



پژوهش آب در کشاورزی

Wra.areeo.ac.ir

ISSN: 2228-7140

ب / جلد ۳۹ / شماره ۱ / سال ۱۴۰۴

صفحه

عنوان

۱..... بررسی اثر عوامل مختلف آب، خاک، مدیریت آبیاری و بارش در برنامه ریزی آبیاری گندم با استفاده از نرم افزار نیاز آب..... حسین جعفری، نیاز علی ابراهیمی پاک و آرش تافته

۲۱..... بررسی رابطه عملکرد زیست توده ذرت با آب کاربردی در مراحل مختلف رشد در تنش همزمان آبی - کودی فرامرز زرگریعقوبی، مهدی سرائی تبریزی، علی محمدی ترکشوند، مهرداد اسفندیاری و هادی رضانی اعتدالی

بررسی اثر پارامترهای طراحی سامانه آبیاری زیرسطحی با لوله های پی وی سی سوراخ دار بر تغییرات رطوبت خاک و دور آبیاری درختان پسته عیسی اسفندیارپور، ناصر صداقتی، سید جواد حسینی فرد، سمیه صدر و سعید کلانتری

برآورد تبخیر- تعرق مرجع روزانه با بهره گیری از راهبرد ترکیب الگوریتم بهینه سازی گرادیان نزولی تصادفی با شبکه عصبی مصنوعی داوود زارع حق، شیلا شیرازی، سعید صمدیان فرد و فاطمه میکائیلی

۸۱..... بررسی اثر تغییر اقلیم بر عملکرد دانه و زیست توده گیاه گندم در دو سطح تنش شوری و آبی فاطمه حاجی آبادی، فرزاد حسن پور، مصطفی یعقوب زاده و حسین حمامی

۹۵..... ارزیابی لوله های آبیاری قطره ای زیست تخریب پذیر از نظر فنی و بهره وری آب آبیاری محمد هادی محمدی، محمدرضا خالدیان و جمالعلی الفتی چیرانی

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

جلد ۳۹ شماره (۱)
۱۴۰۴

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

اعضاء هیأت تحریریه (به ترتیب حروف الفبا):

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

چهار شماره
دکتر حمید سیادت
مهندس فاطمه آقاجانی

تعداد انتشار در سال:
ویراستار انگلیسی:
صفحه آرایی:

پایگاه الکترونیکی نشریه پژوهش آب در کشاورزی: <http://www.wra.areo.ir>
پایگاه الکترونیکی مؤسسه تحقیقات خاک و آب: www.swri.ir
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 سیویلیکا: [https://civilica.com](http://civilica.com)
پایگاه با نك اطلاعات نشریات کشور (Magiran): [https://www.magiran.com](http://www.magiran.com)

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

- ۱..... بررسی اثر عوامل مختلف آب، خاک، مدیریت آبیاری و بارش در برنامه ریزی آبیاری گندم با استفاده از نرم افزار نیازآب..... حسین جعفری، نیازعلی ابراهیمی پاک و آرش تافته
- ۲۱..... بررسی رابطه عملکرد زیست توده ذرت با آب کاربردی در مراحل مختلف رشد در تنش همزمان آبی- کودی فرامرز زرگریعقوبی، مهدی سرائی تبریزی، علی محمدی ترکاشوند، مهرداد اسفندیاری و هادی رضائی اعتدالی
- ۴۳..... بررسی اثر پارامترهای طراحی سامانه آبیاری زیرسطحی با لوله های پی وی سی سوراخ دار بر تغییرات رطوبت خاک و دور آبیاری درختان پسته عیسی اسفندیارپور، ناصر صداقتی، سید جواد حسینی فرد، سمیه صدر و سعید کلانتری
- ۶۵..... برآورد تبخیر- تعرق مرجع روزانه با بهره گیری از راهبرد ترکیب الگوریتم بهینه سازی گرادیان نزولی تصادفی با شبکه عصبی مصنوعی..... داوود زارع حق، شیلا شیرازی، سعید صمدیان فرد و فاطمه میکائیلی
- ۸۱..... بررسی اثر تغییر اقلیم بر عملکرد دانه و زیست توده گیاه گندم در دو سطح تنش شوری و آبی..... فاطمه حاجی آبادی، فرزاد حسن پور، مصطفی یعقوب زاده و حسین حمای
- ۹۵..... ارزیابی لوله های آبیاری قطره ای زیست تخریب پذیر از نظر فنی و بهره وری آب آبیاری..... محمدهادی محمدی، محمدرضا خالدیان و جمالعلی الفتی چیرانی

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

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

الف) اصول کلی

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

ب) نحوه تهیه و ارسال مقاله

نحوه نگارش مقاله

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

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

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

شناسنامه مقاله

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

برگ شناسه

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

عنوان مقاله

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

چکیده

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

واژه‌های کلیدی

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

نتایج

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

در نمودارها از نشانه‌های 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

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

تشکر و قدردانی

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

فهرست منابع

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

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

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

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

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

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

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

مثال‌های برای تنظیم منابع

مقاله از مجله

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

مقاله از کارگاه آموزشی یا علمی

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

مطلب از کتاب

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

مطلب نقل شده یک نویسنده در یک مجموعه مقالات

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

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

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

ذکر مطلب از اینترنت

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

مقاله با یک نویسنده

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

مقاله با دو نویسنده

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

مقاله با سه نویسنده

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

مقاله با بیش از سه نویسنده

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

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

منابع مورد استفاده در متن بدین صورت نگاشته شوند:

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

اسمیت (۲۰۰۲) گزارش کرد ...

اسمیت و جونز (۲۰۰۲) گزارش کردند...

اسمیت و همکاران (۲۰۰۲) گزارش کردند...

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

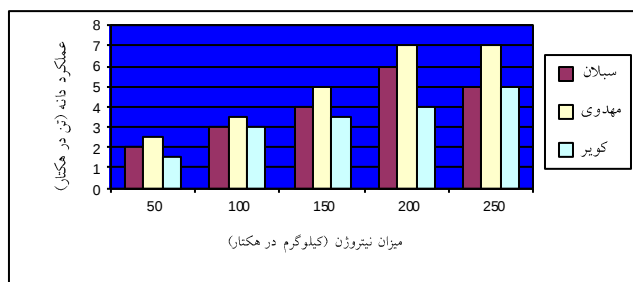
جدول نامناسب

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

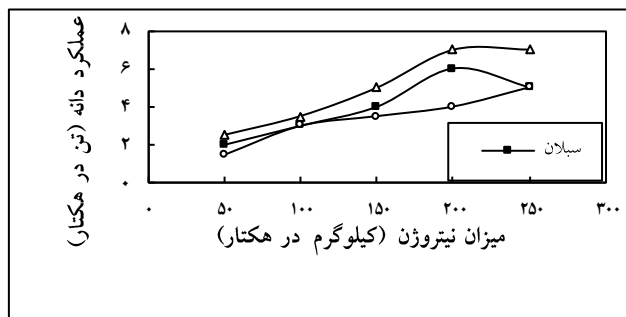
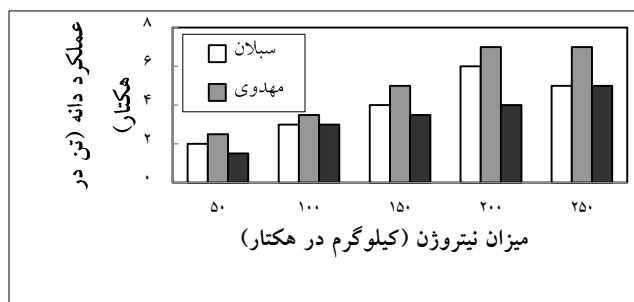
جدول مناسب

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

شکل نامناسب



شکل مناسب



نشریه علمی پژوهش آب در کشاورزی

دکتر مهدی اکبری.....	۳ دآوری
دکتر مسعود پارسی نژاد.....	۱ دآوری
دکتر آرش تافته.....	۳ دآوری
دکتر شاهرخ زندپارسا.....	۱ دآوری
دکتر محمد عبدالهی عزت آبادی.....	۱ دآوری
دکتر علی اصغر فرشی.....	۳ دآوری
دکتر عبدالمجید لیاقت.....	۱ دآوری
دکتر فاطمه مسکینی.....	۱ دآوری
دکتر منصور معیری.....	۴ دآوری
دکتر میلاد نوری.....	۳ دآوری
دکتر شادمان ویسی.....	۳ دآوری
مهندس هوشنگ یزدانی.....	۲ دآوری

فرم تعهد نامه

نشریه پژوهش‌های آب در کشاورزی

اینجانب نویسنده مسئول مقاله زیر:

- سال‌های اجراء آزمایش ذکر شود

موارد زیر را به آگاهی می‌رسانم:

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

نام نام خانوادگی نویسنده اول: امضاء نویسنده اول مقاله

نام نام خانوادگی نویسنده دوم: امضاء نویسنده دوم مقاله

نام نام خانوادگی نویسنده سوم: امضاء نویسنده سوم مقاله

نام نام خانوادگی نویسنده چهارم: امضاء نویسنده چهارم مقاله

بررسی اثر عوامل مختلف آب، خاک، مدیریت آبیاری و بارش در برنامه‌ریزی آبیاری گندم با استفاده از نرم‌افزار نیازآب

حسین جعفری* , نیازعلی ابراهیمی‌پاک و آرش تافته

استادیار موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

Jafari52_h@yahoo.com

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

nebrahimipak@yahoo.com

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

arash_tafteh@yahoo.com

دریافت: مرداد ۱۴۰۳ و پذیرش: اردیبهشت ۱۴۰۴

چکیده

در این پژوهش، در سامانه نیازآب که برای برآورد آب مصرفی گیاهان تهیه شده است، تأثیر اقلیم (بارش)، خاک (بافت) و مدیریت آبیاری (سامانه آبیاری و راندمان کاربرد) بر مقدار آب و دور آبیاری گندم در استان البرز بررسی شد. برای این منظور، برنامه‌ریزی آبیاری گندم در دو زمان بارش، در سه خاک لوم، لوم‌شنی و لوم‌رسی، سه سامانه آبیاری ثقلی، بارانی و قطره‌ای و راندمان‌های مختلف آبیاری برآورد شد. نتایج برنامه‌ریزی آبیاری گندم نشان داد که در آبیاری ثقلی، بارانی و قطره‌ای باید در هر هکتار به‌ترتیب ۷۵۳۷، ۴۹۵۱ و ۴۹۵۹ مترمکعب آب در ۸، ۱۴ و ۱۷ نوبت آبیاری به گندم داده شود. همچنین، نتایج نشان داد که تفاوت در بافت خاک مزرعه، حجم آب آبیاری مورد نیاز بر اساس تبخیر و تعرق را تغییر نمی‌دهد؛ اما تعداد آبیاری در خاک‌های سبک بیشتر از خاک‌های سنگین بود. بر این اساس، حجم آب مورد نیاز در سه خاک لوم‌شنی، لوم و لوم‌رسی به‌ترتیب ۷۹۸۷، ۷۵۳۷ و ۷۹۸۸ مترمکعب در هکتار؛ اما تعداد آبیاری در این سه خاک به‌ترتیب ۱۰، ۸ و ۷ نوبت بود. بر خلاف خاک مزرعه، راندمان کاربرد آب آبیاری حجم آب آبیاری را تغییر داد، به‌طوری‌که در سه خاک لوم‌شنی، لوم و لوم‌رسی با راندمان به‌ترتیب ۳۰٪، ۴۶٪ و ۴۵٪، حجم آب آبیاری به‌ترتیب ۱۲۲۴۷، ۷۵۳۷ و ۸۱۸۸ مترمکعب در هکتار بود. بارش مؤثر مانند راندمان آبیاری بسته به زمان و مقدار بارش بر برنامه‌ریزی آبیاری اثرگذار بود، به‌طوری‌که در خاک لوم با بارش یکسان اما در دو تاریخ متفاوت، حجم آب آبیاری متفاوتی حاصل شد. بنابراین، در برنامه‌ریزی آبیاری گندم باید به نقش خاک مزرعه، راندمان آبیاری، مدیریت آبیاری و بارش مؤثر هم بر دور آبیاری و هم بر مقدار آب آبیاری توجه نمود.

واژه‌های کلیدی: آب مصرفی، دور آبیاری، راندمان کاربرد آب آبیاری

* - آدرس ایمیل نویسنده مسئول: Jafari52_h@yahoo.com



مقدمه

سامانه نیاز آب یک سامانه رایانه‌ای است که به صورت گام به گام، در قالب یک الگوریتم و ورود عوامل پنج گانه، مقدار آب مصرفی گیاهان زراعی و باغی را در سطح کشور محاسبه و در اختیار بهره‌بردار قرار می‌دهد. برنامه‌ریزی آبیاری گیاهان زراعی و باغی بخشی از برنامه‌های این سامانه است. این سامانه دارای بانک اطلاعات کامل و جامعی در ارتباط با عوامل پنج گانه است که بسته به سؤال بهره‌بردار، با فراخوان داده از بانک داده سامانه و انجام محاسبات لازم بر اساس برنامه‌های از پیش تعیین شده، پاسخ سؤال را در اختیار بهره‌بردار قرار می‌دهد. علاوه بر این سامانه به گونه‌ای تهیه شده که کاربر بتواند بخشی از اطلاعات دقیقی که خود برای مزرعه خود اندازه‌گیری نموده، مثل ویژگی خاک مزرعه یا راندمان کاربرد آب آبیاری وارد سامانه نماید. برنامه‌ریزی آبیاری گیاهان زراعی و باغی یکی از گام‌های محاسباتی این سامانه است و داده‌های مورد نیاز برای برنامه‌ریزی آبیاری گیاهان زراعی و باغی در مناطق مختلف کشور، شامل تبخیر و تعرق واقعی هر گیاه، ویژگی خاک، آب و اقلیم از بانک داده سامانه نیاز آب قابلیت فراخوان کردن را دارد. برخی از این داده‌ها به صورت خام وارد سامانه شده‌اند مثل دما، رطوبت و غیره و برخی در درون سامانه محاسبه گردیده‌اند مثل تبخیر و تعرق در شرایط استاندارد و واقعی که پس از محاسبه به عنوان یک داده برای مقاصد بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در نهایت پس از محاسبات سامانه گزارش مد نظر را در قالب جدول به کاربر ارائه می‌دهد (جعفری و همکاران، ۱۴۰۳).

مدیریت آب آبیاری عبارت است از زمان‌بندی و تنظیم مصرف آب آبیاری به گونه‌ای که نیاز آبی گیاه را بدون هدر رفتن آب، خاک و مواد مغذی گیاه برآورده کند. اگر ظرفیت آب موجود در خاک، ظرفیت زراعی، نقطه پژمردگی، عمق ریشه‌دهی محصول برای مرحله خاص رشد، چگالی ظاهری، سطح مجاز تخلیه رطوبتی خاک (MAD) و مقدار تبخیر و تعرق مشخص باشد، آنگاه می‌توان زمان و میزان آب مصرفی در هر آبیاری را برای یک

گیاه تعیین کرد. هنگامی که بارندگی بخش قابل توجهی از نیاز آبی فصلی گیاه را تأمین کند، می‌توان از آبیاری برای تکمیل نیاز آبی گیاه استفاده کرد. آب مصرفی باید همیشه مکمل رویدادهای بارندگی در نظر گرفته شود (اسنایدر و همکاران، ۲۰۲۴).

برنامه‌ریزی مناسب آبیاری به معنای استفاده از مقدار مناسب آب در زمان مناسب است؛ به عبارت دیگر، اطمینان از در دسترس بودن آب زمانی که محصول به آن نیاز دارد. برنامه‌ریزی آبیاری با به حداقل رساندن تلفات رواناب و نفوذ عمقی، راندمان آبیاری را به حداکثر می‌رساند. این اغلب منجر به مصرف انرژی و آب کمتر و عملکرد بهینه محصول می‌شود، اما در شرایطی که آب به‌درستی مدیریت نمی‌شود، می‌تواند منجر به افزایش مصرف انرژی و آب شود. برنامه‌ریزی آبیاری در خاک‌های مختلف متفاوت است. خاک‌های شنی دارای فضای منافذ کم و سرعت نفوذ زیاد هستند. پیامدهای تأثیر این دو ویژگی بر سامانه‌ها و روش‌های آبیاری، از اهمیت بالایی برخوردار است. فضای کم منافذ عامل کم بودن ظرفیت نگهداشت آب است. در نتیجه، دفعات آبیاری و نیاز به نیروی کار بدون توجه به روش آبیاری مورد استفاده، زیاد است. در سامانه آبیاری تحت فشار، نیاز به نیروی کار را می‌توان کاهش داد، اما هزینه اولیه تجهیزات به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. سرعت نفوذ بالا، آبیاری سطحی را با مشکل مواجه می‌کند، زیرا تلفات هنگام اعمال آبیاری مزارع زیاد است. در مقابل، نرخ نفوذ بالا، تأثیر کمی بر آبیاری بارانی دارد؛ بنابراین می‌توان این روش را برای خاک‌های شنی به‌عنوان بهترین روش آبیاری در نظر گرفت. طراحی و مدیریت صحیح آبیاری، به بازده قابل قبولی منجر خواهد شد. آبیاری قطره‌ای روشی امیدوارکننده است؛ اما هزینه آن هنوز بسیار بالاست. توصیه می‌شود قبل از شروع توسعه در مقیاس بزرگ با آبیاری قطره‌ای، آزمایش‌های مزرعه‌ای انجام داده شود (الاحمدی و الشروفی، ۲۰۱۳).

به‌طور کلی، زمان آبیاری به میزان مصرف آب گیاه و ویژگی خاک مزرعه بستگی دارد و با محاسبه مقدار ET_c

برای مرحله خاص رشد گیاه و پایش تخلیه آب خاک تعیین می‌شود. آب ثقلی در خاک درشت‌بافت، به سرعت تخلیه می‌شود؛ اما تخلیه آب در خاک با بافت ریز می‌تواند تا دو روز طول بکشد زیرا آب آزاد کندتر تخلیه می‌شود. میزان کاهش محتوای خاک-آب نشان‌دهنده استفاده و تبخیر آب گیاه است که می‌تواند برای تعیین زمان آبیاری و میزان مصرف استفاده شود. این مفهوم اساسی در برنامه‌ریزی آبیاری است (گیهو و همکاران، ۲۰۲۴).

در خاک درشت‌بافت، آب آبیاری یا بارندگی به سرعت نفوذ می‌کند در خاک با بافت ریز، آب به آرامی نفوذ می‌کند، اما در خاک‌های سنگین، آب بیشتری در ناحیه ریشه گیاهان نسبت به خاک سبک نگهداری می‌شود. همچنین برای یک خاک معین، مقدار نفوذ، زمانی که خاک خشک است بیشتر از زمانی است که مرطوب است. این بدان معنی است که برای بارانی که مدت کوتاهی پس از بارش یا آبیاری قبلی رخ می‌دهد، میزان نفوذ کمتر و رواناب سطحی بیشتر است. روش‌های آبیاری تأثیر مختلفی بر میزان بارندگی مؤثر دارند. در آبیاری کرتی، رواناب سطحی وجود ندارد. تمام آب باران در کرت محبوس و وارد خاک می‌شود. در آبیاری نواری و شیاری، رواناب نسبتاً زیاد است؛ بنابراین میزان بارندگی مؤثر تحت آبیاری نواری یا شیاری کمتر از آبیاری کرتی است. در آبیاری شیارهای در مسیر خطوط هم‌تراز، شیب بسیار کمی در جهت شیار وجود دارد و بنابراین رواناب محدود می‌شود؛ زیرا آب به وسیله پشته‌ها هدایت می‌شود. این منجر به یک بارندگی مؤثر نسبتاً بالا در مقایسه با آبیاری نواری یا شیاردار می‌شود (شرر و همکاران، ۲۰۲۲).

کریمی و همکاران (۱۳۹۰) برنامه‌ریزی آبیاری بهینه گندم رقم چمران در استان خوزستان را بر اساس تخلیه ۵۰ درصد آب قابل استفاده گیاه در خاک توصیه کردند. نتایج تحقیقات امداد و تافته (۱۳۹۸) در تعیین مناسب‌ترین عمق آب آبیاری گیاه گندم با استفاده از مدل Aquacrop نشان دادند با در نظرگیری دور آبیاری متعارف گندم در خوزستان (چهار تا پنج نوبت آبیاری) و عمق

کاربرد آب آبیاری ۱۰۰ تا ۱۲۰ میلی‌متر، امکان افزایش عملکرد دانه گندم به میزان ۳۰ درصد و کاهش حجم مصرف آب به مقدار حدود ۴۶ درصد نسبت به شرایط معمول زارع وجود دارد. کارایی مصرف آب گندم در شرایط معمول منطقه حدود ۰/۳۲ کیلوگرم بر مترمکعب آب بوده که با اعمال مدیریت آبیاری بر اساس عمق آب کاربردی مصرفی در بازه ۱۰۰ تا ۱۲۰ میلی‌متر به مقدار ۰/۷۸ کیلوگرم بر مترمکعب قابل افزایش هست.

گوشه و غالبی (۱۳۹۱) در بررسی اثر دور آبیاری بر عملکرد دانه گندم در خوزستان نتیجه گرفتند که دور آبیاری بر اساس تخلیه مجاز رطوبتی خاک ۳۰ تا ۷۰ درصد با شوری آب آبیاری پنج دسی‌زیمنس بر متر تأثیری بر عملکرد ندارد؛ اما با افزایش شوری بیشتر آب آبیاری، کاهش معنی‌دار عملکرد مشاهده شد. در این پژوهش، برای زراعت گندم، آبیاری با آب شور حداکثر پنج دسی-زیمنس بر متر با دور آبیاری تخلیه ۳۰ درصد آب قابل دسترس گیاه توصیه شد.

نتایج تحقیقات قوچانیان و همکاران (۱۳۹۸) در بررسی سناریوهای مختلف برنامه‌ریزی آبیاری گندم در مشهد با استفاده از مدل Aquacrop بیانگر آن بود که از بین دوره‌های آبیاری ثابت ۸، ۱۰، ۱۲ و ۱۴ روز، دور ۱۰ روز با عمق آبیاری ۶۰ میلی‌متر (۶۰۰ مترمکعب در هکتار) بیشترین مقدار بهره‌وری مصرف آب به دست آمد.

صنوبر و همکاران (۱۳۹۰) بهترین دور آبیاری برای گیاه گندم در سامانه آبیاری ثقلی در استان یزد را بین ۸ تا ۱۰ روز اعلام نمودند. آن‌ها نتیجه گرفتند که افزایش دور آبیاری به ۱۴ روز باعث کاهش معنی‌دار در عملکرد گندم می‌شود. در این پژوهش، مقدار آب آبیاری در هر نوبت آبیاری برای دور ۸، ۱۰، ۱۲ و ۱۴ روز را به ترتیب ۵۶۱، ۵۸۴، ۶۱۲ و ۶۴۰ مترمکعب در هکتار برآورد شد.

دهقان و همکاران (۱۳۹۲) در بررسی شاخص-های بهره‌وری آب در مزارع تحت آبیاری گندم در دشت نیشابور، نتیجه گرفتند که در صورت اصلاح برنامه‌ریزی

آبیاری، عملکرد محصول به میزان ۱۴ درصد افزایش می‌یابد. همچنین آن‌ها گزارش کردند که در صورت برنامه‌ریزی صحیح آبیاری، ضمن کاهش آب مصرفی، شاخص کارایی مصرف آب آبیاری ۲۱ درصد افزایش می‌یابد.

منتجبی (۱۳۸۸) در مدیریت مصرف آب آبیاری گندم در گلپایگان نتیجه گرفت که آبیاری پس از ۷۵ میلی-متر تبخیر با مصرف حدود ۶۴۳۰ مترمکعب آب در هکتار در نه نوبت آبیاری، با تولید ۷۸۲۵ کیلوگرم دانه و ۱۳۶۲۵ کیلوگرم کاه در هکتار مناسب‌ترین دور آبیاری است.

عزیزآبادی فراهانی و میرزایی (۱۴۰۰) در بهینه‌سازی برنامه‌ریزی آبیاری سامانه آبیاری ثقلی در شرایط تأمین آب به میزان ۱۰۰ درصد حجم آب در دسترس، بهترین برنامه آبیاری در سناریوی اول (دور و مقدار ثابت آب آبیاری) را دور ۱۰ روز با عمق ۹۶ میلی‌متر اعلام کردند و در سناریوی دوم (دور آبیاری ثابت اما عمق آب آبیاری متغیر) بهترین برنامه آبیاری را دور هشت روز و عمق ۵۰ میلی‌متر برای محصولات پاییزه و عمق ۸۰ میلی‌متر برای محصولات بهاره تعیین کردند. بهترین برنامه آبیاری در سناریوی سوم دور آبیاری هفت روز با عمق ۴۴ میلی‌متر برای محصولات پاییزه و دور هشت روزه با عمق ۸۰ میلی‌متر برای محصولات بهاره حاصل شد. در مقایسه سه سناریوی برنامه آبیاری، نتایج نشان داد که برنامه بهینه مربوط به سناریوی دوم است که بیشینه سود خالص را در مقایسه با دیگر برنامه‌ها داراست و یک درصد سود بیشتر نسبت به برنامه سناریوی سوم و ۱۹ درصد سود بیشتر نسبت به سناریوی اول دارا است.

عزیزی‌زهان و همکاران (۱۳۹۸) در برنامه‌ریزی آبیاری گل رز برای کلاس‌های مختلف بافت خاک در سه منطقه محلات، اراک و ورامین دریافتند که در شرایط مشابه، تعداد آبیاری در خاک‌های با بافت سبک زیاد و بیش از سه برابر خاک‌های سنگین است. در اقلیم‌های گرم‌تر، برای شرایط مشابه خاک، تعداد آبیاری بیشتر از اقلیم‌های معتدل سرد بود. مقدار حداکثر و متوسط هیدرومدول آبیاری برای شرایط آبیاری کامل در ورامین، اراک و محلات به‌ترتیب

۱/۲، ۱/۴، ۱/۱ و ۰/۶۷، ۰/۸۵ و ۰/۶۴ لیتر در ثانیه در هکتار بود. آن‌ها دور و عمق آب آبیاری گل رز را در قالب اپلیکیشن تهیه و در اختیار عموم کشاورزان قرار دادند. همچنین، ۳۸ آبیاری در ورامین و ۲۶ آبیاری در اراک در بافت لوم ارائه دادند. در این تحقیق، بیشترین فاصله آبیاری در خاک رسی (۳۰ بار) و کمترین دور آبیاری در خاک لوم (۹۴ بار) برای طول دوره رشد ۲۴۵ روز در محلات به‌دست آمد.

نیاز آبی گندم برای کل دوره رشد در منطقه هنام الشتر استان لرستان ۳۱۸/۱ میلی‌متر، میانگین عمق آب آبیاری گندم ۶۰/۸ میلی‌متر و میانگین دور آبیاری در خردادماه ۱۱ روز محاسبه شد.

پی و همکاران (۲۰۲۲) با پایش مزرعه‌ای و شبیه‌سازی مدل عددی HYDRUS یک بعدی (HYDRUS-1D)، بیان آب اندازه‌گیری و برنامه‌های آبیاری بهینه را ارائه کردند. در طول دوره رشد ذرت تحت برنامه آبیاری فعلی، بیشترین نفوذ در مزارع واحه‌ای قدیمی (OF) با بافت لوم و سطح عمق آب زیرزمینی (GWL) عمیق به مقدار ۳۶۴ میلی‌متر و به دنبال آن مزارع جدید توسعه‌یافته از بیابان (NFD) با بافت شنی، برابر ۲۳۱ میلی‌متر و مزارع جدید توسعه‌یافته از تالاب (NFW) به دلیل ورود رطوبت از طریق هدایت موئینگی از آب‌های زیرزمینی، ۵۲- میلی‌متر مشاهده کردند. در مقایسه با برنامه آبیاری فعلی، میزان آبیاری به ترتیب ۶۵، ۴۵ و ۱۳ درصد تحت مقدار آبیاری بهینه در OF، NFW و NFD کاهش یافت. علاوه بر این، هم در زمان آبیاری و هم مقدار بهینه‌شده در OF، NFW و NFD به ترتیب ۸۴، ۶۱ و ۲۳ درصد کاهش یافت. بر این اساس در اثر آبیاری بهینه، کمبود آب کاهش یافت، نفوذ عمیق در طول دوره رشد ذرت کاهش یافت و پس از برداشت ذرت، آب کمتری در خاک ذخیره شد. در بین سه مزرعه، کمترین زمان آبیاری (چهار روز) و مقدار (۹۰ میلی‌متر) در NFW حاصل شد که ناشی از مقدار آبی بود که به‌واسطه تغذیه از آب‌های زیرزمینی به دلیل هدایت موئینگی بود. با توجه به تفاوت بافت خاک، دفعات آبیاری

کمتر با مقدار قابل توجه آبیاری یکباره (۳۰-۷۰ میلی متر) برای OF با خاک لوم توصیه شد، در حالی که دفعات آبیاری بیشتر با آبیاری کمتر (۲۵-۵۰ میلی متر) برای NFD با بافت خاک شنی مناسب بود. نتیجه گیری شد که اثرات بافت خاک و GWL باید برای بهینه سازی برنامه های آبیاری به خوبی در نظر گرفته شود (پی و همکاران، ۲۰۲۲).

سیدل و همکاران (۲۰۱۵) در فرانسه برای دستیابی به حداکثر سود و بهره وری، طراحی بهینه برنامه ریزی آبیاری گیاه ذرت از نظر زمان و مقدار آب آبیاری را پیشنهاد کردند و بر اساس آن سود را تا ۲۷٪ افزایش دادند (سیدل و همکاران، ۲۰۱۵). در سامانه های آبیاری با نرخ متغیر (دور و مقدار متغیر آب) منجر به استفاده اقتصادی تر و پایدارتر از آب و آبیاری می شود. این سیستم آبیاری کارایی مصرف آب را ۱۵ تا ۱۶ درصد در مقایسه با سیستم سنتی بهبود می بخشد، زیرا نرخ مصرف آب ثابت را در کل مزرعه حذف می کند. چون بافت خاک در مزارع متفاوت است این سیستم می تواند بیشترین مزایا دارند. استفاده از فناوری سنجش از دور و دوربین های حرارتی در این سیستم می تواند راهگشا باشد (جورج و همکاران، ۲۰۰۸).

صلاح و یورس (۲۰۱۰) طی دو سال (۲۰۰۷ و ۲۰۰۸) به منظور ایجاد ترکیب های بهینه بین دفعات و مقدار آب آبیاری برای ذرت در سامانه آبیاری قطره ای با استفاده از توابع تولید آب مطالعه ای انجام کردند. آزمایش مزرعه ای چهار دور آبیاری (F1، F2، F3 و F4، آبیاری به ترتیب هر یک، دو، سه یا چهار روز یکبار) و سه مقدار حجم آب آبیاری (۱، ۰/۸ و ۰/۶ تبخیر و تعرق) انجام شد. نتایج نشان داد که متغیرهای عملکرد و راندمان مصرف آب (WUEs) با افزایش دفعات و میزان آبیاری افزایش می یابد، ولی تفاوت های معنی داری بین F1 و F2 در متغیرهای عملکرد و بین I1 و I2 در WUEs ایجاد نشد. علاوه بر این، اثرات متقابل بین دور و مقدار آب آبیاری تأثیر زیادی بر متغیرهای عملکرد و WUE داشت، به طوری که بیشترین مقادیر برای F1I2 و F2I1 و کمترین برای F3I3 و F4I3 به دست آمد. تیمار F1I3 دارای عملکرد دانه و مقادیر اجزای

عملکرد مشابه با مقادیر به دست آمده برای تیمارهای F3I2 و F4I1 و مقادیر WUE مشابه با مقادیر به دست آمده برای تیمارهای F2I1 و F2I2 بود. ضریب عکس العمل گیاه (ky) در سال های ۲۰۰۷ و ۲۰۰۸ به ترتیب ۱/۸۱ و ۱/۸۶ بود (صلاح و یورس، ۲۰۱۰).

جعفری و غالبی (۱۳۹۷) با تهیه اپلیکیشن کاربردی، برنامه ریزی آبیاری گیاه گندم را در سراسر کشور محاسبه کردند. این برنامه بر اساس داده های کتاب نیاز آبی گیاهان عمده زراعی و باغی کشور و به صورت غیربرخط (Offline) تهیه شد که پیشنهاد کردند برنامه ریزی آبیاری گیاهان زراعی و باغی به صورت برخط انجام شود. این اپلیکیشن تاریخ آبیاری، عمق آب آبیاری و مدت زمان آبیاری را ارائه می داد و در صورت داشتن حقایق، توصیه های لازم را به بهره بردار انجام می داد.

تامپسون و همکاران (۲۰۰۷) معتقدند که علاوه بر مقدار بارش دریافت شده در یک منطقه در طول دوره زمانی مشخص، توزیع، شدت و مدت بارش هم بر میزان ذخیره آن در محدوده توسعه ریشه گیاهان اهمیت دارد.

با عنایت به پژوهش های صورت گرفته، برنامه ریزی آبیاری گیاهان باعث کاهش آب مصرفی و افزایش عملکرد و در نتیجه افزایش بهره وری آب می شود. بر این اساس، به دلیل کمبود آب، تعیین برنامه ریزی آبیاری گیاهان در سراسر کشور از اهمیت بالایی برخوردار است. از یک سو دریافت دور و عمق آب آبیاری گیاهان در سراسر کشور، فقط در قالب یک برنامه رایانه ای امکان پذیر است و از سوی دیگر برنامه ریزی آبیاری به عوامل مختلفی نظیر آب، خاک، اقلیم و مدیریت آبیاری بستگی دارد که سبب می شود برنامه رایانه ای این گیاهان مشابه باشد و فقط باید داده های ورودی نظیر تبخیر و تعرق، عمق ریشه، فصل رشد، خاک مزرعه و غیره که مختص هر گیاه است وارد برنامه شود. سطح زیر کشت گندم به عنوان یک گیاه استراتژیک در ایران حدود ۲/۴ میلیون هکتار است که حدود ۱۲ میلیارد مترمکعب آب مصرف می کند (آمارنامه کشاورزی، ۱۴۰۱)؛ بنابراین، در گام اول، تهیه و تشریح

مراحل گام‌به‌گام برنامه (الگوریتم برنامه) رایانه‌ای برنامه-ریزی آبیاری گیاهان زراعی و باغی ارائه و سپس در گام دوم تأثیر چهار عامل از عوامل مؤثر بر برنامه‌ریزی آبیاری گندم در استان البرز شامل خاک مزرعه، سامانه آبیاری، بارش مؤثر و راندمان کاربرد آب آبیاری بررسی می‌شود. برای این منظور، سه بافت خاک مزرعه، سه سامانه آبیاری، سه راندمان کاربرد آب آبیاری و سه سطح بارش مؤثر تحلیل می‌شود.

روش پژوهش

سامانه نیاز آب توسط موسسه تحقیقات خاک و آب به‌منظور برآورد آب مصرفی گیاهان تهیه و ارائه گردیده است. این سامانه به‌عنوان تنها مرجع برآورد آب مصرفی گیاهان زراعی و باغی کشور از سوی وزارت جهاد کشاورزی و سازمان برنامه‌وبودجه به کلیه نهادهای ذی‌ربط ابلاغ گردیده است. بدیهی است یک‌ه از گام‌های برآورد آب مصرفی گیاهان تعیین دور و عمق آب آبیاری یا همان برنامه‌ریزی آبیاری است که از این سامانه برای برنامه‌ریزی آبیاری گیاه گندم در استان البرز استفاده شد. در این بررسی، برنامه‌ریزی آبیاری بر اساس شرایط حاکم بر مزرعه از قبیل کیفیت آب آبیاری، خاک مزرعه، اقلیم منطقه و مدیریت آبیاری، تعیین شد؛ بنابراین در برنامه‌ریزی آبیاری نیاز به مشخص شدن نوع گیاه، زمان کاشت تا برداشت، نوع سامانه آبیاری، تبخیر و تعرق واقعی، ویژگی خاک، عمق توسعه ریشه در طول فصل رشد، مقدار بارش و حبابه کشاورز بود. این داده‌ها بر اساس میانگین داده‌های درازمدت (مثلاً ۱۰ ساله) از بانک داده سامانه نیاز آب فراخوان شد؛ بنابراین ابتدا دستورالعمل تعیین دور و عمق آب آبیاری گندم در استان البرز به‌صورت گام‌به‌گام در نرم‌افزار "نیاز آب" برای سه سامانه آبیاری (ثقلی، بارانی و قطره‌ای) ارائه، سپس بر اساس داده‌های موجود در سامانه نیاز آب، با محاسبه دور و عمق آب آبیاری در طول فصل رشد گندم، تأثیر خاک مزرعه، راندمان کاربرد آب آبیاری، بارش و حبابه کشاورز بر برنامه‌ریزی آبیاری تحلیل و بررسی شد. میزان آب آبیاری

در اولین آبیاری گیاه گندم که برای سبز کردن و استقرار گیاه انجام می‌شود (خاکاب)، به دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فرد آن نظیر آبیاری با دبی کم و در زمان زیاد، در محاسبات وارد نشد. مراحل گام‌به‌گام برنامه‌ریزی آبیاری گیاه گندم در استان البرز به شرح زیر است: اولین گام، وارد کردن نوع گیاه است. بعد از آن، گام بعدی در برنامه‌ریزی آبیاری تعیین مکان کشت است. با وارد کردن مکان مزرعه در سامانه نیاز آب، در واقع عامل اقلیم منطقه در محاسبات لحاظ می‌شود.

اگر برنامه‌ریزی آبیاری برای کل طول فصل رشد گیاه گندم یعنی از اولین آبیاری بعد از سبز شدن و استقرار تا برداشت گندم مدنظر باشد، نیاز به پرسش تاریخ آبیاری قبلی نیست؛ اما اگر در بین فصل رشد و برای یک زمان مشخص (مثلاً اردیبهشت‌ماه) برنامه‌ریزی آبیاری مد نظر باشد، نیاز است که تاریخ آبیاری قبل مشخص باشد تا در صورت وقوع بارندگی بعد از آبیاری قبل، در محاسبه مقدار آب آبیاری لحاظ شود؛ بنابراین دومین سؤال از بهره‌بردار مربوط به تاریخ آبیاری قبلی است.

مرحله بعدی، اعلام نوع سامانه آبیاری از سوی بهره‌بردار است. هر یک از سامانه‌های آبیاری دارای ویژگی‌های منحصربه‌فرد خود هستند. در سامانه آبیاری ثقلی بلافاصله بعد از آبیاری، رطوبت خاک مزرعه از حد اشباع عبور کرده و آب با نیروی ثقل در سطح مزرعه جاری و گاه از محدوده توسعه ریشه زهکشی می‌شود؛ اما در سامانه آبیاری قطره‌ای ممکن است رطوبت خاک به حد اشباع نرسد و در سامانه آبیاری بارانی آب روی گیاه پاشیده و تلفات تبخیر بیشتر از سامانه آبیاری قطره‌ای است؛ بنابراین دور آبیاری در سامانه‌های مختلف آبیاری متفاوت است. در سامانه آبیاری ثقلی در دور آبیاری بیش از ۱۰ روز، بسته به خاک مزرعه بین ۴۸ تا ۷۲ ساعت بعد از زمان آبیاری، رطوبت به حد ظرفیت زراعی (FC) رسیده و در روزهای بعد رطوبت خاک کاهش و تا حدی می‌رسد که گیاه قادر به جذب آب به‌اندازه نیاز نبوده و به مرحله تنش نزدیک می‌شود. در روز بعد از آبیاری میزان تبخیر و تعرق واقعی

ده روزه است. ثانیاً انتخاب هفت روز برای استفاده از این میانگین در سامانه‌های مختلف آبیاری از ثقلی با دور آبیاری بالا و قطره‌ای با دور آبیاری کم در خاک‌های مختلف است (جعفری و غالبی، ۱۳۹۷).

$$\overline{ET}_a = \frac{\sum_{i=1}^7 ET_i}{ET_1 + ET_2 + ET_3 + ET_4 + ET_5 + ET_6 + ET_7} \quad (1)$$

که در آن: $\overline{ET}_a$ میانگین تبخیر و تعرق واقعی بر حسب میلی‌متر بر روز و ET_i تبخیر و تعرق واقعی هر روز و اندیس i از یک تا هفت بیانگر روز بعد از آبیاری است. بافت خاک مزرعه توسط بهره‌بردار در سامانه نیاز آب انتخاب و بر اساس بافت خاک، درصد حجمی رطوبت در نقطه ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی ذخیره‌شده در بانک داده‌های سامانه نیاز آب فراخوان شد. علاوه بر این، سامانه دارای این قابلیت است که کاربر می‌تواند بافت خاک مزرعه را وارد سامانه کند و سامانه بر اساس آن مقدار ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی را فراخوان کند (جدول ۲).

در بالاترین حد و هر چه زمان به آبیاری بعدی نزدیک‌تر می‌شود، از میزان تبخیر و تعرق کاسته می‌شود. در صورتی - که در سامانه آبیاری قطره‌ای به دلیل دور آبیاری کم، رطوبت خاک مزرعه در محدوده FC قرار دارد؛ بنابراین در سامانه - های مختلف آبیاری میزان در دسترس بودن رطوبت خاک برای تبخیر و تعرق تفاوت وجود دارد (تودوروویچ، ۲۰۱۶).

گام بعدی در تعیین دور آبیاری برآورد میانگین تبخیر و تعرق واقعی در هر منطقه برای گیاه گندم است. در این پژوهش، از تبخیر و تعرق واقعی گندم که قبلاً در سامانه نیاز آب برآورد شده استفاده شد. استفاده شد. نمونه‌ای از خروجی تبخیر و تعرق واقعی گندم در استان البرز در جدول (۱) نشان داده شده است. پس از فراخوان تبخیر و تعرق واقعی از سامانه نیاز آب، از تاریخ آبیاری قبل به مدت هفت روز میانگین آن به صورت وزنی محاسبه شد. محاسبه میانگین وزنی تبخیر و تعرق واقعی در این مدت، اولاً به دلیل تنظیم مقدار ET_a در سامانه نیاز آب به صورت میانگین

جدول ۱- مقادیر تبخیر و تعرق واقعی گندم در استان البرز

نیاز آبیاری واقعی (IRa)	بارش مؤثر (Pe)	تبخیر-تعرق		مشخصات گیاهی	تاریخ		
		میلی‌متر در دهه	میلی‌متر در دهه			ماه	مرحله رشد دهه
0	15.58	10.66	23.27	0.5	ini	1	October-آبان
1.96	7.3	9.26	20.3	0.5	ini	2	November-آبان
0.49	6.22	6.71	14.77	0.49	ini	3	November-آبان
0.66	5.21	5.87	13.12	0.48	ini	1	November-آذر
0	5.52	5.26	12.11	0.47	ini	2	December-آذر
0	4.04	4.86	11.3	0.46	ini	3	December-آذر
0	3.4	5.23	12.23	0.46	ini	1	December-دی
0	2.15	4.98	11.99	0.45	ini	2	January-دی
0	2.1	6.03	14.3	0.45	ini	3	January-دی
0	3.75	6.32	14.95	0.45	ini	1	January-بهمن
0	5	6.42	15.29	0.45	ini	2	February-بهمن
0	2.52	8.17	18.46	0.48	ini	3	February-بهمن
0	9.36	9.43	20.93	0.49	ini	1	February-اسفند
0	0.95	13.73	26.82	0.55	dev	2	March-اسفند
0	5.01	14.97	24.58	0.66	dev	3	March-اسفند
17.98	5.46	23.44	32.01	0.79	dev	1	March-فروردین
25.32	5.53	30.85	36.72	0.9	dev	2	April-فروردین
30.53	10.05	40.58	42.47	1.03	dev	3	April-فروردین
42.62	3.55	46.17	45.33	1.11	mid	1	April-اردیبهشت
45.52	3.28	48.8	48.42	1.1	mid	2	May-اردیبهشت
58.1	1.6	59.7	60.03	1.09	mid	3	May-اردیبهشت
55.8	2.61	58.41	59.08	1.08	mid	1	May-خرداد
56.67	0.2	56.87	67.29	0.93	end	2	June-خرداد
45.69	0	45.69	77.41	0.65	end	3	June-خرداد
21.52	0	21.52	62	0.38	end	1	June-تیر
785.18	110.39	549.93	785.18				جمع کل

جدول ۲- ظرفیت حجمی رطوبت برای خاک موجود در بانک اطلاعات و وارد شده به سامانه نیاز آب توسط کشاورز

بافت خاک	لوم شنی	لوم (ارائه‌شده توسط سامانه نیاز آب)	لوم رسی
ظرفیت حجمی رطوبت mm/m	120	153.3	190

زراعی و نقطه پژمردگی در بند ۲، مقدار عمق آب آبیاری خالص (d_n) در سامانه نیاز آب با استفاده از رابطه (۲) برآورد شد.

$$d_n = (FC - PWP) \times MAD \times Z_r \quad (2)$$

Z_r : عمق توسعه ریشه (mm)، MAD : ضریب تخلیه مجاز رطوبتی، PWP : رطوبت در نقطه پژمردگی دائم (mm/m)

گام بعدی تعیین تاریخ کاشت است. مهم‌ترین علت دانستن تاریخ کشت، محاسبه عمق توسعه ریشه گندم در سامانه است. عمق ریشه گندم متناسب با طول فصل رشد از بانک داده سامانه نیاز آب فراخوان شد.

بر اساس عمق ریشه گندم فراخوان شده از بند ۶ و ویژگی‌ها و درصد حجمی رطوبت خاک در نقاط ظرفیت

یک از سامانه‌های آبیاری رجوع کرده و از تاریخ آبیاری قبل تا تاریخ آبیاری جدید، مقدار تجمعی تبخیر و تعرق واقعی را محاسبه می‌کند. به عبارت دیگر، مقدار تبخیر و تعرق حاصل از این بند برابر مقدار تبخیر و تعرق واقعی در مجموع روزهای بین دو آبیاری است.

آیا از بعد از آبیاری قبل، بارندگی اتفاق افتاده است؟ اگر پاسخ خیر است سامانه از مرحله ۱۴ ادامه یابد. اگر پاسخ بله است، مقدار بارندگی و تاریخ اتمام بارندگی وارد شود.

در مقابل این سؤال دو گزینه وجود دارد: الف) بهره‌بردار مقدار بارندگی را می‌داند و آن را وارد می‌کند و ب) بارندگی اتفاق افتاده اما بهره‌بردار مقدار آن را نمی‌داند. اگر پاسخ قسمت الف را داد پس از وارد شدن مقدار بارش توسط بهره‌بردار، سامانه نیاز آب بارش مؤثر را با استفاده از روش قابل اطمینان محاسبه می‌کند. سپس تاریخ اتمام آخرین بارندگی را وارد کند. اگر مقدار باران مؤثر بیش از ۸۰ درصد مقدار تبخیر و تعرق نهایی در بند ۱۰ شد (جعفری و همکاران، ۱۳۹۸). مقدار آب آبیاری ناخالص محاسبه نمی‌شود و سامانه نیاز آب، تاریخ اتمام آخرین بارندگی را جایگزین تاریخ آبیاری قبل کرده و دوباره (بند ۲) دور آبیاری جدید را محاسبه می‌کند. اگر مقدار باران مؤثر، کمتر از ۸۰ درصد مقدار عمق آب آبیاری خالص در بند ۱۰ بود، محاسبه مقدار آب آبیاری ناخالص مطابق دستورالعمل ارائه شده از بند ۱۲ به بعد ادامه یابد.

اگر کاربر مقدار بارندگی را نداند، سامانه نیاز آب بسته به استان، شهر و دهستان محل کشت گندم و همچنین زمان آبیاری، به جدول مقدار بارندگی بانک اطلاعات سامانه مراجعه و میانگین وزنی مقادیر احتمالی بارش مؤثر را محاسبه می‌کند. پس از مشخص شدن مقدار بارش مؤثر در بین دو آبیاری، سامانه نیاز آب با کم کردن بند ۱۱ از بند ۱۰، مقدار آب آبیاری خالص را استخراج می‌کند.

و FC: رطوبت در حد ظرفیت زراعی (mm/m) و MAD برای محصول گندم ۰/۵ در نظر گرفته شد.

با استفاده از رابطه (۳) دور آبیاری بیشینه بر اساس هر یک از سامانه‌های آبیاری با استفاده از نرم‌افزار نیاز آب برآورد شد.

$$f = \frac{dn}{ET_a} \quad (3)$$

برای جلوگیری از وقوع تنش آبی، سامانه نیاز آب، دور آبیاری بدست آمده را به عدد کوچک‌تر گرد می‌کند.

اصلاح دور آبیاری

سامانه نیاز آب بر اساس دور آبیاری به‌دست‌آمده در هر یک از سامانه‌های آبیاری، به جدول رجوع کرده و بجای میانگین تبخیر و تعرق هفت روزه، برای سامانه آبیاری قطره‌ای، بارانی و ثقلی دور آبیاری به‌دست‌آمده در بند ۸، میانگین ET_a را برآورد و دوباره به بند ۸ برگشته و دور و عمق آب آبیاری جدید را محاسبه می‌کند. این برگشت تا زمانی که اختلاف بین دو دور آبیاری (f) کمتر از یک شد، ادامه پیدا می‌کند و دور آبیاری آخر، به‌عنوان دور آب آبیاری نهایی ثبت می‌شود.

اگر در آبیاری ثقلی دور آبیاری بیش از ۲۰ روز شد یعنی مخرج کسر رابطه (۳) به قدری کوچک بود که دور آبیاری نامتعارف (بیش از ۲۰ روز در سامانه آبیاری ثقلی) به‌دست آمد، سامانه نیاز آب دور آبیاری را همان ۲۰ روز در نظر می‌گیرد و مقدار آب آبیاری را اصلاح می‌کند. به‌طور مشابه در آبیاری بارانی اگر بیش از ۱۲ روز شد، ۱۲ روز و در آبیاری قطره‌ای اگر دور آبیاری بیش از هفت روز شد، هفت روز را لحاظ می‌کند (جعفری و غالبی، ۱۳۹۷). پس از محاسبه دور آبیاری نهایی، با اضافه کردن آن به تاریخ آبیاری قبلی، تاریخ آبیاری جدید به‌عنوان اولین خروجی توسط نرم‌افزار نیاز آب ارائه می‌شود.

با مشخص شدن دور آبیاری در هر کدام از سامانه‌های آبیاری، چه بر اساس بند ۸-۱ و چه بر اساس بند ۸-۲، سامانه نیاز آب به جدول تبخیر و تعرق برای هر

راندمان کاربرد آب آبیاری

راندمان کاربرد آب آبیاری نسبت آبی که توسط گیاه در محدوده توسعه ریشه جذب شده به مقدار آبی است که وارد مزرعه می‌شود. برای استفاده از راندمان کاربرد آب آبیاری در سامانه نیاز آب دو راه وجود دارد یا زارع راندمان کاربرد مزرعه خود را محاسبه کرده و از آن آگاه است که مقدار آن را وارد سامانه نیاز آب می‌کند، اما اگر از مقدار آن آگاهی نداشت، مقدار راندمان را به سامانه نیاز آب واگذار کرده که به‌طور پیش‌فرض از راندمان درج شده در بانک اطلاعات استفاده می‌کند. در این پژوهش برای تحلیل و بررسی تأثیر خاک مزرعه و راندمان کاربرد آب آبیاری در برنامه‌ریزی آبیاری، از سه نوع خاک با بافت لوم‌شنی، لومی و لوم‌رسی با راندمان‌های کاربرد آب آبیاری مخصوص به خود استفاده شد (جدول ۳).

جدول ۳- حالت‌های مختلف راندمان کاربرد آب آبیاری برای خاک موجود در بانک اطلاعات و وارد شده از طریق کشاورز به سامانه نیاز آب

سامانه آبیاری	قطره‌ای	بارانی	ثقلی
راندمان نیاز آب	76%	70%	46%
راندمان ارائه شده توسط کشاورز	76%	70%	لوم شنی 30% لوم رسی 45%

نیاز آبتشویی مقدار آبی است که کشاورز علاوه بر آب مورد نیاز گندم به مزرعه می‌دهد تا نمک خاک مزرعه را شستشو نماید. به عبارت دیگر، نیاز آبتشویی بخشی از آب مصرفی گندم است که محاسبه آن در سامانه آبیاری قطره‌ای (رابطه ۴) با سامانه آبیاری بارانی و ثقلی (رابطه ۳) متفاوت است و برای محاسبه نیاز آبتشویی، بهره‌بردار باید مقدار شوری آب آبیاری، شوری عصاره اشباع خاک و شوری با عملکرد صفر را وارد نرم‌افزار کند. در این بررسی شوری آب آبیاری کمتر از دو دسی‌زیمنس بر متر بود که نیاز به آبتشویی نداشت.

$$LR = \frac{EC_w}{[5EC_e - EC_w]} \quad (4)$$

$$LR = \frac{EC_w}{[2EC_{max}]} \quad (5)$$

که در آن‌ها: LR: کسر آبتشویی، EC_w : هدایت الکتریکی آب آبیاری، EC_e : هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک-آستانه تحمل گیاه و EC_{max} : شوری خاک با عملکرد صفر. واحد همه پارامترها دسی‌زیمنس بر متر است. سامانه نیاز آب با استفاده از رابطه ۶ عمق ناخالص آب آبیاری برحسب میلی‌متر بر دور آبیاری را بر اساس راندمان کاربرد آب آبیاری (E_a) و نیاز آبتشویی (LR) برآورد می‌کند:

$$I_g = \frac{I_n}{(1-LR) \times E_a} \quad (6)$$

غالباً مقدار آب آبیاری در هر نوبت آبیاری به‌صورت حجم آب با واحد مترمکعب ارائه می‌شود که برای این منظور نیاز به مساحت مزرعه (A) است؛ بنابراین مساحت مزرعه یکی دیگر از پارامترهایی است که باید وارد سامانه نیاز آب شود. از رابطه (۷) حجم آب آبیاری برحسب مترمکعب در کل مزرعه محاسبه و به‌عنوان دومین خروجی نمایش داده می‌شود.

$$V_g = 10 \times I_g \times A \quad (7)$$

که در آن: I_g نیاز ناخالص برحسب میلی‌متر و V_g حجم آب آبیاری برحسب مترمکعب در کل مزرعه است معمولاً مدت‌زمان آبیاری برای بهره‌بردار قابل درک‌تر است؛ بنابراین از رابطه (۸)، ساعت آبیاری (hr_i) محاسبه و به‌صورت مدت‌زمان آبیاری برحسب ساعت به‌عنوان سومین خروجی از سوی سامانه نیاز آب اعلام می‌شود.

$$hr_i = V_g \div (3.6 \times Q) \quad (8)$$

Q: دبی آب آبیاری برحسب مترمکعب بر ثانیه که توسط کاربر وارد سامانه نیاز آب می‌شود و hr_i مدت‌زمان آبیاری برحسب ساعت است.

حقابه

حقابه مقدار آبی است که یک کشاورز در یک مدار مشخص برحسب روز (مثلاً ۱۰ روز) به مدت مشخصی (مثلاً ۲۰ ساعت) از یک منبع آب (قنات، چاه یا رودخانه) با دبی ثابت یا متغیر در اختیار دارد. معمولاً برنامه‌ریزی آبیاری بهینه که شرح آن گذشت بر مدار حقابه

دبی آب ورودی به مزرعه (دبی حقاچه)، مدت زمان آبیاری مشخص و به عنوان سومین خروجی به وسیله سامانه نیاز آب اعلام شود. برای ارزیابی مقدار آبی که کشاورز بر اساس مدار حقاچه در اختیار گندم قرار می دهد، باید دبی و مدت زمان آبیاری توسط کشاورز وارد سامانه نیاز آب شود؛ بنابراین در گام بعد:

دبی و مدت زمان حقاچه که مزرعه با آن آبیاری می شود وارد سامانه نیاز آب شود (Q_{ws})

بر اساس دبی و مدت زمان حقاچه، مقدار آبی که زارع در اختیار مزرعه خود قرار می دهد برابر است با:

$$V_{ws} = 0.36 \times Q_{ws} \times T_{ws} \quad (10)$$

اگر مقدار آبی که زارع در هر مدار حقاچه، در اختیار مزرعه گندم قرار می دهد کمتر از آبی باشد که بر اساس شرایط بهینه محاسبه شده و یا مدار حقاچه یک روز بیشتر از مدار آبیاری در شرایط بهینه باشد (مزرعه یک روز دیرتر آبیاری شود)، سامانه نیاز آب هشدار لازم برای وقوع تنش آبی و کاهش عملکرد گندم برای کشاورز صادر می کند.

برآورد آب مصرفی در کل فصل رشد

با مشخص شدن برنامه ریزی آبیاری از زمان کاشت تا برداشت، با جمع نمودن مقدار آب آبیاری در هر نوبت آبیاری، مقدار آبی که سالانه در اختیار گیاه قرار می گیرد، محاسبه شد. همچنین برای ارزیابی اثر خاک، راندمان کاربرد آب آبیاری و بارش مؤثر در برنامه ریزی آبیاری گیاه گندم در استان البرز از زمان کاشت (اول آبان) تا زمان برداشت (۱۰ تیر)، علاوه بر تعیین برنامه ریزی آبیاری در خاک با بافت لوم (موجود در بانک داده سامانه نیاز آب)، برنامه ریزی آبیاری دو خاک لوم شنی و لوم رسی که توسط کشاورز وارد سامانه نیاز آب شد تعیین و تحلیل لازم انجام شد. به دلیل تراکم زیاد گندم، فرض شده که در هر سه سامانه آبیاری تمام سطح مزرعه به طور کامل خیس شده و در بخشی از طول فصل رشد گندم که تبخیر و تعرق واقعی کمتر از یک میلی متر در روز داشت به عنوان خواب زمستانه تلقی شد و همچنین زمانی که مقادیر بارش مؤثر مخصوصاً

منطبق نیست. گاه ممکن است مدار آبیاری تعیین شده بیشتر یا کمتر از مدار حقاچه کشاورز باشد. در این شرایط زارع نمی تواند از برنامه ریزی آبیاری تعیین شده برای آبیاری مزارع خود استفاده کند، مگر اینکه بتواند حقاچه خود را در یک استخر آب، ذخیره و مطابق برنامه تعیین شده در اختیار گیاه قرار دهد که معمولاً این اتفاق مخصوصاً در شرایط کمبود آب امکان پذیر نیست. از سویی، حقاچه کشاورز هم نیاز به ارزیابی دارد و باید کشاورز بداند که آیا مزرعه گندم خود را نسبت به شرایط موجود زودتر آبیاری می کند یا دیرتر و همچنین آیا مقدار حقاچه کفایت آبیاری مزرعه گندم را می کند یا خیر؟ بر این اساس در برنامه ریزی آبیاری، سامانه نیاز آب حقاچه کشاورزان، هم از نظر دور آبیاری و هم مقدار آب آبیاری مورد ارزیابی قرار می گیرد. برای این منظور اولین سؤالی که در این زمینه از زارع پرسیده می شود عبارت است از:

آیا حقاچه دارد؟ اگر جواب خیر باشد برنامه به اتمام رسیده است و نیاز به ارزیابی ندارد و کشاورز باید برنامه ریزی آبیاری تعیین شده اعمال کند؛ اما اگر پاسخ مثبت باشد:

مدار حقاچه بر اساس نوع سامانه آبیاری را وارد کنید f_{ws} مثلاً ۱۰ روز

سامانه نیاز آب به جای ارائه دور آبیاری در شرایط بدون حقاچه، مدار حقاچه زارع را به عنوان دور آبیاری اعلام سپس این مدار را با دور آبیاری که در شرایط بهینه محاسبه شده مقایسه و به عنوان هشدار اعلام می کند که بهره بردار دیرتر یا زودتر از شرایط بهینه آبیاری می کند. در ادامه مقدار آب آبیاری از رابطه (۹) بر اساس مدار حقاچه کشاورز تعیین می شود.

$$I_{gws} = I_g \times \frac{f_{ws}}{f} \quad (9)$$

محاسبه مقدار نیاز ناخالص آب آبیاری بر اساس اطلاعات موجود در سامانه یعنی راندمان ۴۶ درصد برای سامانه آبیاری ثقیل برآورد شد. I_{gws} مقدار آبی است که باید زارع در مدار حقاچه خود در اختیار گیاه قرار دهد؛ بنابراین در صورت وجود حقاچه، این عدد باید به عنوان دومین خروجی توسط سامانه نیاز آب اعلام شود. با مشخص شدن

در ابتدای فصل رشد، کفایت آبیاری کرد، برنامه‌ریزی آبیاری انجام نشد. به این دلایل برنامه‌ریزی آبیاری از ۱۰ اسفند شروع و تا ۲۰ روز قبل از برداشت ادامه یافت. آبیاری اول برای سبز نمودن و استقرار جوانه گندم به دلیل طولانی بودن زمان آبیاری و راندمان کم آبیاری در محاسبات وارد نشد.

