مرتبط است. عدم قطعیت پارامترهای مدل ناشی از این حقیقت است که مدل‌های شبیه‌سازی زراعی-هیدرولوژیکی دارای تعداد قابل توجهی از پارامترهای مجهول هستند که به‌طور مستقیم قابل اندازه‌گیری نبوده و با خطایی نامعلوم برآورد می‌شوند (گورگوگیونه و همکاران، ۲۰۱۹). این امر منجر به چالش غیریکتایی پارامترهای مجهول برآورد شده از طریق فرآیند واسنجی خواهد شد. به‌گونه‌ای که در این شرایط، فرآیند واسنجی پارامترهای مجهول مدل به یک جواب منحصر به فرد ختم نشده و ترکیبات مختلفی از مقادیر پارامترهای مجهول به عملکرد قابل قبول مدل شبیه‌سازی در بازسازی داده‌های واسنجی می‌انجامد (بی‌ون، ۲۰۰۶).

روش‌های تحلیل عدم قطعیت به‌عنوان راهکاری برای ارزیابی اثر منابع مختلف عدم قطعیت یاد شده بر عدم قطعیت شبیه‌سازی‌های مدل به‌شمار می‌روند. این روش‌ها به‌لحاظ فرضیات آماری اتخاذ شده در توسعه آنها، منابع عدم قطعیت قابل کمی‌سازی از طریق روش ارائه شده، حجم محاسبات مورد نیاز و سهولت به‌کارگیری و پیاده‌سازی آنها با یکدیگر متفاوت هستند. یکی از

رایج‌ترین روش‌های تحلیل عدم قطعیت در کاربردهای مدل‌سازی‌های هیدرولوژیکی، روش برآورد عدم قطعیت درست‌نمایی تعمیم یافته^۱ (GLUE) (بی‌ون و بینلی، ۱۹۹۲) است. در روش GLUE، اثر تمامی منابع عدم قطعیت مورد اشاره در برآورد عدم قطعیت شبیه‌سازی‌های مدل لحاظ شده و این روش، فاقد فرضیات آماری سخت (که کاربرد روش را به شرایط خاصی محدود می‌کنند) است (یانگ و همکاران، ۲۰۰۸).

در روش GLUE، با تعریف یک تابع توزیع احتمال پیشین برای هریک از پارامترهای مجهول مدل و از طریق اجرای شبیه‌سازی‌های مونت‌کارلو با یک حجم نمونه از پیش تعیین شده، نسبت به نمونه‌گیری تصادفی از فضای پارامترهای مجهول مدل (فضای شکل یافته از دامنه تغییرات مجاز پارامترهای مجهول در واسنجی مدل) اقدام می‌شود. سپس، مدل شبیه‌سازی به‌ازای هریک از دسته پارامترهای نمونه‌گیری شده اجرا شده و شبیه‌سازی‌های متناظر با هر دسته پارامتر تولید می‌شود. با انتخاب یک معیار درست‌نمایی مانند ضریب کارایی مدل (رابطه (۴)) و تعیین یک مقدار آستانه‌ای برای آن، شبیه‌سازی‌های قابل قبول و غیرقابل قبول مدل (که به ترتیب، به شبیه‌سازی‌های رفتاری و غیررفتاری معروف هستند) از یکدیگر متمایز می‌شوند. در ادامه، با اطلاق یک وزن درست‌نمایی w_i (رابطه (۱)) به هریک از دسته پارامترهای رفتاری شناسایی شده، تابع توزیع احتمال شبیه‌سازی‌های رفتاری (که به توزیع پسین معروف است) اشتقاق یافته و از طریق آن، کران‌های عدم قطعیت پیش‌بینی‌های مدل در قالب صدک‌های توزیع پسین محاسبه می‌شود (عباسپور، ۲۰۰۸):

$$w_i = \frac{L(\theta_i)}{\sum_{i=1}^M L(\theta_i)} \quad (1)$$

که در آن:

w_i وزن درست‌نمایی مربوط به دسته پارامتر رفتاری i ام، $L(\theta_i)$ معیار درست‌نمایی متناظر با دسته پارامتر رفتاری θ_i و M تعداد کل دسته پارامترهای رفتاری شناسایی شده است.

یکی از کاستی‌های روش GLUE آن است که مشخص‌سازی سراسر نواحی رفتاری فضای پارامترها (که به رویه تابع درست‌نمایی معروف است) نیازمند انتخاب یک حجم نمونه‌گیری بالا از فضای پارامترهای مدل است. از سوی دیگر، تعیین حجم نمونه مورد نیاز نیز یکی دیگر از چالش‌های کاربرد این روش بوده و عملاً، مقدار آن بر اساس معیارهای ادراکی انتخاب می‌شود (بی‌ون، ۲۰۰۶). همین‌طور، به دلیل آن که در اغلب موارد، تابع توزیع احتمال پیشین پارامترها، خود مجهول بوده و اطلاعاتی در خصوص آن در دست پژوهشگران نیست، معمولاً از تابع توزیع احتمال یک‌نواخت به‌عنوان تابع توزیع احتمال پیشین پارامترها استفاده می‌شود. این امر به معنای جستجوی کورکورانه فضای پارامترها است؛ بنابراین، در نتیجه نمونه‌گیری‌های کاملاً تصادفی از فضای پارامترها، تعداد قابل توجهی از دسته پارامترهای نمونه‌گیری شده به شبیه‌سازی‌های رفتاری ختم نشده و لذا، نتایج آنها در گام‌های بعدی محاسبات عدم قطعیت فاقد کاربرد خواهد بود (موگانتن و شومیکر، ۲۰۰۶). بدین ترتیب، اشتقاق تمامی دسته پارامترهای رفتاری مورد نیاز به منظور دستیابی به برآوردی هرچه معتبرتر از عدم قطعیت شبیه‌سازی‌های مدل تضمین شده نخواهد بود. در این شرایط، تنها راهکار برای دستیابی به برآوردهای هرچه واقع‌بینانه‌تر از عدم قطعیت شبیه‌سازی‌های مدل، افزایش تعداد نمونه‌گیری‌ها از فضای پارامترها است که این امر افزایش دفعات اجرای مدل و لذا، افزایش مفرط حجم محاسبات را در پی خواهد داشت (تالسن و شومیکر، ۲۰۰۸). تا جایی که این کاستی روش GLUE یکی از محدودیت‌های کاربرد آن در مورد مدل‌های شبیه‌سازی با حجم محاسباتی بالا به‌شمار می‌رود. الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی با دارا بودن قابلیت پیاده‌سازی یک جستجوی احتمالاتی، سراسری و در عین حال هدفمند فضای پارامترها، قادر به یافتن نواحی رفتاری و نیز جواب بهینه سراسری مساله مدل‌سازی معکوس با یک هزینه محاسباتی به مراتب معقول‌تر از GLUE هستند. به‌همین دلیل، تلفیق روش GLUE با

روش‌های بهینه‌سازی تکاملی به‌عنوان راهکاری برای بهینه‌سازی حجم محاسبات تحلیل عدم قطعیت مدل‌های شبیه‌سازی مورد توجه واقع شده است (موگانتن و شومیکر، ۲۰۰۶؛ تالسن و شومیکر، ۲۰۰۸؛ عباسپور، ۲۰۰۸؛ پولاکو و ماهانتی، ۲۰۱۲). در این رویکرد، نواحی رفتاری فضای پارامترها به جای نمونه‌گیری‌های کاملاً تصادفی از طریق یک الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی مورد جستجو قرار گرفته و سایر مراحل محاسبات عدم قطعیت مشابه روش اصلی GLUE است. نتایج پژوهش‌های صورت گرفته در این رابطه، حاکی از برتری روش‌های تلفیقی بر روش اصلی GLUE بوده و این برتری با افزایش تعداد پارامترهای مجهول مدل به‌شدت نمود می‌یابد (تالسن و شومیکر، ۲۰۰۸). تا جایی که موگانتن و شومیکر (۲۰۰۶) با تلفیق GLUE و یک الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی و به کارگیری آن برای تحلیل عدم قطعیت یک مدل جریان آب زیرزمینی نشان دادند که روش ترکیبی ارائه شده علاوه بر قابلیت یافتن جواب بهینه سراسری مساله مدل‌سازی معکوس، در یافتن نواحی رفتاری فضای پارامترهای واسنجی مدل نسبت به روش GLUE برتر داشت. این برتری حتی با ۱۰ برابر کردن حجم نمونه‌گیری‌های مورد استفاده در روش GLUE نسبت به روش ترکیبی همچنان باقی بود.

بنابراین، با توجه به قابلیت‌های به اثبات رسیده رویکردهای ترکیبی فوق در تحلیل عدم قطعیت شبیه‌سازی مدل‌های ریاضی حجیم، به‌نظر می‌رسد که تلفیق روش GLUE با یک الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی گزینه مناسبی برای آنالیز عدم قطعیت مدل‌سازی‌های زراعی-هیدرولوژیکی توزیعی با صرف یک هزینه محاسباتی معقول باشد. طی پژوهشی، پرچمی عراقی و همکاران (۱۳۹۹) با کاربرد نسخه تصحیح شده‌ای از مدل SWAP (کروز و همکاران، ۲۰۱۷)، یک طرح مدل‌سازی زراعی-هیدرولوژیکی توزیعی با قابلیت واسنجی زیرروانه را توسعه دادند. چارچوب توسعه یافته به‌منظور مدل‌سازی زراعی-هیدرولوژیکی یک مزرعه نیشکر با زهکشی

زیرزمینی کنترل شده در واحد کشت و صنعت نیشکر امام خمینی (شعبیه)، خوزستان با موفقیت مورد واسنجی و صحت‌سنجی قرار گرفت. نتایج حاکی از قابلیت تعمیم‌پذیری مناسب مدل در ۱) شبیه‌سازی رطوبت خاک، عمق سطح ایستابی و جریان زه‌آب خروجی (با آماره ضریب کارایی مدل، EF، به‌ترتیب، برابر با ۰/۸۳، ۰/۹۲ و ۰/۸۶ طی مرحله واسنجی و آماره EF به‌ترتیب، برابر با ۰/۸۸، ۰/۷۸ و ۰/۷۱ طی مرحله صحت‌یابی)، ۲) شبیه‌سازی نیم‌رخ غلظت املاح آب خاک و شوری زه‌آب خروجی از سیستم زهکش زیرزمینی (با آماره ریشه میانگین خطای نرمال شده، NRMSE، به‌ترتیب، برابر با ۰/۱۲ و ۰/۰۸ در مرحله واسنجی و آماره NRMSE به‌ترتیب، برابر با ۰/۱۵ و ۰/۰۷ طی مرحله صحت‌یابی) و ۳) شبیه‌سازی شاخص سطح برگ، عملکرد نی و عملکرد ساکارز (با آماره EF به‌ترتیب، برابر با ۰/۹۹۷، ۰/۹۹۳ و ۰/۹۸۸ در مرحله واسنجی) بود. هدف از پژوهش حاضر، تحلیل عدم قطعیت مدل توسعه یافته در پژوهش فوق از طریق تلفیق GLUE با گونه یکپارچه الگوریتم بهینه‌سازی رفتار جمعی اجزا (UPSO) (پارسوپولوس و وراهاتیس، ۲۰۰۴) بوده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی: پژوهش حاضر در یکی از مزارع (مزرعه B1115) تحت کشت گیاه نیشکر (کشت اول) در واحد کشت و صنعت نیشکر امام خمینی (شعبیه)، بین طول جغرافیایی $48^{\circ}37'$ تا $48^{\circ}50'$ شرقی و عرض جغرافیایی $31^{\circ}37'$ تا $32^{\circ}00'$ شمالی) و با استفاده از بانک اطلاعات مزرعه‌ای گردآوری شده توسط صادقی لاری (۱۳۹۱) صورت گرفت. مزرعه مطالعاتی مجهز به زهکش زیرزمینی آزاد (با متوسط عمق کارگذاری ۲/۱ متر، طول ۸۴۵ متر و به‌فواصل تقریبی ۷۵ متر از یکدیگر) است که طی بخشی از دوره رشد گیاه (از اردیبهشت تا آبان ماه ۱۳۹۰) تحت سامانه زهکشی کنترل شده با عمق کنترل

سطح ایستابی ۹۰ سانتی‌متر قرار گرفت. کشت قلمه‌های نیشکر در مزرعه مطالعاتی در شهریور ماه ۱۳۸۹ انجام شد. **برپاسازی مدل برای مزرعه مطالعاتی:** دوره شبیه‌سازی برای مزرعه مورد مطالعه یک دوره کامل رشد کشت اول گیاه نیشکر (به مدت ۴۸۱ روز) را در بر می‌گرفت. ستون خاک در نظر گرفته شده برای مزرعه مطالعاتی دارای عمق ۵۵۰ سانتی‌متر (معادل با عمق وقوع لایه محدود کننده) و مشتمل بر دو لایه خاک متمایز بود (جدول ۱). مقادیر ۱۵ دقیقه‌ای تبخیر-تعرق پتانسیل و واقعی گیاه نیشکر با استفاده از داده‌های هواشناسی روزانه مزرعه نمونه منطقه مطالعاتی و چارچوب ریزمقیاس‌سازی اطلاعات هواشناسی (پرچمی عراقی و همکاران، ۱۳۹۴ ب) و ویرایش تصحیح شده مدل پنمن-مانتیت ASCE برای منطقه مطالعاتی (پرچمی عراقی و همکاران، ۱۳۹۴ الف) برآورد شد.

به‌دلیل وسعت قابل توجه مزرعه مطالعاتی (حدود ۲۱ هکتار) و ناهمگنی مکانی برنامه‌ریزی آبیاری اعمال شده در سطح مزرعه، مدل SWAP با تعریف ۱۰ واحد شبیه‌سازی همگن (موسوم به هیدروتوپ) به شیوه توزیعی مورد کاربرد قرار گرفت. به‌منظور در نظر گرفتن زمان‌های اعمال رویدادهای آبیاری طی ساعات شبانه‌روز، رویدادهای آبیاری محقق شده در مزرعه به‌صورت داده‌های زیرروزانه به مدل معرفی شد.

شرط مرزی پایین‌دست در مدل SWAP
به صورت مقادیر از پیش تعیین شده جریان از کف نیم‌رخ خاک با میزان شوری معین تعریف شد. برای این منظور، میزان جریان از کف در پنج مقطع زمانی طی دوره شبیه‌سازی (با فواصل زمانی یکسان) از طریق مدل‌سازی معکوس و در مورد سایر گام‌های زمانی دیگر از طریق درون‌یابی خطی بین مقادیر فوق برآورد شد. میزان شوری آب زیرزمینی و شوری جریان از کف نیم‌رخ خاک، هریک به‌عنوان یک پارامتر مجهول یکتا از طریق مدل‌سازی معکوس برآورد شد. به‌منظور مدل‌سازی سامانه زهکشی

مطالعاتی توسط پرچمی عراقی و همکاران (۱۳۹۹) تشریح شده است.

تحلیل عدم قطعیت مدل: در این بررسی، با برنامه‌نویسی فرترن و ++C چندپردازشی و تلفیق روش GLUE با الگوریتم UPSO یک طرح تحلیل عدم قطعیت ترکیبی توسعه یافت. طرح توسعه یافته با کد منبع تصحیح شده‌ای از مدل SWAP (پرچمی عراقی و همکاران، ۱۳۹۹) یکپارچه سازی شد. فرآیند واسنجی و تحلیل عدم قطعیت مدل توسعه یافته برای مزرعه مطالعاتی، با در نظر گرفتن مجموعاً، ۴۵ پارامتر مجهول (جدول ۳) صورت گرفت. دامنه تغییرات مجاز پارامترهای مجهول مدل بر اساس منابع علمی (شاپ و لیث، ۱۹۹۸؛ کروز و همکاران، ۲۰۱۷) و مشاهدات مزرعه‌ای تعیین شد (جدول ۳). کران پایین دامنه تغییرات مجاز پارامتر رطوبت اشباع، θ_{sat} ، بر اساس حداکثر مقدار رطوبت حجمی مشاهده شده تعیین شد. فرآیند واسنجی پارامترهای مجهول مدل به‌ازای ۳۰۰ ذره (دو برابر تعداد ذرات در نظر گرفته شده در پژوهش پرچمی عراقی و همکاران (۱۳۹۹)) و ۴۵۰ تکرار (با احتساب ۱۰ هیدروتوپ در نظر گرفته شده، مجموعاً، ۱/۳۵ میلیون مرتبه اجرای مستقل مدل SWAP) انجام شد. مجموعه داده‌های مورد استفاده در واسنجی و صحت سنجی مدل توسعه یافته برای مزرعه مطالعاتی در جدول ۲ ارائه شده است. از مجموع وزنی آماره ریشه میانگین خطای نرمال شده (NRMSE، رابطه (۳)) حاصل از مقایسه مقادیر هریک از مجموعه داده‌های واسنجی با داده‌های شبیه‌سازی شده با ضرایب وزنی یکسان به‌عنوان تابع برازش مساله مدل‌سازی معکوس تک‌هدفه استفاده شد. پس از اجرای مدل به‌ازای هریک از دسته پارامترهای تولید شده از طریق طرح ترکیبی GLUE-UPSO، عملکرد مدل در باز سازی داده‌های واسنجی با استفاده از آماره‌های NRMSE و ضریب کارایی مدل، EF، مورد ارزیابی قرار گرفت. آماره‌های فوق به‌شرح زیر قابل محاسبه می‌باشند:

$$NRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (P_i - O_i)^2}{m}} / \bar{O} \quad (3)$$

از رویکرد زهکشی چند گانه مبتنی بر مفهوم مقاومت زهکشی (کروز و همکاران، ۲۰۱۷) استفاده شد.

مزرعه مطالعاتی علاوه بر دارا بودن سامانه زهکشی زیرزمینی، در مجاورت یک زهکش جمع‌کننده روباز نیز قرار داشت؛ بنابراین، در فرآیند مدل سازی، یک سامانه زهکشی زیرزمینی و یک سامانه زهکشی سطحی (با ویژگی‌های یکسان برای هر ۱۰ هیدروتوپ) در نظر گرفته شد. زه آب خروجی از هر هیدروتوپ از طریق رابطه ساده زیر روندیابی شد:

$$T_{delay}^{iHdrt} = (T_c L_{outlet}^{iHdrt}) / \text{Max}\{L_{outlet}^{iHdrt}\}_{iHdrt=1}^{nHdrt} \quad (2)$$

که در آن:

L_{outlet}^{iHdrt} و T_{delay}^{iHdrt} به ترتیب، طول مسیر (متر) و زمان تاخیر (ساعت) رسیدن زه آب خروجی از هیدروتوپ $iHdrt$ ام به نقطه خروجی، T_c متوسط زمان انتقال زه آب به خروجی سیستم زهکشی (ساعت) و $nHdrt$ بیانگر تعداد هیدروتوپ‌های متصل به نقطه خروجی مورد نظر است.

مدل سازی انتقال املاح با لحاظ کردن دو فرآیند انتقال توده‌ای و جذب سطحی املاح (مبتنی بر ایزوترم جذب خطی) صورت گرفت. به‌منظور شبیه سازی رشد گیاه نیشکر و عملکرد محصول از مدل گیاهی WOFOST (سوویت و همکاران، ۱۹۹۴) استفاده شد. پارامترهای حساس این مدل بر اساس پژوهش‌های مشابه گذشته (بسمبایندر و همکاران، ۲۰۰۳) شناسایی شد و مقادیر آن‌ها از طریق مدل سازی معکوس برآورد شد (جدول ۳). با توجه به طولانی بودن دوره رشد و توسعه گیاه نیشکر (حدود ۱۵ ماه) مقادیر پارامترهای گیاهی A_{max} و SLA (جدول ۳) هریک در نه مقطع از دوره رشد گیاه (با فواصل مساوی و به‌عنوان تابعی از مجموع دما) از طریق مدل‌سازی معکوس و برای سایر ایام از طریق درونیابی خطی بین مقادیر فوق برآورد شد. جزئیات بیشتر در خصوص روش‌شناسی برپاسازی مدل برای مزرعه

$$EF = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^m (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^m (O_i - \bar{O})^2} \right) \quad (۴)$$

که در آن‌ها:

O مقدار اندازه‌گیری شده، P مقدار شبیه‌سازی شده و $\bar{O}$ میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و m تعداد مقایسه‌ها است. مقادیر آماره NRMSE در دامنه ۰/۰۰ تا ۰/۱۰، ۰/۱۰ تا ۰/۲۰، ۰/۲۰ تا ۰/۳۰ و بزرگتر از ۰/۳۰ به ترتیب، به عنوان عملکرد بسیار خوب، خوب، قابل قبول و غیرقابل قبول مدل در بازسازی مقادیر اندازه‌گیری شده معیار در نظر گرفته می‌شود (لوگ و گرین، ۱۹۹۱). مقادیر آماره ضریب کارایی مدل در دامنه ۰/۸ تا ۱/۰، ۰/۷ تا ۰/۸، ۰/۵ تا ۰/۷ و کوچکتر از ۰/۵ به ترتیب، به عنوان عملکرد بسیار خوب، خوب، قابل قبول و غیرقابل قبول مدل در بازسازی مقادیر اندازه‌گیری شده معیار در نظر گرفته می‌شود (موریاسی و همکاران، ۲۰۰۷).

پرچمی عراقی و همکاران (۱۳۹۹) نشان دادند که در صورت بروز تناقض در ارزیابی عملکرد مدل بر اساس آماره‌های EF و NRMSE، ملاک قرار دادن این دو آماره به ترتیب، برای قضاوت در خصوص عملکرد مدل در بازسازی داده‌های واسنجی با واریانس بالا و واریانس پایین نسبت به دیگری دارای ارجحیت است؛ بنابراین، به منظور متمایز ساختن دسته پارامترهای رفتاری و غیررفتاری از یکدیگر، دسته پارامتری که شبیه سازی‌های صورت گرفته با استفاده از آن تمامی معیارهای وضع شده در جدول ۲ را به طور هم‌زمان برآورده ساخت، به عنوان یک دسته پارامتر رفتاری در نظر گرفته شد. درجه حساسیت تابع برازش نسبت به هریک از پارامترهای واسنجی مدل با استفاده از آماره ضریب تغییرات (CV) محاسبه شده برای مجموعه پارامترهای رفتاری مورد بررسی قرار گرفت. مقادیر آماره ضریب تغییرات (CV) کوچکتر از ۲۵ درصد، بین ۲۵ تا ۷۵ درصد و بزرگتر از ۷۵ درصد به ترتیب، به عنوان تغییرپذیری ناچیز، بینایی و تغییرپذیری بالای کمیت مورد بررسی در نظر گرفته می‌شود (یوان‌ای‌بی، ۲۰۱۵).

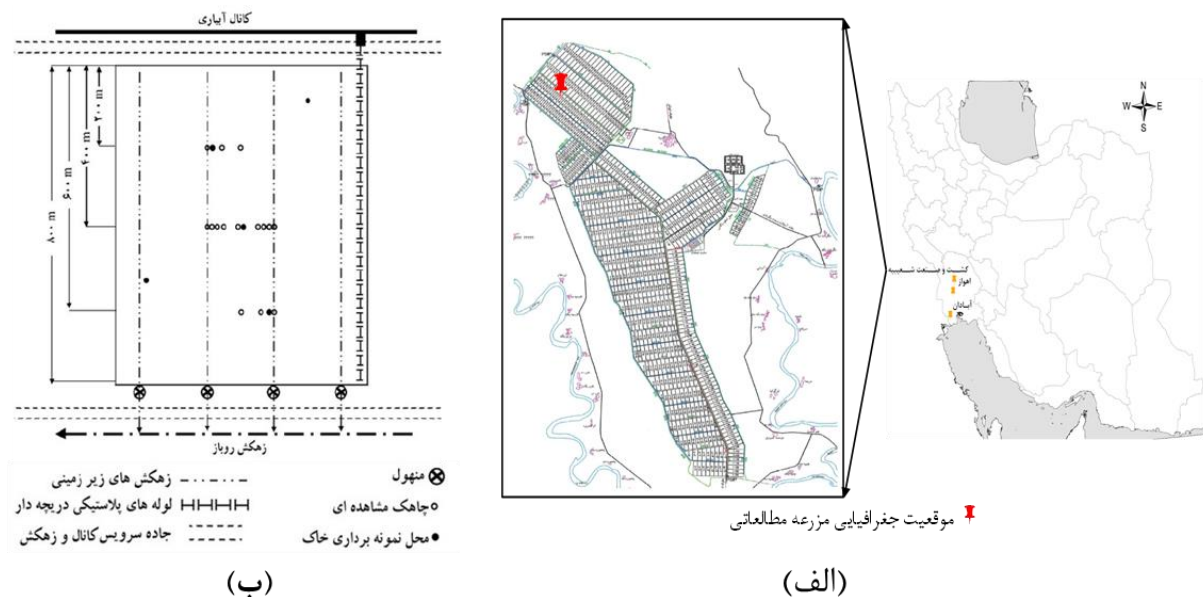
از مقادیر تابع برازش مساله مدل سازی معکوس محاسباتی برای هریک از دسته پارامترهای رفتاری شناسایی شده به عنوان معیار درست‌نمایی در محاسبه وزن‌های درست‌نمایی (رابطه (۱)) استفاده شد. وزن‌های درست‌نمایی محاسبه شده به منظور تعیین محدوده‌های عدم قطعیت پیش‌بینی ۹۵ درصد (95PPU) برای به هریک از سری زمانی‌های شبیه سازی شده داده‌های واسنجی مورد استفاده قرار گرفت. محدوده‌های عدم قطعیت اشتقاق یافته با استفاده از آماره‌های p-factor و r-factor مورد ارزیابی قرار گرفت (عباسپور، ۲۰۰۸):

$$p - factor = \frac{100 \left| \{O_i | P_i^{2.5\%} \leq O_i \leq P_i^{97.5\%}, i=1,2,...,m\} \right|}{m} \quad (۵)$$

$$r - factor = \frac{\sum_{i=1}^m (P_i^{97.5\%} - P_i^{2.5\%})}{m \sigma_{obs}} \quad (۶)$$

که در آن‌ها:

$P_i^{97.5\%}$ و $P_i^{2.5\%}$ به ترتیب، کران‌های پایین و بالای محدوده عدم قطعیت پیش‌بینی ۹۵ درصد (95PPU) و σ_{obs} انحراف معیار داده‌های اندازه‌گیری شده است. آماره p-factor بیانگر درصدی از داده‌های اندازه‌گیری شده واقع در محدوده 95PPU است. آماره r-factor بیانگر نسبت متوسط ضخامت محدوده 95PPU به انحراف معیار داده‌های اندازه‌گیری شده است (یانگ و همکاران، ۲۰۰۸). در شرایط ایده‌آل، مقدار آماره‌های p-factor و r-factor به ترتیب، برابر با ۱۰۰ درصد و صفر است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی مزرعه مطالعاتی (الف) و سیمای سیستم آبیاری و زهکشی در مزرعه مطالعاتی (ب)

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نیم‌رخ خاک مزرعه مطالعاتی

عمق (cm)	بافت خاک	شن (%)	سیلت (%)	رس (%)	جرم ویژه ظاهری (g cm^{-3})	کربن آلی (%)	آهک (%)	pH (-)	شوری عصاره اشباع (dS m^{-1})
۰-۳۰	لوم رسی-سیلتی	۱۳/۰۰	۵۱/۰۰	۳۶/۰۰	۱/۶۲	۱/۶۸	۴۰/۷۶	۷/۶۴	۲/۳۰
> ۳۰	لوم رسی-سیلتی	۱۳/۶۷	۴۸/۶۷	۳۷/۶۷	۱/۶۲	۰/۸۵	۴۳/۹۶	۷/۷۸	۱/۷۸

جدول ۲- مجموعه داده‌های مورد استفاده در فرآیند واسنجی و صحت‌سنجی و معیارهای تعریف شده شناسایی شبیه‌سازی‌های رفتاری

مولفه مورد ارزیابی مدل	داده واسنجی	مرحله واسنجی	مرحله صحت‌سنجی	معیار شناسایی شبیه‌سازی‌های رفتاری
شبیه‌سازی انتقال آب	نیم‌رخ رطوبت خاک ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) عمق سطح ایستابی (cm) جریان زه‌آب خروجی از زهکش زیرزمینی (cm d^{-1})	✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓	EF > ۰/۷
شبیه‌سازی انتقال املاح	شوری زه‌آب خروجی از زهکش زیرزمینی (dS m^{-1}) نیم‌رخ غلظت املاح آب خاک (dS m^{-1})	✓ ✓	✓ ✓	NRMSE < ۰/۲
شبیه‌سازی متغیرهای بیوفیزیکی	شاخص سطح برگ ($\text{cm}^2 \text{ cm}^{-2}$) عملکرد ماده خشک نی (ton ha^{-1}) عملکرد ماده خشک ساکارز (ton ha^{-1})	✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓	EF > ۰/۷

نتایج و بحث

مقادیر بهینه‌سازی شده پارامترهای مجهول لحاظ شده برای واسنجی مدل به همراه آماره‌های توصیفی مربوط به مجموعه پارامترهای رفتاری حاصل از طرح تحلیل عدم قطعیت GLUE-UPSO (حاوی تعداد ۵۹۴۳ دسته پارامتر رفتاری منحصر به فرد) در جدول ۳ ارائه شده است. حصول نتایج مشابه با پژوهش پرچمی عراقی و همکاران (۱۳۹۹) برای مقادیر بهینه پارامترهای مجهول مدل نشان دهنده قابلیت بالای الگوریتم UPSO در جستجوی سراسری فضای پارامترهای مجهول و یافتن جواب بهینه سراسری مساله مدل‌سازی معکوس است. بر اساس ضریب تغییرات مجموعه رفتاری پارامترهای هیدرولیکی خاک (جدول ۳)، پارامترهای α و K_{sat} در مقایسه با پارامترهای n و θ_{sat} از تغییر پذیری بالاتری برخوردار بوده‌اند. بر این اساس، می‌توان مطرح نمود در مقایسه با پارامترهای n و θ_{sat} ، تابع برازش مدل‌سازی معکوس از حساسیت کمتری نسبت به پارامترهای α و K_{sat} برخوردار بوده است. در این رابطه، نتایج مشابهی در پژوهش‌های مرتبط گذشته گزارش شده است (هورکمپ و همکاران، ۲۰۰۵؛ پولاکو و ماهانتی، ۲۰۱۲؛ شفیع و همکاران، ۲۰۱۴).

به عنوان نمونه، اندرکنش مقادیر رفتاری پارامترهای هیدرولیکی دو لایه خاک لحاظ شده در مدل SWAP در شکل ۲ ارائه شده است. این شکل حاکی از غیریکتایی مشهود مقادیر رفتاری پارامترهای هیدرولیکی خاک است که این نتیجه با نتایج گزارش شده در پژوهش‌های مشابه گذشته (بینلی و بی‌ون، ۲۰۰۳؛ پولاکو و ماهانتی، ۲۰۱۲؛ شفیع و همکاران، ۲۰۱۴؛ وسلینگ و همکاران، ۲۰۲۰b)؛ انطباق دارد. نحوه پراکنش مقادیر رفتاری پارامتر θ_{sat} در محدوده تغییرات مجاز و ضعیف شده (شکل ۲) حاکی از آن است که وضع کران پایین تغییرات مجاز پارامتر θ_{sat} بر اساس حداکثر مقدار رطوبت خاک مشاهداتی در کاهش عدم قطعیت برآورد این پارامتر موثر بوده است. در این مطالعه، دامنه تغییرات مجاز سایر

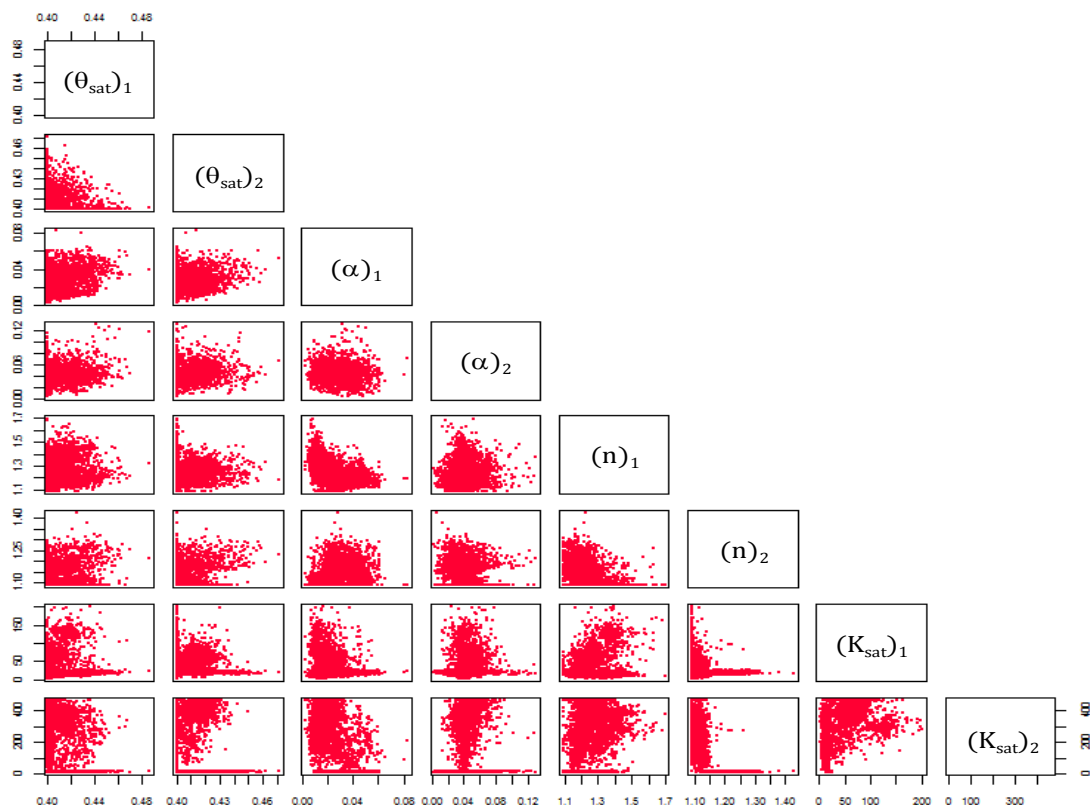
پارامترهای هیدرولیکی خاک مورد بررسی با در نظر گرفتن دامنه تغییرات مجاز فیزیکی آن‌ها بر اساس بانک اطلاعات خاک گردآوری شده توسط شاپ و لیژ (۱۹۹۸) تعیین شد. این امر مبین اهمیت استفاده از داده‌های مشاهداتی در کاهش عدم قطعیت پارامترهای برآورد شده و در نتیجه شبیه‌سازی‌های مدل است.

در مقایسه با لایه خاک زیرسطحی، مقادیر رفتاری پارامترهای هیدرولیکی لایه سطحی خاک از تغییرپذیری کمتری برخوردار بوده‌اند (جدول ۳). یکی از دلایل این امر را می‌توان به داده‌های رطوبت خاک مورد استفاده در واسنجی مدل نسبت داد که تنها بخش‌های سطحی نیم‌رخ خاک (عمق صفر تا ۶۰ سانتی‌متری) را در بر می‌گرفتند. همچنین، رطوبت خاک شبیه‌سازی شده برای این محدوده، مقادیر شبیه‌سازی شده غلظت املاح آب خاک و متغیرهای بیوفیزیکی را متاثر می‌سازد

جدول ۳- مقادیر دامنه تغییرات مجاز، بهترین برآورد پارامترهای واسنجی و آماره‌های توصیفی مجموعه پارامترهای رفتاری برای مدل توسعه یافته در مزرعه مطالعاتی.^(*)

پارامترهای رفتاری					پارامترهای رفتاری				
شرح	پارامتر	دامنه تغییرات مجاز (حداکثر - حداقل)	مقدار بهینه	میانگین	شرح	پارامتر	دامنه تغییرات مجاز (حداکثر - حداقل)	مقدار بهینه	میانگین
پارامترهای هیدرولیکی خاک	(θ_{sat}) ₁	-۰/۴۰ - ۰/۵۴۰	۰/۴۰۴	۰/۴۰۸	پارامترهای گیاهی	T _{SUMEA}	۵۴۰۰/۰۰۰ - ۶۰۰۰/۰۰۰	۵۵۷۴/۶۲۳	۵۵۹۲/۸۸۴
	(θ_{sat}) ₂	-۰/۴۰ - ۰/۵۴۰	۰/۴۰۰	۰/۴۰۵		T _{SUMAM}	۶۴۲/۰۰۰ - ۴۵۰۰/۰۰۰	۱۲۲۲/۲۲۳	۱۹۹۹/۲۷۰
	(α) ₁	-۰/۰۰۳ - ۰/۱۳۲	۰/۰۳۵	۰/۰۲۳		R _{GRLAI}	-۰/۰۱۵۰ - ۰/۰۵۰۰	-۰/۰۳۱	-۰/۰۲۷
	(α) ₂	-۰/۰۰۳ - ۰/۱۳۲	۰/۰۴۵	۰/۰۴۲		(S _{LA}) ₁	-۰/۰۰۰۴ - ۰/۰۰۱۹	-۰/۰۰۰۴	-۰/۰۰۰۶
	(n) ₁	۱/۰۹۰ - ۲/۳۰۰	۱/۱۴۰	۱/۲۶۷		(S _{LA}) ₂	-۰/۰۰۰۴ - ۰/۰۰۱۹	-۰/۰۰۱۱	-۰/۰۰۱۱
	(n) ₂	۱/۰۹۰ - ۲/۳۰۰	۱/۱۵۳	۱/۱۲۴		(S _{LA}) ₃	-۰/۰۰۰۴ - ۰/۰۰۱۹	-۰/۰۰۰۷	-۰/۰۰۰۷
	(K _{sat}) ₁	-۰/۴۸۰ - ۴۶۵/۰۰۰	۲۰/۰۰۵	۳۳/۶۷۵		(S _{LA}) ₄	-۰/۰۰۰۴ - ۰/۰۰۱۹	-۰/۰۰۰۸	-۰/۰۰۰۹
	(K _{sat}) ₂	-۰/۴۸۰ - ۴۶۵/۰۰۰	۱۳/۴۳۳	۲۲۷/۰۷۶		(S _{LA}) ₅	-۰/۰۰۰۴ - ۰/۰۰۱۹	-۰/۰۰۱۴	-۰/۰۰۱۵
	(q _{Bot}) ₁	-۰/۰۰۰ - ۰/۰۴۱	۰/۰۱۹	۰/۰۲۵		(S _{LA}) ₆	-۰/۰۰۰۴ - ۰/۰۰۱۹	-۰/۰۰۱۱	-۰/۰۰۱۰
	(q _{Bot}) ₂	-۰/۰۰۰ - ۰/۰۴۱	۰/۰۱۳	۰/۰۱۹		(S _{LA}) ₇	-۰/۰۰۰۴ - ۰/۰۰۱۹	-۰/۰۰۱۴	-۰/۰۰۱۲
جریان از کف در پنج مقطع زمانی	(q _{Bot}) ₃	-۰/۰۰۰ - ۰/۰۴۱	۰/۰۱۳	۰/۰۱۹	(S _{LA}) ₈	-۰/۰۰۰۴ - ۰/۰۰۱۹	-۰/۰۰۰۷	-۰/۰۰۱۰	
	(q _{Bot}) ₄	-۰/۰۰۰ - ۰/۰۴۱	۰/۰۰۸	۰/۰۱۲	(S _{LA}) ₉	-۰/۰۰۰۴ - ۰/۰۰۱۹	-۰/۰۰۰۹	-۰/۰۰۱۰	
	(q _{Bot}) ₅	-۰/۰۰۰ - ۰/۰۴۱	۰/۰۱۱	۰/۰۱۴	EFF	-۰/۳۰۰۰ - ۰/۸۰۰۰	-۰/۵۵۱	-۰/۵۱۴	
	(D _{dis}) ₁	-۰/۵۰۰ - ۶۵/۰۰۰	۲۹/۵۱۸	۳۰/۱۰۷	(A _{max}) ₁	-۰/۰۰۰ - ۸۵/۰۰۰	۴۰/۰۵۷	۱۸/۵۷۴	
	(D _{dis}) ₂	-۰/۵۰۰ - ۶۵/۰۰۰	۴۵/۴۰۸	۴۰/۵۴۲	(A _{max}) ₂	-۰/۰۰۰ - ۸۵/۰۰۰	۱۵/۷۵۲	۲۰/۸۳۱	
املاح در خاک	(K _f) ₁	-۰/۰۰۰ - ۹۹/۰۰۰	۲۶/۲۸۹	۵۲/۳۵۱	(A _{max}) ₃	-۰/۰۰۰ - ۸۵/۰۰۰	۵/۶۳۱	۱۴/۶۹۹	
	(K _f) ₂	-۰/۰۰۰ - ۹۹/۰۰۰	۲۹/۶۳۰	۳۹/۱۶۸	(A _{max}) ₄	-۰/۰۰۰ - ۸۵/۰۰۰	۷۷/۳۵۲	۶۹/۱۰۶	
شوری آب زیرزمینی	C _{gw1}	۱/۳۰۰ - ۳/۵۰۰	۲/۰۴۰	۲/۵۰۴	(A _{max}) ₅	-۰/۰۰۰ - ۸۵/۰۰۰	۶۶/۲۸۵	۷۲/۳۲۱	
شوری جریان از کف	C _{Bot}	۱/۳۰۰ - ۵/۵۰۰	۴/۶۹۶	۳/۹۱۴	(A _{max}) ₆	-۰/۰۰۰ - ۸۵/۰۰۰	۳۶/۳۴۷	۴۱/۲۹۷	
پارامترهای سیستم زهکشی	γ_{drain}	۵۰/۰۰۰ - ۲۵۰/۰۰۰	۱۷۲/۱۳۳	۱۸۵/۴۱۱	(A _{max}) ₇	-۰/۰۰۰ - ۸۵/۰۰۰	۵۵/۹۱۹	۲۳/۷۴۶	
	γ_{drain2}	۱۰۰۰/۰۰۰ - ۱۰۰۰۰/۰۰۰	۴۸۷۴/۸۱۵	۴۲۴۰/۹۷۶	(A _{max}) ₈	-۰/۰۰۰ - ۸۵/۰۰۰	۴۱/۰۷۷	۱۷/۶۷۴	
	$\gamma_{drain, Ctrl}$	۵۰/۰۰۰ - ۲۵۰/۰۰۰	۱۰۴/۳۶۸	۱۰۵/۲۰۴	(A _{max}) ₉	-۰/۰۰۰ - ۸۵/۰۰۰	۱/۰۳۹	۳۴/۷۲۱	
	T _c	-۰/۸۰۰ - ۲/۰۰۰	۱/۴۹۸	۱/۷۲۳					

^(*) در جدول فوق، θ_{sat} رطوبت خاک در حالت اشباع ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)، α (cm^{-1})، n (بدون بعد)، λ (بدون بعد) ضرایب شکل، K_{sat} هدایت هیدرولیکی اشباع (cm d^{-1}) مورد استفاده در مدل‌های معلم و ون گنوختن، D_{dis} و K_f به ترتیب، ضریب انتشارپذیری (cm)، ضریب ایزوترم جذب خطی ($\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$)، q_{Bot} جریان از کف (cm d^{-1}) و C_{Bot} شوری جریان از کف (mg cm^{-3})، γ_{drain1} ، γ_{drain2} و T_c به ترتیب، مقاومت زهکشی سیستم زهکشی زیرزمینی (d)، مقاومت زهکشی سیستم زهکشی روبار و زمان تاخیر رسیدن زه‌آب به خروجی C_{gw} ، (h) شوری آب زیرزمینی (mg cm^{-3})، T_{SUMEA} ، R_{GRLAI} ، S_{LA} و A_{max} به ترتیب، بیانگر مجموع دما از مرحله جوانه‌زنی تا گل‌دهی ($^{\circ}\text{C}$)، مجموع دما از مرحله گل‌دهی تا بلوغ ($^{\circ}\text{C}$)، حداکثر افزایش نسبی شاخص سطح برگ ($\text{m}^2 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$)، سطح ویژه برگ (ha kg^{-1})، حداکثر شدت جذب دی‌اکسید کربن ($\text{kg CO}_2 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$) و راندمان مصرف نور در یک برگ منفرد ($\text{kg ha}^{-1} \text{h}^{-1} / \text{J m}^2 \text{s}^{-1}$) است.



شکل ۲- ماتریس نمودارهای پراکنش مجموعه رفتاری پارامترهای هیدرولیکی خاک (جدول ۳)، حاوی ۵۹۴۳ دسته پارامتر رفتاری منحصر به فرد

جدول ۴- آماره‌های ارزیابی مورد استفاده در تحلیل عدم قطعیت مدل توسعه یافته برای مزرعه مطالعاتی در شبیه‌سازی انتقال آب، املاح و متغیرهای بیوفیزیکی طی دوره شبیه‌سازی^(*)

آماره ارزیابی				CV	M	مجموعه داده	داده معیار اندازه‌گیری شده
r-factor	p-factor	EF	NRMSE				
۰/۹۳	۸۲	۰/۸۲۹	۰/۰۲۹	۷	۱۷	واستجی	رطوبت خاک ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)
۱/۱۸	۷۷	۰/۸۷۷	۰/۰۳۷	۱۰	۱۳	صحت‌سنجی	
۰/۹۸	۸۰	۰/۸۷۵	۰/۰۳۲	۹	۳۰	کل مجموعه داده	
۰/۶۲	۶۶	۰/۹۲۲	۰/۱۷۰	-۶۱	۹۸	واستجی	عمق سطح ایستابی (cm)
۱/۱۶	۷۹	۰/۷۸۱	۰/۲۱۷	-۴۶	۱۲۲	صحت‌سنجی	
۰/۸۳	۷۳	۰/۸۷۷	۰/۱۹۴	-۵۵	۲۲۰	کل مجموعه داده	
۰/۶۹	۷۵	۰/۸۵۷	۰/۲۱۸	۵۸	۸۱	واستجی	جریان زه‌آب خروجی (cm d^{-1})
۰/۹۹	۷۱	۰/۷۱۲	۰/۲۸۵	۵۳	۱۲۹	صحت‌سنجی	
۰/۸۷	۷۳	۰/۷۷۴	۰/۲۶۱	۵۵	۲۱۰	کل مجموعه داده	
۱/۸۷	۶۷	-۰/۳۹۹	۰/۱۲۴	۱۱	۱۲	واستجی	نیم‌رخ غلظت املاح آب خاک (dS m^{-1})
۲/۲۶	۵۸	-۰/۶۵۳	۰/۱۵۲	۱۲	۱۲	صحت‌سنجی	
۱/۹۶	۵۸	-۰/۴۴۳	۰/۱۳۹	۱۲	۲۴	کل مجموعه داده	
۱/۰۰	۲۰	-۰/۴۳۳	۰/۰۹۱	۸	۱۵	واستجی	شوری زه‌آب (dS m^{-1})
۱/۹۷	۶۱	-۰/۰۸۸	۰/۰۸۴	۸	۲۳	صحت‌سنجی	
۱/۴۳	۴۵	-۰/۰۰۶	۰/۰۸۷	۹	۳۸	کل مجموعه داده	
۱/۱۱	۹۵	۰/۹۹۷	۰/۰۳۷	۶۴	۳۹	واستجی	شاخص سطح برگ ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$)
۰/۷۵	۷۵	۰/۹۹۳	۰/۰۴۷	۵۷	۴	واستجی	عملکرد نی (ton ha^{-1})
۰/۸۴	۱۰۰	۰/۹۸۸	۰/۰۶۵	۵۸	۴	واستجی	عملکرد ساکارز (ton ha^{-1})

(*) در این جدول، CV ضریب تغییرات (درصد) کمیت اندازه‌گیری شده و m تعداد مشاهدات است

از سوی دیگر، در نتیجه اثر آب زیرزمینی کم عمق، بخش عمده لایه زیرسطحی طی سراسر دوره شبیه سازی در حالت اشباع بوده و تغییرات زمانی اندک محتوای آب خاک در این ناحیه منجر به کاهش حساسیت پارامترهای مربوط به این لایه خاک شده است. ضریب تغییرات مقادیر رفتاری ترم های جریان از کف در جدول ۳ حاکی از کاهش تدریجی حساسیت آن ها در طول دوره شبیه سازی است. دلیل این امر را می توان به فعال شدن زهکشی کنترل شده و شدت یافتن رویدادهای آبیاری در دوره های میانی و انتهایی شبیه سازی و ناچیز شدن سهم این ترم در بیلان آب نسبت داد. از سوی دیگر، همان طور که در جدول ۳ مشاهده می شود، مقادیر بهینه سازی شده و میانگین مقادیر رفتاری ترم جریان از کف ستون خاک طی دوره زمانی غیرفعال بودن سامانه زهکشی زیرزمینی کنترل شده (دوره ابتدایی شبیه سازی) بیشتر از دوره زمانی فعال شدن زهکشی کنترل شده بوده است. این امر می تواند مبین نقش زهکشی کم عمق در کاهش جریان خروجی از زهکش های زیرزمینی و شدت مشکلات زیست محیطی آن ها باشد که توسط پژوهشگران متعددی مورد اشاره قرار گرفته است (جوانی جونی و همکاران، ۲۰۱۸).

در مقایسه با سایر پارامترهای انتقال املاح مورد بررسی در تحلیل عدم قطعیت، پارامتر ضریب انتشارپذیری برای لایه زیرسطحی خاک، $(D_{dis})_2$ ، از بیشترین حساسیت نسبت به تابع هدف مساله مدل سازی معکوس برخوردار بوده است (جدول ۳). دلیل این امر را می توان به تاثیر مقدار این پارامتر بر تبادل املاح بین بخش های اشباع و غیراشباع نیم رخ خاک و در نتیجه، تغییرات شوری عصاره اشباع خاک و زه آب خروجی، برداشت آب از طریق ریشه گیاه (و به تبع آن، متاثر شدن متغیرهای بیوفیزیکی و اجزای بیلان آب شبیه سازی شده) نسبت داد. ضریب تغییرات مقادیر رفتاری پارامترهای شوری آب زیرزمینی و شوری جریان از کف نیز بیانگر حساسیت قابل توجه تابع هدف مساله مدل سازی معکوس نسبت به این دو پارامتر بوده است.

همان طور که از جدول ۳ قابل استنباط است، در مقایسه با پارامتر مقاومت زهکشی جمع کننده سطحی، γ_{drain2} ، تابع هدف مدل سازی معکوس از حساسیت بیشتری نسبت به پارامترهای مقاومت زهکشی زیرزمینی در شرایط زهکشی آزاد و کنترل شده (به ترتیب، γ_{drain} و $\gamma_{drain, Ctrl}$) برخوردار بوده است. همچنین، محدود کردن دامنه تغییرات مجاز پارامتر T_c از طریق مشاهدات مزرعه ای، سبب عدم قطعیت پایین برآورد این پارامتر شده است.

همین طور، ضریب تغییرات مقادیر رفتاری پارامترهای گیاهی برآورد شده نیز حاکی از حساسیت قابل توجه اکثر پارامترهای لحاظ شده در تحلیل عدم قطعیت است. تغییرات مقادیر بهینه و درجه حساسیت پارامترهای A_{max} و S_{LA} در طول دوره رشد گیاه حاکی از اهمیت در نظر گرفتن مقادیر این پارامترها به عنوان تابعی از مرحله رشد گیاه است. این در حالی است که در اکثر مطالعات مشابه، مدل بر اساس فرض یک مقدار یکتا برای پارامترهای فوق واسنجی شده است (وظیفه دوست و همکاران، ۲۰۰۸؛ لی و رن، ۲۰۱۹).

مقادیر ضرایب همبستگی پیرسون در ماتریس همبستگی محاسبه شده برای پارامترهای رفتاری اشتقاقی از تحلیل عدم قطعیت مدل در دامنه بین ۰/۹۱- تا ۰/۹۱ متغیر بود. مقادیر مطلق ضریب همبستگی پیرسون در دامنه ۰/۰ تا ۰/۲، ۰/۲ تا ۰/۴، ۰/۴ تا ۰/۷، ۰/۷ تا ۰/۹ و ۰/۹ تا ۱/۰ به ترتیب، بیانگر وجود همبستگی بسیار ضعیف، ضعیف، متوسط، قوی و بسیار قوی بین دو متغیر مورد بررسی است (سلیمان نژاد، ۲۰۰۴). بر این اساس، حدود ۳۲/۷، ۲۸/۲، ۲۹/۳، ۹/۴ و ۰/۴ درصد از ضرایب مربوط به ماتریس همبستگی محاسبه شده به ترتیب، در کلاس های همبستگی بسیار ضعیف، ضعیف، متوسط، قوی و بسیار قوی قرار داشتند. این نتیجه بیانگر اندرکنش قابل توجه بین پارامترهای مورد بررسی در تحلیل عدم قطعیت مدل و توانایی طرح تحلیل عدم قطعیت توسعه یافته در جستجوی سراسری و متمرکز نواحی رفتاری فضای

پارامترهای مجهول و آشکار ساختن اندرکنش بین پارامترهای مدل است.

آماره‌های مورد استفاده در ارزیابی عملکرد مدل در بازسازی مجموعه داده‌های واسنجی و صحت‌سنجی در جدول ۴ نشان داده شده است. مقادیر آماره EF حاکی از عملکرد بسیار خوب و خوب تا بسیار خوب مدل به‌ترتیب، در بازسازی مجموعه داده‌های واسنجی و صحت‌سنجی رطوبت خاک، عمق سطح ایستابی، جریان زه‌آب خروجی است. بر اساس مقدار این آماره، عملکرد مدل در بازسازی مجموعه داده واسنجی شاخص سطح برگ، عملکرد نی و عملکرد ساکارز بسیار خوب ارزیابی می‌شود. مقادیر آماره NRMSE حاکی از عملکرد خوب تا بسیار خوب مدل در بازسازی هردو مجموعه داده واسنجی و صحت‌سنجی نیم‌رخ غلظت املاح آب خاک و شوری زه‌آب است.

بر اساس مقادیر آماره p-factor (جدول ۴)، محدوده‌های 95PPU تعیین شده برای سری زمانی‌های شبیه‌سازی شده مرتبط با مولفه هیدرولوژی مدل (شامل رطوبت خاک، نوسانات سطح ایستابی و جریان زه‌آب خروجی از زهکش زیرزمینی) بین ۶۶ تا ۸۲ درصد از مجموعه داده‌های واسنجی و بین ۷۱ تا ۷۹ درصد از مجموعه داده‌های صحت‌سنجی را در بر گرفته‌اند. بر این اساس، می‌توان نتیجه گرفت که اثر بخش عمده‌ای از منابع موثر بر عدم قطعیت شبیه‌سازی‌های مولفه‌های هیدرولوژی مدل در عدم قطعیت پارامترهای واسنجی نمود یافته است. مقادیر آماره r-factor (جدول ۴) مربوط به محدوده 95PPU به‌دست آمده برای سری زمانی‌های شبیه‌سازی شده فوق برای مجموعه داده‌های واسنجی و صحت‌یابی به‌ترتیب، بین ۰/۶۲ تا ۰/۹۳ و ۰/۹۹ تا ۱/۱۸ متغیر بود. بر این اساس می‌توان مطرح نمود که در اغلب موارد، ضخامت محدوده‌های 95PPU به‌دست آمده برای شبیه‌سازی‌های مرتبط با مولفه هیدرولوژی مدل قابل قبول بوده است. بنابراین، در بر گرفته شدن بخش عمده مجموعه داده‌های واسنجی و صحت‌سنجی در

محدوده‌های 95PPU به‌قیمت افزایش مفرط ضخامت این محدوده صورت نگرفته است.

این امر از شکل ۳ نیز که در آن مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده مجموعه داده‌های واسنجی و صحت‌سنجی مولفه‌های هیدرولوژیکی و بیوفیزیکی مدل به‌همراه محدوده‌های 95PPU متناظر با هریک ارائه شده است نیز قابل استنباط است. این نتیجه، بیانگر سطح قابل قبول عدم قطعیت شبیه‌سازی هیدرولوژیکی صورت گرفته از طریق مدل توسعه یافته برای مزرعه مطالعاتی و نیز عملکرد رضایت‌بخش چارچوب تحلیل عدم قطعیت توسعه یافته در کمی‌سازی اثرات بخش عمده‌ای از منابع عدم قطعیت بر شبیه‌سازی‌های مولفه هیدرولوژی مدل است.

بر اساس آماره p-factor (جدول ۴)، محدوده 95PPU مربوط به شبیه‌سازی‌های نیم‌رخ غلظت املاح آب خاک به‌ترتیب، ۶۷ و ۵۸ درصد از مجموعه داده‌های واسنجی و صحت‌سنجی را با آماره r-factor به‌ترتیب، برابر با ۱/۸۷ و ۲/۲۶ در بر گرفته است. در این مورد، دلیل اصلی حصول مقادیر بالای آماره r-factor ناشی از تغییرپذیری اندک مقادیر اندازه‌گیری شده غلظت املاح آب خاک (جدول ۴) بوده است. این امر از شکل ۴ نیز قابل استنباط است. بر اساس این شکل، با افزایش عمق از سطح خاک، ضخامت محدوده 95PPU رو به کاهش نهاده است. همچنین، محدوده 95PPU مربوط به شبیه‌سازی‌های شوری زه‌آب خروجی از زهکش زیرزمینی مزرعه به‌ترتیب، به‌میزان ۲۰ و ۶۱ درصد از مجموعه داده‌های واسنجی و صحت‌سنجی را با آماره r-factor به‌ترتیب، برابر با ۱/۰۰ و ۱/۹۷ در بر گرفته است. به‌طور مشابه، دلیل اصلی حصول مقادیر نسبتاً بالای آماره r-factor برای شوری زه‌آب خروجی از زهکش زیرزمینی مزرعه (مجموعه داده صحت‌سنجی) نیز ناشی از تغییرپذیری اندک مقادیر اندازه‌گیری شده متناظر بوده است (جدول ۴). این امر از شکل ۴ نیز قابل استنباط است. مقادیر پایین آماره p-factor مربوط به شبیه‌سازی‌های شوری زه‌آب

خروجی از زهکش زیرزمینی مزرعه، خصوصاً در مورد مجموعه داده‌های واسنجی حاکی از وجود محدودیت در انعکاس یافتن اثر منابع مختلف عدم قطعیت شبیه‌سازی این کمیت در پارامترهای مجهول مدل است. یکی از دلایل این امر ناشی از ساده‌سازی‌های صورت گرفته در مدل‌سازی انتقال املاح در مدل SWAP به لحاظ مدل‌سازی یک‌بعدی جریان آب و املاح در خاک و عدم مدل‌سازی منطقه‌ای آب زیرزمینی است. از سوی دیگر، اعمال این ساده‌سازی به منظور سهولت به‌کارگیری مدل اجتناب‌ناپذیر است. دلیل دیگر این امر را می‌توان به استفاده از داده‌های واسنجی متنوع و لزوم برآورده شدن هم‌زمان تمامی معیارهای وضع شده برای متمایز ساختن شبیه‌سازی‌های رفتاری و غیررفتاری (جدول ۲) از یکدیگر نسبت داد. چراکه در این شرایط، افزایش ضخامت محدوده 95PPU برای شبیه‌سازی‌های شوری زه‌آب خروجی از زهکش زیرزمینی مزرعه به‌قیمت برآورده نشدن حداقل یکی از معیارهای وضع شده خواهد گرفت. تا جایی که این محدودیت سبب تغییرپذیری اندک مقادیر رفتاری پارامتر $(D_{dis})_2$ (جدول ۳) شده است. مقادیر آماره‌های p-factor و r-factor برای سری زمانی‌های شبیه‌سازی شده برای متغیرهای بیوفیزیکی به‌ترتیب، بین ۷۵ تا ۱۰۰ درصد و ۰/۷۵ تا ۱/۱۱ متغیر بود. مقادیر این دو آماره حاکی از انعکاس بخش عمده منابع عدم قطعیت در پارامترهای واسنجی و در عین حال، ضخامت قابل قبول محدوده 95PPU اشتقاق یافته برای شبیه‌سازی‌های متغیرهای بیوفیزیکی است. این نکات از شکل ۳ نیز قابل استنباط است. در این شکل، مقدار شاخص سطح برگ برابر با صفر در انتهای دوره شبیه‌سازی بیانگر به‌معنای مرگ گیاه و در نتیجه، توقف فرآیندهای تعرق، فتوسنتز و تولید ماده خشک است.

همان‌طور که در شکل ۳ قابل مشاهده است، دامنه عدم قطعیت شبیه‌سازی‌های سه متغیر بیوفیزیکی مورد بررسی در طول دوره شبیه‌سازی دارای روندی افزایشی بوده است. از آنجا که میزان عملکرد محصول

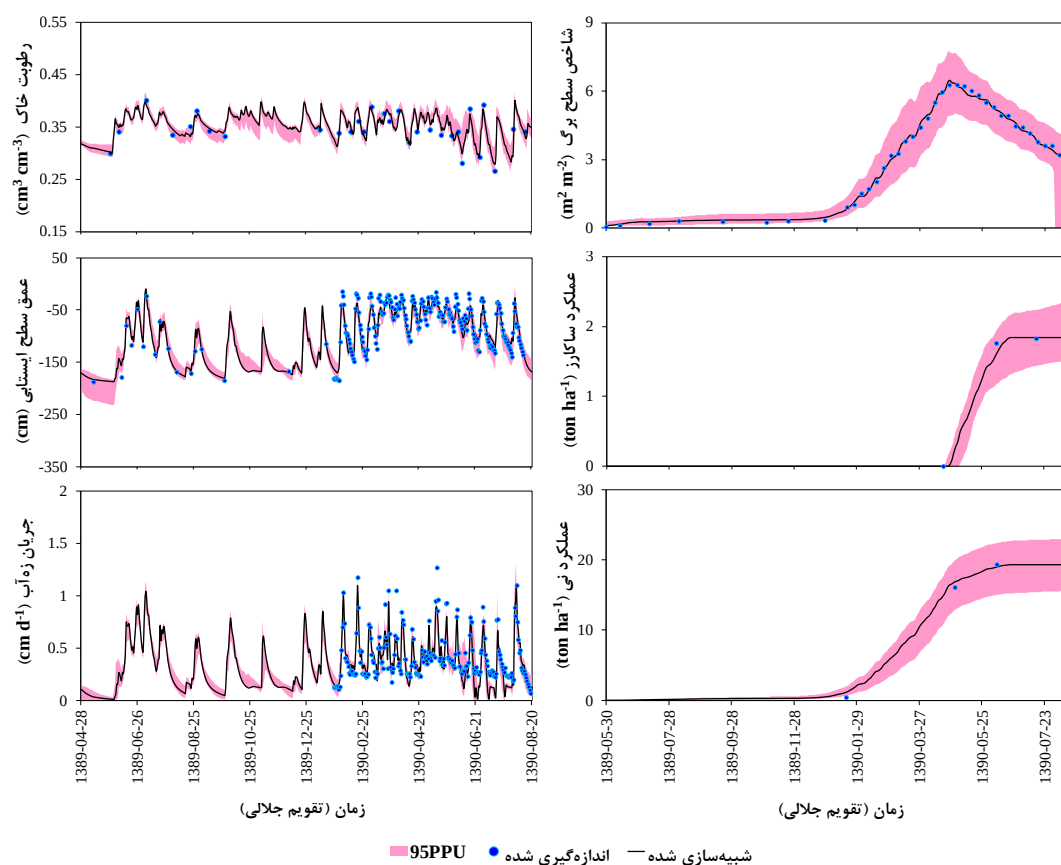
شبیه‌سازی شده در مدل SWAP به صورت تجمعی در طول فصل رشد گیاه محاسبه می‌شود، محاسبات رشد و توسعه گیاه در مراحل آغازین و میانی رشد، می‌تواند طول دوره رشد گیاه و نیز میزان نهایی محصول تولیدی را متأثر نماید. این امر بیانگر اهمیت استفاده از اطلاعات گیاهی متنوع اندازه‌گیری شده در طول دوره رشد و توسعه گیاه در واسنجی پارامترهای گیاهی مدل باشد. این در حالی است که در اکثر پژوهش‌های مشابه صورت گرفته، پارامترهای مدل WOFOST، با استفاده صرف از داده‌های اندازه‌گیری شده عملکرد نهایی محصول تولیدی واسنجی شده است.

نتیجه‌گیری

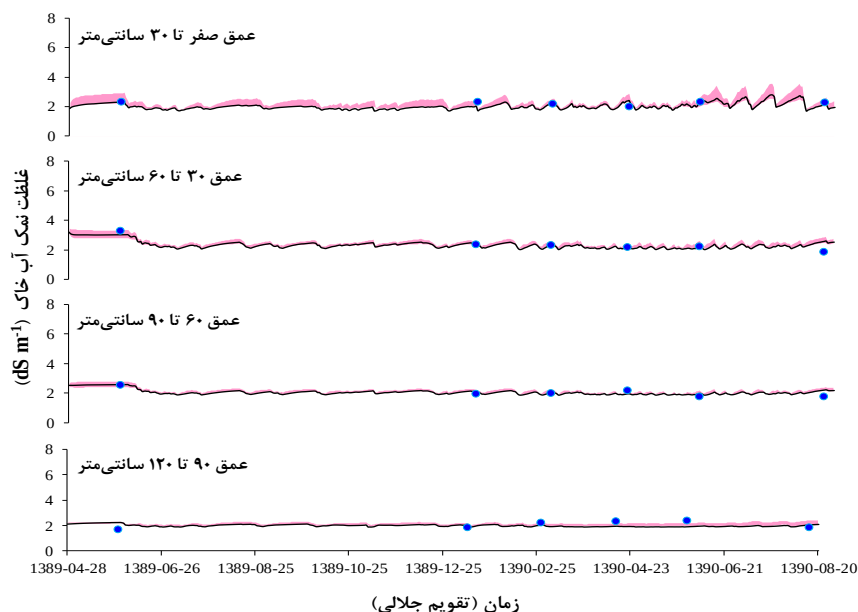
در پژوهش حاضر، عدم قطعیت شبیه‌سازی‌های توزیعی و زیرروانه مدل SWAP برای یک مزرعه نیشکر با زهکشی زیرزمینی کنترل شده از طریق روش تلفیقی GLUE-UPSO مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه، به‌منظور اطمینان بیشتر از جستجوی سراسری فضای پارامترهای مجهول مدل (مشمول بر ۴۵ پارامتر) و بارزتر شدن ویژگی اکتشاف الگوریتم UPSO، اندازه ازدحام مورد استفاده به دو برابر مقدار انتخابی در مطالعه پرچمی عراقی و همکاران (۱۳۹۹) افزایش یافت. حصول نتایج مشابه با پژوهش فوق برای مقادیر بهینه پارامترهای مجهول مدل حاکی از قابلیت الگوریتم UPSO در جستجوی فضای پارامترهای مجهول و یافتن جواب بهینه سراسری مساله مدل‌سازی معکوس است. نتایج این مطالعه حاکی از غیریکتایی مشهود پارامترهای واسنجی شده و اهمیت تحلیل عدم قطعیت شبیه‌سازی‌های مدل SWAP و برآورد کران‌های عدم قطعیت پیش‌بینی‌های مدل بود. وجود همبستگی‌های قوی بین پارامترهای واسنجی شده مبین اهمیت واسنجی همه مولفه‌های مدل (هیدرولوژی، انتقال املاح/گرما و بیوفیزیکی) با استفاده از داده‌های واسنجی متنوع به‌صورت موازی و هم‌زمان به جای واسنجی هریک از مولفه‌های فوق بر اساس یک سلوب ترتیبی است. چراکه در این شرایط، واسنجی ترتیبی

رفع این دشواری مفید باشد. در مقایسه با مولفه انتقال املاح در مدل SWAP، نتایج تحلیل عدم قطعیت مولفه های هیدرولوژی و بیوفیزیکی این مدل رضایت بخش تر بود. محدوده های عدم قطعیت شبیه سازی به دست آمده برای مولفه های هیدرولوژی و بیوفیزیکی مدل علاوه بر در برگرفتن بخش عمده داده های اندازه گیری شده، از ضخامت قابل قبولی برخوردار بودند. این امر مبین اهمیت استفاده هم زمان از داده های واسنجی متنوع در کاهش عدم قطعیت شبیه سازی های مدل و نیز قابلیت روش تلفیقی GLUE-UPSO در جستجوی متمرکز نواحی رفتاری فضای پارامترهای مدل است.

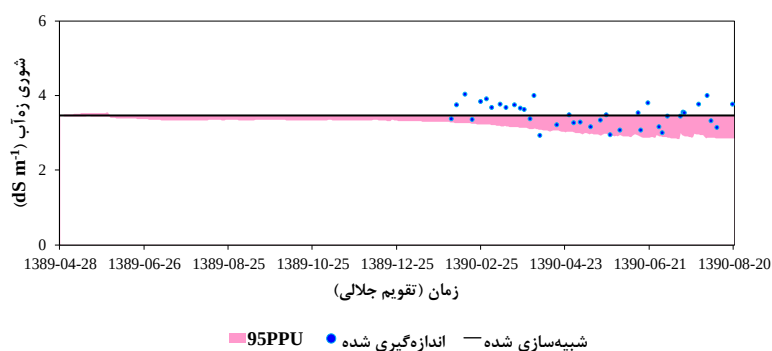
مولفه های مختلف مدل منجر به مخدوش شدن نتایج واسنجی مدل در گام ماقبل و اریب شدن پارامترهای واسنجی خواهد شد. با این حال، در اکثر پژوهش های گذشته مولفه های مختلف مدل SWAP بر اساس یک اسلوب ترتیبی واسنجی شده است. دلیل اصلی این امر دشواری واسنجی هم زمان پارامترهای مدل در واسنجی دستی مدل از یک سو و محدودیت الگوریتم های بهینه سازی با ماهیت جستجوی موضعی به لحاظ تعداد پارامترهای مجهول وارده در مساله مدل سازی معکوس از سوی دیگر است. در این مطالعه نشان داده شد که به کارگیری الگوریتم های بهینه سازی تکاملی با قابلیت جستجوی سراسری فضای پارامترهای مدل می تواند در



شکل ۳- مقادیر اندازه گیری و شبیه سازی شده کمیت های معیار مورد استفاده در ارزیابی عملکرد مدل توسعه یافته در شبیه سازی انتقال آب و متغیرهای بیوفیزیکی طی دوره شبیه سازی به همراه محدوده عدم قطعیت پیش بینی ۹۵ درصد (95PPU) حاصل از تحلیل عدم قطعیت مدل. مقادیر عملکرد محصول تولیدی بر حسب وزن ماده خشک است



شکل ۴- مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده نیم‌رخ غلظت املاح آب خاک در مزرعه مطالعاتی و محدوده عدم قطعیت پیش‌بینی ۹۵ درصد (95PPU)



شکل ۵- مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده شوری زه‌آب خروجی از زهکش زیرزمینی در مزرعه مطالعاتی و محدوده عدم قطعیت پیش‌بینی ۹۵ درصد (95PPU)

فهرست منابع

۱. پرچمی عراقی، ف.، سمیع پور، ف. و صادقی لاری، ع. ۱۳۹۹. کاربرد مدل SWAP برای مدل سازی یک سامانه مزروعی با زهکشی زیرزمینی کنترل شده در یک مزرعه نیشکر، نشریه پژوهش آب در کشاورزی، ۳۴(۱): ۶۴-۵۱.
۲. پرچمی عراقی، ف.، میرلطیفی، س.م.، قربانی دشتکی، ش. و صادقی لاری، ع. ۱۳۹۴. الف. مقایسه تبخیر-تعرق مرجع پنمن-مانتیت ASCE و پنمن-مانتیت فائو-۵۶ در مقیاس های زمانی زیرروزانه مختلف: یک مطالعه عددی، نشریه آب و خاک، ۲۹(۵): ۱۱۸۹-۱۱۷۳.
۳. پرچمی عراقی، ف.، میرلطیفی، س.م.، قربانی دشتکی، ش.، وظیفه دوست، م. و صادقی لاری، ع. ۱۳۹۵. ب. توسعه یک چارچوب ریزمقیاس سازی به منظور برآورد تبخیر-تعرق مرجع زیرروزانه: ۱- مقایسه عملکرد برخی مدل های ریزمقیاس سازی داده های هواشناسی روزانه، نشریه آب و خاک، ۳۰(۲): ۳۵۴-۳۳۴.
۴. صادقی لاری، ع. ۱۳۹۱. بررسی اثرات کنترل سطح ایستابی بر روی میزان جریان، نیتروژن و فسفر خروجی از زهکش های زیرزمینی در نواحی خشک (مطالعه موردی: شعبیه خوزستان). پایان نامه دکتری، دانشگاه شهید چمران، اهواز. ۱۷۸ ص.
5. Abbaspour KC, 2008. SWAT-CUP2: SWAT Calibration and Uncertainty Programs - A User Manual, 2. Department of Systems Analysis, Integrated Assessment and Modelling (SIAM), Eawag, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Duebendorf, Switzerland.
6. Bessembinder JJE, Dhindwal AS, Leffelaar PA, Ponsioen T, and Singh S, 2003. Analysis of crop growth. In: van Dam J.C., and Malik R.S. (Eds.), Water Productivity of Irrigated Crops in Sirsa District, India: Integration of remote sensing, crop and soil models and geographical information systems. Alterra, Wageningen, The Netherlands, pp. 59-82.
7. Beven K, 2006. A manifesto for the equifinality thesis. Journal of Hydrology, 320(1-2): 18-36.
8. Beven KJ, and Binley A, 1992. The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. Hydrological Processes, 6(3): 279-298.
9. Binley A, and Beven K, 2003. Vadose zone flow model uncertainty as conditioned on geophysical data. Groundwater, 41(2): 119-127.
10. Gorgoglione A, Bombardelli FA, Pitton BJ, Oki LR, Haver DL, and Young TM, 2019. Uncertainty in the parameterization of sediment build-up and wash-off processes in the simulation of sediment transport in urban areas. Environmental Modelling & Software, 111: 170-181.
11. Haverkamp R, Leij FJ, Fuentes C, Sciortino A, and Ross P, 2005. Soil water retention. Soil Science Society of America Journal, 69(6): 1881-1890.
12. Javani-Jouni H, Liaghat A, Hassanoghli A, and Henk R, 2018. Managing controlled drainage in irrigated farmers' fields: A case study in the Moghan plain, Iran. Agricultural Water Management, 208: 393-405.
13. Kroes J, van Dam J, Bartholomeus R, Groenendijk P, Heinen M, Hendriks R, Mulder H, Supit I, and van Walsum P, 2017. SWAP version 4, Theory description and user manual. Technical Report. Wageningen Environmental Research, ESG Report 2780, Alterra, Wageningen, The Netherlands.
14. Li P, and Ren L, 2019. Evaluating the effects of limited irrigation on crop water productivity and reducing deep groundwater exploitation in the North China Plain using an agro-hydrological model: I. Parameter sensitivity analysis, calibration and model validation. Journal of Hydrology, 574: 497-516.
15. Loague K, and Green RE, 1991. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application. Journal of Contaminant Hydrology, 7(1): 51-73.

16. Moriasi DN, Arnold JG, van Liew MW, Bingner RL, Harmel RD, and Veith TL, 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transaction of the ASAE*, 50(3): 885-900.
17. Mugunthan P, and Shoemaker CA, 2006. Assessing the impacts of parameter uncertainty for computationally expensive groundwater models. *Water Resources Research*, 42(10): W10428.
18. Parsopoulos KE, and Vrahatis MN, 2004. UPSO: A unified particle swarm optimization scheme. In: Simos T., and Maroulis G. (Eds.), *Lecture Series on Computer and Computational Sciences*. VSP International Science Publishers, Zeist, The Netherlands, pp. 868-873.
19. Pollacco JAP, and Mohanty BP, 2012. Uncertainties of water fluxes in soil-vegetation-atmosphere transfer models: Inverting surface soil moisture and evapotranspiration retrieved from remote sensing. *Vadose Zone Journal*, 11(3).
20. Schaap MG, and Leij FJ, 1998. Database-related accuracy and uncertainty of pedotransfer functions. *Soil Science*, 163(10): 765-779.
21. Shafiei M, Ghahraman B, Saghaian B, Davary K, Pande S, and Vazifedoust M, 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.
22. Soleimannejad F, 2004. *Six Sigma, Basic Steps and Implementation*. AuthorHouse, Bloomington, Indiana, USA, 248 pp.
23. Supit I, Hooijer AA, and van Diepen CA, 1994. System description of the Wofost 6.0 crop simulation model implemented in CGMS. Joint research centre; European commission.
24. Tolson BA, and Shoemaker CA, 2008. Efficient prediction uncertainty approximation in the calibration of environmental simulation models. *Water Resources Research*, 44(4): W04411.
25. United Nations Environment Programme (UNEP), 2015. Nile River Basin: Nile Basin Adaptation to Water Stress: Comprehensive Assessment of Flood & Drought Prone Areas. (Available at: <http://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/14067>).
26. Vazifedoust M, van Dam JC, Feddes RA, and Feizi M, 2008. Increasing water productivity of irrigated crops under limited water supply at field scale. *Agricultural Water Management*, 95(2): 89-102.
27. Wesseling J, Kroes J, Oliveira TC, and Damiano F, 2020. The impact of sensitivity and uncertainty of soil physical parameters on the terms of the water balance: Some case studies with default R packages. Part I: Theory, methods and case descriptions. *Computers Electronics in Agriculture*, 170: 105054.
28. Wesseling J, Kroes J, Oliveira TC, and Damiano F, 2020. The impact of sensitivity and uncertainty of soil physical parameters on the terms of the water balance: Some case studies with default R packages. Part II: Results and discussion. *Computers Electronics in Agriculture*, 170: 105072.
29. Yang J, Reichert P, Abbaspour KC, Xia J, and Yang H, 2008. Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to the Chaohe Basin in China. *Journal of Hydrology*, 358(1): 1-23.