از سوی دیگر، برای ارزیابی نوع مدیریت آبیاری در مقدار مصرف آب گندم در استان البرز در طول فصل

رشد، برنامه‌ریزی آبیاری در سامانه‌های آبیاری قطره‌ای، بارانی و ثقلی به‌طور جداگانه برای خاک‌های مختلف انجام و تحلیل لازم در مورد اثر هر یک از عوامل مؤثر بر برنامه‌ریزی آبیاری انجام شد.

به‌طور خلاصه، داده‌های مورد نیاز و محاسبات لازم در طول کل برنامه رایانه‌ای برنامه‌ریزی آبیاری در جدول (۴) ارائه شده است.

جدول ۴- خلاصه ورودی و محاسبات و کدهای برنامه

ردیف	ورودی	محاسبات
1	نوع گیاه	میانگین $\overline{ET_a}$ از آبیاری قبل به مدت هفت روز
2	مکان	عمق ریشه (هم قابل اندازه‌گیری و هم قابل محاسبه)
3	تاریخ کاشت	عمق خالص آب آبیاری
4	نوع سامانه آبیاری	دور آبیاری اولیه
5	تاریخ آبیاری قبل	دور آبیاری اصلاح‌شده
6	بافت خاک	ET_a برای دور آبیاری اولیه
7	مقدار و تاریخ بارندگی	ET_a برای دور آبیاری اصلاح‌شده
8	راندمان کاربرد آب آبیاری	تاریخ آبیاری
9	شوری آب آبیاری	بارش مؤثر
10	شوری عصاره اشباع خاک	نیاز خالص آب آبیاری
11	شوری خاک با عملکرد صفر	نیاز آبخویی
12	دبی جریان	نیاز ناخالص آب آبیاری
13	مساحت مزرعه	نیاز ناخالص اصلاح‌شده
14	مدار حلقه	حجم آب آبیاری ناخالص
15	دبی حلقه	مدت زمان آبیاری
16	زمان حلقه	نیاز ناخالص در حلقه
17	عمق ریشه	حجم ناخالص حلقه

نتایج و بحث

است. حجم آب آبیاری و تعداد آبیاری در سامانه ثقلی، بارانی و قطره‌ای به‌ترتیب $7537m^3$ و ۸ مرتبه، 4737 مترمکعب و ۱۳ مرتبه، 4959 مترمکعب و ۱۷ مرتبه حاصل شد. مطابق انتظار، حجم آب آبیاری در سامانه آبیاری ثقلی حدود ۳۰ درصد بیشتر از دو سامانه آبیاری بارانی و قطره‌ای بود.

نکته قابل توجه در برنامه‌ریزی آبیاری گندم در استان البرز برآورد حجم آب آبیاری یکسان در سامانه آبیاری بارانی و قطره‌ای علی‌رغم پایین بودن راندمان کاربرد آب آبیاری در سامانه آبیاری بارانی نسبت به قطره‌ای بود. مساوی بودن حجم آب آبیاری در این دو سامانه آبیاری به دو دلیل عمده است: اولاً در سامانه آبیاری قطره‌ای بر خلاف

برنامه‌ریزی آبیاری شامل دور آبیاری، مقدار آب آبیاری در هر نوبت آبیاری و مقدار آب مصرفی در کل طول فصل رشد گندم در استان البرز، بر مبنای خاک مزرعه و راندمان کاربرد آب آبیاری مندرج در بانک اطلاعاتی سامانه نیاز آب (جدول ۲ و ۳)، در سامانه آبیاری ثقلی، بارانی و قطره‌ای با آب آبیاری باکیفیت مطلوب (بدون نمک) به شرح جداول ۵، ۶ و ۷ برآورد شد. نتایج برنامه‌ریزی آبیاری در طول فصل رشد نشان داد که در ابتدای فصل رشد به دلیل کم بودن تبخیر و تعرق و عمق توسعه ریشه، نیاز ناخالص آب آبیاری در هر آبیاری کم و با افزایش دما در مراحل انتهایی رشد و افزایش عمق ریشه مقدار آن افزایش یافته

دو سامانه آبیاری دیگر، در مراحل ابتدایی رشد گندم، به دلیل دور آبیاری کم، مقدار تبخیر و تعرق واقعی (جداول ۱ و ۲)، در هر بار آبیاری، کمتر از گنجایش رطوبتی مزرعه بود و برای عدم تنش آبی گیاه گندم، ظرفیت گنجایش رطوبتی خاک به جای تبخیر و تعرق واقعی مبنای محاسبه برنامه ریزی آبیاری قرار گرفت. ثانیاً مقدار رطوبت در دسترس خاک مزرعه برای تبخیر و تعرق در این سامانه بیشتر از سامانه آبیاری بارانی است در سامانه آبیاری قطره‌ای به دلیل دور پایین آبیاری، خاک مزرعه همواره مرطوب است. لذا رطوبت برای تبخیر و تعرق همواره در دسترس است؛ اما در سامانه آبیاری بارانی به دلیل طولانی‌تر بودن فاصله بین دو آبیاری، مقدار رطوبت خاک در روزهای قبل از هر آبیاری کمتر بوده (خاک مزرعه خشک‌تر است) و لذا مقدار تبخیر و تعرق در این سامانه در این روزها کمتر است (تودوروویچ، ۲۰۱۶). هر چند افزایش مقدار آب مصرفی ناشی از این تفاوت‌ها در هر آبیاری اندک بود اما در طول فصل رشد باعث تفاوت قابل توجه در مقدار آب مصرفی در سامانه آبیاری قطره‌ای نسبت به بارانی شد و تفاوت راندمان کاربرد آب آبیاری در این دو سامانه آبیاری جبران می‌شود. یکی از دلایل بالا بودن عملکرد در سامانه آبیاری قطره‌ای نسبت به آبیاری بارانی، در دسترس‌تر بودن رطوبت

برای گیاه است. این موضوع یکی از دلایل عدم کاهش مصرف آب در کشاورزی علی‌رغم توسعه سامانه آبیاری قطره‌ای در کشور (حدود ۲/۵ میلیون هکتار) است که توجهی به آن نمی‌شود. شاید به‌کارگیری سامانه آبیاری قطره‌ای بر اساس شرایط آب، خاک، گیاه و اقلیم هر منطقه راه‌گشای این مشکل باشد. متعجبی (۱۳۸۸) در آزمایشی در گلپایگان برای گیاه گندم نه بار آبیاری با حجم آب آبیاری ۶۴۳۰ مترمکعب در هکتار توصیه نمود. همچنین در آزمایشی که توسط قوچانیان و همکاران (۱۳۹۸) در خراسان رضوی انجام شد دور آبیاری گندم را ۱۰ روز و حجم آب آبیاری در هر آبیاری را ۶۰۰ مترمکعب در هکتار، صنوبر و همکاران (۱۳۹۰) دور آبیاری گندم در یزد را بین ۸ تا ۱۰ روز و مقدار آب آبیاری را بین ۵۶۱ تا ۵۸۴ مترمکعب در هکتار برای هر آبیاری پیشنهاد کردند؛ اما در مورد تغییر دما و عمق توسعه ریشه در طول فصل رشد و تأثیر آن بر مدار و مقدار آب آبیاری گندم توضیحی ارائه ندادند.

به‌طور خلاصه، از بین عوامل مؤثر بر برنامه‌ریزی آبیاری، انتخاب یا تغییر سامانه آبیاری برای آبیاری مزارع گندم جزء عواملی هستند که هم بر دور آبیاری و هم بر حجم آب آبیاری تأثیرگذار است (جداول ۵، ۶ و ۷).

جدول ۵- برنامه‌ریزی آبیاری گندم در خاک با بافت لوم و راندمان ۴۶ درصد در سامانه آبیاری ثقلی

تاریخ آبیاری	حجم**	دور	عمق ریشه	تاریخ آبیاری	حجم	دور	عمق ریشه
بارش کفایت آبیاری				۲۶ اردیبهشت - 16May	1077	9	37.5
۱ فروردین - 21Mar.	613	20*	26	۵ خرداد - 26May	1134	9	40
۱۶ فروردین - 5Apr.	752	15	29	۱۵ خرداد - 6Jun.	1239	10	42
۲۷ فروردین - 16Apr.	800	11	31	۲۰ روز قبل از برداشت آبیاری نمی‌شود			
۷ اردیبهشت - 27Apr.	912	10	33	کل آب مصرفی			تعداد آبیاری
۱۷ اردیبهشت - 7May	1010	10	35.5	7537 m ³ ha ⁻¹			8

*اصلاح شده ** واحد حجم آب آبیاری (مترمکعب در هکتار)، دور آبیاری (روز) و عمق ریشه (سانتیمتر)

جدول ۶- برنامه‌ریزی آبیاری گندم در خاک با بافت لوم و راندمان ۷۰ درصد در سامانه آبیاری بارانی

تاریخ آبیاری	حجم	دور	عمق ریشه	تاریخ آبیاری	حجم	دور	عمق ریشه
بارش کفایت آبیاری				۲۲ اردیبهشت-12May	426	6	36
۲۲ اسفند-27Feb	265	12*	24	۲۷ اردیبهشت-17May	415	5	38
۴ فروردین-24Mar	224	11	26	۳ خرداد-24May	488	6	39
۱۳ فروردین-2Apr.	269	9	28	۹ خرداد-30May	478	6	40
۲۱ فروردین-10Apr.	297	8	30	۱۵ خرداد-5Jun.	485	6	42
۲۸ فروردین-17Apr.	305	7	32	۲۰ روز قبل از برداشت آبیاری نمی‌شود			
۴ اردیبهشت-24Apr.	330	6	33				
۱۰ اردیبهشت-30Apr.	365	6	34	کل آب مصرفی	تعداد آبیاری		
۱۶ اردیبهشت-6May	390	6	35	4737 m ³ ha ⁻¹	13		

*اصلاح شده ** واحد حجم آب آبیاری (مترمکعب در هکتار)، دور آبیاری (روز) و عمق ریشه (سانتیمتر)

جدول ۷- برنامه‌ریزی آبیاری گندم در خاک با بافت لوم و راندمان ۷۶ درصد در سامانه آبیاری قطره‌ای

تاریخ آبیاری	حجم	دور	عمق ریشه	تاریخ آبیاری	حجم	دور	عمق ریشه
بارش کفایت آبیاری				۱۷ اردیبهشت- 7May	325	5	35
۱۷ اسفند- 7Mar.	214	7*	23	۲۲ اردیبهشت- 12May	335	5	36
۲۴ اسفند- 14Mar.	205	7*	25	۲۶ اردیبهشت- 16May	360	4	37
۲ فروردین- 22Mar.	201	7*	26	۱ خرداد- 22May	370	4	38
۹ فروردین- 29Mar.	211	7	28	۶ خرداد- 27May	370	5	39
۱۶ فروردین- 5Apr.	225	6	28	۱۱ خرداد- 1Jun.	386	5	41
۲۲ فروردین- 11Apr.	234	5	30	۱۶ خرداد- 6Jun.	411	5	42
۲۷ فروردین- 16Apr.	236	5	31	۲۰ روز قبل از برداشت آبیاری نمی‌شود			
۲ اردیبهشت- 22Apr.	264	5	32	کل آب مصرفی	تعداد آبیاری		
۷ اردیبهشت- 27Apr.	300	5	33	4959 m ³ ha ⁻¹	17		
۱۲ اردیبهشت- 2May	312	5	34				

*اصلاح شده ** واحد حجم آب آبیاری (مترمکعب در هکتار)، دور آبیاری (روز) و عمق ریشه (سانتیمتر)

برای بررسی تأثیر خاک مزرعه در برنامه‌ریزی آبیاری، دور و عمق آب آبیاری گندم برای سه خاک لوم-شنی، لوم و لومرسی با ویژگی مندرج در جداول ۲ و ۳ انجام شد. نتایج برنامه‌ریزی آبیاری گندم در این سه خاک با بارش و راندمان آبیاری یکسان در جدول ۵، ۸ و ۹ نشان داد که در استان البرز حجم آب آبیاری برای آبیاری یک

هکتار گندم در سامانه آبیاری ثقلی طول فصل رشد در سه خاک لوم، لومرسی و لومشنی به ترتیب ۷۵۳۷، ۷۹۸۸ و ۷۹۸۷ مترمکعب است و نشان داد که بافت خاک تأثیری بر مقدار حجم آب آبیاری ندارد؛ اما تعداد دفعات آبیاری در طول فصل رشد به خاک مزرعه بستگی دارد و هر چه خاک سبک‌تر گنجایش زراعی آن کمتر و تعداد دفعات آبیاری در

یک فصل رشد بیشتر است و بالعکس. تعداد آبیاری در یک فصل رشد برای گندم در استان البرز برای این سه خاک لوم شنی، لوم و لومرسی با گنجایش زراعی متفاوت (جدول ۲) به ترتیب ۱۰، ۸ و ۷ بار حاصل شد. عزیزی زهان و همکاران (۱۳۹۸) در تحقیقی دریافتند که تعداد آبیاری در خاک سبک بیشتر از خاک سنگین است.

جدول ۸- برنامه ریزی آبیاری گندم در استان البرز در سامانه آبیاری ثقلی در خاک لومرسی با راندمان آبیاری ۴۶٪

تاریخ آبیاری	حجم**	دور	عمق ریشه	تاریخ آبیاری	حجم	دور	عمق ریشه
بارش کفایت آبیاری				۸ خرداد- 29May	1475	12	41
۱ فروردین- 21Mar.	750	20	26	۲۰ خرداد- 10Jun.	1575	13	43
۱۹ فروردین- 8Apr.	808	18	30	۲۰ روز قبل از برداشت آبیاری نمی شود			
۲ اردیبهشت- 22Apr.	915	13	32	کل آب مصرفی			
۱۴ اردیبهشت- 4May	1140	13	35	تعداد آبیاری			
۲۶ اردیبهشت- 16May	1325	12	37	7			
				7988m ³ ha ⁻¹			

** واحد حجم آب آبیاری (مترمکعب در هکتار)، دور آبیاری (روز) و عمق ریشه (سانتیمتر)

جدول ۹- برنامه ریزی آبیاری گیاه گندم در استان البرز در سامانه آبیاری ثقلی در خاک لوم شنی با راندمان آبیاری ۴۶٪

تاریخ آبیاری	حجم	دور	عمق ریشه	تاریخ آبیاری	حجم	دور	عمق ریشه
بارش کفایت آبیاری				۳۰ اردیبهشت- 20May	950	7	38
۲۸ اسفند- 18Mar.	518	20*	23	۷ خرداد- 28May	985	7	40
۱۲ فروردین- 1Apr.	591	15	28	۱۵ خرداد- 5Jun.	1038	8	42
۲۲ فروردین- 11Apr.	663	10	30	۲۰ روز قبل از برداشت آبیاری نمی شود			
۳۰ فروردین- 19Apr.	701	8	32	کل آب مصرفی			
۸ اردیبهشت- 28Apr.	797	8	33	تعداد آبیاری			
۱۶ اردیبهشت- 6May	844	8	35	10			
۲۳ اردیبهشت- 13May	900	7	36	7987 m ³ ha ⁻¹			

** واحد حجم آب آبیاری (مترمکعب در هکتار)، دور آبیاری (روز) و عمق ریشه (سانتیمتر)

آبیاری افزایش یافت (جداول ۵ و ۱۱)؛ اما کاشت گندم در خاک لوم شنی و لومرسی با راندمان آبیاری مشابه، تغییری در حجم آب آبیاری ایجاد نکرد (جداول ۸ و ۹)؛ بنابراین بر خلاف بافت خاک مزرعه، راندمان کاربرد آب آبیاری باعث تغییر در مقدار حجم آب آبیاری گندم شد. از این رو برای مدیریت مصرف آب، راندمان کاربرد آب آبیاری از اهمیت بیشتری نسبت به بافت خاک مزرعه برخوردار است. تغییر در سامانه آبیاری از ثقلی به تحت فشار با هدف افزایش راندمان کاربرد آب آبیاری برای دستیابی به این هدف است.

نتایج ارزیابی راندمان کاربرد آب آبیاری بر دور و عمق آب آبیاری گندم، در سه خاک با بافت لوم، لوم شنی و لومرسی با راندمان کاربرد به ترتیب ۴۶، ۳۰ و ۴۵ درصد (جدول ۳) در جداول ۵، ۱۰ و ۱۱ ارائه شده است. نتایج نشان داد که راندمان کاربرد آب آبیاری تأثیری بر تعداد دفعات آبیاری در طول فصل رشد ندارد، اما حجم آب آبیاری را تحت تأثیر قرار می دهد. به طوری که با ۱۶ درصد کاهش راندمان کاربرد آب آبیاری در خاک لوم شنی نسبت به خاک لوم، ۴۲۶۰ مترمکعب در هکتار (۴۶٪) حجم آب

جدول ۱۰- برنامه‌ریزی آبیاری گندم در استان البرز در سامانه آبیاری ثقلی در خاک لومرسی با راندمان ۴۵٪

تاریخ آبیاری	حجم	دور	عمق ریشه	تاریخ آبیاری	حجم	دور	عمق ریشه
بارش کفایت آبیاری				۸ خرداد- 29May	1508	12	40
۱ فروردین- 21Mar.	767	20	25	۲۰ خرداد- 10Jun.	1610	13	43
۱۹ فروردین- 8Apr.	826	18	29	۲۰ روز قبل از برداشت آبیاری نمی‌شود			
۲ اردیبهشت- 22Apr.	935	13	32	کل آب مصرفی		تعداد آبیاری	
۱۴ اردیبهشت- 4May	1165	13	35	8188m ³ ha ⁻¹		7	
۲۶ اردیبهشت- 16May	1354	12	37				

** واحد حجم آب آبیاری (مترمکعب در هکتار)، دور آبیاری (روز) و عمق ریشه (سانتیمتر)

جدول ۱۱- برنامه‌ریزی آبیاری گیاه گندم در استان البرز در خاک لوم‌شنی با راندمان ۳۰٪ در سامانه آبیاری ثقلی

تاریخ آبیاری	حجم	دور	عمق ریشه	تاریخ آبیاری	حجم	دور	عمق ریشه
بارش کفایت آبیاری				۲۳ اردیبهشت- 13May	1380	7	37
۲۸ اسفند- 18Mar.	794	20*	25	۷ خرداد- 28May	1510	7	39
۱۲ فروردین- 1Apr.	906	14	27	۱۵ خرداد- 10Jun.			
۲۲ فروردین- 11Apr.	1017	10	30				
۳۰ فروردین- 19Apr.	1075	8	32	۲۰ روز قبل از برداشت آبیاری نمی‌شود			
۸ اردیبهشت- 28Apr.	1222	8	34	کل آب مصرفی	تعداد آبیاری		
۱۶ اردیبهشت- 6May	1294	8	35	12247 m ³ ha ⁻¹	9		

** واحد حجم آب آبیاری (مترمکعب در هکتار)، دور آبیاری (روز) و عمق ریشه (سانتیمتر)

به‌اندازه بارش مؤثر نمی‌شود (تامپسون و همکاران، ۲۰۰۷؛ شرر و همکاران، ۲۰۲۲).

تأثیر زمان بارش بر مقدار آب مصرفی با پنج روز دیرتر از حالت قبل در جدول ۱۲ ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با پنج روز جابجایی در زمان بارش (بارش بجای ۱۲۵م، در ۱۳۰م اتفاق بیفتد) مقدار آب مصرفی با همان مقدار بارش ۴۹/۹ میلی‌متر کاهش یافت؛ بنابراین اولاً علاوه بر مقدار بارش، زمان بارش هم بر مؤثر بودن و کاهش مقدار آب مصرفی اثرگذار است و ثانیاً مشخص نبودن زمان وقوع بارش و مقدار دقیق آن در استفاده از میانگین داده‌های درازمدت، باعث می‌شود که برنامه‌ریزی آبیاری با خطا مواجه شود و پیشنهاد می‌شود در آینده از داده‌های به روز در سامانه نیاز آب استفاده و در تحقیقات آینده موضوع بارش مؤثر در ارتباط با برنامه‌ریزی آبیاری

بارش مؤثر یکی از مهم‌ترین و پیچیده‌ترین عوامل مؤثر در برنامه‌ریزی آبیاری است. زمان بارش در طول فصل رشد، مقدار و مدت بارش سه عامل مهم در مؤثر بودن مقدار بارش هستند. برای مشخص کردن تأثیر زمان بارش بر حجم آب آبیاری گندم، مقادیر بارش ۵۰، ۴۰ و ۳۰ میلی-متری به ترتیب در روزهای ۲۵ اسفند، ۲۵ فروردین و ۲۵ اردیبهشت (جدول ۱۲) در برنامه‌ریزی آبیاری در سامانه آبیاری بارانی بررسی شد. نتایج نشان داد که این مقدار بارش، مقدار آب مصرفی در سامانه آبیاری بارانی را ۱۱۸ مترمکعب معادل ۱۱/۸ میلی‌متر کاهش می‌دهد، این در حالی است که مقدار بارش مؤثر این سه بارش، مطابق محاسبات سامانه نیاز آب برابر ۴۲ میلی‌متر (۴۲=۲۰+۱۴+۸) است و نشان داد که اگر فاصله زمانی بین بارندگی و آبیاری کم باشد، باعث کاهش آب مصرفی

مورد بررسی قرار گیرد. در جدول ۱۲، از ویژگی خاک و راندمان کاربرد آب آبیاری ارائه شده به وسیله سامانه نیاز آب استفاده شده است.

جدول ۱۲- نقش بارش در برنامه ریزی آبیاری گیاه گندم در استان البرز در سامانه آبیاری بارانی

برنامه ریزی آبیاری بدون بارش				برنامه ریزی آبیاری با بارش ۵۰، ۴۰ و ۳۰ میلی متری در ۳۰ اسفند، ۲۵ فروردین و ۳۰ اردیبهشت				برنامه ریزی آبیاری با بارش ۵۰، ۴۰ و ۳۰ میلی متری در ۳۰ اسفند، ۲۵ فروردین و ۳۰ اردیبهشت			
تاریخ آبیاری	حجم	دور	عمق ریشه	تاریخ آبیاری	حجم	دور	عمق ریشه	تاریخ آبیاری	حجم	دور	عمق ریشه
۲۲ اسفند 12Mar	318	12	19	۲۲ اسفند 12Mar	318	12	19	۲۲ اسفند 12Mar	318	12	19
۴ فروردین 24Mar	331	7	22	مقدار بارش در ۲۵ اسفند بیش از ۸۰٪ نیاز آب آبیاری بود بنابراین به عنوان یک آبیاری تلقی و	۲۵ اسفند 12Mar	12	19	قبل از فرار رسیدن زمان آبیاری، وقوع بارش ۴۰mm جبران آبیاری کرد	۳۰ اردیبهشت	12	19
۱۱ فروردین 31Mar	370	8	24	۶ فروردین 26Mar	321	11	22	۱۰ فروردین 30Mar	346	10	24
۱۹ فروردین 8Apr	366	7	25	۱۵ فروردین 4Apr	353	9	24	۱۸ فروردین 7Apr	366	8	25
۲۶ فروردین 15Apr	410	7	27	۲۲ فروردین 11Apr	358	7	25	۲۵ فروردین 14Apr	366	7	27
۳ اردیبهشت 23Apr	410	6	29	۲۹ فروردین 18Apr	207	7	27	بارندگی برای آبیاری کفایت کرد			
۹ اردیبهشت 29Apr	410	6	30	۵ اردیبهشت 25Apr	413	6	29	۶ اردیبهشت 26Apr	415	6	30
۱۵ اردیبهشت 5May	436	6	31	۱۱ اردیبهشت 1May	413	6	30	۱۲ اردیبهشت 2May	423	6	31
۲۱ اردیبهشت 11May	458	6	32	۱۸ اردیبهشت 8May	487	7	31	۱۷ اردیبهشت 7May	427	5	31
۲۷ اردیبهشت 17May	545	6	34	۲۴ اردیبهشت 14May	510	6	32	۲۳ اردیبهشت 13May	493	6	32
۳ خرداد 27May	545	6	36	۳۰ اردیبهشت 20May	231	6	34	۲۸ اردیبهشت 18May	449	5	34
۹ خرداد 30May	545	6	37	۶ خرداد 27May	510	6	36	۴ خرداد 25May	220	6	36
۱۶ خرداد 6Jun	545	7	38	۱۲ خرداد 2Jun	510	6	37	۱۰ خرداد 31May	533	6	37
				۱۹ خرداد 9Jun	609	7	38	۱۵ خرداد 5Jun	503	5	38
مقدار آب مصرفی (m ³)	تعداد آبیاری	مقدار آب مصرفی (m ³)	تعداد آبیاری	مقدار آب مصرفی (m ³)	تعداد آبیاری	مقدار آب مصرفی (m ³)	تعداد آبیاری	مقدار آب مصرفی (m ³)	تعداد آبیاری	مقدار آب مصرفی (m ³)	تعداد آبیاری
5358	13	5240	13	4859	12						

** واحد حجم آب آبیاری (مترمکعب در هکتار)، دور آبیاری (روز) و عمق ریشه (سانتیمتر)

نتیجه گیری

متفاوتی در پی داشت و نشان داد که تغییر سامانه آبیاری که از نمادهای مدیریت آب در مزرعه است باعث تغییر در مدار آبیاری و میزان مصرف آب می شود. از نکات قابل توجه دیگر مشابه بودن حجم آب آبیاری در دو سامانه آبیاری

برنامه ریزی آبیاری گیاه گندم در سامانه های ثقلی، بارانی و قطره ای از نظر مدار و حجم آب آبیاری نتایج

راندمان کاربرد آب آبیاری در سامانه آبیاری ثقلی، ۴۶ درصد حجم آب آبیاری کاهش داد و نشان داد که راندمان کاربرد آب آبیاری از خاک مزرعه در کاهش مصرف آب مؤثرتر است. علاوه بر این زمان بارش در طول فصل رشد، مدت بارش و مقدار بارش از عواملی هستند که بر مقدار بارش مؤثر تأثیر بسزایی دارند. لذا پیشنهاد می‌شود زمان باران در فصل رشد، مقدار باران و مدت‌زمان آن بر بارش مؤثر بررسی و بر اساس آن رابطه‌ای متناسب با شرایط کشاورزی استخراج شود.

تعارض منافع

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

بارانی و قطره‌ای بود که دلیل آن کوتاه بودن فاصله دو آبیاری متوالی در آبیاری قطره‌ای نسبت به بارانی و مرطوب بودن دائمی خاک در سامانه آبیاری قطره‌ای است به عبارتی رطوبت خاک در مزارعی که تحت پوشش سامانه آبیاری قطره‌ای هستند باعث افزایش تبخیر و تعرق واقعی شده و این افزایش تبخیر و تعرق اختلاف راندمان در دو سامانه آبیاری را جبران نموده و باعث نزدیکی حجم آب آبیاری در این دو سامانه آبیاری می‌شود. بررسی خاک مزرعه بر برنامه‌ریزی آبیاری نشان داد که بافت خاک تأثیری بر حجم آب آبیاری ندارد اما تعداد دفعات آبیاری در طول فصل رشد را تغییر می‌دهد و هر چه خاک سبک‌تر گنجایش زراعی آن کمتر، فاصله دو آبیاری متوالی کمتر و در نتیجه تعداد دفعات آبیاری بیشتر خواهد شد. افزایش ۱۶ درصدی

فهرست منابع

۱. ابراهیمی‌پاک، نیازعلی، تافته، آرش، حسینی، سیده‌نرگس و کیخا، فاطمه، ۱۴۰۱. سیستم نیاز آب. مؤسسه تحقیقات خاک و آب. [http:// swri.ir](http://swri.ir)
۲. امداد، محمدرضا و تافته، آرش، ۱۳۹۸. تعیین مناسب‌ترین عمق آب آبیاری گیاه گندم با استفاده از مدل Aquacrop در راستای ارتقا کارایی مصرف آب. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۳۳(۲). ص. ۴۲۵-۴۱۷.
۳. تافته، آرش، دواتگر، ناصر، و عزیزی‌زهان، علی‌اکبر، ۱۳۹۸. مروری بر روش‌های تعیین و تخمین مقدار بارش مؤثر در تعیین نیاز آبیاری. انتشارات مؤسسه تحقیقات خاک و آب. نشریه فنی. شماره ثبت ۵۷۴. ۴۳ صفحه.
۴. جعفری، حسین، ابراهیمی‌پاک، نیازعلی، دواتگر، ناصر، تافته، آرش، حسینی، سیده‌نرگس و رضوی، رقیه، ۱۴۰۳. برنامه‌ریزی آبیاری گیاهان زراعی و باغی در سامانه نیاز آب. گزارش نهایی. سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی. مؤسسه تحقیقات خاک و آب. شماره مصوب ۹۷۱۰۳۸-۹۷۲-۱۰-۱۰-۰.
۵. جعفری، حسین و غالبی، سعید، ۱۳۹۷. برنامه‌ریزی آبیاری برای گندمیان مهم در مناطق مختلف کشور. شماره ثبت، ۵۵-اپ. سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی. تالار ترویج.
۶. دهقان، هادی، علیزاده، امین، انصاری، حسین، و حقایقی مقدم، سیدابوالقاسم، ۱۳۹۲. بررسی شاخص‌های بهره‌وری آب در مزارع تحت آبیاری گندم (مطالعه موردی: دشت نیشابور). مجله آبیاری و زهکشی ایران. ۲(۵). ص. ۲۶۳-۲۷۵.
۷. صنوبر، علی، طباطبایی، سیدعلی، و دهقانی، فرهاد، ۱۳۹۰. اثر دور آبیاری بر عملکرد دانه، اجزای عملکرد و شاخص برداشت ژنوتیپ‌های گندم نان در منطقه یزد. ۳(۲). ص. ۹۵-۱۰۴.
۸. عزیزآبادی فراهانی، مریم، و میرزایی، فرهاد، ۱۴۰۰. بهینه‌سازی برنامه‌ریزی آبیاری در شرایط مختلف تأمین آب با استفاده از الگوریتم مورچگان. مجله پژوهش آب ایران. ۱۵(۱). ص. ۶۴-۵۵.

۹. عزیزی زهان، علی اکبر، بنی جمالی، سید محمد، شهابی فر، مهدی، پورمنصور، سمانه، رضوی، رقیه، و رفعت پور ساسان، ۱۳۹۸. برنامه ریزی آبیاری گل رز برای کلاس های مختلف بافت خاک در فضای باز. شانزدهمین کنگره علوم خاک. ۵ تا ۷ شهریور ۹۸. ۶ صفحه.
۱۰. قوچانیان، مرجان، انصاری، حسین، و فشائی، محمد، ۱۳۹۸. ارتقای بهره وری مصرف آب در محصول گندم زمستانه تحت سناریوهای آبیاری مختلف با استفاده از مدل Aquacrop (مطالعه موردی مشهد). نشریه آبیاری و زهکشی. ۱۳(۳). ص. ۶۶۶-۶۵۷.
۱۱. کریمی، علی، مسکرباشی، موسی، نبی پور، مجید، و برومندنسب، سعید، ۱۳۹۰. بررسی برخی خصوصیات کمی و کیفی دو رقم گندم تحت شرایط مختلف روش کاشت و دور آبیاری. نشریه دانش کشاورزی و تولید پایدار. ۲۱(۴). ص. ۹۵-۱۰۵.
۱۲. گوشه، محی الدین، و غالبی، سعید، ۱۳۹۱. مدیریت آبیاری گندم با استفاده از آب شور در اراضی جنوبی استان خوزستان. مجله پژوهش آب در کشاورزی. ۲۶(۱). ص. ۴۳-۲۹.
۱۳. منتجی، نصرت الله، ۱۳۸۸. مدیریت مصرف آب آبیاری برای افزایش عملکرد و کارایی آب مصرفی گندم در گلپایگان. چهارمین همایش منطقه ای ایده های نو در کشاورزی. ۲۹ و ۳۰ مهرماه. دانشگاه آزاد اسلامی واحد خوراسگان، دانشکده کشاورزی.
14. Alhammadi, M. S. and Al-Shrouf, A. M. 2013. Crop Production, irrigation of sandy soils, basics and scheduling. Chapter 3. *Creative Commons Attribution*. Pages 20.
15. Gebeyhu, B., Dagalo, S. and Muluneh, M. 2024. Soil moisture-based irrigation interval and irrigation performance evaluation: In the case of lower Kulfo catchment, Ethiopia. *Heliyon* 10(2024) e36089.
16. Jorge, A. D., Peter, M. G., Mark, A. N., Tom, G., Don, R., Rattan, L., Newell, R. K., Charles, W. R., Dan, T., and Paul, S. 2008. New technology to increase irrigation efficiency. *Journal of Soil and Water Conservation*, 63(1):11A.
doi:10.2489/jswc.63.1.11A.
17. Salah, E. H. and Urs, S. 2010. Optimal coupling combinations between irrigation frequency and rate for drip-irrigated maize grown on sandy soil. *Agricultural Water Management*, 97(3): 439-448.
18. Scherer, T. F., Franzen, D. and Cihacek, L. 2022. Soil, Water and plant characteristics important to irrigation. North Dakota State University (NDSU) Extension. 16 Pages. www.ag.ndsu.edu/agcomm/creative-commons.
19. Seidel, S. J., Schütze, N., Fahle, M., Mailhol, J.C. and Ruelle, P. 2015. Optimal irrigation scheduling, irrigation control and drip line layout to increase water productivity and profit in subsurface drip-irrigated agriculture. *Irrigation and Drainage*, 64(4): 501-518.
20. Snyder, R. L., Shackel, K. A., Sanden, B., Fulton, A. E. and Suvočarev, K. 2024. Microirrigation for crop production. *Irrigation Scheduling*. (Second Edition). Chapter 3. Pages 41-132.
21. Thompson, R.B., Gallardo, M., Valdez, L.C. and Fernández, M.D. 2007. Using plant water status to define threshold values for irrigation management of vegetable crops using soil moisture sensors. *Agricultural Water Management*, 88(1-3): 147-158.
22. Todorovic, M. 2016. Soil Water Balance and Irrigation Scheduling. LARI, Tal Amara, Lebanon, 12-16 December.
23. Yi, J., Li, H., Zhao, Y., Shao, M., Zhang, H. and Liu, M. 2022. Assessing soil water balance to optimize irrigation schedules of flood-irrigated maize fields with different cultivation histories in the arid region. *Agricultural Water Management*. 265: 107543.

بررسی رابطه عملکرد زیست توده ذرت با آب کاربردی در مراحل مختلف رشد در تنش همزمان آبی - کودی

فرامرز زرگریعقوبی، مهدی سرائی تبریزی*^{ID}، علی محمدی ترکشوند، مهرداد اسفندیاری و هادی رضانی اعتدالی

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

faramarz.zargaryaghoubi@iau.ac.ir

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

m.sarai@iau.ac.ir

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

ali.mohammaditorkashvand@iau.ac.ir

استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

doddesfandiari@gmail.com

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

ramezani@eng.ikiu.ac.ir

دریافت: آبان ۱۴۰۲ پذیرش: اسفند ۱۴۰۳

چکیده

در این پژوهش عملکرد تر و تبخیر و تعرق دوره‌ای ذرت علوفه‌ای Sc. 704، زیر تأثیر مقادیر مختلف آب و کود بررسی شد. آزمایش به صورت فاکتوریل دو عاملی در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در دو سال زراعی ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰ در منطقه علی‌آباد فشافویه، بخش حسن‌آباد، شهرستان ری (استان تهران) انجام و تیمارهای آبی شامل سه سطح W_0 ، W_1 و W_2 و سه سطح کودی F_0 ، F_1 و F_2 که به ترتیب با تأمین ۱۰۰٪، ۷۵٪ و ۵۰٪ نیاز آبی بر اساس کمبود رطوبت خاک و کود بر اساس آزمون خاک برای عناصر غذایی پرمصرف ذرت علوفه‌ای، اجرا شد. نتایج نشان داد که هم‌زمان با افزایش تنش‌های آبی و کودی، میزان متوسط دو ساله عملکرد و آب کاربردی (تبخیر و تعرق کل) به ترتیب ۲۷/۶٪ و ۴۶/۸٪ کاهش داشت به طوری که عملکرد از ۵۰/۴ تن بر هکتار و آب کاربردی (ET) کل از ۶۹۴ به ۳۶۹ میلی‌متر کاهش پیدا کرد. همچنین، اثرات ساده و متقابل تیمارها بر عملکرد و آب کاربردی دوره‌ای با احتمال ۹۵٪ معنی‌دار بود. نتایج مدل‌سازی عملکرد نسبی محصول بر اساس مقادیر ET نسبی دوره‌ای حاکی از مناسب بودن مدل جمع‌پذیر سینک و ضرب‌پذیر راثو در شرایط تنش آبی و کودی بود. در مجموع نتایج نشان داد که تولید ذرت علوفه‌ای در درجه نخست وابسته به حجم آب آبیاری و سپس تأمین عناصر غذایی است. بالاترین میزان عملکرد زیست توده پس از تیمار شاهد (W_0F_0) مربوط به اعمال تیمار W_0F_1 بود. همچنین، وجود یک همبستگی مثبت قوی بین تبخیر و تعرق کل با عملکرد به اثبات رسید ($R^2=0.94$, $p<0.05$) از سوی دیگر، تفاوت معنی‌داری از نظر عملکرد بین سه تیمار W_1F_0 ، W_1F_1 و W_1F_2 مشاهده نشد. بنابراین در شرایط کمبود آب آبیاری، تیمار W_1F_2 صرفه اقتصادی بهتری نسبت به سایر تیمارها دارا بود. نیز، تابع تولید ریشه دوم با آماره‌های $RMSE$ ، R^2 و NS به ترتیب ۰/۴۲، ۰/۹۸ و ۰/۹۷، تابع مناسب‌تری برای برآورد میزان عملکرد با آب مصرفی و کود در مقایسه با تابع‌های لجستیک و کاب داگلاس داشت و مشخص شد که در شرایط کمبود آب و عناصر غذایی اصلی، نه تنها ET مراحل مختلف رشد با مدیریت مصرف کود قابل افزایش هست، بلکه عملکرد گیاه نیز بستگی کامل به مدیریت صحیح مصرف آب و کود دارد.

واژه‌های کلیدی: تبخیر و تعرق دوره‌ای، توابع تولید تجربی، دستگاه بازتاب زمانی امواج، ذرت علوفه‌ای Sc. 704

مقدمه

عواملی که باعث کاهش رشد کمی و یا کیفی محصولات گیاهی در اثر تغییرات خارج از دامنه مطلوب عوامل محیطی ایجاد می شود به عنوان تنش شناخته شده (زرگریعقوبی و همکاران، ۱۴۰۱) و تنش های آبی، شوری و کودی، مهم ترین تنش های غیرزنده محیطی در مناطق خشک و نیمه خشک است، لذا وجود یک برنامه ریزی صحیح در راستای استفاده بهینه از منابع کمی و کیفی آب آبیاری و کودی کشور به منظور افزایش بهره وری به خصوص در بخش کشاورزی با توجه به افزایش سریع جمعیت و کاهش منابع امری لازم و ضروری به نظر می رسد. این مهم جزء با اعمال مدیریت صحیح در سامانه آب، خاک و گیاه محقق نخواهد شد. با این کار می توان ضمن ایجاد افزایش محصول، به یک کشاورزی پایدار نیز دست یافت. از سویی، شناخت و آگاهی از حساسیت مرحله ای تبخیر و تعرق گیاهان (ET دوره ای) به تنش های محیطی، امکان مدل سازی دقیق عملکرد را با توابع تولید تجربی فراهم می کند و در این میان ذرت علوفه ای به دلیل نقش تغذیه ای آن برای دام در تولید پروتئین از اهمیت بسیاری برخوردار است، لذا مدل سازی تولید با این توابع می تواند نقش مهمی در برآورد میزان تولید سالیانه کشور به این محصول استراتژیک با توجه به منابع قابل دسترس آبی و کودی کشور داشته باشد (زرگریعقوبی و همکاران، ۲۰۲۴).

مقاومت گیاهان به تنش ها یک صفت پیچیده است که تحت تأثیر عواملی چون ژنتیک، فیزیولوژی گیاه و عوامل محیطی از جمله نور، دما، CO₂ و رطوبت قرار دارد (مولز و همکاران، ۲۰۱۶). از آنجایی که آب مهم ترین نقش را در رشد و نمو و انتقال مواد معدنی جذب شده از خاک به گیاه و حرکت آن در سرتاسر اندام های گیاهی از ریشه تا برگ را دارد، از میزان فاکتور آب قابل دسترس به همراه مقدار مصرف سه کود ماکرو (نیتروژن) N، (فسفر) P و (پتاسیم) K به عنوان مهم ترین عوامل تنش تولید یاد می

شود. در ارتباط با نوع عملیات کشت، پژوهشی بر روی پنبه انجام شده و نتیجه آن بود که در شرایط بدون خاک ورزی، گیاه به کاربرد کود ازته پاسخ معنی داری نمی دهد بر خلاف زمانی که عملیات خاک ورزی انجام می شود (روبرتز و همکاران، ۱۹۹۹). در تأیید این نتیجه پژوهشی در سال ۱۹۹۵ انجام شده بود که نشان داد، تلفات نیتروژن چه از طریق آبشویی، دنتریفیکاسیون، فرار آمونیاک (تصعید گازی) و غیر متحرک شدن^۱ آن در عملیات بدون خاک ورزی بیش تر از کشت نرمال (کشت پس از عملیات خاک ورزی) است (ایزورالدو و همکاران، ۱۹۹۵).

سون و ارشد (۲۰۰۵) معتقدند که نیتروژن اضافی برای خنثی نمودن اثرات آلی شدن نیتروژن به وسیله ریزجانداران مصرف می شود که این مسئله منجر به عدم تعادل در C/N خاک می شود. نتایج پژوهش های متعددی نشان داد که بهبود خواص فیزیکی خاک و شرایط تهویه ای بهتر آن در اثر عملیات مناسب خاک ورزی می تواند، موجب بهبود جذب عناصر غذایی و عملکرد بالاتر گیاه شود (آریف و همکاران، ۲۰۰۷- زوریتا، ۲۰۰۰- هالو و همکاران، ۲۰۰۱- پاتیل و شلوانتار، ۲۰۰۶). بیشتر تحقیقاتی که در ایران در زمینه های کودی صورت گرفته در شرایط مطلوب آب آبیاری و عملیات مناسب خاک ورزی بوده است، لیکن در شرایطی که محدودیت منابع آبی وجود داشته باشد، توسعه سامانه های کم خاک ورزی به همراه مدیریت مصرف صحیح کود می تواند راه حلی چاره ساز در زمینه رفع برخی محدودیت های تولید در کشاورزی باشد. این امر به خصوص در خشکسالی های اخیر از اهمیت ویژه ای برخوردار است. در پژوهشی تأثیر تنش آبی و مقادیر مختلف نیتروژن بر گیاه ذرت مطالعه شد و نتایج نشان دهنده به تأخیر افتادن مراحل فنولوژیکی رشد و نمو گیاه در طول دوره رشد بود، به طوری که با کاهش رطوبت خاک و نیتروژن قابل دسترس گیاه، شاخص سطح برگ به شدت افت چشم گیری پیدا کرد (سپهری و همکاران،

^۱ - پدیده ای موقتی که طی فرآیند معدنی شدن دوباره به فرم قابل دسترس گیاه تبدیل می شود.

متری از سطح دریا قرار گرفته و حداکثر دما در فصل تابستان ۴۲ درجه و حداقل آن در زمستان ۴- درجه سانتیگراد گزارش شده است.

الگوی کشت مرسوم در منطقه گندم و جو پائیزه، یونجه، آفتابگردان، ذرت علوفه‌ای و کلزا است که به‌تازگی و با توجه به اقلیم سازگار منطقه با گیاه کینوا، برخی از کشاورزان سطوحی را به کشت این گیاه جدید اختصاص داده‌اند. همچنین، سطح زیر کشت در منطقه مطالعاتی در سال‌های ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰ برای کشت ذرت علوفه‌ای به‌ترتیب حدود ۱۴ و ۱۷ هکتار بوده است. رقم مورد استفاده بذر هیبرید سینگل کراس ۷۰۴ در فاصله ردیف‌های کاشت ۷۵ سانتی‌متری و عمق پنج سانتی‌متری با تراکم بوته ۸۵ هزار در هکتار بنا به توصیه موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر انجام شد.

روش اجرای طرح

این پژوهش، در چارچوب مطالعات دوساله مزرعه‌ای، به بررسی اثرات تنش آبی و محدودیت‌های مصرف کودهای N، P و K بر روی ذرت علوفه‌ای پرداخته است که در آن، سطوح تنش آبی و کودی به‌عنوان اصلی‌ترین متغیرهای تصادفی مستقل در نظر گرفته شده‌اند. داده‌های پژوهش برای هر سال مطالعاتی شامل عملکرد زیست‌توده گیاه (بیوماس تر) و تبخیر و تعرق کُل و دوره‌ای تحت شرایط تنش آبی ($W_1 = 75\% \times FC$) و $W_2 = 50\%$ و غیرتنش آبی ($W_0 = 100\% \times FC$) و اثرات متقابل تنش آبی و کودی N، P و K بر روی این صفات، مورد بررسی قرار گرفت. تجزیه واریانس و مقایسه میانگین داده‌ها به روش توکی با احتمال ۹۵ درصد با استفاده از نرم‌افزارهای SAS و SPSS انجام و سپس داده‌های آنالیز شده به‌صورت شکل و جدول تدوین و مورد تفسیر قرار گرفت. در نهایت با تعیین توابع تجربی ضرب‌پذیر و جمع‌پذیر، عملکرد با مقادیر تبخیر و تعرق دوره‌ای و همچنین با انجام سه مدل رگرسیونی دو متغیر که شامل میزان درصد کاهشی از رطوبت FC خاک و درصد کاهشی

(۱۳۸۱). در پژوهش دیگری اثرات متقابل دو سطح تنش آبی (بدون تنش خشکی و تنش خشکی قبل از گرده‌افشانی) و سه سطح نیتروژن خالص (صفر، ۸۰ و ۱۶۰ kg/ha) بر روی چهار وارسته ذرت بررسی شد و نتایج حاکی از کاهش عملکرد زیست‌توده در اثر تنش رطوبتی بود (موسه و همکاران، ۲۰۰۶). همچنین با انجام آزمایش گلخانه‌ای (Indoor) سه‌ساله بر روی گوجه‌فرنگی در ایالت فلوریدا امریکا، زورتاوی و همکاران (۲۰۰۹)، پی به اثرات متقابل تنش آبی و کودی نیتروژن بر کارایی ازت شدند و بدین نتیجه رسیدند که کاربرد نیتروژن زیاد در شرایط تنش آبی تأثیر معکوسی بر عملکرد دارد. از آنجایی‌که در این سوابق مطالعاتی گفته‌شده فقط به مصرف کود ازته اشاره داشته و کمبودی از نظر کود P و K نداشته‌ایم در این مطالعات به نقش تنش کودی N، P و K نیز پرداخته شد؛ بنابراین با توجه به بحران کنونی کمیت و کیفیت منابع آب و خاک در شرایط منطقه نیمه‌خشک و حفظ امنیت غذایی در تأمین و تولید محصولات کشاورزی با کیفیت و در سطح کمتر، پیش‌بینی عملکرد محصولات با توجه به سطوح تأمین نهاده‌های آبی و خاکی (کود) بسیار با اهمیت است و در این راستا در این پژوهش از دو طریق به بررسی توابع تولید در این امر مهم و حساس پرداخته شده است. نتایج به‌دست آمده از دو سال کشت می‌تواند به توصیه کودی مناسب برای کشت این محصول در وضعیت‌های محدودیت رطوبتی خاک و همچنین اقتصادی‌تر بودن کاشت این محصول منجر شود.

مواد و روش‌ها

مشخصات منطقه مورد مطالعه

این پژوهش در تابستان سال‌های ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰ در مزرعه کشاورزی و دامپروری علی‌آباد فشافویه واقع در بخش حسن‌آباد شهرستان ری، استان تهران با مشخصات طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۴۰ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۱۷ دقیقه شمالی انجام شد. منطقه مورد مطالعه دارای آب‌وهوای خشک و نیمه‌خشک و اصولاً کم‌باران در کویری نسبتاً هموار و مسطح و در ارتفاع ۱۱۹۱

از مقدار مطلوب کودهای پرمصرف NPK به روش گام به گام، به برآورد عملکرد ذرت علوفه‌ای انجام گردید. ذرت در کرت‌هایی به ابعاد سه در سه متر با فاصله سه متر از هم از هر چهار طرف در اواسط تیرماه هرسال کشت شد (شکل ۱). با توجه به اثر باقی‌مانده کود کشت سال قبل به سال بعد، برای یکنواختی ماده آزمایشی (خاک) چه از نظر شکل، اندازه و ماهیت کرت‌ها، در سال دوم کاشت، زمین مجاور کشت سال نخست با آرایشی متفاوت برای تیمارها با استفاده از اصول جداول اعداد تصادفی، چیدمان تیمارها به‌طور تصادفی قرار داده شد که با انجام این کار می‌توان دقت آزمایش را تا حد بسیار زیادی مشابه سال قبل فرض کرد و فقط تفاوت تیمارها از نظر نوع تنش‌های اعمال‌شده از نظر آبی و کودی بود و بقیه مدیریت‌های زراعی کاملاً یکسان در دو سال اعمال شد.

قبل از اجرای طرح از اعماق ۰-۲۰، ۲۰-۴۰ و ۴۰-۶۰ سانتی‌متری، نمونه‌های مرکبی بر اساس اصول صحیح نمونه‌برداری خاک تهیه و آنالیزهای فیزیکی و شیمیایی لازم برای نوع و مقدار کودهای مورد نیاز انجام شد و به جزء نیتروژن بقیه کودها قبل از کشت و هم‌زمان با عملیات کشت مصرف شد. ذرت بیشترین نیاز را از میان این سه عنصر (NPK) به نیتروژن دارد و با توجه به آبشویی زیاد ازت، این عنصر نمی‌تواند مدت زمان زیادی در دسترس گیاه باشد. لذا با تقسیم آن در سه مرحله نیاز گیاه به این عنصر حیاتی تأمین شد. در جداول ۱ و ۲ به ترتیب میانگین نتایج تجزیه شیمیایی و فیزیکی خاک مزرعه بر حسب عمق‌های یادشده در دو سال زراعی ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰ و در جدول ۳ داده‌های هواشناسی منطقه مورد مطالعه در ایام تحت کشت ارائه شده است.

جدول ۱- میانگین برخی خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک منطقه مورد آزمایش (۱۳۹۹)

عمق (سانتی‌متر)	رطوبت حجمی PWP (cm ³ .cm ⁻³)	رطوبت حجمی FC (cm ³ .cm ⁻³)	پتاسیم K (mg.kg ⁻¹)	فسفر P (mg.kg ⁻¹)	ازت کل Total N (mg.kg ⁻¹)	کربن آلی OC (%)	آهک TNV (%)	اسیدیته pH	شوری EC (dS.m ⁻¹)	بافت خاک Texture
0-20	14.7	29.8	197.30	5.65	627.8	0.61	14.18	7.86	8.67	لوم
20-40	15.1	28.5	187.37	5.38	582.0	0.58	12.35	7.88	7.96	لوم
40-60	18.4	35.6	168.02	4.93	561.2	0.53	13.11	7.94	8.42	لوم رسی

*: به دلیل وجود شوری در خاک، در ابتدای شروع کشت، یک آبیاری سنگین اولیه در کلیه کرت‌ها انجام شد که هدف آن شستشوی نمک‌های موجود در ناحیه توسعه ریشه است. این آبیاری سنگین باعث کاهش قابل توجه شوری خاک در عمق توسعه ریشه خواهد شد و شرایط مناسب برای رشد گیاه را فراهم می‌گردد بنابراین در مراحل بعدی آبیاری، نیازی به لحاظ نمودن جزء آبشویی در محاسبات حجم آب آبیاری نیست و حجم آب داده شده را می‌توان معادل تبخیر و تعرق گیاه در نظر گرفت

جدول ۲- متوسط برخی خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک منطقه (۱۴۰۰)

عمق (سانتی‌متر)	رطوبت حجمی PWP (cm ³ .cm ⁻³)	رطوبت حجمی FC (cm ³ .cm ⁻³)	پتاسیم K (mg.kg ⁻¹)	فسفر P (mg.kg ⁻¹)	ازت کل Total N (mg.kg ⁻¹)	کربن آلی OC (%)	آهک TNV (%)	اسیدیته pH	شوری EC (dS.m ⁻¹)	بافت خاک Texture
0-20	14.6	30.0	200.70	5.95	630.8	0.65	14.79	7.76	8.53	لوم
20-40	15.3	28.5	182.40	5.37	587.0	0.61	12.15	7.85	7.86	لوم
40-60	18.1	35.9	168.09	4.99	562.8	0.73	13.01	7.91	8.52	لوم رسی

جدول ۳- داده‌های هواشناسی در ماه‌های زیر کشت ذرت علوفه‌ای در منطقه مورد مطالعه

ماه	دما (°C)			رطوبت نسبی (%)			بیشترین سرعت باد (m/s)	بارندگی (mm)
	حداقل	حداکثر	متوسط	حداقل	حداکثر	متوسط		
تیر	18.4	44.0	32.6	12.8	42.2	27.3	14.1	0.0
مرداد	17.1	43.1	31.8	12.1	47.5	30.7	13.2	0.0
شهریور	13.6	40.3	27.8	16.2	59.6	37.1	13.5	0.0
مهر	7.5	34.8	21.0	17.2	64.9	40.1	13.6	0.0
آبان	1.2	28.3	13.4	45.7	94.1	70.2	11.3	0.0

فاکتورهای اصلی آزمایش، سه سطح آبیاری با هدایت الکتریکی ۱/۸ دسی‌زیمنس بر متر (با نماد W) و سه سطح حاصلخیزی از نظر کودی (با نماد F) را شامل می‌شد. در هر بلوک، سطوح آبیاری شامل W_0 (تأمین ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه تا حد FC)، W_1 (تأمین ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه تا حد FC) و W_2 (تأمین ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه تا حد FC) بود. کنترل سطوح آبیاری با ± 5 درصد خطای رطوبت حجمی قابل قبول با دستگاه TDR مدل ۱۵۰ به‌طور روزانه صورت می‌گرفت؛ بنابراین زمان‌بندی آبیاری همه تیمارها پس از گذشتن از مرحله رشد اولیه گیاه، یکسان و هم‌زمان نبوده و انجام آبیاری با توجه به پایش روزانه‌ای که انجام می‌گرفت، به‌گونه‌ای بود که برای تیمارهای W_0F_0 ، W_0F_1 و W_0F_2 همواره بخشی از خاک ناحیه ریشه گیاه در حد رطوبت FC نگه داشته می‌شد و برای تیمارهای W_1F_0 ، W_1F_1 و W_1F_2 این بخش از خاک، با مصرف ۲۵ درصد رطوبت FC و یا با ثابت نگه‌داشتن رطوبت در حد ۷۵ درصد ظرفیت زارعی، آبیاری مجدد صورت می‌گرفت و به همین طریق برای تیمارهای W_2F_0 ، W_2F_1 و W_2F_2 رطوبت در حد ۵۰ درصد FC ثابت نگه‌داشته می‌شد. حجم آب مورد استفاده برای کرت‌های تنشی با استفاده از معادله ۱ برآورد می‌شد.

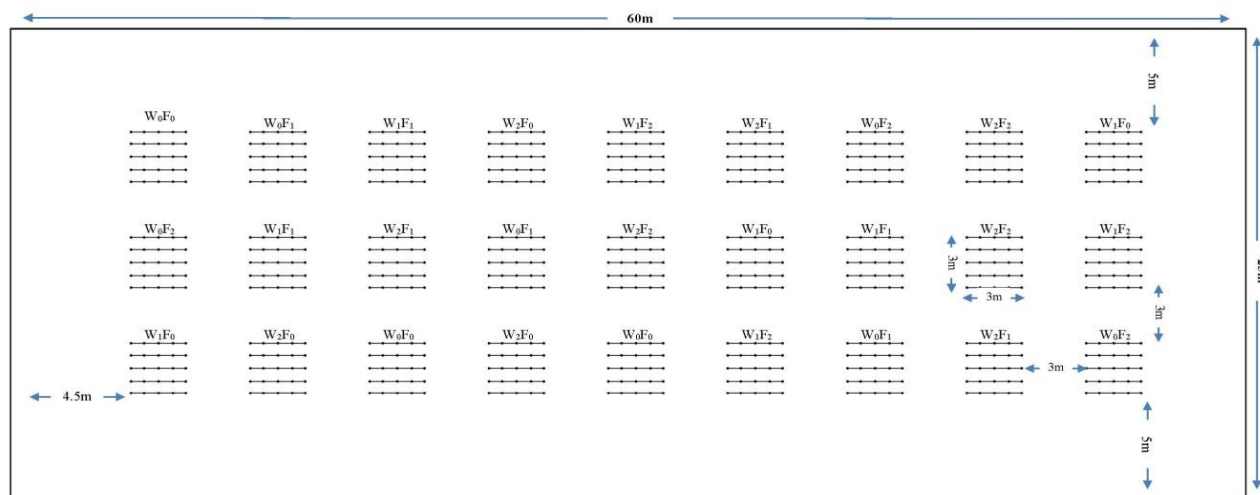
$$V = 0.01 \times (\theta_s - \theta_{TDR}) \times \Delta Z \times A \quad (1)$$

که در آن: V حجم آب مورد نیاز (m^3)، θ_s رطوبت حجمی خاک در سطح تنش مورد نظر (cm^3/cm^3)، θ_{TDR} رطوبت

حجمی قرائت دستگاه TDR (cm^3/cm^3)، ΔZ (cm) متوسط عمق توسعه ریشه گیاه (با توجه به رشد و نمو گیاه در دوره‌های مختلف این عمق افزایش و رطوبت در آن ناحیه اندازه‌گیری می‌شد) و A (m^2) مساحت سطح کرت است. از آنجایی که در طول فصل رشد گیاه (تابستان‌های ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰) هیچ‌گونه بارندگی در منطقه نازل نشد و از سویی با فرض کوچک بودن کرت‌ها ($9 m^2$) و عدم وقوع رواناب در کرت‌ها، امکان برآورد راندمان آبیاری صددردصدی برای کرت‌ها محتمل بود. همچنین، با نبود درز و ترک، جریان در اعماق خاک و یا جریان‌های ترجیحی در آن و دستگاه اندازه‌گیری نسبتاً دقیق رطوبت خاک با TDR و اعمال کم آبیاری در بیشتر تیمارها میزان آب داده شده در ناحیه توسعه ریشه ذخیره‌شده و تمام این رطوبت به‌صورت تبخیر و تعرق از سطح خاک و روزنه‌های گیاه مصرف شده است. در نتیجه این اطمینان حاصل شد که روند کاهش مقدار رطوبت خاک در روزهای پس از آبیاری، صرفاً متأثر از فرآیند تبخیر و تعرق بوده است بنابراین امکان برآورد مقدار تبخیر و تعرق گیاه، با رابطه زیر وجود داشت:

$$ET = \frac{V}{A} \quad (2)$$

که در آن: ET مقدار تبخیر و تعرق گیاه (mm)، V و A نیز قبلاً معرفی شده بود. در پایان دوره رشد گیاه و برداشت محصول، با حفر گودال در خاک کرت‌ها، بقایای ریشه ذرت در اعماق بیش‌تر از ۶۰ سانتی‌متری مشاهده نشد.



شکل ۱- چیدمان تیمارها در سال زراعی ۱۳۹۹

کودهای فسفره و پتاسه تنها در یک مرحله همان‌طور که در بالا مطرح شد، اعمال شد.

$$X = \frac{R \times (100 - S) \times A}{E \times 10000} \quad (3)$$

که در آن: X میزان کود مورد نیاز هر کرت (kg)، R میزان عنصر غذایی (N ، P_2O_5 و K_2O) توصیه شده (kg/ha)، S مقدار تنش کودی وارد شده در هر کرت (%)، A مساحت کرت (m^2) و E میزان درصد عنصر غذایی در کود مورد نظر است. در تمامی تیمارها از W_0F_0 تا W_2F_2 هیچ‌گونه تنشی از بابت آبی در طول دوره رشد اولیه یا ابتدایی گیاه که حدود ۲۰ تا ۲۵ روز ابتدای کشت است اعمال نشد و سطوح تنشی (آبی و کودی) فقط در طول مراحل توسعه، میانی و پایانی اجرا شد. منبع آب در این پژوهش، چاه عمیق بود. متوسط عمق آب زیرزمینی منطقه در ۱۱۲ متری موجود است. در جدول (۴) مشخصات فیزیکوشیمیایی آب چاه ارائه شده است.