اثرات سطوح مختلف بیوچار گندم و تنش آبی بر ویژگی‌های کمی و کیفی کارلا (خریزه تلخ) در شرایط گلدانی

اسماعیل میر، حلیمه پیری^۱ و امیر ناصرین

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران.

esmaealmir@gmail.com

استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران.

h_piri2880@uoz.ac.ir

استادیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ملاتانی، ایران.

a.naserin@asnruk.ac.ir

دریافت: دی ۱۳۹۹ و پذیرش: شهریور ۱۴۰۰

چکیده

کارلا گیاهی دارویی است که از میوه آن برای درمان دیابت استفاده می‌شود. در این تحقیق اثر تنش آبی و بیوچار بر پارامترهای کیفی و کمی گیاه کارلا مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش در شرایط گلخانه به صورت فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. تیمارها شامل سه تیمار آب آبیاری (۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪ آب مورد نیاز) و چهار تیمار بیوچار (صفر، ۱/۲۵٪، ۲/۵٪ و ۵٪ وزنی خاک گلدان) بود. سطوح تنش آبی در طول فصل رشد با توزین هر هفته گلدان‌ها و جبران کمبود آب خاک تا حد ظرفیت زراعی (FC) با افزودن مقدار آب لازم به آن‌ها اعمال شد و میزان آب اضافه شده به هر گلدان نیز در طول فصل رشد اندازه‌گیری شد. ۵۰ روز پس از کاشت، برداشت محصول هر هفته یک‌بار انجام شد. در مجموع پنج بار برداشت انجام شد. در هر برداشت پارامترهای کمی ارتفاع گیاه، تعداد، وزن، قطر و طول میوه و پارامترهای کیفی مقدار قند میوه، شاخص سبزی‌نگی و شاخص سطح برگ در هر گلدان به دقت اندازه‌گیری شد. همچنین عملکرد محصول و کارایی مصرف آب آبیاری در پایان فصل کشت در هر تیمار محاسبه شد. نتایج نشان داد که اثرات سطوح آب مورد نیاز و بیوچار بر پارامترهای اندازه‌گیری شده معنی‌دار بود (در سطح احتمال ۱٪ و ۵٪). با کاهش آب آبیاری، مقدار پارامترهای کمی و عملکرد گیاه کاهش یافت. بیشترین مقدار پارامترهای مزبور از تیمار ۱۰۰٪ مقدار آب آبیاری حاصل شد که از این نظر با تیمار ۷۵٪ آب آبیاری معنی‌دار نبود. استفاده از بیوچار تا سطح ۲/۵٪ وزنی خاک باعث افزایش پارامترها شد. استفاده بیشتر بیوچار (۵٪ وزنی خاک) باعث کاهش پارامترهای کمی و عملکرد گیاه شد. استفاده از مقدار مناسب بیوچار سبب کاهش اثرات منفی تنش رطوبتی و بهبود شاخص‌های رشد و نمو گیاه در مقایسه با شاهد شد. بنابراین کاربرد آن برای گیاه و به‌ویژه در شرایطی که گیاه تحت تنش خشکی است و یا در گلخانه‌ها و خزانه‌کاری‌ها به منظور کاهش میزان آب مصرفی و بهبود رشد و عملکرد گیاه قابل توصیه می‌باشد، هر چند پیشنهاد می‌شود آزمایش در شرایط مزرعه نیز انجام شود.

واژه‌های کلیدی: شاخص سبزی‌نگی، شاخص سطح برگ، کارایی مصرف آب، قند میوه

^۱ - آدرس نویسنده مسئول: گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران

مقدمه

یکی از مشکلات اساسی در اقلیم گرم و خشک ایران، کمبود آب می‌باشد. با توجه به کاهش سرانه آب تجدیدشونده به دلیل رشد جمعیت و کاهش نزولات جوی در سال‌های اخیر و احتمال تداوم آن در آینده، لازم است تمهیداتی جهت مقابله با بحران آب اتخاذ نمود. بخش وسیعی از زمین‌های زیر کشت محصولات کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک قرار گرفته است و این گیاهان در معرض شرایط نامطلوب محیطی مانند شوری و خشکی قرار دارند (فیضی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۱). از این رو، افزایش توان گیاهان برای تحمل تنش‌های محیطی همچون کم‌آبی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. وقوع تنش‌های محیطی، حفظ و حراست از منابع آب و خاک موجود و افزایش بهره‌وری هرچه بیش‌تر از این منابع، از اهمیت بالایی برخوردار است (دمیرال و ترکان، ۲۰۰۴). مدیریت مصرف آب در بخش کشاورزی می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر کاهش مصرف منابع آب داشته باشد (لی و همکاران، ۲۰۱۶). اعمال مدیریت صحیح آبیاری و کاشت گیاهان مقاوم به خشکی، به منظور حفظ ذخیره رطوبتی خاک و افزایش ظرفیت نگهداری آب در خاک از جمله اقدامات مؤثر برای افزایش بازدهی مصرف آبیاری و در نتیجه بهبود بهره‌برداری از منابع محدود آب کشور می‌باشد. یکی از راه-کارهای افزایش نگهداشت آب در خاک استفاده از اصلاح-کننده‌های خاک می‌باشد (لیو همکاران، ۲۰۱۸). زغال زیستی (بیوپار) از اصلاح‌کننده‌هایی می‌باشد که در سال-های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. بیوپار زغال تهیه شده از زیست توده‌های گیاهی و ضایعات کشاورزی است که سوختن آن‌ها در حضور کم و یا عدم حضور اکسیژن با فرآیند موسوم به پیرولیز انجام می‌شود (گلیسر و بریک، ۲۰۱۲). توانایی بالای این ماده در جذب و نگهداری عناصر غذایی و جلوگیری از آشوبی آن‌ها، جذب فلزات سمی و کودهای شیمیایی باعث افزایش حاصلخیزی خاک می‌شود (بریک. همکاران، ۲۰۱۱). بیوپار به علت سرعت تجزیه بسیار کند نسبت به سایر مواد آلی، ظرفیت زیادی برای

کاهش گازهای گلخانه‌ای از قبیل دی‌اکسید کربن و متان که از ضایعات آزاد می‌شود، دارد و می‌تواند کربن را برای دوره‌های طولانی ذخیره کند و باعث بهبود عملکرد خاک می‌شود (لهمن و همکاران، ۲۰۰۶). بیوپار به عنوان ماده‌ای برای افزایش حاصلخیزی خاک، افزایش pH در خاک‌های اسیدی و افزایش فراوانی جمعیت میکروارگانیسم‌های خاک به کار می‌رود. همچنین تغییراتی روی چرخه عناصر غذایی و ساختمان خاک گذاشته و به صورت غیرمستقیم رشد گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد (وانزویتن و همکاران، ۲۰۱۰). همچنین گزارش‌هایی مبنی بر تأثیر مثبت بیوپار بر ویژگی-های فیزیکی خاک مانند بهبود سطح ویژه، افزایش ظرفیت ذخیره آب و نفوذپذیری خاک ارائه شده است (خادم و همکاران، ۱۳۹۶). بیوپار با تأثیر بر مواد معدنی مانند کلسیم، منیزیم، فسفر، پتاسیم و گوگرد به صورت مستقیم موجب افزایش رشد گیاه شده و همچنین به صورت غیرمستقیم، با تأثیر بر خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی، زمینه‌ی افزایش رشد گیاه را فراهم می‌آورد (اکسیو و همکاران، ۲۰۱۲). شواهد نشان می‌دهد اضافه کردن این ماده به خاک محصول گیاه را افزایش می‌دهد و آبشویی مواد مغذی را کاهش داده و فعالیت‌های میکروبی خاک را تحریک می‌کند (کیولیام و همکاران، ۲۰۱۲). عباس‌پور و همکاران (۱۳۹۸) اثر بیوپار بر حاصلخیزی خاک و کارایی مصرف آب در گیاه سیاهدانه را در شرایط تنش خشکی مورد بررسی قرار دادند. ایشان بیان داشتند استفاده از بیوپار در مناطق خشک و نیمه‌خشک علاوه بر بهبود خصوصیات خاک، جذب آب و عناصر غذایی توسط گیاه را افزایش داده و با تأثیر بهینه بر عملکرد، میزان آب مصرفی در سیاهدانه را کاهش داده و باعث صرفه‌جویی در مصرف آب می‌شود. دهقانی‌احمدآبادی و همکاران (۱۳۹۷) اثر سطوح مختلف بیوپار بر مشخصه‌های رطوبتی خاک در کم‌آبایی گیاه ذرت را مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد بیوپار می‌تواند به نحو موثری توانایی خاک در نگهداری آب را بهبود بخشد و این شرایط باعث بهبود ۱ تا ۱۳ درصدی در عملکرد دانه محصول ذرت و کاهش

اثرات تنش خشکی در تیمارهای کم آبیاری شد. گائولو و همکاران (۲۰۱۴) در تحقیق خود به این نتیجه رسیدند که بیوچار موجب بهبود ساختمان خاک، ظرفیت نگهداری آب در خاک، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک و تهویه خاک رسی شد. یکی از ارکان اساسی در کشاورزی پایدار استفاده از کودهای زیستی و آلی در سیستم‌های زراعی با هدف حذف یا کاهش مصرف نهاده‌های شیمیایی است. کودهای زیستی در برخی موارد به‌عنوان جایگزین و در برخی موارد به‌عنوان مکمل کودهای شیمیایی می‌توانند باعث پایداری نظام کشاورزی شود. یکی از خصوصیات کودهای آلی، تجزیه کندتر آن‌ها در مقایسه با کودهای معدنی می‌باشد. کودهای دامی هر دو یا سه سال اعمال می‌شود که علاوه بر هزینه‌ی بالا، تجزیه سریع و معدنی شدن مواد آلی، تأثیر معنی‌داری نیز بر گرمایش جهانی دارد (اسلم و همکاران، ۲۰۱۴). سرتیپ و همکاران (۱۳۹۶) اثر کودهای زیستی نیتروکسین و فسفات و کودهای شیمیایی را بر گیاه کارلا مود بررسی قرار دادند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد کاربرد کودهای زیستی نیتروکسین و فسفات بارور ۲ در ترکیب با ۵۰ درصد و ۷۵ درصد کودهای شیمیایی در بهبود صفات فیزیولوژیکی و عملکرد میوه گیاه کارلا تأثیر مثبتی داشته است و به‌جای مصرف مداوم کودهای شیمیایی، می‌توان با استفاده بهینه از نهاده‌های زیستی در راستای کشاورزی پایدار گام برداشت.

با توجه به اثرات سوء ناشی از مصرف داروهای شیمیایی در سال‌های اخیر صنایع داروسازی، پزشکان و گروه‌های تحقیقاتی بسیاری از کشورها توجه خود را به منابع طبیعی و گیاهان دارویی معطوف ساخته‌اند. به‌طوری که هم اکنون مزارع وسیع آزمایشی و تولیدی گیاهان دارویی وجود دارد که با افزایش مصرف آن‌ها نیاز به توسعه کشت، مدیریت و برنامه‌ریزی صحیح، ضروری می‌باشد (هانسون و اسمکینز، ۲۰۰۹). تحقیقات سازمان بهداشت جهانی نشان می‌دهد در بسیاری از کشورها به‌خصوص کشورهای در حال توسعه از گیاهان دارویی برای رفع نیازهای بهداشتی و درمانی خود استفاده می‌کنند (کودهری

و همکاران، ۲۰۱۶). با توجه به افزایش جمعیت دنیا و نیاز روزافزونی که صنایع داروسازی به گیاهان دارویی به‌عنوان مواد اولیه دارو دارند، تحقیق بیشتر پیرامون این دسته از گیاهان ضروری و بررسی راه کارهای مختلف جهت افزایش عملکرد کمی و کیفی آن‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. کارلا با نام علمی (*Momordica Charantia*)

(L) از خانواده ی کدوئیان (*Cucurbitaccac*) گیاهی گرمسیری است که در سراسر جهان پراکندگی دارد و مناطق عمده‌ی کشت آن شرق آفریقا، آسیا و آمریکای جنوبی است (مبصری مقدم، ۲۰۱۲). گرچه این گیاه در اقلیم‌های گوناگون رشد می‌کند اما بهترین بازدهی را در اقلیم‌های گرم دارد. کارلا گیاهی یکساله، خزنده، بالارونده و پرشاخ و برگ است. میوه، دانه و برگ‌های به‌دلیل وجود کوئینین تلخ مزه می‌باشد. بخش‌های مختلف میوه این گیاه از گذشته برای درمان در طب سنتی استفاده می‌شده است. به‌طور کلی کارلا به‌صورت غذا و دارو مورد استفاده قرار می‌گیرد (کریسان، ۲۰۰۸). این گیاه مقاومت بدن در برابر عفونت‌ها را افزایش می‌دهد. کارلا از خون سم‌زدایی می‌کند و مزیت‌های زیادی در درمان و کنترل اختلالات خون از قبیل دمل‌های خونی، خارش، بیماری‌ها و عفونت‌های قارچی دارد (بلوم و همکاران، ۲۰۱۱). اگرچه دانه، برگ و ساقه این گیاه دارای خاصیت دارویی می‌باشند و مورد استفاده قرار می‌گیرند، اما مهمترین بخش آن میوه گیاه است که برای کنترل دیابت از آن استفاده می‌شود. گیاه دارویی کارلا اولین بار در ایران در سال ۱۳۸۷ در شهرستان کنارک استان سیستان و بلوچستان و در سطح یک هکتار کشت شد. سطح زیر کشت این محصول در استان سیستان و بلوچستان در سال ۱۳۹۵ بیش از شش هکتار بوده است که از هر هکتار بیش از ۱۵ تن میوه برداشت می‌شود (سرتیپ و همکاران، ۱۳۹۶). این گیاه در استان سیستان و بلوچستان به‌صورت گلخانه‌ای نیز کشت می‌گردد. این استان پتانسیل بالقوه‌ای در تولید گیاهان دارویی دارد اما خشکسالی‌های اخیر باعث کاهش رونق کشاورزی در این استان شده است. آب یکی از عوامل محیطی مهم در تولید گیاهان دارویی می‌باشد. کمبود آب

در مراحل مختلف رشد گیاه صدمات سنگینی به آن وارد می‌کند. در گیاهان دارویی آب علاوه بر پارامترهای رشدی گیاه بر مواد موثره گیاه دارویی نیز اثر می‌گذارد. به نظر می‌رسد بیوپار با داشتن خصوصیتی مانند توانایی ویژه در جذب و نگهداری عناصر غذایی در خاک و ظرفیت نگهداری آب بالا بتواند جایگزین کودهای شیمیایی در گیاهان شده و مقاومت گیاه به تنش آبی را افزایش دهد (هایدر، ۲۰۱۶). با توجه به اهمیت دارویی کارلا در صنعت داروسازی و غذایی، در این تحقیق به بررسی اثرات بیوپار در شرایط تنش آبی روی این گیاه پرداخته شد.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر در ۲۰ بهمن ماه ۱۳۹۸ در گلخانه خصوصی با ابعاد ۶۰ × ۹ متر در شهرستان زاهدان انجام شد. میانگین دمای گلخانه در فصل کشت ۲۱/۶ درجه سانتی-گراد و رطوبت نسبی آن ۴۶ درصد بود. شهرستان زاهدان در طول جغرافیایی ۶۰ درجه و ۲۵ دقیقه شرقی و عرض

جغرافیایی ۲۹ درجه و ۲۹ دقیقه شمالی و ارتفاع ۱۳۷۲ متر از سطح دریا در استان سیستان و بلوچستان قرار دارد. این منطقه بر اساس اقلیم‌نمای آمبرژه دارای اقلیم گرم و خشک می‌باشد.

به منظور تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک پیش از مراحل آماده سازی زمین نمونه‌های مرکب خاک از اعماق ۰ تا ۳۰ سانتی متری خاک برداشت شد و برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک تعیین شد. همچنین از آب مورد استفاده نیز جهت تعیین کیفیت آن نمونه برداری شد. برای تهیه بیوپار در این تحقیق از کاه و کلش گندم استفاده شد. ابتدا کاه و کلش بسته بندی شده و سپس در دمای ۳۰۰ درجه سانتی گراد و در شرایط بدون اکسیژن حرارت داده شد. این ماده (بیوپار مورد استفاده) از شرکت کربن اکتیو بشل واقع در قائمشهر مازندران خریداری شد. نتایج تجزیه آب و خاک و بیوپار مورد استفاده در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، آب و بیوپار

بیوپار	آب	خاک	پارامترهای اندازه گیری شده
۷/۵	۷/۹۲	۸/۲۶	pH
۶/۴	۰/۸۴	۰/۵۸	هدایت الکتریکی EC (ds/m)
-	-	۲۳	ظرفیت زراعی خاک (درصد)
-	-	۱۰	نقطه پژمردگی (درصد)
۴۶/۵	-	۰/۰۸	کربن آلی (درصد)
۹/۸	۰/۲۶	۰/۵۲	فسفر (meq/lit)
۸۹/۹	۰/۴۱	۰/۶۴	پتاسیم (meq/lit)
۱۶/۳	۲/۰۵	۰/۳۴	کلسیم (meq/lit)
۱۰/۶	۲/۹۵	۰/۶۷	منیزیم (meq/lit)
۲/۶	۴/۲	۰/۵۸	سدیم (meq/lit)
۲۶/۸	-	۰/۰۱	نیترژن کل (درصد)
۱/۱۸	۲/۷	۰/۸۲	SAR
-	C3-S1	لوم شن	بافت- کلاس

تحقیق در قالب طرح فاکتوریل کاملاً تصادفی در گلخانه اجرا شد. تیمارها شامل سه سطح آبیاری به ترتیب معادل ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد مقدار آب مورد نیاز و چهار سطح بیوچار (صفر، ۱/۲۵، ۲/۵ و ۵ درصد وزنی خاک) بود. بیوچار مورد استفاده از کاه و کلش و بقایای گندم بود. خاک و بیوچار پس از عبور از الک دو میلی متر در سطوح تعیین شده با یکدیگر مخلوط شدند و سپس گلدان‌ها با ارتفاع ۳۰ و قطر ۲۵ سانتی متر با مخلوط خاک و بیوچار تا وزن شش کیلوگرم پر شد. کود نیتروژن از منبع اوره به مقدار ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار به صورت سرک در سه مرحله یک سوم همزمان با کاشت، یک سوم مرحله رویشی (شاخه دهی) و یک سوم زمان گلدهی (۵۰ درصد گلدهی گیاه)، ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار کود پتاسیم از نوع سولفات پتاسیم و کود فسفر از نوع سوپرفسفات تریپل به مقدار ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار همزمان با کاشت به خاک اضافه شد. پس از اختلاط خاک و بیوچار و اضافه نمودن آن به گلدان‌ها، گلدان‌ها به صورت کامل اشباع شد. سپس روی گلدان‌ها

جهت جلوگیری از تبخیر آب پوشانده شد. خروج آب ثقلی از انتهای گلدان در بازه‌های زمانی مشخص تا زمانی که خروج آب ثقلی متوقف شود، اندازه‌گیری شد. وزن گلدان در این حالت به عنوان وزن در حالت ظرفیت زراعی در نظر گرفته شد. سپس در هر گلدان پنج عدد بذر گیاه کارلا رقم هندی کشت شد. پس از جوانه زدن و استقرار، تعداد گیاه در هر گلدان به سه عدد کاهش یافت. کلیه گلدان‌ها تا زمان استقرار گیاه به صورت کامل و تا حد ظرفیت زراعی آبیاری شدند. سپس گلدان‌ها هر هفته توزین شدند. کمبود آب در هر گلدان تا حد رطوبت زراعی گیاه (براساس تغییرات وزن گلدان‌ها و مقدار آب زهکش شده) محاسبه شد و حجم آب محاسبه شده در اختیار گیاه قرار می‌گرفت. در مجموع ۱۳ بار آبیاری انجام شد. میزان کل آب مصرفی طی دوره رشد از مجموع آب مصرفی در تمام روزهای دوره رشد به دست آمد. جدول ۲ حجم آب مورد استفاده در هر تیمار را نشان می‌دهد.

جدول ۲- حجم آب مورد استفاده در هر تیمار در هر آبیاری

تیمار I1	تیمار I2	تیمار I3	حجم آب مصرفی (میلی متر)
۱۸/۶۲	۲۷/۹۳	۳۷/۲۵	۱
۲۰/۱۸	۳۰/۲۷	۴۰/۳۶	۲
۲۰/۷۵	۳۱/۱۳	۴۱/۵۱	۳
۲۶/۸۹	۴۰/۳۴	۵۳/۷۹	۴
۲۷/۹۳	۴۱/۸۹	۵۵/۸۶	۵
۲۹/۴۶	۴۴/۱۹	۵۸/۹۳	۶
۳۱/۲۹	۴۶/۹۳	۶۲/۵۸	۷
۳۴/۴۲	۵۱/۶۳	۶۸/۸۴	۸
۳۳/۶۹	۵۰/۵۳	۶۷/۳۸	۹
۳۲/۶۲	۴۸/۹۳	۶۵/۲۵	۱۰
۳۰/۹۶	۴۶/۴۴	۶۱/۹۲	۱۱
۲۹/۲۳	۴۳/۸۵	۵۸/۴۷	۱۲
۲۰/۸۳	۴۱/۶۷	۵۵/۵۶	۱۳
۳۶۳۹	۵۴۵۷	۷۲۷۷	کل دوره رشد (مترمکعب در هکتار)

نمونه‌برداری گیاهی

مراحل رشد گیاه شامل چهار مرحله می‌باشد. مرحله اولیه (۲۰ روز) که رشد گیاه کم و اندازه آن کوچک است، مرحله توسعه (۲۸ روز) و مرحله میانی (۲۰ روز) که گیاه به اندازه کامل رشد و توسعه یافته است و گلدهی انجام شده است و مرحله پایانی (۲۰ روز) که میوه‌دهی انجام و برگ‌ها کم کم زرد می‌شوند (عمرزهی و همکاران، ۱۳۹۸). اولین برداشت محصول تقریباً پس از ۵۰ روز از تاریخ کاشت یعنی ۱۱ فروردین ۱۳۹۹ انجام شد و تا وسط اردیبهشت ادامه داشت. برداشت هر هفته یکبار انجام شد. در مجموع پنج بار برداشت انجام شد. در هر برداشت پارامترهای کمی ارتفاع گیاه، تعداد میوه، وزن میوه‌ها، قطر و طول میوه و پارامترهای کیفی مقدار قند میوه، شاخص سبزی‌نگی و شاخص سطح برگ کارلا در هر گلدان به دقت اندازه‌گیری شد. همچنین عملکرد و کارایی مصرف آب آبیاری در پایان فصل کشت در هر تیمار محاسبه شد. در پایان داده‌های اندازه‌گیری شده با استفاده

از نرم‌افزار SAS 9.1 مورد تجزیه و تحلیل و میانگین‌ها با آزمون دانکن مورد مقایسه قرار گرفت.

کارایی مصرف آب آبیاری (IWUE)

عبارت است از: نسبت محصول تولید شده به آب آبیاری. از رابطه (۱) به دست آمد (پیرو و همکاران، ۲۰۰۹).

$$IWUE = \frac{Y}{IR} \quad (1)$$

در این رابطه:

IWUE: کارایی مصرف آب آبیاری (کیلوگرم بر مترمکعب)
Y: مقدار محصول برداشت شده (کیلوگرم)
IR: مقدار آب آبیاری (مترمکعب در هکتار)

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس پارامترهای کمی اندازه‌گیری شده در جدول ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد اثر بیوچار بر پارامترها در سطح احتمال یک درصد و پنج درصد معنی‌دار بوده است. جدول ۴ مقایسه میانگین و جدول ۵ اثرات متقابل پارامترهای اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد.

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات و درجه آزادی) پارامترهای کمی اندازه‌گیری شده

منابع تغییرات	درجه آزادی	ارتفاع گیاه	تعداد میوه	قطر میوه	طول میوه	وزن میوه	عملکرد	کارایی مصرف آب آبیاری
آبیاری (A)	۲	۱۳۴۵/۶۵*	۱۸۷/۶*	۱/۴۷**	۴۵/۶*	۳۴۷/۶۵**	۲۴۵۰۳/۲۱**	۱۸۹/۱۵**
بیوچار (B)	۳	۲۷۴۸/۲۳*	۹۸/۳۴**	۲/۵۶**	۹۴/۸۷**	۱۷۶/۵۴*	۲۳۷۴۰/۵۴*	۱۰۱/۲۴*
اثر متقابل (A*B)	۶	۳۲۵۱/۸۵*	۱۱۵/۰۴*	۵/۸۷*	۱۰۰/۲۳**	۶۷/۵۸*	۳۵۴۱/۴۶*	۶۷/۵۱*
خطا	۲۴	۲۱۵/۶۱	۸۹/۶۳*	۱۲/۴	۲۳/۴۵	۳۶/۸۶	۴۳۱/۵۲	۷۵/۱۴
ضریب تغییرات		۹/۴	۱۰/۲	۸/۷	۸/۹	۱۰/۵	۱۰/۴	۱۰/۱

* و ** معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد و یک درصد

جدول ۴- مقایسه میانگین پارامترهای کمی اندازه‌گیری شده

تیمارهای آزمایشی	ارتفاع گیاه (cm)	تعداد میوه	قطر میوه (cm)	طول میوه (cm)	وزن میوه (gr)	عملکرد (ton/ha)	کارایی مصرف آب آبیاری (kg/m ³)
مقدار آب آبیاری							
۵۰ درصد	۱۳۲/۷b	۱۴/۳b	۶/۴b	۱۱/۶b	۱۴۸/۴b	۸/۴c	۲/۳۱b
۷۵ درصد	۱۶۱/۵ab	۱۸/۴a	۹/۷a	۱۵/۸a	۱۷۱/۶ab	۱۴/۴ab	۲/۶۴a
۱۰۰ درصد	۱۷۶/۴a	۲۰/۷a	۱۰/۸a	۱۶/۵a	۱۸۱/۴a	۱۵/۵a	۲/۱۳c
مقدار بیوچار							
صفر درصد	۱۵۶/۷c	۱۷/۱bc	۸/۵c	۱۴/۳c	۱۶۴/۵c	۱۱/۳c	۱/۵۵c
۱/۲۵ درصد	۱۶۸/۲b	۱۸/۸ab	۱۰/۴b	۱۶/۱ab	۱۷۶/۴b	۱۵/۱ab	۲/۰۸b
۲/۵ درصد	۱۷۸/۸a	۲۰/۲a	۱۱/۲a	۱۷/۳a	۱۸۳/۶a	۱۶/۴a	۲/۲۶a
۵ درصد	۱۵۱/۳d	۱۶/۳d	۷/۸cd	۱۳/۷cd	۱۵۹/۲cd	۱۰/۷dc	۱/۴۷d

جدول ۵- مقایسه میانگین اثرات متقابل مقدار آب آبیاری و بیوچار (A×B) پارامترهای کمی کارلا

مقدار آب آبیاری	مقدار بیوچار	ارتفاع گیاه (cm)	تعداد میوه	قطر میوه (cm)	طول میوه (cm)	وزن میوه (gr)	عملکرد (ton/ha)	کارایی مصرف آب آبیاری (kg/m3)
۵۰ درصد	صفر	۱۴۳/۲e	۱۳/۵e	۷/۳d	۱۲/۳de	۱۵۲/۳d	۸/۴g	۲/۳۱d
۱/۲۵ درصد	۱/۲۵ درصد	۱۵۴/۶c	۱۵/۶c	۹/۷b	۱۴/۴c	۱۶۰/۵c	۱۰/۵f	۲/۸۹ab
۲/۵ درصد	۲/۵ درصد	۱۳۴/۷f	۱۰/۴f	۵/۸ef	۹/۵f	۱۴۸/۴e	۷/۲gh	۱/۹۸f
۵ درصد	۵ درصد	۱۲۱/۵g	۷/۶g	۴/۳f	۷/۶fg	۱۲۷/۸f	۶/۵h	۱/۷۹g
۷۵ درصد	صفر	۱۵۰/۲d	۱۴/۹d	۷/۲d	۱۳/۶d	۱۵۵/۶d	۱۰/۸f	۱/۹۸f
۱/۲۵ درصد	۱/۲۵ درصد	۱۶۳/۷b	۱۸/۴b	۸/۸c	۱۵/۸bc	۱۶۱/۲c	۱۲/۹e	۲/۵۵c
۲/۵ درصد	۲/۵ درصد	۱۷۹/۴a	۲۱/۵a	۱۱/۳a	۱۷/۴b	۱۷۷/۷a	۱۶/۲a	۲/۹۷a
۵ درصد	۵ درصد	۱۴۰/۱e	۱۳/۳e	۶/۴e	۱۲/۳de	۱۴۷/۸	۸/۴g	۱/۵۴gh
۱۰۰ درصد	صفر	۱۵۶/۹c	۱۶/۸c	۸/۶c	۱۴/۷c	۱۶۵/۳c	۱۲/۶c	۱/۷۳g
۱/۲۵ درصد	۱/۲۵ درصد	۱۶۸/۶b	۱۹/۱b	۱۰/۸b	۱۶/۸b	۱۷۲/۴b	۱۵/۵b	۲/۱۳e
۲/۵ درصد	۲/۵ درصد	۱۸۰/۵a	۲۳/۴a	۱۲/۴a	۱۸/۵a	۱۸۵/۵a	۱۷/۷a	۲/۴۴cd
۵ درصد	۵ درصد	۱۴۸/۶d	۱۴/۱d	۷/۵dc	۱۴/۲c	۱۵۴/۷d	۱۰/۴f	۱/۴i

ارتفاع گیاه

بر اساس جدول ۴ با کاهش عمق آب آبیاری ارتفاع گیاه کاهش یافت. بیشترین مقدار ارتفاع در تیمار ۱۰۰ درصد آب آبیاری (۱۷۶/۴ سانتی متر) مشاهده شد؛ که از این نظر با تیمار ۷۵ درصد آب آبیاری تفاوت معنی دار نداشت. کمترین مقدار آن در تیمار ۵۰ درصد آب آبیاری (۱۳۲/۷ سانتی متر) بود. کاهش ارتفاع ناشی از تنش خشکی می تواند به دلیل کاهش پتانسیل آب بافت های مرستمی در طول روز و نقصان پتانسیل فشاری باشد که در نتیجه مانع بزرگ شدن سلول ها شده و ارتفاع کاهش می یابد. سطوح مختلف بیوچار نیز بر ارتفاع گیاه اثر معنی دار داشت. با افزایش مقدار بیوچار تا سطح ۲/۵ درصد وزنی، ارتفاع گیاه افزایش یافت؛ اما مصرف بیشتر بیوچار باعث کاهش ارتفاع شد. بیشترین ارتفاع گیاه در سطح ۲/۵ درصد وزنی بیوچار (۱۷۸/۸ سانتی متر) و کمترین آن در سطح پنج درصد وزنی بیوچار (۱۵۱/۳ سانتی متر) به دست آمد. افزایش سطوح بیشتر بیوچار (پنج درصد وزنی) باعث کاهش ارتفاع شد. سطوح بالای بیوچار باعث شوری خاک می شود. لذا فشار اسمزی محلول خاک زیاد می شود. در نتیجه مقدار انرژی که گیاه باید برای جذب آب مصرف کند، افزایش می یابد که این عمل باعث افزایش تنفس و کاهش ارتفاع گیاه می شود. کوراکو و همکاران (۲۰۱۴) با افزودن چهار سطح بیوچار صفر، ۵، ۱۰ و ۲۰ تن در هکتار بیوچار در کشت گیاه جو

به این نتیجه رسیدند که افزودن بیوچار موجب افزایش ارتفاع گیاه جو نسبت به تیمار شاهد شده و بیشترین افزایش ارتفاع گیاه نسبت به تیمار شاهد، با افزودن پنج تن در هکتار بیوچار به دست آمد. اثرات متقابل آب آبیاری و بیوچار (جدول ۵) نشان داد با کاهش مقدار آب آبیاری و بیوچار ارتفاع کاهش یافت. در تمامی سطوح آبیاری استفاده پنج درصد وزنی بیوچار باعث کاهش ارتفاع گیاه شد. در سطوح ۱۰۰ و ۷۵ درصد آب آبیاری استفاده بیوچار تا ۲/۵ درصد وزنی باعث افزایش ارتفاع شد. در سطح آبیاری ۵۰ درصد مصرف ۱/۲۵ درصد وزنی بیوچار افزایش ارتفاع را در پی داشت و استفاده بیشتر بیوچار در این سطح کم آبی باعث کاهش ارتفاع شد؛ بنابراین می توان گفت در سطح ۵۰ درصد آبیاری، بیوچار نمی تواند اثرات شدید کم آبی را جبران نماید بلکه باعث افزایش شدت تنش های وارده می شود. وجود منافذ زیاد و سطح ویژه بالا در بیوچار موجب افزایش قدرت تبادل کاتیونی و افزایش عناصر غذایی در تیمارهای حاوی بیوچار می شود. همچنین بیوچار به دلیل منافذ زیاد و سطح ویژه بالا، زیستگاه مناسبی برای میکروارگانیسم های خاکزی است و از خشکی و شکار شدن آنها توسط موجودات بزرگ تر جلوگیری کرده و منابع سرشاری از مواد معدنی و کربنی را برای میکروارگانیسم ها فراهم می کند. با توجه به این که میکروارگانیسم ها از خدمات اکوسیستمی مهم در طبیعت هستند، می توانند با

تأثیر بر ساختار بیولوژیکی خاک، چرخه‌ی عناصر غذایی، بهبود دانه‌بندی خاک و معدنی شدن کربن آلی بر رشد گیاه موثر است و باعث افزایش رشد و ارتفاع گیاه می‌گردد (جمال و اب، ۲۰۱۶).

تعداد میوه: همان‌طور که از جدول ۴ مشاهده می‌شود با کاهش عمق آب آبیاری تعداد میوه گیاه کاهش یافت. بیشترین مقدار آن از تیمار ۱۰۰ درصد آب آبیاری (۲۰/۷ عدد) به دست آمد که تفاوت معنی‌دار با تیمار ۷۵ درصد آب آبیاری (۱۸/۴ عدد) نداشت. حیدریان و همکاران (۱۳۹۶) در بررسی تنش آبی بر ارقام مختلف خربزه به این نتیجه رسیدند که کم‌آبی باعث کاهش تعداد میوه می‌شود. مصرف بیوپار باعث افزایش تعداد میوه ها شد. بیشترین مقدار آن از تیمار ۲/۵ درصد وزنی بیوپار (۲۰/۲ عدد) به دست آمد اما از این نظر با تیمار ۱/۲۵ درصد وزنی بیوپار تفاوت معنی‌دار حاصل نشد. افزایش بیوپار به مقدار پنج درصد وزنی باعث کاهش تعداد میوه شد به طوری که تعداد میوه گیاه در تیمار عدم مصرف بیوپار بیشتر بود. اثرات متقابل آب آبیاری و بیوپار بر تعداد گیاه (جدول ۵) نشان داد با کاهش عمق آب آبیاری و بیوپار تعداد میوه کاهش یافت. بیشترین مقدار آن از تیمار ۱۰۰ درصد آب آبیاری و ۲/۵ درصد وزنی بیوپار (۲۳/۴ عدد) به دست آمد که تفاوت معنی‌دار با تیمار ۷۵ درصد آب آبیاری و ۲/۵ درصد وزنی بیوپار (۲۱/۵ عدد) نداشت. در تیمار ۵۰ درصد آب آبیاری، تعداد گیاه در سطح ۱/۲۵ درصد وزنی بیوپار (۱۵/۶ عدد) بیشتر بود. مصرف بیوپار در سطح ۲/۵ و ۵ درصد وزنی باعث کاهش تعداد میوه گیاه شد.

قطر، طول و وزن میوه

سطوح مختلف آبیاری و بیوپار در سطح احتمال یک درصد بر قطر میوه تأثیر معنی‌دار داشت (جدول ۴). با کاهش عمق آب آبیاری قطر میوه کاهش یافت (جدول ۵). بیشترین مقدار آن از تیمار ۱۰۰ آب آبیاری حاصل شد که تفاوت معنی‌دار با تیمار ۷۵ درصد آب آبیاری نداشت. کاهش سطوح بیوپار نیز باعث کاهش قطر میوه شد.