سطوح حاصلخیزی کودی بر اساس توصیه آزمایشگاهی بر پایه آزمون خاک محل اجرای پروژه به سه سطح F_0 (تأمین ۱۰۰ درصد نیاز کودی N ، P و K)، F_1 (تأمین ۷۵ درصد نیاز کودی N ، P و K یا تنش ۲۵ درصدی کودی) و F_2 (تأمین ۵۰ درصد نیاز کودی N ، P و K) اعمال تیمار گشته و این درصدها بر پایه ۳۵۰ کیلوگرم کود اوره، ۱۸۰ کیلوگرم کود سوپرفسفات تریپل و ۲۰۰ کیلوگرم کود سولفات پتاسیم در هکتار انجام شد. کود ازته از منبع اوره در سه مرحله به ترتیب، نخست هم‌زمان با کاشت در مرحله جوانه‌زنی به‌صورت نواری در پنج سانتی‌متری زیر و کنار بذر و بقیه آن در دو مرحله در زمان‌های تُنک‌کردن بوته‌ها همراه با ساقه رفتن گیاه و در نهایت در زمان بروز گل‌های تاجی همراه با تشکیل و شیری شدن دانه به‌طور کامل در سطح کرت‌ها پخش و با خاک مخلوط شد. مقدار تنش حاصلخیزی از نوع کودی آن بر اساس رابطه ۳ برای تمامی کرت‌ها محاسبه و فقط کود ازته در سه مرحله و

جدول ۴- آنالیز فیزیکوشیمیایی آب چاه شور در منطقه مورد مطالعه

Class	TDS mg/l	SAR	SSP %	Cations	Na ⁺ meq/l	Mg ⁺² meq/l	Ca ⁺² meq/l	Anions	SO ₄ ⁻² meq/l	Cl ⁻ meq/l	HCO ₃ ⁻³ meq/l	CO ₃ ⁻² meq/l	pH	EC dS/m
C ₅ S ₄	6425.6	13.09	59.97	104.11	60.86	13.68	29.57	104.08	36.6	61.75	5.73	0	7.06	10.42

روش پژوهش و نحو محاسبه شاخص‌های آماری

تنش آبی و حاصلخیزی خاک از نوع کودی آن هر دو منجر به کاهش تبخیر و تعرق کل و دوره‌ای گیاه و همچنین عملکرد تولید ذرت علوفه‌ای نسبت به شرایط ایده‌آل (تأمین ۱۰۰ درصد نیاز آبی و بدون محدودیت عناصر غذای گیاه) می‌شود (بابازاده و سرانی‌تبریزی، ۱۳۹۶). در این پژوهش به دو نوع تابع تخمین تولید (عملکرد) پرداخته شد که نوع نخست آن به ارتباط عملکرد با تبخیر و تعرق دوره‌ای گیاه و نوع دوم آن به ارتباط تولید با میزان شدت تنش‌های آبی و کودی اعمال شده بر گیاه ذرت پرداخته است که در ادامه به شرح هر کدام از این نوع توابع اشاره شده است. از آنجایی که صدمات وارده در اثر عوامل تنش‌زا در برخی از مراحل رشد بیش از مراحل دیگر است (به عنوان مثال زمان گل‌دهی، گرده‌افشانی، تلقیح و یا تشکیل دانه) در نوع نخست تابع، رابطه بین عملکرد و تبخیر و تعرق دوره‌ای گیاه در شرایط تنش دوگانه آبی و کودی مدل‌سازی شد. طول دوره رشد مربوط به زمان کاشت، داشت و برداشت محصول بر اساس گزارش فائو ۵۶ که مراحل رشدی گیاه را به چهار دوره اولیه (حدود ۲۵ روز)، توسعه (حدود ۴۰ روز)، میانی (حدود ۴۵ روز) و پایانی (حدود ۳۰ روز) تقسیم می‌کند، تطبیق داده شد (آلن و همکاران، ۱۹۹۸).

متغیر وابسته، عملکرد نسبی (Y_s/Y_m) و متغیر مستقل، تبخیر و تعرق نسبی هر دوره (ET_{si}/ET_{mi}) در نظر گرفته شد. برای این منظور از مدل‌های تجربی تابع تولید جمع‌پذیر بلنک^۱، استوارت^۲، سینگ^۳ و مدل‌های ضرب‌پذیر جنسن^۴ و رائو^۵ استفاده شد. مدل‌های یادشده به ترتیب در روابط ۴ تا ۸ ارائه شده است. با استفاده از مقادیر تبخیر و تعرق نسبی دوره‌ای و عملکرد ذرت علوفه‌ای، ضرایب مربوط به هر دوره رشدی در شرایط تنشی طرح با استفاده از نرم‌افزار SPSS برای مدل‌های پنج‌گانه مختلف برآورد شد (زرگر یعقوبی و همکاران، ۱۴۰۱ و آلن و

همکاران، ۱۹۹۸). همچنین، با استفاده از معیارهای آماری خطا شامل آماره‌های ضریب تبیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) و شاخص نش-ساتکیل (NS) نسبت به مقایسه مدل‌های مختلف با یکدیگر شد. روابط آماره‌های ارزیابی مدل‌های تجربی و نظری یادشده به ترتیب با شماره‌های ۹ تا ۱۴ ارائه شده است.

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

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

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

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

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

$$ME = \max |P_i - O_i| \quad (9)$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (11)$$

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

$$NRMSE = \frac{1}{O_{ave}} \times \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

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

که در آن‌ها: $\sum$ و $\prod$ به ترتیب عملگر جمع و ضرب توابع، Y_s عملکرد در شرایط تنش (ton/ha)، Y_m بیشینه عملکرد (ton/ha)، ET_{si} تبخیر و تعرق در شرایط تنش مرحله iam

⁴ - Jensen

⁵ - Rao

¹ - Blank

² - Stewart

³ - Sing

استوارت، سینگ، جنسن و رائو که عملکرد نسبی را بر اساس مراحل چهارگانه رشدی برآورد می نمودند. برای این سه نوع توابع تولید نیز با داشتن داده های مشاهده ای و برآورد شده از مدل ها، اعتبار توابع با شاخص های آماری مطرح شده ارزیابی و تابع بهینه تولید معرفی شد.

ضریب تبیین یکی از مهم ترین معیارهای ارزیابی ارتباط میان دو متغیر مستقل و وابسته است و ارتباط مستقیمی با ضریب همبستگی پیرسون دارد. هرچه مقدار ضریب R^2 به عدد یک نزدیک تر باشد، ارتباط قوی تری میان دو متغیر X و Y وجود دارد. در واقع این ضریب نشان می دهد که چند درصد از تغییرات متغیر وابسته با متغیر مستقل تبیین می شود. شاخص NRMSE سطوح تخمین برآورد محاسباتی مدل ها را نشان می دهد (جمیس و همکاران، ۱۹۹۱). ضریب نش-ساتکلیف (۱۹۷۰) از جمله شاخص های است که صحت برازش داده های اندازه گیری شده و برآورد شده را بررسی کرده و در واقع حالت استاندارد تابع حداقل مربعات خطاها است. دامنه تغییرات این شاخص از منهای بی نهایت تا مثبت یک بوده و هرچه این شاخص به یک نزدیک تر باشد صحت برازش داده های برآورد شده با اندازه گیری شده آن بیش تر است و بر اساس مطالعات گاسمن و همکاران (۲۰۰۷)، چنانچه این ضریب بالاتر از ۰/۵ باشد، مدل ارائه شده دارای شبیه سازی قابل قبول و خوبی با واقعیت است.

نتایج و بحث

تأثیر تیمارها بر عملکرد زیست توده و عملکرد نسبی

در هر دو سال در پایان فصل رشد با توجه به هدف برداشت ذرت علوفه ای (بیوماس تر)، بوته های ذرت کف بر شده و وزن بوته های قرار گرفته شده در هر پرتاب تصادفی قاب چوبی ۱/۵×۱/۵ متری ملاک سنجش عملکرد هر کرت شد. همچنین به منظور رفع اثر حاشیه ای و رقابت بین گیاهان سعی شد که نمونه های قرار گرفته در قاب از اطراف مرکز کرت ها صورت گیرد (خطوط کاشت در مرکز کرت ها).

دوره رشد گیاه ET_{mi} (mm)، تبخیر و تعرق حداکثر ذرت در مرحله نام تیمار بیشیه عملکرد i اندیس شمارنده دوره رشد ذرت، a_i ضریب حساسیت هر مدل در دوره رشد نام همان مدل، n تعداد مراحل رشد گیاه، O_i مقادیر اندازه گیری شده عملکرد، P_i مقادیر عملکرد برآورد شده، $\bar{O}$ میانگین مقادیر اندازه گیری شده و $\bar{P}$ میانگین مقادیر برآورد شده است. همچنین، در این پژوهش می توان با به کارگیری داده های عملکرد در شرایط وجود مقادیر متفاوتی از تنش های آبی و کودی، توابع تولید عملکرد ذرت را برآورد نمود.

$$Yield = f\left(\frac{ET_S}{ET_0}, \frac{F_S}{F_0}, a_0\right) \quad (15)$$

که در آن، عملکرد ذرت صرفاً تحت تأثیر تنش های آبی و کودی قرار گرفته و سایر عوامل مؤثر، ثابت در نظر نگه داشته شده است. نسبت $\frac{ET_S}{ET_0}$ تبخیر و تعرق در شرایط تنش دوگانه آبی و کودی به تبخیر و تعرق پتانسیل یا حداکثر یا در شرایط بدون تنش، نسبت $\frac{F_S}{F_0}$ مقدار کود ماکرو داده شده به زمین به شرایط حاصلخیزی کامل کود ماکرو و a_0 مقدار ثابت تابع سایر عوامل مؤثر بر عملکرد است. در این راستا، مدل سازی عملکرد ذرت با توابع تولید ریشه دوم، لجستیک و کاب داگلاس انجام شد. فرم کلی هر سه نوع تابع به ترتیب به شرح زیر است:

$$Y = a_0 + a_1 X_1^{0.5} + a_2 X_2^{0.5} + a_{11} X_1 + a_{22} X_2 \quad (16)$$

$$Y = \frac{a_0}{1 + e^{-(a_1 X_1 + a_2 X_2)}} \quad (17)$$

$$Y = a_0 X_1^{a_1} a_2 X_2^{a_2} \quad (18)$$

که در آن ها: X_1 و X_2 متغیرهای مستقل بی بعد هستند که به ترتیب شامل $\frac{ET_S}{ET_0}$ و $\frac{F_S}{F_0}$ است. با استفاده از رگرسیون گام به گام در SPSS ضرایب تابع تولید هر معادله برآورد و برای تعیین اثر معنی داری آن ها از آماره F (فیشر) استفاده شد. چنانچه Sig. هر ضریب کوچک تر از ۰/۰۵ ($P < 0.05$ value) باشد، آن ضریب در معادله وارد خواهد شد و اثر معنی داری بر متغیر وابسته یا پاسخ (عملکرد ذرت) دارد، مانند توابع تولید تجربی جمع پذیر و ضرب پذیر بلنک،

تجزیه واریانس (ANOVA) و مقایسه میانگین عملکرد تیمارها به تفکیک سال‌های مورد پژوهش در جداول ۵ و ۶ ارائه شده است. در این جداول، تحلیل واریانس و مقایسه میانگین‌های عملکرد ذرت بر حسب تنش آبی (W_s)، تنش کودی (F_s) و همچنین اثر متقابل W_s و F_s نشان داده شده است. بر اساس مقدار آماره F (فیشر) برای تنش آبی و مقدار احتمال مربوط به بررسی معنی‌داری آنکه کم‌تر از ۰/۰۵ است، می‌توان مطرح نمود که با احتمال ۹۵ درصد فرض صفر آماری (H_0) مبنی بر برابر بودن میانگین عملکرد ذرت علوفه‌ای بر حسب سه سطح تنش آبی (W_0 ، $W_1 = 0.75 \times W_0$ و $W_2 = 0.50 \times W_0$) رد می‌شود. بنابراین، می‌توان انتظار داشت که میان میانگین سه سطح تنش آبی اختلاف معنی‌داری وجود دارد و در نتیجه تنش آبی بر عملکرد ذرت اثر معنی‌داری دارد.

همچنین، با توجه به مقدار احتمال مربوط به بررسی مقدار آماره فیشر برای تنش کودی (F_s) که باز هم کم‌تر از ۰/۰۵ است می‌توان مطرح نمود که با $\alpha = 0.05$ (خطای آماری پنج درصد) فرض صفر آماری مبنی بر برابر بودن میانگین عملکرد ذرت بر حسب سه سطح تنش کودی (F_0 ، $F_1 = 0.75 \times F_0$ و $F_2 = 0.50 \times F_0$) رد می‌شود؛ بنابراین، میان میانگین سه سطح تنش کودی اختلاف معنی‌داری وجود دارد و تنش کودی اعمال‌شده بر تیمارها بر عملکرد ذرت اثر معنی‌داری دارد و در نهایت با توجه به آماره فیشر برای اثر متقابل $W_s \times F_s$ و مقدار احتمال مربوط به بررسی معنی‌داری آنکه کم‌تر از ۰/۰۵ است، با احتمال ۹۵ درصد فرض صفر آماری مبنی بر عدم وجود اثر متقابل ما بین تنش آبی و کودی رد می‌شود و در نتیجه اثر متقابل

تنش‌های آبی و کودی بر عملکرد گیاه تأثیر معنی‌داری دارد. به همین ترتیب در تحلیل واریانس و مقایسه میانگین‌های ET کل ذرت بر حسب تنش آبی و کودی و اثر متقابل این دو عامل می‌توان به تأثیرپذیری سطوح تنش آبی، کودی و اثر متقابل این تنش‌ها اشاره کرد که از ارائه مجدد آن خودداری می‌شود.

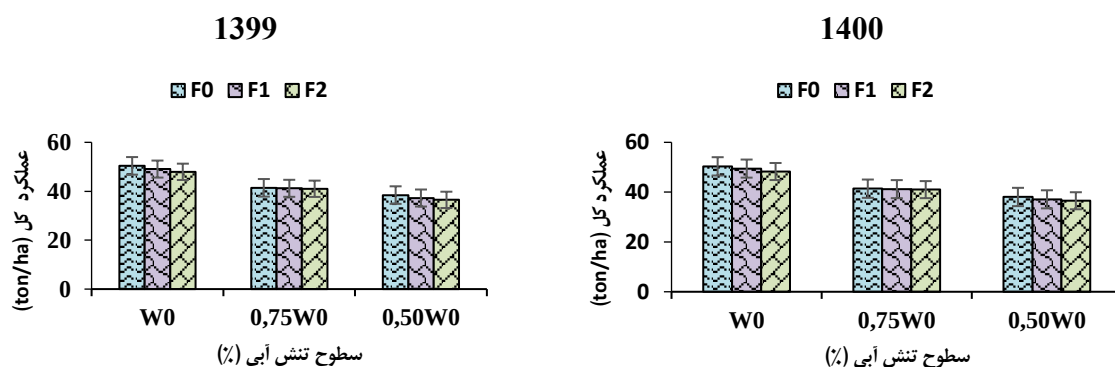
نتایج نشان‌دهنده کاهش عملکرد محصول نسبت به تیمار حداکثر تولید (شاهد) در اثر تنش‌های توأمان دوگانه آبی و کودی است به‌طوری‌که بیش‌ترین عملکرد در سال‌های ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰ به‌ترتیب ۵۰/۳۹ و ۵۰/۳۶ تن در هکتار بوده و کم‌ترین عملکرد در تیمار (W_2F_2) با کاهش ۲۷/۶ و ۲۷/۴ درصد نسبت به شاهد به ۳۶/۴۸ و ۳۶/۵۵ تن در هکتار رسیده است (شکل ۲). برای اطمینان از یکسان بودن نتایج عملکرد دو سال آزمون میانگین به روش T-Test انجام شد. در نخست برای هر گروه تیماری از W_0F_0 تا W_2F_2 آزمون کلموگراف اسمیروف استفاده شد و نتایج حاکی از نرمال بودن توزیع عملکرد در هر دو سال زراعی داشت. نتایج آزمون تی استیودنت برای مقایسه میان هر تیمار در هر دو سال حاکی از برابر بودن میانگین عملکرد آن تیمار در سال‌های ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰ بود؛ بنابراین، با احتمال ۹۵ درصد فرض صفر آماری مبنی بر برابر بودن میانگین عملکرد هر تیمار ذرت در سال ۱۳۹۹ و سال ۱۴۰۰ تأیید می‌شود، در نتیجه میانگین‌های هر تیمار در هر دو سال اختلاف معنی‌داری وجود ندارد در صورتی‌که بین هر تیمار با تیمار بعدی اختلاف معنی‌داری وجود دارد. در جدول ۶ حدود تغییرات عملکرد طی دو سال زراعی و متوسط آن در هر سال برای تیمارهای مختلف مورد پژوهش ارائه شده است.

جدول ۵- تجزیه واریانس تنش آبی و حاصلخیزی از نوع کودی و توأمان آن‌ها بر صفات مورد بررسی پژوهش طی دو سال متوالی کشت

میانگین مربعات				درجه آزادی	منابع تغییرات
تبخیر و تعرق کل		عملکرد زیست توده			
1400	1399	1400	1399		
22.9**	16.5**	0.2*	0.8**	2	بلوک
224345.2**	223152.7**	344.2**	323.3**	2	تنش آبی
284.2**	255.0**	3.9**	5.7**	2	تنش کودی
4.2**	4.5**	0.6*	0.9**	4	Ws×Fs
0.2	0.3	0.2	0.08	16	خطا
0.1	0.1	0.9	0.7	-	C.V.

جدول ۶- حدود تغییرات عملکرد زیست توده طی دو سال کشت در منطقه مطالعاتی

میانگین دوساله عملکرد	عملکرد (هکتار/تن)			تیمار
	1400	1399	حدود تغییرات عملکرد	
50.4	50.4	50.4	(50.1-50.7)	W ₀ F ₀
49.3	49.3	49.1	(48.3-49.7)	W ₀ F ₁
48.1	48.1	48.0	(47.5-48.7)	W ₀ F ₂
41.4	41.4	41.4	(41.3-41.5)	W ₁ F ₀
41.2	41.2	41.2	(41.1-41.3)	W ₁ F ₁
41.0	41.0	41.0	(40.9-41.2)	W ₁ F ₂
38.3	38.3	38.4	(37.5-38.7)	W ₂ F ₀
37.2	37.2	37.2	(36.6-37.9)	W ₂ F ₁
36.5	36.5	36.5	(36.1-37.4)	W ₂ F ₂



شکل ۲- عملکرد زیست توده تیمارهای مورد بررسی در دو سال زراعی ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰

عملکرد زیست توده و متغیرهای مستقل سطوح تنش آبی و کودی به قرار زیر است:

$$\text{Yield (ton/ha)} = 91.3 - 16.43 \times \left(\frac{W_s}{W_0}\right)^{0.5} + 1.2 \times \left(\frac{W_s}{W_0}\right) + 0.032 \times \left(\frac{F_s}{F_0}\right) \quad (19)$$

که در آن، W_s و F_s به ترتیب میزان درصد رطوبت FC و مقدار درصد بهینه مصرف کودهای ماکرو نسبت به شرایط ایده آل (W_0 و F_0) در منطقه مطالعاتی است^۱. به طور مثال اگر تنش ۵۰ درصدی آبی با تأمین نیمی از کودهای ماکرو توصیه شده مد نظر باشد رابطه فوق، عملکرد ۳۶/۷ تن بر هکتار را برآورد می کند که در واقعیت عملکرد ۳۶/۵ تن بر هکتار دیده شده است. در ادامه به بررسی دو تابع تخمین گر دیگر (لجستیک و توانی) اشاره خواهد شد و مقایسه بین این سه تابع برآورد کننده عملکرد با هم با شاخص های آماری بررسی خواهد گشت.

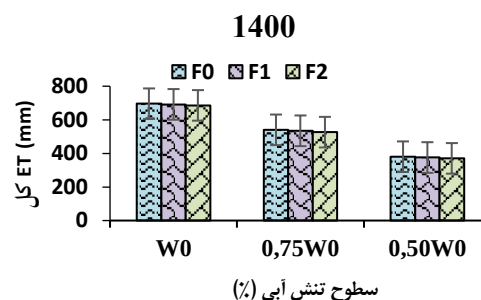
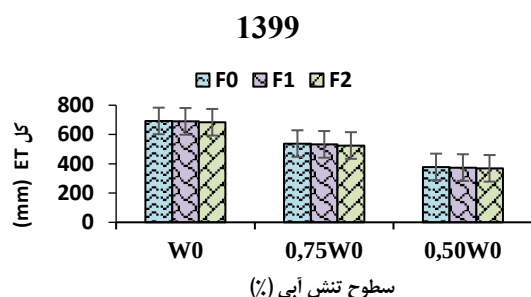
برای برآورد یک رابطه رگرسیونی دو متغیره بین سطوح تنش آبی تا FC خاک منطقه مطالعاتی با ± 5 درصد تغییرات رطوبت و کاهش مصرف کودهای ماکرو NPK از سطوح بهینه مصرف، اقدام به انجام محاسبات رگرسیونی گام به گام با نرم افزار SPSS شد و نتایج نشان دهنده ضریب R^2 بین متغیر عملکرد زیست توده و متغیرهای مستقل تنش آبی و کودی به مقدار ۹۸ درصد (تابع ریشه دوم) بود که نشان دهنده تأثیرپذیری متغیر وابسته (عملکرد زیست توده) از مستقل (W_s و F_s) است و متغیرهای مستقل ۹۸ درصد تغییرات ایجاد شده در متغیر وابسته را پیش بینی برآورد می کند. تحلیل واریانس رگرسیون نشان داد که با احتمال ۹۵ درصد فرض H_0 که مبنی بر عدم وجود رابطه بین متغیر وابسته و متغیرهای مستقل است، رد می شود، زیرا سطح معنی داری آن کم تر از ۰/۰۵ است. رابطه میان متغیر پاسخ

^۱ - پیش تر اشاره گردید که با توجه به فرضیات مطرح شده، مقدار آب آبیاری داده شده با میزان تبخیر و تعرق کل گیاه برابر می باشد.

تأثیر تیمارها بر تبخیر و تعرق کل و دوره‌ای

ET از مهم‌ترین اجزاء چرخه هیدرولوژیکی است که برآورد صحیح آن در طراحی و مدیریت سامانه‌های آبیاری و همچنین مطالعات منابع آب از اهمیت بسیاری

برخوردار است. تخمین نادرست و بیش از حد آن موجب اتلاف منابع آب و ماندابی شدن اراضی، شستشوی عناصر غذایی از خاک و در نهایت باعث آلوده نمودن منابع آب زیرزمینی می‌شود. همچنین، تخمین غلط و کم آن نیز باعث اعمال تنش آبی و کاهش تولید محصول می‌شود.



شکل ۳- تبخیر و تعرق کل تیمارهای مورد بررسی در دو سال زراعی ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰

این‌که این موضوع مورد تحقیق این پژوهش نبود لیکن این مسئله همان‌طور که بیان شد قابل‌رؤیت در مزرعه بود. متفاوت بودن تعداد دفعات آبیاری از آنجایی ناشی می‌شود که در طول رشد گیاه پارامتر ΔZ ریشه (عمق مؤثر ریشه که پیش‌تر در رابطه ۱ معرفی شده بود) و میزان سطوح تنش آبی در تیمارهای مختلف متفاوت بوده است. جدول ۷ دفعات آبیاری، میانگین ET هر ساله (میزان آب آبیاری) و حدود تغییرات آن را در طی دو سال متوالی کشت به تفکیک تیمارهای مورد پژوهش نشان می‌دهد.

نتایج پژوهش‌های دوساله نشان داد که اثر تنش‌های آبی و کودی باعث کاهش تبخیر و تعرق کل نسبت به ET شاهد شده به‌طوری‌که میانگین تبخیر و تعرق از ۶۹۴/۲ میلی‌متر با یک کاهش ۴۶/۸ درصدی به ۳۶۹/۶ میلی‌متر در شرایط اعمال تیمار W_2F_2 رسیده است (جدول ۵). کاهش ET مؤید کاهش جذب آب به‌وسیله گیاه در اثر افزایش تنش آبی و کودی است، به‌طوری‌که در کرت‌های که تنش حاصلخیزی و آبی به‌طور شدید اعمال شده بود اندازه و ظاهر بوته‌های ذرت به‌طور نسبی کوچک‌تر و کوتاه‌تر از بوته‌های W_0F_0 (کرت شاهد) بود. علی‌رغم

جدول ۷- تعداد دفعات آبیاری کرت‌های و حدود تغییرات تبخیر و تعرق کل طی دو سال و میانگین ET کل به تفکیک سال‌های کشت

تیمار	دفعات آبیاری	حدود تغییرات	1399	1400	میانگین
W_0F_0	19	(691.9-697.0)	692.7	695.7	694.2
W_0F_1	19	(688.7-692.9)	689.6	691.7	690.6
W_0F_2	19	(682.9-687.2)	683.7	685.8	684.8
W_1F_0	23	(536.2-542.0)	538.1	540.2	539.2
W_1F_1	23	(530.6-536.0)	532.4	534.6	533.5
W_1F_2	23	(523.2-527.8)	524.8	526.4	525.6
W_2F_0	24	(376.6-382.1)	378.4	380.2	379.3
W_2F_1	24	(372.9-377.1)	373.9	375.4	374.7
W_2F_2	24	(367.9-372.3)	368.9	370.3	369.6

اطمینان ۹۵ درصد در تمامی مراحل مؤثر بوده و همچنین تأثیر تنش آبی و کودی در هر سه مرحله بر تبخیر و تعرق

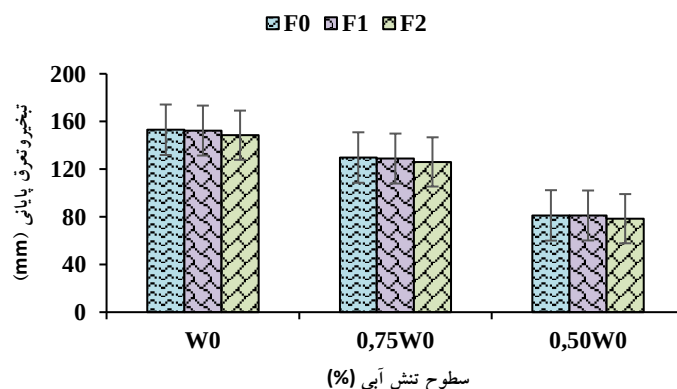
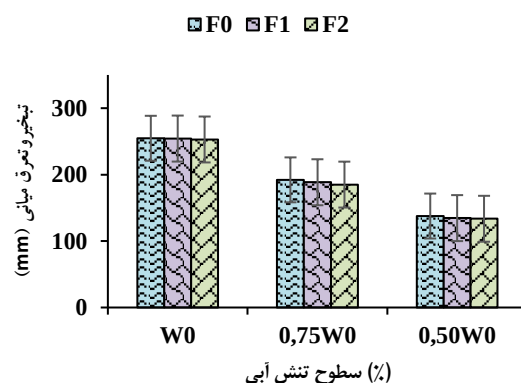
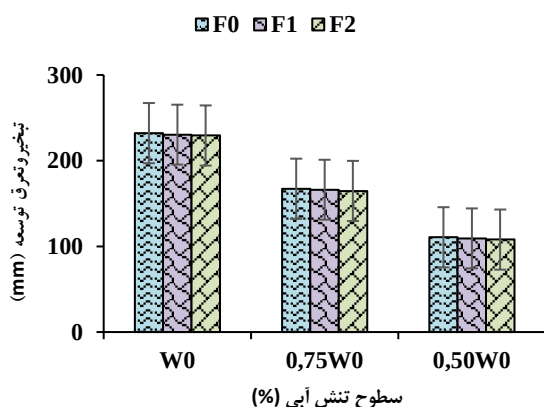
نتایج تجزیه واریانس مقادیر تبخیر و تعرق دوره‌ای (جدول ۸) نشان داد که بلوک‌بندی طرح حداقل با سطح

دوره‌ای با احتمال ۹۹ درصد مؤثر بوده است. معنی دار نشدن اثر تنش‌های توأمان آبی و کودی به این معنی است که هر کدام از عوامل تنش آبی و کودی به تنهایی در ET مرحله‌ای مؤثر است و وجود هم‌زمان این دو تنش با هم اثر معنی‌داری بر ET ندارد در صورتی‌که در تنش‌های آبی و شوری اثر توأمان این دو تنش بر ET مرحله‌ای مؤثر واقع می‌شد که این نتایج با پژوهش‌های فرحبخش و همکاران (۲۰۲۳)، فرحبخش و همکاران (۱۳۹۸) و سپهری و همکاران (۱۳۸۱) کاملاً مطابقت دارد.

نتایج مشخص نمود که با افزایش تنش حاصلخیزی از سطح F_0 تا F_2 میزان متوسط ET دوساله در سطح تیمار بدون تنش آبی (W_0) از ۰/۵ تا ۱/۴ درصد و در سطح W_1 از ۱/۱ تا ۲/۵ درصد و در سطح W_2 از ۱/۲ تا ۲/۶ درصد کاهش می‌یابد در صورتی‌که با کاهش سطوح آبیاری از W_0 تا W_2 ، متوسط دوساله تبخیر و تعرق در سطح تنش کودی F_0 از ۲۲/۳ تا ۴۵/۴ درصد و در سطح F_1 از

دوره‌ای با احتمال ۹۹ درصد مؤثر بوده است. معنی دار نشدن اثر تنش‌های توأمان آبی و کودی به این معنی است که هر کدام از عوامل تنش آبی و کودی به تنهایی در ET مرحله‌ای مؤثر است و وجود هم‌زمان این دو تنش با هم اثر معنی‌داری بر ET ندارد در صورتی‌که در تنش‌های آبی و شوری اثر توأمان این دو تنش بر ET مرحله‌ای مؤثر واقع می‌شد که این نتایج با پژوهش‌های فرحبخش و همکاران (۲۰۲۳)، فرحبخش و همکاران (۱۳۹۸) و سپهری و همکاران (۱۳۸۱) کاملاً مطابقت دارد.

نتایج مشخص نمود که با افزایش تنش حاصلخیزی از سطح F_0 تا F_2 میزان متوسط ET دوساله در سطح تیمار بدون تنش آبی (W_0) از ۰/۵ تا ۱/۴ درصد و در سطح W_1 از ۱/۱ تا ۲/۵ درصد و در سطح W_2 از ۱/۲ تا ۲/۶ درصد کاهش می‌یابد در صورتی‌که با کاهش سطوح آبیاری از W_0 تا W_2 ، متوسط دوساله تبخیر و تعرق در سطح تنش کودی F_0 از ۲۲/۳ تا ۴۵/۴ درصد و در سطح F_1 از



شکل ۴- تأثیر سطوح تنش آبی و کودی بر متوسط تبخیر و تعرق دوره‌ای دوساله ذرت در مراحل مختلف رشد

مدل سازی توابع تجربی عملکرد بر اساس ET مراحل

مختلف رشد در شرایط تنشی آبی و کودی

تخمین عملکرد نسبی تولید و مقادیر ضرایب رشدی چهارگانه بر پایه داده‌های تبخیر و تعرق دوره‌ای دو سال زراعی برای گیاه مورد مطالعه بر اساس مدل‌های جمع‌پذیر و ضرب‌پذیر توابع تولید در نرم‌افزار SPSS به صورت غیرخطی (Nonlinear) محاسبه شد و مشخص شد که در کلیه تیمارها مقادیر میانگین ضرایب رشدی در مراحل مختلف رشد ذرت متفاوت بوده و از این نظر در مدل‌های بلنک، استوارت، سینگ، جنسن و راثو به ترتیب در بازه‌های کمینه و بیشینه در جدول ۱۰ آورده شده است. انواع معادلات تولیدشده در این روش تحت شرایط تنش‌های آبی و کودی وارد شده برای گیاه ذرت در جدول ۱۱ گردآوری شده است. با توجه به معادلات مدل‌های مختلف برآوردی، مشخص شد که در تمامی مدل‌ها، مرحله توسعه نسبت به سایر مراحل رشدی حساس‌تر بوده و از متوسط ضریب حساسیت رشدی بیش‌تری برخوردار است. علت آن را می‌توان به دلیل تأثیر دو نوع تنش آبی و کودی وارده بر کاهش مقدار ET واقعی گیاه و عملکرد محصول در مرحله حساس رشد دانست.

برای اعتبارسنجی توان مدل‌ها در تخمین عملکرد نسبی از آماره‌های ارزیابی ME ، $NRMSE$ ، R^2 و NS و CRM استفاده شد و بر این اساس، انواع مدل‌ها در جدول ۱۲ رتبه‌بندی شده است. نتایج نشان‌دهنده مدل بهینه سینگ با آماره‌های ارزیابی یادشده به ترتیب ۰/۰۷۵، ۰/۰۵۲، ۰/۸۰۵، ۰/۷۷۳ و ۰/۰۱۹ در مدل‌های جمع‌پذیر بود و در مدل‌های ضرب‌پذیر مدل راثو با آماره‌های به ترتیب ۰/۲۶۱، ۰/۲۰۶، ۰/۹۸۲، ۲/۵۶۸- و ۰/۱۶۴ به عنوان مدل برتر انتخاب شد و در شکل ۵ صحت اولویت‌بندی مدل‌های یادشده به صورت شهودی قابل مشاهده است. از این رو با استفاده از مدل بهینه می‌توان عملکرد نسبی گیاه مورد مطالعه را در شرایط تنش‌های آبی و کودی تخمین زد.

در جداول ۸ و ۹ نتایج تجزیه واریانس و متوسط تبخیر و تعرق سه مرحله رشدی توسعه، میانی و پایانی به تفکیک سال‌های ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰ ارائه شده است. نتایج میانگین دوساله تبخیر و تعرق دوره‌ای مشخص نمود که در مرحله توسعه، ET از تیمار شاهد تا W_2F_2 به میزان ۱۲۴/۲ میلی‌متر کاهش و ترکیبات تیماری (W_0F_1 و W_0F_2)، (W_1F_1 و W_1F_2) و (W_2F_1 و W_2F_2) تفاوتی از نظر آماری با یکدیگر نداشته و سایر ترکیبات تیماری در گروه‌های متفاوتی از این جهت قرار گرفته‌اند و تنش‌های آبی و کودی هر کدام به تنهای بر مقادیر ET این مرحله مؤثر بوده لیکن اثر متقابل این دو تنش غیرمعنی‌دار شده است. در مرحله میانی رشد تبخیر و تعرق با کاهش ۴۷/۵ درصدی به ۱۳۳/۶ میلی‌متر در تیمار W_2F_2 رسیده و تمام ترکیبات تیماری در گروه‌های مختلفی از a تا h قرار گرفته‌اند و اثر متقابل تنش‌های دوگانه آبی و کودی نیز همانند مرحله قبل معنی‌دار نشده است. این مسئله برخلاف پژوهش انجام‌شده در اثر تنش‌های دوگانه آبی و شوری بوده است (زرگر یعقوبی، ۱۴۰۱). این موضوع مشخص می‌سازد که عامل کودی (تغذیه‌ای) با توجه به اینکه ماهیتی شبیه نمک (املاح) دارد، لیکن اثر کاهش پتانسیل اسمزی آن کمتر از عامل EC (شوری) است که باعث عدم معنی‌داری آن در این مرحله مهم و حساس رشدی شده است. در نهایت بیش‌ترین کاهش ET در مرحله آخر رشدی (مرحله پایانی) به مقدار ۴۸/۸ درصد نسبت به تیمار شاهد اتفاق افتاده است که نشان‌دهنده اثر تنش‌های هم‌زمان آبی و کودی در مراحل قبلی رشد است که اثر خود را در این مرحله نشان می‌دهد.

جدول ۸- تجزیه واریانس تنش آبی و کودی و توأمان آن‌ها برای مراحل مختلف تبخیر و تعرق دوره‌ای به تفکیک دو سال کشت						
منابع تغییرات		درجه آزادی		میانگین مربعات		
				مرحله توسعه		
				مرحله میانی		
				مرحله پایانی		

جدول ۹- مقایسه میانگین اثرات متقابل تنش‌های آبی و کودی بر تبخیر و تعرق مراحل مختلف رشدی (به روش HSD)

تبخیر و تعرق دوره‌ای (میلی‌متر)											
توسعه			میانی			پایانی			میانگین دو ساله		
ت	تغییرات	1399	1400	تغییرات	1399	1400	تغییرات	1399	توسعه	میانی	پایانی
W ₀ F ₀	(231.3-234.0)	231.5 ^a	232.8 ^a	(253.0-257.4)	254.1 ^a	255.4 ^a	(150.7-156.5)	152.8 ^a	153.3 ^a	232.2	254.7
W ₀ F ₁	(224.3-234.1)	230.5 ^b	230.3 ^b	(251.3-259.4)	253.6 ^b	254.9 ^b	(147.2-161.9)	151.9 ^b	152.8 ^b	230.4	254.3
W ₀ F ₂	(225.8-232.4)	229.3 ^b	229.6 ^b	(249.1-258.3)	252.2 ^c	253.6 ^c	(145.1-154.7)	148.2 ^c	148.7 ^c	229.4	252.9
W ₁ F ₀	(165.9-168.6)	166.6 ^c	167.8 ^c	(189.6-195.7)	190.9 ^d	193.3 ^d	(127.7-131.0)	130.4 ^d	129.0 ^d	167.2	192.1
W ₁ F ₁	(164.4-168.8)	165.6 ^d	166.6 ^d	(187.5-189.7)	188.0 ^e	189.0 ^e	(126.2-133.3)	128.9 ^e	128.9 ^d	166.1	188.5
W ₁ F ₂	(162.2-168.5)	164.3 ^d	165.1 ^e	(178.2-191.2)	186.5 ^f	183.6 ^f	(121.0-134.3)	124.2 ^f	127.8 ^e	164.7	185.0
W ₂ F ₀	(111.0-111.4)	110.5 ^e	110.7 ^f	(135.2-140.6)	137.3 ^g	138.1 ^g	(79.9-82.5)	80.8 ^g	81.6 ^f	110.6	137.7
W ₂ F ₁	(107.6-110.4)	109.1 ^e	109.5 ^f	(132.5-136.9)	134.2 ^h	134.9 ^h	(77.9-86.2)	80.9 ^h	81.3 ^g	109.3	134.5
W ₂ F ₂	(107.1-108.7)	108.3 ^f	107.5 ^g	(131.0-135.9)	133.1 ⁱ	134.1 ⁱ	(75.6-81.4)	77.9 ⁱ	78.9 ^h	107.9	133.6

در هر صفت مقایسه شده، تیمارهایی که با حروف یکسان نشان داده شده‌اند بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن ($P \leq 0.05$)، دارای اختلاف معنی‌دار نیستند

جدول ۱۰- ضرایب کمینه و بیشینه در انواع مدل‌های توابع تجربی عملکرد نسبی محصول بر اساس تبخیر و تعرق دوره‌ای در شرایط تنش‌های آبی و کودی

مدل	مراحل رشد	ابتدایی		توسعه		میانی		پایانی	
		کمینه	بیشینه	کمینه	بیشینه	کمینه	بیشینه	کمینه	بیشینه
	بلنک	0.117	0.127	0.472	0.520	0.279	0.307	0.068	0.074
	استوارت	0.236	0.259	0.599	0.660	0.421	0.466	0.151	0.168
	سینگ	0.117	0.130	0.404	0.449	0.265	0.291	0.071	0.079
	جنسن	0.298	0.330	0.783	0.862	0.345	0.385	0.122	0.134
	رائو	0.338	0.370	0.561	0.621	0.397	0.440	0.172	0.188

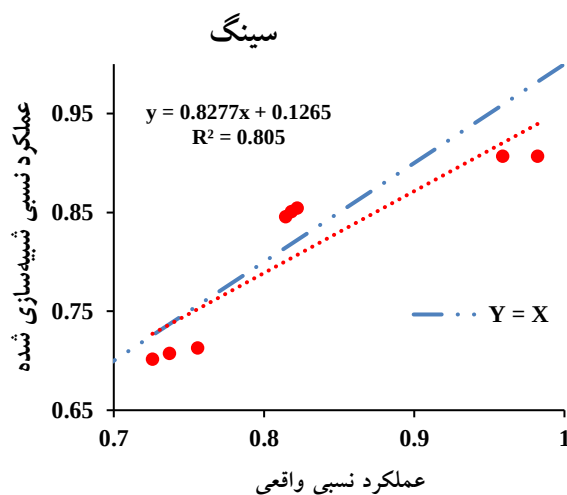
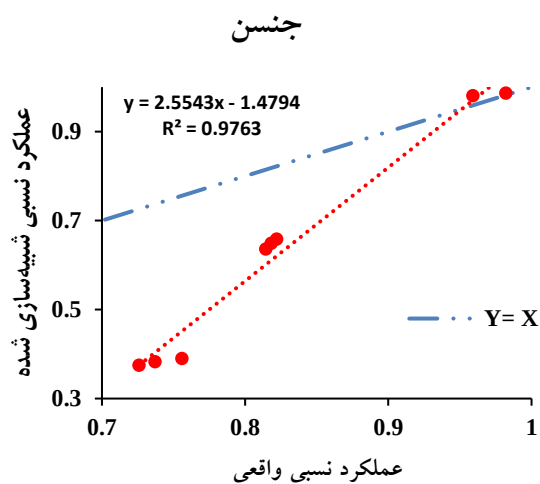
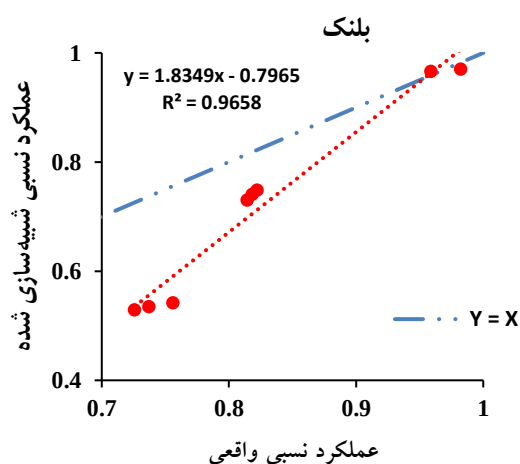
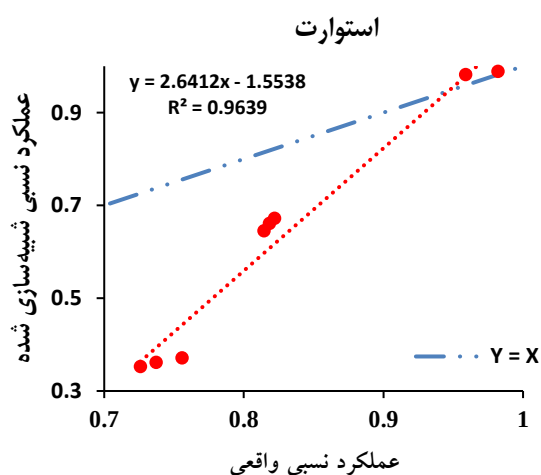
جدول ۱۱- معادلات تولیدشده برای انواع مدل‌های توابع تجربی بر اساس تبخیر و تعرق دوره‌ای در شرایط تنش آبی و کودی

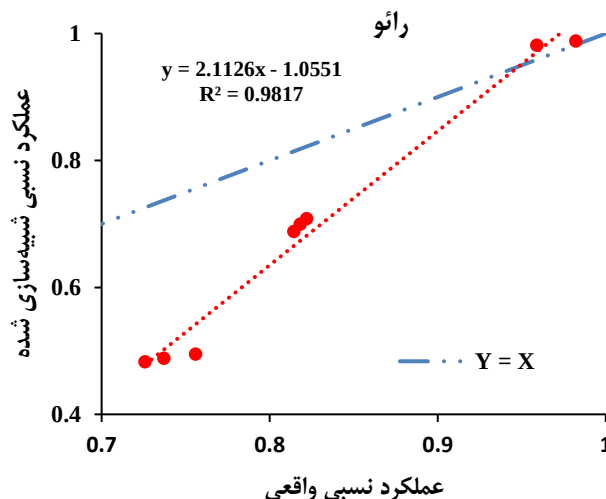
نام مدل	معادله مدل
بلنک	$\frac{y_s}{y_m} = 0.122 \left(\frac{ET_{s1}}{ET_{m1}} \right) + 0.494 \left(\frac{ET_{s2}}{ET_{m2}} \right) + 0.292 \left(\frac{ET_{s3}}{ET_{m3}} \right) + 0.070 \left(\frac{ET_{s4}}{ET_{m4}} \right)$
استوارت	$\frac{y_s}{y_m} = 1 - \left[0.248 \left(1 - \frac{ET_{s1}}{ET_{m1}} \right) + 0.632 \left(1 - \frac{ET_{s2}}{ET_{m2}} \right) + 0.440 \left(1 - \frac{ET_{s3}}{ET_{m3}} \right) + 0.159 \left(1 - \frac{ET_{s4}}{ET_{m4}} \right) \right]$
سینگ	$\frac{y_s}{y_m} = 0.125 \left(1 - \left(1 - \frac{ET_{s1}}{ET_{m1}} \right)^2 \right) + 0.430 \left(1 - \left(1 - \frac{ET_{s2}}{ET_{m2}} \right)^2 \right) + 0.277 \left(1 - \left(1 - \frac{ET_{s3}}{ET_{m3}} \right)^2 \right) + 0.075 \left(1 - \left(1 - \frac{ET_{s4}}{ET_{m4}} \right)^2 \right)$
جنسن	$\frac{y_s}{y_m} = \left(\frac{ET_{s1}}{ET_{m1}} \right)^{0.314} \times \left(\frac{ET_{s2}}{ET_{m2}} \right)^{0.822} \times \left(\frac{ET_{s3}}{ET_{m3}} \right)^{0.364} \times \left(\frac{ET_{s4}}{ET_{m4}} \right)^{0.127}$
رائو	$\frac{y_s}{y_m} = \left(1 - 0.353 \left(1 - \frac{ET_{s1}}{ET_{m1}} \right) \right) \times \left(1 - 0.594 \left(1 - \frac{ET_{s2}}{ET_{m2}} \right) \right) \times \left(1 - 0.419 \left(1 - \frac{ET_{s3}}{ET_{m3}} \right) \right) \times \left(1 - 0.179 \left(1 - \frac{ET_{s4}}{ET_{m4}} \right) \right)$

جدول ۱۲- نتایج ارزیابی اعتبار مدل‌های جمع‌پذیر و ضرب‌پذیر توابع تجربی

مدل	بیشینه خطای نسبی (ME)	ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE)	ضریب تبیین (R^2)	شاخص نش- ساتکلیف (NS)	ضریب جرم باقی‌مانده (CRM)
بلنک	0.214*	0.162	0.966	-1.203	0.128
استوارت	0.384	0.303	0.964	-6.725	0.238
سینگ	0.075	0.052	0.805	0.773	0.019
چنسن	0.366	0.293	0.976	-6.217	0.235
رائو	0.261	0.206	0.982	-2.568	0.164

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





شکل ۵- مقایسه انواع مدل‌های جمع‌پذیر و ضرب‌پذیر در تخمین عملکرد نسبی ذرت در شرایط تنش آبی و کودی با خط $Y = X$

$$Yield \left(\frac{ton}{ha} \right) = 6.53 \times \left(\frac{ETs}{ETo} \right)^{0.384} \times \left(\frac{Fs}{Fo} \right)^{0.053} \quad (22)$$

همانند توابع جمع‌پذیر و ضرب‌پذیر تولید که با استفاده از مقادیر تبخیر و تعرق دوره‌ای به برآورد عملکرد می‌پرداختند، برای این سه نوع تابع تولید نیز آماره‌های صحت‌سنجی شامل حداکثر خطا، میانگین ریشه دوم خطا، ضریب تبیین، ضریب NS و ضریب باقی‌مانده محاسبه و سپس اعتبار توابع، ارزیابی و تابع بهینه معرفی شد. نتایج تحلیل آماری هر سه مدل نشان داد که ضریب رگرسیونی آب و کود معنی‌دار هستند. همچنین با توجه به فزونی ضریب رگرسیونی و آماره تی آب نسبت به ضریب کود، می‌توان نتیجه گرفت که عامل آب اثر بیشتری بر عملکرد نسبت به کود دارد. برای تأیید صحت این موضوع، یکبار دیگر میزان همبستگی اسپیرمن عملکرد با آب و کود مجدداً مورد آزمون قرار گرفت و نتایج نشان داد که عامل آب همبستگی بیشتری با عملکرد دارد و در نتیجه تأثیر آب بر عملکرد بیش‌تر از تنش کودی است و با توجه به جدول ۱۳ مدل ریشه دوم، مدل مناسب‌تری برای تخمین عملکرد در شرایط تنش آبی و کودی است و این موضوع با توجه به مقایسه شهودی این توابع با هم (شکل ۶) قابل‌پذیرش است.

مدل‌سازی توابع تجربی عملکرد ذرت بر اساس شدت تنش‌های آبی و کودی

کمبود مقادیر آب مورد نیاز گیاه (تنش آبی) و مقادیر سه کود ماکرو اولیه گیاه (NPK- تنش حاصلخیزی) هر دو از عوامل مؤثر بر کاهش عملکرد گیاهان هست. در این پژوهش اثرات دو فاکتور تنش آبی در سه سطح و همچنین تنش کودی در سه سطح با توابع تولید ریشه دوم، لگجستیک و توانی کاب- داگلاس مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصله منجر به خلق توابع تولید در شرایط مقادیر متفاوتی از تنش‌های آبی و کودی شد که با استفاده از آن‌ها می‌توان به برآورد عملکرد ذرت رسید. در رابطه‌های ۲۰، ۲۱ و ۲۲ این توابع به همراه ضرایب مربوط به هر فاکتور آن ارائه شده است.

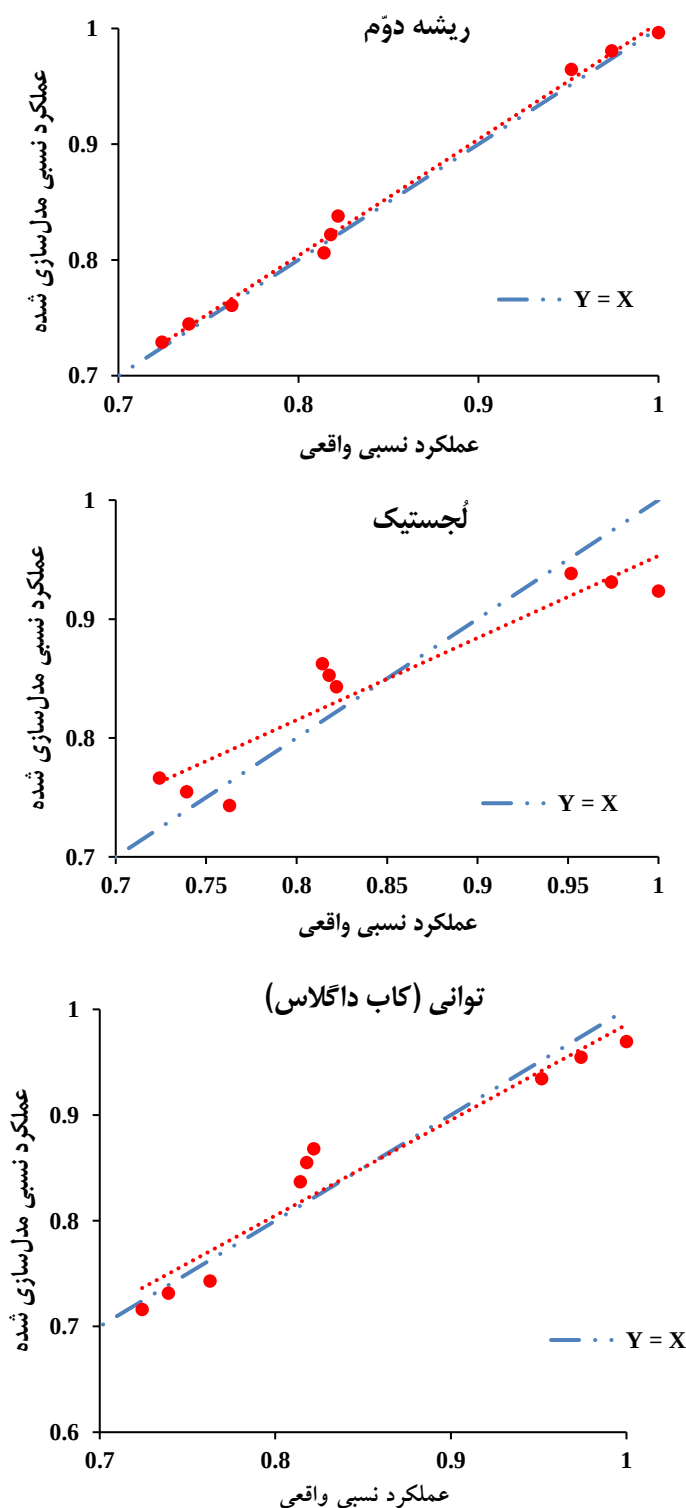
$$Yield \left(\frac{ton}{ha} \right) = 91.3 - 16.43 \times \left(\frac{ETs}{ETo} \right)^{0.5} + 1.2 \times \left(\frac{ETs}{ETo} \right) + 0.032 \times \left(\frac{Fs}{Fo} \right) \quad (20)$$

$$Yield \left(\frac{ton}{ha} \right) = \frac{56.41}{1 + 2.7182^{0.0019 \times \frac{Fs}{Fo} - 0.0174 \times \frac{ETs}{ETo}}} \quad (21)$$

جدول ۱۳- نتایج ارزیابی مدل‌های توابع تولید ذرت Sc.704 در منطقه مطالعاتی

مدل	بیشینه خطای نسبی (ME)	ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)	ضریب تبیین (R^2)	شاخص نش- ساتکلیف (NS)	ضریب جرم باقی مانده (CRM)
ریشه دوم	0.90 ⁽¹⁾	0.42 ⁽¹⁾	0.98 ⁽¹⁾	0.97 ⁽¹⁾	-0.0047 ⁽³⁾
لجستیک	3.85 ⁽³⁾	2.01 ⁽³⁾	0.87 ⁽³⁾	0.84 ⁽³⁾	-0.0013 ⁽²⁾
کاب داگلاس	2.33 ⁽²⁾	1.32 ⁽²⁾	0.93 ⁽²⁾	0.93 ⁽²⁾	-0.0006 ⁽¹⁾

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



شکل ۶- مقایسه توان تخمین سه مدل در عملکرد نسبی ذرت، تحت شرایط تنش همزمان آبی و کودی

نتیجه گیری

برآورد صحیح تبخیر و تعرق و نیاز کودی ذرت علوفه‌ای برای حصول به عملکرد بهینه و بر اساس منابع آب و کود موجود از اهمیت بسیاری برخوردار است. طبق نتایج این بررسی ET نسبی دوره‌ای ذرت در شرایط تنش‌های دوگانه آبی و کودی از تیمار W_0F_1 تا W_2F_2 از ۹۹/۲ تا ۴۶/۵ درصد در مرحله توسعه، ۹۹/۸ تا ۵۲/۹ درصد در مرحله میانی و ۹۹/۵ تا ۵۱/۲ درصد در مرحله پایانی را به خود اختصاص می‌دهد. این موضوع اهمیت مرحله توسعه را در کشت ذرت نشان می‌دهد. از سویی، مقدار عملکرد نسبی آن در تیمارهای یادشده در بازه ۹۷/۸ تا ۷۲/۵ درصد قرار گرفته است. همچنین مشخص شد که تفاوت معنی‌داری از نظر عملکرد بین سه تیمار W_1F_1 ، W_1F_0 و W_1F_2 مشاهده نشد؛ بنابراین در شرایط کمبود آب آبیاری تیمار W_1F_2 صرفه اقتصادی بهتری نسبت به سایر تیمارهای مورد پژوهش در این سطح تنش آبی (W_1) دارد. اما قابل ذکر است که اتخاذ این مدیریت تنشی دوگانه در سال‌های بعد می‌تواند منجر به کاهش عملکرد، با توجه به چالش‌های که در حاصلخیزی خاک ممکن است پیش بیاید، بشود.

تنش‌های آبی و کودی هر کدام اثرات خود را به تنهایی در تولید محصول نشان می‌دهند. تنش آبی باعث کاهش مقدار پتانسیل آب موجود در خاک و به تبع آن، موجب کاهش جذب آب و تبخیر و تعرق گیاه می‌شود و برآیند تمامی این اثرات در کاهش تولید بیوماس و عملکرد محصول منعکس می‌شود و تنش حاصلخیزی از نوع کودی آن نیز باعث اختلال در فرآیند رشد و نمو گیاه می‌شود. در این میان، با توجه به تحلیل آماری انجام‌شده تنش آبی نسبت به تنش کودی تأثیر بیشتری بر عملکرد تر دارد؛ بنابراین، آبیاری و مصرف کودهای شیمیایی دو عامل کلیدی در تولید محصول هستند که تأثیر مستقیمی بر عملکرد گیاه دارند و برقراری تعادل میان آبیاری و مصرف کودهای شیمیایی به معنای استفاده بهینه و مؤثر از منابع آب و مواد مغذی برای رشد و توسعه گیاه است.

از سوی دیگر با در نظر گرفتن مدل‌سازی عملکرد نسبی بر اساس تبخیر و تعرق نسبی در مراحل رشد می‌توان مطرح نمود که در هر مرحله از رشد گیاه که نسبت به تیمارهای تنش حساس‌تر باشد، مقدار ضریب حساسیت آن مرحله در مدل بیش‌تر می‌شود. به‌طوری‌که در مرحله حساس توسعه رشد، تأثیر تنش‌ها بر کاهش مقدار ET گیاه و عملکرد محصول بیش‌تر بود.

در این پژوهش نتایج اعتبارسنجی مدل‌ها نشان داد که از میان مدل‌های جمع‌پذیر، مدل سینگ و از میان مدل‌های ضرب‌پذیر، مدل راثو تخمین بهتری برای عملکرد نسبی ذرت در شرایط تنش آبی و کودی ارائه می‌کند و در نهایت با تعیین سه رابطه رگرسیونی دو متغیر که شامل میزان درصد کاهشی از رطوبت FC خاک و میزان بهینه عناصر ماکرو NPK است، منجر به تعیین برآورد عملکرد ذرت علوفه‌ای شد و نتیجه آن، منجر به مناسب بودن عملکرد تابع ریشه دوم با عملکرد واقعی در منطقه مورد مطالعه بود. در ارتباط با نکات کاربردی در مدیریت تنش‌های توأمان آبی و کودی می‌توان به موارد زیر اشاره داشت:

- ۱- برنامه‌ریزی مناسب آبیاری: بر اساس نیاز آبی گیاه ذرت و شرایط خاک، برنامه‌ریزی منظم برای آبیاری صحیح و به‌موقع، انجام گیرد.
- ۲- استفاده بهینه از کودها: بر اساس آزمون حاصلخیزی خاک و نیازهای تغذیه‌ای ذرت، از کودهای شیمیایی یا ارگانیک مناسب استفاده شود و اطمینان حاصل شود که مقدار و زمان استفاده از کودها به‌موقع باشد تا از هدررفت مواد مغذی جلوگیری شود و عملکرد گیاه به حداکثر برسد.
- ۳- تنظیم چرخه کشت: استفاده از روش تناوب زراعی با گیاهانی که نیاز مشابهی به مواد تغذیه‌ای ذرت دارند می‌تواند از تخریب ساختمان خاک جلوگیری کرده و کیفیت خاک را حفظ کند. همچنین انتخاب گیاهان کمک‌کننده به تثبیت نیتروژن باعث بهبود عملکرد فیزیکی خاک و کاهش نیاز به کودهای شیمیایی به‌خصوص از نوع ازته می‌شود.

علی آباد فشافویه، به دلیل حمایت های بی دریغ، در اختیار گذاشتن امکانات اجرایی و فراهم سازی بستر مناسب برای انجام این پژوهش، صمیمانه سپاسگزاری می کنم. بی تردید، همراهی دلسوزانه و نگاه علمی ایشان، نقش بسیار مهمی در پیشبرد این پژوهش داشته است. همچنین وظیفه خود می دانم از دوستان گرامی ام، جناب آقایان نصرت خانزاده و اکبر صدقی پور، به خاطر همکاری ارزشمندشان در بهره گیری از ماشین آلات کشاورزی و ارائه توصیه های عملی و فنی در جریان اجرای طرح، صمیمانه تشکر کنم. همراهی دقیق و صمیمی این دو بزرگوار در مراحل میدانی، سهم بسزایی در اجرای منظم و موفق این پژوهش داشته است.

تعارض منافع

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

۴- مدیریت علف های هرز: کنترل و مدیریت علف های هرز باعث کاهش رقابت با گیاه ذرت برای مواد مغذی و آب می شود و عملکرد آن را بهبود می بخشد.

۵- پایش و کنترل بیماری ها و آفات: انجام پایش دقیق و منظم در مزرعه به منظور تشخیص زودهنگام بیماری ها و آفت ها و اعمال اقدامات احتیاطی برای جلوگیری از گسترش آن ها و همچنین استفاده از روش های مدیریت تلفیقی مانند کنترل بیولوژیکی، کنترل مکانیکی و استفاده از کودهای ارگانیک برای کاهش آسیب های ناشی از بیماری ها و آفت ها بسیار مؤثر هستند.