بیشترین مقدار آن از تیمار ۲/۵ درصد وزنی بیوپار (۱۱/۲ سانتی‌متر) به دست آمد. استفاده بیشتر از بیوپار (سطح پنج درصد وزنی) باعث کاهش قطر میوه شد. اثرات متقابل آب آبیاری و بیوپار نشان داد کاهش عمق آب آبیاری و بیوپار باعث کاهش قطر میوه شد. بیشترین قطر میوه در تیمار ۱۰۰ درصد آب آبیاری و ۲/۵ درصد وزنی بیوپار (۱۲/۴ سانتی‌متر) به دست آمد که از این نظر با تیمار ۷۵ درصد آب آبیاری و ۲/۵ درصد وزنی بیوپار (۱۱/۳ سانتی‌متر) تفاوت معنی‌دار نداشت. با افزایش شدت تنش آبی قطر میوه کاهش یافت. در تیمار ۵۰ درصد آب آبیاری استفاده ۱/۲۵ درصد وزنی بیوپار باعث افزایش قطر میوه شد و استفاده بیشتر از بیوپار قطر میوه را کاهش داد؛ بنابراین می‌توان گفت می‌توان سطوح بالای بیوپار ممکن است سبب ایجاد اثرات شوری در گیاه شود که بر روی رشد و نمو گیاه تأثیر داشته و باعث کاهش قطر میوه شده است. با کاهش آب آبیاری طول میوه کاهش یافت (جدول ۵). بیشترین مقدار طول میوه از تیمار ۱۰۰ درصد آب آبیاری (۱۶/۵ سانتی‌متر) به دست آمد که از این نظر با تیمار ۷۵ درصد مقدار آب آبیاری تفاوت معنی‌دار نداشت. کاهش مقدار بیوپار نیز باعث کاهش طول میوه شد. بیشترین مقدار طول میوه از تیمار ۲/۵ درصد وزنی بیوپار (۱۷/۳ سانتی‌متر) به دست آمد ولی با تیمار ۱/۲۵ درصد وزنی بیوپار تفاوت معنی‌دار نداشت. استفاده پنج درصد وزنی بیوپار باعث کاهش طول میوه شد. اثرات متقابل آب آبیاری و بیوپار نشان داد با کاهش بیوپار و کاهش آب آبیاری طول میوه کاهش یافت. بیشترین مقدار آن در تیمار ۱۰۰ درصد آب آبیاری و ۲/۵ درصد وزنی بیوپار (۱۶/۸ سانتی‌متر) به دست آمد. کمترین مقدار طول میوه در تیمار ۵۰ درصد آب آبیاری و مصرف پنج درصد وزنی بیوپار (۷/۶ سانتی‌متر) به دست آمد؛ که نشان دهنده کاهش اثرات بیوپار در تنش‌های آبی شدید می‌باشد. کاهش مقدار آب آبیاری باعث کاهش وزن میوه شد؛ اما این کاهش بین تیمارهای ۱۰۰ درصد و ۷۵ درصد آب آبیاری و تیمار ۷۵ درصد و ۵۰ درصد آب آبیاری معنی‌دار نبود. کاهش وزن میوه به دلیل کاهش فتوسنتز همراه با

پیری برگ‌ها در اثر تنش باشد. کاهش در میزان فتوسنتز با کاهش سطح برگ و فعالیت آنزیم ریبولوزیسی فسفات کربوکسیلاز به علت کاهش تبادل دی‌اکسید کربن در اثر بسته شدن روزنه‌ها می‌باشد (حیدریان و همکاران، ۱۳۹۶). استفاده از بیوپچار باعث افزایش وزن میوه شد؛ اما این افزایش تا استفاده ۲/۵ درصد بیوپچار بود. استفاده بیشتر از بیوپچار باعث کاهش وزن میوه شد به‌طوری‌که وزن میوه در تیمار عدم استفاده از بیوپچار بیشتر از تیمار پنج درصد وزنی بیوپچار بود. افزایش وزن میوه در اثر کاربرد بیوپچار به دلیل افزایش دسترسی به آب و مواد غذایی در خاک و بهبود شرایط رشد گیاه و در نتیجه افزایش وزن محصول می‌شود. کاهش وزن میوه در سطوح بالاتر بیوپچار می‌تواند ناشی از شوری ایجاد شده در سطوح بالای بیوپچار باشد (پورمنصور و همکاران، ۱۳۹۸). اثرات متقابل آب آبیاری و بیوپچار نشان داد با کاهش آب آبیاری و کاهش بیوپچار وزن میوه کاهش یافت. بیشترین وزن میوه از تیمار ۱۰۰ درصد آب آبیاری و ۲/۵ درصد وزنی بیوپچار (۱۸۵/۵ گرم) حاصل شد؛ اما از این نظر با تیمار ۷۵ درصد آب آبیاری و ۲/۵ درصد وزنی بیوپچار (۱۷۷/۷ گرم) تفاوت معنی‌دار نداشت. تخلخل بالا، جرم مخصوص کم، ظرفیت تبادل کاتیونی زیاد و ظرفیت نگهداری رطوبت بالای بیوپچار باعث افزایش حاصلخیزی خاک شده و رشد گیاه و ریشه را موجب می‌شود. به‌همین دلیل دسترسی گیاه به مواد غذایی بیشتر شده و افزایش قطر، طول و وزن میوه را به‌همراه دارد. افزایش بیشتر بیوپچار (پنج درصد وزنی) در تمامی تیمارهای آبیاری باعث کاهش وزن میوه شد. در تیمار ۵۰ درصد آب آبیاری استفاده از تیمارهای ۲/۵ و ۵ درصد بیوپچار نسبت به تیمار عدم استفاده از بیوپچار باعث کاهش وزن میوه شد؛ بنابراین می‌توان گفت بیوپچار در شدت تنش‌های بالا کارایی موثر ندارد.

عملکرد

کاهش مقدار آب آبیاری باعث کاهش عملکرد شد. بیشترین مقدار عملکرد از تیمار ۱۰۰ درصد آب آبیاری (۱۵/۵ تن در هکتار) به‌دست آمد؛ که با تیمار ۷۵ درصد

آب آبیاری تفاوت معنی‌دار مشاهده نشد. این کاهش می‌تواند به دلیل کاهش جذب عناصر غذایی مورد نیاز گیاه از خاک و همچنین کاهش جذب دی‌اکسید کربن به دلیل بسته شدن روزنه‌ها در شرایط خشکی و در نتیجه کاهش میزان فتوسنتز و کربوهیدرات‌های تولید شده طی فرایند فتوسنتز باشد که در نهایت موجب کاهش عملکرد گیاه شده است. همچنین محققین بیان داشتند گیاهان خانواده کدویان به دلیل رشد سریع به‌ویژه در مراحل اولیه رشد و داشتن برگ‌های بزرگ و سیستم ریشه‌ای سطحی به مقدار زیادی آب برای رشد و نمو نیاز دارند. این عوامل باعث می‌شود که کمبود رطوبت خاک باعث کاهش عملکرد کدویان شود (لسکوار و پیسینی، ۲۰۰۵). گویلی و همکاران (۱۳۹۵) در تحقیق خود راجع به اثرات بیوپچار گاوی و تنش رطوبتی بر اسفناج به نتایج مشابه دست یافتند و بیان داشتند، اعمال سطوح تنش رطوبتی سبب کاهش معنی‌دار سطح برگ، هدایت روزنه‌ای، آب مصرفی، وزن تر و وزن خشک اندام هوایی گیاه در مقایسه با تیمار ۱۰۰ درصد رطوبت ظرفیت مزرعه شد. استفاده بیوپچار تا سطح ۲/۵ درصد وزنی باعث افزایش عملکرد شد. استفاده بیشتر از بیوپچار (تیمار پنج درصد وزنی بیوپچار) باعث کاهش عملکرد شد؛ که احتمالاً به دلیل افزایش شوری حاصل از کاربرد مقادیر زیاد بیوپچار می‌باشد. سان و همکاران (۲۰۱۹) هفت سطح بیوپچار را بر روی گیاه گندم مورد ارزیابی قرار دادند. نتیجه مطالعه آن‌ها نشان داد کاربرد ۵ تا ۲۰ تن در هکتار بیوپچار باعث افزایش عملکرد گندم شد اما کاربرد بیشتر از آن موجب کاهش عملکرد گندم شد. محققین بیان داشتند افزایش عملکرد در اثر کاربرد بیوپچار در خاک می‌تواند به دلیل اثرات مستقیم (عناصر غذایی موجود در زیست توده که طی فرایند تجزیه حرارتی به بیوپچار تبدیل شده) و غیرمستقیم (بهبود ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک) آن باشد (ماجور و همکاران، ۲۰۱۰). ژانگ و همکاران (۲۰۱۲) نیز در تحقیق خود بیان نمودند کاربرد ۲۰ و ۴۰ تن در هکتار بیوپچار باعث افزایش عملکرد ذرت به مقدار ۱۱/۶ و ۱۸/۲ درصد نسبت به تیمار شاهد شد. اختر و همکاران (۲۰۱۴) بیان

کردند کاربرد بیوپار باعث مقاومت گیاه گوجه‌فرنگی به تنش خشکی گردید و عملکرد گیاهان تحت تنش تیمار شده با بیوپار به دلیل افزایش کارایی مصرف آب و محتوای نسبی آب در این تیمارها افزایش یافت. اثرات متقابل آب آبیاری و بیوپار نشان داد با کاهش مصرف بیوپار و آب آبیاری عملکرد کاهش یافت. بیشترین عملکرد از تیمار ۱۰۰ درصد آب آبیاری و ۲/۵ درصد وزنی بیوپار به دست آمد؛ اما از این نظر با تیمار ۷۵ درصد آب آبیاری و ۲/۵ درصد وزنی بیوپار تفاوت معنی‌دار نداشت. در تیمار ۵۰ درصد آب آبیاری مقدار عملکرد در سطح ۱/۲۵ درصد وزنی بیوپار نسبت به سایر سطوح بیوپار بیشتر بود. می‌توان بیان داشت استفاده از بیوپار با به کار بردن آب آبیاری مناسب، باعث فراهم شدن آب و مواد غذایی و در نتیجه رشد بهینه گیاه گردیده است. ابراهیم و همکاران (۲۰۱۵) به افزایش بیشتر عملکرد کاه و کلش در تیمارهای حاوی بیوپار و آبیاری بر اساس ۸۰ درصد نیاز آبی گیاه در مقایسه با تیمارهای بدون بیوپار و ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه اشاره کردند. پورمنصور و همکاران (۱۳۹۸) رشد محصول گندم در سطوح مختلف بیوپار و تنش آبی را در شرایط گلخانه مورد بررسی قرار دادند. ایشان بیان داشتند ۷۵ درصد آبیاری و ۱/۲۵ درصد وزنی بیوپار تأثیر مثبت بر عملکرد و بهبود شرایط گیاه داشت و افزودن مقادیر بیشتر بیوپار به دلیل شور شدن خاک سبب کاهش عملکرد می‌شود.

کارایی مصرف آب آبیاری

با کاهش آب آبیاری تا سطح ۷۵ درصد کارایی مصرف آب آبیاری افزایش یافت. کاهش بیشتر آب آبیاری تا سطح ۵۰ درصد باعث کاهش کارایی مصرف آب آبیاری شد. علت آن به دلیل کاهش عملکرد در این تیمار می‌باشد. مصرف بیوپار تا سطح ۲/۵ درصد وزنی باعث افزایش

کارایی مصرف آب آبیاری شد. بیشترین مقدار کارایی مصرف آب آبیاری در تیمار ۲/۵ درصد وزنی بیوپار (۲/۲۶ کیلوگرم بر مترمکعب) مشاهده شد. افزایش بیوپار به پنج درصد وزنی به دلیل افزایش شدت تنش‌های وارده سبب کاهش کارایی مصرف آب شد. افزودن بیوپار باعث افزایش ظرفیت نگهداری آب در خاک می‌شود. در نتیجه اصلاح خاک با بیوپار منجر به افزایش تولید محصولات زراعی از طریق حفظ بیشتر آب ناشی از بارندگی‌ها و کاهش دفعات آبیاری می‌شود (استرویل و همکاران، ۲۰۱۱). اثرات متقابل آب آبیاری و بیوپار (جدول ۵) نشان داد با کاهش آب آبیاری تا سطح ۷۵ درصد و افزایش بیوپار تا سطح ۲/۵ درصد وزنی باعث افزایش کارایی مصرف آب آبیاری شد. بیشترین مقدار آن از تیمار ۷۵ درصد آب آبیاری و ۲/۵ درصد وزنی بیوپار (۲/۹۷ کیلوگرم بر متر مکعب) حاصل شد که از این نظر با تیمار ۵۰ درصد آب آبیاری و ۱/۲۵ درصد وزنی بیوپار (۲/۸۹ کیلوگرم بر مترمکعب) تفاوت معنی‌دار مشاهده نشد. افزایش کارایی مصرف آب با بالا بودن عملکرد و همچنین کاهش میزان آب مصرفی در تیمارها مرتبط است. افزایش کارایی مصرف آب با کاربرد بیوپار در تحقیقات سایر محققین نیز گزارش شده است. ازوما و همکاران (۲۰۱۱) گزارش کردند کاربرد ۱۰، ۱۵ و ۲۰ تن در هکتار بیوپار کود گاوی کارایی مصرف آب ذرت را به ترتیب ۶، ۱۳/۹ و ۹/۱ درصد نسبت به شاهد افزایش داد.

جدول ۶ نتیجه تجزیه واریانس و جدول ۷ مقایسه میانگین اثرات ساده آب آبیاری و بیوپار را بر صفات کیفی اندازه‌گیری شده گیاه کارلا نشان می‌دهد. نتیجه تجزیه واریانس نشان داد اثر آب آبیاری و بیوپار بر پارامترهای اندازه‌گیری شده در سطح احتمال یک و پنج درصد معنی‌دار بود.

جدول ۶- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات و درجه آزادی) پارامترهای کیفی اندازه‌گیری شده

منابع تغییرات	درجه آزادی	قند میوه	کلروفیل a	کلروفیل b	شاخص سطح برگ
آبیاری (A)	۲	۰/۰۱۲*	۷۴/۴۳*	۶۷/۲۱*	۱۵۸۹/۶۲*
بیوچار (B)	۳	۰/۰۲۳*	۲۰/۵*	۱۳/۳۵*	۲۴۱۶/۳۴**
اثر متقابل (A*B)	۶	۰/۰۱۸*	۱۲/۶۱*	۱۴/۵۶*	۱۸۴۶/۸۵*
خطا	۲۴	۰/۰۰۳*	۱/۵۲	۰/۹۷	۷۵۳/۴۶
ضرب تغییرات		۷/۶*	۵/۷۴	۶/۵۳	۱۰/۲۴

جدول ۷- مقایسه میانگین پارامترهای کیفی اندازه‌گیری شده

تیمارهای آزمایشی	قند میوه (میلی گرم بر گرم)	کلروفیل a (میلی گرم بر گرم)	کلروفیل b (میلی گرم بر گرم)	شاخص سطح برگ (سانتی متر مربع)
مقدار آب آبیاری	۱/۳۵a	۱/۴۵b	۰/۷۸b	۳۰/۲b
۵۰ درصد	۱/۲۴b	۲/۰۲a	۱/۲۹a	۴۴/۳a
۷۵ درصد	۱/۱۲c	۲/۱۶a	۱/۳۴a	۴۹/۵a
۱۰۰ درصد	۱/۰۲d	۱/۳۴c	۰/۷۳c	۳۶/۳c
مقدار بیوچار	۱/۱۵c	۱/۷۸b	۱/۱۹b	۴۷/۶b
۱/۲۵ درصد	۱/۲۸b	۲/۲۱a	۱/۴۲a	۵۱/۴a
۲/۵ درصد	۱/۳۷a	۱/۴۵c	۰/۸۵c	۳۵/۷c
۵ درصد				

شاخص سطح برگ

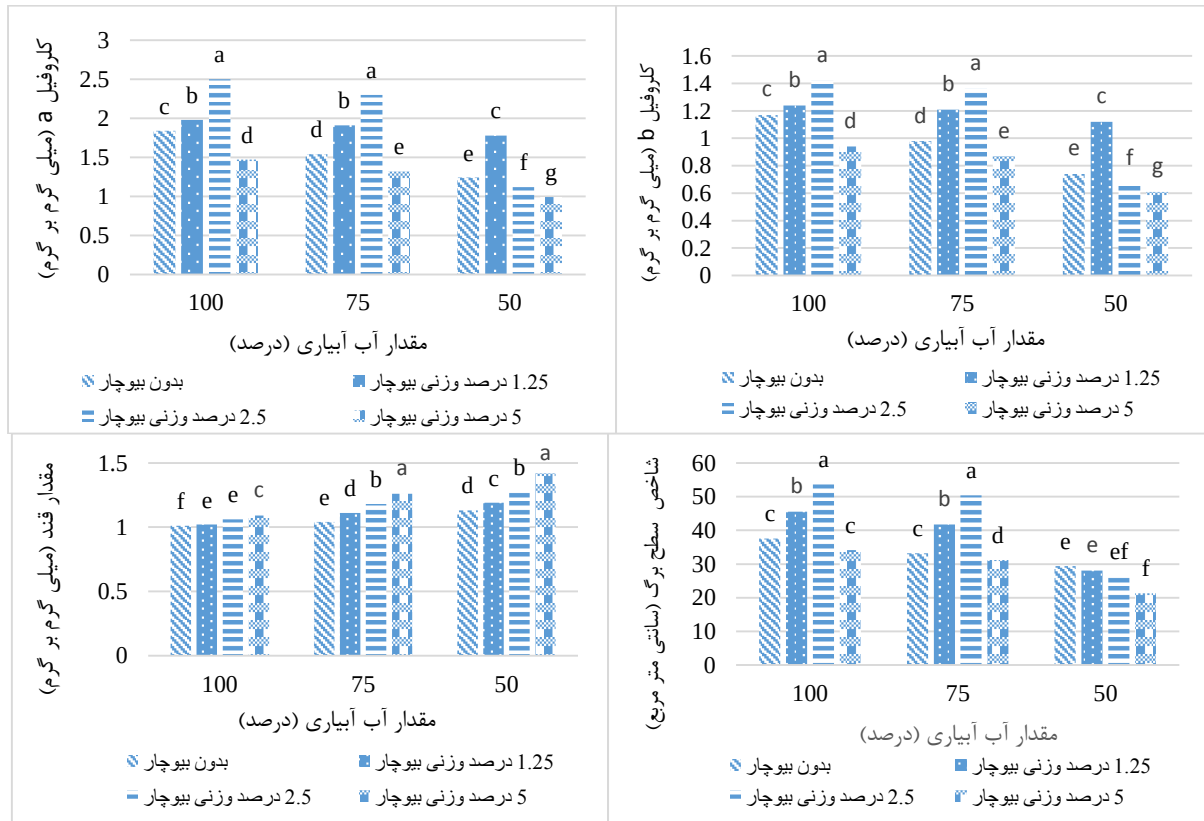
نتیجه تجزیه واریانس (جدول ۶) نشان داد اثر آب آبیاری و بیوچار به ترتیب در سطح احتمال پنج و یک درصد بر شاخص سطح برگ معنی دار بود. مقایسه میانگین اثرات ساده آب آبیاری (جدول ۷) نشان داد با کاهش آب آبیاری شاخص سطح برگ کاهش یافت؛ اما از این نظر با سطح آبیاری ۷۵ درصد تفاوت معنی دار نداشت. سطح برگ تعیین کننده میزان تشعشع جذب شده توسط گیاه و تولید ماده خشک می باشد. تقسیم سلولی در اثر افزایش میزان اسید آبسیسک، تأمین نشدن آسیمیلات مورد نیاز برای رشد برگ و در نتیجه کاهش فتوسنتز از مهم ترین علل احتمالی کاهش شاخص سطح برگ بر اثر تنش خشکی گزارش شده است (تسفا و همکاران، ۲۰۰۶). کاهش سطح برگ ناشی از تنش خشکی به دلیل کاهش میزان سرعت و گسترش سطح برگ ها به واسطه اختلال در فتوسنتز و کاهش آماس سلولی در نتیجه اعمال تنش خشکی است. کاهش سطح برگ در تیمارهای تنش آبی به واسطه حساسیت بالای تقسیم سلولی و سرعت رشد سلول ها به کم آبی است (ندیم و همکاران، ۲۰۰۲). رودریگز و همکاران (۲۰۱۰) بیان

قند میوه: کاهش آب آبیاری باعث افزایش مقدار

قند میوه شد (جدول ۶). بیشترین مقدار قند میوه در تیمار ۵۰ درصد آب آبیاری (۱/۳۵ میلی گرم بر گرم) به دست آمد. در شرایط تنش خشکی با وجود کاهش میزان تولید مواد نورساختی، محتوای قندهای محلول به دلیل تغییر شکل بیشتر نشاسته و یا دیگر شکل های ذخیره ای به قند، تجزیه پلی ساکاریدهای دیواره یاخته ای، تغییر در میزان انتقال قندها و یا مصرف کمتر کربوهیدرات ها توسط بافت ها افزایش می یابد (مانز، ۲۰۱۰). افزایش بیوچار باعث افزایش قند میوه شد (جدول ۷). بیشترین مقدار آن از تیمار پنج درصد بیوچار (۱/۳۷ میلی گرم بر گرم) به دست آمد. کمترین مقدار قند نیز در تیمار عدم استفاده از بیوچار (۱/۱۵ میلی گرم بر گرم) حاصل شد. اثرات متقابل آب آبیاری و بیوچار (شکل ۱) نشان داد با کاهش آب آبیاری و افزایش بیوچار مقدار قند میوه افزایش یافت. بیشترین مقدار آن در تیمار ۵۰ درصد آب آبیاری و پنج درصد وزنی بیوچار (۱/۴۲ میلی گرم بر گرم) به دست آمد. مقدار قند در تیمار ۷۵ درصد آب آبیاری و پنج درصد مصرف بیوچار با تیمار ۵۰ درصد آب آبیاری و ۲/۵ درصد وزنی بیوچار تفاوت معنی دار نداشت.

کمترین مقدار شاخص سطح برگ در تیمار ۵۰ درصد آب آبیاری و پنج درصد وزن بیوپار حاصل شد. استفاده بیوپار تا سطح ۲/۵ درصد وزنی در تیمار ۷۵ درصد آب آبیاری باعث افزایش شاخص سطح برگ نسبت به تیمار عدم مصرف بیوپار شده بود؛ بنابراین می‌توان گفت مصرف مقدار مناسب بیوپار در شرایط کم‌آبی می‌تواند اثرات ناشی از تنش خشکی را تا حدودی کاهش دهد.

کردند سطح برگ در اثر تنش آب کاهش می‌یابد که موجب کاهش جذب نور توسط گیاه و کاهش عملکرد می‌شود. مقایسه میانگین اثرات ساده بیوپار (جدول ۶) نشان داد با مصرف بیوپار تا سطح ۲/۵ درصد شاخص سطح برگ افزایش یافت اما استفاده بیشتر بیوپار باعث کاهش شاخص سطح برگ نسبت به تیمار شاهد (عدم مصرف بیوپار) شد. اثرات متقابل آب آبیاری و بیوپار (شکل ۱) نشان داد



شکل ۱- مقایسه میانگین اثرات متقابل مقدار آب آبیاری و بیوپار (A×B) پارامترهای کیفی کارلا

مقادیر کلروفیل a و b کاهش یافت. بیشترین مقدار کلروفیل a (۲/۱۶ میلی گرم بر گرم) و کلروفیل b (۳۴/۱ میلی گرم بر گرم) از تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه به دست آمد اما از این نظر با تیمار ۷۵ درصد مقدار آب آبیاری تفاوت معنی دار نداشت. با کاهش مقدار بیوپار نیز مقادیر کلروفیل کاهش یافت و از این نظر در سطوح مختلف در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی دار وجود داشت. بیشترین مقدار کلروفیل a (۲/۲۱ میلی گرم بر گرم) و کلروفیل b (۱/۴۲ میلی گرم بر گرم) از تیمار ۲/۵ درصد وزنی بیوپار به دست آمد. اثرات متقابل آب آبیاری و بیوپار (شکل ۱) نشان داد

شاخص سبزی‌نگی

مقدار کلروفیل و رنگدانه‌های فتوسنتزی از مهم‌ترین عوامل موثر در ظرفیت فتوسنتزی گیاهان هستند زیرا به‌طور مستقیم بر سرعت و میزان فتوسنتز و تولید زیست توده موثر هستند (کافی و همکاران، ۱۳۸۹). نتایج تجزیه واریانس (جدول ۶) نشان داد اثر مقدار آب آبیاری و بیوپار و اثرات متقابل آن‌ها در سطح احتمال پنج درصد بر مقادیر کلروفیل a و b تأثیرگذار بود. مقایسه میانگین صفات اندازه‌گیری شده (جدول ۷) نشان داد با کاهش عمق آب آبیاری

کیفی گیاه مرزه مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها بیان داشتند تنش خشکی با تخریب سامانه فتوسنتزی، تخریب غشاء سلولی و کلروپلاست باعث کاهش مقدار رنگدانه‌های کلروفیل a و b و متعاقب آن کاهش توانایی فتوسنتز می‌گردد.

نتیجه‌گیری

در شرایط کم آبیاری، گیاه در طی فصل رشد با شدت‌ها و مدت‌های متفاوتی دچار تنش آبی می‌شود. وجود این تنش تغییراتی را در پاسخ گیاه به وجود می‌آورد که همواره یکسان نیست و در مواردی غیرقابل پیش‌بینی است. بیوپچار از جمله مواد آلی است که به علت دارا بودن خاصیت پایداری بالا، در سال‌های اخیر در شرایط تنش آبی مورد توجه محققین قرار گرفته است. این تحقیق با هدف بررسی اثرات سطوح مختلف بیوپچار در شرایط کم‌آبی بر گیاه کارلا در شرایط گلخانه‌ای در زاهدان انجام شد. نتایج نشان داد اثر مقدار آب مصرفی بر پارامترهای کمی کارلا تأثیر معنی‌دار داشت اما از این نظر بین تیمار ۱۰۰ درصد و ۷۵ درصد آب آبیاری تفاوت معنی‌دار نداشت. افزایش تنش آبی باعث کاهش شاخص سطح برگ و کلروفیل شد. با افزایش تنش مقدار قند گیاه افزایش یافت. بیوپچار با تأثیر بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک از قبیل بهبود اسیدیته خاک، بهبود عناصر غذایی خاک، افزایش قدرت نگهداری عناصر غذایی و ایجاد شرایط مناسب برای میکروارگانیسم‌های خاک می‌تواند بر رشد گیاه اثر مثبت داشته باشد. مصرف بیوپچار تا سطح ۲/۵ درصد وزنی، در شرایط تنش آبی، باعث افزایش عملکرد کمی و کیفی کارلا شد. مصرف بیشتر بیوپچار (پنج درصد وزنی) به دلیل افزایش شوری خاک، باعث کاهش عملکرد کمی و کیفی کارلا شد. مصرف بیوپچار در شرایط کم‌آبی به دلیل داشتن منافذ زیاد و بالابردن ظرفیت نگهداری آب در خاک، باعث افزایش کارایی مصرف آب شد. این کار در مناطق خشک و نیمه-خشک میزان آب مصرفی را کاهش داده و باعث صرفه-جویی می‌شود؛ بنابراین با مصرف بیوپچار می‌توان به جای ۱۰۰ درصد آب آبیاری از ۷۵ درصد آب آبیاری استفاده

با کاهش آب آبیاری و کاهش مصرف بیوپچار مقادیر کلروفیل a و b کاهش یافت. بیشترین مقادیر کلروفیل از تیمار ۱۰۰ درصد آب آبیاری و ۲/۵ درصد وزنی بیوپچار به دست آمد اما از این نظر با تیمار ۷۵ درصد آب آبیاری و ۲/۵ درصد وزنی بیوپچار اختلاف معنی‌دار مشاهده نشد. مصرف بیشتر بیوپچار (پنج درصد وزنی) باعث کاهش مقدار کلروفیل شد. علت آن را می‌توان به شور شدن خاک در مقادیر بالای بیوپچار نسبت داد. دوام فتوسنتز و حفظ کلروفیل برگ تحت تنش از جمله شاخص‌ها فیزیولوژیکی مقاومت به تنش است. غلظت کلروفیل به عنوان یک شاخص برای ارزیابی قدرت منبع شناخته می‌شود زیرا غلظت کلروفیل برگ یکی از عوامل کلیدی در تعیین سرعت فتوسنتز و تولید ماده خشک گیاه است (قوش و همکاران، ۲۰۰۴)؛ بنابراین کاهش آن در شرایط خشکی می‌تواند به عنوان یک عامل محدودکننده‌ی غیرروشنه‌ای در فتوسنتز به حساب آید (هوکسترا و همکاران، ۲۰۱۱). با افزایش تنش خشکی میزان کلروفیل برگ کاهش می‌یابد. در شرایط تنش آبی فاکتورهای لازم برای سنتز کلروفیل کاهش و تخریب آن افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر در شرایط تنش کم‌آبی، گیاه با بسته نگه داشتن روزنه‌ها در طی روز، سعی در حفظ محتوای آب نسبی خود دارد، در این زمان انتقال الکترون در فتوسیستم II مختل شده و الکترون اضافی ناشی از فتولیز آب، باعث تولید اکسیژن فعال و خسارت به غشای سلولی از طریق پراکسیداسیون چربی‌ها، پروتئین‌ها و کاهش محتوای کلروفیل گیاه می‌گردد. یکی از مهمترین دلایل کاهش کلروفیل تخریب آن به وسیله گونه-های اکسیژن فعال (پراکسید هیدروژن) می‌باشد، بنابراین بیوسنتز کلروفیل با محدودیت مواجه می‌شود (قهرمانی و همکاران، ۱۳۹۴). در گیاهان گزارش‌های متفاوتی از تأثیر تنش بر کلروفیل گزارش شده است. در آزمایشی تأثیر خشکی بر رشد گیاه آفتابگردان بررسی شد. نتیجه نشان داد غلظت کلروفیل a و b و کلروفیل کل کاهش یافت (مانیوان و همکاران، ۲۰۰۷). گرگینی‌شبانکاره و خراسانی‌نژاد (۱۳۹۶) اثر سدیم نیتروپروساید را بر خصوصیات کمی و

نمود و همان مقدار محصول تولید نمود. به‌طور کلی استفاده از کارلا سبب بهبود خصوصیات فیزیولوژیکی و افزایش تحمل گیاه کارلا در برابر تنش آبی شد. پیشنهاد می‌گردد که جهت اجرایی نمودن نتایج این تحقیق، آزمایش در شرایط مزرعه‌ای نیز انجام شده و جنبه‌های فنی و اقتصادی نیز مورد مطالعه قرار گیرد. همچنین با توجه به اهمیت دارویی گیاه کارلا، پیشنهاد می‌گردد تحقیقات بیشتری در زمینه کاشت این گیاه در منطقه انجام گیرد.

فهرست منابع

۱. پورمنصور، س.، رزاقی، ف.، سپاسخواه، ع. و موسوی، س. ع. ۱۳۹۸. بررسی رشد و محصول گندم تحت سطوح مختلف بیوچار و کم‌آبیاری در شرایط گلخانه‌ای. مدیریت آب و آبیاری، ۹(۱): ۱۵-۲۸.
۲. حیدریان، ن.، برزگر، ط. و قهرمانی، ز. ۱۳۹۶. اثر تنش کم‌آبی بر رشد، عملکرد، کیفیت میوه و کارایی مصرف آب برخی توده‌های خربزه بومی ایران. به‌زراعی کشاورزی، ۱۹(۲): ۲۸۷-۳۰۲.
۳. خادم، ا.، ریسی، ف. و بشارتی، ح. ۱۳۹۶. مروری بر اثرات بیوچار بر خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک. مدیریت اراضی، ۵(۱): ۱۳-۳۰.
۴. دهقانی‌احمدآبادی، م.، شاه‌نظری، ع.، ضیاءتباراحمدی، م. خ.، اردکانی، م. و قدمی‌فیروزآبادی، ع. ۱۳۹۷. تأثیر تیمارهای مختلف بیوچار بر مشخصه‌های رطوبت خاک در کم‌آبیاری گیاه ذرت. آبیاری و زهکشی ایران، ۵(۱۲): ۱۲۲۸-۱۲۱۷.
۵. سرتیپ، ح.، خمیری، ح. و دهمرده، م. ۱۳۹۶. اثرات کودهای زیستی و شیمیایی بر رنگیزه‌های فتوسنتزی، متابولیت‌های ثانویه و عملکرد میوه گیاه دارویی کارلا. تحقیقات گیاهان دارویی و معطر ایران، ۳۳(۴): ۶۱۹-۶۰۸.
۶. عباس‌پور، ف.، اصغری، ح.، رضوانی‌مقدم، پ.، عباسدخت، ح.، شهابنگ، ج. و بیگ‌بابایی، ع. ۱۳۹۸. تأثیر بیوچار بر حاصلخیزی خاک و کارایی مصرف آب در سیاهدانه تحت شرایط تنش خشکی. پژوهش‌های زراعی ایران، ۱۷(۱): ۵۲-۳۹.
۷. عمرزهی، م.، حسام، م.، پیری، ح. ۱۳۹۹. تعیین نیاز آبی و ضریب گیاهی کارلا (خربزه تلخ) در منطقه سیستان. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۱۴(۳): ۷۴۹-۷۴۰.
۸. فیضی‌زاده، ب.، ابدالی، ح.، رضایی، م. و محمدی، غ. ۱۳۹۱. پهنه‌بندی قابلیت کشت گندم دیم در سطح استان آذربایجان شرقی با استفاده از تحلیل‌های مکانی GIS. پژوهش‌های کاربردی، ۲۵(۳): ۷۵-۹۱.
۹. قهرمانی، م.، عبادی، م.، پرمون، ق. و جهانبخش، س. ۱۳۹۴. بررسی اثر تنش کم‌آبی بر شاخص‌های فتوسنتزی و عملکرد علوفه ژنوتیپ‌های سورگوم علوفه‌ای. فیزیولوژی گیاهان زراعی، ۲۵(۷): ۷۴-۵۹.
۱۰. کافی، م.، باقری، ع.، نباتی، ج.، زارع مهرجردی، م. و معصومی، ع. ۱۳۸۹. بررسی تأثیر تنش شوری بر برخی متغیرهای فیزیولوژیک ژنوتیپ نخود در محیط هیدروپونیک. علوم و فنون کشت‌های گلخانه‌ای، ۴: ۶۹-۵۵.
۱۱. گرگینی‌شبانکاره، ح. و خراسانی‌نژاد، س. ۱۳۹۶. اثر سدیم نیتروپروساید بر برخی ویژگی‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه دارویی مرزه تحت رژیم‌های کم‌آبیاری. پژوهش‌های تولید گیاهی، ۲۴(۳): ۷۰-۵۵.
۱۲. گویلی، ا.، موسوی، س. ع. و کامگارحقیقی، ع. ا. ۱۳۹۵. اثر بیوچار کود گاوی و تنش رطوبتی بر ویژگی‌های رشد و کارایی مصرف آب اسفناج در شرایط گلخانه‌ای. پژوهش آب در کشاورزی، ۳۰(۲): ۲۵۹-۲۴۴.

۱۳. مبصری مقدم، . ۱۳۹۰. تأثیر مقدار و زمان کودپاشی نیتروژن بر خصوصیات کمی و کیفی کارلا. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه زابل.

14. Akhtar, S. S., Andersen, M. N., and Liu, F. 2014. Biochar enhances yield and quality of tomato under reduced irrigation. *Agriculture of Water Management*, 138: 37-44.
15. Aslam, Z., Khalid, M., and Aon, M. 2014. Impact of biochar on soil physical properties. *Scholarly Journal of Agricultural Science*, 4(5): 280-284.
16. Berek, A. K., Hue, N., and Ahmad, A. 2011. Beneficial use of biochar to correct soil acidity. *The Food Provider*. Available at Website <http://www.ctahr.hawaii.edu/huen/nvh/biochar>. *Biol.* 16:1366-1379. Black carbon: downward migration, leaching and soil respiration. *Glob. Change*
17. Blum, A., Ch. Loerz, H. J. Martin, C. A. Staab-Weijnitz, and Maser, E. 2012. *Momordica charantia* extract, an herbal remedy for type 2 diabetes, contains a specific 11β -hydroxysteroid dehydrogenase type 1 inhibitor. *The Journal of Steroid Biochemistry and Molecular Biology*. 128: 51-55.
18. Chaudhry, U. K., Shahzad, S., Naqqash Abdul Saboor, M. N., Yaqoob, S., Salim, M., and Khalid, M. 2016. Integration of biochar and chemical fertilizer to enhance quality of soil and wheat crop (*Triticum aestivum* L.). *Peer Journal Pre Prints*. Available at Web site <https://doi.org/10.7287/peerj.preprints.1631v1>.
19. Crisan, S., Campeanu, G. and Halmagean, L. 2008. Study of *Momordica charantia* L. species grown on the specific conditions of Romania's western part. *Journal of Vegetable Growing*, 32: 425-428.
20. Curaqueo, G., Meier, S., Khan, N., Cea, M. and Navia, R. 2014. Use of biochar on two volcanic soils: effects on soil properties and barley yield. *Soil Science and Plant Nutrition*, 14: 911-924.
21. Demiral, T. and Türkan, I. 2004. Does exogenous glycinebetaine affect antioxidative system of rice seedlings under NaCl treatment *Journal of Plant Physiology*, 161: 1089-1100
22. Gao Lu, S., Fang, S. F. and Tong, Z. Y. 2014. Effect of rice husk biochar and charcoal fly ash on some physical properties of expansive clayey soil (Vertisol). *Catena*. 114: 37-44.
23. Ghosh, P. K., Ajay, K. K., Bandyopadhyay, M. C., Manna, K. G., Mandal, A. K. and Hati, K. M. 2004. Comparative effectiveness of cattle manure, poultry manure, phosphocompost and fertilizer- NPK on three cropping system in vertisols of semi-arid tropics. Dry matter yield, nodulation, chlorophyll content and enzyme activity. *Bi.Tech.* 95:93-85.
24. Glaser, B. and Birk, J. J. 2012. State of the scientific knowledge on properties and genesis of Anthropogenic Dark Earths in Central Amazonia (terra preta de Índio). *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 82: 39-51
25. Haider, G. 2016. Biochar as a Beneficial Soil Amendment in Sandy Soils. Ph.D. thesis. Department of Plant Ecology, Faculty of Biology and Chemistry Justus-Liebig-University Giessen, Germany.
26. Hanson, J. and Smeekens, S. 2009. Sugar perception and signaling- an update. *Current Opinion in Plant Biology*, 12: 562-567.
27. Hoekstra F., Golovina, A., and Buitink, J. 2001. Mechanisms of plant desiccation tolerance. *Tr. P. Sc.* 6: 431-438.
28. Ibrahim, M. M. and Hossein, R. M. 2006. Variability, habitability and genetic advance in some genotypes of roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.). *World Journal of Agricultural Sciences*, 2(3): 340-345.

29. Ibrahim, O. M., Bakry, A. B., El Kramany, M. F., and Elewa, T. A. ۲۰۱۵. Evaluating the role of biochar application under two levels of water requirements on wheat production under sandy soil conditions. *Global Journal of Advanced Research*, 2(2): 411- 418.
30. Jemal, K., and Abebe, A. 2016. Determination of bio-char rate for improved production of Lemmon grass. *International Journal of Advanced Biological and Biomedical Research*, 4(2): 149-157.
31. Lehmann, J., Rillig, M. C., Thies, J., Masiello, C. A., Hockaday, W. C., and Crowley, D. 2011. Biochar effects on soil biota: A review. *Soil Biology and Biochemistry*. 43: 1812- 1836. .
32. Leskovar, DI. and Piccinni, G. 2005. Yield and leaf quality of processing spinach under deficit Irrigation. *HortScience*. 40: 1868-1870.
33. Li, J., Li, Y. E., Wan, Y., Wang, B., Waqas, M. A., Cai, W., and Gao, Q. 2018. Combination of modified nitrogen fertilizers and water saving irrigation can reduce greenhouse gas emissions and increase rice yield. *Geoderma*, 315: 1-10.
34. Li, X., Wan, S., Kang, Y., Chen, X., and Chu, L. 2016. Chinese rose growth and ion accumulation under irrigation with waters of different salt contents. *Agricultural Water Management*. 163: 180-189.
35. Major, J., Rondon, M. Molina D. Riha S.J. and Lehmann J. 2010. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol. *Plant and Soil* 333:117–128.
36. Maness, N. 2010. Extraction and analysis of soluble carbohydrates. P: 341-370. In: Sunkar, R. (ed.) *Plant stress tolerance, methods and protocols*. Springer science & bussines media (Hummana press). pp: 386.
37. Manivaannan, P., Abdul Jaleel, C., Sanka, B., Kishorekumar, A., Somasundaram, R and Panneerselvam, R. 2007. Growth biochemical modification and proline metabolism in *Helianthus annuus* L. as induced by drought stress, *Colloids and Surfaced B. Biointerfaces*. 59: 141-149.
38. Nadeem, T.M.H., Imran, M. and Kamil Husain, M. 2002. Evaluation of sunflower *Helianthus annuus* L. Inbred lines for drought tolerance. *International Journal of Agriculture and Biology*. 25: 398-400.
39. Rodrigues, J. G., Edvardo, M J., Forner, B. and Angeles, F. 2010. Citrus rootstock response to water stress. *Sci. Hort.* 126: 95-102.
40. Payero J.O., Melvin S.R., Irmak S. and Tarkalson, D. 2009. Yield response of corn to deficit irrigation in a semiarid climate. *Agric. Water Manage.* 84:101–112.
41. Quilliam, R. S., Marsden, K. A., Gertler, C., Rousk, J., DeLuca, T. H., and Jones, D. L. 2012. Nutrient dynamics, microbial growth and weed emergence in biochar-amended soil are influenced by time since application and reapplication rate. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 158(4): 192-199.
42. Streubel, J.D., Collins, H.P., Garcia-Perez, M., Tarara, J., Granatstein, D. and Kruger, C.E. 2011. Influence of contrasting biochar types on five soils at increasing rate of application. *Soil Biology and Biochemistry*, 75: 1402-1413.
43. Sun, H., Shi, W., Zhou, M., Ma, X. and Zhang, H. 2019. Effect of biochar on nitrogen use efficiency, grain yield and amino acid content of wheat cultivated on saline soil. *Plant, Soil and Environment*, 65: 83-89.
44. Tesfye, K., Walke, S. and Tsubo, M. 2006. Radintion interception and radiation use efficiency of three gran legumes under water deficit conditions in semi-arid conditions. *EUR. J. Agrin.* 25:60-70.

45. Uzoma, K., Inoue, M., Andry, H., Fujimaki H., Zahoor, A. and Nishihara, E. 2011. Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition. *Soil Use Manage.* 27: 205-212.
46. Van Zwieten, L., Kimber, S., Morris, S., Downie, A., Berger, E., Rust, J and Scheer, C. 2010. Influence of biochars on flux of N₂O and CO₂ from ferrosol. *Australian Journal of Soil Research.* 48: 555-568.
47. Xu, G., Lv, Y., Sun, J., Shao, H. and Wei, L. 2012. Recent advances in biochar applications in agricultural soils: benefits and environmental implications. *CLEAN–Soil, Air, Water*, 40: 1093–1098.
48. Zhang, A., Y. Liu, G. Pan, Q. Hussain, L. Li, J. Zheng, and Zhang, X. 2012. Effect of biochar amendment on maize yield and greenhouse gas emissions from a soil organic carbon poor calcareous loamy soil from Central China Plain. *Plant Soil*, 351: 263-275.

ارزیابی عملکرد برخی گونه‌ها و اکوتیپ‌های سالیکورنیا آبیاری شده با آب دریا و آب شور زیرزمینی

غلامحسن رنجبار^۱، فرهاد دهقانی، آرش علاءالدین، ولی سلطانی گردفرامری و سردار کشتکار

استادیار، مرکز ملی تحقیقات شوری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، یزد، ایران.

ranjbar71@gmail.com

استادیار، مرکز ملی تحقیقات شوری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، یزد، ایران.

deghany47@gmail.com

مرکز غدیر، دانشکده و پژوهشکده پدافند غیرعامل، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران.

arash3568@gmail.com

محقق، مرکز ملی تحقیقات شوری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، یزد، ایران.

valisoltani1355@gmail.com

محقق، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان بوشهر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، یزد، ایران.

sardar.keshtkar@gmail.com

دریافت: تیر ۱۴۰۰ و پذیرش: شهریور ۱۴۰۰

چکیده

کمبود منابع آب باعث شده است که تولید گونه‌های گیاهی متحمل به شوری مورد توجه قرار گیرد. این پژوهش به منظور بررسی تاثیر شوری آب آبیاری بر عملکرد علوفه، ارتفاع گیاه و میزان خاکستر شاخساره سالیکورنیا، گونه بیگلویی (*Salicornia bigelovii*)، اکوتیپ بوشهر (*S. sinus persica*) و اکوتیپ‌های مرکزی، ارومیه و گرگان (گونه *S. persica*) گیاه سالیکورنیا تحت آبیاری با آب خلیج فارس (۶۰ دسی‌زیمنس بر متر) و آب شور زیرزمینی (۲۰ دسی‌زیمنس بر متر)، بترتیب در شرایط استان‌های بوشهر و یزد در سال ۹۹-۱۳۹۸ انجام شد. نتایج نشان داد که بین گونه‌ها و اکوتیپ‌های مورد بررسی از نظر وزن تر و خشک علوفه در هر دو شرایط اختلاف معنی‌دار وجود داشت. در هر دو شرایط، بیشترین میزان وزن تر و خشک علوفه مربوط به اکوتیپ بوشهر و کمترین آن در شرایط استان یزد مربوط به گونه بیگلویی و در شرایط استان بوشهر مربوط به اکوتیپ‌های گرگان و ارومیه بود. میزان علوفه تر تولیدی اکوتیپ بوشهر در شرایط استان‌های بوشهر و یزد به ترتیب در حدود ۹۳۳۳ و ۲۲۹۴۰ گرم در متر مربع بود. بطور کلی، ارتفاع گیاه تحت آبیاری با آب دریا از ۲۳/۰ تا ۳۵/۵ سانتی‌متر در استان بوشهر و از ۵۶/۵ تا ۷۸/۰ سانتی‌متر تحت شرایط آب شور زیر زمینی استان یزد متفاوت بود. متوسط میزان خاکستر شاخساره در شرایط استان بوشهر و یزد بدون توجه به گونه و اکوتیپ به ترتیب ۵۳/۸۳٪ و ۴۷/۷۶٪ بود. بر اساس نتایج این مطالعه، اکوتیپ بوشهر می‌تواند به عنوان وارسته برتر برای کاشت و تولید علوفه در نوار ساحلی جنوب در نظر گرفته شود. در شرایط استان یزد با توجه به کیفیت بهتر آب، همه گونه‌ها و اکوتیپ‌ها عملکرد علوفه بالایی تولید کردند. اگرچه با توجه به نیاز آبی بالای سالیکورنیا، کاشت این گیاه در مناطق خشک به ویژه مناطق مرکزی کشور، توصیه نمی‌گردد.

واژه‌های کلیدی: سالیکورنیا، گونه بیگلویی، اکوتیپ بوشهر، آب بسیار شور، شورزیست، تولید علوفه

^۱ - آدرس نویسنده مسئول: مرکز ملی تحقیقات شوری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، یزد، ایران

مقدمه

کمبود کمی و کیفی منابع آب شیرین، تولید برخی گیاهان علوفه‌ای شورزیست مانند سالیکورنیا را به عنوان گزینه‌ای جایگزین برای تولید بخشی از علوفه با استفاده از منابع آب‌های با کیفیت پایین شامل آب‌های شور زیرزمینی، زه‌آب‌ها و آب دریا اجتناب ناپذیر نموده است (نورمن و همکاران، ۲۰۱۳). سالیکورنیا با تنوع گونه‌ای زیاد (در حدود ۳۰ گونه) در مناطق مختلفی از قاره‌های اروپا، آسیا، آمریکای شمالی و آفریقای جنوبی گسترش یافته است (کادریت و همکاران، ۲۰۰۷). در ایران نیز اکوتیپ‌های مختلفی از گیاه به ویژه در نواحی ساحلی، حاشیه مانداب‌های شور و آبراه‌های منتهی به دریا در مناطقی مانند دریاچه ارومیه، قم، باتلاق گاوخونی، سواحل خلیج فارس تا دریای عمان، خراسان جنوبی، آذربایجان شرقی، خوزستان و بخشی از گرگان رشد می‌کنند (خوش خلق‌سیما و همکاران، ۱۳۹۹ و رنجبر و همکاران، ۱۳۹۶).

گیاه سالیکورنیا به دلیل تحمل بالای آن به دامنه وسیعی از آب با کیفیت‌های مختلف تا آب دریا، اهمیت اقتصادی بالایی به ویژه در سیستم‌های کشت تلفیقی در شرایط شور دارد (رنجبر و همکاران، ۱۳۹۶). از مهمترین موارد مصرف گیاه می‌توان به مصرف تازه‌خوری آن به صورت سبزی و یا به صورت کنسرو و انواع ترش‌جات در برخی کشورهای اروپایی و استفاده از علوفه آن در تولید دام اشاره نمود (بارریرا و همکاران، ۲۰۱۷؛ عبدال، ۲۰۰۹؛ گلن و همکاران، ۱۹۹۸). علاوه بر این، سالیکورنیا به عنوان یک گیاه دانه روغنی، پتانسیل تولید دو تن دانه با میزان روغن ۲۸ درصد را دارد. روغن سالیکورنیا خوراکی و از نظر ترکیبات اسیدهای چرب تقریباً همانند گلرنگ می‌باشد. همچنین میزان اسیدهای چرب غیر اشباع آن در مقایسه با سویا قابل توجه می‌باشد. کنجاله دانه تا ۴۳ درصد پروتئین دارد که می‌تواند در تغذیه دام مورد استفاده قرار گیرد (گلن و همکاران، ۱۹۹۸؛ گلن و همکاران، ۱۹۹۱).

بررسی منابع نشان می‌دهد که میزان بیوماس تولیدی گیاه معمولاً بسته به نوع گونه، میزان شوری آب،

تاریخ کاشت و حتی بافت و ساختمان خاک بین ۱۰ تا ۲۵ تن ماده خشک در هکتار متفاوت می‌باشد (رنجبر و پیراسته انوشه، ۱۳۹۹؛ عبدال، ۲۰۰۹؛ بینس و همکاران، ۲۰۰۵ و گلن و همکاران، ۱۹۹۱). میزان چربی خام و فیبر قابل هضم در شونده خشی در علوفه آن به ترتیب ۱/۸۷ و ۲۲/۵ درصد (بارریرا و همکاران، ۲۰۱۷) و میزان پروتئین خام شاخساره گیاه از ۵/۲ درصد در گونه *Salicornia ramosissima* (بارریرا و همکاران، ۲۰۱۷) تا ۱۰/۲ درصد در گونه *S. bigelovii* Torr (دiaz و همکاران، ۲۰۱۳) و حتی ۲۲/۱ درصد در گونه *S. herbacea* (ای سایدی و همکاران، ۲۰۱۳) متفاوت می‌باشد. لازم به ذکر است میزان پروتئین خام علوفه خشک یونجه بین ۱۳/۵ تا ۲۵/۶ درصد، ذرت سیلو شده نه درصد (آقازیرتی فراهانی و همکاران، ۱۳۹۲؛ بینگسون و لارسون، ۱۹۸۴) و کاه گندم بین ۲/۴ تا ۵/۹ درصد (اریکسون، ۱۹۸۱) می‌باشد.

این گیاه با توجه به ماهیت شورزیست بودن اجباری آن، معمولاً درصد قابل توجهی از عناصر مختلف شامل سدیم، کلر، منیزیم، پتاسیم و کلسیم با هدف تنظیم اسمزی و تحمل شرایط شور در شاخساره خود ذخیره می‌نماید (رنجبر و پیراسته انوشه، ۱۳۹۸؛ بارریرا و همکاران، ۲۰۱۷ و گلن و همکاران، ۱۹۹۸) اگرچه وجود این عناصر می‌تواند در افزایش کیفیت علوفه نقش داشته باشد، ولی تجمع بیش از حد آن، می‌تواند باعث افزایش میزان خاکستر گیاه گردد (رنجبر و دهقانی، ۱۳۹۷). ویژگی که می‌تواند استفاده از علوفه سالیکورنیا را به عنوان جیره کامل گیاه با محدودیت همراه نماید. در حالی که در شرایط غیر شور میزان خاکستر گراس‌ها و لگوم‌ها کمتر از ۱۰٪ ماده خشک است (SCA, 2007)، میزان خاکستر شاخساره گونه‌های مختلف سالیکورنیا از ۸ تا ۵۶ درصد تحت شرایط آبیاری با آب شور تا آب دریا متفاوت می‌باشد (دائود و همکاران، ۲۰۰۱). این محدودیت باعث شده است که تنها به میزان ۲۵-۳۰ درصد استفاده از علوفه این گیاه در جیره دام پیشنهاد گردد (عبدال، ۲۰۰۹).

با توجه به اینکه بسته به نوع گونه و میزان شوری آب آبیاری، عملکرد گیاه (براون و همکاران، ۲۰۱۴؛ بینس و همکاران، ۲۰۰۵) و میزان خاکستر بافت (لوپز و همکاران، ۲۰۱۷) می‌تواند متفاوت باشد، هدف از این مطالعه ارزیابی میزان بیوماس تولیدی و خاکستر شاخساره گونه و اکوتیپ‌های بومی سالیکورنیا با استفاده از دو منبع آب دریا و آب شور زیرزمینی بود.

مواد و روش‌ها

این پژوهش به منظور ارزیابی تاثیر شوری آب آبیاری بر بیوماس (شامل وزن تر و خشک)، ارتفاع گیاه و میزان خاکستر شاخساره گونه و اکوتیپ‌های مختلف سالیکورنیا تحت آبیاری با آب دریا و آب شور زیرزمینی آزمایشی به مورد اجراء قرار گرفت. این تحقیق در سال ۹۹-۱۳۹۸ همزمان در دو شرایط ایستگاه تحقیقات شوری مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان

بوشهر در ساحل بندر دلووار واقع در استان بوشهر و ایستگاه تحقیقات شوری صدوق واقع در استان یزد انجام شد. در استان بوشهر از آب خلیج فارس با شوری ۶۰ دسی‌زیمنس بر متر و در استان یزد از آب شور ایستگاه با شوری ۲۰ دسی‌زیمنس بر متر استفاده شد. مشخصات اقلیمی در منطقه مطالعاتی در استان بوشهر شامل اقلیم خشک و گرم، با متوسط بارش سالانه ۲۱۷ میلیمتر، متوسط دمای سالانه ۲۴ درجه سانتی‌گراد و متوسط سالیانه رطوبت نسبی در حدود ۷۱ درصد و در منطقه مطالعاتی در استان یزد گرم و خشک و بیابانی، با متوسط دمای سالانه ۱۹ درجه سانتی‌گراد، متوسط بارش سالانه ۷۷ میلی‌متر و متوسط سالانه رطوبت نسبی در حدود ۳۰ درصد می‌باشد. در جدول ۱ برخی ویژگی‌های شیمیایی آب آبیاری مورد استفاده آورده شده است. آزمایش در هر دو مکان در خاکی با بافت سیلتی لوم با ویژگی‌های شیمیایی ارائه شده در جدول ۲ انجام شد.

جدول ۱- برخی ویژگی‌های شیمیایی آب خلیج فارس در ساحل شهر دلووار و آب شور زیرزمینی در استان یزد

منبع آب	EC (dSm ⁻¹)	pH	HCO ₃ ⁻	CL ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	SAR
خلیج فارس	۶۰/۲	۸/۲	۱/۸	۶۱۷/۵	۲۴/۴	۱۲۷/۲	۵۲۶/۳	۶۰/۵
آب شور زیرزمینی	۲۰/۰	۷/۴	۳/۶	۱۸۰/۱	۱۷/۰	۳۸/۸	۱۵۰/۴۷	۲۸/۵

جدول ۲- نتایج شیمیایی خاک مزرعه در ایستگاه تحقیقات شوری در استان بوشهر و استان یزد قبل از کاشت در عمق ۰-۳۰ سانتی‌متر خاک

مکان	شوری (dS/m)	pH	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	SAR
بوشهر	۳۴/۰۰	۷/۳۵	۲۵۷/۸۴	۴۱/۰۸	۹۲/۸۱	۳۱۹/۱۸	۱/۶	۷۰/۹۶	۳۱/۵۱
یزد	۱۴/۱۷	۷/۹۵	۹۸/۴	۱۹/۹۶	۲۵/۲۵	۱۰۵/۸۸	۲/۷۷	۳۴/۹۶	۲۰/۷

عملیات تهیه زمین در هر دو مکان شامل شخم با گاوآهن برگرداندار، دیسک و لولر بود. سپس مزرعه دوباره دیسک زده شد و با دستگاه فاروئر جوی و پشته‌هایی با فاصله ۴۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر ایجاد گردید. گونه‌های سالیکورنیا مورد مطالعه شامل گونه خارجی بیگلوی (*Salicornia bigelovii*)، اکوتیپ بوشهر (*S. sinus persica*) از جنوب و اکوتیپ‌های مرکزی از مناطق فلات مرکزی، اکوتیپ گرگان از شمال و اکوتیپ ارومیه از

شمال‌غرب کشور (هر سه مربوط به گونه داخلی *S. persica*) بود. البته لازم به ذکر است در استان یزد اکوتیپ ارومیه کشت نگردید. قالب طرح مورد استفاده در هر دو مکان بلوک‌های کامل تصادفی و با سه تکرار بود. کاشت با توجه به اقلیم هر منطقه، در استان بوشهر در تاریخ ۱۳ دی و در استان یزد در تاریخ ۱۵ اسفند ۱۳۹۸ و بر اساس ۲۰ کیلوگرم بذر در هکتار انجام شد. کاشت به صورت دستی و در کف فاروهای ایجاد شده انجام شد. مساحت

مد نظر قرار گرفت. محتوای رطوبت بافت (TWC) نیز بر مبنای وزن تر و وزن خشک نمونه‌ها با استفاده از رابطه ۱ بدست آمد:

$$TWC = \frac{FW - DW}{FW} \times 100 \quad (1)$$

برای اندازه‌گیری محتوای خاکستر شاخساره، وزن مشخصی از نمونه‌های خشک شده هر گونه و اکوتیپ را در بوتله چینی قرار داده و به مدت ۸ ساعت در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد کوره الکتریکی قرار داده شد (آ.او.آ.سی، ۱۹۹۰). وزن خاکستر باقی‌مانده در هر بوتله چینی به عنوان درصد خاکستر در نظر گرفته شد.

همچنین با توجه به طولانی بودن طول دوره رشد اکوتیپ بوشهر در مقایسه با سایر گونه و اکوتیپ‌ها و به منظور مطالعه دقیق‌تر میزان تجمع ماده تر و خشک و تغییرات خاکستر شاخساره، در استان بوشهر علاوه بر زمان‌های ۱۱۶، ۱۵۶ و ۲۱۹ روز پس از کاشت، یک مرحله نمونه دیگر در زمان ۲۶۲ روز پس از کاشت نمونه گیاه تهیه شد. به منظور اطلاع از تغییرات شوری خاک در طول فصل رشد نیز در پنج مرحله نمونه خاک در عمق ۰-۳۰ سانتی‌متری تهیه شد. داده‌های جمع‌آوری شده با استفاده از نرم‌افزار SAS برای هر شرایط (کیفیت آب آبیاری) به صورت مجزا تجزیه و مقایسات میانگین با استفاده از آزمون دانکن و در سطح ۵٪ انجام شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که بین گونه و اکوتیپ‌های مورد بررسی از نظر میزان وزن تر و خشک علوفه در هر دو شرایط اختلاف معنی‌دار وجود داشت (جدول ۳). در استان بوشهر بیشترین میزان وزن تر و خشک علوفه مربوط به اکوتیپ‌های بوشهر و کمترین آن مربوط به اکوتیپ‌های گرگان و ارومیه بود (جدول ۴). البته بین میزان وزن تر و خشک این دو اکوتیپ با گونه بیگلویی تفاوت معنی‌دار وجود نداشت. در استان یزد بیشترین وزن تر مربوط به اکوتیپ‌های بوشهر و مرکزی و کمترین آن مربوط به گونه بیگلویی بود. بین وزن خشک علوفه اکوتیپ‌های

اختصاص داده شده برای هر واحد آزمایشی ۸۰ متر مربع (۲۰×۴ متر) بود. در استان بوشهر، آبیاری گیاه پس از کاشت و در طول فصل رشد با آب دریا و در استان یزد با آب شور چاه انجام شد. اکوتیپ بوشهر و اکوتیپ مرکزی پنج روز پس از کاشت سبز شدند. این میزان برای گونه بیگلویی و اکوتیپ‌های گرگان و ارومیه در حدود هشت روز پس از کاشت بود.

نظر به اینکه گیاه سالیکورنیا در صورت آبیاری با آب دریا، بین ۱/۵ تا ۲/۵ برابر تبخیر تشک به آب نیاز دارد و میزان تبخیر و تعرق آن در آزمایشات لایسیمتری بین چهار تا شش برابر تبخیر صورت گرفته از خاک لخت عنوان شده است (گراتان و همکاران، ۲۰۰۸)، به منظور ممانعت از ایجاد تنش خشکی در مزرعه، آبیاری مزرعه در هر دو شرایط با توجه به ارزیابی‌های موجود در در مورد گیاه در کشور (رحیمیان و همکاران، ۱۳۹۷)، در زمستان هر هفته یک بار و در طول بهار و تابستان دو نوبت در هفته انجام شد. در طول فصل رشد کود اوره در سه نوبت و هر نوبت به میزان ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار به صورت سرک و قبل از آبیاری برای هر دو مزرعه مصرف گردید.

به منظور بررسی روند تجمع ماده تر گونه و اکوتیپ‌های مختلف در طول فصل رشد، در استان بوشهر و در زمان‌های ۱۱۶، ۱۵۶، ۲۱۹ و ۲۶۲ روز پس از کاشت، نمونه گیاه تهیه گردید. لازم به ذکر است در شرایط استان بوشهر حدود هفت ماه پس از کاشت برخلاف اکوتیپ بوشهر، گونه بیگلویی و اکوتیپ‌های گرگان و مرکزی در مرحله رشد زایشی قرار داشتند. به همین خاطر هم در استان بوشهر و هم در استان یزد، ۲۱۹ روز پس از کاشت با رعایت حاشیه مساحت دو متر مربع در هر تکرار از گونه و اکوتیپ‌های مختلف سالیکورنیا برداشت گردید و پس از اندازه‌گیری ارتفاع بوته، توزین و به عنوان وزن تر (FW) علوفه در نظر گرفته شد. با توجه به محتوای آب بالای بافت، نمونه‌ها تا ۹۶ ساعت در آن با دمای ۷۰ درجه سلسیوس قرار داده شد و پس از اطمینان از ثبات وزن خشک، توزین و به عنوان وزن ماده خشک (DW) علوفه

بوشهر، مرکزی و گرگان در استان یزد تفاوت معنی‌دار وجود نداشت، ضمن اینکه میزان وزن خشک علوفه این سه اکوتیپ به میزان معنی‌داری بیشتر از گونه بیگلوی بود (جدول ۴). بطورکلی در حدود ۲۲۰ روز پس از کاشت، میزان علوفه تر تولیدی اکوتیپ بوشهر در استان بوشهر در حدود ۹۳۳۳ گرم در متر مربع بود که به میزان ۳۳، ۶۴، ۸۲ و ۷۹ درصد بیشتر از اکوتیپ مرکزی، گونه بیگلوی،

اکوتیپ گرگان و اکوتیپ ارومیه بود (جدول ۴). این میزان‌ها در مورد علوفه خشک به ترتیب ۲۰، ۶۳، ۷۵ و ۷۷ درصد بود. در استان یزد نیز میزان علوفه تر تولیدی اکوتیپ بوشهر به میزان ۱۱، ۴۴ و ۵۶ درصد بیشتر از اکوتیپ مرکزی، اکوتیپ گرگان و گونه بیگلوی بود. این میزان‌ها در مورد علوفه خشک به ترتیب ۷، ۳۳ و ۵۶ درصد بود (جدول ۴).

جدول ۳- میانگین مربعات علوفه تر، علوفه خشک، محتوی رطوبت بافت، ارتفاع بوته و خاکستر گانه و اکوتیپ‌های مختلف سالیکورنیا تحت شرایط آبیاری با آب دریا و آب شور

منابع تغییر	درجه آزادی	وزن تر علوفه	وزن خشک علوفه	محتوی رطوبت بافت	ارتفاع بوته	خاکستر
استان بوشهر						
بلوک	۲	۳۶۰۵۱۶۶/۷۰ ^{NS}	۶۵۶۴۵/۷۲ ^{NS}	۳۹/۹۰ ^{NS}	۱۲/۴۵ ^{NS}	۱۴/۸۷ ^{NS}
گونه/اکوتیپ	۴	۳۱۳۸۰۴۱۶/۶۵ ^{**}	۱۲۲۳۵۷۷/۷۸ ^{**}	۳۴/۴۹ ^{NS}	۶۰/۵۴ ^{**}	۱۵۲/۲۲ ^{**}
خطا	۸	۲۵۰۳۹۱۶/۷۰	۶۲۳۶۶/۱۱	۲۲/۹۸	۷/۰۶	۵/۶۰
استان یزد						
بلوک	۲	۵۸۲۹۴۲۳۳/۳۰ ^{NS}	۹۳۰۵۴/۹۷ ^{NS}	۶۹/۴۳ ^{NS}	۴/۶۶ ^{NS}	۷/۲۵ ^{NS}
گونه/اکوتیپ	۳	۱۱۱۴۱۵۱۵۵/۶۰ [*]	۲۰۰۷۰۸۷/۶۱ [*]	۲/۸۴ ^{NS}	۳۴۶/۸۱ ^{**}	۱۸/۴۰ ^{NS}
خطا	۶	۲۱۱۴۸۹۸۸/۹۰	۲۴۳۹۵۱/۴۹	۱۲/۸۴	۱۸/۰۸	۴/۳۴

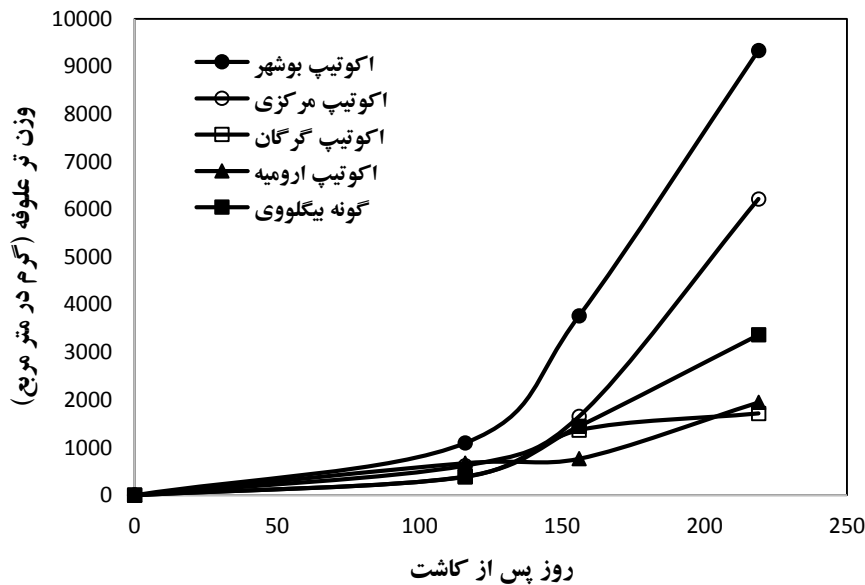
* و ** به ترتیب معنی‌دار در سطح ۵٪ و ۱٪ احتمال آماری، NS معنی‌دار نیست

جدول ۴- مقایسه میزان علوفه تر، علوفه خشک، ارتفاع بوته و خاکستر گانه و اکوتیپ‌های مختلف سالیکورنیا تحت شرایط آبیاری با آب دریا و آب شور

گونه/اکوتیپ	وزن تر علوفه (گرم در متر مربع)	وزن خشک علوفه (گرم در متر مربع)	ارتفاع بوته (سانتی‌متر)	خاکستر (%)
استان بوشهر				
اکوتیپ بوشهر	۹۳۳۳/۰۰a [†]	۱۸۲۹/۲۰a	۳۵/۵۴a	۵۹/۷۷a
اکوتیپ مرکزی	۶۲۱۷/۰۰b	۱۴۶۴/۱۸a	۲۹/۳۳b	۵۸/۷۵a
اکوتیپ گرگان	۱۷۱۷/۰۰c	۴۶۰/۲۱b	۲۳/۰۱c	۵۱/۹۹b
اکوتیپ ارومیه	۱۹۵۰/۰۰c	۴۲۲/۳۰b	۲۹/۹۶b	۵۶/۳۸ab
گونه بیگلوی	۳۳۶۷/۰۰bc	۶۷۱/۳۰b	۲۷/۹۴bc	۴۲/۲۷c
استان یزد				
اکوتیپ بوشهر	۲۲۹۴۰/۰۰a	۳۵۲۷/۹۰a	۷۸/۶۷a	۵۰/۹۴a
اکوتیپ مرکزی	۲۰۴۰۷/۰۰ab	۳۲۶۶/۵۰ab	۷۶/۸۳a	۴۷/۸۱ab
اکوتیپ گرگان	۱۲۹۴۷/۰۰bc	۲۳۶۱/۹۰bc	۷۸/۳۳a	۴۷/۵۰ab
گونه بیگلوی	۱۰۰۱۳/۰۰c	۱۷۵۶/۸۰c	۵۶/۵۰b	۴۴/۹۰b

[†] در هر مکان میانگین‌هایی که در هر ستون حداقل در یک حرف مشترک هستند، اختلاف معنی‌دار باه ندارند (دانکن، ۵٪)

روند تجمع وزن تر علوفه در طول فصل رشد نیز نشان داد که گونه و اکوتیپ‌های مختلف سالیکورنیا در ابتدای فصل رشد و تا حدود سه ماه پس از کاشت از رشد کندی برخوردار بودند و پس از آن رشد به میزان قابل‌توجهی افزایش یافت (شکل ۱). بطورکلی در تمام زمان‌های نمونه‌برداری میزان وزن تر علوفه اکوتیپ بوشهر بیشتری بود.



شکل ۱- روند تجمع ماده تر در گونه و اکوتیپ‌های مختلف سالیکورنیا تحت شرایط آبیاری با آب دریا

آنچه مسلم است با اینکه تنوع قابل توجهی بین گونه و اکوتیپ‌های مختلف سالیکورنیا از نظر میزان بیوماس تولیدی گزارش شده است (آرائوس و همکاران، ۲۰۲۱ و ریاحی سمانی و همکاران، ۲۰۱۸)، ولی میزان عملکرد به شدت تحت تاثیر میزان شوری آب آبیاری است. نتایج یک آزمایش بلند مدت در مکزیک نشان داد که تحت شرایط استفاده از آب دریا با غلظت ۳۸۰۰۰-۴۲۰۰۰ میلی گرم در لیتر، گیاه قادر است بین ۱۳۹۰ تا ۲۴۶۰ گرم در متر مربع بیوماس خشک تولید نماید (گلن و همکاران، ۱۹۹۱). عبدال (۲۰۰۹) در یک مطالعه بر روی سالیکورنیا در کویت نشان داده شد که این گیاه در شرایط استفاده از آب شور چاه با غلظت ۳۴۰۰۰-۳۶۰۰۰ میلی گرم در لیتر، می‌تواند عملکرد ماده خشکی در حدود ۲۷ تن در هکتار تولید نماید. در مطالعه مشابهی در عربستان تحت شرایط آبیاری با آب خلیج فارس، براون و همکاران (۲۰۱۴) متوسط بیوماس تولیدی این گیاه را ۱۰ تن ماده خشک در هکتار گزارش نمودند. پتال و همکاران (۲۰۱۷) نیز گزارش کردند که گونه *S. brachiata* تحت شرایط آبیاری با آب دریای مکران (بحرالعرب) قادر به تولید ۵۸۵ تا ۷۰۸ گرم در متر مربع بیوماس خشک می‌باشد.

در مطالعه‌ای زیرای و همکاران (۲۰۱۰) نیز مشخص شد که میزان بیوماس تولیدی سالیکورنیا زمانی که با آب دریا با غلظت ۳۵ ppt آبیاری می‌گردد در مقایسه با آب با غلظت نمک کلرید سدیم ۱۰ ppt به میزان ۴۰ درصد کاهش می‌یابد. در ترکیه نیز عملکرد علوفه تر و خشک سالیکورنیا (*S. europaea*) در شرایط شوری آب ۴۲ دسی زیمنس بر متر به ترتیب برابر با ۱۳ و ۵ تن در هکتار گزارش شده است. این در حالی است که این میزان‌ها تحت شرایط آبیاری با آب شور ۷۰ دسی زیمنس بر متر به ترتیب به میزان شش و سه تن در هکتار کاهش می‌یابد (یوسیل و همکاران، ۲۰۱۷). در ایرلند نیز عملکرد سالیکورنیا (*S. europaea*) در تیمارهای $\frac{1}{3}$ و $\frac{2}{3}$ آب دریا حدود ۱۸۰ گرم و در تیمار آب دریا حدود ۶۰ گرم وزن خشک در گیاه گزارش شد (Gunning, 2016).

اگرچه نتایج این مطالعه نشان داد که در شرایط استان یزد، همه گونه و اکوتیپ‌های مورد بررسی با توجه به کیفیت آب از پتانسیل تولید بالاتری نسبت به شرایط استان بوشهر برخوردار بودند، اما با توجه به مصرف بیش از ۲۸۰۰۰ متر مکعبی آب مورد نیاز سالیکورنیا در هکتار (رحیمیان و همکاران، ۱۳۹۷)، کاشت این گونه در مناطق

مرکزی کشور به دلیل کمبود منابع آب و همچنین مسائل زیست محیطی توصیه نمی گردد.

هیچ گونه اختلاف معنی داری بین گونه و اکوتیپ های مختلف در هر دو شرایط از نظر محتوی آب بافت وجود نداشت (جدول ۳). محتوی آب بافت در استان بوشهر در دامنه ای از ۷۲ درصد در اکوتیپ گرگان تا ۸۰ درصد در مورد اکوتیپ بیگلویی قرار داشت. در استان یزد دامنه تغییرات محتوی آب بافت گونه و اکوتیپ ها کمتر و از حدود ۷۲ درصد در گونه بیگلویی تا ۸۴ درصد در اکوتیپ بوشهر متفاوت بود.

در هر دو شرایط مورد مطالعه، اختلاف معنی داری بین ارتفاع گونه و اکوتیپ های سالیکورنیا مشاهده شد (جدول ۳). در استان بوشهر بیشترین ارتفاع گیاه مربوط به اکوتیپ بوشهر بود که به میزان معنی داری بیشتر از سایر گونه و اکوتیپ ها بود (جدول ۴). بطور کلی ارتفاع گیاه در استان بوشهر و تحت شرایط آبیاری با آب دریا بین ۲۳/۰۰ سانتی متر برای اکوتیپ گرگان تا ۳۵/۵۴ سانتی متر برای اکوتیپ بوشهر متفاوت بود. این در حالی بود که در استان یزد ارتفاع اکوتیپ اخیر به طور متوسط ۷۸/۶۷ سانتی متر بدست آمد (جدول ۴). کمترین میزان ارتفاع در استان یزد نیز مربوط به گونه بیگلویی و به میزان ۵۶/۵۰ سانتی متر بود که در مقایسه با سه اکوتیپ دیگر اختلاف آن معنی دار بود (دانکن، ۵٪).

گازا تورس و همکاران (۲۰۲۰) در یک مطالعه در ساحل خلیج کالیفرنیا در نزدیک شهر لاپاز مکزیک در مرکز تحقیقات بیولوژی شمال غرب مکزیک با مقایسه سالیکورنیا آبیاری شده با آب خروجی استخرهای پرورش آبزیان با شوری ۳۷/۶ پی پی تی در مقایسه با رویشگاه های مانداب محل رشد سالیکورنیا ارتفاع گیاه را به ترتیب در حدود ۳۰ و ۲۰/۷ سانتی متر گزارش نمود. در یک آزمایش مزرعه ای با گونه *S. brachiata* Roxb. تحت آبیاری با آب دریای مکران (بحرالعرب)، پتال و همکاران (۲۰۱۷) ارتفاع این گونه را در حدود ۳۰ سانتی متر گزارش کردند. معمولا در شرایط نیمه حاره ای که معمولا بیشترین میزان

رشد برای سالیکورنیا گزارش شده است، ارتفاع این گیاه می تواند تا بیش از ۵۰ سانتی متر برسد (زیرای و همکاران، ۲۰۱۰؛ گلن و همکاران، ۱۹۹۱)، به نحوی که در ارزیابی ژرم پلاس های سالیکورنیا در آزمایش جردات و شهید (۲۰۱۲) که اکثرا اکوتیپ های مختلف جمع آوری شده از مناطق مختلف بودند ارتفاع گیاه بین ۳۸/۵ تا ۷۵/۴ سانتی متر گزارش شده است.

در حالی که بین گونه و اکوتیپ های مختلف سالیکورنیا در استان بوشهر از نظر میزان خاکستر شاخساره تفاوت معنی دار وجود داشت، این اختلاف در استان یزد معنی دار نبود (جدول ۳). با این حال هم در استان بوشهر و هم در استان یزد، بیشترین میزان خاکستر مربوط به اکوتیپ های بوشهر و مرکزی و کمترین آن مربوط به گونه بیگلویی بود (جدول ۴). درصد روند تجمع خاکستر در اکوتیپ بوشهر نیز نشان داد که با افزایش فصل رشد، میزان خاکستر شاخساره روند افزایشی و از یک معادله خطی تبعیت می کند (شکل ۴). نتایج مطالعات مختلف نشان می دهد که علاوه بر اینکه درصد بالایی از وزن ماده خشک سالیکورنیا از خاکستر تشکیل شده است، تنوع قابل توجهی نیز از این منظر بین گونه های مختلف وجود دارد. در آزمایش انجام شده توسط دائود و همکاران (۲۰۰۱) میزان خاکستر شاخساره از ۸ تا ۵۶ درصد بسته به نوع گونه تحت شرایط آبیاری با آب دریا متفاوت بود. گراتان و همکاران (۲۰۰۸) میزان خاکستر زیست توده گونه *S. bigelovii* آبیاری شده با کیفیت های مختلف آب بین ۳۷ تا ۴۵ درصد گزارش کردند. در تحقیق دیگری رنجبر و دهقانی (۱۳۹۷) گزارش کردند که تحت شرایط آبیاری با آب دریا (خلیج فارس)، میزان خاکستر گونه های *S. bigelovii* و *S. sinu persics* به ترتیب در حدود ۴۵/۰ و ۴۹/۶ درصد بود. میزان خاکستر گونه *S. europaea* آبیاری شده با آب دریا نیز ۴۱/۳ درصد گزارش شده است (اولری و همکاران، ۱۹۸۵). در آزمایش آکین شاینا و همکاران (۲۰۱۴) بر روی هفت گونه شورزیست، بیشترین میزان خاکستر بافت به میزان ۴۹٪ مربوط به گونه *Salicornia europaea* بود.