با رعایت این نکات کاربردی، می توان مدیریت بهینه ای برای تنش های همزمان آبی و کودی در مزرعه ذرت ایجاد کرد و عملکرد و کیفیت محصول را بهبود بخشیده و به حفظ محیط زیست و منابع طبیعی کمک کرد.

تشکر و قدردانی

با نهایت احترام و قدردانی، از جناب آقای کامران زرگریعقوبی، مدیر محترم مجموعه کشاورزی و دامداری

فهرست منابع

۱. زرگریعقوبی، فرامرز، سرائی تبریزی، مهدی، محمدی ترکاشوند، علی، اسفندیاری، مهرداد و رمضانی اعتدالی، هادی، ۱۴۰۱. ارزیابی اثر تنش های توأمان آبی و شوری در برآورد عملکرد بیولوژیکی ذرت علوفه ای از طریق تبخیر و تعرق دوره ای. نشریه آب و خاک، ۳۶ (۶). صص. ۶۹۳-۶۷۷.
۲. سپهری، علی، مدرس ثانوی، علی محمد، قره یاضی، بهزاد، ویمینی، بدآله، ۱۳۸۱. تأثیر تنش آب و مقادیر مختلف نیتروژن بر مراحل رشد و نمو، عملکرد و اجزاء عملکرد ذرت. نشریه علوم زراعی ایران. ۴ (۳). صص. ۲۰۱-۱۸۴.
۳. سرائی تبریزی، مهدی، بابازاده، حسین، همائی، مهدی، کاوه، فریدون، و پارسی نژاد، مسعود، ۱۳۹۵. توسعه و ارزیابی چند مدل اشتقاقی برای مدل سازی تنش توأم کمبود و نیتروژن. نشریه دانش آب و خاک، ۲۶ (۳). صص. ۲۸۷-۲۹۹.
۴. فرحبخش، مهشاد، سرائی تبریزی، مهدی، و بابازاده، حسین، ۱۳۹۸. برآورد نیاز آبی گیاه ریحان برای مدیریت آب در مزرعه. پژوهش آب در کشاورزی، ۳۳ (۱). صص. ۵۳-۶۶.
۵. بابازاده، حسین، و سرائی تبریزی، مهدی، ۱۳۹۶. مدل سازی واکنش گیاهان به تنش های محیطی (تئوری و عملی). انتشارات دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، ۱۸۷ صفحه.
6. Arif, M., Marwat, K.B. and Khan, M.A., 2007. Effect of tillage and zinc application methods on weeds and yield of maize. *Pakistan Journal of Botany*, 39(5), pp.1583-1591.

7. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, pp.1–326.
8. Babazadeh, H., Sarai Tabrizi, M. and Homaei, M., 2017. Basil root water uptake derived models under combined water and nitrogen deficit conditions. *Irrigation and Drainage*, 66(3), pp.377–386. <https://doi.org/10.1002/ird.2104>
9. Farahbakhsh, M., Sarai Tabrizi, M. and Babazadeh, H., 2023. Determining basil production functions under simultaneous water, salinity, and nitrogen stresses. *Applied Water Science*, 13(68), pp.1–12. <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01849-3>
10. Gassman, P.W., Reyes, M.R., Green, C.H. and Arnold, J.G., 2007. The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions. *Transactions of the ASABE*, 50(4), pp.1211–1250. doi: 10.13031/2013.23637
11. Hao, X., Chang, C. and Lindwall, C.W., 2001. Tillage and crop sequence effects on organic carbon and total nitrogen content in an irrigated Alberta soil. *Soil and Tillage Research*, 62(3–4), pp.167–169. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(01\)00222-7](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(01)00222-7)
12. Izaurralde, R.C., Feng, Y., Robertson, J.A., McGill, W.B., Juma, N.G. and Olson, B.M., 1995. Long-term influence of cropping systems, tillage methods, and N sources on nitrate leaching. *Canadian Journal of Soil Science*, 75(4), pp.497–505. <https://doi.org/10.4141/cjss95-071>
13. Jamieson, P.D., Porter, J.R. and Wilson, D.R., 1991. A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. *Field Crops Research*, 27(4), pp.337–350. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(91\)90040-3](https://doi.org/10.1016/0378-4290(91)90040-3)
14. Moser, S.B., Feil, B., Jampatong, S. and Stamp, P., 2006. Effects of pre-anthesis drought, nitrogen fertilizer rate, and variety on grain yield, yield components, and harvest index of tropical maize. *Agricultural Water Management*, 81(1–2), pp.41–58. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.04.005>
15. Moles, T.M., Pompeiano, A., Reyes, T.H., Scartazza, A. and Guglielminetti, L., 2016. The efficient physiological strategy of tomato landrace in response to short-term salinity stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, 109, pp.262–272. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.10.008>
16. Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models, part I—A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), pp.282–290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
17. Patil, S.L. and Sheelavantar, M.N., 2006. Soil water conservation and yield of winter sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) as influenced by tillage, organic materials, and nitrogen fertilizer in semi-arid tropical India. *Soil and Tillage Research*, 89(2), pp.246–257. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.07.013>
18. Roberts, R.K., Howard, D.D., Gwathmey, C.O. and Sleight, D.E., 1999. Economics of broadcast and injected nitrogen on no-till cotton produced at three locations in Tennessee. *Journal of Cotton Science*.
19. Zargar Yaghoubi, F., Sarai Tabrizi, M., Mohammadi Torkashvand, A., Esfandiari, M. and Ramezani Etedali, H., 2024. The effects of drought, and salinity on KS and RAW managerial coefficients in the efficient water management in maize farms. *Applied Water Science*, 14(8), p.177. <https://doi.org/10.1007/s13201-024-02229-9>
20. Zorita, M.D., 2000. Effect of deep-tillage and nitrogen fertilization interactions on dryland corn (*Zea mays* L.) productivity. *Soil and Tillage Research*, 54(1–2), pp.11–19. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(99\)00100-2](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(99)00100-2)
21. Zotarelli, L., Dukes, M.D., Scholberg, J.M.S., Muñoz-Carpena, R. and Icerman, J., 2009. Tomato nitrogen accumulation and fertilizer use efficiency on sandy soil, as affected by nitrogen rate and irrigation scheduling. *Agricultural Water Management*, 96(8), pp.1247–1258. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.03.019>

بررسی اثر پارامترهای طراحی سامانه آبیاری زیرسطحی با لوله‌های پی‌وی‌سی سوراخ‌دار بر تغییرات رطوبت خاک و دور آبیاری درختان پسته

عیسی اسفندیارپور، ناصر صداقتی، سید جواد حسینی‌فرد، سمیه صدر*  و سعید کلانتری

استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ولی‌عصر رفسنجان، ایران. esfandiarpour@vru.ac.ir

استادیار پژوهش، پژوهشکده پسته، مؤسسه تحقیقات و علوم باغبانی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، رفسنجان، ایران. n-sedaghati@pri.ir

دانشیار پژوهش، پژوهشکده پسته، مؤسسه تحقیقات و علوم باغبانی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، رفسنجان، ایران. hosseinfard@pri.ir

استادیار پژوهش، پژوهشکده پسته، مؤسسه تحقیقات و علوم باغبانی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، رفسنجان، ایران. sadr@pri.ir

دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشگاه ولی‌عصر رفسنجان. s.kalantari9232@gmail.com

دریافت: آذر ۱۴۰۳ و پذیرش: اردیبهشت ۱۴۰۴

چکیده

در پژوهش حاضر، تأثیر پارامترهای طراحی سامانه آبیاری زیرسطحی با لوله‌های پی‌وی‌سی سوراخ‌دار بر دور آبیاری درختان بارور پسته، به مدت دو سال (۱۳۹۸-۱۴۰۰) در باغی به مساحت دو هکتار در شهرستان انار استان کرمان بررسی شد. آزمون با روش کرت‌های خردشده با چهار فاکتور عمق کانال (در سطوح ۴۰ و ۶۰ سانتی‌متر)، قطر لوله (در سطوح ۱۱۰ و ۱۶۰ میلی‌متر)، قطر سوراخ‌های روی لوله (در سطوح ۹ و ۱۲ میلی‌متر) و فاصله سوراخ‌های روی لوله (در سطوح ۱۵ و ۲۵ سانتی‌متر) در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار استفاده شد. تمام تیمارهای آزمایشی با مقدار آب برابر با ۷۵ درصد نیاز آبی و دور آبیاری ۲۴ روز آبیاری شدند. به این منظور، مقدار رطوبت حجمی خاک تیمارهای مختلف در فاصله بین دو آبیاری متوالی در اعماق مختلف، با دستگاه TDR اندازه‌گیری شد. تجزیه و تحلیل آماری اطلاعات با استفاده از نرم‌افزار MSTAT-C و مقایسه میانگین‌ها با آزمون LSD در سطح احتمال ۰/۰۵ صورت گرفت. همچنین، رطوبت حجمی خاک ناحیه حداکثر تراکم ریشه درختان پسته در فاصله بین دو آبیاری متوالی (۲ و ۲۳ روز پس از آبیاری)، به ترتیب ۱۲٪ و ۶/۲٪ افزایش نشان داد. در مجموع، دور آبیاری مناسب درختان پسته در سامانه آبیاری و با توجه به مشخصات خاک باغ مورد نظر و با مدنظر قرار دادن تخلیه مجاز رطوبتی تا آب سهل‌الوصول یا نقطه پژمردگی دائم، به ترتیب ۲۰ و ۲۴ روز تعیین گردید. بنابراین، با استفاده بهینه از پارامترهای طراحی سامانه آبیاری زیرسطحی با لوله‌های پی‌وی‌سی سوراخ‌دار می‌توان بدون اینکه گیاه شرایط رطوبتی سخت و زیان‌آور را تجربه کند در مصرف آب نسبت به آبیاری غرقابی حدود ۵۰ درصد صرفه‌جویی کرد و بهره‌وری آب را بالاتر برد. با توجه به نتایج بدست آمده، از بین فاکتورهای طراحی، عمق کانال ۴۰ cm، قطر لوله ۱۱۰ mm، قطر سوراخ ۱۲ و فاصله سوراخ ۱۵ cm در عملکرد محصول و نیز بهره‌وری آب، وضعیت بهتری داشتند. همچنین تیمار با عملکرد (kg/tree) ۱۱/۱ و بهره‌وری آب بعد از آبیاری (gr/m³) ۱۳۲۵ یا (gr/m³) ۸۲۸ بدون آبیاری به‌ترین تیمار معرفی شد.

واژه‌های کلیدی: کارایی مصرف آب، تخلیه مجاز رطوبتی، رطوبت سهل‌الوصول، کرمان

* - آدرس ایمیل نویسنده مسئول: Ssadr@pri.ir



مقدمه

پسته (*Pistacia vera* L.) گیاهی مقاوم به خشکی است و ریشه‌های آن می‌توانند تا عمق زیادی در لایه‌های مرطوب نفوذ کنند اما مقاومت به خشکی به این معنا نیست که درخت پسته به آب کمتری برای عملکرد بهینه نیاز دارد. در شرایط تنش رطوبتی یعنی زمانی که رطوبت خاک کمتر از نقطه پژمردگی دائم باشد، فعالیت ریشه ممکن است به‌طور کامل برای چهار تا پنج هفته متوقف شود؛ بنابراین، برای تولید اقتصادی، آبیاری کافی درختان پسته ضرورت دارد (گلدنهمر، ۲۰۰۵). بیش از ۹۰ درصد باغ‌های پسته استان کرمان، تحت پوشش روش آبیاری سطحی (غرقابی) قرار دارند (اسماعیل‌پور و همکاران، ۱۳۹۶) این در حالی است که در سال‌های اخیر، به‌دلیل خشک‌سالی‌های پی‌درپی، حجم مخازن آب‌های زیرزمینی که منبع عمده تأمین‌کننده آب مصرفی درختان پسته است، به‌دلیل برداشت‌های بی‌رویه، به‌شدت کاهش یافته است (شرکت سهامی آب منطقه‌ای کرمان، ۱۳۹۷).

محدودیت منابع آب از نظر کمی و کیفی ایجاب می‌کند که برنامه‌ریزی مناسبی برای استفاده بهینه از واحد آب مصرفی انجام پذیرد. محققان روش‌های آبیاری مختلفی را برای به حداقل رساندن مصرف آب در کشاورزی و در عین حال، حفظ عملکرد و افزایش راندمان مصرف آب آبیاری پیشنهاد نموده‌اند (کولاک و همکاران، ۲۰۱۸). روش‌های خرد آبیاری، مانند آبیاری قطره‌ای زیرسطحی، روش ارزشمندی برای صرفه‌جویی در آب، افزایش راندمان آبیاری، کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی و افزایش عملکرد محصول است (تامر و همکاران، ۲۰۲۱؛ کریشناپرابو، ۲۰۲۰؛ یان و همکاران، ۲۰۱۹؛ دستورانی و همکاران، ۲۰۱۰؛ تامسون و همکاران، ۲۰۰۹).

در گزارشی لام (۲۰۰۳) از دانشگاه کانزاس، محاسن و معایب روش‌های آبیاری قطره‌ای زیرسطحی به‌طور مفصل ارائه شده است. از جمله محاسن گزارش شده می‌توان به

راندمان مصرف آب (WUE) بالاتر، آلودگی کمتر آب‌های زیرسطحی به‌دلیل آبشویی کمتر نیتрат‌ها، کاهش خطرات شوری به‌دلیل نگهداری رطوبت خاک در حد بالا و دور آبیاری کوتاه‌تر، یکنواختی پخش بالای آب، وضعیت بهتر گیاه از نظر رشد، افزایش کمی و کیفی محصول، کنترل بهتر بیماری‌ها، مدیریت مناسب کودها و سموم، کنترل علف‌های هرز، امکان خودکار کردن کامل، طول عمر بیشتر، کاهش خسارت‌های ناشی از حیوانات و انعطاف‌پذیری زیاد این روش اشاره کرد. در این گزارش به تعدادی از محدودیت‌های این روش از قبیل محدودشدن عمق توسعه ریشه‌ها، عدم امکان تغییر الگوی کشت به‌دلیل ثابت بودن محل نصب لوله‌ها، نیاز به تجهیزات دقیق تصفیه آب و مدیریت مناسب نگهداری تأسیسات و ورود ذرات خاک به داخل قطره‌چکان‌ها در هنگام خاموش کردن سیستم (در صورت عدم تخلیه هوای داخل لوله‌ها از طریق شیرهای مخصوص) نیز اشاره شده است. در مجموع، این روش به‌دلیل مزایای بسیاری که دارد به‌عنوان یک روش کارآمد معرفی شده است. نتایج پژوهش‌های انجام‌شده توسط محمدی محمدآبادی (۱۳۸۴) در شرایط آب و هوایی شهرستان کرمان در یک خاک لوم شنی با قابلیت هدایت الکتریکی آب آبیاری برابر با ۲/۵ دسی‌زیمنس بر متر، نشان داد که تغییر روش آبیاری از سطحی به زیرسطحی برای درختان بارور پسته امکان‌پذیر بوده و می‌توان با کاربرد آب به میزان ۴۰ و ۶۰ درصد تبخیر از تشت کلاس الف (به‌ترتیب، حجم آبیاری حدود ۴۷۸۳ و ۷۱۷۴ مترمکعب در هکتار در سال) به عملکرد مناسب از نظر صفات کمی و کیفی محصول پسته دست یافت. وی بهترین تیمار در شرایط انجام این آزمایش را روش آبیاری زیرسطحی با مصرف ۶۰ درصد تبخیر از تشت کلاس الف با دور آبیاری ۱۴ روز گزارش نمود در پژوهشی که توسط صداقتی و همکاران (۱۳۸۸) روی روش‌های آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی در باغ‌های پسته انجام شد، مشخص شد که آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با عمق نصب ۳۰ سانتی‌متر و میزان آب ۶۰ درصد

این روش، لازم است تا برخی از ناشناخته‌های آن نظیر دور آبیاری بهینه مشخص شود.

عطایی و همکاران (۱۳۹۸) با بررسی دور آبیاری درخت پسته در دو روش آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی نتیجه گرفتند که کوتاه کردن دور آبیاری برای جلوگیری از تنش رطوبتی ضروری است. به‌علاوه، در پژوهشی که محمدی محمدآبادی (۱۳۸۴) تحت عنوان امکان تغییر روش آبیاری از غرقابی به قطره‌ای زیرزمینی برای درختان پسته شهرستان رفسنجان انجام داد، گزارش نمود که دور آبیاری ۱۴ روزه و مصرف ۴۸۸۷ مترمکعب آب در هکتار برای آبیاری قطره‌ای زیرزمینی، وضعیتی مطلوب را از نظر مصرف آب با توجه به عملکرد محصول، زودخندانی و رشد رویشی پسته نسبت به آبیاری غرقابی با دور آبیاری ۳۵ روزه و آب مصرفی ۹۰۰۰ مترمکعب در هکتار دارا است. استفاده از این روش، ضمن کاهش دور آبیاری، حجم آب مصرفی را حداقل به مقدار ۲۵ درصد نسبت به آبیاری غرقابی رایج در باغ‌های پسته کاهش می‌دهد.

تحقیقات انجام‌شده توسط پژوهشکده پسته نشان داد که بهترین دوره‌های آبیاری برای یک درخت بارور پسته در روش‌های خردآبیاری، بسته به نوع بافت خاک بین ۱۰ تا ۱۵ روز است. انتخاب دوره‌های آبیاری کوتاه در این روش‌ها باعث می‌شود که تنها سطح خاک خیس شده و این مقدار آب کم‌عمق، قبل از اینکه جذب گیاه شود، در اثر تبخیر از دسترس خارج شود؛ بنابراین لازم است که با افزایش ساعات آبیاری، شرایط نفوذ آب به اعماق پایین‌تر فراهم شود (اسماعیل‌پور و همکاران، ۱۳۹۶).

تافته و همکاران (۱۴۰۳) گزارش دادند که نظر به اینکه دور آبیاری معمول در باغات پسته منطقه دامغان در محدوده ۱۰ تا ۱۵ روز و ساعات آبیاری نیز حدود ۱۲ ساعت است لذا، افزایش دور آبیاری به ۲۰ روز و کاهش مدت آبیاری به مدت هشت ساعت بدون تغییر در عملکرد (متوسط تبخیر و تعرق ۶۰۵ میلی‌متر) و با کاهش مصرف آب حدود ۳۰

نیاز آبی در روش آبیاری سطحی، با کارایی مصرف آب ۰/۲۹ کیلوگرم محصول خشک در هر مترمکعب آب مصرفی و ۲۵ درصد صرفه‌جویی در مصرف آب نسبت به روش آبیاری قطره‌ای سطحی، بهتر شناخته شد.

طی سال‌های اخیر با مشخص شدن تأثیر مثبت آبیاری‌های تحت فشار نسبت به آبیاری‌های غرقابی، روش‌های مختلفی در آبیاری درختان پسته (مانند آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی، بابلر، لوله‌های اسفنجی تراوا و آبیاری کوزه‌ای) توصیه شد که اغلب مورد استقبال کشاورزان قرار نگرفت. مشکلاتی نظیر آب‌های با کیفیت نامناسب، هزینه‌های بالای اجرا و نگهداری و ناهماهنگی این هزینه‌ها با کشاورزی خرده مالکی رایج در منطقه، از جمله موانع پیش رو در بحث گسترش روش آبیاری تحت فشار محسوب می‌شوند (صداقتی و همکاران، ۱۳۹۳). با این وجود، استفاده از روش آبیاری زیرسطحی با لوله‌های پی‌وی‌سی سوراخ‌دار، طی سال‌های اخیر در برخی از باغ‌های پسته شهرستان‌های رفسنجان و انار توصیه شده است. صداقتی و همکاران (۱۳۹۳) نشان دادند که تغییر روش آبیاری از غرقابی به آبیاری زیرسطحی با لوله‌های پی‌وی‌سی سوراخ‌دار در باغ‌های پسته، تقریباً تمام صفات کمی و کیفی محصول را تحت تأثیر قرار داد به‌گونه‌ای که باعث افزایش ۰/۸ تا ۱/۶ کیلوگرمی وزن محصول خشک هر درخت (افزایش ۴۵۷ تا ۹۱۴ کیلوگرمی محصول در هکتار)، کاهش ۱/۷ تا ۴/۲۵ درصدی پوکی، افزایش ۳/۵ تا ۶ درصدی خندانی، کاهش ۱/۳ تا ۲ واحدی در انس (معیار عددی برای بیان میزان درشتی یا ریزی پسته) و افزایش ۴۱/۴ تا ۶۱/۶ درصدی بهره‌وری آب شد. ضمن اینکه میزان مصرف آب نسبت به آبیاری غرقابی تا ۲۵ درصد کاهش یافت.

هرچند روش آبیاری با لوله‌های پی‌وی‌سی سوراخ‌دار، با توجه به ظرفیت مناسب آبیگری لوله‌ها (صداقتی و همکاران، ۱۳۹۳)، توسط خرده‌مالکین نیز می‌تواند به‌آسانی و با کمترین هزینه مورد استفاده قرار گیرد اما قبل از ترویج

درصد نسبت به شرایط معمول، قابل توصیه و پیشنهاد خواهد بود.

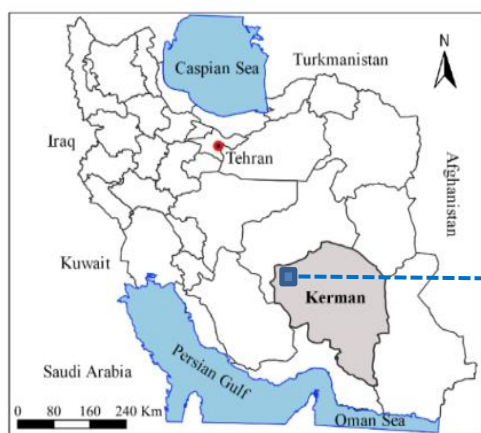
از آنجاکه هنوز اطلاعات دقیقی از تأثیر پارامترهای دخیل در طراحی روش آبیاری با لوله‌های پی‌وی‌سی سوراخ‌دار بر دور آبیاری وجود ندارد، بنابراین در پژوهش حاضر تلاش شده است تا با استفاده از روش آبیاری با لوله‌های پی‌وی‌سی سوراخ‌دار و بررسی برخی از پارامترهای دخیل در طراحی آن، دور آبیاری مناسب در بخشی از باغ‌های پسته شهرستان انار، واقع در استان کرمان، تعیین شود.

روش بررسی

منطقه مطالعاتی

این پژوهش در باغی به مساحت تقریبی دو هکتار (رقم اکبری با میانگین سنی ۳۰ سال) در شهرستان انار اجرا شد. انار، یکی از شهرستان‌های استان کرمان واقع در جنوب

شرقی ایران است که در حد فاصل عرض‌های جغرافیایی ۳۰ درجه و ۴۲ دقیقه تا ۳۰ درجه و ۵۸ دقیقه شمالی و طول‌های جغرافیایی ۵۵ درجه و ۱۰ دقیقه تا ۵۵ درجه و ۳۳ دقیقه شرقی واقع شده است (شکل ۱). میانگین بارش و دمای سالانه این منطقه، به ترتیب ۹۵ میلی‌متر و ۱۶/۶ درجه سلسیوس است. میانگین ارتفاع منطقه از سطح دریا، حدود ۱۱۵۰ متر است. عمق آب زیرزمینی در شهرستان انار در محدوده ۱۵۰ تا ۴۰۰ متر متغیر است بر اساس آمار هواشناسی میزان تبخیر و تعرق در این شهرستان نیز در محدوده ۲۰۰۰ تا ۳۰۰۰ میلی‌متر گزارش شده است. در انتخاب باغ سعی شد تا شرایط غالب باغ‌های منطقه از نظر شوری آب، خاک، رقم پسته، وضعیت رشد درختان و نحوه مدیریت باغ در نظر گرفته شود. مدیریت علف‌های هرز در باغ توسط علف‌کش‌های پیش‌رویشی انجام گرفت و با تکرار استفاده از علف‌کش پس از چند ماه، کاهش شدید جمعیت علف هرز در منطقه مطالعاتی مشاهده شد.



شکل ۱- موقعیت منطقه مطالعاتی در ایران و استان کرمان

روش انجام پژوهش

این پژوهش در تیرماه سال ۱۳۹۷ اجرا شد. قبل از اجرای پژوهش، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آب و خاک منطقه، مورد آزمایش قرار گرفت. برداشت نمونه‌های خاک از سه عمق صفر تا ۴۰، ۴۰ تا ۸۰ و ۸۰ تا ۱۲۰ سانتی‌متر انجام شد.

پژوهش حاضر به صورت کرت‌های خردشده با چهار فاکتور عمق کانال در دو سطح (۴۰ و ۶۰ سانتی‌متر)، قطر لوله در دو سطح (۱۱۰ و ۱۶۰ میلی‌متر)، قطر سوراخ‌های روی لوله در دو سطح (۹ و ۱۲ میلی‌متر) و فاصله سوراخ‌های روی لوله در دو سطح (۱۵ و ۲۵ سانتی‌متر) با سه تکرار به مدت دو سال اجرا شد. در مجموع، ۱۶ تیمار آزمایشی در این

پژوهش، مورد بررسی قرار گرفت. جدول (۱) مشخصات تیمارهای ۱۶ گانه را نشان می‌دهد.

جدول ۱- مشخصات تیمارهای آبیاری زیرسطحی با لوله‌های پی‌وی‌سی سوراخ‌دار بر اساس پارامترهای چهارگانه در نظر گرفته‌شده

شماره تیمار	سطح هر فاکتور				شماره تیمار	سطح هر فاکتور				شماره تیمار	
	فاصله	قطر	قطر لوله	عمق کانال		فاصله	قطر	قطر لوله	عمق کانال		
میلی متر				میلی متر							
فاکتور D	فاکتور C	فاکتور B	فاکتور A	فاکتور D	فاکتور C	فاکتور B	فاکتور A				
2221	15(1)	12(2)	160(2)	60(2)	T9	1221	15(1)	12(2)	160(2)	40(1)	T1
2222	25(2)	12(2)	160(2)	60(2)	T10	1222	25(2)	12(2)	160(2)	40(1)	T2
2211	15(1)	9(1)	160(2)	60(2)	T11	1211	15(1)	9(1)	160(2)	40(1)	T3
2212	25(2)	9(1)	160(2)	60(2)	T12	1212	25(2)	9(1)	160(2)	40(1)	T4
2121	15(1)	12(2)	110(1)	60(2)	T13	1121	15(1)	12(2)	110(1)	40(1)	T5
2122	25(2)	12(2)	110(1)	60(2)	T14	1122	25(2)	12(2)	110(1)	40(1)	T6
2111	15(1)	9(1)	110(1)	60(2)	T15	1111	15(1)	9(1)	110(1)	40(1)	T7
2112	25(2)	9(1)	110(1)	60(2)	T16	1112	25(2)	9(1)	110(1)	40(1)	T8

* اعداد ارائه‌شده در این ستون، به‌ترتیب، نشانگر سطوح مربوط به فاکتورهای A، B، C و D است. برای مثال، کد (۱۲۲۱) در تیمار T۱ بیانگر تیماری است که در آن عمق کانال در سطح یک (۴۰ سانتی‌متر)، قطر لوله در سطح دو (۱۶۰ میلی‌متر)، قطر سوراخ روی لوله در سطح دو (۱۲ میلی‌متر) و فاصله سوراخ‌ها از یکدیگر در سطح یک (۱۵ سانتی‌متر) است. شماره سطح مورد مطالعه در پرانتز ارائه شده است

اجرای روش آبیاری زیرسطحی با لوله‌های پی‌وی‌سی سوراخ‌دار

در روش آبیاری زیرسطحی با لوله‌های پی‌وی‌سی سوراخ‌دار، آب از منبع تأمین آب آبیاری (چاه یا استخر ذخیره آب)، با استفاده از پمپاژ، در لوله‌های تحت فشار تا ابتدای قطعات باغ منتقل شده و سپس با استفاده از شیرفلکه‌ها یا دربندهای مخصوص به داخل حوضچه تقسیم آب می‌ریزد. بنابراین در این قسمت از روش آبیاری، آب از حالت تحت فشار خارج می‌گردد و با نیروی ثقل و بر اساس شیب زمین، در داخل لوله‌های آبد به حرکت در می‌آید. در داخل هر حوضچه، لوله‌های آبد به که تعداد آن‌ها بستگی به ابعاد حوضچه، قطر لوله‌های آبد و دبی آب دارد، وظیفه انتقال آب به زیر خاک و محدوده ریشه درختان را بر عهده دارند. انتهای لوله‌های آبد نیز باز بوده و توسط یک زانویی به یک لوله عمودی (هواکش) متصل می‌گردند. این هواکش، علاوه بر

تخلیه هوای داخل لوله و سهولت جریان آب داخل آن، باعث می‌گردد که جریان در لوله از حالت تحت فشار خارج شده و تنها در هنگامی که لوله‌ها پر از آب شوند، کمی تحت فشار قرار می‌گیرند. به همین دلیل، گاهی اوقات به این سیستم آبیاری، واژه کم‌فشار اطلاق می‌گردد. شکل ۲ نمای کلی یک سیستم آبیاری زیرسطحی کم‌فشار با لوله‌های پی‌وی‌سی سوراخ‌دار را نشان می‌دهد که در آن سه ردیف درخت با شش خط لوله و از طریق یک حوضچه آبیاری می‌شوند.

لوله‌های پی‌وی‌سی تقریباً در مرکز سایه‌انداز درختان پسته (فاصله ۱۲۰ سانتی‌متری از تنه درختان) در دو طرف و در عمق‌های مورد نظر کارگذاری شد. روی لوله‌های پی‌وی‌سی، سوراخ‌هایی به قطرهای مورد نظر (۹ و ۱۲ میلی‌متر) در قسمت تحتانی لوله با زاویه اندک نسبت به خط عمود بر زمین و به فواصل تیمارهای آزمایشی (۱۵ و ۲۵ سانتی‌متر) تعبیه شد.



شکل ۲- نمای کلی از آرایش سه ردیفه آبیاری زیرسطحی کم‌فشار با لوله‌های پی‌وی‌سی و تصاویر مراحل اجرای این روش در باغ

۱۰ سانتی‌متر، دور تا دور لوله‌ها (به غیر از بالای لوله‌ها) به صورت فیلتر تعبیه شد (شکل ۳). با توجه به ضخامت تقریبی ۱۰ سانتی‌متری استفاده شده برای فیلتر، در عمل، عمق کارگذاری لوله‌ها ۳۰ و ۵۰ سانتی‌متر بوده است. عرض کانال‌های حفر شده برای همه تیمارها مساوی با ۳۵ سانتی‌متر بود. طول ردیف‌ها ۵۰ متر و شیب زمین ۰/۱ درصد بود.

در تمام تیمارها، به فاصله هر ۵۰ تا ۶۰ سانتی‌متر (بسته به فاصله سوراخ‌های مورب اصلی)، یک سوراخ در کف لوله‌ها برای تخلیه کامل آب از لوله‌ها تعبیه شد. برای کاهش خطر انسداد سوراخ‌ها به وسیله ذرات خاک و نیز جلوگیری از شست‌وشوی خاک در هنگام آبیاری، یک لایه سنگریزه (با قطر ذرات ۶ تا ۱۲ میلی‌متر) به ضخامت تقریبی



شکل ۳- (الف) موقعیت سوراخ‌های اصلی و کف لوله؛ (ب) نحوه قرارگیری لوله و فیلتر اطراف لوله‌ها؛ (ج) نوع فیلتر دور لوله‌ها

گیاه پسته به شرایط خشکی، برای محاسبه RAW، مقدار حداکثر تخلیه مجاز رطوبتی (MAD)، معادل ۷۵ درصد در نظر گرفته شد.

نیاز خالص آبیاری درختان پسته در روش آبیاری غرقابی در شهرستان انار، بر اساس سامانه نیاز آبی مؤسسه تحقیقات خاک و آب کشور، ۵۱۱۲ مترمکعب در هکتار در طول هشت ماه فصل رشد است. با توجه به متوسط راندمان آبیاری ۵۰ درصد در روش آبیاری غرقابی در باغ‌های پسته کشور (عباسی و همکاران، ۱۳۹۶)، نیاز ناخالص آبیاری ۱۰۲۲۴ مترمکعب خواهد شد. بر این اساس ۵۰ درصد این

به منظور تعیین دور آبیاری مناسب، نمونه‌برداری خاک از عمق حداکثر تراکم ریشه‌های ریز (عمق ۶۰ سانتی‌متری) (حکم‌آبادی و همکاران، ۱۴۰۰) به فواصل زمانی ۲، ۵، ۸، ۱۲، ۱۴، ۱۷، ۲۰ و ۲۳ روز پس از آبیاری در هر تکرار انجام شد و درصد رطوبت حجمی نمونه‌ها تعیین گردید (در ادامه به جای رطوبت حجمی از واژه رطوبت استفاده خواهد شد). سپس، بر اساس میزان رطوبت خاک در دو نقطه ظرفیت زراعی (FC) و پژمردگی دائم (PWP) و حد تخلیه مجاز رطوبتی خاک (MAD) برای درختان پسته، دور آبیاری مناسب درختان تعیین شد. با توجه به مقاومت بالای

نیاز آبی حدود ۵۰۰۰ مترمکعب خواهد بود. برای انجام آبیاری بر اساس این حجم آب، ابتدا با توجه به تعداد نوبت آبیاری در طول فصل رشد (۱۰ نوبت)، حجم آب آبیاری در هر نوبت در هکتار (۵۰۰ مترمکعب) تعیین شد. سپس با توجه به سطح آبیاری مربوط به هر حوضچه، حجم آب مورد نیاز در هر نوبت آبیاری برای یک حوضچه مشخص شد. در نهایت نیز با توجه به حجم آب مورد نیاز و دبی آب ورودی به هر حوضچه، مدت زمان آبیاری هر حوضچه در هر نوبت آبیاری، مشخص شد و بر این اساس تخصیص آب به کرت‌ها انجام گرفت. همچنین عملیات داشت روی درختان در همه تیمارها به‌طور یکسان در طول مدت پژوهش انجام شد و آبخویی زمستانه در دو نوبت آبیاری و با حجم تقریبی هر آبیاری ۱۵۰۰ مترمکعب در هکتار (در مجموع، ۳۰۰۰ مترمکعب در هکتار) انجام شد.

در پایان سال‌های ۱۳۹۸ و ۱۴۰۰، عملکرد پسته (وزن خشک) برای ارزیابی تأثیر تیمارهای مختلف بر درختان، بهره‌وری آب با (WUP1) و بدون (WUP2) محاسبه نیاز آبخویی و راندمان مصرف آب برای هر تیمار (با تقسیم متوسط عملکرد خشک بر حجم آب آبیاری اعمال شده در هکتار) محاسبه شد.

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار MSTAT-C و مقایسه میانگین‌ها با روش آزمون LSD در سطح پنج درصد انجام شد. به علاوه، نمودار تغییرات رطوبت خاک برای تیمارهای مختلف ترسیم و مورد ارزیابی قرار گرفت.

اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی

پس از هوا خشک کردن نمونه‌های خاک و عبور آن‌ها از الک دو میلی‌متری، تجزیه‌های آزمایشگاهی لازم روی آن‌ها انجام شد. برای این منظور، واکنش خاک در خمیر اشباع با دستگاه پ‌هاش‌متر و قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک با استفاده از دستگاه هدایت‌سنج (رودز، ۱۹۹۶)، بافت

خاک به روش هیدرومتری (بایکاس، ۱۹۵۱)، کربنات کلسیم معادل به روش خنثی‌سازی با اسیدکلریدریک (آلیسوم و مودی، ۱۹۶۵)، ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم توسط دستگاه صفحه فشاری، فسفر قابل جذب به روش اولسن (اولسن، ۱۹۵۴)، پتاسیم قابل جذب به روش استات آمونیوم، سدیم محلول با روش شعله‌سنجی و کلسیم و منیزیم در عصاره اشباع به روش کمپلکسومتری با EDTA (لانیون و هیلد، ۱۹۸۲) اندازه‌گیری شد. سپس با استفاده از مقادیر سدیم، کلسیم و منیزیم محلول، مقدار عددی نسبت جذب سطحی سدیم (SAR) توسط معادله مربوطه محاسبه شد. علاوه بر این، از یک‌سری نمونه دست‌نخورده برای تعیین چگالی ظاهری به روش سیلندر (بلیک، ۱۹۶۵) استفاده شد. رطوبت خاک با استفاده از دستگاه TDR (Time-Domain Reflectometry)، واکنش آب با دستگاه پ‌هاش‌متر و قابلیت هدایت الکتریکی نمونه‌های آب با استفاده از دستگاه هدایت‌سنج (ریچارد، ۱۹۵۴)، کلر به روش تیتراسیون با نیترات نقره (Piper, 2010)، کربنات و بی‌کربنات به روش تیتراسیون با اسیدسولفوریک (زانگن، ۱۹۶۲)، سولفات به روش کلرید باریم و قرائت با اسپکترومتر (استفان، ۲۰۱۳)، سدیم، کلسیم و منیزیم به روش کمپلکسومتری و تیتراسیون با EDTA (لانیون و هیلد، ۱۹۸۲) اندازه‌گیری شد. سپس با استفاده از مقادیر سدیم، کلسیم و منیزیم، مقدار عددی نسبت جذب سطحی سدیم (SAR) محاسبه شد.

نتایج

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آب و خاک

جدول ۲ برخی از مهم‌ترین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. بر اساس اطلاعات این جدول، خاک باغ مورد مطالعه در گروه خاک های شور ($EC_e > 4 \text{ dS/m}$) قرار دارد. نظر به اینکه درختان پسته تا شوری هشت دسی‌زیمنس بر متر را می‌توانند تحمل کنند (سپاسخواه و مفتون، ۱۹۸۸) و با توجه به اینکه تراکم

کیلوگرم خاک) (حسینی فرد و همکاران، ۱۳۹۶) مشخص می‌شود که در خاک منطقه مورد مطالعه، کمبود پتاسیم وجود ندارد. روند کلی تغییرات فسفر قابل جذب با عمق نیز نسبتاً افزایشی است. با توجه به حد بحرانی فسفر در خاک برای رشد پسته (۱۵ تا ۲۰ میلی‌گرم در خاک) (حسینی فرد و همکاران، ۱۳۹۶) می‌توان نتیجه گرفت که خاک منطقه، فاقد کمبود فسفر است.

مقدار رطوبت خاک در عمق‌های سه‌گانه مطالعاتی، تقریباً برابر است هرچند که در عمق سوم (۱۲۰-۸۰ سانتی متر) اندکی افزایش یافته است.

عمده ریشه درختان پسته در عمق ۴۰ تا ۸۰ سانتی‌متری است (صداقتی و همکاران، ۱۴۰۳) بنابراین شوری خاک مورد مطالعه، هیچ‌گونه محدودیتی برای درختان پسته این باغ ایجاد نمی‌کند (صداقتی و همکاران، ۱۳۸۸ ب). همچنین در این باغ، مشکل سدیمی بودن خاک ($SAR > 13$) وجود ندارد. با توجه به روند مشابه موجود در تغییرات قابلیت هدایت الکتریکی از سطح به عمق با مقدار کلسیم، منیزیم و سدیم محلول خاک می‌توان نتیجه گرفت که شوری در منطقه مورد مطالعه، متأثر از این عناصر است. همچنین، خاک این منطقه به‌طورکلی در گروه خاک‌های متوسط تا درشت‌بافت قرار گرفته است.

میانگین پتاسیم قابل جذب از سطح به عمق افزایش یافته است. با توجه به حد بحرانی پتاسیم (۲۵۰ میلی‌گرم در

جدول ۲- برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک باغ مورد مطالعه

ویژگی خاک	علامت اختصاری (واحد اندازه‌گیری)	عمق خاک (سانتی‌متر)		
		0-40	40-80	80-120
قابلیت هدایت الکتریکی	ECe (dS/m)	5.12	4.55	8.72
نسبت جذب سطحی سدیم	SAR (meq/L) ^{0.5}	8.3	8.11	8.05
اسیدیته	pH	12	9	31.5
کلسیم محلول	Ca ²⁺ (meq/L)	12.5	11	25
منیزیم محلول	Mg ²⁺ (meq/L)	26.5	25	30.5
سدیم محلول	Na ⁺ (meq/L)	7.57	7.91	5.74
پتاسیم قابل جذب	K ⁺ (mg/kg)	260	264	320
فسفر قابل جذب	P (mg/kg)	28.98	27.97	30.04
سیلت	Silt (%)	12	10	20
رس	Clay (%)	11	9	21
شن	Sand (%)	77	81	59
بافت خاک	---			
جرم مخصوص ظاهری	ρ_b (gr/cm ³)	1.3	1.35	1.27
رطوبت خاک در ظرفیت زراعی	FC (%)	33	31	35
رطوبت خاک در نقطه پژمردگی دائم	PWP (%)	10	9	11
کل رطوبت قابل استفاده خاک	TAW (%)	23	22	24
کل رطوبت سهل‌الوصول خاک*	RAW (%)	17.25	16.5	18

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

از عناصر نظیر کلر و سدیم، از جمله مهم‌ترین موارد قابل بررسی بود. آب آبیاری مورد استفاده در باغ مورد نظر در کلاس آب‌های شور طبقه‌بندی می‌شود و از درجه محدودیت

جدول ۳ نشان‌دهنده نتایج تجزیه آب آبیاری مورد استفاده در باغ مورد نظر است. در بین شاخص‌های کیفی آب آبیاری، شوری یا قابلیت هدایت الکتریکی آب و سمیت برخی

این، کیفیت آب آبیاری مورد استفاده در این باغ از نظر سمیت عناصر سدیم، کلر و منیزیم، به ترتیب، دارای درجه محدودیت متوسط، شدید و شدید است. از نظر نسبت جذب سدیم (SAR) نیز محدودیتی وجود ندارد.

متوسط تا زیاد برای کشت پسته برخوردار است. با این وجود، از آب‌هایی تا شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر نیز می‌توان با قبول حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد کاهش عملکرد و با اعمال مدیریت مناسب، به‌ویژه در روش آبیاری غرقابی و تأمین آب لازم برای آبیاری استفاده نمود (نیری، ۱۳۷۷). علاوه بر

جدول ۳- نتایج تجزیه آب آبیاری مورد استفاده در باغ مورد مطالعه

غلظت آنیون‌ها و کاتیون‌ها (میلی‌اکی‌والان بر لیتر)						pH	EC _w (dS m ⁻¹)	SAR (meq L ⁻¹) ^{0.5}
Na ⁺	Mg ⁺²	Ca ⁺²	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻²			
45.1	40.0	30.0	107.5	3.2	4.3	7.4	11.5	7.6

تغییرات رطوبت خاک عمق ۶۰ سانتی‌متر در فاصله بین دو آبیاری متوالی و با فاصله سه روز انجام شد که نتایج آن در جدول ۴ آمده است. بر اساس نتایج این جدول، در هر سه محل نمونه‌برداری (کنار لوله، کنار پشته و کنار درخت)، تیمارهای T۳، T۵، T۶ و T۹ بهترین وضعیت رطوبتی را در ناحیه ریشه درختان داشتند؛ البته رطوبت خاک کنار لوله و کنار پشته در تیمار T۹ از روز هشتم به بعد با تیمارهای برتر (T۳، T۵ و T۶) در سطح پنج درصد اختلاف معنی‌دار پیدا نمود.

تعیین دور آبیاری مناسب درختان پسته

نتایج تجزیه واریانس رطوبت خاک عمق حداکثر تراکم ریشه درختان پسته (۶۰ سانتی‌متر) محدوده کنار لوله آبد، کنار پشته و کنار ردیف درختان (جدول ۴)، حاکی از اثر کاملاً معنی‌دار فاکتورهای طراحی و اثرات متقابل آن‌ها بر رطوبت لایه حداکثر تراکم ریشه درختان بود و تنها اثر قطر لوله بر رطوبت خاک کنار درختان از روز هشتم پس از آبیاری تا آبیاری بعدی، معنی‌دار نبود. همچنین مقایسه میانگین

جدول ۴- مقایسه میانگین رطوبت خاک عمق حداکثر تراکم ریشه درختان پسته (۶۰ سانتی‌متر) در فاصله بین دو آبیاری متوالی تحت تأثیر پارامترهای مختلف طراحی روش آبیاری زیرسطحی با لوله

های پی‌وی‌سی															
کنار پشته					کنار لوله أبده					کنار ردیف درختان					فاکتور (تیمار)
روز 23	روز 20	روز 14	روز 8	روز 2	روز 23	روز 20	روز 14	روز 8	روز 2	روز 23	روز 20	روز 14	روز 8	روز 2	
9.370 a	11.025 a	15.257 a	21.118 a	28.383 b	9.921 a	11.671 a	16.153 a	22.358 a	30.023 b	11.144 a	13.111 a	18.145 a	25.115a	34.359 a	عمق کانال
8.596 b	10.112 b	13.995 b	19.373 b	29.950 a	9.375 b	11.030 b	15.266 b	21.130 b	31.773 a	10.018 b	11.788 b	16.314 b	22.579b	33.165b	(A)
9.112 a	10.719 a	14.835 a	20.535 a	30.756 a	9.900 a	11.648 a	16.120 a	22.313 a	32.508 a	10.833 a	12.747 a	17.640 a	24.416a	34.779a	قطر لوله (B)
8.854 a	10.418 a	14.418 a	19.956 a	27.577 b	9.396 b	11.053 b	15.299 b	21.175 b	29.288 b	10.328 b	12.152 b	16.818 b	23.278b	32.744b	160 میلی‌متر
8.384 b	9.864 b	13.652 b	18.895 b	28.042 b	9.006 b	10.595 b	14.664 b	20.296 b	29.829 b	9.935 b	11.688 b	16.176 b	22.389b	32.261b	9 میلی‌متر
9.582 a	11.273 a	15.601 a	21.595 a	30.292 a	10.290 a	12.107 a	16.755 a	23.193 a	31.967 a	11.227 a	13.211 a	18.282 a	25.305a	35.262a	12 میلی‌متر
9.336 a	10.985 a	15.202 a	21.042 a	30.431 a	10.266 a	12.077 a	16.716 a	23.137 a	32.331 a	11.223 a	13.204 a	18.273 a	25.29a	32.258b	15 سانتی‌متر
8.630 b	10.153 b	14.051 b	19.449 b	27.902 b	9.030 b	10.624 b	14.703 b	20.352 b	29.465 b	9.939 b	11.695 b	16.185 b	22.402b	32.37 cd	25 سانتی‌متر
9.350 b-d	11.00 b-d	15.22 b-d	21.07 b-d	25.95 fg	10.13 c	11.92 c	16.50 c	22.83 c	28.23 f	10.40 c	12.23 c	16.93 c	23.43c	30.33f	T ₁ (1221)
8.823 de	10.38 de	14.37 de	19.89 de	24.63 g	9.320 de	10.96 de	15.18 de	21.01 de	25.90 g	9.257 e-g	10.90 e-g	15.08 e-g	20.87e-g	39.12a	T ₂ (1222)
10.47 ab	12.32 ab	17.05 ab	23.60 ab	31.43 c	11.70 a	13.76 a	19.05 a	26.36 a	34.33 a	13.45 a	15.82 a	21.89 a	30.30a	27.95g	T ₃ (1211)
8.033 de	9.450 de	13.08 de	18.10 ce	21.83 h	7.203 j	8.473 j	11.73 j	16.23 j	23.18 h	8.967 g	10.55 g	14.60 g	20.20g	39.73 a	T ₄ (1212)
10.92 a	12.84 a	17.78 a	24.60 a	33.22 ab	11.81 a	13.89 a	19.22 a	26.61 a	34.72 a	13.80 a	16.24 a	22.47 a	31.10a	39.27a	T ₅ (1121)
11.12 a	13.08 a	11.18 a	25.07 a	33.80 a	11.59 a	13.63 a	18.87 a	26.12 a	34.05 a	13.50 a	15.88 a	21.98 a	30.42a	33.48bc	T ₆ (1122)
8.190 de	9.637 de	13.33 de	18.46 de	33.18 d	9.067 ef	10.67 ef	14.76 ef	20.44 ef	30.80 c	10.09 cd	11.87 cd	16.42 cd	22.73cd	32.62cd	T ₇ (1111)
8.057 de	9.483 de	13.12 de	18.16 de	27.02 ef	8.550 hi	10.06 hi	13.92 hi	19.27 hi	28.97 ef	9.700 de	11.41 de	15.79 de	21.86de	39.72a	T ₈ (1112)
10.32 a-c	12.15 a-c	16.81 a-c	23.27 a-c	33.53 a	11.01 b	12.95 b	17.93 b	24.82 b	34.50 a	12.87 b	15.14 b	20.96 b	29.01b	31.82de	T ₉ (2221)
8.360 de	9.833 de	13.61 de	18.84 de	28.13 de	8.817 f-h	10.38 f-h	14.36 f-h	19.88 f-h	30.03 cd	9.490 ef	11.16 ef	15.45 ef	21.39ef	30.63ef	T ₁₀ (2222)
7.723 e	9.087 e	12.58 e	17.41 e	27.55 d-f	8.697 gh	10.23 gh	14.16 gh	19.60 gh	29.45 de	9.173 fg	10.79 fg	14.94 fg	20.68fg	30.02f	T ₁₁ (2211)
7.750 e	9.120 e	12.62 e	17.47 e	27.55 d-f	8.290 i	9.750 i	13.50 i	18.68 i	28.67 ef	9.027 g	10.62 g	14.70 g	20.35g	34.68 b	T ₁₂ (2212)
8.987 c-e	10.57 c-e	14.63 c-e	20.25 c-e	31.67 bc	10.11 c	11.89 c	16.46 c	22.78 c	34.08 a	10.32 c	12.14 c	16.80 c	23.25c	34.18b	T ₁₃ (2121)
8.777 de	10.32 de	14.28 de	19.78 de	31.40 c	9.540 d	11.22 d	15.53 a	21.50 d	34.22 a	10.19 c	11.99 c	16.60 c	22.97c	32.38cd	T ₁₄ (2122)
8.730 de	10.27 de	14.21 de	19.67 d-e	30.92 c	9.610 d	11.31 d	15.65 d	21.66 d	32.53 b	9.690 de	11.40 de	15.78 de	21.84de	31.88de	T ₁₅ (2111)
8.117 de	9.547 de	13.21 de	18.29 de	28.85 d	8.933 fg	10.51 fg	14.55 fg	20.13 fg	30.70 c	9.387 eg	11.04 e-g	15.29 e-g	21.15e-g	32.258b	T ₁₆ (2112)

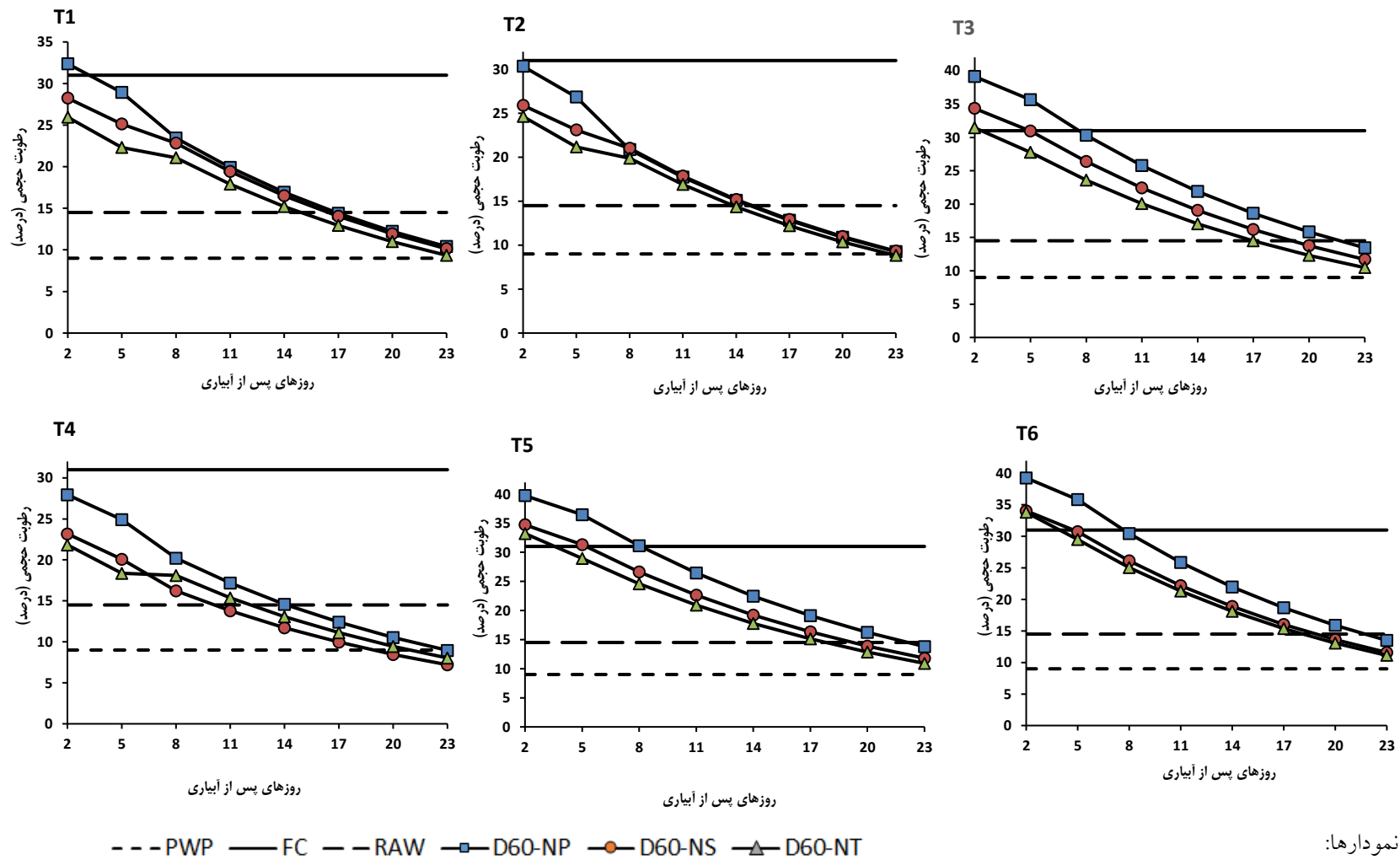
* اعداد داخل پرانتز به ترتیب از چپ به راست نشانگر سطوح مربوط به فاکتورهای A, B, C و D می‌باشند. به طور مثال، (۱۲۲۱) T₁ یعنی تیماری که در آن عمق کانال ۴۰ سانتی‌متر، قطر لوله ۱۶۰ میلی‌متر، قطر سوراخ روی لوله ۱۲ میلی‌متر و فاصله سوراخ‌ها از یکدیگر، ۱۵ سانتی‌متر است

در هر عامل تغییر (فاکتور)، میانگین‌های دارای حروف مشترک در یک ستون، با یکدیگر اختلاف معنی‌داری در سطح پنج درصد ندارند

با توجه به بالا رفتن حجم جداول، تنها نتایج مربوط به روزهای ۲، ۸، ۱۴، ۲۰ و ۲۳ ارائه شده است.

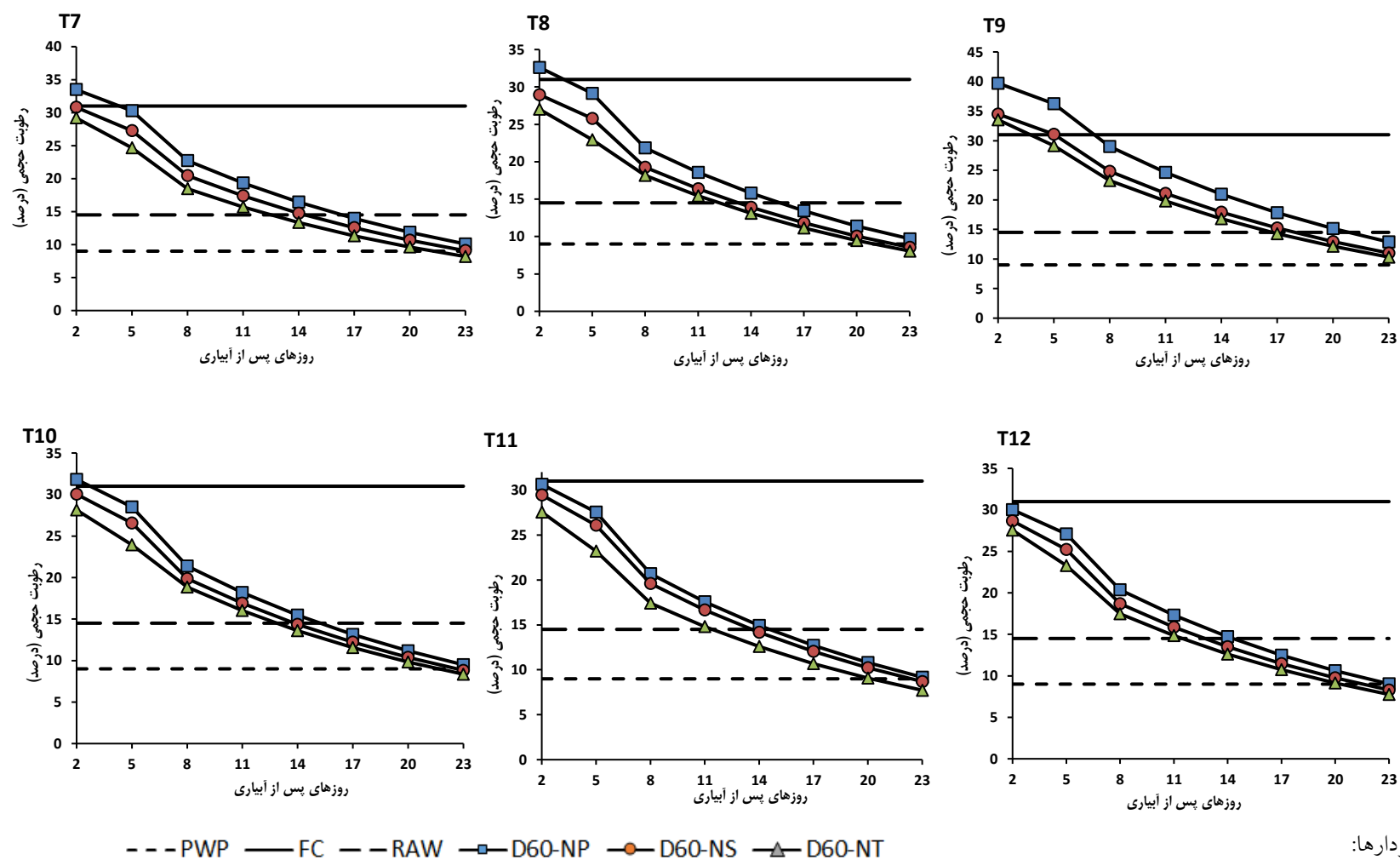
برای تعیین دور آبیاری بهینه، در نمودارهای ارایه شده در شکل ۴، میانگین رطوبت خاک در عمق حداکثر تراکم ریشه (۶۰ سانتی متر)، نسبت به روزهای پس از آبیاری تا رسیدن به آبیاری بعدی برای همه تیمارها ترسیم شده است. علاوه بر آن، در این نمودارها خطوط مربوط به میزان رطوبت خاک در سه حد رطوبتی ظرفیت زراعی (FC)، رطوبت سهل الوصول (RAW) و نقطه پژمردگی دائم (PWP) با استفاده از اطلاعات جدول ۲ ترسیم شده تا بدین وسیله زمان رسیدن رطوبت خاک به دو نقطه رطوبتی مهم RAW و PWP در فاصله بین دو آبیاری، حاصل شود. در واقع، با استفاده از این اطلاعات می توان پس از شناسایی بهترین تیمار آبیاری، دور آبیاری مناسب را در این سیستم به دست آورد اما پیش از آن، توجه به چند نکته مهم در نمودارهای مزبور حائز اهمیت است. نخست اینکه در تمام تیمارها رطوبت خاک در کنار لوله (NP) بیشتر از سایر نقاط است. همچنین، رطوبت خاک در کنار پشته (NB) از کنار درخت (NT) بیشتر است که با توجه به وضعیت سوراخ های روی لوله ها، این موضوع طبیعی به نظر می رسد چراکه سوراخ های جانبی روی لوله ها به سمت پشته و محل حفر چال کود است. با این وجود در اغلب موارد، بین این دو نقطه، تفاوت چندانی وجود ندارد. نکته دوم اینکه در اغلب تیمارها رطوبت حجمی خاک در عمق حداکثر

توسعه ریشه (۶۰ سانتی متر) پس از ۲۳ روز به کمتر از حد PWP نرسیده و فقط رطوبت خاک در تیمارهای T_{11} و T_{12} از روز بیستم به بعد به حد پایین تر از PWP رسیده است. نکته سوم اینکه فقط در تیمارهای T_3 ، T_5 ، T_6 و تا حدودی T_9 ، رطوبت کنار لوله پس از ۲۳ روز به پایین تر از حد رطوبت سهل الوصول نرسیده است. به غیر از تیمارهای اخیر، در مابقی تیمارها با گذشت حدود ۱۴ یا ۱۵ روز پس از آبیاری، درصد رطوبت خاک به مقدار RAW رسیده است. به عبارت دیگر، درختان پسته موجود در باغ مورد مطالعه تا ۱۴ یا ۱۵ روز پس از آبیاری، بدون صرف انرژی از آب سهل الوصول استفاده کرده اند؛ از روز ۱۶ تا ۲۳، گیاه با صرف انرژی آب مورد نیاز خود را تأمین کرده است و در روز ۲۳ مقدار رطوبت خاک در تیمارهای گفته شده به نقطه پژمردگی دائم رسیده و گیاه را با تنش خشکی (به ویژه در موقعیت کنار درخت) مواجه نموده است. نکته چهارم اینکه در تمام نمودارهای ترسیم شده مشاهده می شود که هر چه به انتهای دوره زمانی حداثت دو آبیاری متوالی نزدیک می شویم، مقدار رطوبت خاک در کنار لوله آبد، کنار پشته و کنار ردیف درختان، به هم نزدیک تر می شوند. به دیگر سخن، دامنه نوسانات رطوبتی موجود در فاصله بین سه نقطه نمونه برداری انجام شده (کنار لوله آبد، کنار پشته و کنار درخت) کاهش می یابد.