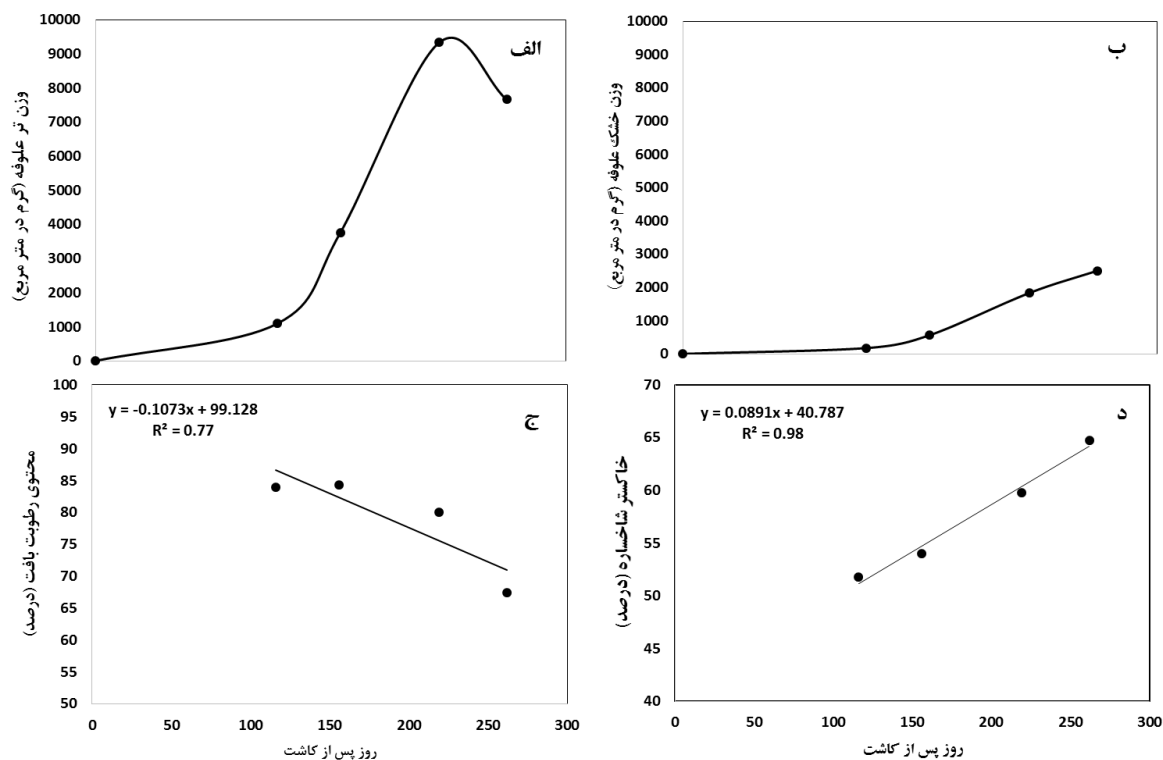
خاکستر اصطلاحی است که برای توصیف اجزای بافتی که هنگام قرار گرفتن در معرض دمای بالا سوخته نشده است، استفاده می‌شود و باقی‌مانده بیوماس خشک از میزان خاکستر همان مواد آلی می‌باشد (فاجینری و فایت، ۱۹۸۳). آنچه مسلم است علت بالا بودن میزان خاکستر در گیاهان شورزیست، سازوکار تحمل به شوری در آنها با تجمع مقادیر بالایی از یون‌های مختلف به ویژه در مورد سالیکورنیا تجمع یون‌های Na^+ و Cl^- در بافت گیاه با هدف تنظیم اسمزی برای تحمل و بقا در شرایط بسیار شور می‌باشد (گراتان و همکاران، ۲۰۰۸).

از طرف دیگر محتوای خاکستر ویژگی مهمی برای بررسی قابلیت کاربرد یک گیاه به عنوان علوفه است. اگرچه در شرایط غیرشور که بخش عمده‌ای خاکستر مربوط به مواد معدنی است، خاکستر بالا می‌تواند معادل کیفیت بهتر علوفه شود، اما در شرایط شور و گیاهان شورزی این موضوع می‌تواند در مورد مصرف علوفه این گیاهان محدودیت ایجاد نماید. معمولاً غلظت‌های بالای خاکستر ارزش غذایی شورزیست‌ها را به عنوان علوفه بنابه دلایلی مانند این واقعیت که انرژی مورد نیاز دام صرفاً از هضم مواد آلی علوفه تامین می‌گردد و خاکستر هیچ‌گونه انرژی ندارد و اینکه دام ممکن است نیاز به صرف انرژی بیشتر در دفع اجزای محلول خاکستر مانند $NaCl$ و KCl داشته باشد (آریلی و همکاران، ۱۹۸۹) کاهش می‌دهد. علاوه بر این، غلظت مواد معدنی جداگانه در خاکستر ممکن است برای نیازهای حیوانات کم و یا زیاد و در نتیجه ایجاد سمیت کند (نورمن و همکاران، ۲۰۰۸ و ۲۰۰۴؛ ماسترس و همکاران، ۲۰۰۷).

همانطور که قبلاً نیز گفته شد اگرچه در مورد گونه بیگلووی و اکوتیپ‌های گرگان و مرکزی روند تجمع ماده تر علوفه در حدود ۲۲۰ روز پس از کاشت با رسیدن گیاه به انتهای رشد متوقف گردید ولی اکوتیپ بوشهر با

توجه به دیررس بودن، رشد آن همچنان ادامه داشت (شکل ۲-الف). اگرچه در حدود ۲۶۰ روز پس از کاشت در این اکوتیپ میزان تجمع ماده تر علوفه روند کاهشی نشان داد (شکل ۲-الف)، ولی میزان تجمع وزن خشک علوفه روند صعودی داشت (شکل ۲-ب). دلیل اصلی این امر کاهش محتوی رطوبت بافت با افزایش سن گیاه و افزایش درصد ماده خشک بوته در طول فصل رشد بود (شکل ۲-ج). مشاهدات مزرعه‌ای نیز نشان داد که با افزایش سن گیاه درصد بافت‌های خشبی به ویژه در قسمت‌های پایین سایه‌اندازه گیاه افزایش یافت. درحالی‌که محتوی رطوبت بافت گیاه تا ۱۵۶ روز پس از کاشت در حدود ۸۴ درصد بود، این میزان در ۲۲۰ روز پس از کاشت به ۸۰ درصد و در ۲۶۲ روز پس از کاشت در حدود ۶۷ درصد کاهش یافت.

میزان همبستگی بین ویژگی‌های اندازه گیری شده در گونه و اکوتیپ‌های مختلف سالیکورنیا در دو استان بوشهر و یزد در جدول ۵ و ۶ آورده شده است. آنچه در این جداول بیشتر اهمیت دارد همبستگی مثبت بین وزن خشک علوفه با میزان خاکستر در هر دو شرایط بود؛ به عبارت دیگر با افزایش میزان ماده خشک گیاه، میزان خاکستر شاخساره گیاه نیز افزایش می‌یابد. همانطور که در شکل ۲-د نیز نشان داده شده است میزان خاکستر شاخساره اکوتیپ بوشهر با افزایش سن گیاه به صورت خطی افزایش یافت. در حالی‌که میزان خاکستر شاخساره در این اکوتیپ و در حدود ۱۱۶ روز پس از کاشت در حدود ۵۱/۸ درصد بود، میزان این شاخص در ۲۱۹، ۱۵۶ و ۲۶۰ روز پس از کاشت به ترتیب به میزان ۵۳/۹، ۵۹/۷ و ۶۴/۷ درصد افزایش یافت. افزایش میزان خاکستر بافت با افزایش سن گیاه توسط دیگران نیز گزارش شده است (ناصری بازاری و همکاران، ۱۳۹۷؛ تورکوئس و همکاران، ۲۰۲۱ و آکین‌شاینا و همکاران، ۲۰۱۶).



شکل ۲- روند تجمع وزن تر و خشک علوفه، درصد ماده خشک و میزان خاکستر شاخساره اکوتیپ بوشهر سالیکورنیا تحت شرایط آبیاری با آب دریا

جدول ۵- همبستگی بین ویژگی‌های اندازه گیری شده در گونه و اکوتیپ‌های مختلف سالیکورنیا در استان بوشهر

	وزن تر علوفه	وزن خشک علوفه	محتوی رطوبت بافت	ارتفاع بوته	درصد خاکستر شاخساره
وزن تر علوفه	۱				
وزن خشک علوفه	۰/۹۷۰**	۱			
محتوی رطوبت بافت	۰/۳۵۸ ^{ns}	۰/۱۹۱ ^{ns}	۱		
ارتفاع بوته	۰/۵۴۴*	۰/۵۳۹*	۰/۴۳۰ ^{ns}	۱	
درصد خاکستر شاخساره	۰/۴۰۹ ^{ns}	۰/۴۹۳*	-۰/۱۸۸ ^{ns}	۰/۴۵۵ ^{ns}	۱

جدول ۶- همبستگی بین ویژگی‌های اندازه گیری شده در گونه و اکوتیپ‌های مختلف سالیکورنیا در استان یزد

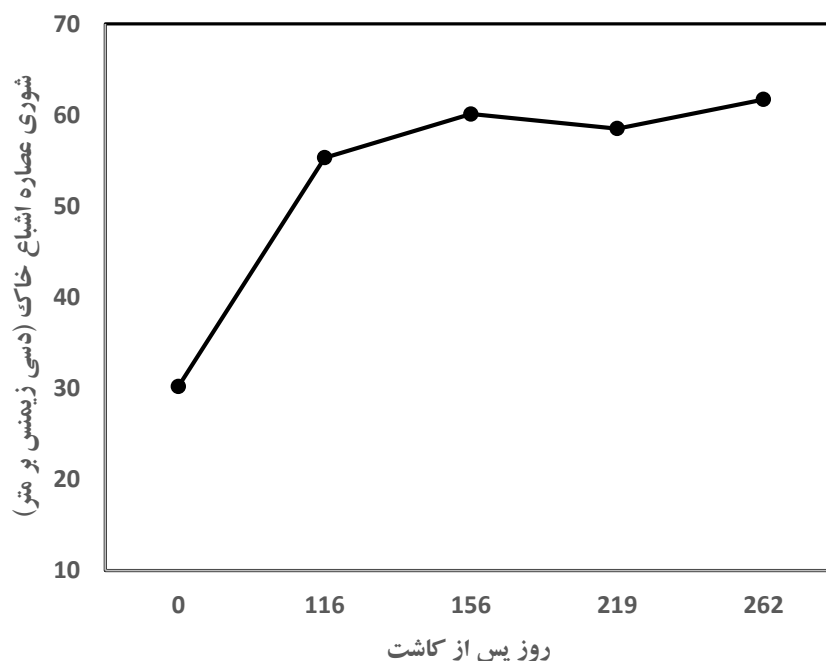
	وزن تر علوفه	وزن خشک علوفه	محتوی رطوبت بافت	ارتفاع بوته	درصد خاکستر شاخساره
وزن تر علوفه	۱				
وزن خشک علوفه	۰/۶۷۵*	۱			
محتوی رطوبت بافت	۰/۶۶۲*	-۰/۰۶۶ ^{ns}	۱		
ارتفاع بوته	۰/۵۴۸ ^{ns}	۰/۶۳۳*	۰/۱۹۴ ^{ns}	۱	
درصد خاکستر شاخساره	۰/۶۰۶*	۰/۶۲۱*	۰/۱۲۵ ^{ns}	۰/۵۰۳ ^{ns}	۱

شوری ۶۰ دسی‌زیمنس بر متر، میزان شوری خاک روند افزایشی داشته است. با اینحال در انتهای فصل رشد میزان شوری خاک تقریباً ثابت (بین ۶۰/۱ تا ۶۱/۷ دسی‌زیمنس بر متر) و در محدوده شوری آب آبیاری باقی مانده است. این نشان می‌دهد که در صورت آبیاری منظم مزرعه بر

روند تغییرات شوری خاک (عصاره اشباع) در عمق ۰-۳۰ سانتی‌متری در شکل ۳ نشان داده شده است. با توجه به این شکل، اگرچه میزان شوری خاک در زمان کاشت در حدود ۳۰ دسی‌زیمنس بر متر بوده است، ولی در طول فصل رشد و با آبیاری مرتب مزرعه با آب دریا با

اساس نیاز آبی گیاه، میزان شوری خاک در انتهای فصل رشد، الزاماً بیشتر از شوری آب آبیاری نخواهد شد. از طرف دیگر به نظر می‌رسد با توجه به شیب طبیعی اراضی ساحلی به سمت دریا، وقوع بارندگی‌های قابل توجه در زمستان باعث می‌شود که بخشی از شوری تجمع یافته در لایه‌های

بالایی خاک آبشویی گردد. این فرآیند ضمن ممانعت از تجمع مضاعف شوری در طول سال‌های مختلف، باعث می‌شود شوری لایه سطحی خاک بسته به میزان بارندگی تا حد قابل توجهی کاهش یافته و شرایط برای کاشت گیاه در فصل بعد مناسب‌تر گردد.



شکل ۳- تغییرات شوری عصاره اشباع خاک در طول فصل رشد در عمق ۰-۳۰ سانتی‌متری خاک در شرایط استان بوشهر

نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان داد که میزان علوفه تر، علوفه خشک و ارتفاع بوته گونه و اکوتیپ‌های مورد بررسی در شرایط یزد با توجه به کیفیت بهتر آب آبیاری در مقایسه با شرایط کاشت با آب دریا بیشتر بود. همچنین متوسط میزان خاکستر شاخساره هم بدون توجه به گونه و اکوتیپ در شرایط استان یزد کمتر از استان بوشهر بود. از نظر عددی متوسط عملکرد علوفه تر، علوفه خشک، خاکستر شاخساره و ارتفاع بوته گونه و اکوتیپ‌های مختلف سالیکورنیا در یزد به ترتیب ۱۶۵۷۶/۷۵ گرم در متر مربع، ۲۵۰۳/۲۸ گرم در متر مربع، ۴۷/۷۶ درصد و ۷۲/۵۸ سانتی‌متر بود. این میزان‌ها برای استان بوشهر به ترتیب ۴۵۱۶/۸ گرم در متر مربع، ۹۶۹/۴۴ گرم در متر مربع، ۵۳/۸۳ درصد و ۲۹/۱۶ سانتی‌متر بود.

با این حال در شرایط استان بوشهر بیشترین میزان علوفه تر و خشک تولید مربوط به اکوتیپ بوشهر بود. از طرف دیگر بر خلاف اکوتیپ‌های داخلی، در هر دو شرایط درصد خاکستر بافت در گونه بیگلویی به مراتب کمتر از اکوتیپ‌های داخلی بود. اگرچه میزان کمتر خاکستر در سالیکورنیا با کیفیت بهتر علوفه رابطه مستقیم دارد، ولی تولید ناچیز گونه بیگلویی در استان بوشهر نمی‌تواند صرفاً با هدف خاکستر کمتر اقتصادی باشد؛ بنابراین ضمن معرفی اکوتیپ بوشهر به عنوان وارسته برتر جهت کاشت در شرایط آبیاری با آب دریا در استان بوشهر، لازم است مزرعه به نحوی مدیریت گردد که گیاه قبل از ورود به مرحله خشبی شدن ساقه‌ها و حداکثر در حدود ۵-۶ ماه پس از کاشت برداشت گردد. برداشت در این زمان هم از نظر میزان علوفه تر تولیدی اقتصادی خواهد بود و هم درصد خاکستر بافت

قابل قبول تر می باشد. با این حال با توجه به میزان شوری بالای آب دریا پیشنهاد می گردد قبل از عملیاتی نمودن توسعه سالیکورنیا در نوار ساحلی، ارزیابی های زیست محیطی با هدف مشخص نمودن تاثیر استفاده از آب های بسیار شور در درازمدت بر پایداری تولید و بیلان نمک در خاک انجام پذیرد.	سپاسگزاری اعتبار این مطالعه توسط دانشکده و پژوهشکده پدافند غیرعامل، دانشگاه جامع امام حسین (ع) طی قرارداد شماره ۱۸۰/۴۴/۳۰۱۰/س تامین شده است که بدینوسیله از مدیریت محترم آن مجموعه قدردانی و سپاسگزاری می گردد.
--	--

فهرست منابع

۱. آقازارتی فراهانی، ن.، ح. امانلو، ه. منصوری، ح. ر. میرزایی و ع. مصطفی تهرانی. ۱۳۹۲. اثر جایگزینی یونجه خشک با سیلاژ یونجه در جیره های گاوهای پرتولید هلشتاین. نشریه پژوهش های علوم دامی ایران. ۵ (۴): ۳۳۵-۳۴۳.
۲. خوش خلق سیما، ن. ا.، عبادی، ع.، ن. ریاحی سامانی، ب. د. روحانی. ۱۳۹۹. سالیکورنیا کاربردها، توان اقتصادی، کشت و بهره برداری. نشر آموزش کشاورزی. سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، دفتر شبکه دانش و رسانه های ترویجی.
۳. رحیمیان، م. ح.، ی. هاشمی نژاد، ح. بیرامی، غ. م. رنجبر، م. ح. بناکار، م. صالحی، مهدی شیران تفتی. ۱۳۹۷. ارزیابی نیاز آبی و آبشویی سالیکورنیا در سواحل جنوبی کشور؛ تعیین ضریب گیاهی سالیکورنیا در محیط کنترل شده (لایسیمتری). گزارش پایان کار پروژه تحقیقاتی مشترک بین مرکز ملی تحقیقات شوری و شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران. شماره قرارداد ۹۵۲۰۰۳-۱۹/۰۲/۱۳۹۵. ۲۰۸ صفحه.
۴. رنجبر، غ. ح.، ف. دهقانی، ه. پیرسته انوشه و م. پورمقدم. ۱۳۹۶. سالیکورنیا، گیاهی متحمل به آب دریا. سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، معاونت ترویج و نشر آموزش کشاورزی. نشریه شماره ۱۵۰.
۵. رنجبر، غ. ح. و ف. دهقانی. ۱۳۹۷. مقایسه میزان خاکستر و درصد روغن دو گونه *S. sinus persica* و *Salicornia bigelovii* آبیاری شده با آب دریا. کنگره ۱۵ علوم زراعت و اصلاح نباتات. ایران، کرج. ۱۳-۱۵ شهریور
۶. رنجبر، غ. ح. و ه. پیرسته انوشه. ۱۳۹۹. بررسی میزان تولید علوفه سالیکورنیا در مناطق مختلف دنیا و عوامل موثر بر آن. دومین همایش بین المللی شورورزی، تهران، ایران
۷. رنجبر، غ. ح. و ه. پیرسته انوشه. ۱۳۹۸. مقایسه مقدار تجمع عناصر، محتوی خاکستر و زیست توده چند گونه شورزی تحت آبیاری با آب دریا. مجله مدیریت بیابان، ۱۴: ۶۳-۷۴.
۸. ناصری بازیاری، م. ا.، م. پیچند و ک. نجفی تیره شبانکاره. ۱۳۹۷. بررسی کیفیت علوفه ی گونه *Gymnocarpus decander* در مراحل مختلف فنولوژیک در استان هرمزگان (مطالعه موردی :مراعات شهرستان رودان). مجله علمی پژوهشی اکوفیزیولوژی گیاهی، ۳۴: ۲۴۶-۲۵۹.
9. Abdal, M. S. 2009. Salicornia production in Kuwait. World Applied Science Journal, 6(8): 1033-1038.
10. Akinshina, N., Azizov, A., Karasyova, T., and Klose, E. 2016. On the issue of halophytes as energy plants in saline environment. Biomass and Bioenergy, 91: 306-311.
11. Akinshina, N., Oderich, K.T., Zizov, A.A., Aito, L.S., and Smail, S.I. 2014. Halophyte Biomass-a Promising Source of Renewable Energy. Journal of Arid Land Studies, 24: 231-235.

12. AOAC. 1990. Official methods of analysis, 15th Edition. Association of Official Analytical Chemists, Washington, DC, USA
13. Araus, J.L., Rezzouk, F.Z., Thushar, S., Shahid, M., Elouafi, I.A., Bort, J., and Serret, M. D. 2021. Effect of irrigation salinity and ecotype on the growth, physiological indicators and seed yield and quality of *Salicornia europaea*. Plant Science, 304: 110819.
14. Arieli, A., Naim, E., Benjamin, R.W., and Pasternak, D., 1989. The effect of feeding saltbush and sodium chloride on energy metabolism in sheep. Animal Science, 49: 451-457.
15. Barreira, L., Resek, E., Rodrigues, M.J., Rocha, M.I., Pereira, H., Bandarra, N., Silva, M.M., Varela, J., and Custodio, L. 2017. Halophytes: gourmet food with nutritional health benefits? Journal of Food Composition and Analysis, 59:35–42.
16. Benes, S.E., Grattan, S.R., and Robinson, P.H. 2005. Cultivation of halophytes to reduce drainage volumes on the Westside San Joaquin Valley of California. Final report to the California State University Agricultural Research Initiative (ARI). Project #00-1-003. 18 Oct. 2005. Available at [http://ari.calstate.edu/research/pdf/00-1-003/](http://ari.calstate.edu/research/pdf/00-1-003/FinalReport-00-1-003.pdf) FinalReport-00-1-003.pdf.
17. Bengtsson, S., and Larsson, K. 1984. Prediction of the nutritive value of forages by Near Infrared Reflectance Photometry. Journal of the Science of Food and Agriculture, 351: 951-958.
18. Brown, J.J., Cybulska, I., Chaturvedi, T., and Thomsen, M.H. 2014. Halophytes for the production of liquid biofuels. In: Khan MA, Boer B, Ozturk M, Thabit Z, Al Abdessalaam TZ, Clusener-Godt M, Gul B, (Eds.). Sabkha Ecosystems. Vol. IV: Cash crop halophyte and biodiversity conservation. Springer, Dordrecht, pp 67–72.
19. Daoud, S., Harrouni, M.C., and Bengueddour, R. 2001. Biomass production and ion composition of some halophytes irrigated with different seawater dilutions. First International Conference on Saltwater Intrusion and Coastal Aquifers- Monitoring, Modeling, and Management. Essaouira, Morocco, April 23–25. (15 pp.).
20. Díaz, F.J., Benes, S.E., and Grattan, S.R. 2013. Field performance of halophytic species under irrigation with saline drainage water in the San Joaquin Valley of California. Agricultural Water Management, 118: 59-69.
21. Erickson, S. 1981. Nutritive value of cereal straw. Agriculture and Environment, 6: 257–260.
22. Essaidi, I., Brahmi, Z., Snoussi, A., Koubaier, H.B.H., Casabianca, H., Abe, N., Omri, A.E., Chaabouni, M.M., and Bouzouita, N. 2013. Phytochemical investigation of Tunisian *Salicornia herbacea* L., antioxidant, antimicrobial and cytochrome P450 (CYPs) inhibitory activities of its methanol extract. Food Control, 32:125–33.
23. Faichney, G.J., and White, G.A. 1983. Methods for the analysis of feeds eaten by ruminants. CSIRO, Melbourne.
24. Garza-Torres, R., Troyo-Diéguez, E., Nieto-Garibay, A., Lucero-Vega, G., Magallón-Barajas, F. J., García-Galindo, E., Fimbres-Acedo, Y., and Murillo-Amador, B. 2020. Environmental and Management Considerations for Adopting the Halophyte *Salicornia bigelovii* Torr. as a Sustainable Seawater-Irrigated Crop. Sustainability, 12(2): 707.
25. Glenn, E.P., Brown, J., and O'Leary, J.W. 1998. Irrigating crops with seawater. Scientific American, 279: 76-81
26. Glenn, E.P., Oleary, J.W., Watson, M.C., Thompson, T.L., and Kuehl, R.O., 1991. *Salicornia bigelovii* Torr. an oilseed halophyte for seawater irrigation. Science, 251: 1065–1067.
27. Grattan, S.R., Benes, S.E., Peters, D.W., and Diaz, F., 2008. Feasibility of irrigating pickleweed (*Salicornia bigelovii* Torr) with hyper-saline drainage water. Journal of Environmental Quality. 37: 149-156.
1. Gunning, D. 2016. Cultivating *Salicornia europaea* (marsh samphire). Dublin, Ireland: Irish Sea Fisheries Board.
28. Jaradat, A.A., and Shahid, M. 2012. The dwarf saltwort (*Salicornia bigelovii* Torr.): Evaluation of breeding populations. International Scholarly Research Notices, 2012.

29. Kadereit, G., Ball, P., Beer, S., Mucina, L., Sokoloff, D., Teege, P., Yaprak, A.E., and Freitag, H. 2007. A taxonomic nightmare comes true: phylogeny and biogeography of glassworts (*Salicornia* L., Chenopodiaceae). *Taxon*, 56(4): 1143-1170.
30. Lopes, M., Cavaleiro, C., and Ramos, F. 2017. Sodium reduction in bread: A role for glasswort (*Salicornia ramosissima* J. Woods). *Comprehensive reviews in food science and food safety*, 16(5): 1056-1071.
31. Masters, D.G., Benes, S.E., and Norman, H.C. 2007. Biosaline agriculture for forage and livestock production. *Agriculture, ecosystems & environment*, 119(3-4): 234-248.
32. Norman, H.C., Freind, C., Masters, D.G., Rintoul, A.J., Dynes, R.A., and Williams, I.H., 2004. Variation within and between two saltbush species in plant composition and subsequent selection by sheep. *Australian Journal of Agricultural Research*, 55(9): 999-1007.
33. Norman, H.C., Masters, D.G., and Barrett-Lennard, E.G. (2013). Halophytes as forages in saline landscapes: interactions between plant genotype and environment change their feeding value to ruminants. *Environmental and Experimental Botany*, 92: 96-109.
34. Norman, H.C., Masters, D.G., Wilmot, M.G., and Rintoul, A.J. 2008. Effect of supplementation with grain, hay or straw on the performance of weaner Merino sheep grazing old man (*Atriplex nummularia*) or river (*Atriplex amnicola*) saltbush. *Grass and forage science*, 63(2): 179-192.
35. O'Leary, J.W., Glenn, E.P., and Watson, M.C. 1985. Agricultural production of halophytes irrigated with seawater. *Plant and soil*. 89: 311-321.
36. Patel, M. M., Patel, B. K., Naik, V. R., Joshi, H. K., and Usadadia, V. P. 2017. Effect of Irrigation and Sowing Dates on Production Potential of *Salicornia* (*Salicornia brachiata* Roxb.) in Coastal Saline Soil. *Journal of Soil Salinity and Water Quality*, 9(1): 111-114.
37. Reiahisamani, N., Esmaeili, M., Sima, N. A. K., Zaefarian, F., and Zeinalabedini, M. 2018. Assessment of the oil content of the seed produced by *Salicornia* L., along with its ability to produce forage in saline soils. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 65(7): 1879-1891.
38. SCA. 2007. Standing Committee on Agriculture's Nutrient Requirements of Domesticated Ruminants. CSIRO Publications, Melbourne, Australia.
39. Turcios, A. E., Cayenne, A., Uellendahl, H., and Papenbrock, J. 2021. Halophyte Plants and Their Residues as Feedstock for Biogas Production—Chances and Challenges. *Applied Sciences*, 11(6): 2746.
40. Yucel, C., Farhan, M.J., Khairo, A. M., Ozer, G., Cetin, M., Ortas, I., and Islam, K.R. 2017. Evaluating *Salicornia* as a potential forage crop to remediate high groundwater-table saline soil under continental climates. *International Journal of Plant and Soil Science*, 1-10.
41. Zerai, D. B., Glenn, E. P., Chatervedi, R., Zhongjin, L., Mamood, A. N., Nelson, S. G., and Ray, D. T. 2010. Potential for the improvement of *Salicornia bigelovii* through selective breeding. *Ecological Engineering*, 36: 730-739.

تحلیلی بر بحران آب در بخش کشاورزی منطقه سیستان در سناریوهای مختلف:

رهیافت آینده پژوهی

زهرا غفاری مقدم، ابراهیم مرادی^۱، محمود هاشمی تبار و علی سردار شهرکی

دانشجوی دکتری، گروه اقتصاد کشاورزی، دانشکده مدیریت و اقتصاد، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.

ghafari.zahra1@gmail.com

استادیار گروه اقتصاد کشاورزی، دانشکده مدیریت و اقتصاد، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.

Eb_moradi@eco.usb.ac.ir

استادیار گروه اقتصاد کشاورزی، دانشکده مدیریت و اقتصاد، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.

mhashemi@hamoon.usb.ac.ir

استادیار گروه اقتصاد کشاورزی، دانشکده مدیریت و اقتصاد، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.

a.s.shahraki@eco.usb.ac.ir

دریافت: اردیبهشت ۱۴۰۰ و پذیرش: شهریور ۱۴۰۰

چکیده

هدف این مطالعه دستیابی به درکی بهتر از آینده آب در بخش کشاورزی در منطقه سیستان است. در این مطالعه برای تعیین پیشران‌های نهایی به روش‌های آینده‌پژوهی تکیه کرده و با استفاده از روش پل خبرگان ۲۳ پیشران شناسایی و در نهایت هفت پیشران اصلی تاثیر گذار بر بحران آب سیستان برای نگارش سناریو به روش دلفی استفاده شد. این پیشران‌ها عبارت بودند از: خشکسالی، وابستگی به منابع آب خارجی، توجه نکردن کافی به مدیریت منابع آب، کشت بی رویه محصولات آب بر، شیوه نامناسب آبیاری، ضعف فناوری کشاورزی و رایگان بودن آب در بخش کشاورزی. با توجه به نقشه پهنه بندی خطر، ۸۶٪ از منطقه سیستان در آینده در معرض بحران آبی خیلی شدید قرار خواهند گرفت. در ادامه، وضعیت‌های محتمل برای هر یک از این عوامل ارائه شد و با استفاده از آن سه سناریو با سازگاری بالا که شامل سناریوی اول، دوم و سوم برای مسئله بحران آب در سیستان با استفاده از نرم‌افزار سناریو ویزارد (Scenario Wizard) طراحی شد. در این سناریوها سه وضعیت شامل: وضعیت محتمل (اگر پیشران در وضعیت فعلی بماند)، وضعیت خوشبینانه (بهبود شرایط) و وضعیت بدبینانه (تضعیف شرایط) برای هر یک از عوامل طراحی شد. در سناریوهای طراحی شده کشت بی رویه محصولات آب‌بر در حالت بدبینانه، رایگان بودن آب در بخش کشاورزی و خشکسالی در حالت محتمل، و سایر پیشران‌ها در وضعیت خوشبینانه قرار داشتند. و وضعیت‌های خوشبینانه بر دیگر وضعیت‌ها برتری داشت و در هر سه سناریو بیشترین فرض‌ها را تشکیل داد. انتظار بر این است که اعمال این سناریوها منجر به بهبود شرایط آبی و کشاورزی در دشت سیستان خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: سناریو ویزارد، آینده آب در بخش کشاورزی، روش پل خبرگان، روش دلفی

^۱ -آدرس نویسنده مسئول: زاهدان، گروه اقتصاد کشاورزی، دانشکده مدیریت و اقتصاد، دانشگاه سیستان و بلوچستان

مقدمه

مسئله کمبود آب چنانچه مهار نشود منجر به یکی از بحران‌های مهمی می‌شود که در آینده نزدیک بشر را تهدید می‌کند و به موضوع تنش‌زایی بین ملت‌ها تبدیل خواهد شد (بورک و همکاران، ۲۰۱۶). بحران آب یک مسئله جهانی است که در مناطق خشک و نیمه خشک بیشتر احساس می‌شود (صدیق و همکاران، ۱۳۸۹). در حالی که خشکسالی طولانی مدت، تغییر نسبت برف به باران، گرم شدن کره زمین و افزایش تعداد روزهای خشکی همه در این موضوع نقش داشته‌اند، رشد جمعیت و توسعه اقتصادی و به دنبال آن افزایش تقاضای آب این مشکل را تشدید کرده است (آقاکوچک، ۲۰۱۵). کمتر از یک درصد از آب‌های شیرین جهان به طور مستقیم توسط بشر استفاده می‌شود (لیو و همکاران، ۲۰۱۷)؛ و این میزان آب بصورت یکنواخت و متوازن بین نواحی و کشورهای مختلف توزیع نشده است (هاسمن و پاتریک، ۲۰۱۳). در بخش کشاورزی حدود ۷۰ درصد از کل آب‌های شیرین جهان و در چندین کشور در حال توسعه بیش از ۹۵ درصد استفاده می‌شود (لیو و همکاران، ۲۰۱۷). به دلیل بارندگی نامتوازن، کمبود آب یکی از مهم ترین چالش‌های حوزه کشاورزی است. بخش کشاورزی به عنوان بزرگترین مصرف کننده آب در جهان، بیشترین میزان خسارت اقتصادی-اجتماعی ناشی از کمبود آب را به صورت کاهش در عملکرد محصولات کشاورزی نشان می‌دهد (سعادت و همکاران، ۲۰۱۴). رشد سریع جمعیت، آلودگی آب و تغییر آب و هوا، بحران کمبود آب در سالهای اخیر، تولید محصولات کشاورزی را در بسیاری از کشورهای جهان به ویژه در کشورهای در حال توسعه که کمبود منابع را به طور جدی تجربه کرده‌اند، تهدید کرده است (لی و همکاران، ۲۰۱۹؛ وانگ و همکاران، ۲۰۱۹ و پاستوری، ۲۰۱۷).

احتمال رخداد بحران شدید آب در کشورهایی که در مناطق خشک و نیمه خشک قرار دارند از جمله کشور ایران، بسیار زیاد است و امنیت اقتصادی، اجتماعی و بحران

مربوط به امنیت غذایی به واسطه فشارهای غیر قابل تحملی که بر بخش کشاورزی این کشورها به دلیل کمبود آب وارد می‌شود به مراتب وخیم‌تر خواهد بود (آلن، ۱۹۹۳). بحران آبی آینده یکی از پتانسیل‌های مهم بالقوه برای نزاع و چالش‌های امنیتی بین المللی است که قابلیت تبدیل شدن به بحران بزرگ بین المللی را دارد (رضائیان و رضائیان، ۱۳۹۵).

آینده پژوهی^۲، فرآیند تلاش نظام‌مند برای نگاه به آینده بلند مدت علم، تکنولوژی، محیط زیست، اقتصاد و اجتماع است که با هدف شناسایی فناوریهای عام نوظهور و تقویت حوزه‌های تحقیقات راهبردی که بیشترین منافع اقتصادی و اجتماعی را به همراه دارد، انجام می‌شود (زارع و همکاران، ۱۳۹۸). در رویکرد کلاسیک نگاه به آینده، هدف پیش‌بینی یک آینده مشخص می‌باشد، در آینده پژوهی از انواع آینده‌ها سخن گفته می‌شود. این نوع نگاه به آینده، تحت عناوین مختلفی از جمله آینده‌نگاری، آینده پژوهی و غیره توسعه یافته است (گوردن، ۲۰۱۲). امروزه تفکر آینده پژوهی در حوزه‌های محیط زیست و بحران‌های زیست محیطی به‌ویژه بحران آب از مهم‌ترین مسائل جوامع امروز است. چرا که مهمترین چالش‌های قرن حاضر، چالش‌های زیست محیطی بوده است و اگر نگاه بلند مدت و تفکر آینده پژوهی در ابعاد مختلف جامعه صورت نگیرد، بحران‌های زیست محیطی را برآورد نکرده و به موقع و ماهرانه پیش‌بینی لازم را نداشته باشد، غافلگیر شده و در کنترل این بحران (بحران‌های زیست محیطی از جمله بحران آب) کارآمد نخواهد بود. اصولاً جامعه برای چیره شدن بر مشکلات زیست محیطی و دستیابی به توسعه پایدار باید تفکر آینده پژوهی را بیش از پیش در نظر داشته باشد (غفاریان، ۱۳۹۶).

سناریوسازی یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین روش‌های مورد استفاده در آینده پژوهی است (پوپر، ۲۰۰۸). سناریو تصاویری فرضی از آینده هستند که نمونه‌ای از یک فضای تثبیت شده را توصیف می‌کنند و راه‌های

پیشرفت را توصیف می‌کند و مانند یک راهنما عمل می‌کند (پلیکان، ۱۳۹۴). بر اساس سناریو نیازهای مقابله شناسایی شده و دولت و دستگاهها می‌توانند از این سناریوها به عنوان مرجع برنامه‌ریزی استفاده نمایند. سناریوها هر از چند گاهی نیاز به مرور دارند تا دقت و کارایی خود را حفظ کنند (اسکندری، ۱۳۹۲).

نیروهای پیشران^۳ نیز مجموعه‌ای از نیروهای شکل دهنده آینده هستند که بر یکدیگر تاثیر می‌گذارند. پیشران‌ها به صورتی غیر مستقیم بر آینده‌ی حوزه‌های اجتماعی، فن‌آورانه، اقتصادی، زیست محیطی و سیاسی تاثیر گذارند (هاشمیان اصفهانی، ۱۳۸۹).

مروری بر ادبیات نظری تحقیق نشان می‌دهد که تاکنون پژوهش‌های متعددی مانند موضوع تحقیق حاضر انجام شده است. رضائیان و رضائیان (۱۳۹۵) در پژوهش خود با تکیه بر پیشران‌های اصلی مسئله آب در ایران شامل افزایش جمعیت، تقاضای روزافزون برای مصرف، تغییرات آب و هوایی چهار سناریو محتمل را استخراج نمودند. کرمی و غفاریان (۱۳۹۶) در مطالعه خود مهم‌ترین عوامل کلیدی و پیشران در رابطه با آینده‌پژوهی بحران آب در شهرستان رفسنجان شناسایی نمودند و سپس با توجه به عوامل کلیدی شناخته شده سناریوهای کوچک و سناریو جامع در سطح شهرستان ارائه و نقشه پهنه‌بندی خطر ترسیم نمودند. عظیمی و همکاران (۱۳۹۶) به بررسی آینده تأمین آب برای تولید گندم تا افق ۱۴۰۴ با توجه به وضعیت منابع آب کشور پرداختند. در این راستا از روش آینده‌نگاری تحت پارادیم^۴ آینده‌پژوهی یکپارچه که یک تحقیق توصیفی و تحلیلی آینده محور است، استفاده کرده‌اند. بر اساس نتایج پیشران بارندگی و مشارکت ذی‌نفعان اصلی به ترتیب دارای بیشترین عدم قطعیت، فراگیرترین و بیشترین تأثیرگذاری بر عوامل کلیدی موضوع تا افق ۱۴۰۴ هستند. علی بیگی و همکاران (۱۳۹۷) عوامل کلیدی آینده‌پژوهی اثرات اجرای انتقال آب رودخانه سیروان به شهرستان مهران در استان ایلام را شناسایی نمودند. نتایج مطالعه ۱۳ عامل

را به عنوان عوامل کلیدی تحولات فضایی- مکانی شناسایی و وضعیت احتمالی آن‌ها را در افق سال ۱۴۰۸ تدوین نمودند. جشاری و مرادی (۱۳۹۸) به استخراج پیشران‌های توسعه بخش کشاورزی در نواحی روستایی استان سیستان و بلوچستان، تدوین سناریوها و ارائه راهبردهای اصولی برای توسعه بخش کشاورزی پرداختند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد از بین پیشران‌های مختلف مؤثرترین پیشران‌ها ارتقا دانش کشاورزی، مدیریت صحیح منابع آب و تأمین مالی پروژه شناسایی شدند. بهشتی و همکاران (۱۳۹۹) پیشران‌های مؤثر در مدیریت منابع آبی در شهرستان تبریز بر مبنای رویکرد آینده‌پژوهی تا سال ۱۴۲۰ را بررسی نمودند. یافته‌های مطالعه نشان داد که عوامل زیست‌محیطی و اقتصادی تأثیر بیشتری بر آینده منابع آبی خواهد داشت. از دیگر مطالعات انجام شده در زمینه آینده‌پژوهی می‌توان پندی (۲۰۱۸) و آنا و پیتر بارتکوویکا (۲۰۱۷) از مبحث آینده‌پژوهی در زمینه توسعه پایدار کشاورزی، گومسا و همکاران (۲۰۱۸) در زمینه کشاورزی، اسپاتز و همکاران (۲۰۱۱)، هملت و همکاران (۲۰۱۲) در زمینه مدیریت منابع آب، اسپچیز و کارنیوان (۲۰۱۶) در زمینه تغییرات آب و هوایی، استفاده نمودند.