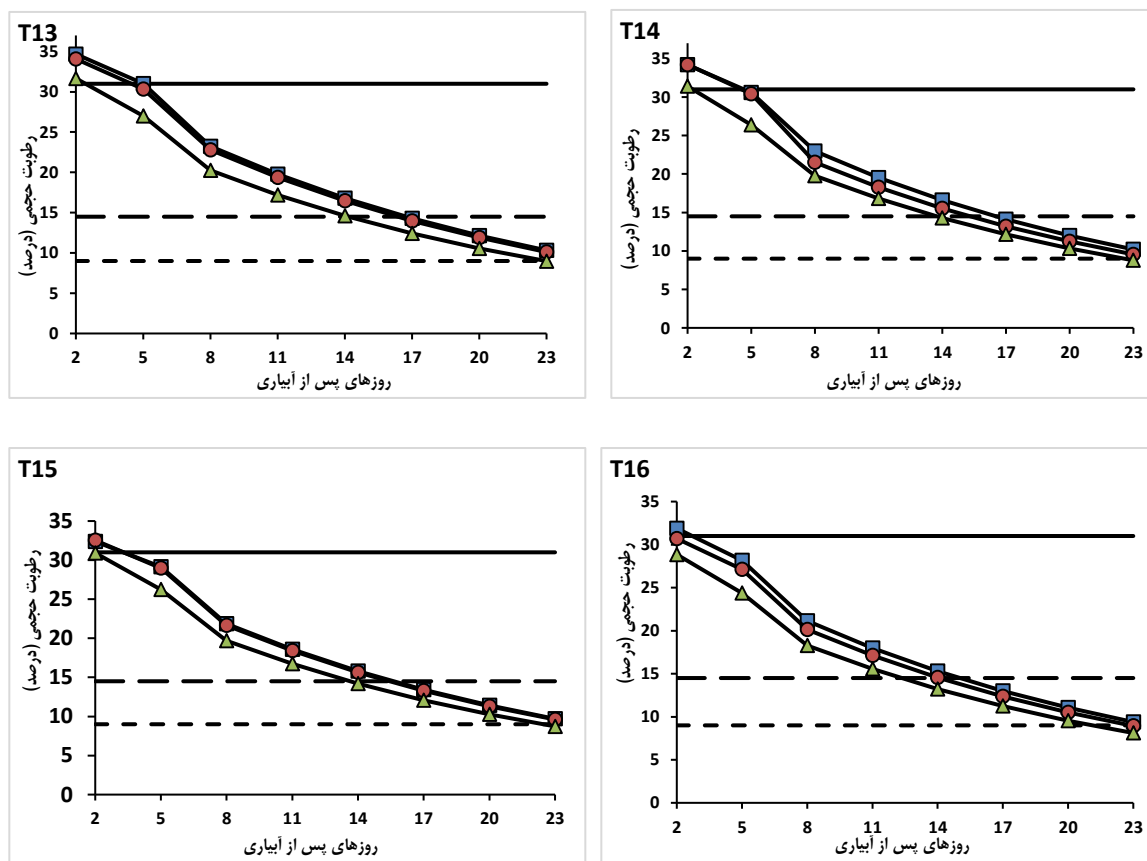
راهنمای نمودارها:

شکل ۴- تغییرات درصد رطوبت در فاصله بین دو آبیاری متوالی برای تیمارهای مختلف



راهنمای نمودارها:

شکل ۴- (ادامه)



راهنمای نمودارها:

--- PWP — FC --- RAW —■— D60-NP —●— D60-NS —▲— D60-NT

شکل ۴- (ادامه)

در عمق ۶۰ سانتی‌متر، به ترتیب بعد از ۲۲/۵، ۲۳، ۲۲/۵ و ۲۲ روز پس از آبیاری به حد رطوبت RAW رسید. نتایج همچنین نشان داد که میانگین تعداد روز لازم برای رسیدن رطوبت خاک عمق ۶۰ سانتی‌متری همه تیمارها در سه محل کنار لوله، کنار پشته و کنار درخت، به ترتیب ۱۷/۱، ۱۵/۸ و ۱۴/۳ روز بود؛ ضمن اینکه این میانگین برای کل ناحیه ریشه درختان در همه تیمارها، ۱۵/۷ روز به دست آمد.

خلاصه اطلاعات موجود در شکل ۴ در جدول ۵ ارائه شده است. در این جدول، تعداد روزهای لازم برای رسیدن رطوبت خاک عمق ۶۰ سانتی‌متری در سه نقطه کنار لوله (NP)، کنار پشته (NB) و کنار درخت (NT) به حد رطوبت سهل‌الوصول (RAW) مشخص شده است. بر اساس نتایج جدول ۵، تیمارهای T_3 ، T_5 ، T_6 و T_9 بهترین وضعیت رطوبتی را داشتند و در این تیمارها رطوبت خاک کنار لوله

جدول ۵- زمان رسیدن رطوبت خاک عمق ۶۰ سانتی متری به حد رطوبت سهل الوصول در تیمارهای مختلف

تیمار آبیاری	کد تیمار	زمان رسیدن رطوبت خاک به حد رطوبت سهل الوصول (روز)				میانگین هر تیمار (روز)
		کنار لوله (NP)	کنار پشته (NB)	کنار درخت (NT)	کل ناحیه ریشه درختان در عمق 60 سانتی متر	
T ₁	1221	17	17	16	16.7	
T ₂	1222	14	14	14	14	
T ₃	1211	22.5	20	17	19.8	
T ₄	1212	14	12	11	12.3	
T ₅	1121	23	20	19	20.7	
T ₆	1122	22.5	18.5	18.5	19.8	
T ₇	1111	17	14	12.5	14.5	
T ₈	1112	15.5	14	12.5	14	
T ₉	2221	22	18	17	19	
T ₁₀	2222	14	14	13	13.7	
T ₁₁	2211	14	14	12	13.3	
T ₁₂	2212	14	13	12	13	
T ₁₃	2121	17	17	14.5	16.2	
T ₁₄	2122	17	15.5	14	15.5	
T ₁₅	2111	16	16	14	15.3	
T ₁₆	2112	15	15	12.5	14.2	
میانگین		17.1	15.8	14.3	15.7	

* اعداد داخل پرانتز به ترتیب از چپ به راست نشانگر سطوح مربوط به فاکتورهای A, B, C و D می باشند. به طور مثال، (۱۲۲۱) T_۱ یعنی تیماری که در آن عمق کانال ۴۰ سانتی متر، قطر لوله ۱۶۰ میلی متر، قطر سوراخ روی لوله ۱۲ میلی متر و فاصله سوراخها از یکدیگر، ۱۵ سانتی متر است

برای تعیین دور آبیاری مناسب، باید تنها تیمارهایی در نظر گرفته شوند که از نظر ترکیب فاکتورهای طراحی، بهترین شرایط را داشته باشند. بنابراین، در جدول ۶ فقط چهار تیمار برتر انتخاب شده و میانگین های مورد نظر آنها محاسبه شده است. با توجه به اطلاعات این جدول و در صورتی که رطوبت کل ناحیه حداکثر تراکم ریشه، ملاک کار قرار گیرد، دور آبیاری مناسب در این روش حدود ۲۰ روز خواهد بود؛ اما در حالتی که فقط رطوبت عمق حداکثر تراکم ریشه در وسط سایه انداز (کنار لوله) ملاک قرار گیرد، دور آبیاری بهینه ۲۲/۵ روز خواهد بود که با دور آبیاری انتخاب شده در این پژوهش (۲۴ روز) تطابق خوبی دارد و در بین تیمارهای برتر نیز تیمار T_۵ بهترین وضعیت را دارا است.

در صورتی که هدف این باشد که کل آب قابل استفاده خاک استفاده شود، رطوبت خاک بین دو آبیاری متوالی می تواند تا حد PWP نیز برسد. در این صورت، تعداد روزهای لازم برای رسیدن رطوبت خاک به حد PWP مطابق جدول ۷ خواهد بود. بر اساس اطلاعات جدول اخیر، همان طور که پیش از این نیز ذکر شد، تنها رطوبت خاک کنار درخت در تیمارهای T_{۱۱} و T_{۱۲} از روز بیستم به بعد به حد پایین تر از PWP رسیده است و در بقیه تیمارها، در صورت استفاده از کل آب قابل استفاده، دور آبیاری ۲۴ روز مناسب است.

در جدول ۸ نتایج مقایسه میانگین را برای عملکرد خشک و راندمان مصرف آب درختان پسته، با (WUP1) و بدون (WUP2) احتساب نیاز آبتیابی نشان داده شده است.

جدول ۶- زمان رسیدن رطوبت خاک عمق ۶۰ سانتی‌متری به حد رطوبت سه‌ل‌الوصول در تیمارهای برتر

تیمار آبیاری	زمان رسیدن رطوبت خاک به حد رطوبت سه‌ل‌الوصول (روز)				میانگین هر تیمار (روز)
	کنار لوله (NP)	کنار پشته (NB)	کنار درخت (NT)	کل ناحیه ریشه درختان در عمق ۶۰ سانتی‌متر	
T ₃ (1211)*	22.5	20	17	19.8	
T ₅ (1121)	23	20	19	20.7	
T ₆ (1122)	22.5	18.5	18.5	19.8	
T ₉ (2221)	22	18	17	19	
میانگین	22.5	19.1	17.9	19.8	

* اعداد داخل پرانتز به ترتیب از چپ به راست نشانگر سطوح مربوط به فاکتورهای A، B، C و D است. به طور مثال، T₁ (۱۲۲۱) یعنی تیماری که در آن عمق کانال ۴۰ سانتی‌متر، قطر لوله ۱۶۰ میلی‌متر، قطر سوراخ روی لوله ۱۲ میلی‌متر و فاصله سوراخ‌ها از یکدیگر، ۱۵ سانتی‌متر است

جدول ۷- زمان رسیدن رطوبت خاک عمق ۶۰ سانتی‌متر به حد رطوبت نقطه پژمردگی دائم در تیمارهای مختلف

تیمار آبیاری	کد تیمار	زمان رسیدن رطوبت خاک به حد رطوبت نقطه پژمردگی دائم (روز)				میانگین هر تیمار (روز)
		کنار لوله (NP)	کنار پشته (NB)	کنار درخت (NT)	کل ناحیه ریشه درختان در عمق ۶۰ سانتی‌متر	
T ₁	1221	> 23	> 23	23	> 23	
T ₂	1222	23	23	23	23	
T ₃	1211	> 23	> 23	> 23	> 23	
T ₄	1212	23	> 23	23	23	
T ₅	1121	> 23	> 23	> 23	> 23	
T ₆	1122	> 23	> 23	> 23	> 23	
T ₇	1111	> 23	23	23	> 23	
T ₈	1112	> 23	23	23	> 23	
T ₉	2221	> 23	> 23	> 23	> 23	
T ₁₀	2222	23	23	23	23	
T ₁₁	2211	23	23	20	23	
T ₁₂	2212	23	22	20	23	
T ₁₃	2121	> 23	23	23	> 23	
T ₁₄	2122	> 23	23	23	> 23	
T ₁₅	2111	23	23	23	23	
T ₁₆	2112	23	23	23	23	
میانگین		> 23	> 23	حدود 23	> 23	

* اعداد داخل پرانتز به ترتیب از چپ به راست نشانگر سطوح مربوط به فاکتورهای A، B، C و D است. به طور مثال، T₁ (۱۲۲۱) یعنی تیماری که در آن عمق کانال ۴۰ سانتی‌متر، قطر لوله ۱۶۰ میلی‌متر، قطر سوراخ روی لوله ۱۲ میلی‌متر و فاصله سوراخ‌ها از یکدیگر، ۱۵ سانتی‌متر است

جدول ۸- نتایج مقایسه میانگین عملکرد خشک پسته و راندمان مصرف آب در درختان پسته، با (WUP1) و بدون (WUP2) احتساب نیاز

آبشویی				
عامل تغییر (فاکتور)	سطح عامل (تیمار)	محصول خشک (kg.tree)	بهره‌وری آب WUP ₁ (gr.m ³)	بهره‌وری آب WUP ₂ (gr.m ³)
سال (Y)	1398	9.7 b	937.3 b	585.8 b
	1400	10.1 a	1196.1 a	747.6 a
عمق کانال (A)	40 cm	9.8 a	1167.1 a	729.4 a
	60 cm	8.1 b	966.3 b	603.9 b
قطر لوله (B)	110 mm	8.7 b	1041.2 b	650.7 b
	160 mm	9.2 a	1092.2 a	682.6 a
قطر سوراخ (C)	9 mm	8.5 b	1010.9 b	631.8 b
	12 mm	9.4 a	1122.5 a	701.6 a
فاصله سوراخ (D)	15 cm	9.2 a	1098.6 a	686.6 a
	25 cm	8.7 b	1034.8 b	646.7 b
اثر متقابل فاکتورها (A×B×C×D)	T ₁	10.3 bc	1222.7 bc	764.2 bc
	T ₂	9.9 c	1172.2 c	732.6 c
	T ₃	10.5 ab	1253.4 ab	783.4 ab
	T ₄	9.2 d	1097.8 d	686.1 d
	T ₅	11.1 a	1325.5 a	828.4 a
	T ₆	10.8 ab	1280.3 ab	800.2 ab
	T ₇	8.4 e	1002.1 ef	626.3 ef
	T ₈	8.3 e	982.9 ef	614.3 ef
	T ₉	8.4 e	994.6 ef	621.6 ef
	T ₁₀	8.7 e	1033.6 e	646.0 e
	T ₁₁	9.1 d	1086.7 d	679.2 d
	T ₁₂	7.4 gf	876.6 h	547.9 h
	T ₁₃	8.6 e	1019.1 e	636.9 e
	T ₁₄	7.8 f	932.2 f	582.6 f
	T ₁₅	7.4 g	884.6 g	552.9 g
	T ₁₆	7.6 g	902.7 g	564.2 g
LSD	-	0.511	60.71	37.94

(میزان آب مصرفی برای تمام تیمارها ۵۰۰۰ مترمکعب در طول فصل رشد بوده است)

تجزیه و تحلیل نشان می‌دهد که میانگین وزن خشک هر درخت در طول زمان به دنبال اجرای روش آبیاری به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است. به‌طور مشخص، در سال دوم، محصول خشک به ازای هر درخت به‌طور متوسط ۲/۲ کیلوگرم نسبت به سال اول افزایش یافته است. بر این اساس عمق کانال ۴۰ سانتی‌متر با میانگین محصول خشک ۹/۸ کیلوگرم بر درخت وضعیت بهتری نسبت به عمق کانال ۶۰

سانتی‌متر با میانگین محصول خشک ۸/۱ کیلوگرم بر درخت داشت. قطر لوله ۱۶۰ میلی‌متر نیز با میانگین محصول خشک ۹/۲ کیلوگرم بر درخت، وضعیت بهتری نسبت به قطر ۱۱۰ میلی‌متر با محصول خشک ۸/۷ کیلوگرم بر درخت داشت. همچنین، قطر سوراخ ۱۲ میلی‌متر با میانگین محصول خشک ۹/۴ کیلوگرم بر درخت وضعیت بهتری نسبت به قطر سوراخ ۸ میلی‌متر با محصول خشک ۸/۵ کیلوگرم بر درخت داشت.

در ضمن فاصله سوراخ ۱۵ سانتی‌متر با میانگین محصول خشک ۹/۲ کیلوگرم بر درخت وضعیت بهتری نسبت به فاصله سوراخ ۲۵ سانتی‌متر با محصول خشک ۸/۷ کیلوگرم بر درخت داشت. در بین تیمارهای اثر متقابل نیز تیمارهای T5 و T15 به ترتیب با میانگین محصول خشک ۱۱/۱ و ۷/۴ کیلوگرم بر درخت، بهترین و بدترین تیمارها بودند.

یافته‌ها همچنین نشان می‌دهند که هر کدام از فاکتورهای طراحی این روش آبیاری به‌تنهایی و نیز اثرات متقابل آن‌ها به‌طور قابل‌توجهی بر راندمان مصرف آب در سطح یک درصد تأثیر گذاشت. به‌طور خاص، عمق قرارگیری لوله ۴۰ سانتی‌متر، قطر لوله ۱۶۰ میلی‌متر، قطر سوراخ ۱۲ میلی‌متر و فاصله سوراخ‌ها ۱۵ سانتی‌متر منجر به افزایش مثبت و قابل‌توجهی در راندمان مصرف آب در مقایسه با سایر تیمارها شد. در میان تیمارهای متقابل، T5 با میانگین ۱۳۲۵/۵ گرم در مترمکعب و ۸۲۸/۴ گرم در مترمکعب به ترتیب برای WUP1 و WUP2، بالاترین راندمان مصرف آب را نشان داد. در مقابل، T12 با میانگین ۸۷۶/۶ گرم در مترمکعب برای WUP1 و ۵۴۷/۹ گرم در مترمکعب برای WUP2، کمترین راندمان را دارد.

بحث

پسته مقاوم به خشکی بوده و قادر است با مقادیر کم آب نیز محصول متوسطی داشته باشد. انتخاب دور آبیاری درختان پسته به عواملی نظیر بافت خاک، میزان تبخیر و تعرق، شوری آب و خاک، روش آبیاری، سن درخت و میزان آب در دسترس بستگی دارد. آبیاری در زمان گلدهی (عموماً فروردین و اردیبهشت) و زمان پر شدن مغز (تیر و مرداد) از مهم‌ترین مراحل حساس پسته به آب بوده و کمبود آب در این مراحل از تشکیل مغز و رسیدن میوه جلوگیری می‌کند. عمق آب آبیاری کمتر از حد موردنیاز باعث ایجاد تنش خشکی در درختان پسته شده و تنش خشکی موجب

خشکیدگی سرشاخه، ریزش و خشکیدگی برگ‌ها و نهایتاً خشک شدن درخت می‌شود (استجوتو و همکاران، ۲۰۱۲). نتایج پژوهش حاضر نشان داد که هر یک از پارامترهای طراحی روش آبیاری زیرسطحی کم‌فشار با لوله‌های پی‌وی‌سی سوراخ‌دار به‌تنهایی و نیز اثرات متقابل آن‌ها بر چگونگی توزیع رطوبت در ناحیه ریشه درختان پسته، معنی‌دار بود. در بحث اثر هر یک از فاکتورها به‌تنهایی، در اغلب موارد عمق کانال برابر با ۴۰ سانتی‌متر، قطر لوله برابر با ۱۱۰ میلی‌متر، قطر سوراخ روی لوله برابر با ۱۲ میلی‌متر و فاصله سوراخ روی لوله برابر با ۱۵ سانتی‌متر، به‌عنوان فاکتورهای برتر شناخته شدند. در خصوص قطر لوله، اگرچه در برخی از موارد برتری نسبی با قطر ۱۶۰ میلی‌متر بود؛ ولی این اختلاف در بسیاری از موارد، به‌ویژه در هنگام ترکیب فاکتورها با یکدیگر، معنی‌دار نبود. بنابراین با در نظر گرفتن جنبه‌های اقتصادی اجرای این روش آبیاری و قیمت پایین‌تر لوله‌های با اندازه کوچک‌تر، قطر لوله ۱۱۰ میلی‌متر نیز می‌تواند جایگزین قطر لوله ۱۶۰ میلی‌متر گردد. در رابطه با اثرات متقابل فاکتورهای طراحی، به‌ترتیب چهار تیمار T5، T6، T7 و T8 بهترین و ضعیف‌ترین را در عملکرد محصول و نیز بهره‌وری آب داشتند.

در بررسی حاضر، در ناحیه حداکثر تراکم ریشه درختان پسته (۴۰ تا ۸۰ سانتی‌متر) در فاصله بین دو آبیاری متوالی (دو و ۲۳ روز پس از آبیاری)، به‌ترتیب ۱۲ و ۶/۲ درصد افزایش رطوبت خاک ناشی از انتخاب مناسب فاکتورهای طراحی مشاهده شد. در ضمن، با انتخاب مناسب فاکتورهای طراحی این روش آبیاری، پسته به‌اینکه بخواهیم رطوبت خاک در پایان دور آبیاری به مقادیر RAW یا PWP برسد، می‌توان دور آبیاری را به‌ترتیب دو تا هشت روز افزایش داد. به دیگر سخن، دور آبیاری مناسب درختان پسته در این روش آبیاری و با توجه به ویژگی‌های خاک باغ مورد استفاده در پژوهش حاضر، برحسب در نظر گرفتن تخلیه

خرده مالکی و امکان استفاده از آن در شرایط آب و خاک شور، می تواند بخش زیادی از مشکلات پسته کاران را در زمینه مقابله با خشک سالی و استفاده از آب های شور، مرتفع کند. با افزایش دور آبیاری در این روش میزان مصرف آب تغییری نمی کند و نتایج این مطالعه نشان داد که باعث بهبود بهره وری آب و عملکرد خشک محصول نیز می شود. این سیستم توسط موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی مورد تأیید قرار گرفته است و به همین واسطه مانند سایر روش های آبیاری نوین مشمول وام های حمایتی قرار می گیرد. در مجموع، دور آبیاری مناسب درختان پسته در این سیستم آبیاری و با توجه به مشخصات خاک باغ مورد نظر و با مدنظر قرار دادن تخلیه مجاز رطوبتی تا آب سهل الوصول یا نقطه پژمردگی دائم، به ترتیب، ۲۰ و ۲۴ روز تعیین گردید.

تعارض منافع

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

مجاز رطوبتی تا RAW یا PWP، به ترتیب، ۲۰ و ۲۴ روز تعیین گردید.

در هر حال، باید توجه داشت که اعداد و ارقام به دست آمده در این پژوهش برای فاکتورهای طراحی روش آبیاری مزبور، اعداد مطلق و ثابتی نبوده و لازم است با در نظر گرفتن نتایج این پژوهش، برای هر باغ با توجه به بافت خاک، طول و فاصله ردیف درختان، دبی آب آبیاری، شیب زمین و غیره، این پارامترها بهینه سازی شود.

نتیجه گیری

نتایج حاصل نشانگر آن هستند که روش آبیاری زیرسطحی با لوله های پی وی سی سوراخ دار می تواند به عنوان یک روش آبیاری مناسب برای درختان پسته محسوب شود؛ چرا که با انتخاب مناسب فاکتورهای طراحی روش آبیاری، می توان دور آبیاری را دو تا هشت روز افزایش داد بدون اینکه این افزایش دور آبیاری به کیفیت دسترسی درخت به آب تأثیر منفی ایجاد کند لذا، علاوه بر کاهش مصرف آب، به دلیل تطابق خوب آن با شرایط

فهرست منابع

۱. اسماعیل پور، علی، امامی، سید یحیی، بصیرت، مهدی، تاج آبادی پور، علی، جوانشاه، امان الله، حکم آبادی، حسین، حسینی فرد، سید جواد، حق دل، معصومه، شاکر اردکانی، احمد، صداقت، رضا، صداقتی، ناصر، محمدی، امیر حسین، مهرنژاد، محمدرضا و هاشمی راد، حمید، ۱۳۹۶. پسته از تولید تا مصرف. انتشارات تحقیقات آموزش کشاورزی، ۱۳۰ صفحه.
۲. تافته، آرش و امداد، محمدرضا، ۱۴۰۳. استفاده از مدل Hydrus 2D در ارائه برنامه مناسب آبیاری باغات و شبیه سازی شوری خاک (مطالعه موردی باغات پسته سمنان). نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب / ایران، ۱۵(۱)، صص. ۳۷-۵۵.
۳. صداقتی، ناصر، تاج آبادی پور، علی، و حیدری نژاد، علی، ۱۳۸۸. مقایسه عملکرد سیستم های آبیاری قطره ای سطحی و زیرسطحی بر روی درختان پسته. گزارش نهایی طرح پژوهشی، مؤسسه تحقیقات پسته کشور. ۵۱ صفحه.
۴. صداقتی، ناصر، حسینی فرد، سید جواد و عبدالحی عزت آبادی، محمد، ۱۳۹۳. بررسی امکان تغییر سیستم آبیاری سطحی غرقابی و زیرسطحی با لوله های PVC در باغ های پسته. گزارش نهایی پروژه تحقیقاتی پژوهشکده پسته رفسنجان، ۲۶ صفحه.

۵. عباسی، فریبرز، عباسی، نادر، توکلی، علیرضا، ۱۳۹۶. بهره‌وری آب در بخش کشاورزی؛ چالش‌ها و چشم اندازها. فصلنامه آب و توسعه پایدار، ۴(۱)، صص. ۱۴۱-۱۴۴. doi: 10.22067.jwsd.v4i1.67121
۶. عطایی، علی، اکبری، مهدی، نیشابوری، محمدرضا، غفاری، زهرا و زارع حق، داوود، ۱۳۹۸. اثر آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی با آب شور و غیرشور بر تغییرات جریان شیره آوندی، هدایت روزنه‌ای و دمای برگ درختان پسته. پژوهش آب در کشاورزی، ۳۳(۴)، صص. ۵۸۳-۵۹۹. doi: 10.22092.jwra.2020.121240
۷. محمدی محمدآبادی، اکبر، ۱۳۸۴. بررسی امکان تغییر سیستم آبیاری از روش سطحی به زیرزمینی و تعیین تأثیر تغییر سیستم بر روی میزان زودخندانی در درختان بارور پسته. گزارش نهایی طرح تحقیقاتی، مؤسسه تحقیقات پسته کشور، ۳۱ صفحه.
۸. محمدی محمدآبادی، اکبر، ۱۳۸۶. مطالعه سیستم‌های آبیاری (سطحی، تراوا، کوزه‌ای، تی تیپ، قطره‌ای و بابلر) از زمان کاشت بر روی پسته. گزارش نهایی طرح تحقیقاتی، مؤسسه تحقیقات پسته کشور، ۴۰ صفحه.
۹. حسینی فرد، سید جواد، بصیرت، مهدی، صداقتی، ناصر و اخیانی احمد، ۱۳۹۶. دستورالعمل مدیریت تلفیقی حاصلخیزی خاک و تغذیه درختان پسته، مؤسسه تحقیقات علوم باغبانی، پژوهشگاه پسته.
۱۰. حکم آبادی، حسین، اسماعیل پور، علی، امامی، سید یحیی و همکاران، ۱۴۰۰. پسته ایران. انتشارات آموزش و ترویج کشاورزی.
۱۱. نیری‌زی، سعید، ۱۳۷۷. نگرشی بر استفاده از آب‌های شور و لب‌شور در کشت آبی. مجموعه مقالات نهمین همایش کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران.
12. Alison, L.E. and Modie, C.D., 1965. Carbonate. pp. 1379-1396. In: C.A. Black et al. (Eds.) Methods of Soil Analysis. Part II, ASA and SSSA, Madison, WI.
Doi: 10.2134.agronmonogr9.2.c40
13. Blake, G.R., 1965. Bulk density. In: C.A. Black et al. (Eds.) Methods of Soil Analysis. Part I, ASA and SSSA, Madison, WI.
14. Bouyoucos, G.J., 1951. A recalibration of hydrometer method for making mechanical analysis of soil. *Agronomy Journal*, 43: 434-438.
15. Estefan, G., Sommer, R. and Ryan, J., 2013. Methods of Soil, Plant, and Water Analysis: A manual for the West Asia and North Africa Region. ICARDA (International Center for Agricultural Research in the Dry Areas) Box 114.5055, Beirut, Lebanon, 244 p.
<https://hdl.handle.net/20.500.11766.7512>
16. Goldhamer, D.A., 2005. Tree water requirements and regulated deficit irrigation. In: Ferguson, L. (Ed.), Pistachio Production Manual. 4th Edition, University of California, Oakland, California, pp. 147-157.
17. Lamm, F.R., 2003. Advantages and disadvantages of subsurface drip irrigation. www.Oznet.Ksu.Edu.sdi.Reports.2000.
18. Lanyon, L.E. and Heald, W.R., 1982. Magnesium, calcium, strontium and barium. In: Page et al. (Eds.) Methods of Soil Analysis. Part II, Agron. Monogr., ASA and SSSA, Madison, WI, pp. 247-260.
19. Olsen, S.R., Cole, C.V., Watanabe, F.S. and Dean, L.A., 1954. Estimation of available phosphorous in soil by extraction with sodium bicarbonate. USDA Cir. 939, U.S. Govern. Prin. Office, Washington, D. C., USA.
20. Richards, L.A., 1954. Diagnosis and improvement of saline-alkali soils. USDA Hand book, No. 60, Washington, DC, USA.

21. Rhoades, J.D.,1996. Salinity: electrical conductivity and total dissolved soils. In: D.L. Sparks (ed.), *Methods of Soils Analysis, Part 3: Chemical methods*. SSSA Book series Number 5, Soil Science Society of America, Madison, WI, pp. 417-435.
22. Sepaskhah, A.R. and Maftoun, M.,1988. Relative salt tolerance of pistachio cultivars. *Journal of Horticultural Science*, 63,pp 157-162. doi:10.1080.14620316.1988.11515841.
23. Krishnaprabu, S.,2020. Comparative study of subsurface drip irrigation and flood irrigation systems for quality and yield of sugarcane. *Plant Archives*, 20 (1), pp 2169-2176.
24. Qadir, M., Quill  rou, E., Nangia, V., Murtaza, G., Singh, M., Thomas, R.J. and Drechsel, P.,2014. Economics of salt-induced land degradation and restoration. *Natural Resources Forum*, 38(4), pp 282-295. doi:10.1111.1477-8947.12054
25. Thompson, T.L., PANG, H.C. and LI, Y.Y.,2009. The potential contribution of subsurface drip irrigation to water-saving agriculture in the western USA. *Agricultural Sciences in China*, 8(7), pp 850-854. doi:10.1016.S1671-2927(08)60287-4
26. Dastorani, M.T., Heshmati, M. and Sadeghzadeh, M.A., 2010. Evaluation of the efficiency of surface and subsurface irrigation in dryland environments. *Irrigation and Drainage: The Journal of the International Commission on Irrigation and Drainage*, 59(2), pp 129-137. doi:10.1002.ird.462
27. Thamer, T.Y., Nassif, N. and Almaeini, A.H.,2021. The productivity of maize (*Zea mays* L.) water using efficacy and consumptive use under different irrigation systems. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 9(1), pp 90-103.
28.   olak, Y.B., Yazar, A., G  nen, E. and Ero  lu, E.  .,2018. Yield and quality response of surface and subsurface drip - irrigated eggplant and comparison of net returns. *Agricultural. Water Management*, 206, pp 165 - 175. doi:10.1016.j.agwat.2018.05.010
29. Yan, Z., Dyck, M., Huan -Jie, C., Li -Bing, S. and Hui, C.,2019. The effects of aerated irrigation on soil respiration, oxygen, and porosity. *Journal of Integrative Agriculture*, 18, pp 2–16. doi:10.1016.S2095-3119(19)62618-3
30. Sayed, T., Derbala, A., Elmetwalli, A., Hassan, S., Elglaly, A. and Fayed, M.,2023. Effect of using trailing perforated pipe on irrigation efficiency for maize production. *Al-Azhar Journal of Agricultural Engineering*, 35(5), pp 1-7. Doi: 10.21608.azeng.2023.308721
31. Piper, C.S. 2010. Soil and plant analysis: A laboratory manual of methods for the examination of soils and determination of the inorganic constituents of plants. Scientific Publishers, India.
32. Zangen, M. 1962. Titration of carbonate- bicarbonate leach solutions. *Journal of Applied Chemistry*, 12(2), pp 92-96.

برآورد تبخیر- تعرق مرجع روزانه با بهره‌گیری از راهبرد ترکیب الگوریتم بهینه‌سازی

گرادیان نزولی تصادفی با شبکه عصبی مصنوعی

داوود زارع‌حقی* , شیلا شیرازی، سعید صمدیان‌فرد و فاطمه میکائیلی

دانشیار، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

davoudhaghi@tabrizu.ac.ir

کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

shilashirazi75@gmail.com

دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

s.samadian@tabrizu.ac.ir

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

mikailifatemeh@yahoo.com

دریافت: فروردین ۱۴۰۴ و پذیرش: تیر ۱۴۰۴

چکیده

تبخیر- تعرق مرجع (ET_0) یک پارامتر مهم در بخش مدیریت آب کشاورزی است. در این بررسی، مدل‌های پرسپترون چندلایه و پرسپترون چندلایه ترکیب شده با الگوریتم گرادیان نزولی تصادفی، برای برآورد تبخیر- تعرق مرجع روزانه در ایستگاه‌های کیش، گرگان و شیراز بررسی شد. برای اعتبارسنجی مدل‌های پیشنهادی، داده‌های هواشناسی در مقیاس روزانه در مدت ۲۳ سال (۱۳۷۹-۱۴۰۲) در ایستگاه‌های یادشده مورد استفاده قرار گرفته که در پنج سناریو شامل ترکیب‌های مختلفی از پارامترهای ورودی و براساس ضریب همبستگی پیرسون به کار برده شد. همچنین، مدل‌های منفرد و ترکیبی با استفاده از معیارهایی نظیر ضریب همبستگی (R)، جذر میانگین مربعات خطا ($RMSE$)، ضریب نش- ساتکلیف (NSE) و شاخص توافق ویلموت (d) مورد ارزیابی قرار گرفت. ارزیابی نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که سناریو پنجم مدل ترکیبی با داشتن $RMSE$ برابر با ۱/۰۴، ۱/۲ و ۱/۹۴ میلی‌متر در روز به ترتیب در ایستگاه‌های شیراز، گرگان و کیش بهترین عملکرد را در برآورد تبخیر- تعرق مرجع داشته است. همچنین، تجزیه و تحلیل نتایج نشان داد که مدل ترکیبی عملکرد بهتری نسبت به مدل منفرد داشته و به عنوان مدلی قابل اعتماد شناخته شد. یافته‌های حاصل از این تحقیق می‌تواند پیامدهای مهمی برای ارزیابی مدل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی اعمال شده برای مدیریت مصرف آب کشاورزی و بهره‌گیری پایدار از منابع آبی داشته باشد.

واژه‌های کلیدی: پرسپترون چند لایه، روش‌های ترکیبی، مدل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی

* - آدرس ایمیل نویسنده مسئول: davoudhaghi@tabrizu.ac.ir



مقدمه

با توجه به این‌که بخش کشاورزی بزرگ‌ترین مصرف‌کننده منابع آب شیرین در سطح جهان است، استفاده بهینه از آب در بخش کشاورزی می‌تواند به شکل قابل-توجهی در مصرف آب صرفه‌جویی کند. برنامه‌ریزی دقیق و مدیریت شیوه‌های آبیاری موردنیاز برای دستیابی به این صرفه‌جویی مستلزم برآورد دقیق اجزای اصلی بیلان آب، به‌ویژه تبخیر- تعرق است (پیرا و همکاران ۲۰۲۰). تبخیر- تعرق مرجع (ET_0)^۱ به‌عنوان یک پارامتر اساسی در هیدرولوژی و کشاورزی عمل می‌کند و تبخیر حاصل از یک محصول مرجع آبیاری شده را تحت شرایط استاندارد خاصی نشان می‌دهد (هو و همکاران ۲۰۲۲). ET_0 تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند دما، رطوبت، سرعت باد و تابش خورشیدی است (لو و همکاران ۲۰۲۱). درک این عوامل و تأثیر آن‌ها بر تبخیر- تعرق برای بهینه‌سازی شیوه‌های کشاورزی و اطمینان از استفاده پایدار از آب ضروری است. روش‌های برآورد تبخیر- تعرق به دو دسته مستقیم و غیرمستقیم تقسیم می‌شوند (گیسن و همکاران ۲۰۲۱). در روش مستقیم، بخش کوچکی از مزرعه را جدا کرده و مقدار تبخیر- تعرق در یک دوره زمانی، مستقیماً اندازه‌گیری می‌شود. معمول‌ترین روش مستقیم، تعیین تبخیر- تعرق با استفاده از اصل بیلان جرمی در یک حجم کنترل‌شده از خاک، لایسمتر است (ما و همکاران ۲۰۲۰). در روش‌های غیرمستقیم از عوامل اقلیمی و گیاهی استفاده شده و از ارتباط آن‌ها با تبخیر- تعرق و یا از معادلاتی که از روش‌های مستقیم واسنجی شده‌اند، تبخیر- تعرق پوشش گیاهی موردنظر تخمین زده می‌شود. اندازه‌گیری تبخیر- تعرق به روش مستقیم هزینه‌بر بوده و محدود به زمان و مکان است. لذا برآورد تبخیر- تعرق به کمک متغیرهای آب و هوایی فراگیرتر از اندازه‌گیری مستقیم آن هست. مرسوم‌ترین روش، معادله فائو- پنمن- مانیت^۲ بوده که به‌عنوان یک روش مرجع استاندارد برای محاسبه ET_0 شناخته شده است (کای و همکاران ۲۰۰۷). با این وجود،

این مدل و به‌طور کلی روش‌های ارزیابی مبتنی بر تعادل آب، به داده‌های دقیق و بلندمدت هواشناسی نیاز دارند که همیشه و در همه‌جا در دسترس نیستند. لذا استفاده از مدلی که بتواند با دقت بالایی پارامتر ET_0 را برآورد کند، بیش از پیش مهم خواهد بود.

حامی کوچه‌باغی و همکاران (۲۰۱۷) در تحقیقی به محاسبه تبخیر- تعرق مرجع بر اساس تحلیل آماری دمای هوا در ایستگاه تبریز با استفاده از معادلات پنمن- مانیت و هارگریز پرداختند. نتایج روش‌ها با داده‌های تبخیر به‌دست‌آمده از تشت مقایسه شده و ضریب تشت برای هر روش و مقادیر ضریب تشت ۰/۶۳ و ۱/۲۲ برای روش‌های پنمن- مانیت و هارگریز تعیین شد.

شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN)^۳ و روش‌های یادگیری ماشینی^۴ برای مدل‌سازی فرآیندهای غیرخطی، مانند ET مناسب هستند. طبری و طلایی (۲۰۱۳) در پژوهشی شبکه‌های پرسپترون چندلایه (MLP) بهینه‌سازی شده با الگوریتم‌های یادگیری و توابع فعال‌سازی مختلف را برای تخمین ET_0 در ایستگاه نوژه مورد استفاده قرار دادند. ارزیابی نتایج این تحقیق نشان داد که مدل شبکه عصبی مصنوعی با داشتن ضریب همبستگی ۰/۹۹ به تخمین ET_0 در منطقه مورد مطالعه پرداخت.

آنتونوپولوس و آنتونوپولوس (۲۰۱۷) شبکه‌های عصبی مصنوعی را با مجموعه داده‌های یک ایستگاه هواشناسی (Amyntaio) طی دوره ۲۰۰۹-۲۰۱۳ برای تخمین ET_0 آموزش دادند و بهترین نتایج را با ضریب تبیین در حدود ۹۷/۲٪ به‌دست آوردند.

میکائیلی و صمدیان فرد (۱۴۰۲) کاربرد مدل‌های درختی و مبتنی بر کرنل را در تعیین تبخیر- تعرق مرجع روزانه در دو منطقه مرطوب و خشک ایران مورد بررسی قرار داده و چنین گزارش کردند که مدل‌های رگرسیون بردار پشتیبان و مدل درختی M5P قابلیت مناسبی در مقایسه با برخی از معادلات تجربی در تعیین ET_0 دارا هست.

^۳ -Artificial neural network

^۴ -Machine learning

^۱ -Reference evapotranspiration

^۲ -FAO- Penman- Monteith

ضریب تعیین ۰/۹۹۲، در مراحل آزمایش، دقیق‌ترین تخمین‌ها را در برآورد ET_0 داشته است.

در این پژوهش روش استاندارد فائو-پنمن-مانتیت برای محاسبه تبخیر-تعرق گیاه مرجع به‌عنوان روش مبنا در نظر گرفته شد. هدف پژوهش حاضر بررسی قابلیت مدل پرسپترون چند لایه در حالت منفرد و به‌صورت ترکیبی با گرادیان نزولی تصادفی در برآورد مقادیر تبخیر-تعرق مرجع روزانه در سه شهر با اقلیم‌های مختلف (شیراز و گرگان و کیش) است. در خصوص انتخاب مدل‌های MLP و SGD-MLP می‌توان چنین مطرح نمود که یکی از دلایل محتمل در انتخاب MLP، توانایی این مدل در شناسایی و یادگیری روابط پیچیده و غیرخطی در مجموعه داده‌های بزرگ و پیچیده است. شبکه‌های عصبی چندلایه با قابلیت‌های فراگیری خود، می‌توانند الگوهای پنهان و عوامل تأثیرگذار متعدد را در داده‌ها تشخیص دهند که این ویژگی برای مسائلی که شامل عوامل متغیر و تعاملات پیچیده هستند، می‌تواند بسیار ارزشمند باشد. به‌علاوه، MLP به دلیل ساختار نسبتاً ساده‌اش، پیاده‌سازی و تنظیم آن در مقایسه با روش‌های پیچیده‌تر مانند یادگیری عمیق، زمان و منابع کمتری نیاز دارد. همچنین، اهمیت روش بهینه‌سازی نزولی تصادفی در بهبود نتایج غیرقابل انکار است. این روش بهینه‌سازی به دلیل توانایی در بهبود کارایی زمانی و محاسباتی، به‌ویژه در مسائل با داده‌های عظیم و یا زمانی که منابع محاسباتی محدود هستند، بسیار محبوب است. روش SGD برای تطبیق سریع و مؤثر وزن‌ها در شبکه‌های عصبی طراحی شده و به تسریع در همگرایی و کاهش ریسک افتادن در کمینه‌های محلی کمک شایانی می‌کند؛ بنابراین، در مطالعاتی که نیاز به انجام محاسبات زیاد و با سرعت بالا دارند، انتخاب این روش می‌تواند کاملاً منطقی باشد.

جانسون و ژانگ (۲۰۱۳) در مطالعه‌ای به تسریع گرادیان نزولی تصادفی با استفاده از کاهش واریانس پیش‌بینی‌کننده پرداختند. ارزیابی نتایج این بررسی نشان داد که مدل گرادیان نزولی تصادفی با سهولت برای مسائل پیچیده مانند برخی از مشکلات پیش‌بینی ساخت‌یافته و یادگیری شبکه‌های عصبی قابل استفاده است.

سوباسی و همکاران (۲۰۲۲) در تحقیقی به پیش‌بینی نفوذپذیری مخازن نفتی با استفاده از رگرسیون گرادیان تصادفی پرداختند و درنهایت پس از مقایسه مدل‌ها مشخص شد که مدل گرادیان تصادفی عملکرد کلی بهتری نسبت به مدل‌های دیگر داشته است.

محمد و همکاران (۲۰۲۳) در تحقیقی به پیش‌بینی بهره‌وری یک تقطیرکننده خورشیدی بهبود یافته با صفحه جاذب شیب‌دار با استفاده از گرادیان نزولی تصادفی در شبکه‌های عصبی مصنوعی پرداختند. ارزیابی نتایج این بررسی نشان داد که مدل گرادیان نزولی تصادفی ترکیب‌شده با ANN با داشتن ضریب تغییرات ۰/۰۸۲۲ عملکرد مناسبی را در برآورد بهره‌وری داشته است. واز و همکاران (۲۰۲۲) در مطالعه‌ای به برآورد تبخیر-تعرق در پرتقال با استفاده از مدل‌های مبتنی بر شبکه عصبی ترکیب‌شده با الگوریتم‌های حافظه کوتاه‌مدت بلندمدت (LSTM)، واحد بازگشتی دروازه‌ای (GRU)^۱، شبکه عصبی بازگشتی (RNN)^۲ پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد که مدل‌های ترکیبی با داشتن ضریب تبیین ۰/۹۷ عملکرد مناسبی را در برآورد تبخیر-تعرق داشتند. همچنین طالبی و همکاران (۲۰۲۳) در تحقیقی به تخمین تبخیر-تعرق مرجع روزانه با داده‌های تصاویر ماهواره‌ای و الگوریتم بهینه‌سازی مجموعه گرادیان نزولی تصادفی با پرسپترون چندلایه بین سال‌های ۲۰۲۱-۲۰۰۳ در ایران پرداختند. مدل ترکیبی در همه موارد عملکرد بهتری نسبت به پرسپترون چندلایه منفرد داشت. در نهایت، پرسپترون چندلایه آموزش‌دیده با گرادیان یادگیری تصادفی با داشتن

^۳ -Recurrent neural network

^۱ -Long short-term memory

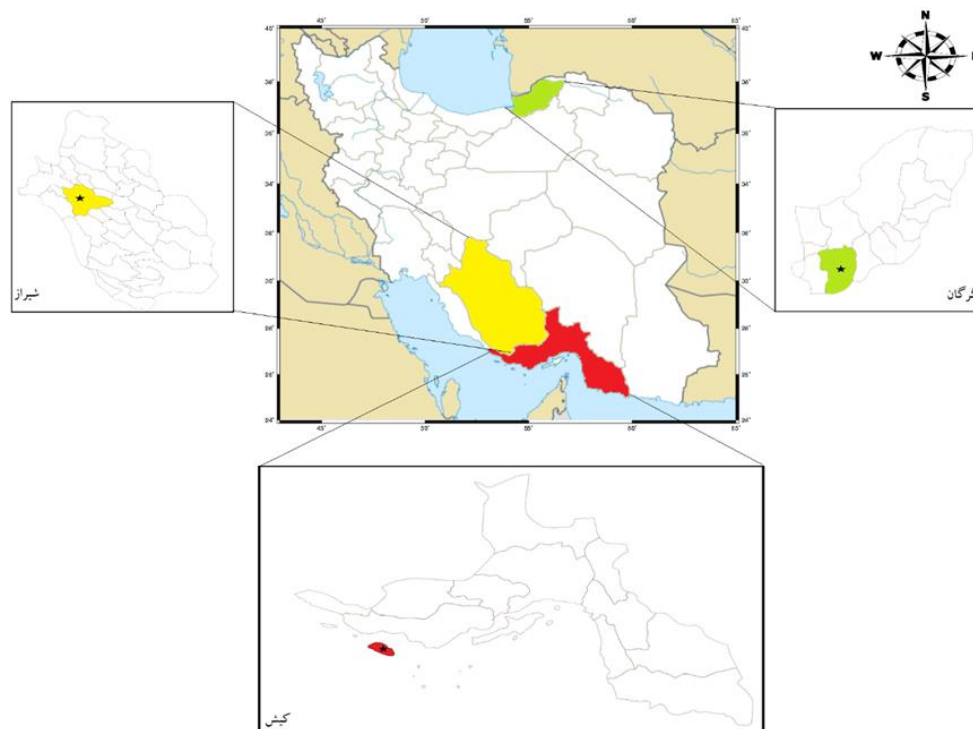
^۲ -Gateway return unit

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

در این مطالعه برای بررسی و برآورد مقادیر تبخیر- تعرق مرجع در مقیاس روزانه، داده‌های هواشناسی سه ایستگاه سینوپتیک شیراز، گرگان و کیش به ترتیب واقع در استان‌های فارس، گلستان و هرمزگان مورد استفاده قرار گرفت. ایستگاه‌های مذکور بر اساس تنوع اقلیمی و قابلیت نمایندگی از شرایط متفاوت محیطی انتخاب شده‌اند. این انتخاب به‌گونه‌ای صورت گرفته است که هر یک از ایستگاه‌ها نماینده یکی از انواع اقلیم‌های اصلی ایران باشند. بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی کوپن، ایستگاه گرگان در اقلیم نیمه‌حاره‌ای مرطوب، ایستگاه شیراز در اقلیم نیمه‌خشک و ایستگاه کیش در منطقه بیابانی قرار دارد. این تنوع اقلیمی اطمینان می‌دهد که عملکرد مدل‌های مورد بررسی در شرایط مختلف آب‌وهوایی مورد ارزیابی قرار گیرد و نتایج حاصل از تحقیق قابل تعمیم به سایر مناطق با شرایط مشابه باشند. انتخاب ایستگاه کیش به‌ویژه به دلیل موقعیت جغرافیایی خاص این منطقه در خلیج فارس و شرایط اقلیمی منحصر به فرد آن صورت گرفته است. علیرغم اینکه بیشتر مناطق این جزیره از لحاظ اقلیمی در گروه بیابانی قرار

می‌گیرند، اما توسعه‌های اخیر در زمینه کشاورزی گلخانه‌ای و مدیریت هوشمند آب، این منطقه را به یکی از نقاط مهم در بهره‌برداری بهینه از منابع آب تبدیل کرده است. اهمیت تعیین تبخیر-تعرق مرجع در این منطقه حتی در مواردی مانند کشت چمن در فضای سبز شهری نیز ضروری است. در واقع، تعیین دقیق نیاز آبی گیاه مرجع برای برنامه‌ریزی صحیح آبیاری و مدیریت فضای سبز در کیش امری ضروری و حیاتی محسوب می‌شود. این امر به‌خصوص در شرایطی که رطوبت نسبی بالا، دماهای گرم و بادهای غالب دریایی تأثیر مستقیمی بر الگوی تبخیر-تعرق دارند، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند؛ بنابراین، ارزیابی مدل‌های تخمین تبخیر-تعرق در این ایستگاه از اهمیت بالایی برخوردار است. همچنین، انتخاب ایستگاه‌های گرگان و شیراز به‌ترتیب به‌عنوان نماینده اقلیم نیمه‌حاره‌ای مرطوب و نیمه‌خشک، امکان مقایسه عملکرد مدل‌ها در شرایط اقلیمی متنوع را فراهم می‌کند. این انتخاب‌ها با هدف دستیابی به نتایج کاربردی و قابل تعمیم در مناطق با شرایط اقلیمی متفاوت صورت گرفته است. شکل (۱) موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های مورد مطالعه

متغیرهای مورد استفاده

دو متری (U_2)، رطوبت نسبی متوسط (RH_{ave})، رطوبت نسبی حداقل (RH_{min}) و رطوبت نسبی حداکثر (RH_{max}) به عنوان پارامترهای ورودی و تبخیر-تعرق مرجع (ET_0) به عنوان پارامتر خروجی است. همچنین ۷۰٪ داده‌ها برای مرحله آموزش مدل‌ها و ۳۰٪ داده‌ها به‌طور تصادفی برای مرحله آزمون استفاده شد.

جدول (۱) مشخصات و متغیرهای آماری روزانه داده‌های مورد استفاده در طی دوره آماری (۱۳۷۹-۱۴۰۲) را نشان می‌دهد. این متغیرها شامل دمای متوسط (T_{ave})، دمای حداقل (T_{min})، دمای حداکثر (T_{max})، متوسط دمای خاک (T_{soil})، ساعات آفتابی (SSH)، سرعت باد در ارتفاع

جدول ۱- برخی شاخص‌های آماری داده‌های استفاده

ایستگاه	پارامتر واحد	T_{ave} °C	T_{min} °C	T_{max} °C	T_{soil} °C	SSH hour	U_2 m/s	RH_{ave} %	RH_{min} %	RH_{max} %	ET_0 mm/day
کیش	حداقل	11.9	10.2	12.4	1.3	1.5	0.3	24.13	7	32	0.2
	حداکثر	38.7	34.2	46.2	34	12.7	18	96	93	100	21
	میانگین	28.03	24.17	31.89	21.18	8.91	3.93	66.18	47.03	83.31	7.56
	انحراف از معیار	5.46	5.22	5.88	6.12	2.36	1.79	10.4	13.13	10.55	2.9
گرگان	حداقل	1.2	-2.6	2.6	-11	1.1	0.1	24.38	7	46	0.15
	حداکثر	33.8	13.35	46.3	29	13.9	13.25	99.5	98	100	16.7
	میانگین	19.03	28.6	24.72	11.14	6.43	2.5	74.21	52.78	90.12	4.06
	انحراف از معیار	7.97	7.8	8.9	8.19	4.2	1.34	10.97	16.92	7.13	3
شیراز	مینیمم	1.3	-5.2	4	-11	1.3	0.2	6.63	1	11	0.18
	ماکزیمم	35.3	29.2	43.4	25	13.3	13.5	99.25	98	57.35	20.1
	میانگین	19.71	11.55	27.87	6.92	9.36	1.8	33.36	18.66	100	7.11
	انحراف از معیار	7.85	7.24	8.85	7.08	2.91	1.02	18.47	14.7	21.51	4.22

فائو- پنمن- مانیتث

فشار بخار ($kPa \cdot ^\circ C^{-1}$)، γ ← ضریب سایکرومتری
 R_H ، ($kPa \cdot ^\circ C^{-1}$) ← رطوبت نسبی (%)

پارامترهای ورودی مدل‌ها

در پژوهش حاضر امکان‌سنجی استفاده از پارامترهای هواشناسی دما، رطوبت نسبی، سرعت باد، ساعات آفتابی در ترکیب‌های مختلف به‌منظور تخمین تبخیر-تعرق گیاه مرجع مدنظر قرار گرفت. نحوه انتخاب ترکیبات مختلف ورودی، بر اساس ضریب همبستگی پیرسون بوده به‌طوری‌که ترکیب اول کمترین همبستگی و ترکیب آخر بیش‌ترین همبستگی را نسبت به ET_0 داشته‌اند. جدول (۲) ترکیبات ورودی مختلف جهت برآورد مقادیر تبخیر-تعرق گیاه مرجع را نشان می‌دهد.

آلن و همکاران (۱۹۹۸) رابطه (۱) را که به‌نام رابطه فائو- پنمن- مانیتث معروف است، به‌عنوان دقیق‌ترین روش برآورد نیاز آبی گیاه را ارائه نمودند. در پژوهش حاضر مقادیر تبخیر-تعرق گیاه مرجع با این روش و با استفاده رابطه زیر محاسبه شد:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_{mean} + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

که در آن: ET_0 ← تبخیر تعرق گیاه مرجع ($mm \cdot day^{-1}$)،
 R_n ← تابش خالص در سطح پوشش گیاهی ($MJ \cdot m^{-2} \cdot day^{-1}$)،
 G ← شار گرما به داخل خاک ($MJ \cdot m^{-2} \cdot day^{-1}$)،
 T ← دمای هوا ($^\circ C$)،
 u_2 ← سرعت باد در ارتفاع دو متری از سطح زمین ($m \cdot s^{-1}$)،
 e_a ← فشار بخار واقعی (kPa)،
 e_s ← فشار بخار اشباع (kPa)،
 Δ ← شیب منحنی

جدول ۲- ترکیبات ورودی مختلف مدل‌ها

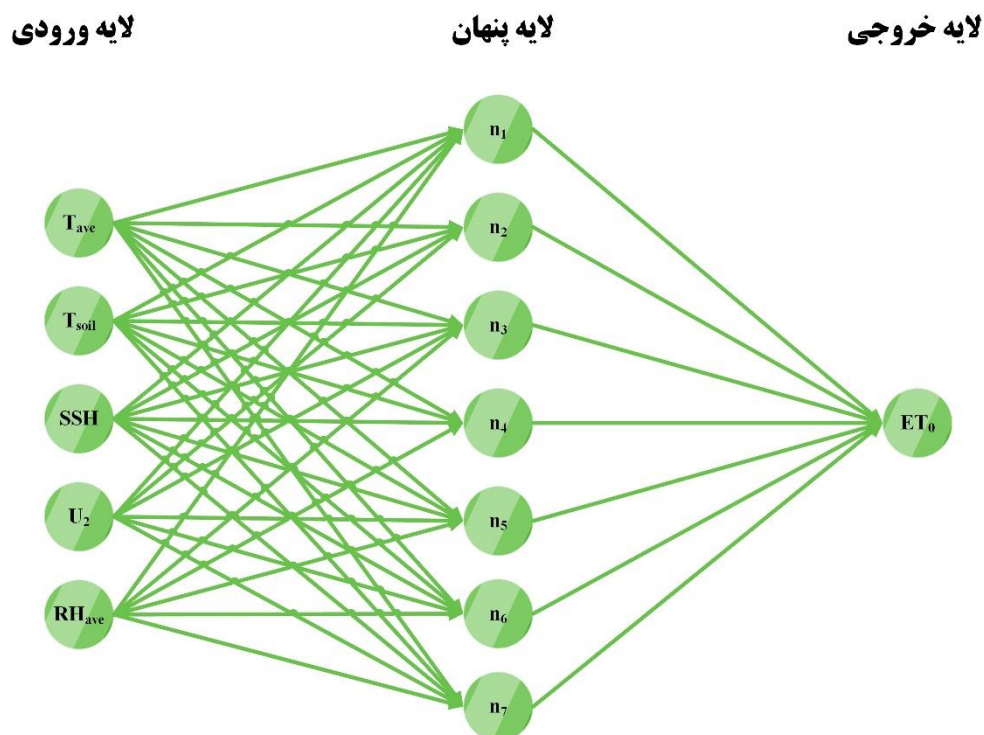
سناریو	پارامترهای ورودی	خروجی
1	$T_{ave}-T_{min}-T_{max}$	ET_0
2	$T_{ave}-T_{min}-T_{max}$ T_{soil}	ET_0
3	$T_{ave}-T_{min}-T_{max}$ T_{soil} SSH	ET_0
4	$T_{ave}-T_{min}-T_{max}$ T_{soil} SSH U_2	ET_0
5	$T_{ave}-T_{min}-T_{max}$ T_{soil} SSH U_2 $RH_{ave}-RH_{min}-RH_{max}$	ET_0

مدل پرسپترون چندلایه

پرسپترون چندلایه (MLP^1) نوعی شبکه عصبی مصنوعی است که پایه و اساس بسیاری از سامانه‌های یادگیری عمیق را تشکیل می‌دهد (پاپسکو و همکاران ۲۰۰۹). این لایه از یک لایه ورودی، یک یا چند لایه پنهان و یک لایه خروجی تشکیل شده است. هر لایه متشکل از گره‌هایی است که اغلب نورون نامیده می‌شوند که با هر گره در لایه بعدی به هم مرتبط هستند و آن را به یک شبکه کاملاً متصل تبدیل می‌کنند. وظیفه اصلی لایه ورودی دریافت ورودی‌های مختلف است که متعاقباً از طریق لایه های پنهان که در آن محاسبات و یادگیری واقعی انجام می‌شود، پردازش می‌شوند. لایه خروجی برآورد یا طبقه‌بندی نهایی را ارائه می‌دهد. فرآیند یادگیری یک MLP شامل روشی به نام پس‌انتشار است که یک الگوریتم یادگیری نظارت شده است (درایرج و رواسی ۲۰۱۵). در حین

آموزش، شبکه بر اساس داده‌های ورودی برآورد می‌کند و تفاوت بین خروجی برآورد شده و خروجی هدف واقعی به عنوان خطا محاسبه می‌شود. سپس این خطا در شبکه، از لایه خروجی به لایه ورودی منتشر می‌شود. در این فرآیند وزن اتصالات برای کاهش خطا تنظیم می‌شود. این تنظیم به طور مکرر در بسیاری از دوره‌ها انجام می‌شود، هر بار با هدف بهبود دقت مدل. استفاده از توابع فعال‌سازی غیرخطی، مانند واحد خطی اصلاح شده (ReLU)، سیگموئید، یا مماس هذلولی، MLP را قادر می‌سازد تا الگوها و روابط پیچیده درون داده‌ها را ضبط و مدل‌سازی کند. این توابع فعال‌سازی غیرخطی بودن را به مدل وارد می‌کنند و به آن اجازه می‌دهند تا مسائل پیچیده‌تری را نسبت به مدل‌های خطی حل کند (دوبی و همکاران ۲۰۲۲). شکل (۲) نمایی کلی از یک شبکه عصبی مصنوعی را نشان می‌دهد.

¹ - Multilayer Perceptron



شکل ۲- نمای کلی از یک شبکه عصبی مصنوعی

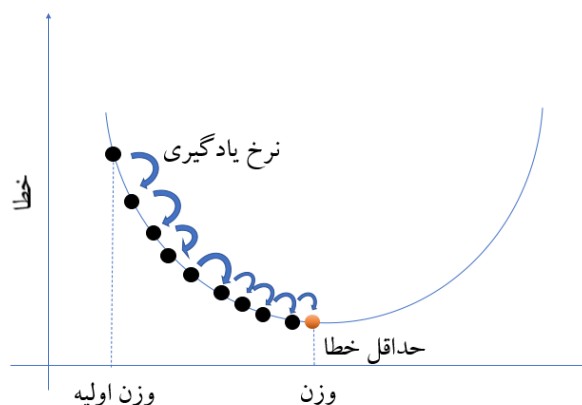
که با مجموعه داده‌های بزرگ سروکار داریم. تصادفی بودن در انتخاب نقاط داده منفرد به الگوریتم کمک می‌کند تا از حداقل‌های محلی فرار کند و آن را در یافتن حداقل مقدار جهانی مؤثرتر کند (شی و همکاران ۲۰۲۲).

مکانیسم کار SGD شامل چندین مرحله کلیدی است. در ابتدا، پارامترهای مدل، معمولاً با مقادیر تصادفی کوچک مقداردهی اولیه می‌شوند. در هر تکرار، یک نقطه داده به‌طور تصادفی انتخاب‌شده از مجموعه آموزشی برای محاسبه گرادیان تابع هزینه با توجه به پارامترهای مدل استفاده می‌شود. این گرادیان نشان‌دهنده جهتی است که پارامترها باید در آن تنظیم شوند تا هزینه کاهش یابد. یکی از مزیت‌های اصلی SGD کارایی آن در مدیریت داده‌های بزرگ مقیاس و ابعاد بالا است که در وظایف یادگیری ماشین مدرن رایج است (شی و همکاران ۲۰۲۲). شکل (۳) یک نمای کلی از مدل گرادیان نزولی تصادفی را نشان می‌دهد.

مدل گرادیان نزولی تصادفی

گرادیان نزولی تصادفی (SGD)^۱ یک الگوریتم بهینه‌سازی اساسی است که به‌طور گسترده در یادگیری ماشین و یادگیری عمیق برای آموزش طیف گسترده‌ای از مدل‌ها از جمله شبکه‌های عصبی استفاده می‌شود. هدف اصلی SGD به حداقل رساندن تابع هزینه است که تفاوت بین خروجی برآورد شده و خروجی هدف واقعی را با تنظیم مکرر پارامترهای مدل اندازه‌گیری می‌کند (بونابل ۲۰۱۳). برخلاف گرادیان نزولی سنتی که گرادیان را با استفاده از کل مجموعه داده محاسبه می‌کند، SGD پارامترهای مدل را با استفاده از تنها یک نقطه داده یا دسته کوچکی از داده‌ها در هر تکرار به‌روزرسانی می‌کند. این رویکرد به‌طور قابل توجهی بار محاسباتی را کاهش می‌دهد و امکان همگرایی سریع‌تر را فراهم می‌کند، به‌ویژه هنگامی

^۱ -Stochastic Gradient Descent



شکل ۳- نمای کلی از گرادیان نزولی تصادفی

همچنین مقادیر نزدیک به صفر RMSE نشان‌دهنده تطابق خوب بین مقادیر مشاهداتی و برآورد شده هست. علاوه بر این، مطابق توصیه‌های موریاسی و همکاران (۲۰۰۷)، مقدار یک برای NS ایده آل بوده و مقادیر بین صفر تا یک قابل قبول هست.

نتایج و بحث

به منظور امکان‌سنجی استفاده از ترکیب متغیرهای هواشناسی مختلف در برآورد مقادیر تبخیر و تعرق گیاه مرجع، پنج سناریو مختلف تعریف شد. سپس محاسبات واسنجی بر روی ۷۰٪ از داده‌ها و محاسبات صحت‌سنجی بر روی ۳۰٪ از داده‌های باقیمانده با استفاده از نرم‌افزار RapidMiner Studio نسخه ۱۰/۲ انجام شد. برآورد مقادیر تبخیر و تعرق با استفاده از مدل‌های MLP و MLP-SGD انجام شد و دقت روش‌های یادشده در مرحله صحت‌سنجی بر اساس معیارهای آماری (روابط ۲ تا ۵) محاسبه شده و در جدول ۳ ارائه شده است.

معیارهای ارزیابی عملکرد مدل‌ها

ارزیابی عملکرد مدل‌های مورد استفاده با ضریب همبستگی (R)^۱، جذر میانگین مربعات خطا ($RMSE$)^۲، ضریب نش-ساتکلیف (NS)^۳ و شاخص توافق ویلموت (WI)^۴ با استفاده از روابط (۲) تا (۵) بررسی شده است.

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

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

$$NS = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \right] \quad (4)$$

$$WI = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{P}|)^2} \right] \quad (5)$$

که در آن‌ها: O_i و P_i به ترتیب مقادیر مشاهداتی و برآورد شده و N تعداد مشاهدات است. با توجه به توصیه‌های موریاسی و همکاران (۲۰۰۷)، R نزدیک به یک نشان‌دهنده رابطه خطی مثبت و ۱- نشان‌دهنده رابطه معکوس است.

³ -Nash-Sutcliffe Coefficient

⁴ -Willmott index of Agreement

¹ -Correlation Coefficient

² -Root Mean Squared Error

جدول ۳- نتایج ارزیابی مدل‌های مورد مطالعه در ایستگاه‌های کیش، گرگان و شیراز

ایستگاه	مدل	معیارهای ارزیابی			
		R	RMSE (mm/day)	NS	WI
کیش	MLP-1	0.57	2.43	0.33	0.69
	MLP-2	0.59	2.41	0.33	0.71
	MLP-3	0.63	2.30	0.39	0.75
	MLP-4	0.67	2.21	0.44	0.75
	MLP-5	0.73	2.15	0.47	0.79
	MLP-SGD-1	0.65	2.37	0.36	0.64
	MLP-SGD-2	0.66	2.32	0.39	0.67
	MLP-SGD-3	0.71	2.27	0.41	0.68
	MLP-SGD-4	0.77	2.17	0.46	0.71
	MLP-SGD-5	0.80	1.94	0.57	0.81
گرگان	MLP-1	0.85	1.68	0.71	0.91
	MLP-2	0.85	1.64	0.72	0.91
	MLP-3	0.86	1.62	0.73	0.91
	MLP-4	0.87	1.58	0.74	0.92
	MLP-5	0.88	1.51	0.77	0.93
	MLP-SGD-1	0.91	1.53	0.76	0.92
	MLP-SGD-2	0.91	1.31	0.83	0.95
	MLP-SGD-3	0.92	1.25	0.84	0.96
	MLP-SGD-4	0.92	1.24	0.84	0.96
	MLP-SGD-5	0.92	1.20	0.85	0.96
شیراز	MLP-1	0.90	1.97	0.79	0.94
	MLP-2	0.90	1.93	0.80	0.94
	MLP-3	0.91	1.86	0.82	0.95
	MLP-4	0.92	1.78	0.83	0.95
	MLP-5	0.92	1.72	0.84	0.96
	MLP-SGD-1	0.96	1.93	0.80	0.94
	MLP-SGD-2	0.96	1.70	0.85	0.95
	MLP-SGD-3	0.96	1.23	0.92	0.98
	MLP-SGD-4	0.98	1.22	0.92	0.98
	MLP-SGD-5	0.98	1.04	0.94	0.98

مقدار خطا در حدود ۰/۱۱ میلی‌متر در روز و افزایش ضریب همبستگی به مقدار ۰/۰۴ شده است. برای سناریو چهارم، معیارهای R و NS به مقدار جزئی افزایش یافته و معیار خطا نیز در حدود ۰/۰۹ میلی‌متر در روز کاهش یافت. در سناریو پنجم نیز بررسی تمام معیارها نشان از بهبود دقت برآورد نسبت به سایر سناریوها است، به‌طوری‌که معیارهای ضریب همبستگی، شاخص نش‌ساتکلیف و ویلموت به‌ترتیب به میزان ۰/۰۶، ۰/۰۳ و ۰/۰۴ افزایش یافته و جذر میانگین مربعات خطا در حدود ۰/۰۶ میلی‌متر در روز کاهش یافت.

مقایسه سناریوهای مختلف برای مدل MLP در ایستگاه کیش نشان می‌دهد که سناریو اول با داشتن $R=0.57$ ، $RMSE=2.43$ mm/day، $NS=0.33$ و $WI=0.69$ عملکرد ضعیفی را نسبت به سایر سناریوها داشته است. در سناریو دوم معیارها بهبود جزئی را نسبت به سناریو اول نشان دادند، به‌طوری‌که معیارهای R و WI به مقدار ۰/۰۲ افزایش یافته، معیار خطای RMSE در حدود ۰/۰۲ میلی‌متر در روز کاهش یافته و معیار NS نیز بدون تغییر باقی ماند. در سناریو سوم، افزوده شدن پارامتر ساعات آفتابی به تعداد ورودی‌های مدل، سبب کاهش قابل ملاحظه

برای مدل ترکیبی در این ایستگاه نیز بررسی سناریوهای مختلف نشان می‌دهد که اولین سناریو با داشتن $NS=0/36$, $RMSE=2/37$ mm/day, $R=0/65$ و $WI=0/64$ دقت کمتری را نسبت به سایر سناریوهای مدل MLP-SGD داشته است. همچنین مقایسه سناریو اول و دوم نشان می‌دهد که در سناریو دوم مقدار معیارهای ضریب همبستگی، شاخص نش‌ساتکلیف و ویلموت به ترتیب به میزان $1/53$ ، 8 و $4/58$ درصد افزایش یافته و جذر میانگین مربعات خطا در حدود $2/13$ درصد کاهش یافت. سناریو سوم نیز دقت بالاتری را نسبت به سناریو دوم داشته به‌طوری‌که مقدار خطا در حدود $2/18$ درصد در سناریو سوم کاهش یافت. در سناریو چهارم تمامی شاخص‌ها بهبود قابل توجهی را نسبت به سناریو قبلی نشان می‌دهند، به‌طوری‌که شاخص‌های ضریب همبستگی، شاخص نش‌ساتکلیف و ویلموت به ترتیب به میزان $0/11$ ، $11/49$ و $4/32$ درصد افزایش یافته و جذر میانگین مربعات خطا در حدود $2/17$ درصد کاهش یافت. در نهایت سناریو آخر با داشتن $NS=0/57$, $RMSE=1/94$ mm/day, $R=0/8$ و $WI=0/81$ بالاترین دقت را نسبت به تمام سناریوها در هر دو مدل منفرد و ترکیبی داشته است.

در ایستگاه گرگان مقایسه سناریوهای مختلف برای مدل MLP نشان می‌دهد که سناریو اول با داشتن $NS=0/71$, $RMSE=1/68$ mm/day, $R=0/85$ و $WI=0/91$ عملکرد پایین‌تری را نسبت به سایر سناریوها داشته است. در سناریو دوم معیارها بهبود جزئی را نسبت به سناریو اول نشان دادند، به‌طوری‌که معیار NS به مقدار $0/01$ افزایش یافته، معیار خطای $RMSE$ در حدود $0/04$ میلی‌متر در روز کاهش یافته و معیارهای R و WI نیز بدون تغییر باقی ماند. در سناریو سوم، افزوده شدن پارامتر ساعات آفتابی به تعداد ورودی‌های مدل، سبب کاهش مقدار خطا در حدود $0/02$ میلی‌متر در روز و افزایش ضریب همبستگی و شاخص نش‌ساتکلیف به مقدار $0/01$ شده است. برای سناریو چهارم، معیار خطا نیز در حدود $0/04$ میلی‌متر در روز کاهش یافته و سایر معیارها در حدود $0/01$ افزایش

یافت. در سناریو پنجم نیز بررسی تمام معیارها نشان از بهبود دقت برآورد نسبت به سایر سناریوها هست، به‌طوری‌که معیارهای ضریب همبستگی، شاخص نش‌ساتکلیف و ویلموت به ترتیب به میزان $0/01$ ، $0/03$ و $0/01$ افزایش یافته و جذر میانگین مربعات خطا در حدود $0/07$ میلی‌متر در روز کاهش یافت.

برای مدل ترکیبی نیز بررسی سناریوهای مختلف نشان می‌دهد که اولین سناریو با داشتن $R=0/91$, $RMSE=1/53$ mm/day, $NS=0/76$ و $WI=0/92$ دقت کمتری را نسبت به سایر سناریوهای مدل MLP-SGD داشته است. همچنین، مقایسه سناریو اول و دوم نشان می‌دهد که در سناریو دوم مقدار معیارهای شاخص نش‌ساتکلیف و ویلموت به ترتیب به میزان $8/81$ و $3/21$ درصد افزایش یافته و جذر میانگین مربعات خطا در حدود $15/49$ درصد کاهش یافت. سناریو سوم نیز دقت بالاتری را نسبت به سناریو دوم داشته به‌طوری‌که مقدار خطا در حدود $4/69$ درصد در سناریو سوم کاهش یافت. در سناریو چهارم تمامی شاخص‌ها بهبود قابل توجهی را نسبت به سناریو قبلی نشان می‌دهند، به‌طوری‌که شاخص‌های ضریب همبستگی، شاخص نش‌ساتکلیف و ویلموت بدون تغییر باقی ماندند و جذر میانگین مربعات خطا به مقدار جزئی کاهش یافت. در نهایت سناریو آخر با داشتن $R=0/92$, $RMSE=1/2$ mm/day, $NS=0/85$ و $WI=0/96$ بالاترین دقت را نسبت به تمام سناریوها در هر دو مدل منفرد و ترکیبی داشته است.

در ایستگاه شیراز سناریو اول با داشتن $R=0/9$, $RMSE=1/97$ mm/day, $NS=0/79$ و $WI=0/94$ عملکرد پایینی نسبت به سایر سناریوها داشته است. در سناریو دوم معیارهای NS به مقدار $0/01$ افزایش یافته، معیار خطای $RMSE$ در حدود $0/04$ میلی‌متر در روز کاهش یافته و باقی معیارها نیز بدون تغییر باقی ماندند. در سناریو سوم، افزوده شدن پارامتر ساعات آفتابی به تعداد ورودی‌های مدل، سبب کاهش مقدار خطا در حدود $0/07$ میلی‌متر در روز و افزایش مقدار معیارهای ضریب همبستگی، شاخص

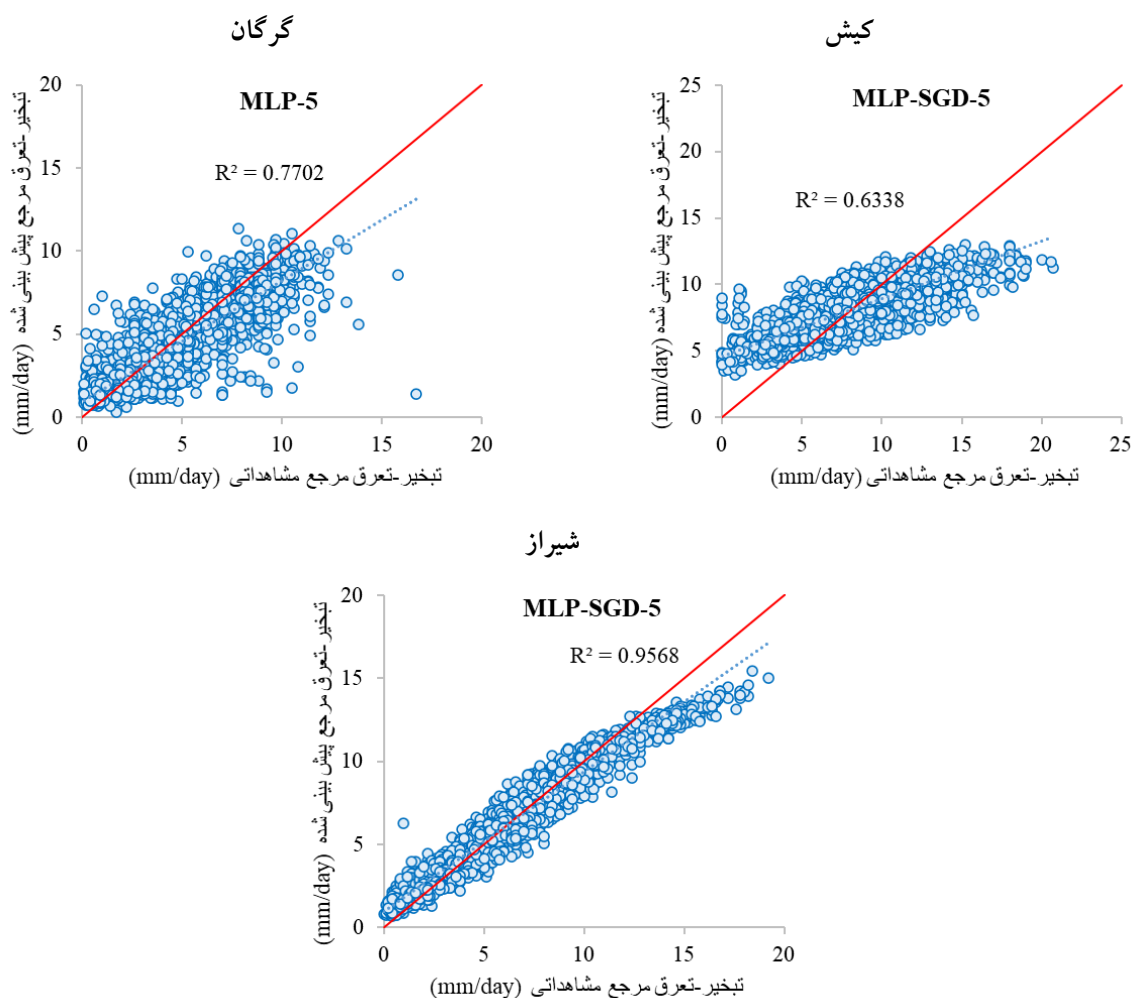
نش-ساتکلیف و ویلموت به ترتیب به میزان ۰/۰۱، ۰/۰۲ و ۰/۰۱ شده است. برای سناریو چهارم، معیارهای R و NS به مقدار جزئی افزایش یافته و معیار خطا نیز در حدود ۰/۰۸ میلی متر در روز کاهش یافت. در سناریو پنجم نیز بررسی معیارها نشان از بهبود دقت برآورد نسبت به سایر سناریوها است، به طوری که معیارهای شاخص نش-ساتکلیف و ویلموت به میزان ۰/۰۱ افزایش یافته و جذر میانگین مربعات خطا در حدود ۰/۰۶ mm/day میلی متر در روز کاهش یافت.

برای مدل ترکیبی نیز بررسی سناریوهای مختلف نشان می دهد که اولین سناریو با داشتن $R=0/96$ ، $RMSE=1/93$ mm/day، $NS=0/8$ و $WI=0/94$ دقت کمتری را نسبت به سایر سناریوهای مدل MLP-SGD داشته است. همچنین مقایسه سناریو اول و دوم نشان می دهد که در سناریو دوم مقدار معیارهای شاخص نش-ساتکلیف و ویلموت به ترتیب به میزان ۶/۰۶ و ۱/۰۶ درصد افزایش یافته و جذر میانگین مربعات خطا در حدود ۱۲/۶۷ درصد کاهش یافت. سناریو سوم نیز دقت بالاتری را نسبت به سناریو دوم داشته به طوری که مقدار خطا به مقدار قابل توجهی (در حدود ۳۲/۰۸ درصد) در سناریو سوم کاهش یافت. در سناریو چهارم نیز شاخص ضریب همبستگی به میزان ۲/۰۶ درصد افزایش یافته و جذر میانگین مربعات خطا در حدود یک درصد کاهش یافت. در نهایت سناریو آخر با داشتن $R=0/98$ ، $RMSE=1/04$ mm/day، $NS=0/94$ و $WI=0/98$ بالاترین دقت را نسبت به تمام سناریوها در هر دو مدل منفرد و ترکیبی داشته است.

با بررسی های به عمل آمده در خصوص هر سه ایستگاه مورد مطالعه می توان مطرح نمود که بدون تردید،

سناریو اول که تنها بر مبنای دما به عنوان پارامتر ورودی عمل می کند، می تواند به عنوان یک روش مؤثر برای برآورد تبخیر- تعرق با پذیرش یک خطای نسبتاً پایین به کار رود. این سناریو با استفاده از تنها پارامترهای دما، مزایای خاصی از جمله ساده سازی فرآیند برآورد و کاهش نیاز به داده های ورودی پیچیده تر را فراهم می آورد. به علاوه، استفاده از تنها یک پارامتر می تواند منجر به کاهش هزینه های عملیاتی، زمان پردازش و پیچیدگی های مربوط به جمع آوری داده ها شود. در واقع، این رویکرد به ویژه در مناطقی که داده های اقلیمی به دقت در دسترس نیستند، بسیار ارزشمند است؛ زیرا به محققان و کارشناسان اجازه می دهد که به سرعت و به آسانی تبخیر- تعرق را برآورد کنند. در نتیجه، با توجه به شرایط مختلف اقلیمی در ایستگاه های مختلف، پیاده سازی این سناریو می تواند به بهبود برآوردهای محیطی و کشاورزی کمک کند و در نتیجه به مدیریت بهینه منابع آب یاری رساند. این امر نه تنها به حفظ منابع آبی کمک می کند بلکه می تواند به برنامه ریزی بهتر و کارآمدتر در بخش کشاورزی کمک کند و به کشاورزان اجازه می دهد که با استفاده از اطلاعات دقیق تر، تصمیمات بهتری در مورد کشت و آبیاری بگیرند.

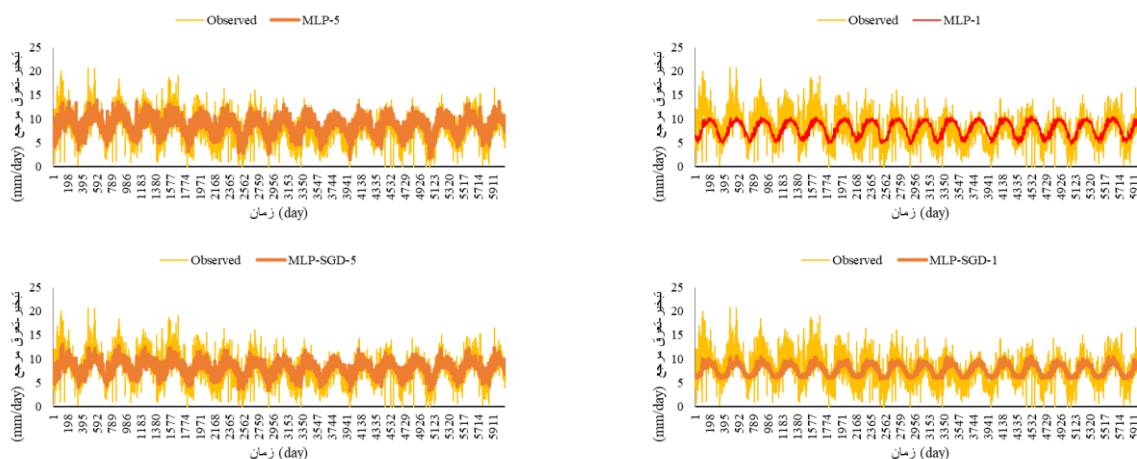
شکل ۴ نمودارهای پراکنش برای مدل پرسپترون چندلایه ترکیب شده با الگوریتم گرادیان نزولی تصادفی را در هر سه ایستگاه نشان می دهد. در تمام سناریوها خط قرمز رنگ نیمساز ربع اول بوده و هرچه نقاط داده به این خط نزدیک تر باشند، دقت آن مدل افزایش خواهد یافت. مقایسه سناریوها نشان می دهد که سناریو پنجم بیشترین دقت را داشته است.

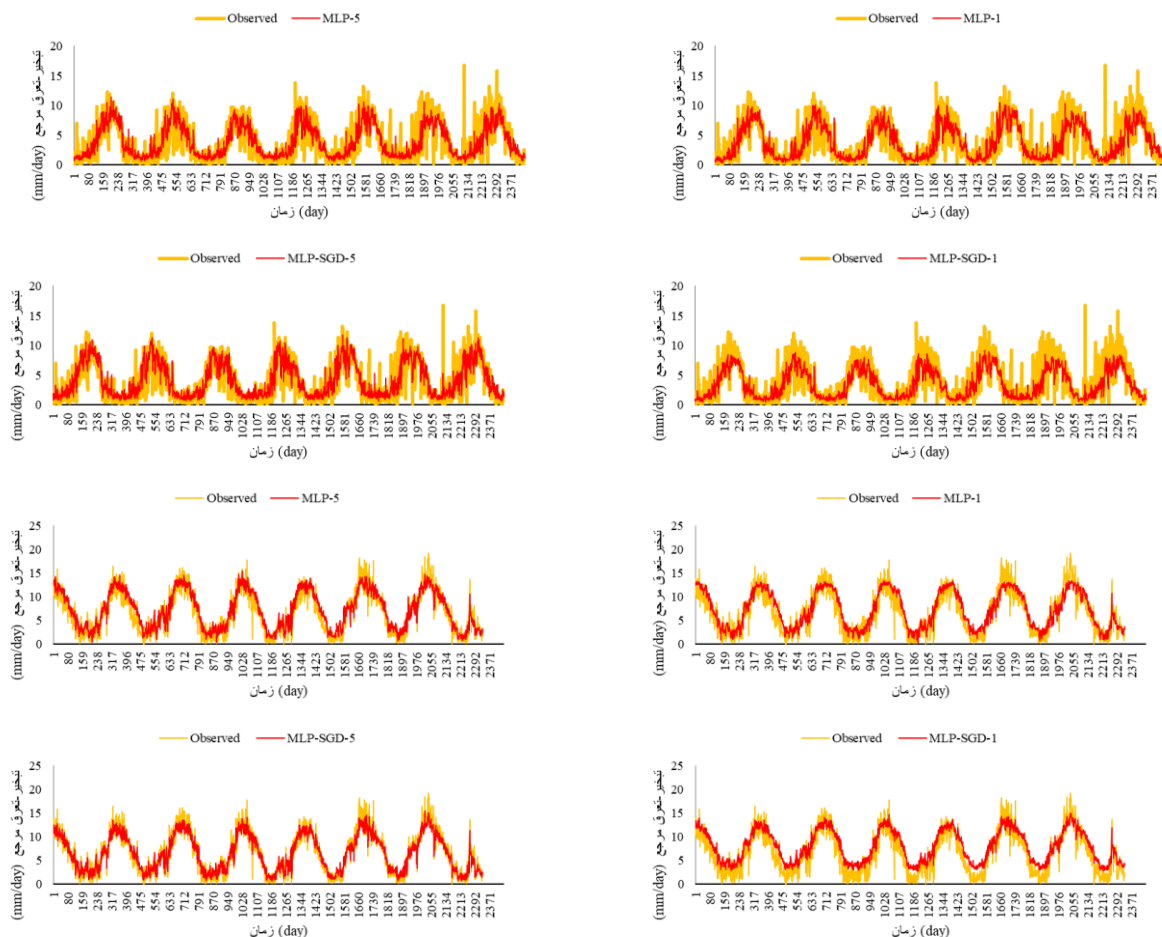


شکل ۴- نمودارهای پراکنش با بهترین عملکرد در هر سه ایستگاه مورد مطالعه

به‌طوری‌که مدل‌ها در آخرین سناریو با دقت مناسبی داده‌های مشاهده‌ای را برآورد کرده است.

همچنین شکل (۵) نمودارهای سری زمانی برای سناریوهای مختلف را نشان می‌دهد. مطابق نمودارها، در سناریو اول، مدل‌ها دارای کم‌برآوردی از ابتدای بازه تا انتهای آن بوده اما رفته‌رفته این کم‌برآوردی رفع شده،





شکل ۵- نمودارهای سری زمانی تبخیر- تعرق مرجع برای بهترین و ضعیف‌ترین عملکرد در ایستگاه‌های مورد مطالعه

کاهش یابد یا به شکل متفاوتی بروز کند. این جزیره همچنین از بادهای دریایی منظمی بهره می‌برد که می‌توانند به میزان زیادی بر فرآیندهای تبخیر و تعرق اثرگذار باشند، زیرا حرکت باد می‌تواند بخار آب را جابجا کند و تعادل رطوبت-دما را تغییر دهد. علاوه بر این، فعالیت‌های انسانی نیز ممکن است در کیش تفاوت‌هایی در نتایج به وجود آورند. توسعه سریع در زمینه‌های گردشگری و ساخت‌وساز در کیش منجر به تغییر کاربری زمین‌ها و ایجاد میکروکلیم‌های جدیدی شده است که می‌توانند تأثیر شگرفی بر داده‌های جمع‌آوری شده از تبخیر و تعرق داشته باشند. مثلاً، استفاده گسترده از سامانه‌های آبیاری مصنوعی در مناطق توسعه‌یافته ممکن است منجر به افزایش تبخیر-تعرق شود درحالی‌که در مناطق بکر و طبیعی این احتمال کمتر است. به نظر می‌رسد که این عوامل اقلیمی و انسانی می‌توانند توجیه‌کننده تفاوت‌های مشاهده‌شده باشند.

همچنین، علت تفاوت‌های مشاهده‌شده بین ترکیب‌های مختلف در ایستگاه کیش نسبت به ایستگاه‌های دیگر ممکن است به عوامل متعددی بستگی داشته باشد. ایستگاه کیش با توجه به موقعیت جغرافیایی خاص خود، یعنی واقع شدن در یک جزیره در خلیج فارس، دارای شرایط اقلیمی منحصربه‌فردی است که می‌تواند تأثیرات زیادی بر روی الگوهای تبخیر و تعرق داشته باشد. یکی از عوامل کلیدی در این زمینه، رطوبت نسبی بالای هوا در کیش به دلیل نزدیکی به دریا است. رطوبت بالا می‌تواند سرعت تبخیر را کاهش دهد و به نوبه خود تأثیر مستقیم بر نتایج مدل‌های پیش‌بینی تبخیر-تعرق بگذارد. عامل دیگر، دمای هوای بالای کیش است که به‌خصوص در فصل تابستان می‌تواند به شدت بر الگوهای تبخیری تأثیرگذار باشد. دماهای بالا معمولاً باعث افزایش سرعت تبخیر می‌شوند، اما در مناطقی با رطوبت بالای محیطی، این افزایش ممکن است

با وجود این، برای اطمینان از صحت این فرضیه‌ها و ارائه راهکارهای مناسب، لازم است که پژوهش بیشتری انجام گیرد. می‌توان از مطالعات میدانی، مدل‌سازی‌های اقلیمی خاص و تجزیه و تحلیل‌های آماری پیشرفته‌تر استفاده کرد تا به درک بهتری از این پدیده دست یافت. برای مثال، استفاده از مدل‌های منطقه‌ای که بتوانند به‌وضوح تأثیرات میکروکلیمایی را بر تبخیر و تعرق بررسی کنند، می‌تواند به تحلیل دقیق‌تری منجر شود. علاوه بر این، ارزیابی نتایج حاصل از این مطالعه با نتایج تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که مدل‌های به کار برده شده در تحقیق حاضر دقت بالایی را در برآورد تبخیر- تعرق مرجع داشته‌اند. برای مثال، پناهی و همکاران (۲۰۱۶) در تحقیقی به برآورد تبخیر- تعرق مرجع در ایستگاه همدیدی تبریز با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی پرداختند. نتایج مربوط به برآورد هفت‌روزه نشان داد که مدل شبکه عصبی MLP با داشتن RMSE برابر با ۳/۸۸ میلی‌متر در هفته دارای بیش‌ترین دقت نسبت به سایر مدل‌ها بوده است. صمدیان فرد و همکاران (۲۰۲۴) در تحقیقی به پیش‌بینی تبخیر- تعرق مرجع روزانه در دو ایستگاه آستارا و اصفهان با روش‌های درختی، رگرسیون بردار پشتیبان و رگرسیون فرآیند گاوسی پرداختند. ارزیابی مدل‌های به کار رفته در ایستگاه آستارا نشان داد که سناریو پنجم مدل درختی با داشتن مقدار خطای ۱/۴۲ میلی‌متر در روز، بالاترین دقت را نسبت به سایر مدل‌ها داشتند. در ایستگاه اصفهان نیز سناریو هشتم مدل درختی با داشتن مقدار ۱/۸۶ میلی‌متر در روز، بهترین عملکرد را نسبت به سایر مدل‌ها داشتند.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، عملکرد دو روش مدل‌سازی شامل مدل پرسپترون چندلایه (MLP) و مدل ترکیبی پرسپترون چندلایه بهینه‌سازی شده با الگوریتم گرادیان نزولی تصادفی (SGD-MLP) در برآورد تبخیر- تعرق

مرجع روزانه در سه اقلیم متفاوت کشور (نیمه‌حاره‌ای مرطوب، نیمه‌خشک و بیابانی) مورد ارزیابی قرار گرفت. داده‌های هواشناسی روزانه در طول دوره ۲۳ ساله (۱۴۰۲-۱۳۷۹) در ایستگاه‌های کیش، گرگان و شیراز جمع‌آوری و تحت پنج سناریو مختلف ورودی قرار گرفتند. معیارهای آماری مختلفی نظیر ضریب همبستگی (R)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب نش-ساتکیلف (NSE) و شاخص توافق ویلموت (d) برای ارزیابی دقت مدل‌ها استفاده شدند. نتایج حاصل نشان داد که در بین تمام سناریوها، سناریو پنجم که دارای کامل‌ترین مجموعه متغیرهای ورودی شامل دما، رطوبت، سرعت باد، ساعات آفتابی و دمای خاک بود، بهترین عملکرد را در هر دو مدل منفرد و ترکیبی داشته است. مقایسه مستقیم مدل‌ها نیز نشان داد که استفاده از روش بهینه‌سازی SGD در کنار MLP منجر به بهبود قابل توجه دقت مدل شده و خطای برآورد را کاهش داده است. به‌طوری‌که در ایستگاه شیراز، مدل ترکیبی با داشتن ضریب همبستگی ۰/۹۸ و RMSE معادل ۱/۰۴ میلی‌متر در روز، بهترین عملکرد را در بین تمام سناریوها و ایستگاه‌ها داشته است. در مجموع، نتایج این پژوهش نشان داد که مدل ترکیبی MLP-SGD عملکرد قابل قبولی در برآورد تبخیر- تعرق مرجع روزانه دارد و می‌تواند به‌عنوان یک ابزار قدرتمند در برنامه‌ریزی مدیریت آب کشاورزی و بهینه‌سازی مصرف آب در شرایط اقلیمی متنوع کشور مورد استفاده قرار گیرد. همچنین، این مطالعه اهمیت استفاده از متغیرهای اقلیمی گسترده و روش‌های بهینه‌سازی را در بهبود دقت مدل‌های مورد استفاده در محاسبات هیدرولوژیکی نشان داد.

تعارض منافع

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

فهرست منابع

۱. میکائیلی، فاطمه و صمدیان فرد، سعید، ۱۴۰۲. کاربرد مدل‌های درختی و مبتنی بر کرنل در تعیین تبخیر و تعرق مرجع روزانه در دو منطقه مرطوب و خشک ایران. نشریه دانش آب و خاک، ۳۳ (۲)، صص. ۳۵-۵۱.

DOI: 10.22034/WS.2021.45876.2415

2. Allen, R.G., Pereira L.S., Raes, D. and Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper no. 56, FAO, Rome, Italy.
3. Antonopoulos, V.Z. and Antonopoulos, A.V. 2017. Daily reference evapotranspiration estimates by artificial neural networks technique and empirical equations using limited input climate variables. Computers and Electronics in Agriculture, 132: pp.86-96. DOI:10.1016/j.compag.2016.11.011
4. Bonnabel, S. 2013. Stochastic gradient descent on Riemannian manifolds. IEEE Transactions on Automatic Control, 58(9):2217-2229. DOI:10.1109/TAC.2013.2254619
5. Cai, J., Liu, Y., Lei, T. and Pereira, L.S. 2007. Estimating reference evapotranspiration with the FAO Penman-Monteith equation using daily weather forecast messages. Agricultural and Forest Meteorology 145(1-2):pp. 22-35. DOI: 10.1016/j.agrformet.2007.04.012
6. Dubey, S.R., Singh, S.K. and Chaudhuri, B.B. 2022. Activation functions in deep learning: A comprehensive survey and benchmark. Neurocomputing, 503: 92-108. DOI: 10.1016/j.neucom.2022.06.111
7. Durairaj, M. and Revathi, V. 2015. Prediction of heart disease using back propagation MLP algorithm. International Journal of Scientific and Technology Research, 4(8): pp.235-239. ISSN 2277-8616
8. Gibson, J., Holmes, T., Stadnyk, T., Birks, S., Eby, P. and Pietroniro, A. 2021. Isotopic constraints on water balance and evapotranspiration partitioning in gauged watersheds across Canada. Journal of Hydrology: Regional Studies, 37: 100878. DOI: 10.1016/j.ejrh.2021.100878
9. Hami, Kouchebagi, M., Nazemi, A., Sadraddini, A. and Delirhasannia, R. 2017. Calculation of the reference evapotranspiration based on the statistical analysis of air temperature (case study: Tabriz area). Water and Soil Science, 26(4.2), pp. 41-54.
10. Hu, Z., Bashir, R.N., Rehman, A.U., Iqbal, S.I., Shahid, M.M.A. and Xu, T. 2022. Machine learning based prediction of reference evapotranspiration (ET₀) using iot. IEEE Access, 10. DOI:10.1109/ACCESS.2022.3187528
11. Johnson, R. and Zhang, T. 2013. Accelerating stochastic gradient descent using predictive variance reduction. Advances in neural information processing systems 26, pp. 1-9.
12. Kazemi, M.H., Shiri, J., Marti, P. and Majnooni-Heris, A. 2020. Assessing temporal data partitioning scenarios for estimating reference evapotranspiration with machine learning techniques in arid regions. Journal of Hydrology, 590: 125252. DOI:10.1016/j.jhydrol.2020.125252
13. Luo, Y., Gao, P. and Mu, X. 2021. Influence of meteorological factors on the potential evapotranspiration in Yanhe River Basin, China. Water, 13(9): 1222. DOI: 10.3390/w13091222
14. Ma, L., Li, Y., Wu, P., Zhao, X., Chen, X. and Gao, X. 2020. Coupling evapotranspiration partitioning with water migration to identify the water consumption characteristics of wheat and maize in an intercropping system. Agricultural and Forest Meteorology, 290: 108034.

DOI: 10.1016/j.agrformet.2020.108034

15. Mohammed, S.A., Al-Haddad, L.A., Alawee, W.H., Dhahad, H.A., Jaber, A.A. and Al-Haddad, S.A. 2023. Forecasting the productivity of a solar distiller enhanced with an inclined absorber plate using stochastic gradient descent in artificial neural networks. *Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design*, 1-11. **DOI:10.1007/s41939-023-00309-y**
16. Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D., Veith, T.L. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50: 885-900.
17. Panahi, S., Karbasi, M. and Nikbakht, J. 2016. Forecasting of reference evapotranspiration using MLP, RBF, and SVM neural networks. *Environment and Water Engineering*, 2(1), pp.51-63. **DOI: 10.29252/jwmr.9.18.157**
18. Pereira, L., Paredes, P. and Jovanovic, N. 2020. Soil water balance models for determining crop water and irrigation requirements and irrigation scheduling focusing on the FAO56 method and the dual Kc approach. *Agricultural water management*, 241: 106357.
19. Popescu, M.C., Balas, V.E., Perescu-Popescu, L. and Mastorakis, N. 2009. Multilayer perceptron and neural networks. *WSEAS transactions on circuits and systems*, 8(7), pp.579-588.
20. Samadianfard, S., Rousta, Z. and Sharafi, M. 2024. Prediction of daily reference evapotranspiration with M5P, Gaussian process regression and support vector regression methods. *Water and Soil Science*, 34(2), pp.156-176.
21. Shi, H., Yang, N., Tang, H. and Yang, X. 2022. Stochastic gradient descent with adaptive batch size for every parameter. *Mathematics*, 10(6): 863.
22. Subasi, A., El-Amin, M.F., Darwich, T and Dossary, M., 2022. Permeability prediction of petroleum reservoirs using stochastic gradient boosting regression. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, pp.1-10.
23. Tabari, H. and Hosseinzadeh, Talaee, P. 2013. Multilayer perceptron for reference evapotranspiration estimation in a semiarid region. *Neural Computing and Applications*, 23, pp. 341-348.
24. Talebi, H., Samadianfard, S. and Valizadeh, Kamran, K. 2023. Estimation of daily reference evapotranspiration implementing satellite image data and strategy of ensemble optimization algorithm of stochastic gradient descent with multilayer perceptron. *Environment, Development and Sustainability*: pp.1-23.
25. Vaz, P.J., Schütz, G., Guerrero, C. and Cardoso, P.J. 2022. Hybrid neural network based models for evapotranspiration prediction over limited weather parameters. *IEEE Access*, 11, pp. 963-976.

بررسی اثر تغییر اقلیم بر عملکرد دانه و زیست توده گیاه گندم در دو سطح تنش شوری و آبی

فاطمه حاجی آبادی، فرزاد حسن پور، مصطفی یعقوب زاده*  و حسین حمای

دانش آموخته دکتری آبیاری و زهکشی، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل و کارشناس ارشد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند.

fhajiabadi@birjand.ac.ir

دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل.

hassanpourir@uoz.ac.ir

دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، عضو گروه پژوهشی خشکسالی و تغییر اقلیم، دانشگاه بیرجند.

M.yaghoobzadeh@birjand.ac.ir

دانشیار گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند.

hhammami@birjand.ac.ir

دریافت: اسفند ۱۴۰۳ و پذیرش: تیر ۱۴۰۴

چکیده

استفاده از مدل‌های گیاهی در تعیین عملکرد گیاهان و زمان‌بندی متناسب آبیاری از مدیریت‌های کارآمد در زمینه توسعه پایدار منابع آب در کشاورزی است. هدف از این پژوهش، بررسی اثر تغییر اقلیم بر عملکرد دانه و زیست توده گیاه گندم در دو سطح تنش شوری (۱/۶ و ۶/۰ dS/m) و پنج سطح تیمار آبی (دیم، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ درصد نیازآبی) با استفاده از مدل گیاهی AquaCrop در دوره‌های پایه (۲۰۰۴-۱۹۷۵) و آبی (۲۰۲۵-۲۰۵۴) در منطقه بیرجند واقع در استان خراسان جنوبی است. برای پیش‌بینی عوامل بارش و دمای حداکثر و حداقل در دوره آبی در محدوده مورد مطالعه از پنج مدل تغییر اقلیم IPSL-CM5A-LR، MIROC-ESM، CSIRO-MK3.6، HADGEM2-ES، GFDL-ESM2M تحت سناریوهای انتشار RCP4.5 و RCP8.5 استفاده شد که از این میان مدل CSIRO-MK3.6 با استفاده از روش وزن‌دهی و معیارهای عملکردی، به عنوان مدل برتر انتخاب شد. نتایج نشان داد که مقدار بارش پیش‌بینی شده برای دوره آبی نسبت به دوره پایه، در هر دو سناریو انتشار کاهش داشت ولی میانگین سالانه دمای حداکثر و حداقل در دوره آبی نسبت به دوره پایه در هر دو سناریو انتشار، افزایش یافت. بر اساس نتایج، تیمار دیم در دوره پایه و آبی، عملکرد دانه گندم نداشته است، این در حالی است که بیشترین میزان عملکرد دانه مربوط به تیمارهای ۱۰۰٪ و ۱۲۵٪ نیازآبی گیاه به ترتیب برای مقادیر سناریو RCP4.5 برابر با ۳/۸۳۴ و ۴/۰۳۲ تن در هکتار و برای سناریو RCP8.5 برابر با ۳/۸۲۲ و ۴/۱۷ تن در هکتار است. در نهایت مقادیر کاهش عملکرد دانه با شاخص خشکسالی SMDI مقایسه شد و نتایج نشان داد که در سطوح تنش شوری و آبی زیاد، بیشترین تاثیر خشکسالی مشاهده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: خشکسالی، شاخص SMDI، مدل‌های AOGCM، مدل AquaCrop

* - آدرس ایمیل نویسنده مسئول: M.yaghoobzadeh@birjand.ac.ir



مقدمه

بخش کشاورزی در اقتصاد ملی و تأمین غذای جامعه نقش اساسی دارد و در راستای دستیابی به پایداری در این بخش، ضروری است از منابع و ابزارهای تولید در این بخش به بهترین شکل ممکن استفاده شود. تا ضمن کاهش در مصرف این منابع، سودآوری و رفاه کشاورزان نیز افزایش یابد (مهاجرانی و همکاران، ۲۰۱۱). با توجه به اقلیم خشک و نیمه خشک ایران، آب به عنوان یکی از مهم ترین منابع و به عنوان یک عامل اصلی محدودکننده تولید، نقش مهمی را در تعیین نوع فعالیت های زراعی ایفا می کند. از این رو، ارزیابی آب مورد نیاز سامانه های کشاورزی همواره از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است (اسامو^۱ و همکاران، ۲۰۰۵). با توجه به اینکه خشکسالی یکی از دلایل مهم کاهش عملکرد گیاه گندم است. بدیهی است همواره تقاضای آب برای محصولات کشاورزی افزایش می یابد و سؤال اساسی این است که چگونه می توان تولیدات کشاورزی را همراه با استفاده پایدار از منابع آبی و حفاظت از آن افزایش داد (دوگان و فولر، ۲۰۰۶).^۲ یک فن آوری برای مدیریت کارآمد منابع آب آبیاری استفاده از مدل های جدید در تعیین نیاز آبی و زمان بندی آبیاری در کنار فعالیت هایی در راستای اصلاح گیاهان، از مدیریت های کارآمد در زمینه توسعه پایدار منابع آب در کشاورزی است (سلیمانی، ۱۳۹۵). استفاده از مدل های شبیه سازی، محدودیت های موجود در تحقیقات میدانی را تا حد قابل ملاحظه ای کاهش داده و آن ها را تبدیل به ابزاری توانا در بررسی و تحلیل سناریوهای مختلف و انتخاب مدیریت مناسب آب کرده است (کروس و همکاران، ۲۰۰۸).

دتوری و همکاران (۲۰۱۱) از مدل CERES-Wheat برای شبیه سازی تولید فنولوژی گندم در ساردینیا^۳ جنوبی واقع در ایتالیا استفاده نمودند. مدل در برآورد عملکرد دانه و تاریخ گلدهی نتایج خوبی را نشان داد که با نتایج مطالعات دیگر که روی گندم انجام شده بود، مطابقت

داشت؛ اما نتایج برآورد وزن هزار دانه و تعداد دانه مطابقت خیلی خوبی را نشان نداد.

قوام سعیدی و همکاران (۱۳۹۹) واسنجی و صحت سنجی عملکرد و اجزای عملکرد گندم تحت شوری های مختلف و تحت شرایط تنش آبی به کمک مدل گیاهی DSSAT بررسی کردند. نتایج آن ها نشان داد که مدل DSSAT به خوبی مراحل فنولوژیکی، عملکرد و اجزای عملکرد را برای منطقه بیرجند شبیه سازی نموده است.

اثر تنش رطوبتی بر عملکرد و صفات رشدی در سه رقم افق، روشن و نارین و واسنجی و صحت سنجی مدل گیاهی AQUACROP توسط قدیریان و همکاران (۱۳۹۹) انجام شد. با توجه به مقادیر شاخص های آماری محاسبه شده، می توان به این نتیجه رسید مدل کارایی قابل قبولی برای واسنجی ارقام مختلف گندم داشته است. این مهم به دلیل تعداد بالا و روزافزون ارقام مختلف گندم کاربرد بسیاری در منطقه دارد.

ون و همکاران (۲۰۲۳) نیز اثر تغییر اقلیم بر تاریخ کشت و نسبت کاشت را در سه مزرعه با استفاده از مدل AquaCrop و داده های گزارش پنجم تغییر اقلیم بررسی کردند. نتایج آن ها نشان داد استفاده از تاریخ کشت و نسبت کاشت مناسب می تواند یک راهکار برای مقابله با تغییرات آب و هوایی باشد. مقدم و همکاران (۲۰۲۳) نیز در دو مزرعه در کرج و خمین از ایران اثر تغییر اقلیم بر عملکرد گندم زمستانه تحت تیمارهای کودی با استفاده از داده های گزارش پنجم تغییر اقلیم و مدل APSIM انجام دادند. نتایج آن ها نشان داد استفاده از نیتروژن و کود در مناطق خشک می تواند در سازگاری با خشکسالی مؤثر باشد.

با توجه به اینکه در خصوص ارتباط تأثیر تغییر اقلیم بر خشکسالی کشاورزی با عملکرد گیاه گندم در دوره آبی با استفاده از داده های تغییر اقلیم تحقیقات زیادی انجام نشده باشد، از این رو در این پژوهش سعی شده است، ارتباط عملکرد دانه و زیست توده گیاه گندم در تنش های شوری و

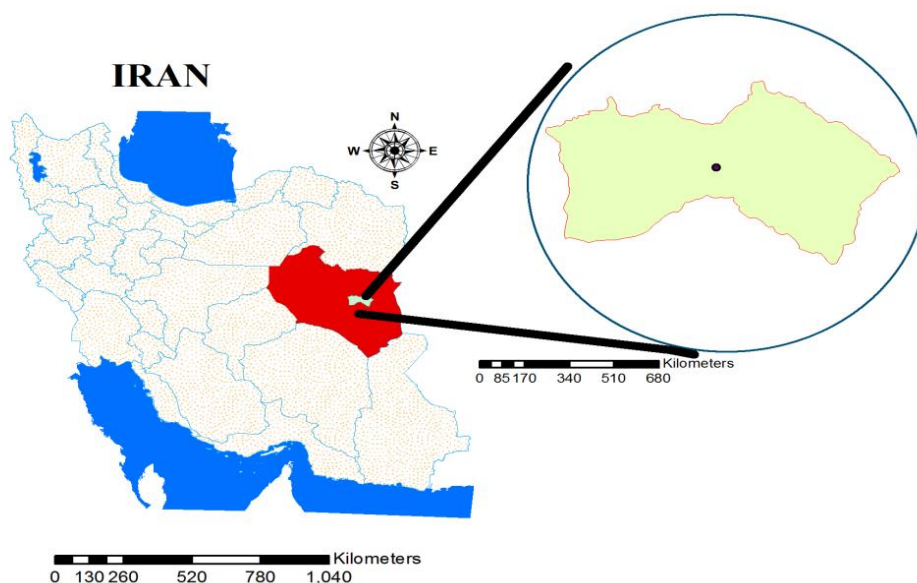
آبی مختلف در منطقه بیرجند با نتایج حاصل از خشکسالی کشاورزی تعیین شده به کمک شاخص SMDI در حال و آینده بررسی شود. در این بررسی با استفاده از مدل واسنجی و صحت سنجی شده AquaCrop، مقادیر عملکرد برای دوره آبی محاسبه شود و روند کاهش عملکرد دانه با مقادیر خشکسالی کشاورزی تعیین شده در آینده مقایسه شد. در این تحقیق سعی شد عملکرد دانه و زیست توده گندم در آینده به دست آورد و از نظر خشکسالی نیز بررسی نمود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

در این پژوهش، مزرعه گندم در دشت بیرجند واقع در استان خراسان جنوبی مورد بررسی قرار گرفته

است. منطقه مورد مطالعه دشت بیرجند در محدوده ۵۹ درجه و ۱۲ ثانیه طول جغرافیایی و ۳۲ درجه و ۵۳ ثانیه عرض جغرافیایی قرار گرفته است. وسعت این دشت ۳۴۸۹۳ کیلومتر مربع است. آب و هوای این دشت بیابانی و نیمه بیابانی بوده و دارای زمستان‌ها سرد و تابستان‌های خشک و گرم است. بارش سالانه ۱۵۲ میلی‌متر و ارتفاع از سطح دریا ۱۴۹۱ متر است. بر اساس اطلاعات ایستگاه بیرجند، میانگین حداقل و حداکثر دمای سالانه بیرجند به ترتیب ۸ و ۲۴ درجه سانتی‌گراد است و همچنین میانگین سالانه رطوبت نسبی این شهر ۳۶ درصد است. شکل (۱) نمایش شماتیکی از محدوده مطالعاتی دشت بیرجند در سطح کشور است.



شکل ۱- نمایش شماتیکی از محدوده مطالعاتی دشت بیرجند

جدول ۱- مشخصات جغرافیایی ایستگاه سینوپتیک بیرجند

نام ایستگاه	کد ایستگاه	نوع ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا
بیرجند	40809	سینوپتیک	59/12	32/88	1480

روش پژوهش

در این پژوهش به منظور بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر رشد و نمو گندم آبی و دیم از مدل‌های AOGCM و مدل گیاهی AquaCrop استفاده شد. برای تولید سناریوهای دما و بارش ماهانه منطقه برای دوره‌های آبی از

میان پنج مدل گردش کلی IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM, CSIRO-MK3.6, HADGEM2-ES, GFDL-ESM2M مدل CSIRO-MK3.6 با استفاده از روش وزن‌دهی و معیارهای عملکردی

(R^2 , RMSE, NSE^۴) به عنوان مدل برتر در محدوده مطالعاتی انتخاب شد. خروجی مدل CSIRO-MK3.6 تحت دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5 مربوط به گزارش پنجم ارزیابی تغییر اقلیم (IPCC^۶) استفاده شد. یعقوب زاده (۲۰۲۲) مدل CSIRO-MK3.6.0 رو جزو مدل های مهم در تعیین بارش تعیین کرد. دوره آماری (۲۰۰۴-۱۹۷۵) به عنوان دوره پایه و همچنین دوره (۲۰۲۵-۲۰۵۴) به عنوان دوره آتی انتخاب و در ادامه برای تولید داده های روزانه و ریزمقیاس شده، از مدل LARS-WG استفاده شد. آزمایش های مزرعه ای در قالب بلوک های تصادفی و طرح فاکتوریل با چهار سطح تنش آبی (۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ درصد) و دو سطح شوری (۱/۶ و ۶ dS/m) در محل مزرعه در طی دو سال انجام شد (جدول ۲). به منظور اطمینان از صحت عملکرد مدل، فرآیند واسنجی باید با هدف انطباق بین داده های مشاهده ای و شبیه سازی شده صورت گیرد. در این پژوهش، از داده های مزرعه ای اندازه گیری شده در سال زراعی ۹۶-۱۳۹۵ برای واسنجی مدل استفاده شد که در ابتدا مدل برای هر تیمار شوری و خشکی به صورت هم زمان برای داده های سال اول، واسنجی و سپس به طور هم زمان برای تیمارهای شوری و خشکی برای داده های سال دوم صحت سنجی شد. ابتدا برای تیمار شوری S_1 و سطح آبیاری ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه (S_1I_2) که تیمار شاهد بود،

فایل های ورودی مربوط به مدل را وارد کرده و مدل را اجرا نموده و سپس نتایج خروجی را با داده های مزرعه ای مقایسه شده و آنالیز حساسیت مدل نسبت به پارامترهای ورودی انجام شد. همچنین فایل های مربوط به دیگر تیمارها را وارد مدل کرده و سپس مدل با تغییر بعضی از پارامترهای حساس که در مزرعه اندازه گیری نشده بود (پارامترهای گیاهی متغیر)، به طور هم زمان برای همه تیمارها واسنجی شد. به طوری که خطای نسبی بین عملکرد اندازه گیری و شبیه سازی شده حداقل شود. به عبارتی، مدل با استفاده از تیمارهای سال اول واسنجی و با استفاده از تیمارهای سال دوم صحت سنجی شد. همچنین واسنجی مدل برای پارامتر رطوبت خاک با استفاده از داده های اندازه گیری رطوبت خاک نیز انجام شد. پس از واسنجی و ارزیابی مدل گیاهی، برای برآورد خشکسالی کشاورزی (SMDI) و مقایسه آن با عملکرد گیاه گندم در دوره پایه، داده های رطوبت خاک با مدل AquaCrop شبیه سازی شد. سپس برای شبیه سازی رطوبت خاک در دوره آتی از سناریوهای انتشار RCP4.5 و RCP8.5 و مدل CSIRO-MK3.6 استفاده شد و در نهایت شاخص خشکسالی کشاورزی (SMDI) در دوره آتی تعیین شد و با شبیه سازی عملکرد گیاه گندم در دوره آتی مقایسه شد.

جدول ۲- مقادیر تنش شوری و آبی در رژیم های مختلف آبیاری

رژیم آبیاری	S_1I_4	S_1I_3	S_1I_2	S_1I_1	S_2I_4	S_2I_3	S_2I_2	S_2I_1	تنش آبی	Rainfed
توضیحات	%50	%75	%100	%125	%50	%75	%100	%125		دیم
	1.6 dS/m	1.6 dS/m	1.6 dS/m	1.6 dS/m	6 dS/m	6 dS/m	6 dS/m	6 dS/m	تنش شوری	

$$SMDI_j = \frac{\sum_{t=1}^j SD_t}{(25t + 25)} \quad (۳)$$

به دلیل اینکه اندازه‌گیری رطوبت خاک به صورت هفته به هفته برای یک دوره آماری بلندمدت برای تعیین خشکسالی سبب می‌شود که تعیین خشکسالی با داده‌های زیاد روبرو شود. بدین منظور بر اساس روش پالمر شاخص کمبود رطوبت خاک (SMDI) اصلاح شده است.

$$SMDI_j = SMDI_{j-1} + \Delta SMDI_j \quad (۴)$$

برای اینکه شدت خشکسالی برای هر ماه محاسبه شود، در معادلات فوق $i=1$ و $t=1$ قرار داده شد و معادله بعد از یک سری محاسبات به شکل زیر خلاصه شد.

$$SMDI_j = 0.5 \times SMDI_{j-1} + \frac{SD_j}{50} \quad (۵)$$

مدل و سناریوهای مورد استفاده

در حال حاضر معتبرترین ابزار برای تولید سناریوهای تغییر اقلیم، مدل‌های GCM است. هیات بین-الدول تغییر اقلیم در تدوین گزارش پنجم خود از سناریوهای جدید تحت عنوان RCP^۸ استفاده نموده است. سناریوهای RCP شامل یک سناریوی کاهشی سختگیرانه (RCP2.6)، دو سناریوی حد واسطه (RCP4.5 و RCP6) و یک سناریوی بدبینانه (RCP8.5) با تولید گازهای گلخانه‌ای بسیار بالا می‌باشند (هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم، ۲۰۱۳). خصوصیات مدل‌ها و سناریوهای مورد استفاده در این تحقیق، در جدول (۳) ارائه شده است.

شاخص خشکسالی کمبود رطوبت خاک^۷ (SMDI)

این شاخص بر مبنای مجموع رطوبت خاک به‌طور روزانه برای یک سال استوار است و تنها فاکتور اقلیمی مورد استفاده در این شاخص، داده‌های رطوبت خاک است. این داده‌ها به کمک مدل شبیه‌سازی برای دوره پایه محاسبه شده و شاخص کمبود رطوبت خاک به طریقه زیر محاسبه می‌شود. (یعقوب زاده، ۱۳۹۴)

$$SD_{i,j} = \frac{SW_{i,j} - MSW_j}{MSW_j - \min SW_j} \times 100 \quad (۱)$$

$$\text{if } SW_{i,j} \leq MSW_j$$

$$SD_{i,j} = \frac{SW_{i,j} - MSW_j}{\max SW_j - MSW_j} \times 100$$

$$\text{if } SW_{i,j} > MSW_j$$

(۲)

در این روابط، $SD_{i,j}$: درصد کمبود رطوبت خاک، $SW_{i,j}$: میانگین رطوبت خاک در هفته در پروفیل خاک، MSW_j : متوسط درازمدت رطوبت قابل استفاده خاک در پروفیل خاک، $\max SW_j$: حداکثر درازمدت رطوبت قابل استفاده خاک در پروفیل خاک و $\min SW_j$: حداقل درازمدت رطوبت قابل استفاده خاک در پروفیل خاک، i : نشان‌دهنده تعداد هفته‌ها و j : نشان‌دهنده تعداد سال‌ها است.

درصد کمبود رطوبت خاک از ۱۰۰ تا ۱۰۰- متغیر است. در ۱۰۰ خاک مرطوب‌ترین و در ۱۰۰- خاک خشک‌ترین وضعیت را داراست. شاخص کمبود رطوبت خاک SMDI از رابطه زیر برای هر هفته بدست می‌آید.