منطقه سیستان در انتهای یک حوزه وسیع و بسته‌ی داخلی قرار دارد که یکی از بزرگ‌ترین مناطق بیابانی دنیاست. این منطقه با اقلیم صحرایی و میانگین بارندگی ۵۰ میلی‌متر، معادل ۰/۲ میانگین بارندگی کشور دارای آب‌وهوای گرم و بیابانی است (سلطانی و کرباسی، ۱۳۸۱). این منطقه با مساحتی افزون بر ۸۰۰۰ کیلومترمربع از رسوبات رودخانه هیرمند در طول هزاران سال به وجود آمده است. مطابق مطالعات جامع منابع آب، سطوح قابل کشت کشاورزی در منطقه سیستان ۱۳۵ هزار هکتار است و سرانه آب سالانه با توجه به الگوی کشت در این منطقه به طور میانگین ۸۷۵۰ مترمکعب در هکتار می‌باشد (آمارنامه کشاورزی، ۱۳۹۶ و سردار شهرکی، ۱۳۹۵). از این رو تنها برای کشاورزی منطقه سالانه حدود ۱۲۰۰

^۴ Paradigm^۳ Driving forces

سناریو ارائه شد بر پایه بررسی منابع انجام شده تاکنون در ارزیابی بحران آب بخش کشاورزی منطقه سیستان از آینده پژوهی استفاده نشده است. هدف از این پژوهش تحلیل مهم ترین عوامل مؤثر بر بحران آب در بخش کشاورزی در منطقه سیستان با رویکرد آینده پژوهی می باشد.

روش تحقیق

مطالعه حاضر در سال ۱۳۹۸-۱۳۹۹ انجام شده است. این پژوهش از لحاظ هدف از نوع کاربردی است؛ از نظر روش، ترکیبی از روش های اسنادی و از نظر ماهیت بر اساس روش های جدید آینده پژوهی-تحلیلی بوده که در آن ترکیبی از مدل های کمی و کیفی به کار گرفته شده است. شناسایی متغیرهای کلیدی گام نخست و مهم ترین گام آینده پژوهی راهبردی است. این مرحله باهدف ۱) شناسایی متغیرها، ۲) توصیف روابط میان متغیرها و ۳) شناسایی متغیرهای کلیدی صورت گرفت (گودت، ۲۰۱۱). با توجه به ماهیت این پژوهش، از روش های دلفی و تحلیل ساختاری بهره گرفته شد. شیوه گردآوری اطلاعات اسنادی کتابخانه ای و پرسشنامه ای است. داده های کیفی با پرسشنامه باز و از طریق مصاحبه و بررسی اسناد و داده های کمی به صورت عددی و از طریق وزن دهی پرسشنامه های دلفی تهیه شد. روش دلفی روشی متکی بر خرد، هوش و طوفان فکری^۵ به منظور اجماع خبرگان روی موضوع خاص است تا از این طریق بتوان مناسب ترین پاسخ ها را کسب کرد (مردوخ، ۱۳۹۱). در روش دلفی خبرگان متعلق به حوزه مورد مطالعه هستند و خبرگان باهم تعامل ندارند و هرکدام به طور مجزا به پرسش ها پاسخ می دهند. با استفاده از روش دلفی می توان پیشرفت های آتی در یک حوزه از علم را تشخیص داده و با تکیه بر نظر خبرگان، نسبت به آن اطمینان یافت و عموماً این روش برای موضوعاتی به کار می رود که دانش موجود ما نسبت به آن کم است (حیدری، ۱۳۹۵). روش دلفی در دو مرحله انجام شد: مرحله نخست از روش مرور منابع و پیمایش نظر خبرگان عوامل مؤثر بر بحران

میلیون مترمکعب آب مورد نیاز بوده که از کل سطوح زیر کشت تنها حدود ۸۵ هزار هکتار از اراضی (حدود ۶۳ درصد از کل اراضی) به کشت محصولات اختصاص می یابد ((آمارنامه کشاورزی، ۱۳۹۵). شرایط آب و هوایی و وابستگی کامل به رودخانه هیرمند و اقدامات کشور افغانستان در مهار آب این رودخانه، باعث بروز بحران شدید آبی و تأثیرات منفی در اقتصاد، کشاورزی، اشتغال و محیط زیست این منطقه شده است؛ و مسئله مدیریت آب را در این منطقه با مشکلات فراوانی مواجه ساخته است (سردار شهرکی، ۱۳۹۵). مرور بر آمار و اطلاعات سال های پیش، نشان داد که هر ۱۵ سال یک خشک سالی و هر ۳۰ سال بحران خشک سالی روی می دهد (مختاری و صالح، ۱۳۸۶)؛ بنابراین بررسی وضعیت آب به عنوان مسئله ای راهبردی و حیاتی در منطقه سیستان از اهمیت زیادی برخوردار است. میزان آب ورودی رودخانه هیرمند به منطقه سیستان و آب تخصیص یافته به بخش کشاورزی در سال های اخیر روند کاهشی داشته است. در صورت ادامه این روند ضمن ایجاد مشکلات اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی وقایعی مانند مهاجرت، افزایش سطح فقر، خالی شدن روستاها از سکنه، شکل گیری اعتراض ها و تنش های منطقه ای بر سر منابع آب، نابودی کشاورزی، مرگ گونه های جانوری و گیاهی، نابودی محیط زیست، بیابان زایی و گردوغبار و مرگ تالاب هامون از مصادیق بحران آبی در بخش کشاورزی منطقه سیستان خواهد بود.

لذا با توجه به بحران آبی و خشک سالی های پی در پی که در منطقه سیستان طی سال های متمادی وجود دارد. این مطالعه به دنبال آن است که استفاده از اصول آینده پژوهی چگونه می تواند در تدوین راهبردهای مؤثر بر بحران آب کشاورزی مؤثر باشد و محتمل ترین سناریو برای رفع بحران آب در آینده این منطقه را به دست آورد. در این راستا نخست پیشران های تأثیرگذار بر بحران آب در بخش کشاورزی شناسایی و سپس اصلی ترین پیشران ها استخراج و با تشکیل سناریوهای مختلف راهکارهای مناسب با آن

آب در بخش کشاورزی منطقه سیستان در اختیار ۱۰ کارشناس قرار داده شد و عوامل مهم بر بحران آب انتخاب شدند. پس از شناسایی عوامل تأثیرگذار بر بحران آب، پرسشنامه تأثیرات متقابل طراحی شد. مرحله دوم، شامل تهیه و تکمیل این پرسشنامه‌ها بود که در آن ۲۰ پرسشنامه برای تعیین عوامل کلیدی تأثیرگذار بر بحران آب از طریق وزن دهی توسط کارشناسان، خبرگان و صاحب‌نظران تکمیل شد. متخصصان و خبرگان حوزه‌های مرتبط با آب شامل متخصصین در حوزه اقتصاد آب، مدیریت منابع آب، جغرافی، مهندسان محیط‌زیست و کشاورزی که اکثراً از اساتید مطرح دانشگاه‌ها، پژوهشگران مراکز تحقیقاتی و جهاد کشاورزی در دامنه سنی ۴۰ تا ۶۰ سال بوده‌اند، به‌منظور شرکت در این مطالعه انتخاب شدند در شکل یک انواع متغیرها در مختصات نشان داده شده است. برای تحلیل اثر متقابل و روابط بین متغیرها با استفاده از نرم‌افزار MicMac عوامل کلیدی استخراج شد. سپس از خروجی این نرم‌افزار به‌عنوان ورودی نرم‌افزار سناریو ویزارد استفاده شد. برای انجام این مراحل متخصصان در پل‌های خبرگان بر اساس تجربه و دانش خود فهرستی از متغیرهای کلیدی ارائه دادند و سپس با توجه به تعداد متغیرهای کلیدی، خانه‌های ماتریس $n \times n$ را امتیازدهی کردند. این ماتریس، ماتریس تأثیرات مستقیم نامیده می‌شود که در آن هر درایه نشان‌دهنده میزان تأثیر متغیر i بر متغیر j است و مقدار آن بسته به میزان تأثیر می‌تواند بین صفر تا سه باشد. در این روش ۰ بیانگر عدم تأثیر، یک تأثیر ضعیف، دو تأثیر متوسط و سه بیانگر تأثیرات قوی یا شدید است. در مرحله بعد با استفاده از روش مستقیم و یا غیرمستقیم می‌توان میزان تأثیر را مشخص کرد. در روش مستقیم، تأثیر مستقیم متغیر k بر دیگر متغیرها حاصل جمع تمامی مقادیر سطر k از ماتریس m است و تأثیرپذیری متغیر k از سایر متغیرها، حاصل جمع مقادیر ستون k است. سپس با محاسبه جمع سطری و ستونی متغیرها، رتبه هر متغیر به دست می‌آید و از مرتب‌سازی این مقادیر، اهمیت هر متغیر محاسبه می‌شود (ویلاکورتا و همکاران، ۲۰۱۲). پس از مشخص شدن

عوامل کلیدی، برنامه‌ریز برای آینده‌نگاری احتیاج به ابزاری دارد تا بتواند آینده را در قالب عناصر قابل پیش‌بینی و عدم قطعیت‌ها بیان کند. این ابزار همان سناریوها هستند (فهی و روبرت، ۲۰۱۱)؛ بنابراین بعد از مشخص شدن عوامل کلیدی وضعیت‌های احتمالی مختلفی شامل سه وضعیت خوش‌بینانه، محتمل و بدبینانه برای هر یک از عوامل کلیدی در نظر گرفته شد و در قالب پرسشنامه، ماتریس اثرات متقابل طراحی شد. پرسش اساسی این ماتریس این است که: اگر وضعیت A1 از عامل کلیدی A در آینده اتفاق بیفتد، چه تأثیری بر وقوع یا عدم وقوع وضعیت B1 از عامل کلیدی B خواهد داشت؟ جواب آن بر اساس طیف هفت‌قسمتی (محدودکننده شدید... تقویت‌کننده شدید) در قالب اعداد ۳ تا ۳- می‌باشد؛ بنابراین وزن دهی این پرسشنامه به‌صورت مقایسه زوجی و میزان ارتباط متغیرها به‌صورت دامنه‌ای از اعداد ۳ تا ۳- سنجیده و سپس پرسشنامه توسط جامعه آماری تکمیل شد. جامعه آماری مطالعه شامل کارشناسان حوزه آب، اساتید و صاحبان مقاله در همایش‌های علمی، سیاست‌گذاران حوزه کشاورزی و آب و صاحب‌نظران در این زمینه بودند. با استفاده از نرم‌افزار سناریو ویزارد از مجموع سناریوهای ممکن، محتمل‌ترین سناریوها با سازگاری بالا به دست خواهد آمد و در هر یک از سناریوهای به‌دست‌آمده وضعیت هر عامل پیشران مشخص خواهد شد.

با توجه به اینکه کدام یک از بخش‌های منطقه سیستان احتمال تنش آبی در آینده نه‌چندان دور به واقعیت نزدیک‌تر می‌شود و در معرض ریسک اجتماعی-اقتصادی ناشی از بحران آب قرار می‌گیرند، اقدام به تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر، شده است. نقشه پهنه‌بندی خطر با توجه به متغیرهایی مانند نرخ رشد جمعیت و خانوار، میزان سطح زیر کشت هر منطقه که به دلیل کم‌آبی کشت نشده است، تعداد روستاهای خالی از سکنه که به علت بحران‌های آبی و پیامدهای ناشی از خشک‌سالی ساکنین آن‌ها اقدام به مهاجرت به دیگر مناطق نموده‌اند، میزان فقر که نشان‌دهنده کاهش درآمد روستائیان به علت بحران‌های آبی بوده و شغل

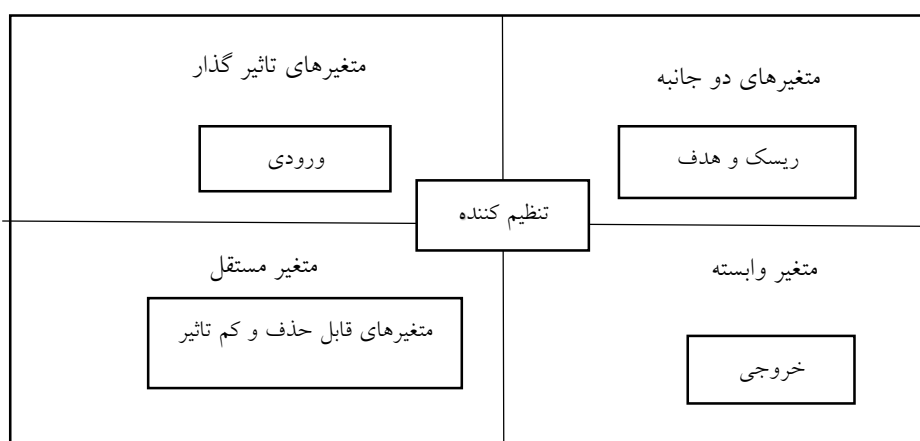
خود را که اغلب کشاورزی و دامپروری و صیادی بوده‌اند از دست داده‌اند و با تعداد خانوارهای زیرپوشش کمیته امداد سنجیده شد. آمار و اطلاعات مربوطه از پایگاه داده آماری مرکز آمار ایران جمع‌آوری شد. متغیرهای یادشده با استفاده از فرایند تحلیل سلسله مراتبی در نرم‌افزار Expert choice وزن دهی شد و سپس در Arc map نرم‌افزار GIS سه طیف بحرانی خیلی شدید، بحرانی شدید و نیمه بحرانی به‌عنوان نقشه خطر بحران آب، پهنه‌بندی شد.

نتایج و بحث

پیشران‌های مؤثر و عوامل کلیدی بحران آب

با استفاده از تکنیک دلفی و پرسش از کارشناسان ۲۳ عامل به‌عنوان عوامل مؤثر و کلیدی بحران آب در بخش کشاورزی منطقه سیستم شناسایی شدند که فهرست این متغیرها در جدول یک آورده شد؛ و سپس با استفاده از نرم‌افزار Mic Mac عوامل اصلی تأثیرگذار استخراج شدند. در ماتریس متقاطع جمع سطری هر عامل به‌عنوان میزان تأثیرگذاری و جمع ستونی آن، میزان تأثیرپذیری آن

را از عوامل دیگر نشان می‌دهد. نتایج جدول یک نشان می‌دهد که میزان تأثیرگذاری متغیرهای خشک‌سالی، تغییرات اقلیمی، وابستگی به منابع آب خارجی، اقدامات توسعه‌ای کشور همسایه، افزایش جمعیت، عدم توجه کافی به مدیریت منابع آب، کشت بی‌رویه و محصولات آب بر، ضعف فناوری کشاورزی، ساختار نظام مالکیت، روش‌های نامناسب آبیاری، سرمایه ناکافی، تلفات آب در شبکه‌های آبیاری، رایگان بودن آب در بخش کشاورزی از میزان تأثیرپذیری آن‌ها بیشتر بوده است و این نشان می‌دهد که عوامل یادشده تأثیر بسیاری بر سیستم دارند و به‌عنوان تأثیرگذارترین عوامل در بحران آب در بخش کشاورزی دشت سیستم شناخته می‌شوند. دیگر متغیرها میزان تأثیرگذاری آن‌ها از بسیار کمتر از میزان تأثیرپذیری آن‌هاست؛ و سهم بسیار کمی در تأثیرگذاری بر سیستم دارند و از مهم‌ترین عوامل تأثیرپذیر از بحران آب هستند. در جدول دو ویژگی عمومی ماتریس آورده شد.



شکل ۱- نمودار تأثیرگذاری و تأثیرپذیری (گودت، ۱۹۹۳)

جدول ۱- عوامل مهم و مؤثر در بحران آب در بخش کشاورزی منطقه سیستان

ردیف	متغیر	علامت اختصاری	امتیاز تأثیرگذاری	امتیاز تأثیرپذیری
۱	خشک سالی	drought	۴۳	۴۱
۲	تغییرات اقلیمی	climate	۳۲	۲۵
۳	تقاضای روزافزون آب در بخش کشاورزی	demand	۴۵	۴۹
۴	وجود بیشترین تقاضا در زمان کمترین بارندگی	Max demand	۳۸	۴۴
۵	انتقال آب به زاهدان	transfer	۴۰	۴۳
۶	وابستگی به منابع آب خارجی	foreign	۵۵	۵۴
۷	اقدامات توسعه‌ای کشور همسایه	development	۳۰	۲۰
۸	افزایش جمعیت	population	۱۵	۱۱
۹	عدم توجه کافی به مدیریت منابع آب	management	۵۸	۵۰
۱۰	توزیع غیریکنواخت آب در بخش کشاورزی	distribution	۳۰	۴۰
۱۱	کشاورزی ناکارآمد و سنتی	traditional	۴۳	۴۳
۱۲	کشت بی‌رویه	Extra cult	۴۴	۴۱
۱۳	کشت محصولات آب بر	W-B produce	۴۱	۳۴
۱۴	ضعف فناوری کشاورزی	weekness	۵۵	۳۷
۱۵	ساختار نظام مالکیت در بخش کشاورزی	ownership	۳۵	۲۷
۱۶	روش‌های نامناسب آبیاری	Irrigation	۴۶	۴۱
۱۷	سرمایه ناکافی و سطح پایین نوآوری در زیرساخت‌های آب	Capital	۵۲	۳۶
۱۸	تلفات آب در شبکه‌های آبیاری	Losses	۴۹	۴۵
۱۹	راندمان پایین آبیاری	Efficiency	۴۶	۴۸
۲۰	رایگان بودن آب در بخش کشاورزی	Price	۴۷	۲۳
۲۱	گسترش بیابان و کویر	Desert	۳۲	۶۱
۲۲	معضل ریز گرد	Dust	۲۹	۶۰
۲۳	از بین رفتن زیست‌بوم‌های آبی	Ecosystem	۲۹	۶۱
	جمع کل		۹۳۴	۹۳۴

مأخذ: یافته‌های تحقیق

جدول ۲- تحلیل اولیه داده‌های ماتریس و تأثیرات متقاطع

بعد ماتریس	تعداد تکرار	تعداد صفر (بدون تأثیر)	تعداد یک (تأثیرگذار)	تعداد سه (تأثیرگذاری زیاد)	جمع	درجه پرشدگی ماتریس (درصد)
۲۳*۲۳	۲	۸۴	۱۵۸	۲۰۵	۴۴۵	۸۴/۱۲

درجه پرشدگی ماتریس ۸۴/۱۲ درصد است که نشان می‌دهد عوامل انتخاب‌شده تأثیر زیاد و پراکنده‌ای بر همدیگر داشته‌اند و درواقع سیستم از وضعیت ناپایداری برخوردار بوده است. از مجموع ۴۴۵ رابطه قابل ارزیابی در این ماتریس، ۸۴ رابطه عدد صفر بوده که نشان می‌دهد این عوامل بر همدیگر تأثیر نداشته و یا از یکدیگر تأثیر نپذیرفته‌اند.

آثاری که هر یک از متغیرها بر کل سیستم می‌گذارند در شکل دو نشان داده شد. نحوه توزیع و پراکنش متغیرها در صفحه پراکندگی، نشان از میزان پایداری و ناپایداری سیستم است. هرکدام از متغیرها با

توجه به میزان تأثیرگذاری و تأثیرپذیری در مکان خاصی در نمودار قرار می‌گیرند. طبق شکل دو موقعیت متغیرها در نمودار بیانگر وضعیت آن‌ها در سیستم و نقش آن‌ها در پویایی و تحولات سیستم در آینده است.

درمجموع دو نوع از پراکنش تعریف شده است که سیستم‌های پایدار و ناپایدار نامیده می‌شوند. در سیستم‌های پایدار پراکنش متغیرها به صورت L انگلیسی است، یعنی برخی متغیرها دارای تأثیرگذاری زیاد و برخی دارای تأثیرپذیری زیاد هستند. در سیستم‌های پایدار سه گروه متغیر شامل متغیرهای بسیار تأثیرگذار بر سیستم (عوامل کلیدی)، متغیرهای مستقل و متغیرهای خروجی

سیستم قابل مشاهده است. در سیستم‌های ناپایدار وضعیت پیچیده‌تر است. در این سیستم متغیرها در حول محور قطری صفحه پراکنده هستند و در بیشتر مواقع حالت بینابینی از تأثیرگذاری و تأثیرپذیری را نشان می‌دهد که ارزیابی و شناسایی عوامل کلیدی را بسیار مشکل می‌کند (گودت، ۲۰۰۳). از وضعیت صفحه پراکندگی متغیرهای تأثیرگذاری بر بحران آب می‌توان نتیجه گرفت وضعیت سیستم بسیار ناپایدار است. بیشتر متغیرها در اطراف محور قطری صفحه پراکنده بودند.

متغیرهای تعیین‌کننده یا تأثیرگذار^۶ بیش‌تر تأثیرگذار بوده و کم‌تر تأثیرپذیرند و بحرانی‌ترین مؤلفه‌ها هستند و تغییرات سیستم وابسته به آن‌هاست و از این رو میزان کنترل بر این متغیرها بسیار مهم است. این متغیرها ورودی سیستم هستند و توسط سیستم قابل کنترل نیستند و بیشتر به عنوان عوامل ثابت محسوب می‌شوند. این متغیرها در قسمت شمال غربی نمودار واقع شده است. چگونگی پراکنش متغیرها نشان داد که عامل رایگان بودن آب در بخش کشاورزی و کشت محصولات آب بر با درجه تأثیرگذاری بالا در سمت شمال غربی نمودار واقع شده است.

متغیرهای دوجبه^۷ به عنوان بازیگران اصلی سیستم شناخته می‌شوند. در صورتی که این متغیرها به خوبی مطالعه و مدیریت نشوند در آینده می‌توانند سبب به وجود آمدن نقطه انفصالی در سیستم مدیریت و بحران آب در منطقه باشند. این متغیرها به دو دسته متغیرهای ریسک و متغیرهای هدف تقسیم می‌شوند. متغیرهای ریسک در اطراف خط قطری ناحیه شمال شرقی نمودار قرار دارند و ظرفیت بسیار زیادی برای تبدیل شدن به بازیگران کلیدی سیستم را دارا هستند. این متغیرها شامل خشک‌سالی، وابستگی به منابع آب خارجی، توجه نکردن کافی به مدیریت منابع آب، کشت بی‌رویه، ضعف فناوری کشاورزی، روش‌های نامناسب آبیاری، سرمایه ناکافی و

سطح پایین نوآوری در زیرساخت‌های آب و تلفات آب در شبکه‌های آبیاری می‌باشند.

متغیرهای هدف در زیر ناحیه قطری شمال شرقی صفحه قرار دارند. این متغیرها در واقع نتایج تکاملی سیستم بوده و نمایانگر اهداف ممکن در یک سیستم هستند. با دست‌کاری و ایجاد تغییرات در این متغیرها می‌توان به تکامل سیستم مطابق برنامه و هدف خود دست یافت. این متغیرها شامل تقاضای روزافزون آب، وجود بیشترین تقاضا در زمان کمترین بارندگی، انتقال آب به زاهدان، کشاورزی ناکارآمد و سنتی و راندمان پایین آبیاری هستند.

متغیرهای تأثیرپذیر^۸ در قسمت جنوب شرقی شکل قرار دارند. آن‌ها تأثیرگذاری پایین و تأثیرپذیری بسیار بالایی دارند و نسبت به تکامل متغیرهای تأثیرگذار و دو وجهی بسیار حساس هستند. متغیرهای گسترش بیابان و کویر، معضل ریزگردها، از بین رفتن زیست‌بوم‌های آبی و توزیع غیریکنواخت آب در بخش کشاورزی خروجی سیستم هستند و از میزان تأثیرپذیری بالا نسبت به سایر عوامل برخوردارند.

متغیرهای مستقل دارای تأثیرگذاری و تأثیرپذیری پایینی هستند این متغیرها در قسمت جنوب غربی نمودار قرار دارند و به دو دسته متغیرهای مستقل از سیستم و متغیرهای مستقل از نتیجه سیستم تقسیم می‌شوند. این متغیرها معمولاً نه باعث توقف یک متغیر اصلی و نه باعث تکامل و پیشرفت یک متغیر در سیستم می‌شوند. این متغیرها نقش کلیدی ندارند اما باید به آن‌ها توجه شود این متغیرها بیش از اینکه تأثیرپذیر باشند، تأثیرگذارند و می‌توانند به عنوان نقاطی برای سنجش و معیار به کار روند؛ و شامل تغییرات اقلیمی، اقدامات توسعه‌ای کشور همسایه (افغانستان)، ساختار نظام مالکیت در بخش کشاورزی و افزایش جمعیت هستند.

متغیرهای تنظیمی در نزدیکی مرکز ثقل نمودار قرار دارند درواقع حالت تنظیمی داشته و گاهی به عنوان اهرمی ثانویه عمل می‌کنند. بستگی به سیاست‌های دولت

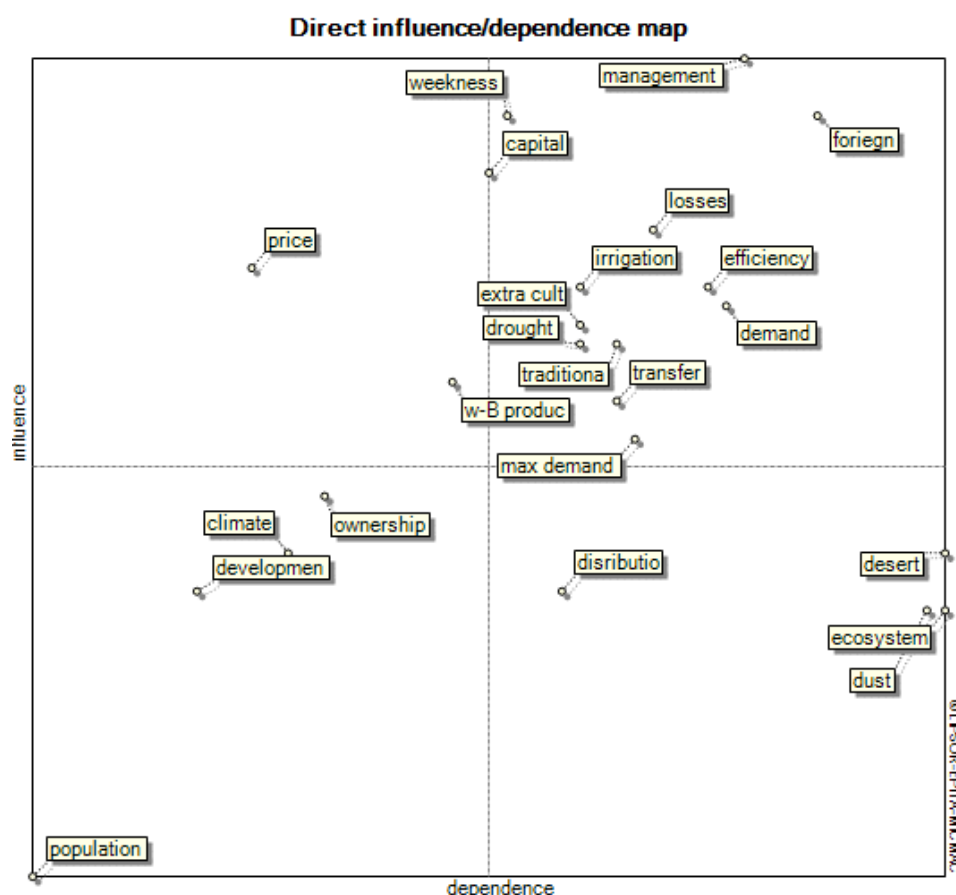
^۸ Dependent variables

^۶ Determinate or influential variables

^۷ Relay variables

و ریسک تبدیل شود و یا انتقال آب به زاهدان و وجود بیشترین تقاضا در زمان کمترین بارندگی در اثر سیاست‌های نادرست می‌تواند به متغیر تعیین‌کننده بحران آب تبدیل شود (گرایی، ۱۳۹۵؛ زالی، ۱۳۹۲؛ گوده و همکاران، ۲۰۰۹).

در خصوص اهداف این متغیرها قابل ارتقا به متغیرهای تأثیرگذار، متغیرهای تعیین‌کننده و یا متغیرهای هدف و ریسک هستند. این متغیرهای شامل کشت محصولات آب بر می‌باشد که می‌توان با اعمال سیاست در برای کاهش کشت این گونه محصولات از متغیر تأثیرگذار به متغیر هدف



شکل ۲- پراکندگی متغیرها و جایگاه آن‌ها در محور تأثیرگذاری- تأثیرپذیری

باهم ادغام و درنهایت هفت عامل کلیدی شامل خشک‌سالی، وابستگی به منابع آب خارجی، توجه نکردن کافی به مدیریت منابع آب، کشت بی‌رویه محصولات آب بر، شیوه نامناسب آبیاری، ضعف تکنولوژیکی کشاورزی و رایگان بودن آب در بخش کشاورزی شناسایی شدند. پس از گروه‌بندی نیروهای پیشران کلیدی تأثیرگذار بر بحران آب به تصویر کشیدن روابط میان آن‌ها می‌تواند به درک بهتر تأثیرگذاری مستقیم آن‌ها کمک کند. ارتباطات و تأثیرگذاری مستقیم بین پیشران‌ها در شکل ۳ نشان داده شد. تأثیرگذاری هر متغیر بر متغیر دیگر توسط "پیکان‌ها" و

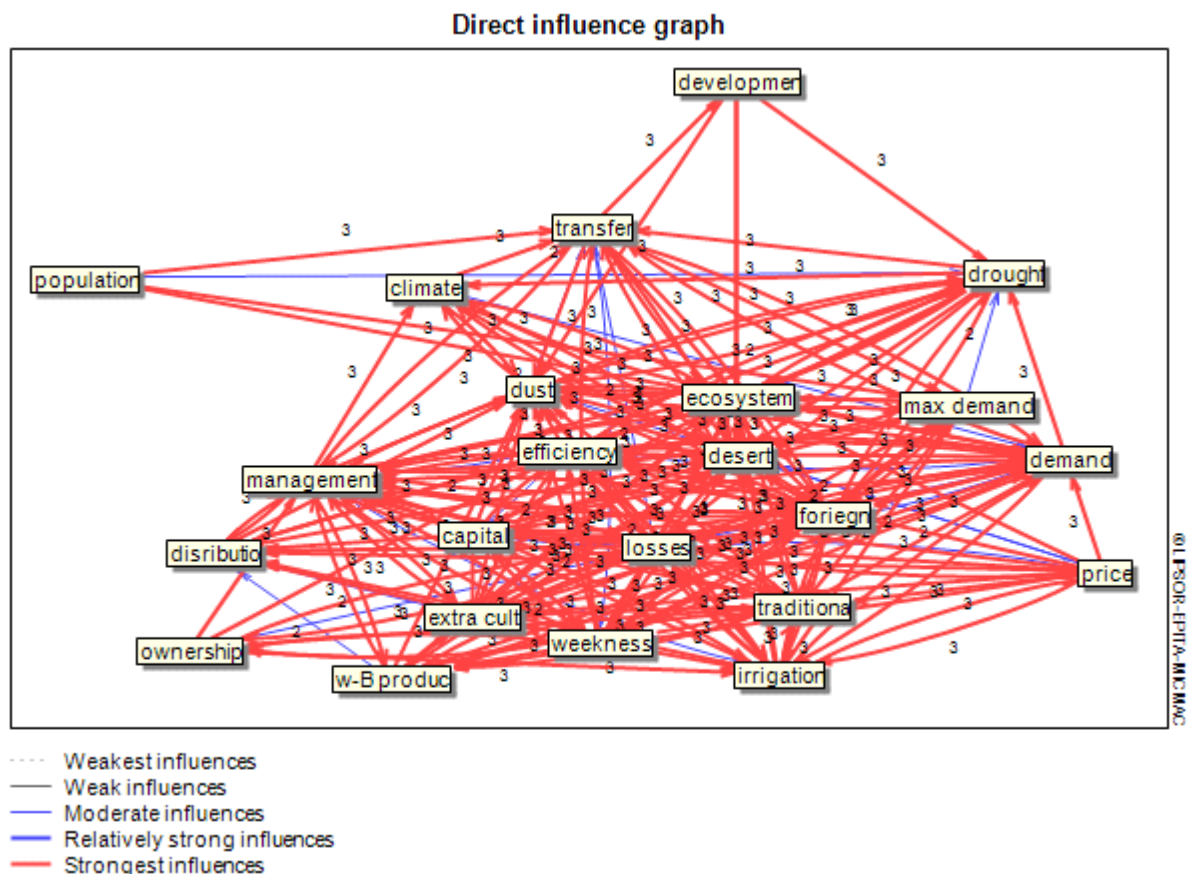
از میان ۲۳ پیشران انتخاب‌شده تعداد ۱۰ پیشران که در شمال شرقی و شمال غربی نمودار قرار دارند و میزان تأثیرگذاری آن‌ها از میزان تأثیرپذیری‌شان بیشتر است به‌عنوان عوامل کلیدی در بحران آب شناسایی شدند. این عوامل عبارت‌اند از: خشک‌سالی، وابستگی به منابع آب خارجی، عدم توجه کافی به مدیریت منابع آب، کشت بی‌رویه، کشت محصولات آب بر، ضعف فناوری کشاورزی، روش‌های نامناسب آبیاری، سرمایه ناکافی و سطح پایین نوآوری در زیرساخت‌های آب، تلفات آب در شبکه‌های آبیاری و رایگان بودن آب در بخش کشاورزی. با توجه به همسانی و نزدیکی برخی عوامل، بعضی از آن‌ها

اندازه تأثیرگذاری به صورت عددی در بالای آن پیکان نمایش داده شد.

انتخاب سناریو

بعد از مشخص شدن مهم ترین عوامل، سه وضعیت محتمل (اگر پیشران در وضعیت فعلی بماند)، خوش بینانه (بهبود شرایط) و بدبینانه (تضعیف شرایط) برای هر یک از عوامل طراحی شد. درواقع این وضعیت راهبردهایی را برای آینده بحران آب در منطقه سیستان در

نظر می گیرند. این وضعیت ها تأثیرگذاری تقویت کننده یا تأثیرگذاری محدودکننده را نیز نشان می دهند. ۲۱ وضعیت احتمالی برای ۷ عامل کلیدی مؤثر بر بحران آب در منطقه سیستان متصور شد از ترکیب این اعداد، ۲۱۷۸ سناریو ترکیبی استخراج می شود که شامل همه وضعیت های احتمالی آینده می باشد. از بین ۲۱۷۸ سناریو ممکن سه سناریو با سازگاری بالا مشخص شد و ۲۱ وضعیت احتمالی برای هفت عامل کلیدی مؤثر بر بحران آب در این سه سناریو برای منطقه سیستان شناسایی شد (جدول ۳).



شکل ۳- روابط مستقیم بین متغیرها (تأثیرات میانه تا بسیار قوی)

جدول ۳- سناریوهای با سازگاری قوی در آینده مسئله بحران آب دشت سیستان

وضعیت	مسئله کلیدی	سناریو
خوش بینانه	خشک سالی	سناریو محتمل نخست
خوش بینانه	وابستگی به منابع آب خارجی	
خوش بینانه	مدیریت منابع آب در بخش کشاورزی	
بدبینانه	کشت بی رویه محصولات آب بر	
خوش بینانه	ضعف فناوری کشاورزی	
خوش بینانه	شیوه آبیاری	
محتمل	رایگان بودن آب در بخش کشاورزی	
خوش بینانه	خشک سالی	سناریو محتمل دوم
خوش بینانه	وابستگی به منابع آب خارجی	
خوش بینانه	مدیریت منابع آب در بخش کشاورزی	
بدبینانه	کشت بی رویه محصولات آب بر	
خوش بینانه	شیوه نامناسب آبیاری	
خوش بینانه	ضعف فناوری کشاورزی	
خوش بینانه	رایگان بودن آب در بخش کشاورزی	
محتمل	خشک سالی	سناریو محتمل سوم
خوش بینانه	وابستگی به منابع آب خارجی	
خوش بینانه	مدیریت منابع آب در بخش کشاورزی	
خوش بینانه	کشت بی رویه محصولات آب بر	
خوش بینانه	شیوه نامناسب آبیاری	
خوش بینانه	ضعف فناوری کشاورزی	
خوش بینانه	رایگان بودن آب در بخش کشاورزی	

کشاورزی در این منطقه می باشد و انگیزه لازم برای جایگزینی تکنولوژی آب اندوز به جای تکنولوژی های موجود فراهم نمی کند.

در سناریو نخست بیشتر بی شران ها در حالت خوش بینانه قرار دارند اما کشت بی رویه محصولات آب بر در حالت بدبینانه و رایگان بودن آب در حالت محتمل (روند فعلی) قرار دارند. در این سناریو بیشتر عوامل کلیدی روند مثبت دارند و با گذشت زمان، تغییرات مثبتی در بحران آب خواهند داشت. با توجه به این سناریو چنانچه در آینده وضعیت خشک سالی از راه افزایش بارندگی، مذاکرات با کشور همسایه برای تأمین حق آب منطقه سیستان، سطح توانمندی های فناوری برای تأمین آب بهبود و میزان وابستگی به منابع آب خارجی کاهش یابد، تخصیص منابع آب بین بخش های مختلف بهینه باشد، الگوی کشت به سمت محصولات با نیاز آبی کمتر تغییر کند، استفاده از سامانه های پیشرفته آبیاری تحت فشار گسترش یابد و فناوری در بخش کشاورزی تقویت شود، همچنین برای

در منطقه سیستان با توجه به اینکه میانگین بارش سالانه کمتر از ۵۰ میلی متر و تبخیر بیش از ۴/۶ متر در سال است این منطقه در شرایط فرا خشک می باشد (سردار شهرکی، ۱۳۹۵). انتظار بر این است این خشک سالی همچنان ادامه داشته باشد و مهم ترین عامل آن، وابستگی کامل به رودخانه مرزی هیرمند است و کلیه بهره برداری های زراعی سیستان تابه حال متکی بر آب هیرمند بوده است (وزارت نیرو، ۱۳۹۰). وجود خشک سالی پی در پی و کمی نزولات جوی در سال های اخیر باعث کمبود منابع آبی در منطقه شده است. همچنین با وجود محدودیت منابع آبی، در این مناطق به خاطر مرسوم بودن روش های آبیاری سنتی هدر رفت آب زیاد است (طاهرزاده، ۱۳۹۳). در دشت سیستان حدود ۶۵ درصد از ترکیب کشت به گندم و جو اختصاص داده شده و پس از آن محصولات جالیزی و یونجه بیشترین سطح زیر کشت را دارند که این محصولات نیاز آبی زیادی دارند (خواجه پور، ۱۳۹۲). رایگان بودن آب در بخش کشاورزی نیز یکی از دلایل اصلی تقاضای زیاد آب

انتقال آب به مزارع آب از طرح‌های کارا مانند انتقال آب با لوله استفاده شود و یا راندمان کاربرد آبیاری افزایش یابد، ولی آب کشاورزی در منطقه سیستان همچنان رایگان باشد و سطح کشت محصولات آب بر در منطقه افزایش یابد می‌توان بر بحران آب در منطقه سیستان غلبه کرد.