جدول ۳- خصوصیات مدل و سناریوهای انتشار مورد استفاده در این تحقیق

نام مدل	مخفف مدل	کشور و گروه مؤسس	قدرت تفکیک (طول*عرض)	سناریوهای انتشار مورد استفاده
CSIRO-MK3.6.0	CSIRO-QCCCCE	استرالیا (Common wealth Scientific and Industrial Research Organization)	1.875×1.86	RCP4.5&RCP8.5
GFDL-ESM2M	NOAA-GFDL	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory USA	2.5×2	RCP4.5&RCP8.5
HADGEM2-ES	INPE	National Institute For Space Research Brazil	1.875×1.25	RCP4.5&RCP8.5
MIROC-ESM	MIROC	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology Japan	1.77×2.81	RCP4.5&RCP8.5
IPSL-CM5A-LR	IPSL	Institut Pierre Simon Laplace France	1.875×3.75	RCP4.5&RCP8.5

مدل ریزمقیاس نمایی LARS-WG

خروجی مدل های AOGCM را نمی توان به طور مستقیم در مطالعات مختلف به منظور پیش بینی و ارزیابی پیامدهای تغییر اقلیم در مقیاس منطقه ای استفاده کرد، به همین علت از روش های ریزمقیاس نمایی برای رفع این مشکل استفاده می شود (یعقوب زاده و همکاران، ۱۳۹۵). برای ریزمقیاس نمایی خروجی های مدل های گردش کلی و تولید سری زمانی بارش و دما برای دوره آتی از مدل آماری LARS-WG استفاده می شود. این مدل یکی از مشهورترین مدل های مولد داده های تصادفی وضع هوا است که می تواند برای شبیه سازی داده های اقلیمی (بارش روزانه، دمای حداکثر و حداقل) در یک ایستگاه استفاده شود (Fan et al., 2021). LARS-WG برای مدل سازی متغیرهای هواشناسی، از توزیع های آماری پیچیده بهره می برد؛ بنابراین، مدل یادشده برای مدل سازی طول دوره های خشک، تر، بارش روزانه و سری های تابش دارای توزیع نیمه تجربی است. این مدل با دریافت فایل محتوای رفتار آب و هوای گذشته ایستگاه و سناریوی تغییر اقلیم، مقادیر روزانه دمای حداقل، حداکثر و بارش را در آینده پیش بینی می کند (بهلمی و مولی، ۱۹۸۰).

ارزیابی مدل

برای ارزیابی مدل، از تحلیل خطاهای باقیمانده و اختلاف بین مقادیر اندازه گیری و پیش بینی شده استفاده شد. آماره های لازم برای این منظور، از شاخص آماری ریشه دوم میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تبیین (R^2) استفاده شده است:

$$RMSE = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right)^{1/2} \times \left(\frac{100}{\bar{O}} \right) \quad (۶)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2} \quad (۷)$$

در این معادلات O و P: به ترتیب مقدار عملکرد مشاهده شده و پیش بینی شده از هر تیمار، $\bar{O}$: متوسط عملکرد اندازه گیری شده و n: تعداد مشاهدات هست.

نتایج و بحث

واسنجی و صحت سنجی مدل

مقدار RMSE رقم گندم سیروان در مرحله واسنجی و در مرحله اعتبارسنجی به ترتیب برابر با ۰/۱۸ و ۰/۲۰ به دست آمد که بر اساس این آماره، مدل سازی عملکرد محصول مطلوب است. شاخص R^2 در مرحله واسنجی و در مرحله اعتبارسنجی نزدیک به یک بود که نشان دهنده و مناسب مدل در برآورد عملکرد محصول است. فنگ و همکاران (۲۰۲۵) نیز دقت زیاد مدل

AquaCrop را در برآورد عملکرد گیاه در شرایط شوری و تنش به دست آوردند.

اثر تغییر اقلیم بر متغیرهای هواشناسی

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول (۵) در مجموع مشخص شد که مدل اقلیمی CSIRO-MK3.6 بین (۴) مدل موجود، دارای بیشترین وزن و کمترین خطای RMSE و همچنین بیشترین همبستگی با داده‌های بارش، دمای حداکثر و حداقل مشاهداتی ایستگاه بیرجند را دارا است و به‌عنوان مدل مناسب در این پژوهش انتخاب شد. برای تولید داده‌های اقلیمی و مشخص شدن تغییرات آن‌ها در دوره آتی، از مدل CSIRO-MK3.6.0 با دو سناریو انتشار RCP4.5 و RCP8.5 استفاده شد. یعقوب زاده (۲۰۲۲) مدل CSIRO-MK3.6.0 رو جزو مدل‌های مهم در تعیین بارش مؤثر تعیین کرد. پارامترهای اقلیمی

مورد استفاده در این تحقیق شامل دمای حداقل، حداکثر و بارش بوده که یکی از مهم‌ترین موارد تأثیرگذار بر رطوبت خاک می‌باشند. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول (۶) مشاهده می‌شود که مقدار بارش پیش‌بینی شده برای دوره آتی نسبت به دوره پایه، تحت هر دو سناریوی انتشار کاهش یافته است. همچنین طبق پیش‌بینی مدل اقلیمی CSIRO-MK3.6.0 سناریو RCP8.5 نسبت به RCP4.5 میانگین بارش کمتری را نشان می‌دهد. همچنین نتایج میانگین سالانه دمای حداکثر و حداقل در دوره پایه و آتی نشان می‌دهد که مقدار دمای حداکثر و حداقل در دوره آتی نسبت به دوره پایه تحت هر دو سناریو انتشار RCP4.5 و RCP8.5 افزایش داشته است. از طرفی به‌منظور مقایسه سناریوها، مقادیر سناریو RCP8.5 نسبت به سناریو RCP4.5، افزایش بیشتری در دما و کاهش بیشتری در بارش را نشان می‌دهد که بیانگر بحرانی بودن سناریو RCP8.5 در دوره آتی است.

جدول ۵ - مقایسه مقادیر آب‌وهوایی مدل‌های تغییر اقلیم با داده‌های ایستگاه سینوپتیک بیرجند

مدل	RMSE			R ²	
	بارش	دمای حداقل	دمای حداکثر	بارش	دمای حداقل
CSIRO-MK3.6	0.113	1.065	0.904	0.998	0.998
GFDL- ESM2M	0.132	1.045	1.044	0.997	0.998
IPSL-CM5A-LR	0.176	1.070	1.290	0.997	0.998
MIROC-ESM	0.182	1.031	0.99	0.997	0.998
HADGEM2-ES	0.201	1.070	0.965	0.997	0.998

جدول ۶- مقادیر متوسط سالانه پارامترهای اقلیمی در دوره پایه و آتی تحت دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5

سناریو	دمای حداکثر (C)	دمای حداقل (C)	بارش (mm)
دوره پایه	24.37	8.09	173.38
RCP4.5	26.99	10.91	171.11
RCP8.5	27.26	11.24	169.15

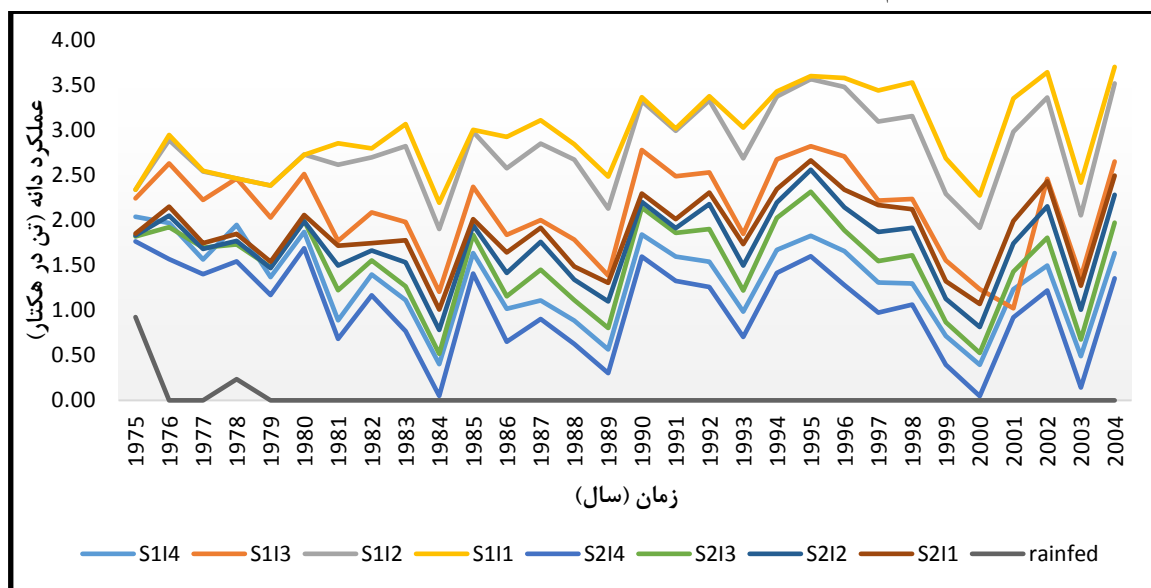
اثر تغییر اقلیم بر شاخص عملکرد دانه و زیست توده در دوره پایه

نتایج شاخص عملکرد دانه و زیست توده گیاه گندم برای تیمارهای مختلف در دوره پایه (۱۹۷۵-۲۰۰۴) در شکل (۵) و (۶) نشان می‌دهد که تیمار دیم (Rainfed)

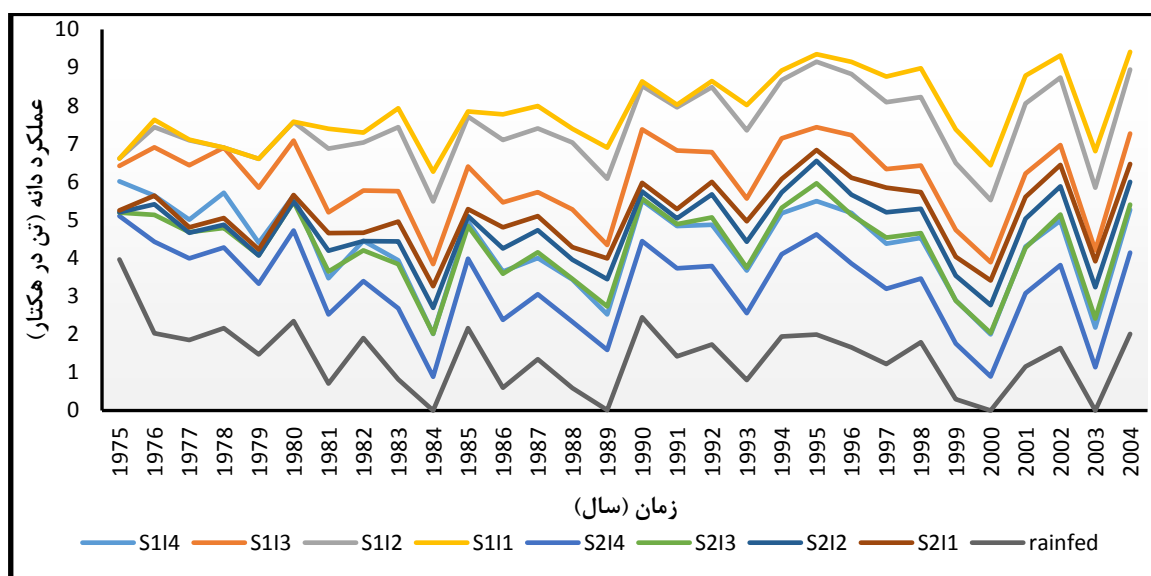
مقادیر عملکرد و زیست توده کمتری نسبت به سایر تیمارها دارد. همچنین مقدار شاخص عملکرد دانه در تیمار دیم جز در سال ۱۹۷۵ و ۱۹۷۸ در مابقی سال‌های دوره پایه صفر است. افزایش درصد آبیاری از سطح ۵۰ درصد به سطح ۱۲۵ درصد میزان نیاز گیاه، در هر دو سطح تنش شوری

عملکرد دانه و زیست توده و تیمار S1I1 با سطح تنش شوری ۱/۶ و سطح آبیاری ۱۲۵ درصد نیاز گیاه دارای بیشترین عملکرد دانه و زیست توده در بین سایر تیمارها هستند.

(۱/۶ و ۶ dS/m) تأثیر مستقیمی بر روی میزان عملکرد دانه و زیست توده دارد. همچنین افزایش سطح تنش شوری از ۱/۶ به ۶ باعث کاهش شاخص عملکرد دانه و زیست توده در تیمارهای مختلف می شود. در نهایت می توان مطرح نمود به ترتیب تیمارهای دیم (Rainfed) و S2I4 کمترین



شکل ۵- میزان عملکرد دانه تیمارهای مختلف در دوره پایه (۱۹۷۵-۲۰۰۴)



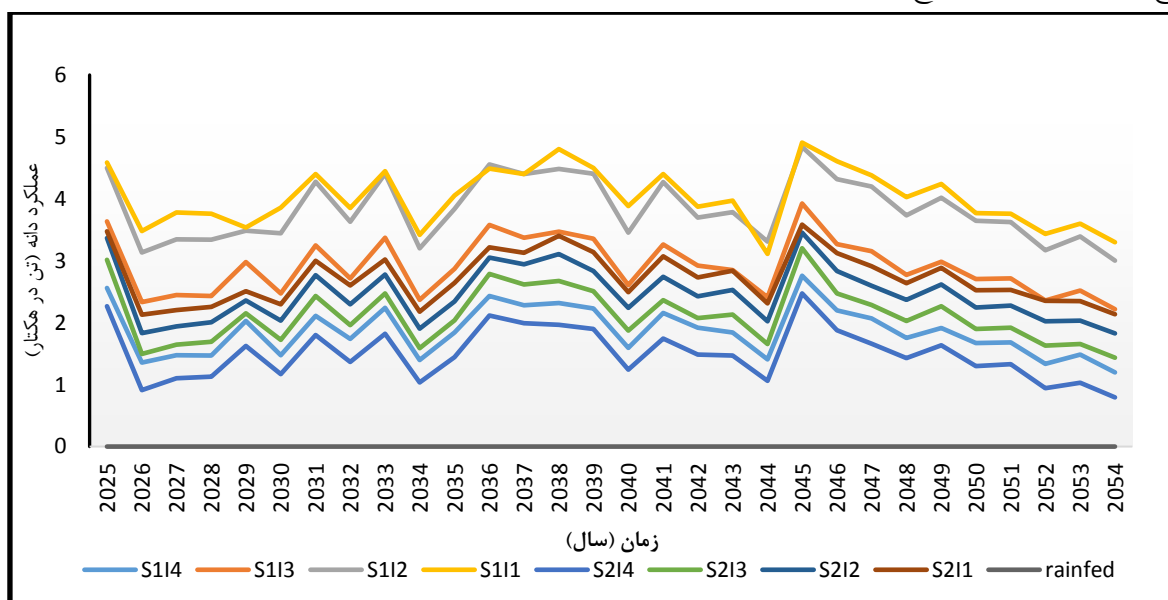
شکل ۶- میزان زیست توده تیمارهای مختلف در دوره پایه (۱۹۷۵-۲۰۰۴)

سناریو انتشار RCP4.5 برای تیمارهای مختلف در شکل های (۷) و (۸) نشان می دهد که در دوره آبی تیمار دیم (Rainfed) مقادیر عملکرد و زیست توده کمتری نسبت به سایر تیمارها دارد و مقدار شاخص عملکرد دانه در تیمار دیم در تمامی سال های دوره آبی صفر است.

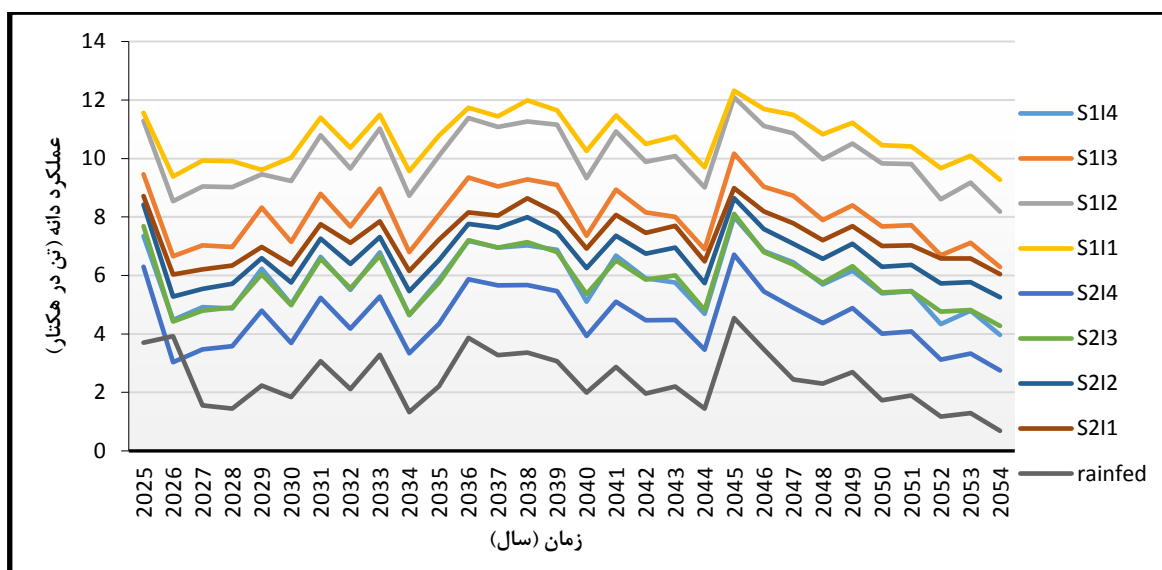
اثر تغییر اقلیم بر شاخص عملکرد دانه و زیست توده در دوره آبی تحت سناریو انتشار RCP4.5 مقادیر شاخص عملکرد دانه و زیست توده در دوره آبی با استفاده از مدل اقلیمی CSIRO-MK3.6 تحت

دارای بیشترین عملکرد دانه و زیست‌توده در بین سایر تیمارها هستند. همچنین مقایسه نتایج مربوط به شاخص عملکرد دانه و زیست‌توده در دوره آتی (۲۰۲۵-۲۰۵۴) تحت سناریو انتشار RCP4.5 با دوره پایه (۱۹۷۵-۲۰۰۴) نشان می‌دهد که شاخص عملکرد دانه و زیست‌توده گیاه گندم در دوره آتی تحت سناریو انتشار RCP4.5 نسبت به دوره پایه در بعضی سالها افزایش و در بعضی سالها کاهش یافته است.

افزایش درصد آبیاری از سطح ۵۰ درصد به سطح ۱۲۵ درصد میزان نیاز گیاه در هر دو سطح تنش شوری (۱/۶ و ۶) تأثیر مستقیمی بر روی میزان عملکرد دانه و زیست‌توده دارد. افزایش سطح تنش شوری از ۱/۶ به ۶ باعث کاهش شاخص عملکرد دانه و زیست‌توده در تیمارهای مختلف می‌شود. در مجموع، به ترتیب تیمارهای دیم (Rainfed) و S2I4 کمترین عملکرد دانه و زیست‌توده و تیمار S1I1 با سطح تنش شوری ۱/۶ و سطح آبیاری ۱۲۵ درصد نیاز گیاه



شکل ۷- شاخص عملکرد دانه در دوره آتی (۲۰۲۵-۲۰۵۴) با استفاده از مدل اقلیمی CSIRO-MK3.6 تحت سناریو انتشار RCP4.5 برای تیمارهای مختلف



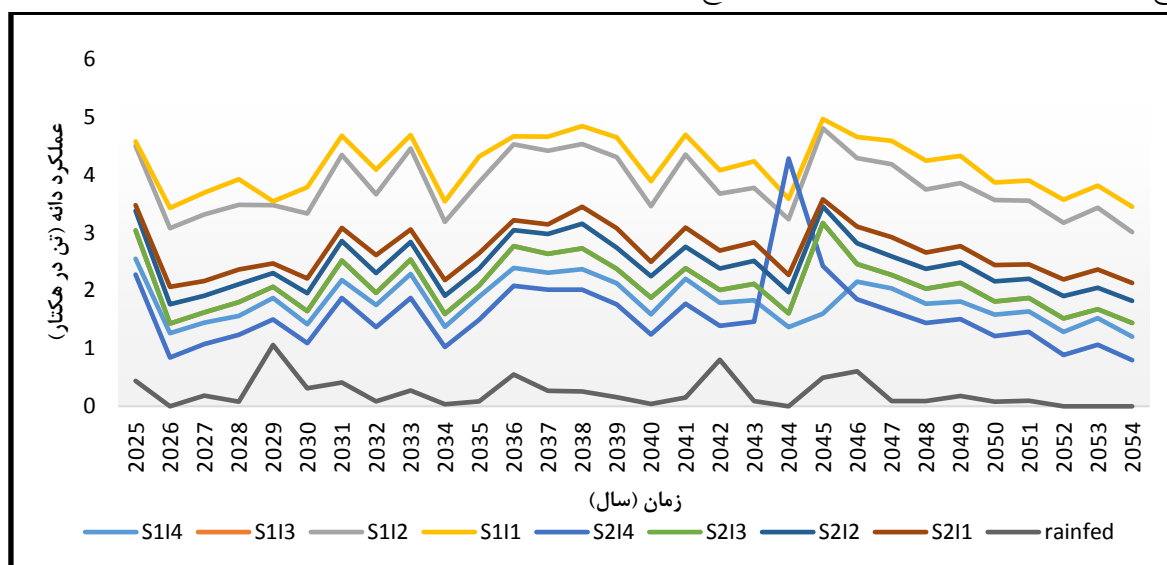
شکل ۸- شاخص زیست‌توده در دوره آتی (۲۰۲۵-۲۰۵۴) با استفاده از مدل اقلیمی CSIRO-MK3.6 تحت سناریو انتشار RCP4.5 برای تیمارهای مختلف

اثر تغییر اقلیم بر شاخص عملکرد دانه و زیست توده در

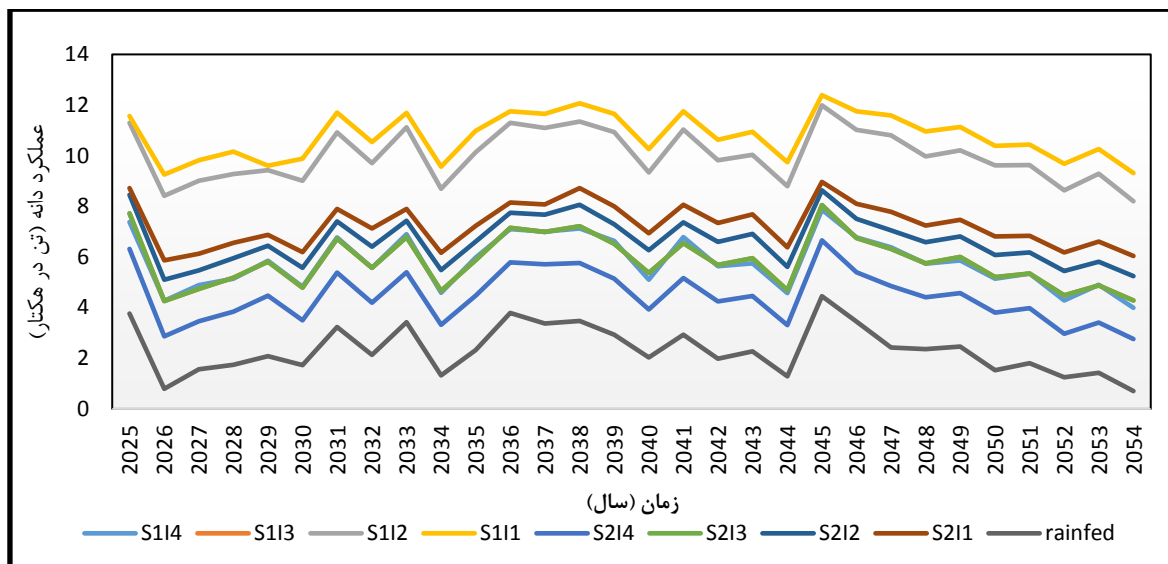
دوره آبی تحت سناریو انتشار RCP8.5

نتایج مربوط به شاخص عملکرد دانه و زیست توده در دوره آبی با استفاده از مدل اقلیمی CSIRO-MK3.6 تحت سناریو انتشار RCP8.5 برای تیمارهای مختلف در شکل های (۹) و (۱۰) نشان می دهد که در دوره آبی تیمار دیم (Rainfed) مقادیر عملکرد و زیست توده کمتری نسبت به سایر تیمارها دارد و مقدار شاخص عملکرد دانه در تیمار دیم تحت سناریو انتشار RCP8.5 نسبت به سناریو RCP4.5 افزایش قابل ملاحظه ای داشته است که علت آن می تواند کمتر بودن شدت خشکسالی در دوره آبی تحت سناریو RCP8.5 نسبت به RCP4.5 باشد (جدول ۶). افزایش درصد آبیاری از سطح ۵۰ درصد به سطح ۱۲۵ درصد میزان نیاز گیاه در هر دو سطح تنش

شوری (۱/۶ و ۶) تأثیر مستقیمی بر روی میزان عملکرد دانه و زیست توده دارد. همچنین، افزایش سطح تنش شوری از ۱/۶ به ۶ باعث کاهش شاخص عملکرد دانه و زیست توده در تیمارهای مختلف می شود. در مجموع می توان مطرح نمود به ترتیب تیمارهای دیم (Rainfed) و S₂I₄ کمترین عملکرد دانه و زیست توده و تیمار S₁I₁ با سطح تنش شوری ۱/۶ و سطح آبیاری ۱۲۵ درصد نیاز گیاه دارای بیشترین عملکرد دانه و زیست توده در بین سایر تیمارها هستند. همچنین مقایسه نتایج مربوط به شاخص عملکرد دانه و زیست توده در دوره آبی تحت سناریو انتشار RCP8.5 با دوره پایه نشان می دهد که شاخص عملکرد دانه و زیست توده گیاه گندم در دوره آبی تحت سناریو انتشار RCP8.5 نسبت به دوره پایه در بعضی سالها افزایش و در بعضی سالها کاهش یافته است.



شکل ۹- شاخص عملکرد دانه در دوره آبی (۲۰۲۵-۲۰۵۴) با استفاده از مدل اقلیمی CSIRO-MK3.6 تحت سناریو انتشار RCP8.5 برای تیمارهای مختلف

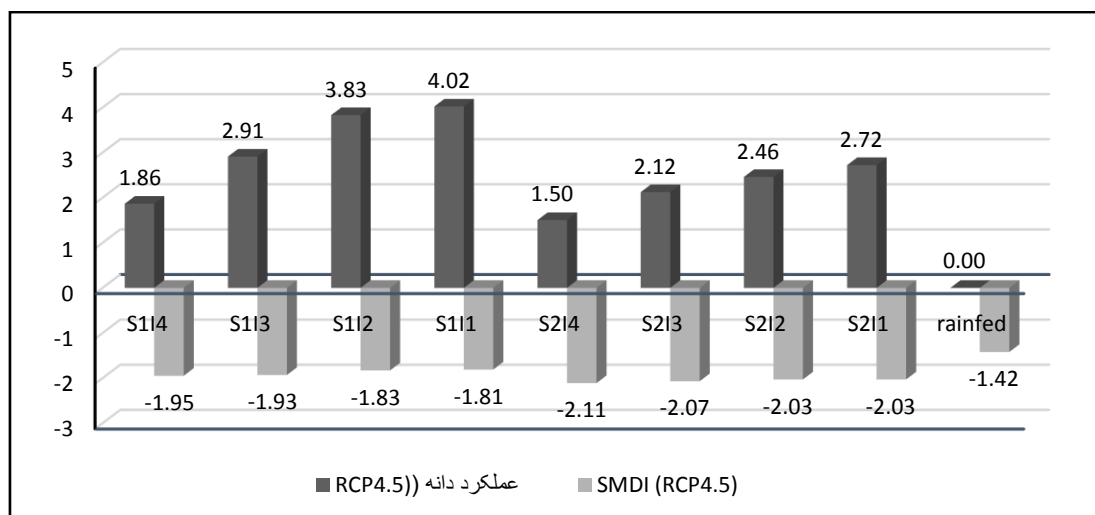


شکل ۱۰- شاخص زیست‌توده در دوره آبی (۲۰۲۵-۲۰۵۴) با استفاده از مدل اقلیمی CSIRO-MK3.6 تحت سناریو انتشار RCP8.5 برای تیمارهای مختلف

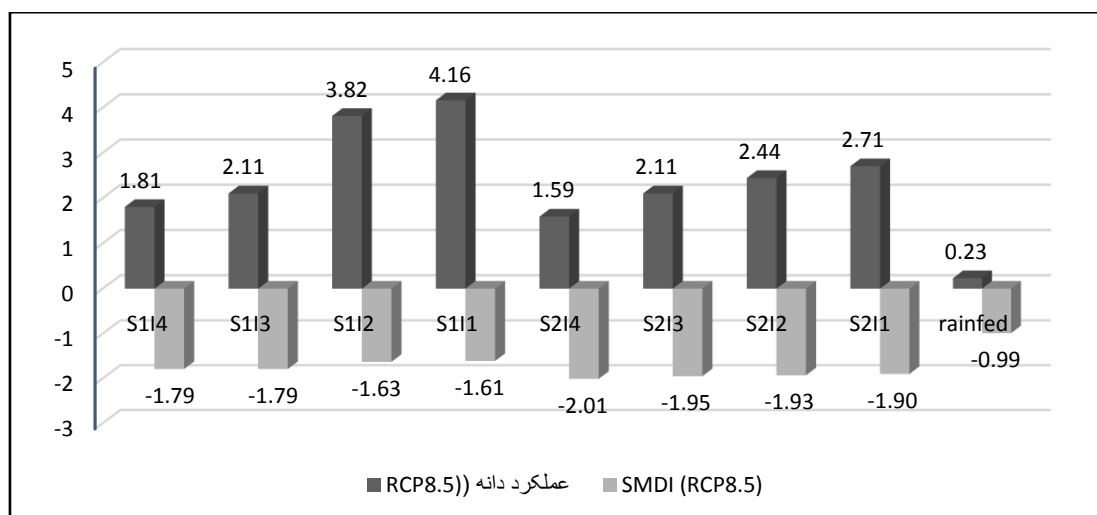
در هکتار) به ترتیب مربوط به تیمار S₁I₁ و S₁I₂ است. همچنین نتایج نشان می‌دهد شدت شاخص خشکسالی SMDI برای تیمار دیم در دوره آبی در هر دو سناریو انتشار نسبت به سایر تیمارها کمتر است و شدت خشکسالی در تیمار دیم در سناریو انتشار RCP4.5 نسبت به RCP8.5 بیشتر است. علاوه بر مطالب فوق می‌توان گفت که تغییر سطح آبیاری از ۵۰ درصد به ۱۲۵ درصد نیاز آبی گیاه باعث افزایش مقدار شاخص عملکرد دانه و تغییر سطح تنش شوری آب از ۱/۶ به ۶ باعث کاهش مقادیر شاخص عملکرد دانه می‌شود.

مقایسه میانگین شاخص عملکرد دانه با شاخص خشکسالی کشاورزی SMDI در دوره آبی

نتایج مربوط به میانگین بلندمدت سالانه شاخص عملکرد دانه و شاخص خشکسالی کشاورزی SMDI در دوره آبی با استفاده از مدل اقلیمی CSIRO-MK3.6 تحت سناریوهای انتشار RCP8.5 و RCP4.5 برای تیمارهای مختلف در شکل (۱۱) و (۱۲) نشان می‌دهد که کمترین میزان عملکرد دانه (تن در هکتار) به ترتیب مربوط به تیمار دیم (Rainfed) و S₂I₄ و بیشترین میزان عملکرد دانه (تن



شکل ۱۱- مقایسه میانگین شاخص عملکرد دانه با شاخص خشکسالی کشاورزی SMDI در دوره آبی تحت سناریو RCP4.5



شکل ۱۲- مقایسه میانگین شاخص عملکرد دانه با شاخص خشکسالی کشاورزی SMDI در دوره آبی تحت سناریو RCP8.5

نتیجه گیری

با توجه به نتایج به دست آمده، به طور میانگین در دوره آبی در سناریو RCP8.5 نسبت به سناریو انتشار RCP4.5 از درجه خشکسالی بیشتری بخصوص در کاهش عملکرد برخوردار خواهند بود یا به عبارت دیگر بیشتر تحت تأثیر خشکسالی قرار خواهند گرفت. نتایج عملکرد دانه گیاه گندم نیز نشان داد، کمترین میزان عملکرد دانه (تن در هکتار) به ترتیب مربوط به تیمار دیم (Rainfed) و S₂I₄ و بیشترین میزان عملکرد دانه (تن در هکتار) به ترتیب مربوط به تیمار S₁I₁ و S₁I₂ است.

تعارض منافع

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

نتایج تغییرات پارامترهای اقلیمی تحقیق نشان داد که مقدار بارش پیش بینی شده برای دوره آبی نسبت به دوره پایه، تحت هر دو سناریوی انتشار کاهش یافته است. همچنین نتایج میانگین سالانه دمای حداکثر و حداقل در دوره پایه و آبی نشان می دهد که مقدار دمای حداکثر و حداقل در دوره آبی نسبت به دوره پایه تحت هر دو سناریو انتشار RCP8.5 و RCP4.5 افزایش داشته است. از طرفی به منظور مقایسه سناریوها، مقادیر سناریو RCP8.5 نسبت به سناریو RCP4.5، افزایش بیشتری در دما و کاهش بیشتری در بارش را نشان می دهد که بیانگر بحرانی بودن سناریو RCP8.5 در دوره آبی است.

فهرست منابع

۱. دلقندی، مهدی، جورابلو، ساناز، و گنجی نوروبی، زهرا، ۱۴۰۲. بررسی اثرات تغییر اقلیم بر شدت، مدت و مقدار خشکسالی منطقه سمنان با استفاده از دو شاخص SPI و RDI. *مجله پژوهش های خشکسالی و تغییر اقلیم*، ۱(۱)، صص ۱۸-۱۰۴. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2023.5909.1004>
۲. سلیمانی، علی، ۱۳۹۵. بررسی تأثیر تنش خشکی بر عملکرد و اجزای عملکرد گندم با استفاده از مدل ET-HS. *تنش های محیطی در علوم زراعی*، دوره ۹، شماره ۳۹(۳)، صص ۲۱۵-۲۰۵.
۳. قدیریان، امیرحسین، یعقوبزاده، مصطفی، زمانی، غلامرضا، و شهیدی، علی، ۱۳۹۹. واسنجی و صحت سنجی مدل گیاهی AQUACROP جهت شبیه سازی عملکرد سه رقم گندم تحت تنش رطوبتی مختلف. *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*، ۱۴(۶)، صص ۲۲۶۷-۲۲۵۷.

۴. قوام سعیدی نوقابی، سعید، یعقوبزاده، مصطفی، شهیدی، علی، حامی، حسین و کلانکی، مهدی، ۱۳۹۹. ارزیابی مدل DSSATv4.7 در شبیه‌سازی مراحل فنولوژیکی و عملکرد گندم رقم آنفارم ۴ تحت سطوح مختلف آبیاری. *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*. ۱۴(۲)، ۵۴۸-۵۵۸.
۵. یعقوب زاده، مصطفی، احمدی، محسن، برومند نسب، سعید، و حقایقی مقدم، سید ابوالقاسم، ۱۳۹۵. اثر تغییر اقلیم بر روند تغییرات تبخیر-تعرق در طی دوره رشد گیاهان مزارع آبی و دیم با استفاده از مدل‌های AOGCM. *پژوهش آب در کشاورزی*، ۳۰(۴)، صص ۵۱۱-۵۲۳. doi: 10.22092/jwra.2017.109013.
۶. یعقوب زاده، مصطفی، امیرآبادی زاده، مهدی، رضائی، یوسف و پوررضا بیلندی، محسن، ۱۳۹۶. بررسی عدم قطعیت مدل‌های گردش عمومی جو در برآورد رطوبت خاک تحت تأثیر تغییر اقلیم. *تحقیقات آب‌و خاک ایران*، ۴۸(۵)، صص ۱۱۰۹-۱۱۱۹. doi: 10.22059/ijswr.2017.224039.667603.
7. Andarzian, B., M. Bannayan, P. Steduto, H. Mazraeh, M. E. Barati, M. A. Barati and A. Rahanama. 2011. Validation and testing of the AquaCrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran. *Agric. Water Manag.*, 100:1-8.
8. Bhalme, H. N., and Mooley, D. A. 1980. Large-scale droughts/floods and monsoon circulation. *Monthly Weather Review*, pp. 1197-1211.
9. Boulange, J., Nizamov, S., Nurbekov, A., Ziyatov, M., Kamilov, B., Nizamov, S., Abduvasikov, A., Khamdamova, G., Watanabe, H. (2025). Calibration and validation of the AquaCrop model for simulating cotton growth under a semi-arid climate in Uzbekistan, *Agricultural Water Management*, 310, 109360. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109360>.
10. Fan, G., Sarabandi, A. and Yaghoobzadeh, M., 2021. Evaluating the climate change effects on temperature, precipitation and evapotranspiration in eastern Iran using CMPI5. *Water Supply*, 218:4316-4327. DOI: 10.2166/ws.2021.179
11. Feng, Z., Miao, Q., Shi, H., Gonçalves, J.M. Li, X., Feng, W., Yan, J., Yu, D., Yan, Y., (2025). AquaCrop model-based sensitivity analysis of soil salinity dynamics and productivity under climate change in sandy-layered farmland, *Agricultural Water Management*, 307, 109244. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.109244>
12. IPCC. 2013. Summary for policymakers. In: Field, C.B., Barros, V., Stocker, T.F., Qin, D., Dokken, D.J., Ebi, K.L., Mastrandrea, M.D., Mach, K.J., Plattner, G.-K., Allen, S.K., Tignor, M., and Midgley, P. (Eds.), *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. Cambridge University Press, 1-19.
13. Mohajerani, H., Mosaedi, A., Kholghi, M., Maftah Halghi, M. & Saad Aldin, A. (2011). Estimating crop water requirement of wheat by Cropwat model in Kordkouy-Golestan province. *National Conference on Water Scarcity*.
14. Moghaddam, H., Oveisi, M., Keshavarz Mehr, M., Bazrafshan, J., Naeimi, M. H., Pourmorad Kaleibar, B., and Müller-Schärer, H., 2023. Earlier sowing combined with nitrogen fertilization to adapt to climate change effects on yield of winter wheat in arid environments: Results from a field and modeling study, *European Journal of Agronomy*, 146, 126825. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.126825>
15. Osamu, T., Yoshida, K., Hiroaki, S., Katsuhiko, H. & Hajime Tangi, H. (2005). Estimation of irrigation water using Crop wat model at KM35 project site, in Savannakhet, LAO, PDR. *Proceedings of the International Symposium on Role of Water Sciences in Transboundary River Basin Management*. 10-12 March. Ratchathani, Thailand.
16. Wen, P., Wei, Q., Zheng, L., Rui, Z., Niu, M., Gao, Ch., Guan, X., Wang, T., and Xiong, Sh., 2023. Adaptability of wheat to future climate change: Effects of sowing date and sowing rate on wheat yield in three wheat production regions in the North China Plain, *Science of The Total Environment*, 901, 165906. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165906>

17. Yaghoobzadeh, M. 2022. Selecting the best general circulation model and historical period to determine the effects of climate change on precipitation, IDŐJÁRÁS/Quarterly journal of the Hungarian meteorological service, 126(2), pp. 247-265.
DOI: 10.28974/idojaras.2022.2.5

ارزیابی لوله‌های آبیاری قطره‌ای زیست‌تخریب‌پذیر از نظر فنی و بهره‌وری آب آبیاری

محمدهادی محمدی، محمدرضا خالدیان*  و جمالعلی الفتی چیرانی

دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه گیلان.

hadimhmmohammadi@gmail.com

دانشیار گروه مهندسی آب دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه گیلان و گروه پژوهشی مهندسی آب و محیط‌زیست پژوهشکده حوزه دریای خزر، رشت.

khaledian@guilan.ac.ir

دانشیار گروه علوم و مهندسی باغبانی دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه گیلان.

jamalaliolfati@gmail.com

دریافت: آذر ۱۴۰۳ و پذیرش: تیر ۱۴۰۴

چکیده

امروزه، حجم زیادی از مواد پلاستیکی در بخش کشاورزی به کار می‌رود ولی بقایای آن‌ها در زمین‌های کشاورزی مشکلات زیادی را ایجاد کرده است. استفاده از مواد زیست‌تخریب‌پذیر می‌تواند راهکار مناسبی باشد که ابتدا باید چالش‌های استفاده از این مواد به‌طور دقیق بررسی شود. در این بررسی، لوله (تیپ) آبیاری قطره‌ای با استفاده از مواد اُکسوزیست‌تخریب‌پذیر تولید و در شرایط مزرعه استفاده شد. در طول یک فصل زراعی، لوله‌ها در دو حالت زیر و روی خاک و همراه با گیاه سایه‌انداز و بدون سایه (لویا و تربچه) استفاده شد. بعد از ۶ و ۱۱ ماه استفاده از لوله‌ها، عملکرد فنی آن‌ها نظیر یکنواختی توزیع و بازده کاربرد آب بررسی شد. نتایج نشان داد که لوله‌های ساخته‌شده با افزودنی اُکسو در مقایسه با لوله‌های معمولی، از نظر شاخص‌های فنی مورد بررسی و بهره‌وری آب آبیاری تفاوتی ندارند و می‌توان از آن‌ها در آبیاری استفاده کرد. کاربرد لوله‌های آبیاری قطره‌ای زیست‌تخریب‌پذیر در کنار افزایش بهره‌وری آب آبیاری نسبت به سایر سامانه‌های آبیاری موجب کاهش انباشت مواد پلاستیکی در زمین‌های کشاورزی خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: تربچه، لویا، یکنواختی توزیع آب

* - آدرس ایمیل نویسنده مسئول: khaledian@guilan.ac.ir



مقدمه

مصرف جهانی کنونی پلاستیک بیش از ۲۰۰ میلیون تن است که رشد سالانه تقریباً پنج درصدی دارد و مصرف زیاد نفت خام را به دنبال خواهد داشت (صمدی‌پور هندواری و همکاران، ۱۳۹۲). همچنین مشکلات زیست-محیطی ناشی از زباله‌های پلاستیکی بر کسی پوشیده نیست. پلیمرهای معمولی هنوز هم بهترین ماده برای ساخت بسیاری از محصولاتی هستند که نیاز به فیلم‌های سخت دارند، زیرا پلی‌اتیلن و پلی‌پروپیلن ارزان هستند و ساخت محصولات با آن‌ها آسان است. اگرچه هر دو پلیمر به‌طور طبیعی تخریب می‌شوند، اما مدت‌زمان لازم برای تخریب آن‌ها در محیط‌زیست بسیار طولانی است و افزایش تقاضا برای چنین موادی نیاز به روش‌هایی برای تسریع و بهبود تجزیه آن‌ها را اثبات می‌کند. راه‌حل مناسب این مشکل، سرعت بخشیدن به اکسیداسیون این پلیمرها است.

در بسیاری از پژوهش‌های پیشین، هدف این بود که پلیمرها به‌سرعت در پایان عمر مفید خود تخریب شوند و سرانجام، با تخریب کلی مکانیکی، پلاستیک باقی‌مانده از آن‌ها بدون تأثیر منفی بر محیط به چرخه‌زیستی منتقل شود. فرمولاسیون پلاستیک تجزیه‌پذیر (TDPA^۱) می‌تواند در طی فرآیند عادی در پلی‌الفین‌های معمولی ترکیب شود تا اکسیداسیون در معرض اشعه ماورای بنفش (UV^۲) و مهم‌تر از آن در معرض حرارت تسریع شده و استفاده از آن‌ها منجر به تولید محصولاتی شود که زیست‌تخریب‌پذیر هستند (بیلینگام و همکاران، ۲۰۰۳).

اندازه‌گیری مقدار و سرعت تخریب محصولات تولیدشده با افزودنی‌های اکسوزیست‌تخریب‌پذیر با استفاده از آزمایش‌هایی از جمله طیف‌سنجی، آزمون کشش و اندازه‌گیری وزن مولکولی آن‌ها انجام‌پذیر است و کاهش مقاومت مکانیکی و طول زنجیره و تشکیل محصولات اکسیداسیون را نشان می‌دهد (تانگ و همکاران، ۱۹۹۹). پلاستیک‌های اکسوزیست‌تخریب‌پذیر می‌توانند به‌عنوان مثال، به پلی‌اتیلن با چگالی بالا (HDPE^۳) اضافه

شوند و تجزیه آن را در پایان عمر محصول تضمین کنند. تجزیه پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر با مشارکت ریزجاندارانی مانند باکتری و قارچ صورت می‌گیرد. با این حال، تجزیه پلیمرهای اکسوزیست‌تخریب‌پذیر پیچیده‌تر است و دارای دو مرحله است. مرحله اول، فعال‌سازی مواد اکسیدکننده افزودنی است. این امر می‌تواند به‌عنوان مثال، تحت تأثیر اشعه فرابنفش و گرما رخ دهد (اسکات، ۲۰۰۰). مرحله دوم تخریب با مشارکت ریزجانداران (تجزیه بیولوژیک مناسب) است. به‌نظر می‌رسد با کنترل مقدار مصرف و انتخاب مناسب نوع افزودنی می‌توان محصولات زیست‌تخریب‌پذیری تولید کرد که در طی فرآیند تولید پلیمر و نیز طول عمر مفید مصرف آن‌ها کارایی قابل قبولی داشته و پس از سپری‌شدن زمان معینی شروع به تجزیه و تخریب کنند و در عین حال اثر سوء در محیط‌زیست از خود باقی نگذارند (وایلز و اسکات، ۲۰۰۶).

مواد افزودنی زیست‌تخریب‌پذیر، باعث افزایش تجزیه بیولوژیک در پلیمرها با اجازه دادن به ریزجانداران به استفاده از کربن در زنجیره پلیمر به‌عنوان یک منبع انرژی می‌شوند. این افزودنی‌ها با ایجاد بیوفیلم روی مواد پلاستیکی، ریزجانداران را به پلیمر جذب می‌کنند. مواد افزودنی به‌طور کلی به شکل مستریج هستند که از رزین‌های حامل مانند پلی‌اتیلن، پلی‌پروپیلن، پلی‌استایرن یا پلی‌اتیلن-ترفتالات استفاده می‌کنند. افزودن مواد زیست‌تخریب‌پذیر می‌تواند فرآیند تجزیه پلاستیک را با تغییر خواص شیمیایی و فیزیکی پلاستیک‌ها برای افزایش سرعت تجزیه تحت تأثیر قرار دهد. افزودنی‌های زیست‌تخریب‌پذیر به‌جای اینکه مواد تنها توسط عوامل محیطی مانند نور و گرما تجزیه شوند، امکان تجزیه شدن پلیمرها توسط میکروارگانیسم‌ها و باکتری‌ها از طریق حمله مستقیم یا غیرمستقیم را فراهم می‌کنند (تاکایا و همکاران، ۲۰۰۹).

پلاستیک‌های زیست‌تخریب‌پذیر می‌توانند کاربردهایی مشابه پلاستیک‌های نفتی داشته باشند (پاتاک و همکاران، ۲۰۱۴). سیاه‌های اخیر جایگزینی پلیمرهای

^۳ -High Density Poly Ethylene

^۱ - Totally Degradable Plastic Additives

^۲ -Ultra Violet

زیست تخریب پذیر با زیست تخریب ناپذیر است که در محیط ماندگاری کم تری دارند. این پلیمرها به راحتی قابل تجزیه اند تا از تجمع مداوم بقایای پلاستیک در خشکی و دریا جلوگیری کنند. طبق تعریف، مواد زیست تخریب پذیر موادی هستند که می توانند با باکتری ها، قارچ ها یا سایر روش های بیولوژیک تجزیه شوند. این مواد به طور معمول با محصولات سازگار با محیط زیست ساخته شده و می تواند به عناصر طبیعی تجزیه شود (تیان و بلال، ۲۰۲۰).

پلیمرهای زیست تخریب پذیر برای تجزیه و تخریب در زمین مناسب هستند با این حال قیمت آن ها ۲/۵ تا ۱۰ برابر از پلیمرهای معمول در حال استفاده گران ترند و اغلب ویژگی های فیزیکی و شیمیایی از خود نشان می دهند که استفاده از آن ها را محدود می کند. مواد زیست تخریب پذیر از اصلاح پلاستیک های متداول حاصل از منابع تجدیدناپذیر و تجدیدپذیر تشکیل شده است. در حال حاضر، این مواد جایگزین اقتصادی تری نسبت به سایر پلیمرهای زیست تخریب پذیر هستند و هزینه نهایی را فقط در حدود ۱۰ تا ۲۰ درصد افزایش می دهند (استیونس، ۲۰۰۳). این مواد یک نوع ماده افزودنی هستند که به پلی اتیلن ها، پلی پروپیلن ها، پلی استایرن ها و سایر پلیمرها اضافه می شوند. ساختار این مسترچ ها شامل کبالت، منگنز و ترکیبات آهن و همچنین مواد دیگری است که بقایای حاصل از تجزیه آن ها سمیت زیادی را به وجود نمی آورند، با این وجود، هنوز به اندازه سایر پلیمرهای زیست تخریب پذیر شناخته نشده اند (اجدا و همکاران، ۲۰۰۹).

توسعه سامانه های آبیاری تحت فشار بخشی از راهکارهای مدیریتی برای صرفه جویی، افزایش کارایی و بهره وری آب کشاورزی است که از سال ۱۳۶۶ در کشور آغاز شده است (محقق زاده و کرمی، ۱۳۹۶). استفاده از روش های آبیاری با راندمان زیاد علاوه بر افزایش بهره وری آب باعث بهبود کارایی اقتصادی مزرعه نیز می شود (داریوک و همکاران، ۲۰۱۷). آبیاری قطره ای یکی از کم

مصرف ترین سامانه های آبیاری با راندمان بسیار زیاد است (موریسون و همکاران، ۲۰۰۸). تا به امروز، سامانه های آبیاری قطره ای در باغ ها به خوبی مورد استقبال قرار گرفته اند (ال سید و الهاگاری، ۲۰۱۴). امروزه روشی از این سامانه به نام سامانه تیپ (نوار آبد) برای گیاهان ردیفی از جمله چغندر قند، ذرت، پنبه و گندم مورد استفاده قرار گرفته و در کشور ما نیز به صورت موفقیت آمیزی توسعه پیدا کرده است (اخوان و همکاران، ۱۳۸۶).

کاظم عطار و همکاران (۱۳۹۹) گزارش کردند که با توجه به گسترش استفاده از آبیاری قطره ای تیپ در اراضی زراعی، در صورت اجرای سامانه های آبیاری قطره ای در تمامی اراضی موجود، محصولات دارای بهره وری اقتصادی بیش تر خواهند بود. با توجه به اینکه در کشور ما، حدود ۸۵ درصد هزینه های طراحی و اجرای سامانه های آبیاری تحت فشار توسط دولت به عنوان یارانه در اختیار کشاورز قرار می گیرد، اجرای سامانه آبیاری قطره ای نواری می تواند مورد توجه سیاست گذاران و کارشناسان این بخش قرار گیرد؛ چراکه در حال حاضر تولیدکنندگان داخلی توانایی تولید لوله های آبد را دارند و بهره وری آب این سامانه نیز بسیار مناسب تر از سایر سامانه ها است (خالدیان و همکاران، ۱۳۹۵).

لوله های تیپ معایب و مشکلاتی را نیز دارند. میزان تیپ مصرفی برای هر هکتار از ۱۰ تا ۵۰ کیلومتر متغیر است. به طور معمول، برای آبیاری یک هکتار، ۲۵ کیلومتر تیپ نیاز است. در خوش بینانه ترین حالت اگر فرض شود که در هر فصل، ۱۰ درصد این نوارها در زمین باقی بماند، بعد از ۱۰ سال، میزان تپیی که در زمین باقی می ماند برابر ۲۵ کیلومتر و بعد از ۲۰ سال این عدد به ۵۰ کیلومتر می رسد. حال اگر فرض شود که در اثر عملیات زراعی و یا گذر زمان این نوارها به تکه های ۵۰ سانتی متری تبدیل شوند، بعد از ۱۰ سال، در هر هکتار ۵۰ هزار قطعه و بعد از ۲۰ سال در هر هکتار ۱۰۰ هزار قطعه پلاستیک رها می شود. با توجه به رویکرد افزایش بی رویه اراضی تحت پوشش این سامانه ها در کشور، سهم کشاورزی در

تولید ضایعات پلاستیکی بسیار زیاد خواهد بود (احمدآلی و همکاران، ۱۳۹۵). مشکلات این نوارها در خارج از فصل را می‌توان به دو دسته مشکلات جمع‌آوری تیپ و مشکلات رهاسازی آن‌ها در مزرعه دسته‌بندی نمود. جمع‌آوری نوارهای آبیاری قطره‌ای در پایان فصل آبیاری باعث تحمیل هزینه‌های اضافه کارگری و نیز هزینه‌های اضافی نگهداری می‌شود. بر اساس مشاهدات میدانی از طرح‌های آبیاری نواری تیپ در استان‌های مختلف کشور، این نتیجه حاصل شده که اصولاً کشاورزان اقدامی برای جمع‌آوری این نوارها انجام نمی‌دهند و این نوارها عملاً در سطح مزرعه رها می‌شوند. افزون بر مشکلات یاد شده در مزرعه و متعاقباً اثرات مستقیم ضایعات پلاستیکی بر محیط‌زیست، یکی از جدی‌ترین مشکلات این نوارها تکه‌تکه شدن آن‌ها است. در حالتی که نوارها در سطح مزرعه رها شوند، به‌مرور زمان در اثر اشعه آفتاب و یا ماشین‌آلات کشاورزی قطعه‌قطعه شده و تبدیل به ضایعات می‌شوند.

این مشکلات، بالاخص مسائل زیست‌محیطی ناشی از تیپ‌های ساخته‌شده با پلاستیک‌های تخریب‌ناپذیر، موجب پدید آمدن ایده‌ی ساخت آن‌ها با پلیمرهای تجزیه‌پذیر (پلاستیک‌های زیستی) شده است (هربی، ۲۰۱۰). لوله‌های ساخته‌شده باید از نظر فنی هم مورد بررسی قرار گیرند. بازده یک سامانه آبیاری قطره‌ای به عملکرد هیدرولیکی قطره‌چکان‌ها و معیارهای طراحی بستگی دارد. بدین‌منظور، شاخص‌های ضریب تغییرات ساخت، تغییرات دبی در قطره‌چکان‌ها، یکنواختی و بازده سامانه‌ها باید مورد بررسی قرار گیرند. تا به امروز تعاریف زیادی برای بهره‌وری آب در کشاورزی ارائه شده است. به‌طور مثال، بهره‌وری بیشتر آب کشاورزی از دیدگاه اقتصادی به معنای سود بیشتر نسبت به واحد حجم آب است. بهره‌وری آب کشاورزی از دیدگاه امنیت غذایی به معنای تولید انرژی، پروتئین و یا محصول غذایی بیشتر به ازای واحد حجم آب (نه واحد سطح زیرکشت) است و در یک تعریف کلی می‌توان گفت که در کشاورزی، بهره‌وری، میزان خروجی یک سامانه به آب مصرفی در سامانه، در

زمان و مکان مشخص است (دهقانی‌سانج و کشاورز، ۱۳۹۱).

با توجه به مروری بر منابع، به نظر می‌رسد پژوهش‌های جامعی درباره ساخت تیپ با مواد زیست‌تخریب‌پذیر مانند افزودنی اکسو و نشاسته انجام نگرفته باشد. در این پژوهش، ابتدا امکان ساخت تیپ آبیاری قطره‌ای با نشاسته از منابع مختلف و ترکیب آن‌ها و همین‌طور افزودنی‌های اکسوزیست‌تخریب‌پذیر به مواد پلی‌اتیلن در فرآیند ساخت لوله تیپ بررسی شد و نتایج آن توسط محمدی و همکاران (۱۴۰۱) گزارش شد. در ادامه، میزان تخریب فیلم‌ها و تیپ‌های ساخته‌شده با اندازه‌گیری درصد تغییر وزن، میزان تغییر کدورت و ویژگی‌های مکانیکی آن‌ها بعد از گذشت یک سال استفاده در شرایط واقعی مزرعه سنجیده شد (محمدی و همکاران، ۲۰۲۴). در آن مقاله، پس از ساخت تیپ زیست‌تخریب‌پذیر و کاربرد آن در شرایط مزرعه، آزمون‌های مختلفی در مقیاس آزمایشگاهی انجام شد.

در پژوهش محمدی و همکاران (۲۰۲۴) از افزودنی اکسوزیست‌تخریب‌پذیر به‌عنوان تسریع‌کننده تخریب در فرآیند تولید نوارهای تیپ استفاده شد. بعد از تولید، این تیپ‌ها در شرایط واقعی و طی یک‌فصل زراعی و در تیمارهای زیر و روی خاک و همراه با گیاه سایه‌انداز و بدون سایه (به‌ترتیب، لوبیا و تربچه) استفاده شدند. بعد از ۶ و ۱۱ ماه استفاده از تیپ‌ها، نمونه‌برداری از آن‌ها به‌منظور بررسی تخریب آن‌ها صورت گرفت. نتایج نشان داد که لوله‌های ساخته‌شده با افزودنی اکسو در مقایسه با لوله‌های معمولی، تخریب خود را بیشتر و سریع‌تر آغاز کردند. کاهش ویژگی‌هایی مانند وزن و کدورت و خواص مکانیکی مانند استحکام تنشی در نقطه پارگی، ازدیاد طول در نقطه پارگی، مدول یا نگ و جقرمگی در لوله‌های تولیدشده همراه با افزودنی اکسو نسبت به لوله‌های معمولی نشان‌دهنده تخریب بیشتر و سریع‌تر در آن‌ها بود. نگرانی و پرسشی که در این مرحله از پژوهش پیش آمد این بود که آیا با وجود تخریب ایجاد شده در تیپ‌های

تیپ استفاده شده و در ادامه بررسی‌های آزمایشگاهی و مزرعه‌ای انجام شد. در خاتمه، اثر استفاده از این تیپ بر شاخص‌های فنی و بهره‌وری آب آبیاری بررسی گردید.

مواد و روش‌ها

تولید لوله تیپ زیست تخریب پذیر با مستریج اکسوزیست-

تخریب پذیر

ابتدا، افزودنی زیست تخریب پذیر epi با نام TDPATM از شرکت کران ابرسپار تهران تهیه شد. سپس برای تولید لوله تیپ مورد نظر این افزودنی به شرکت یاشیل قطره زنجان تحویل شد. برای ساخت نمونه مورد نظر، این افزودنی به مقدار پنج درصد وزنی قبل از اکستروژن به گرانول‌های پلی اتیلن افزوده شد و ادامه فرایند ساخت به طور معمول انجام گرفت (شکل‌های ۱ تا ۴)

زیست تخریب پذیر، کماکان شاخص‌های فنی و بهره‌وری آب آبیاری در وضعیت قابل مقایسه‌ای با تیپ معمولی است یا خیر؟ این احتمال وجود داشت که لوله‌های ساخته شده با افزودنی اکسو در شرایط مختلف آزمایش مزرعه‌ای دچار پارگی ریز و نشت آب شده و شاخص‌های ارزیابی فنی افت کنند و در نتیجه بهره‌وری آب آبیاری کاهش یابد. پژوهش حاضر سعی دارد به صورت مستقل از مقاله محمدی و همکاران (۲۰۲۴) به سؤال بالا پاسخ دهد. هدف کلی از پژوهش حاضر، تولید تیپ آبیاری قطره‌ای زیست تخریب پذیر و استفاده از آن در شرایط مزرعه‌ای و آزمایشگاهی است تا محدودیت‌ها، مزیت‌ها و قابلیت‌های آن مشخص شود. با توجه به بررسی منابع انجام شده، به نظر می‌رسد تاکنون پژوهشی جامع در مورد استفاده از مواد اکسوزیست تخریب پذیر در ساخت لوله تیپ آبیاری قطره‌ای انجام نشده باشد؛ بنابراین از این مواد در ساخت



شکل ۲- گرانول پلی اتیلن



شکل ۱- مستریج اکسوزیست تخریب پذیر



شکل ۴- لوله تیپ تولید شده با مستریج اکسوزیست تخریب پذیر



شکل ۳- دستگاه تولید لوله تیپ

کشت تربچه و لوبیا کارگذاری شده و ویژگی‌های فنی و بهره‌وری آب در آن‌ها با یکدیگر مقایسه شد. این بخش از

بعد از تولید لوله‌های تیپ، برای مقایسه آن با لوله تیپ معمولی، هر دو در شرایط مزرعه‌ای و یکسان برای

دقیقه شمالی و عرض جغرافیایی ۳۷ درجه و ۹ دقیقه شرقی و ارتفاع ۴۷ متری از سطح دریا اجرا شد. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد نظر در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶- موقعیت گلخانه محل انجام پژوهش

پژوهش در تابستان و پاییز سال ۱۳۹۹ در گلخانه مجتمع کارگاهی-نیمه صنعتی پارک علم و فناوری گیلان واقع در روستای فشتام از توابع بخش سنگر در پنج کیلومتری شهرستان رشت با موقعیت طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۳۸



شکل ۵- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

کم باران ترین ماه نیز مرداد بود. متوسط رطوبت سالانه ۸۱ درصد بود. حداکثر رطوبت آن مربوط به آبان و کم رطوبت-ترین ماه نیز اردیبهشت و خرداد گزارش شده است. میانگین ماهانه عوامل اقلیمی بین سال‌های ۱۳۶۹ تا ۱۳۹۹ در ایستگاه هواشناسی کشاورزی رشت در جدول ۱ ارائه شده است.

برای اطلاعات هواشناسی این منطقه از داده‌های ۳۰ ساله ایستگاه سینوپتیک رشت بین سال‌های ۱۳۶۹ تا ۱۳۹۹ استفاده شد. میانگین سالانه دما ۱۷/۲ درجه سلسیوس بود. میانگین بیشینه دما ۲۱/۷ و میانگین کمینه دما ۱۲/۶ درجه سلسیوس بود. میزان بارندگی سالانه بیش از ۱۲۰۰ میلی متر بوده، ماه‌های پرباران آن آبان و مهر و

جدول ۱- میانگین ماهانه عوامل اقلیمی بین سال‌های ۱۳۶۹ تا ۱۳۹۹ ایستگاه هواشناسی کشاورزی رشت

ماه	بارندگی (mm)	مجموع ساعات آفتابی	سرعت باد (m/s)	رطوبت نسبی (%)	دمای بیشینه (°C)	دمای کمینه (°C)
فروردین	80.9	133.9	3.2	80.3	20.3	10.4
اردیبهشت	73.8	182.1	3.2	76.7	26.1	16.2
خرداد	63.1	206.8	3	74.7	29.7	19.8
تیر	39.4	232.5	2.7	76.9	31.4	21.9
مرداد	37.1	236.7	2.9	77.8	30.7	20.9
شهریور	118	133.3	4	83	26.9	18.4
مهر	164	121.9	3.8	85.1	23.2	14.5
آبان	173	109.6	4.1	86.5	16.7	8.5
آذر	119.6	100.4	4.3	84.4	14.5	6
دی	119.4	109.1	4.1	82.8	12.1	3.4
بهمن	106.6	104.4	5	81.9	13.1	4.1
اسفند	114.2	119	4.5	82.1	16	7.1

برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش را نشان می‌دهند. نتایج آنالیز شیمیایی آب آبیاری در جدول (۴) ارائه شده است.

برای بررسی مشخصات شیمیایی و فیزیکی خاک محل آزمایش، نمونه‌برداری از خاک گلخانه انجام شد و در آزمایشگاه فیزیک و شیمی خاک دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه گیلان، تجزیه شد. جدول‌های (۲) و (۳) به ترتیب

جدول ۲- برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک گلخانه

عمق لایه (cm)	نوع بافت	رس (%)	سیلت (%)	شن (%)	نقطه پژمردگی (%)	ظرفیت زراعی (%)	جرم ویژه ظاهری خاک (g/cm ³)
0 – 20	Sandy-loam	18	30	52	18.9	34.02	1.29

جدول ۳- برخی ویژگی‌های شیمیایی عصاره اشباع خاک گلخانه

عمق لایه (cm)	ماده آلی (%)	ECe (μS/cm)	اسیدیته خاک (pH)	N (mg.L ⁻¹)	Na (mg.L ⁻¹)	Mg (mg.L ⁻¹)	Ca (mg.L ⁻¹)
0 – 20	0.97	0.7	7.85	0.05	14.69	15.56	60.01

جدول ۴- مشخصات شیمیایی آب آبیاری

نیترات (mg.L ⁻¹)	نیتریت (mg.L ⁻¹)	pH	EC (μS/cm)	CaCO ₃ (mg.L ⁻¹)	Mg (mg.L ⁻¹)	Ca (mg.L ⁻¹)
2.98	26.68	7.2	899	14.69	31.88	108.5

اختلافات از آزمون توکی برای مقایسه میانگین‌ها استفاده شد.

تیمارهای مطالعه شده به این ترتیب نام‌گذاری شد: ۱- لوله تیپ معمولی سطحی با گیاه سایه‌انداز (NS1)؛ ۲- لوله تیپ معمولی زیرسطحی با گیاه سایه‌انداز (NZ1)؛ ۳- لوله تیپ زیست‌تخریب‌پذیر سطحی با گیاه سایه‌انداز (BS1)؛ ۴- لوله تیپ زیست‌تخریب‌پذیر زیرسطحی با گیاه سایه‌انداز (BZ1)؛ ۵- لوله تیپ معمولی سطحی با گیاه بدون سایه (NS2)؛ ۶- لوله تیپ معمولی زیرسطحی با گیاه بدون سایه (NZ2)؛ ۷- لوله تیپ زیست‌تخریب‌پذیر سطحی با گیاه بدون سایه (BS2)؛ ۸- لوله تیپ زیست-تخریب‌پذیر زیرسطحی با گیاه بدون سایه (BZ2)؛ ۹- لوله تیپ معمولی (N00) و ۱۰- لوله تیپ زیست‌تخریب‌پذیر (B00) برای ارزیابی و بررسی لوله‌های تیپ از نظر عملکرد. حین دوره آبیاری، لوله‌ها بعد از شش ماه مورد آزمایش قرار گرفتند. بدین منظور طول تیپ به سه قسمت یک‌متری تقسیم شده و از هر قسمت حجم آب دو قطره‌چکان یک و چهار در فشار یک بار با استفاده از استوانه مدرج و در زمان یک دقیقه اندازه‌گیری شد. سپس ضریب تغییرات ساخت

مساحت زمین در حدود ۷۰ متر مربع بود. آب مورد نیاز آبیاری از طرح شبکه آب‌رسانی موجود در گلخانه دارای فشار کاری حدود یک بار تأمین می‌شد. مطالعه در قالب طرح کاملاً تصادفی بود. تیمارهای مطالعه شده شامل دو تیمار آبیاری قطره‌ای تیپ سطحی و زیرسطحی برای دو گیاه تربچه به عنوان گیاه بدون سایه و لوبیا سبزه به عنوان گیاه سایه‌انداز، هر یک با سه تکرار بود. عملیات کاشت و مبارزه با علف‌های هرز به صورت دستی انجام شد و به منظور تولید محصول ارگانیک از هیچ کود و سمی استفاده نشد. لوله‌های تیپ نیز شامل دو نوع معمولی و زیست‌تخریب‌پذیر بود. نوارهای آبیاری زیرسطحی در عمق ۱۵ سانتی‌متری جاگذاری شدند. ابتدای هر نوار به مانیفولد ۳۲ میلی‌متری و یک شیر قطع و وصل جریان آب وصل بود و انتهای هر نوار با بست مسدود شد.

فاصله کرت‌ها از یکدیگر ۰/۵ متر بود که هر کرت با ابعاد ۲×۳ متر با سه نوار آبیاری قطره‌ای با قطر ۱۶ میلی‌متر با فاصله روزنه ۲۰ سانتی‌متری که دبی هر تیپ چهار لیتر در ساعت در متر بود، آبیاری می‌شد. از نرم‌افزار SPSS برای تجزیه واریانس و در صورت معنی‌دار بودن

آبیاری بیشینه باشد. در این روش، هزینه‌ی تولید محصول در نظر گرفته نمی‌شود (کریمی و جلیلی، ۱۳۹۶).

نتایج و بحث

ارزیابی فنی لوله‌های تیپ ساخته شده با مستریج و مقایسه با

لوله‌های تیپ عادی

ضریب ساخت (CV)

نتایج ارزیابی ضریب تغییرات ساخت قطره‌چکان لوله‌های تیپ معمولی و لوله‌های تیپ ساخته شده با مواد آکسو در جدول (۵) ارائه شده است. بر اساس طبقه‌بندی انجمن مهندسين کشاورزی آمریکا، لوله‌های ساخته شده با افزودنی آکسو و لوله‌های معمولی در گروه عالی قرار گرفته‌اند؛ بنابراین این لوله‌ها از نظر ضریب ساخت قطره‌چکان‌ها تفاوتی با یکدیگر ندارند و می‌توان این دو را یکسان در نظر گرفت. کریمی و همکاران (۱۳۸۴) با بررسی تیپ در دو طول ۲۰ و ۶۰ متر به‌طور کلی ضریب ساخت قطره-چکان‌ها را در گروه عالی ارزیابی کردند. باقری و همکاران (۱۳۹۵) در بررسی سامانه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در باغ پرتقال و هلو مقدار ضریب تغییرات قطره‌چکان‌ها را در حدود ۲۰ درصد و ضعیف ارزیابی کردند. شینی دشتگل و همکاران (۱۳۹۸) در بررسی آبیاری قطره‌ای زیرسطحی نیشکر، ضریب تغییرات ساخت قطره‌چکان‌ها را در محدوده نسبتاً خوب ارزیابی نمودند.

درصد خطای دبی اندازه‌گیری و تغییرات دبی در قطره-

چکان‌ها

جدول (۶) نتایج مربوط به بررسی لوله‌های تولید شده از نظر درصد خطای دبی اندازه‌گیری و تغییرات دبی در قطره‌چکان‌ها را نشان می‌دهد. بر این اساس، درصد خطای دبی اندازه‌گیری در لوله‌های تولیدی در اکثر تیمارها خوب ارزیابی شد. البته در سه تیمار NS2، NZ2 و BZ2 متوسط بود. در پارامتر مقدار دبی اندازه‌گیری شده بر اساس طبقه‌بندی انجمن مهندسين کشاورزی آمریکا همه تیمارها عالی، ولی در سه تیمار NS2، NZ2 و BZ2 قابل قبول

قطره‌چکان (CV) (علیزاده، ۱۳۸۵)، درصد خطای دبی اندازه‌گیری (Q_d) (حسن‌زاده آرنایی و فتحی، ۱۳۹۲)، تغییرات دبی در قطره‌چکانها (Q_{var}) (علیزاده، ۱۳۸۸)، ضریب یکنواختی توزیع آب (CU) (حسینیان خطیب گورابی، ۱۳۹۳)، یکنواختی توزیع (DU) (علیزاده، ۱۳۸۸)، یکنواختی آماری (UC) (علیزاده، ۱۳۸۵)، ضریب یکنواختی ریزش آب قطره‌چکان‌ها (EU) (کلر و کارملی، ۱۹۷۴)، بازده کاربردی آب (EA) (علیزاده، ۱۳۸۵)، بازده پتانسیل کاربرد آب در چارک پایین (PELQ) (نوشادی و قائمی، ۱۳۹۱) و بازده کاربرد آب در چارک پایین (AELQ) (مریام و کلر، ۱۹۷۸) محاسبه شد.

برای بررسی شاخص‌های بهره‌وری و عملکرد محصول، تربچه بعد از دو ماه و لوبیا بعد از سه ماه به صورت دستی برداشت شد. برگ و غده تربچه تر و دانه خشک شده لوبیا در آن در دمای ۷۰ درجه سلسیوس بعد از توزین به عنوان عملکرد منظور شدند. برای تعیین پارامترهای مربوط به بهره‌وری آب آبیاری با لوله‌های ساخته شده، از دو شاخص بهره‌وری آب آبیاری (WP) و درآمد به ازای واحد آب آبیاری (BPD) استفاده شد. WP معمولاً به صورت نسبت عملکرد محصول به ازای هر واحد آب آبیاری تعریف می‌شود و بر حسب رابطه (۱) محاسبه شد (احسانی و خالدی، ۱۳۸۲).

$$WP = \frac{Y}{I} \quad (1)$$

که در آن، I مقدار آب آبیاری (m^3/ha) در طول فصل آبیاری، (Y) عملکرد محصول (kg/ha) و WP بر حسب kg/m^3 هست. شاخص BPD در واقع نسبت میزان سود ناخالص (درآمد) در هر هکتار به ازای واحد حجم آب آبیاری (مترمکعب در هکتار) است و از رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$BPD = \frac{TR}{I} \quad (2)$$

که در آن TR مقدار ارزش کل فروش محصول در هکتار (ریال) و I حجم آب آبیاری بدون در نظر گرفتن بارندگی است. بر اساس این شاخص، مدیریت آبیاری باید به گونه‌ای باشد که میزان سود ناخالص به دست آمده در واحد آب

ارزیابی شد. دلیل تفاوت مقادیر اندازه‌گیری شده در سه تیمار یادشده با سایر تیمارها می‌تواند ناشی از گرفتگی قطره‌چکان‌ها باشد. پوگ‌بارگوئس و همکاران (۲۰۱۰) با مطالعه دو نوع از قطره‌چکان‌های خودتنظیم‌شونده فشار در سامانه‌های آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و سطحی، به این نتیجه رسیدند که میزان گرفتگی قطره‌چکان‌ها در سامانه زیرسطحی سه درصد بیشتر از سامانه سطحی اتفاق می‌افتد. کریمی و همکاران (۱۳۸۴) با بررسی تیپ در دو طول ۲۰ و ۶۰ متر به‌طورکلی تغییرات دبی در قطره‌چکان‌ها را در گروه عالی ارزیابی کردند.

جدول ۵- بررسی ضریب ساخت قطره‌چکان‌ها در لوله‌های تولیدی

تیما	مقدار CV	گروه‌بندی
NS1	0.017	عالی
NZ1	0.027	عالی
BS1	0.012	عالی
BZ1	0.013	عالی
NS2	0.044	عالی
NZ2	0.022	عالی
BS2	0.008	عالی
BZ2	0.022	عالی
N00	0.012	عالی
B00	0.009	عالی

جدول ۶- درصد خطای دبی اندازه‌گیری (q_d) و تغییرات دبی در قطره‌چکان‌ها (q_{var}) در لوله‌های تولیدی

تیما	مقدار q_d	گروه‌بندی	مقدار q_{var}	گروه‌بندی
NS1	1.69	خوب	3.38	عالی
NZ1	3.87	خوب	8.48	عالی
BS1	2	خوب	4.4	عالی
BZ1	2.22	خوب	5	عالی
NS2	6.47	متوسط	14.82	قابل قبول
NZ2	6.22	متوسط	11.4	قابل قبول
BS2	1.43	خوب	2.88	عالی
BZ2	6.22	متوسط	11.4	قابل قبول
N00	2.51	خوب	4.94	عالی
B00	1.96	خوب	3.17	عالی

ضریب یکنواختی

آبیاری قطره‌ای سطحی در برخی باغ‌های مرند، میانگین یکنواختی پخش آب را حدود ۹۵ درصد ارزیابی کردند و بیان داشتند سامانه‌های طراحی‌شده از راندمان مناسبی برخوردارند. شینی دشتگل و همکاران (۱۳۹۸) در ارزیابی فنی سامانه‌های زیرسطحی در کشت نیشکر، مقادیر میانگین ضریب یکنواختی، یکنواختی پخش و یکنواختی آماری را در طی دو فصل زراعی به ترتیب ۸۹/۲، ۸۷/۸ و ۸۹/۷ درصد گزارش کرده و مطرح کردند که عملکرد سامانه به‌طورکلی در محدوده خوب قرار می‌گیرد. نوشادی و قائمی (۱۳۹۱)

جدول ۷ نتایج مربوط به بررسی لوله‌های تولیدشده از نظر ضریب یکنواختی پخش آب در خاک بر اساس روش برالتز (۱۹۸۶)، یکنواختی توزیع بر اساس طبقه‌بندی نوشادی و قائمی (۱۳۹۱)، ضریب یکنواختی آماری بر اساس روش برالتز (۱۹۸۶) و مقدار ضریب یکنواختی ریزش آب قطره‌چکان‌ها را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، همه تیمارها در دو نوع لوله تولیدی به ترتیب پارامتر در گروه‌بندی عالی، مناسب، بالا و عالی طبقه‌بندی شدند و مشکلی در عملکرد آن‌ها مشاهده نشد. یگانه و همکاران (۱۳۹۱) در ارزیابی فنی سامانه‌های

در بررسی فنی و هیدرولیکی سامانه‌های آبیاری قطره‌ای در استان فارس گزارش کردند مقادیر DU و EU در کل استان فارس به ترتیب ۹۷-۶۱ و ۹۵-۵۰ است.

پتانسیل کاربرد آب

نتایج مربوط به میانگین بازده پتانسیل کاربرد آب در چارک پایین و بازده واقعی پتانسیل کاربرد در چارک پایین در جدول (۸) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بنا بر دستورالعمل SCS مقادیر PELQ برای لوله‌های تولیدی در گروه‌بندی خوب و در تک تیمار BS2 در گروه متوسط قرار گرفته‌اند؛ بنابراین، مشکلی از نظر کارکرد لوله‌های تولیدی مشاهده نشد. نوشادی و قائمی (۱۳۹۱) در

بررسی فنی و هیدرولیکی سامانه‌های آبیاری قطره‌ای در استان فارس گزارش کردند که به‌طور متوسط مقادیر PELQ و AELQ در کل استان فارس به ترتیب ۹۳-۳۴ و ۹۳-۴۳ است. یگانه و همکاران (۱۳۹۱) در بررسی سامانه‌های آبیاری قطره‌ای در مرند مقادیر PELQ و AELQ را به ترتیب ۸۷-۷۱ و ۹۷-۸۴ گزارش نمودند. حسینیان خطیب گورابی (۱۳۹۳) در بررسی سامانه‌های آبیاری قطره‌ای برای گیاه توت‌فرنگی، مقدار PELQ و AELQ را برای آبیاری قطره‌ای نواری به ترتیب ۸۲/۳۱ و ۹۱/۴۶ درصد به دست آورده و بیان نمود که مقدار زیاد AELQ نشان‌دهنده‌ی عملکرد مناسب سامانه آبیاری است.

جدول ۷- بررسی ضریب یکنواختی پخش، یکنواختی توزیع، یکنواختی آماری و ضریب یکنواختی ریزش بر حسب درصد

تیمار	مقدار CU	گروه‌بندی	مقدار DU	گروه‌بندی	مقدار UC	گروه‌بندی	مقدار EU	گروه‌بندی
NS1	98.60	عالی	97.81	مناسب	98.23	بالا	98.28	عالی
NZ1	97.90	عالی	96.61	مناسب	97.34	بالا	95.21	عالی
BS1	99.00	عالی	98.45	مناسب	98.78	بالا	97.57	عالی
BZ1	98.90	عالی	98.29	مناسب	98.65	بالا	97.14	عالی
NS2	96.50	عالی	94.44	مناسب	95.63	بالا	90.70	خوب
NZ2	98.20	عالی	97.14	مناسب	97.75	بالا	94.35	خوب
BS2	99.40	عالی	99.02	مناسب	99.23	بالا	98.76	عالی
BZ2	98.20	عالی	97.14	مناسب	97.75	بالا	94.38	عالی
N00	99.00	عالی	98.41	مناسب	98.75	بالا	97.50	عالی
B00	99.30	عالی	98.82	مناسب	99.07	بالا	98.77	عالی

جدول ۸- بازده پتانسیل کاربرد آب در چارک پایین و بازده واقعی پتانسیل کاربرد در چارک پایین

تیمار	مقدار PELQ	گروه‌بندی	مقدار AELQ
NS1	88.72	خوب	92.40
NZ1	85.69	خوب	89.50
BS1	87.82	خوب	91.70
BZ1	87.43	خوب	91.30
NS2	81.62	خوب	85.20
NZ2	84.94	خوب	88.70
BS2	80.02	خوب	92.90
BZ2	79.84	متوسط	88.70
N00	83.26	خوب	91.60
B00	83.60	خوب	92.80

نتیجه بررسی فنی تیپ‌های ساخته‌شده از مواد آکسوزیست‌تخریب‌پذیر در مقایسه با تیپ‌های معمولی نشان داد که تفاوتی بین این دو نوع تیپ در شرایط متفاوت مورد مطالعه در این پژوهش از نظر اینکه تیپ روی یا زیر

خاک قرار گیرد، یا گیاه با یا بدون سایه باشد، قابل صرف‌نظر کردن است؛ بنابراین، می‌توان از این نوع تیپ با توجه به مزایای زیست‌محیطی آن و عدم نیاز به جمع‌آوری یا آتش زدن تیپ‌ها پس از برداشت محصول استفاده کرد.

شاخص‌های بهره‌وری

عملکرد

جدول (۹) مقایسه میانگین عملکرد برای دو گیاه تربچه و لوبیا که با لوله‌های تیپ تولیدی آبیاری شده‌اند را نشان می‌دهد. عملکرد در دو سامانه آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی تفاوت معنی‌داری ندارند ($p>0.05$). نتایج به‌دست آمده نشان داد که عملکرد تربچه در آبیاری نواری سطحی با عملکرد 3644 kg/ha حدود ۱۶ درصد بیشتر از تیمار آبیاری نواری زیرسطحی با عملکرد 3147 kg/ha بود. این مقدار برای لوبیا در آبیاری نواری زیرسطحی با عملکرد 3147 kg/ha حدود ۱۱ درصد بیشتر از آبیاری نواری سطحی با عملکرد 2847 kg/ha بود. هر چند تفاوت عملکردها در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار نیست اما به‌نظر می‌رسد تفاوت مشاهده‌شده به این دلیل است که عمق کم ریشه تربچه مانع از استفاده حداکثری از آب توزیع‌شده در عمق ۱۵ سانتی‌متری خاک شده، درحالی‌که ریشه عمیق‌تر لوبیا باعث شده که استفاده مناسب‌تری از آب آبیاری انجام شود.

بوزکورت و منصور اوغلو (۲۰۱۸) گزارش کردند که عملکرد کاهو در آبیاری قطره‌ای سطحی و آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در دو عمق ۱۰ سانتی‌متری و ۲۰ سانتی‌متری تفاوتی با یکدیگر ندارد. نتایج پژوهش کولاک و همکاران (۲۰۱۸) راجع به گیاه بادمجان نشان داد که آبیاری قطره‌ای

سطحی عملکرد بیشتری نسبت به آبیاری قطره‌ای زیرسطحی به میزان $7/3$ و 11 درصد برای دور آبیاری سه روزه و شش روزه در سال اول داشت؛ اما عملکرد این دو سامانه در سال دوم مشابه بود. به همین دلیل نتیجه‌گیری شد که برای دستیابی به عملکرد بادمجان با کیفیت بهتر در منطقه مدیترانه‌ای ترکیه، هر دو روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و آبیاری قطره‌ای سطحی با دور آبیاری سه روزه توصیه می‌شوند. در پژوهشی دیگر روی کاهو که در مزرعه‌ای در دره سالیانس کالیفرنیا انجام شد و روش‌های آبیاری آن شامل آبیاری جویچه‌ای، قطره‌ای سطحی و زیرسطحی بود به این نتایج رسیدند که عملکرد کاهو نتایج مشابهی را برای تیمار آبیاری قطره‌ای جویچه‌ای و قطره‌ای زیرسطحی و عملکرد کمتری را برای روش آبیاری قطره‌ای سطحی نشان داد. مقدار آب مصرفی برای روش‌های آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و سطحی به‌ترتیب بین ۴۳ تا ۷۴ درصد آب مصرفی روش جویچه‌ای بود (هانسون و همکاران، ۱۹۹۷). همچنین در مقایسه آبیاری سطحی و زیرسطحی برای پیاز عملکرد بهتر آبیاری قطره‌ای زیرسطحی گزارش شده است (سلیمان و همکاران، ۲۰۲۰). بنا بر نتایج مطالعات مطرح‌شده در بالا، در مورد گیاهان مختلف به‌ویژه سبزی‌ها نمی‌توان به یک انتخاب نهایی بین آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی بر اساس عملکرد رسید.

جدول ۹- مقدار عملکرد دو سامانه آبیاری قطره‌ای نواری سطحی و زیرسطحی با لوله‌های تولیدی برای لوبیا و تربچه

آبیاری قطره‌ای نواری	عملکرد تربچه (kg/ha)	عملکرد لوبیا (kg/ha)
سطحی	3644	2018
زیرسطحی	3147	2847

بهره‌وری آب آبیاری

در مقایسه میانگین بهره‌وری آب آبیاری برای دو سامانه آبیاری نواری سطحی و زیرسطحی با لوله‌های تولیدی برای هر دو گیاه کشت‌شده، اختلاف معنی‌داری در سطح پنج درصد وجود ندارد ($p>0.05$). بر اساس شکل (۷)، مقادیر بهره‌وری برای تربچه در آبیاری زیرسطحی (10 kg/m^3) بیشتر از مقدار آن در آبیاری نواری سطحی

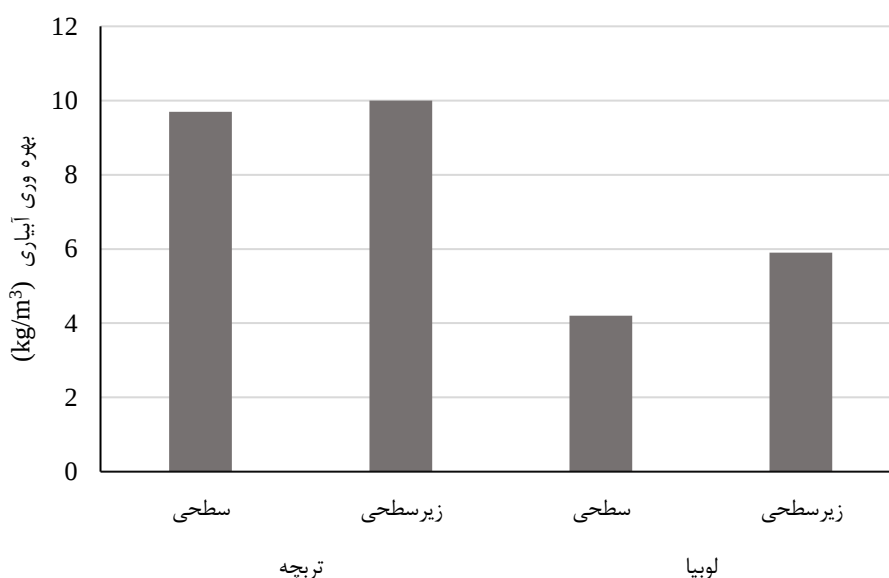
($9/7 \text{ kg/m}^3$) و برای لوبیا نیز در آبیاری نواری زیرسطحی ($5/9 \text{ kg/m}^3$) بیشتر از آبیاری نواری سطحی ($4/9 \text{ kg/m}^3$) است. مقبلی مهنی دررودی و همکاران (۱۳۹۲) گزارش کردند که اثر سامانه آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی بر بهره‌وری گیاه گل‌محمدی معنی‌دار نیست. شینی دشتگل و همکاران (۱۳۹۸) در بررسی شاخص بهره‌وری آب برای گیاه نیشکر به این نتیجه رسیدند که تیمارهای آزمایش از

زیرسطحی با لوله‌های تولیدی، برای دو گیاه را نشان می‌دهد. بر این اساس، مقادیر در هر دو گیاه اختلاف معنی‌داری با یکدیگر ندارند ($p>0.05$)، ولی مقدار بهره‌وری اقتصادی آب آبیاری برای تربچه در آبیاری زیرسطحی (717534 Rial/m^3) بیشتر از آبیاری سطحی (523288 Rial/m^3) و برای لوبیا نیز در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی (1415442 Rial/m^3) بیشتر از آبیاری سطحی (992517) بود.

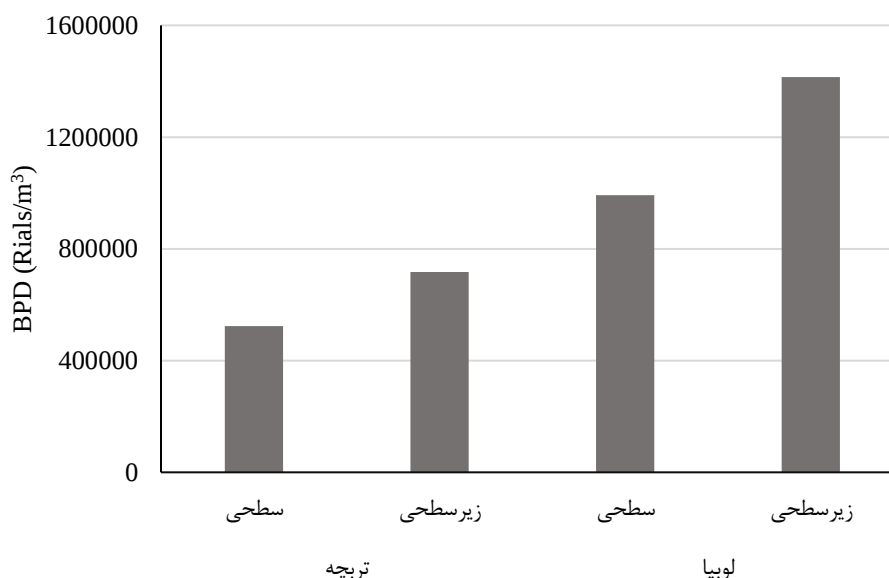
نظر فاصله بین قطره‌چکان‌ها، در سطح یک درصد معنی‌دار بوده ولی از نظر اعماق کارگذاری و اثرات متقابل فاصله و عمق کارگذاری، اختلاف معنی‌داری ندارند.

درآمد به ازای واحد آب مصرفی

شکل ۸ نتایج مقایسه میانگین بهره‌وری اقتصادی آب آبیاری برای دو سامانه آبیاری قطره‌ای سطحی و



شکل ۷- بهره‌وری آبیاری در دو سامانه آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی



شکل ۸- بهره‌وری اقتصادی آب آبیاری (BPD) در دو سامانه آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی

نتیجه گیری

استفاده کرد. با توجه به وضعیت منابع آب کشور و ضرورت استفاده از آبیاری قطره‌ای در راستای کاهش مصرف آب، توصیه می‌شود که نوارهای آبیاری قطره‌ای از مواد جدید که دوست‌دار محیط‌زیست هستند تهیه شوند و دولت از شرکت‌های سازنده‌ی تیپ که از مواد زیست‌تخریب‌پذیر استفاده می‌کنند، حمایت کند. از آنجایی که در صورت استفاده از تیپ در بیش از یک فصل زراعی به دلیل مشکلات عدیدهای که در این موارد ممکن است رخ دهد، استفاده از تیپ زیست‌تخریب‌پذیر می‌تواند گزینه‌ی بسیار مناسبی باشد.

تعارض منافع

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

در مقایسه تیپ‌های آبیاری ساخته‌شده از نظر فنی، نتیجه‌گیری شد که هر دو لوله پلی‌اتیلن معمولی و پلی‌اتیلن ساخته‌شده با مواد اکسوزیست‌تخریب‌پذیر در طی دوره کارکرد خود حداقل برای یک سال از نظر خصوصیات فنی، عملکرد مناسب و خوبی را در همه تیمارهای آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی، با گیاه سایه‌انداز و با گیاه بدون سایه داشتند. تیمار آبیاری قطره‌ای نواری سطحی و زیرسطحی دو گیاه لوبیا و تربچه از نظر عملکرد و شاخص‌های بهره‌وری در آبیاری با لوله‌های تولیدی اکسوزیست-تخریب‌پذیر تفاوتی با یکدیگر نداشتند.

از محصولات اکسوزیست‌تخریب‌پذیر می‌توان در قسمت‌های دیگر در بخش کشاورزی که تولید پسماند پلاستیکی زیادی دارد (خاکپوش، کیسه‌های کود، تور و...) استفاده کرد.

فهرست منابع

۱. احسانی، مهرزاد، و خالدی، هومن، ۱۳۸۲. بهره‌وری آب کشاورزی. کمیته آبیاری و زهکشی ایران. تهران. ۱۰۹ صفحه.
۲. احمدآلی، خالد، لیاقت، عبدالمجید و پورمحسنی، عباسعلی، ۱۳۹۵. بررسی مسائل، مشکلات و اثرات زیست‌محیطی آبیاری موضعی نواری. مدیریت آب در کشاورزی، ۳(۱)، صص. ۵۹-۷۲.
۳. اخوان، سمیرا، موسوی، سیدفرهاد، مصطفی‌زاده‌فرد، بهروز و قدمی فیروزآبادی، علی، ۱۳۸۶. بررسی آبیاری تیپ و شیاری از لحاظ عملکرد و کارایی مصرف آب در زراعت سیب‌زمینی. علوم آب‌ونخاک، ۱۱(۴۱)، صص. ۱۵-۲۷. [doi: 10.1001.1.22518517.1386.11.41.2.9](https://doi.org/10.1001.1.22518517.1386.11.41.2.9)
۴. باقری، رقیه، حسام، موسی، کیانی، علیرضا و هزارجریبی، ابوطالب، ۱۳۹۵. تعیین کارایی سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی (مطالعه موردی: باغ هلو و مرکبات شهرستان کردکوی). پژوهش آب/ایران، ۲۰(۱۰)، صص. ۶۹-۷۹.
۵. حسن‌زاده‌آرنایی، شیلان و فتحی، پرویز، ۱۳۹۲. بررسی اثر قطر ذرات بر گرفتگی فیزیکی نوارهای آبیاری قطره‌ای. حفاظت منابع آب‌ونخاک، ۳(۲)، صص. ۷۳-۸۱.
۶. حسینیان خطیب گورابی، صغری، ۱۳۹۳. بررسی فنی و اقتصادی دو سامانه آبیاری قطره‌ای نواری و لوله‌های قطره‌چکان‌دار برای محصولات گلخانه‌ای. پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد مهندسی آب، گیلان، دانشگاه گیلان.
۷. خالدیان، محمدرضا، حسینیان، صغری و معتمد، محمدکریم، ۱۳۹۵. ارزیابی سامانه‌های آبیاری قطره‌ای و بارانی از لحاظ شاخص‌های اقتصادی بهره‌وری آب در جنوب فرانسه. پژوهش آب در کشاورزی، ۲(۳۰۹)، صص.

doi: 10.22092/jwra.2016.106645 ۲۱۵-۲۲۶

۸. شینی دشتگل، علی، برومندنسب، سعید و ناصری، عبدعلی، ۱۳۹۸. ارزیابی فنی و هیدرولیکی قطره‌چکان‌ها و بررسی کارایی سامانه‌ی آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در کشت نیشکر. پژوهش آب در کشاورزی، ۳۳(۳)، صص. ۳۹۷-۴۱۱.
۹. صمدی پور هندواری، سهیلا، پیغمبردوست، سیده‌ادی و پیغمبردوست، سیدجمال‌الدین، ۱۳۹۲. مروری بر پلیمرهای زیست تخریب پذیر برای بسته‌بندی مواد غذایی و راهکارهای بهبود کارایی آنها با افزودن نانوذرات. بیست و یکمین کنگره ملی علوم و صنایع غذایی ایران. شیراز.
۱۰. کاظم‌عطار، هستی، نوری، حمیده و ابراهیمیان، حامد، ۱۳۹۹. تأثیر بهای واقعی آب بر گسترش سطح روش‌های آبیاری تحت فشار و بهبود بهره‌وری اقتصادی آب آبیاری (مطالعه موردی: شبکه آبیاری دشت قزوین). آبیاری و زهکشی/ایران، ۱۴(۲)، صص. ۶۱۶-۶۲۵. **doi: 20.1001.1.20087942.1399.14.2.22.7**
۱۱. عزیزاده، امین، ۱۳۸۵. طراحی سیستم‌های آبیاری (جلد دوم) طراحی سیستم‌های آبیاری تحت فشار. چاپ اول. انتشارات آستان قدس رضوی. ۳۶۷ صفحه.
۱۲. عزیزاده، امین، ۱۳۸۸. آبیاری قطره‌ای (اصول و عملیات)، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، ۴۹۳ صفحه.
۱۳. کریمی، محمد و جلینی، محمد، ۱۳۹۶. بررسی شاخص‌های بهره‌وری آب کشاورزی در محصولات مهم زراعی، مطالعه موردی: دشت مشهد (یادداشت فنی). آب و توسعه پایدار، ۱(۴)، صص. ۱۳۳-۱۳۸.
- Doi: 10.22067/jwsd.v4i1.52783**
۱۴. کریمی، احمد، همایی، مهدی و لیاقت، عبدالمجید، ۱۳۸۴. یکنواختی توزیع آب و کود در سیستم آبیاری نواری. پژوهش کشاورزی. پژوهش در کشاورزی، ۲(۵)، صص. ۵۳-۶۷.
۱۵. دهقانی سانچ، حسین و کشاورز، عباس، ۱۳۹۱. شاخص بهره‌وری آب و راهکار آتیه کشاورزی کشور. راهبرد اقتصادی، ۱۱(۱)، صص. ۱۹۹-۲۳۳.
۱۶. محققزاده، هژبر و کرمی، عزت‌اله، ۱۳۹۶. سازه‌های اثرگذار بر بهینگی مصرف آب در آبیاری قطره‌ای نواری در کشت گوجه‌فرنگی. علوم ترویج و آموزش کشاورزی ایران، ۱۳(۲)، صص. ۷۱-۸۹.
- Dor: 20.1001.1.20081758.1396.13.2.5.5**
۱۷. محمدی، هادی، خالدیان، محمدرضا و الفتی، جمال‌علی، ۱۴۰۱. امکان‌سنجی ساخت لوله‌های تیپ آبیاری قطره‌ای از مواد زیست تخریب پذیر. آبیاری و زهکشی/ایران، ۱۶(۱)، صص. ۲۰۵-۲۱۵.
- Dor: 20.1001.1.20087942.1401.16.1.16.3**
۱۸. مقبلی مهنی درودی، اسماء، دلبری، معصومه و کوهی، نادر، ۱۳۹۳. تأثیر آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی بر عملکرد گل محمدی تحت رژیم‌های مختلف آبیاری. تحقیقات آب و خاک ایران، ۴۵(۴)، صص. ۴۰۵-۴۱۲.
۱۹. نوشادی، مسعود و قائمی، علی‌اصغر، ۱۳۹۱. بررسی فنی و هیدرولیکی سیستم‌های آبیاری قطره‌ای در استان فارس. آبیاری و زهکشی/ایران، ۶(۴)، صص. ۲۵۴-۲۶۴.
۲۰. یگانه، زینب، بهمنش، جواد و رضایی، حسین، ۱۳۹۱. ارزیابی فنی آبیاری قطره‌ای در برخی باغ‌های شهرستان مرند. پژوهش آب در کشاورزی، ۴(۲۶)، صص. ۴۴۹-۴۶۰. **doi: 10.22092/jwra.2013.131424**
21. Billingham, N., Chiellini, E., Corti, A., Baci, R. and Wiles, D.M., 2003. Environmentally degradable plastics based on oxo-biodegradable of conventional polyolefins. *Biodegradable Polymers and Plastics*, 37, pp.313-325.
22. Bozkurt, S. and Mansuroglu, G.S., 2018. Responses of unheated greenhouse grown green bean to buried drip tape placement depth and watering levels. *Agricultural Water Management*, 197(1-3), pp.209-223.

23. Bralts, V.F., 1986. Field performance and evaluation. *Developments in Agricultural Engineering*, 9, pp.216 – 240.
24. Colak, Y.B., Yazar, A., Gonen, E. and Caglar Eroglu, E., 2018. Yield and quality response of surface and subsurface drip-irrigated eggplant and comparison of net returns. *Agricultural Water Management*, 206, pp.165-175.
25. Darouich, H., Cameira, M.R., Gonçalves, J.M., Paredes, P. and Pereira, L.S., 2017. Comparing sprinkler and surface irrigation for wheat using multicriteria analysis: water saving vs. economic returns. *Water*, 9(1), pp.50-69.
26. El-Sayed, O.M. and El-Hagarey, M.E., 2014. Evaluation of ultra-low drip irrigation and re-relationship between moisture and salts in soil and peach (*Pruns Persica*) yield. *American Journal of Science*, 10(8), pp.12-28.
27. Hanson, B.R., Schwankl, L.J., Schulbach, K.F. and Pettygrove, G.S., 1997. A comparison of furrow, surface drip, and subsurface drip irrigation on lettuce yield and applied water. *Agricultural Water Management*, 33(2-3), pp.139-157.
28. Harby, M.S., 2010. Studies on Bioplastic for Developing and Evaluating Drip Irrigation. Ph.D. Institute of Agronomy and Plant Breeding, Professorship of Agronomy, Germany.
29. Keller, J. and Karmeli, D., 1974. Trickle irrigation design parameters. *Transaction of the ASAE*, 17(4), pp.678-384.
30. Merriam, J.L. and Keller, J., 1978. Farm Irrigation System Evaluation: A Guide for Management. Utah State University, Utah.
31. Mohammadi, M.H., Khaledian, M.R. and Olfati, J.A., 2024. Using degradable oxidizing additives in the manufacturing of drip irrigation tapes to prevent environmental problems. *Irrigation and Drainage*, 74(1), pp.43-54.
32. Morison, J.I.L., Baker, N.R., Mullineaux, P.M. and Davies, W.J., 2008. Improving water use in crop production. *Sustainable Agriculture*, 363(1491), pp.639–658.
33. Pathak, S., Sneha, C. and Mathew, B.B., 2014. Bioplastics: Its timeline based scenario and challenge. *Journal of Polymer and Biopolymer Physics Chemistry*, 2(4), pp.84-90.
34. Puig- Bagues, J., Arbat, G., Elbana, M., Duran-Ros, M., Barragan, J., Ramirez de Cartagena, F. and Lamm, F.R., 2010. Effect of flushing frequency on emitter clogging in microirrigation with effluents. *Agricultural Water Management*, 97(6), pp.883-891.
35. Scott, G., 2000. Green polymers. *Polymers Degradation and Stability*, 68, pp.1-7.
36. Soliman, A., Morad, M., Wasfy, K.I. and Moursy, M., 2020. Utilization of aquaculture drainage for enhancing onion crop yield under surface and subsurface drip irrigation systems. *Agricultural Water Management*, 239, pp.106244.
37. Stevens, E.S., 2003. What makes green plastics green? *Biocycle*, 44(3), pp.24–27.
38. Ojeda, T.F.M., Dalmolin, E., Forte, M.M.D.C., Jacques, R.J.S., Bento, F.M. and Camargo, F.A.O., 2009. Abiotic and biotic degradation of oxo-biodegradable polyethylenes. *Polymer Degradation and Stability*, 94(6), pp.965–976.
39. Tian, K. and Bilal, M., 2020. Chapter 15-Research progress of biodegradable materials in reducing environmental pollution. *Abatement of Environmental Pollutions*, pp. 313-330.
40. Tokiwa, Y., Calabia, B.P., Ugwu, C.U. and Aiba, S., 2009. Biodegradability of plastics. *International Journal of Molecular Sciences*, 10(9), pp.3722-3742.
41. Tung, J.F., Wiles., D.M., Cermak, B.E., Gho, J.G. and Hare, C.W.J., 1999. Totally degradable polyolefin products. Addcon World, Prague, RAPRA Technology, pp: 17.
42. Wiles, D.M. and Scott, G., 2006. Polyolefins with controlled environmental degradability. *Polymer Degradation and Stability*, 81(6), pp.1591-1582.

Evaluation of Bio-degradable Drip Irrigation Tapes from the Technical Point of View and Irrigation Water Productivity

M .H. Mohammadi, M.R Khaledian* , and J.A. Olfati

MSc. Student, Department of Water Eng., Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan; Rasht, Iran.

hadimhmmohammadi@gmail.com

Department of Water Eng., Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan; Rasht, Iran, and Department of Water Engineering and Environment, Caspian Sea Basin Research Center. khaledian@guilan.ac.ir

Associate Prof., Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan.

jamalaliolfati@gmail.com

Received: December 2024 and Accepted: July 2025

Abstract

Nowadays, a large amount of plastic materials is used in the agricultural sector, but their remains in agricultural lands have caused many problems. The use of biodegradable materials can be a suitable solution, and the challenges of using these materials must first be carefully examined. In this research, oxo biodegradable drip irrigation tapes were used under the field conditions. During one cropping season, the tapes were used in two situations: under and on the soil surface, together with shade and non-shade plants (beans and radish). After 6 and 11 months, the tapes were examined in terms of technical indicators such as distribution uniformity and water application efficiency of radish and beans. Results showed that, compared to normal pipes, the pipes made with oxo additive did not differ in terms of technical indicators and irrigation water productivity, and they can be used in irrigation. The use of biodegradable drip irrigation tapes, along with increasing the irrigation water productivity compared to other irrigation systems, will reduce the accumulation of plastic materials in agricultural lands.

Keywords: Beans, Radish, Water distribution uniformity

* - Corresponding Author's email: khaledian@guilan.ac.ir
<https://doi.org/10.22092/jwra.2025.368011.1067>

Assessment of Climate Change Impact on Wheat Grain Yield and Biomass Under Two Levels of Salinity and Drought Stress

F. Hajiabadi, F. Hassanpour, M. Yaghoobzadeh* , and H. Hammami

Ph. D. Graduate of Irrigation and Drainage, Department of Water Engineering, College of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran. And Educational Expert of Department of Water Engineering, College of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran. fhajiabadi@birjand.ac.ir

Associate Prof., Department of Water Engineering, College of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran.
hassanpourir@uoz.ac.ir

Associate Prof., Department of Water Engineering, College of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran, Department of Research Group of Drought and Climate Change, University of Birjand, Birjand, Iran.

M.yaghoobzadeh@birjand.ac.ir

Associate Prof., Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran.
hhammami@birjand.ac.ir

Received: March 2025 and Accepted: July 2025

Abstract

The use of crop models to estimate plant yield and determine optimal irrigation schedules is an effective strategy for sustainable agricultural water resource management. This study investigates the impact of climate change on wheat grain yield and biomass under two levels of salinity stress (1.6 and 6.0 dS/m) and five levels of water (rainfed, 50, 75, 100 and 125% of water requirement) in Birjand region. The AquaCrop model was employed to simulate crop performance during a historical baseline period (1975–2004) and a future period (2025–2054). To project future climate variables, including precipitation and maximum and minimum temperatures, five General Circulation Models (GCMs), namely, IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM, CSIRO-MK3.6, HADGEM2-ES, and GFDL-ESM2M were used under RCP4.5 and RCP8.5 emission scenarios. Based on a weighting method and performance metrics, the CSIRO-MK3.6 model was selected as the most suitable model for the region. The results indicated a projected decrease in precipitation and an increase in annual average maximum and minimum temperatures in the future period under both emission scenarios. Wheat grain yield simulation was zero under rainfed conditions in either period. The highest yields were observed under irrigation treatments supplying 100% and 125% of the crop's water requirements. For the RCP4.5 scenario, yields were 3.834 and 4.032 t/ha, respectively, and for RCP8.5, 3.822 and 4.170 t/ha. Finally, the grain yield reduction values were compared with the SMDI drought index, and the results showed that the greatest impact of drought was observed at high salinity and water stress levels.

Keywords: Drought, SMDI index, AOGCM models, AquaCrop

* - Corresponding Author's email: M.yaghoobzadeh@birjand.ac.ir
<https://doi.org/10.22092/jwra.2025.368392.1069>

Estimation of Daily Reference Evapotranspiration Using a Hybrid Approach Combining Stochastic Gradient Descent Optimization and Artificial Neural Network

D. Zare Haghi * , S. Shirazi, S. Samadianfard, and F. Mikaeili

Associate Prof., Soil Science Dept., Faculty of Agriculture, University of Tabriz.

davoudhaghi@tabrizu.ac.ir

MSc, Soil Science Dept., Faculty of Agriculture, University of Tabriz.

shilashirazi75@gmail.com

Associate Prof., Water Engineering Dept., Faculty of Agriculture, University of Tabriz.

s.samadian@tabrizu.ac.ir

PhD candidate, Water Engineering Dept., Faculty of Agriculture, University of Tabriz.

mikailifatemeh@yahoo.com

Received: April 2025 and Accepted: July 2025

Abstract

Reference evapotranspiration (ET_0) is a crucial parameter in agricultural water management. In this study, two modeling approaches were investigated for predicting daily ET_0 at the Kish, Gorgan, and Shiraz meteorological stations: (1) a standard multilayer perceptron (MLP) model, and (2) an MLP model optimized using the stochastic gradient descent (SGD) algorithm. A dataset comprising 23 years (2000–2023; 1379–1402 in the Iranian calendar) of daily meteorological data was used to develop and validate the models under five different input scenarios, selected based on Pearson correlation analysis. Model performance was evaluated using multiple statistical metrics, including the correlation coefficient (R), root mean square error (RMSE), Nash–Sutcliffe efficiency (NSE), and the Willmott agreement index (d). Among the tested configurations, the fifth scenario of the combined MLP-SGD model showed the highest accuracy, achieving RMSE values of 1.04 mm/day, 1.20 mm/day, and 1.94 mm/day for the Shiraz, Gorgan, and Kish stations, respectively. The results indicate that the combined MLP-SGD model outperformed the standalone MLP model, demonstrating its reliability and effectiveness in predicting reference evapotranspiration. These findings underscore the potential of hybrid artificial intelligence models in improving water resource management and promoting sustainable agricultural practices.

Keywords: Combined methods, Hybrid artificial intelligence modeling, Multilayer Perceptron

* - Corresponding Author's email: davoudhaghi@tabrizu.ac.ir
<https://doi.org/10.22092/jwra.2025.368869.1071>

Investigating the Effect of Design Parameters of a Subsurface Irrigation System with Perforated PVC Pipes on Soil Moisture Changes and Irrigation Frequency of Pistachio Trees

I. Esfandiarpour, N. Sedaghati, S. J. Hosseinifard, S. Sadr*^{id}, and
S. Kalantari

Professor, Department of Soil Science, College of Agriculture, Vali-e-Asr University of Rafsanjan University, Iran.

esfandiarpour@vru.ac.ir

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

Associate prof. of Soil Science, Pistachio Research Center, Horticultural Sciences Research Institute, Agriculture Research Education and Extension Organization (AREEO), Rafsanjan, Iran. hosseinifard@pri.ir

Assistant prof. of Soil Science, Pistachio Research Center, Horticultural Sciences Research Institute, Agriculture Research Education and Extension Organization (AREEO), Rafsanjan, Iran. sadr@pri.ir

MSc Graduate, Department of Soil Science, College of Agriculture, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Iran.

s.kalantari9232@gmail.com

Received: November 2024 and Accepted: May 2025

Abstract

In the present study, the effect of design parameters of a subsurface irrigation system with perforated PVC pipes on the irrigation frequency of pistachio trees was studied for two years in Kerman Province. A split-split plot experiment was conducted with four factors: canal depth (40 and 60 cm), pipe diameter (110 and 160 mm), pipe hole diameter (9 and 12 mm), and pipe hole spacing (15 and 25 cm) in a randomized complete block design with three replications. All treatments were irrigated with an amount of 75% of water requirement and an irrigation frequency of 24 days. To measure the volumetric soil moisture content, a TDR device was used. Statistical analysis of the data was performed using MSTAT-C software, and means were compared with an LSD test at a 0.05 probability level. The results indicated that the volumetric soil moisture of pistachio trees increased by 12% and 6.2%, respectively, between two consecutive irrigations (2 and 23 days after irrigation). The optimal irrigation frequency for pistachio trees in this system was determined to be 20 and 24 days, respectively. Therefore, by optimizing the design parameters of the subsurface irrigation system using perforated PVC pipes, water savings of approximately 50% can be achieved without exposing the plants to severe or harmful moisture stress. According to the results obtained, among the design factors, channel depth of 40 cm, pipe diameter of 110 mm, hole diameter of 12 mm and hole spacing of 15 cm had a better situation in terms of crop yield and water consumption efficiency. This optimal treatment produced a yield of 11.1 (kg/tree) and water use efficiency of 1325 gr/m³ after leaching and 828 gr/m³ before leaching, and was recommended as the best treatment.

Keywords: Water use efficiency, Management allowed depletion, Readily available water, Kerman

* - Corresponding Author's email: sadr@pri.ir

<https://doi.org/10.22092/jwra.2025.367819.1063>

Investigation of the Relationship between Maize Biological Yield and Applied Water at Different Growth Stages under Simultaneous Water-Fertilizer Stress Conditions

F. Zargar Yaghoubi, M. Sarai Tabrizi, * A. Mohammadi Torkashvand, M. Esfandiari, and H. Ramezani Etedali

Ph.D. Student, Soil Engineering and Sciences, Department of Soil Engineering and Sciences, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran., Islamic Azad University, Tehran, Iran. faramarz.zargaryaghoubi@iau.ac.ir

Assistant Prof., Department of Water Engineering and Sciences, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.
m.sarai@iau.ac.ir

Professor, Department of Soil Engineering and Sciences, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.
ali.mohammaditorkashvand@iau.ac.ir

Assistant Prof., Department of Soil Engineering and Sciences, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.
doddesfandiari@gmail.com

Professor, Department of Water Engineering and Sciences, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.
ramezani@eng.ikiu.ac.ir

Received: October 2023 and Accepted: March 2025

Abstract

This research investigated the wet yield and periodic evapotranspiration of maize (*Zea mays* L. Var. Sc. 704), under the influence of different amounts of water and fertilizer. A two-factor factorial experiment was conducted in the form of randomized complete block design in two crop years, 2020 and 2021, in Aliabad Fashapuyeh District, Hasanabad Division, Ray County (Tehran Province). Water treatments included three levels of W0, W1, and W2 and three levels of fertilizer, F0, F1 and F2, which were carried out by supplying 100%, 75% and 50% of water requirement based on soil moisture deficiency and fertilizer was based on soil test for macro-nutrients of fodder corn, respectively. The results showed that, along with the increase in water and fertilizer stress, the two-year average amount of yield and applied water (total evapo-transpiration) decreased by 27.6% and 46.8%, respectively, so that the yield decreased from 50.4 to 36.5 t/ha and applied water decreased from 694 to 369 mm. The simple and interactive effects of treatments on yield and periodic applied water were significant at the 95% probability level. The results of modeling the relative yield of the crop based on periodic relative ET values indicate the suitability of Singh's sum-able and Rao's multiplicative model in the conditions of water and fertilizer stress. In total, the results showed that the production of fodder corn was firstly dependent on the volume of irrigation water and then on the supply of nutrients. The highest biological yield after the control treatment (W0F0) was related to the application of the W0F1 treatment. Also, a positive and significant correlation between the total evapotranspiration with the yield ($R=0.94$) was proved. On the other hand, no significant yield difference was observed between the three treatments W1F0, W1F1 and W1F2. Therefore, in the condition of irrigation water shortage, the W1F2 treatment is more economical than the other treatments. W1 and the square root production function with RMSE, R^2 and NS statistics of 0.42, 0.98 and 0.97, respectively, is a more suitable function for estimating yield with water and fertilizer consumption compared to the functions of Logistics and Cobb Douglas. It was found that, in the conditions of inadequate water and macro nutrients, not only ET of different stages of growth can be increased by management of fertilizer consumption, but also plant performance was completely dependent on the correct management of water and fertilizer consumption.

Keywords: Periodic evapotranspiration, Empirical production functions Simultaneous water and fertilizer stress, Time domain reflectometry, *Zea mays* L. Var. SC. 704

* - Corresponding author Email: m.sarai@iau.ac.ir
<https://doi.org/10.22092/jwra.2025.363823.1013>

Investigating the Effect of Different Factors of Water, Soil, Irrigation Management, and Climate Rainfall in Wheat Irrigation Scheduling Using Niazab Software

H. Jafari * , N. A. EbrahimiPak, and A. Tafeteh

Assistant Prof., Soil and Water Research Institute, Agricultural Education and Extension Research Organization, Karaj, Iran.
Jafari52_h@yahoo.com

Associate Prof., Soil and Water Research Institute, Agricultural Education and Extension Research Organization, Karaj, Iran.
nebrahimipak@yahoo.com

Associate Prof., Soil and Water Research Institute, Agricultural Education and Extension Research Organization, Karaj, Iran.
Arash_tafteh@yahoo.com

Received: August 2024 and Accepted: April 2025

Abstract

In this research, the effect of climate (rainfall), soil (texture) and irrigation management (irrigation system and efficiency) on the amount and frequency of wheat irrigation in Alborz Province was investigated. For this purpose, wheat irrigation planning at two times and amount of rainfall, in three soil textures (loam, sandy loam and clay loam), for gravity, sprinkler, and drip irrigation systems and different irrigation efficiencies were estimated. Results showed that 7537, 4951 and 4959 m³/ha of water should be available for wheat in 8, 14, and 17 times in gravity, sprinkler, and drip irrigation systems, respectively. Also, the results showed that the differences in soil texture did not change the volume of irrigation water, but the number of irrigations in light soils was more than in heavy soils. Based on this, the amounts of water needed in the three soils of sandy loam, loam, and clay loam were 7987, 7537 and 7988 m³/ha, and the number of irrigations were 10, 8, and 7, respectively. Unlike the soil texture, the efficiency of irrigation water application changed both the volume and the number of irrigations, so that in those three soils with an efficiency of 30%, 46% and 45%, the amount of water required was 12247, 7537 and 8188 m³/ha, respectively. Effective rainfall, like irrigation efficiency, affected irrigation planning depending on the time and amount of rainfall, so that in loam soil with the same rainfall but in two different dates, different amounts of irrigation water were obtained. Therefore, in wheat irrigation planning, attention should be paid to the soil texture, irrigation efficiency, irrigation management, and effective rainfall.

Keywords: Water consumption, Irrigation interval, Water application efficiency

* - Corresponding Author's email: Jafari52_h@yahoo.com
<https://doi.org/10.22092/jwra.2025.366606.1049>

Investigating the Effect of Different Factors of Water, Soil, Irrigation Management, and Climate Rainfall in Wheat Irrigation Scheduling Using Niazab Software.....1

H. Jafari, N. A. EbrahimiPak, and A. Tafeteh

Investigation of the Relationship between Maize Biological Yield and Applied Water at Different Growth Stages under Simultaneous Water-Fertilizer Stress Conditions.....2

F. Zargar Yaghoubi, M. Sarai Tabrizi, A. Mohammadi Torkashvand, M. Esfandiari, and H. Ramezani Etedali

Investigating the Effect of Design Parameters of a Subsurface Irrigation System with Perforated PVC Pipes on Soil Moisture Changes and Irrigation Frequency of Pistachio Trees.....3

I. Esfandiarpour, N. Sedaghati, S. J. Hosseinifard, S. Sadr, and S. Kalantari

Estimation of Daily Reference Evapotranspiration Using a Hybrid Approach Combining Stochastic Gradient Descent Optimization and Artificial Neural Network.....4

D. Zare Haghi, S. Shirazi, S. Samadianfard, and F. Mikaeili

Assessment of Climate Change Impact on Wheat Grain Yield and Biomass Under Two Levels of Salinity and Drought Stress.....5

F. Hajiabadi, F. Hassanpour, M. Yaghoobzadeh, and H. Hammami

Evaluation of Bio-degradable Drip Irrigation Tapes from the Technical Point of View and Irrigation Water Productivity.....6

M. H. Mohammadi, M.R Khaledian, and J.A. Olfati

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

Journal of Water Research in Agriculture

Vol. 39, No. 1
2025

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

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

Editorial Board

Mohammad Bybordi, PhD
Naser Davatgar, PhD
Niaz Ali Ebrahimi Pak, PhD
Nader Heydari, PhD
Heydar Ali Kashkuli, PhD
Abdolmajid Liaghat, PhD
Mohammad Hosein Mahdian, PhD
Seyed Majid Mirlatifi, PhD
Seyed Farhad Moosavi, PhD
Ebrahim Pazira, PhD

Senior University Lecturere
Associate Prof, Soil and Water Research Ins
Associate Prof, Soil and Water Research Ins
Associate 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
Eng. 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 39/ No 1/ 2025

ISSN: 2228-7140

Contents

Subject

Page

Investigating the Effect of Different Factors of Water, Soil, Irrigation Management, and Climate Rainfall in Wheat Irrigation Scheduling Using Niazab Software.....1

H. Jafari, N. A. EbrahimiPak, and A. Tafeteh

Investigation of the Relationship between Maize Biological Yield and Applied Water at Different Growth Stages under Simultaneous Water-Fertilizer Stress Conditions.....2

F. Zargar Yaghoubi, M. Sarai Tabrizi, A. Mohammadi Torkashvand, M. Esfandiari, and H. Ramezani Etedali

Investigating the Effect of Design Parameters of a Subsurface Irrigation System with Perforated PVC Pipes on Soil Moisture Changes and Irrigation Frequency of Pistachio Trees.....3

I. Esfandiarpour, N. Sedaghati, S. J. HosseiniFard, S. Sadr, and S. Kalantari

Estimation of Daily Reference Evapotranspiration Using a Hybrid Approach Combining Stochastic Gradient Descent Optimization and Artificial Neural Network.....4

D. Zare Haghi, S. Shirazi, S. Samadianfard, and F. Mikaeili

Assessment of Climate Change Impact on Wheat Grain Yield and Biomass Under Two Levels of Salinity and Drought Stress.....5

F. Hajiabadi, F. Hassanpour, M. Yaghoobzadeh, and H. Hammami

Evaluation of Bio-degradable Drip Irrigation Tapes from the Technical Point of View and Irrigation Water Productivity.....6

M. H. Mohammadi, M.R Khaledian, and J.A. Olfati