در سناریو دوم همه پیشران‌ها به جز سطح کشت بی‌رویه محصولات آب بر در حالت خوش‌بینانه و عوامل کلیدی روند مثبت دارند. در این سناریو نیز اگر سطح زیر کشت محصولات آب بر در آینده افزایش یابد اما دیگر عوامل در حالت خوش‌بینانه باشند باز هم می‌توان بر بحران آب غلبه کرد.

سناریو اول و دوم با ناسازگاری صفر بهترین سناریوها می‌باشند. سناریو سوم با ناسازگاری یک را می‌توان به عنوان یک سناریو برای رفع بحران آب در نظر گرفت، اما اهمیت آن نسبت به دو سناریو دیگر کمتر است. در این سناریو چنانچه خشک‌سالی در حالت وضعیت فعلی خود بوده و در آینده نیز ادامه داشته اما دیگر پیشران‌ها در حالت خوش‌بینانه باشند، باز هم می‌توان با این سناریو بر بحران آب غلبه کرد. هوف و همکاران (۲۰۱۱) در پژوهش خود نشان دادند که سیاست‌های جمعیتی و اقتصادی نقش مهمی در امنیت آینده آب در حوضه رودخانه اردن را دارند. کرمی و غفاریان (۱۳۹۶) نیز در مطالعه خود نشان دادند که عوامل سیاسی، اقتصادی و اقلیمی از مهم‌ترین نیروهای پیشران در آینده بحران آب شهرستان رفسنجان می‌باشند. محمود و همکاران (۲۰۱۱) نیز تغییرات اقلیمی، ویژگی‌های جمعیت شناختی و ساختار اقتصادی را به عنوان مهم‌ترین پیشران‌های مدیریت منابع آبی عنوان نمودند. مهربان قوچانی و همکاران (۱۳۹۸) در پژوهش خود عوامل قیمت واقعی آب کشاورزی، مدیریت منابع آبی و ظرفیت تحویل آب کشاورزی را از مهم‌ترین پیشران‌های مدیریت منابع آب در بخش کشاورزی عنوان نمودند. در تمامی نتایج این پژوهش‌ها نوعی همسویی با نتایج تحقیق حاضر مشاهده می‌شود که در اغلب آن‌ها موضوعات مدیریت منابع آب، شرایط اقلیمی، ساختار اقتصادی و سیاست‌های کشاورزی

به عنوان پیشران‌های اصلی و کلیدی در برنامه‌ریزی و توسعه آینده مناطق مورد مطالعه انتخاب شده‌اند.

احتمال وقوع چالش‌های اقتصادی- اجتماعی بحران آب در بخش‌های مختلف دشت سیستان در شکل ۴ نشان داده شده است.

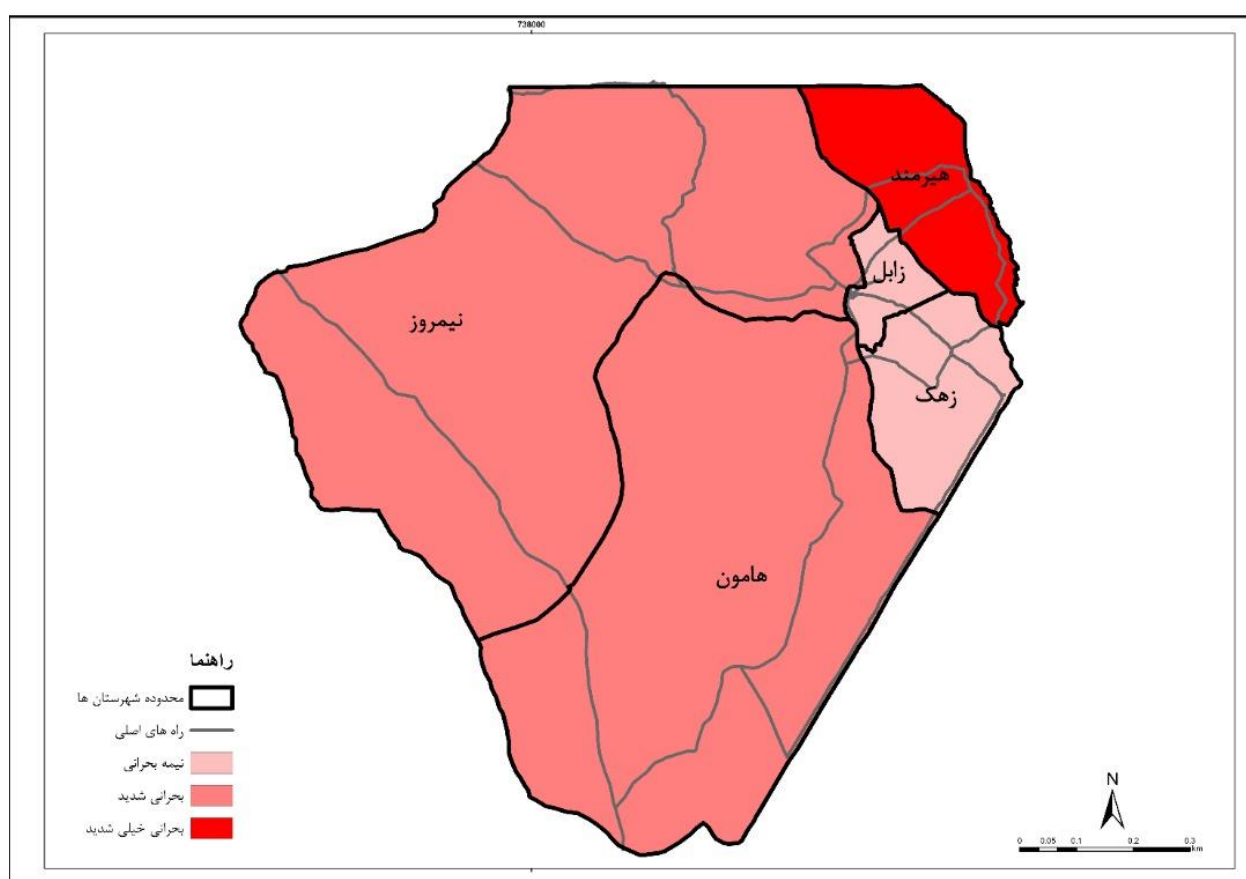
شهرستان هیرمند در وضعیت بحرانی خیلی شدید، هامون و نیمروز در وضعیت بحرانی شدید و زابل و زهک در وضعیت نیمه بحرانی قرار دارند. همچنین ۶/۶ درصد از کل محدوده مطالعه شده در وضعیت بحرانی خیلی شدید، ۸۶ درصد در طیف بحرانی شدید و ۷/۶ درصد در طیف نیمه بحرانی قرار داشتند.

نتیجه‌گیری

این مطالعه با نظرسنجی از کارشناسان و خبرگان در حوزه منابع آبی به بررسی عوامل مؤثر بر بحران آب در دشت سیستان پرداخته و سپس با طراحی و ارائه سناریوهایی، وضعیت آینده آب در دشت سیستان ارزیابی شد. نتایج مطالعه نشان داد از میان ۲۳ پیشران انتخاب شده تعداد ۱۰ پیشران (خشک‌سالی، وابستگی به منابع آب خارجی، عدم توجه کافی به مدیریت منابع آب، کشت بی‌رویه، کشت محصولات آب بر، ضعف فناوری کشاورزی، روش‌های نامناسب آبیاری، سرمایه ناکافی و سطح پایین نوآوری در زیرساخت‌های آب، تلفات آب در شبکه‌های آبیاری و رایگان بودن آب در بخش کشاورزی) که میزان تأثیرگذاری آن‌ها از میزان تأثیرپذیری‌شان بیشتر بود به عنوان عوامل کلیدی در بحران آب شناسایی شدند؛ و با توجه به وضعیت پیشران‌های کلیدی احتمال مواجهه با بحران آبی بیشتر از احتمال خوش‌بینانه آن است، در چنین وضعیتی فقط با داشتن راهبردهای عملی که باید از هم‌اکنون آغاز شود مدیریت بحران آب امکان‌پذیر است. مدیریت منابع آب در ایران نیاز به تغییر وضعیت از مدیریت بحران (انفعالی) به مدیریت پیشگیرانه (فعال) دارد که اجازه ندهد تا مشکلات آب و آسیب‌های زیست‌محیطی به‌طور جدی توسعه یابند؛ بنابراین با توجه به عوامل مؤثر در بحران آب،

تأکید به استفاده از روش‌های نوین آبیاری، ارائه ته‌میدات و تسهیلات لازم برای کشاورزان در استفاده و گسترش روش‌های جدید آبیاری، سرمایه‌گذاری برای افزایش سهم آبیاری مکانیزه، تسریع در روند اجرای پروژه انتقال آب با لوله و بهره‌برداری از آن، استفاده بیشتر از ظرفیت‌های منابع آبی مشترک با کشورهای همسایه بر اساس قوانین بین‌المللی و احقاق حقابه رودخانه هیرمند ایران از راه مذاکرات با افغانستان، اصلاح الگوی کشت و جایگزینی محصولات مقاوم به کم‌آبی، انجام مطالعات در خصوص امکان‌سنجی فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی انتقال آب از دریای عمان به منطقه سیستان، تلاش برای اصلاح الگوی مصرف آب در بخش کشاورزی، توجه به مقوله آب مجازی، اصلاح نظام قیمت‌گذاری آب در مدیریت منابع آب در بخش

کشاورزی و تغییر وضعیت از مدیریت انفعالی به مدیریت کارآمد می‌توان بر بحران آب در دشت سیستان غلبه کرد. بعد از مشخص شدن عوامل بحرانی، سناریو با سازگاری بالا برای مسئله بحران آب در سیستان با استفاده از سناریو ویزارد طراحی شد و شرایط امیدوارکننده‌ای را برای بهبود وضعیت بحران آب نشان می‌دهد که در بین این سناریو‌ها وضعیت‌های خوشبینانه بر دیگر وضعیت‌ها برتری دارد و بیشترین فرض‌ها را تشکیل داده است. سناریوهای مطرح شده برای سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی می‌توانند به تصمیم‌گیران در حوزه منابع آبی کمک نموده و دشت سیستان را از آسیب جدی ناشی از بحران آبی آینده مصون نگاه داشته و از بروز فجایع زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی جلوگیری کنند.



شکل ۴- نقشه پهنه‌بندی خطر بحران آب در محدوده منطقه مورد مطالعه

فهرست منابع

۱. اسکندری، ح. ۱۳۹۲. الگوهای سناریونویسی در مدیریت بحران. بوستان حمید. چاپ اول.
۲. اصلانیان، م.، ب.، کرد، س.، خزایی صحنه، ن.، یعقوبی؛ و ع.، روشن. ۱۳۹۵. رویکردی آینده پژوهانه به برنامه ریزی راهبردی منابع انسانی با استفاده از روش فراترکیب. مجله مدیریت شهری. ۱۵(۴۵): ۳۸۹-۴۱۶.
۳. آمارنامه کشاورزی. ۱۳۹۶. وزارت جهاد کشاورزی. معاونت برنامه ریزی و اقتصادی. تهران. جلد اول. ۱۳۹۶.
۴. بهشتی، م.، د.، بهبودی، ن.، زالی. و ف.، احمد زاده دلجوان. ۱۳۹۹. شناسایی و تحلیل عوامل کلیدی و پیشران های موثر در مدیریت یکپارچه منابع آب بر مبنای رویکرد آینده پژوهی (مطالعه موردی: شهرستان تبریز). اکوهیدرولوژی. ۱۷(۱): ۵۹-۷۶.
۵. پلیکان، ا. ۱۳۹۴. توسعه استراتژی آینده پژوهی و سناریوپردازی. آدینه
۶. جشاری، س. و ا.، مرادی. ۱۳۹۸. تدوین راهبردهای توسعه اقتصاد کشاورزی نواحی روستایی استان سیستان و بلوچستان با رویکرد آینده پژوهی. فصلنامه اقتصاد فضا و توسعه روستایی. ۸(۳): ۵۱-۶۶.
۷. حیدری، ا. ۱۳۹۵. آینده پژوهی و روش دلفی. ترویج علم. ۷(۱۰): ۷۵-۹۳
۸. خواجه پور، ا. ۱۳۹۲. مدلسازی بیمه جریان رودخانه هیرمند. پایان نامه دکتری. دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل.
۹. رضائیان، ا. و ع.، رضائیان. ۱۳۹۵. آینده پژوهی بحران آب در ایران به روش سناریو پردازی. اکوهیدرولوژی. ۱۷(۱): ۱-۱۷.
۱۰. زارع، ع.، س.، حسینی. م.، قبادی. و ج.، افشین. ۱۳۹۸. آینده پژوهی تلاش سیستماتیک در قرن ۲۱. فصلنامه پژوهشهای مدیریت و مهندسی صنایع. ۱۱(۱): ۷۱-۸۲.
۱۱. زالی، ن. ۱۳۹۲. آینده نگاری راهبردی در برنامه ریزی و توسعه منطقه ای تهران. پژوهشکده مطالعات راهبردی.
۱۲. سردار شهرکی، ع. ۱۳۹۵. تخصیص بهینه منابع آب حوزه هیرمند با کاربرد تئوری بازی و ارزیابی سناریوهای مدیریتی. پایان نامه دکتری. دانشکده علوم زیست محیطی و کشاورزی پایدار دانشگاه سیستان و بلوچستان.
۱۳. سلطانی، ج. و ع.، کرباسی. ۱۳۸۱. نقش اجرایی رژیم حقوقی رودخانه هیرمند در تعدیل خشکسالی سیستان. اقتصاد کشاورزی و توسعه. ۱۰(۳۸): ۱۵۵-۱۸۴.
۱۴. طاهر زاده، آ. ۱۳۹۳. ارزیابی وضعیت منابع آب کشاورزی استان سیستان و بلوچستان بر اساس تحلیل SWOT و فرایند تحلیل شبکه ای (ANP). پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه سیستان و بلوچستان.
۱۵. عظیمی، ع. ۱۳۹۶. آینده پژوهی تامین آب کشاورزی جهت تولید گندم تا ۱۴۰۴ جمهوری اسلامی ایران. پایان نامه دکتری. دانشگاه بین المللی امام خمینی.
۱۶. علی بیگی، ج.، ح.، جلالیان، ف.، عزیزپور. و ح.، مهدی زاده. ۱۳۹۷. شناسایی عوامل کلیدی آینده پژوهی اثرات اجرای طرح انتقال آب رودخانه سیروان (طرح سامانه گرمسیری) بر تحولات مکانی - فضایی (مطالعه موردی: شهرستان مهران- استان ایلام). تحقیقات منابع آب ایران. ۱۴(۳): ۱۱۸-۱۳۲.
۱۷. غفاریان بهرمان، و. و ت.، کرمی. ۱۳۹۶. آینده پژوهی بحران آب و چالش های امنیتی آن (مطالعه موردی: شهرستان رفسنجان). فصلنامه علمی- تخصصی دانش انتظامی. ۸(۲۱): ۴۹-۷۹.
۱۸. گرابی، ا. ۱۳۹۵. آینده نگاری راهبردی آموزش علم اطلاعات و دانش شناسی در ایران با رویکرد برنامه ریزی سناریومبنا. پایان نامه دکتری. دانشگاه شهید چمران اهواز

۱۹. مختاری، د. و ا.، صالح. ۱۳۸۶. تحلیل ابعاد اقتصادی و اجتماعی خشکسالی و آثار آن بر خانوارهای روستایی در منطقه سیستان. ششمین کنفرانس اقتصاد کشاورزی. مشهد. ایران.
۲۰. مردوخ، ب. ۱۳۹۱. روش شناسی آینده نگری. اکسیر. تهران.
۲۱. هاشمیان اصفهانی، م. ۱۳۸۹. آینده‌نگاری علم و فناوری: آینده‌نگاری و ارزیابی رقبای منطقه و پیشگامان جهانی در حوزه‌ی علم و فناوری. مرکز نشر دانشگاهی. تهران.
۲۲. وزارت نیرو. ۱۳۹۰. گزارش برنامه ریزی منابع آب رودخانه و مخازن چاه‌نیمه های سیستان، جلد دوم، شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان سیستان و بلوچستان، زابل.
23. AghaKouchak, A. 2015. Recognize anthropogenic drought. *Nature*, 524 (7566): 409
24. Allan, J.A. 1993. Fortunately There Are Substitutes for Water Otherwise Our Hydro-Political Futures Would Be Impossible, In: ODA, Priorities for Water Resources Allocation and Management ODA. London.
25. Bartkowiaka, A. and P. Bartkowiaka. 2017. Technical and Technological Progress in the Context of Sustainable Development of Agriculture in Poland. 7th International Conference on Engineering, Project and Production Management.
26. Burek, P., Y. Satoh, G. Fischer, M.T. Kahil, A. Scherzer, and S. Tramberend. 2016. Water Futures and Solution: Fast Track Initiative (Final Report). IIASA Working Paper. Laxenburg, Austria, International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA).
27. Fahey, L. and M. Robert. R. 2011. Learning from the future, Competitive foresight scenario. Canada John Wiley & Sons Inc.
28. Ghoochani, O., D. Dabiri, and M. Ghanian. 2019. Major Driver Forces of Water Resources management in the Iranian Agricultural Sector. *Public Policy*. 5(2): 59-78.
29. Godet, A. J., M. F. Meunier, and F. Roubelat. 2003. Structural analysis with the MICMAC method & actors' strategy with MACTOR Kauffman nets to multidisciplinary systems analysis. *Physica*. 378:3689-3700.
30. Godet, M. 1991. From anticipation to action. Paris. UNESCO publishing;
31. Godet, M., and P. Durance. 2011. Strategic Foresight for Corporate and Regional Development. Dunod and Unesco.
32. Godet, M., P. Durance, and A. Gerber. 2009. Strategic foresight: Use and misuse of scenario building. Paris: Dunod.
33. Gomesa, B., A. Banosa, and K. Rochab. 2018. Agricultural land fragmentation analysis in a peri-urban context: From the past into the future. *Ecological Indicators*. 97: 380-388.
34. Gordon, T. J. 2012. Cross-Impact Analysis, in *Futures Research Methodology Version 3.0*. American Council for the United Nations University: The Millennium Project.
35. Hamlat, A., M., Errih, and A. Guidoum. 2012. Simulation of water resources management scenarios in western Algeria watersheds using WEAP model. *Arabian Journal of Geosciences*. 6(7):1-12.
36. Hausmann, C., and S. Patrick. 2013. Contingency Planning: Trade's Role in Sustainable World Food Security. *Aquatic Procedia*. 1: 20-29.
37. Hoff, H., C. Bonzi, B. Joyce, and K. Tielbörger. 2011. A water resources planning tool for the Jordan River Basin. *Journal of Water*. 3:718-736
38. Li, M., J. Li, V.P. Singh, Q. Fu, D. Liu, and G. Yang. 2019. Efficient allocation of agricultural land and water resources for soil environment protection using a mixed optimization-simulation approach under uncertainty. *Geoderma*. 353: 55-69.
39. Liu, D., W. Liu, Q. Fu, Y. Zhang, T. Li, K.M. Imran, and F.M. Abrar. 2017. two-stage multi-water sources allocation model in regional water resources management under uncertainty. *Water Resource Management*. 31 (2): 1-19.
40. Mahmoud, M .I, H.V. Gupta, and S. Rajagopal. 2011. Scenario development for water resources planning and watershed management: Methodology and semi-arid region case study. *Environmental Modelling & Software*. 26(7): 873-885.
41. Pandey, G. 2018. Challenges and Future Prospects of Agri-nanotechnology for Sustainable Agriculture in India. *Environmental Technology & Innovation*.

42. Pastori, M. 2017. A multi-objective approach to evaluate the economic and environmental impacts of alternative water and nutrient management strategies in Africa. *Journal Environment Information*. 29 (1): 16-28.
43. Popper, R. 2008. How foresight methods are selected, *foresight*. 10(6): 62-89.
44. Sadati, SK., S. Speelman, M. Sabouhi, M. Gitizadeh, and B. Ghahraman. 2014. Optimal irrigation water allocation using a genetic algorithm under various weather conditions. *Water*. 6(10): 3068–3084.
45. Sadegh, M., N. Mahjouri, and R. Kerachian. 2010. Optimal inter-basin water allocation using crisp and fuzzy Shapley games. *Water Resources Manage*. 24 (10): 2291–2310.
46. Schütze, M., G. Robleto, C. León, and I. Rodriguez. 2011. Modelling and scenario building of urban water and wastewater systems – Addressing water shortage in Lima, 12th International Conference on Urban Drainage. 2011. 11.-16.09. Porto Alegre/Brasil.
47. Schweizer, V., and J. Kurniawan, 2016. Systematically linking qualitative elements of scenarios across levels, scales, and sectors. *Environmental Modelling & Software*. 79: 322-333.
48. Villacorta, P., A.D. Masegosa, D. Castellanos, and M.T. Lamata. 2012. A linguistic approach to structural analysis in prospective studies. In *Advances on Computational Intelligence*: 150-159 Springer Berlin Heidelberg.
49. Wang, Y., J. Yang, and J. Chang. 2019. Development of a coupled quantity-quality-environment water allocation model applying the optimization-simulation method. *Journal of Cleaner Production*. 213: 944-955.

An Analysis of the Water Crisis under Different Scenarios in the Agriculture Sector of Sistan Region: the Approach of Future Studies

**Z. Ghaffari Moghadam, E. Moradi¹, M. Hashemi Tabar, and
A. Sardar Shahraki**

PhD student, Department of Agricultural Economics, Management and Economic Faculty, university of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.

ghafari.zahra1@gmail.com

Associate Professor, Department of Agricultural Economics, Management and Economic Faculty, university of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.

Eb_moradi@eco.usb.ac.ir

Associate Professor, Department of Agricultural Economics, Management and Economic Faculty, university of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.

mhashemi@hamoon.usb.ac.ir

Associate Professor, Department of Agricultural Economics, Management and Economic Faculty, university of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.

a.s.shahraki@eco.usb.ac.ir

Received: May 2021, and Accepted: September 2021

Abstract

The purpose of this study was to gain a better understanding of the future of water in the agricultural sector of the Sistan region. In this study, to determine the final drivers, we relied on Future Studies techniques and, by using the Expert Panel method, 23 drivers were identified and seven main drivers affecting the Sistan water crisis were used to write the scenarios by Delphi method. These factors included drought, dependence on external water resources, the lack of sufficient attention to water resources management, careless cultivation of crops with high water requirement, inappropriate irrigation methods, technological weakness of agriculture, and free water charges in the agriculture sector. Also, 86% of the Sistan region will be exposed to a severe water crisis in the future according to the hazard zonation map. Furthermore, probable conditions for each of these factors were presented, and using that, 3 scenarios with high acclimatization include the first, second, and third scenarios for the water crisis in Sistan, which were designed using the Wizard Scenario software. In these scenarios, three situations including: possible state (if the drivers remain in the current state), optimistic state (improvement of the condition), and pessimistic state (weakening of the condition) were designed for each of the factors. Cultivation of crops with high water requirement were in a pessimistic state, free water and drought in a possible state, and the other drivers in an optimistic state. In these scenarios, optimistic conditions were superior to others and formed most of the assumptions. It is expected that these scenarios would improve water and agricultural conditions in the Sistan Plain.

Keywords: Expert Panel method, Future of water in agriculture, Scenario Wizard, Delphi method

¹ .Corresponding Author: Agricultural Economics Department, Management and Economic Group, university of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.

Yield Evaluation of Some *Salicornia* Species and Ecotypes Irrigated with Seawater and Groundwater

G.H. Ranjbar ¹, F. Dehghani, A. AlaEddin, V. Soltani GerdFaramarzi, and S. Keshtkar

Assistant Professor, National Salinity Research Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Yazd, Iran.

ranjbar71@gmail.com

Assistant Professor, National Salinity Research Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Yazd, Iran.

dehghany47@gmail.com

Ghadir Center, College and Research Institute of Passive Defense, Emam Hossein University, Tehran, Iran.

arash3568@gmail.com

Researcher, National Salinity Research Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Yazd, Iran.

valisoltani1355@gmail.com

Researcher, Bushehr Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Yazd, Iran.

sardar.keshtkar@gmail.com

Received: July 2021, and Accepted: September 2021

Abstract

Lack of fresh water resources has led to production of salt tolerant species. This study was conducted in 2019-2020 to investigate the effect of irrigation water salinity on forage yield, plant height, and shoot ash content of *Salicornia bigelovii* and native *Salicornia* ecotypes including Bushehr (*S. sinus persica*), Central Plateau, Gorgan and Urmia of *S. persica* under irrigation with Persian Gulf (60 dS m⁻¹) and groundwater (20 dS m⁻¹), in Bushehr and Yazd conditions, respectively. Results showed that there were significant differences between the species and ecotypes in terms of fresh and dry weight of forage in both conditions. The highest fresh and dry weight of forage were related to Bushehr ecotype in both conditions, but the lowest of these traits were in *S. bigelovii* in Yazd and in Gorgan and Urmia ecotypes in Bushehr conditions. The amount of fresh forage for Bushehr ecotype were about 9333 and 22940 g m⁻² in Bushehr and Yazd, respectively. In general, plant height under seawater irrigation conditions varied from 23.0 cm to 35.5 cm in Bushehr condition, and 56.5-78.0 cm in Yazd condition under saline groundwater. Regardless of species and ecotypes, the average shoot ash content in Bushehr and Yazd conditions were, respectively, 53.83% and 47.76%. Based on the results of the study, Bushehr ecotype could be considered as superior for planting and forage production in the southern coastal strip. In Yazd condition, due to better water quality, all species and ecotypes produced high fodder yield. However, due to high water requirement of *Salicornia*, its production in arid areas, especially in the central regions of the country, is not recommended.

Keywords: *Salicornia bigelovii*, Bushehr ecotype, highly saline water, Forage production, Halophytes

¹ - Corresponding author: National Salinity Research Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Yazd, Iran.

Effects of Different Levels of Wheat Biochar and Water Stress on Quantitative and Qualitative Characteristics of Carla (Bitter Melon) in Potted Conditions

E. Mir, H. Piri ¹, and A. Naserin

MSc. student, Department of Water Engineering, College of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran.
esmaealmir@gmail.com

Assistant Professor, Department of Water Engineering, College of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran.

h_piri2880@uoz.ac.ir

Assistant Professor, Department of Water Engineering, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Mollasani, Iran.

a.naserin@asnrukh.ac.ir

Received: December 2020, and Accepted: September 2021

Abstract

Carla is a medicinal plant whose fruit is used to treat diabetes. In this study, the effect of water stress and biochar on the qualitative and quantitative parameters of Carla plant was investigated. The experiment was performed in greenhouse conditions in a factorial manner and in a completely randomized design with three replications. Treatments included three irrigation water treatments (50%, 75%, and 100% of the water requirement) and four biochar treatments (zero, 1.25%, 2.5%, and 5% by weight of potting soil). During the growing season, water treatments were applied by weekly weighing of the pots and replenishing the water loss up to Field Capacity. The amount of water added to each pot was measured. Harvest at 50 days after planting was done once a week. A total of five harvests were performed. In each harvest, quantitative parameters including plants height, number, weight, diameter and length of fruit, and qualitative parameters of fruit sugar content, greenness index, and leaf area index in each pot were carefully measured. Also, the yield and efficiency of irrigation water consumption at the end of the planting season was determined in each treatment. The results showed that the effects of irrigation water and biochar levels were significant (at 1% and 5% probability) on the measured parameters. With decrease in irrigation water, the amount of quantitative parameters and plant yield decreased. The highest value of the measured parameters was obtained from 100% irrigation water treatment, which was not significantly different from the 75% irrigation water treatment. The use of biochar up to 2.5% by weight of soil increased the parameters. Use of the right amount of biochar reduces the negative effects of stress and improves plant growth compared with the control treatment. Therefore, use of biochar for plants, especially when the plant is under water stress, can be recommendable. In order to reduce the amount of water used in greenhouses and improve plant growth and yield, biochar use is advisable, however, its use under field conditions should be tested.

Keywords: Fruit sugar, Greenness index, Leaf area index, Water Use Efficiency

¹ - Corresponding author: Department of Water Engineering, College of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran.

Uncertainty Analysis of the SWAP Model in a Sugarcane Field with Subsurface Controlled Drainage

F. Parchami-Araghi¹ and A. Sadeghi-Lari

Assistant Prof., Agricultural Engineering Research Department, Ardabil Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Ardabil, Iran.

f.parchamiaraghi@areeo.ac.ir

Department of Agriculture, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran.

adnansadeghi@yahoo.com

Received: April 2, 2021, and Accepted: September 2021

Abstract

It is important to assess the uncertainties involved in agro-hydrologic simulations because they are subject to varying degrees of uncertainty. Uncertainty analysis of the agro-hydrological models can provide useful insights into the degree of confidence in the model results. In this study, uncertainty analysis of a distributed application of the SWAP model to a sugarcane field with subsurface controlled drainage was conducted using a hybrid uncertainty analysis scheme, combining Generalized Likelihood Uncertainty Estimation (GLUE) and Unified Particle Swarm Optimization (UPSO). The results revealed a high variability of the calibrated parameters and the necessity of an uncertainty assessment for the SWAP simulations. Strong parameter correlations highlighted the need for calibration of the model parameters against diverse calibration data in a simultaneous manner. The 95% prediction uncertainty bands obtained for the hydrological (soil water content, water table level, sub-surface drainage outflow), solute transport (soil water solute concentration and sub-surface drainage outflow salinity), and biophysical (leaf area index, cane, and sucrose dry yield) simulations enveloped 73-80%, 45-58%, and 75-100% of the corresponding total observed data (including both calibration and validation datasets), respectively, with an r-factor (the ratio of the average thickness of the 95PPU band to the standard deviation of the corresponding measured variable) of 0.83-0.98, 1.43-1.96, and 0.75-1.11. The thickness of the derived 95PPU bands for the biophysical simulations showed an increasing trend over the simulation period.

Keywords: Generalized Likelihood Uncertainty Estimation, Soil salinity, Soil hydraulic parameters, Unified Particle Swarm Optimization

¹ - Corresponding author: Agricultural Engineering Research Department, Ardabil Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Ardabil, Iran.

Meta-Analysis of Surface and Drip Fertigation Effectiveness on Crop Yield, Fertilizer, and Water Productivity

R. Delbaz, H. Ebrahimian¹, F. Abbasi, and A. Nazi Ghameshlou

MSc graduate, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

reza.delbaz@ut.ac.ir

Associate Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

ebrahimian@ut.ac.ir

Professor of Agricultural Engineering Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.

fariborzabbasi@ymail.com

Assistant Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

a.ghameshlou@ut.ac.ir

Received: February 2021, and Accepted: September 2021

Abstract

The explosive growth of science and the dissemination of various results have confused researchers in various fields. Simple surveys and reviews of results collected in a specific area seem necessary. Meta-analysis as a structured method and using statistical methods aggregate the results of studies on a subject. In this study, in order to assess the surface and drip fertigation based on crop yield and water and fertilizer productivity, a meta-analysis approach was used. For this purpose, studies of eight databases were recruited, and, after reviewing them, 21 studies had the conditions to enter the meta-analysis. Combined results showed that both surface and drip fertigation methods significantly increased the indicators of crop yield and water and fertilizer productivity. Measuring the effect size of the results for crop yield in surface and drip fertigation methods compared to surface irrigation with traditional fertilization method was equal to 1.32 and 1.25, respectively. The effect size of water productivity for surface and drip fertigation compared to surface irrigation with traditional fertilization methods was 1.24 and 1.74. These values were 2.12 and 1.43, respectively, in terms of fertilizer productivity. Therefore, both surface and drip fertigation methods increase crop yield and water and fertilizer productivity. The results of this study are derived from the quantitative data of preliminary studies, to achieve higher accuracy, it is suggested that further studies be examined by meta-analysis.

Keywords: Systematic review, Irrigation, Effect size, Fertilizer application

¹ - Corresponding author: Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

Development of Production Functions for Important Cereals of Qazvin Plain under Water Shortage and Salinity Stress Using AquaCrop Model and Artificial Neural Network

S. Bulukazari, H. Babazadeh ¹, N. A. Ebrahimi-Pak, S. H. Mosavi-Jahromi, and H. Ramezani-Etedali

Ph.D. Candidate, Department of Water Science and Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Sara.bulukazari@yahoo.com

Professor, Department of Water Science and Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

h_babazadeh@hotmail.com

Associate Professor, Department of Irrigation, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Promotion Organization, Karaj, Iran.

nebrahimipak@yahoo.com

Professor, Department of Civil Engineering, Shahr-e-Qods Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

h-mousavi@srbiau.ac.ir

Associate Professor, Department of Water Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

ramezani@eng.ikiu.ac.ir

Received: May 2021, and Accepted: September 2021

Abstract

In exploitation of low-quality water in arid and semi-arid regions, irrigation management is essential to increase water use efficiency. Determination of crop-water-salinity production function is an essential tool for proper irrigation management. In this study, the AquaCrop model was first evaluated by considering 4 soil and water salinity levels and 4 deficit irrigation levels for the major cereal crops including wheat, barley, and corn in Qazvin Plain. The results showed that the coefficients of determination for wheat, barley, and corn yield were 0.97, 0.86 and 0.91, respectively. Therefore, the model can evaluate the performance in salinity and deficit irrigation conditions with a good approximation. To determine the optimal production functions of each crop, the results of the plant model were compared with three models of linear and nonlinear regression, and artificial neural network. The neural network model was able to estimate the performance compared to the AquaCrop model with lower error and higher correlation (0.99). These values in the linear function for wheat, barley, and corn were 0.98, 0.95, and 0.78 and in the nonlinear function as 0.92, 0.86 and 0.81, respectively. Also, the error calculated in the neural network method for wheat, barley, and maize was 40.16, 62.09, and 57.08 kg, respectively, which were less than the linear model by 75 %, 70 %, and 95 %; and less than the exponential model by 90 %, 85 %, and 93%, respectively. The best trained network for determining the water-salt production function for barley and wheat 5 Nero and for corn 7 Nero was introduced in the single layer structure. Sensitivity analysis on wheat and barley showed that this model had low sensitivity to irrigation and salinity parameters and only corn plant showed a moderate range sensitivity to salinity parameter.

Keywords: Sensitivity Analysis, Wheat, Barley, Corn, Irrigation management

¹ - Corresponding Author: Department of Water Science and Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Effect of Drought and Salinity Stress on Estimation of Forage Maize Yield through Periodic Evapotranspiration Using Different Models

R. Saeidi¹

Ph.D. of irrigation and drainage Engineering, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.
saeidi@org.ikiu.ac.ir

Received: July 2021, and Accepted: September 2021

Abstract

Determining the intra-seasonal sensitivity of maize evapotranspiration to environmental stresses has an important effect on modeling of yield. In this research, the effect of drought and salinity stresses were investigated on the relative evapotranspiration (during initial, development, mid, and late stages) and relative yield of maize, in a field with sandy loam soil texture. Salinity treatments were applied by water with EC of 0.5(S_0), 2.1(S_1), 3.5(S_2), and 5.7(S_3) dS.m⁻¹. Drought treatments included four irrigation levels of 100% (I_0), 80% (I_1), 60% (I_2), and 40% (I_3) of the crop water requirement. The experiment was performed as factorial in a randomized complete block design, with three replications. The relative evapotranspiration of maize in the initial, development, middle and final stages was estimated between 63.5-100%, 62.6-100%, 55.2-100%, and 66.4-100%, respectively. The relative yield of maize in the I_0S_0 to I_3S_3 treatments was calculated between 42.6-100%. The results showed that salinity and drought stresses reduced both the evapotranspiration and maize yield. Also, evapotranspiration decreased with a steeper slope in sensitive growth stages compared to yield. Effect of the mentioned stresses at sensitive growth stages caused disruption in the flowering and fruiting of maize. In this study, the relative yield of maize was modeled by additive models of Blank, Stuart, Singh and multipliable models of Jensen, Rao, and Minhas. According to the results, Stewart model with sensitivity coefficients (in four growth stages) of 0.227, 0.416, 0.604, 0.14 and Jensen model with sensitivity coefficients of 0.301, 0.41, 0.608, and 0.147 were selected as the optimal models. However, Rao, Blank, Singh, and Minhas models were chosen as the next priorities. Therefore, under salinity and drought stress, the relative yield of maize was modeled based on the amount of evapotranspiration in the growth stages.

Keywords: Experimental models, Growth stages, Relative evapotranspiration, Relative yield, Sensitivity coefficients

¹ - Corresponding author: Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

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

Journal of Water Research in Agriculture

Vol. 35, No. 2
2021

***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 Professor, 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
Fatemeh Aghajani

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



Journal of Water Research in Agriculture

wra.areeo.ir



Volume 35/ No 2/ 2021

ISSN: 2228-7140

Contents

Subject

Page

Effect of Drought and Salinity Stress on Estimation of Forage Maize Yield through Periodic Evapotranspiration Using Different Models.....8

R. Saeidi

Development of Production Functions for Important Cereals of Qazvin Plain under Water Shortage and Salinity Stress Using AquaCrop Model and Artificial Neural Network.....9

S. Bulukazari, H. Babazadeh, N. A. Ebrahimi-Pak, S. H. Mosavi-Jahromi, and H. Ramezani-Etedali

Meta-Analysis of Surface and Drip Fertigation Effectiveness on Crop Yield, Fertilizer, and Water Productivity.....10

R. Delbaz, H. Ebrahimian, F. Abbasi, and A. Nazi Ghameshlou

Uncertainty Analysis of the SWAP Model in a Sugarcane Field with Subsurface Controlled Drainage.....11

F. Parchami-Araghi and A. Sadeghi-Lari

Effects of Different Levels of Wheat Biochar and Water Stress on Quantitative and Qualitative Characteristics of Carla (Bitter Melon) in Potted Conditions.....12

E. Mir, H. Piri, and A. Naserin

Yield Evaluation of Some Salicornia Species and Ecotypes Irrigated with Seawater and Groundwater.....13

G.H. Ranjbar, F. Dehghani, A. AlaEddin, V. Soltani Gerdafamarzi, and S. Keshtkar

An Analysis of the Water Crisis under Different Scenarios in the Agriculture Sector of Sistan Region: the Approach of Future Studies.....14

Z. Ghaffari Moghadam, E. Moradi, M. Hashemi Tabar, and A. Sardar Shahraki