نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۸، بهمن - اسفند ۱۴۰۳، ص. ۹۳۶-۹۲۷

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No.6, Vol. 18, Feb.-Mar. 2025, p. 927-936

مقاله علمی-پژوهشی

اثر بیوچار و کیفیت آب آبیاری بر عملکرد و بهره‌وری آب ذرت

مصطفی زنجانی[۱]، محمود مشعل[۲]، مسعود پورغلام آمیجی[۳*]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۲۴

چکیده

آب‌های نامتعارف، مطمئن‌ترین منابع آبی هستند که در شرایط کمبود، وضعیت نامناسب اقلیمی و بحران‌ها در دسترس می‌باشند. همچنین با توجه قرارگیری کشور ایران در موقعیت جغرافیایی خشک و نیمه‌خشک، باید از هرگونه تلفات تبخیری آب جلوگیری کرد. به همین دلیل، این پژوهش با هدف بررسی تأثیر بیوچار و پساب تصفیه‌شده بر عملکرد و بهره‌وری آب بر اساس وزن تر، خشک و دانه ذرت انجام شد. بنابراین آزمایشی به صورت فاکتوریل بر پایه بلوک‌های کامل تصادفی در گلدان‌های استونه‌ای به ارتفاع ۶۰ و قطر ۳۰ سانتی‌متر و در هوای آزاد در شهرستان قم در سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۱ انجام شد. تیمارهای آزمایش شامل سه نوع آب با کیفیت مناسب (چاه) (I1)، پساب تصفیه‌شده (I2) و اختلاط آب و پساب تصفیه‌شده با نسبت یکسان (I3) و سه سطح بیوچار (تهیه‌شده از مواد سلولزی چوب‌های جنگلی) شامل ۱۰ درصد حجمی گلدان‌ها (B1)، ۵ درصد حجمی گلدان‌ها (B2) و عدم استفاده از بیوچار (B3) بود. نتایج نشان داد که اثر متقابل کیفیت آب و کاربرد سطوح مختلف بیوچار بر شاخص برداشت، بهره‌وری آب بر اساس وزن تر، خشک و دانه ذرت در سطح احتمال ۱ درصد و عمکلرد دانه در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار است. بیشترین مقدار صفات شاخص برداشت، بهره‌وری آب بر اساس وزن تر، خشک و دانه ذرت به ترتیب، ۰/۵۳، ۲/۰۴ کیلوگرم بر مترمکعب، ۰/۴۹ کیلوگرم بر مترمکعب و ۰/۹۱ کیلوگرم بر مترمکعب و همچنین عملکرد دانه ۳۷۱/۸۱ گرم از تیمار B1I1 به‌دست آمد. صفات فوق نسبت به حداقل‌ترین تیمارها، به ترتیب ۴۳/۲، ۲۸/۳، ۴۴/۱ و ۳۵/۸ درصد و عملکرد دانه ۳۶/۱ درصد افزایش داشت. نتایج کلی حاکی از آن بود که در شرایط ثابت کیفیت آب، بیوچار می‌تواند با حفظ مواد مغذی و رطوبت در خاک، افزایش عملکرد، شاخص برداشت و بهره‌وری آب ذرت را تضمین کند.

واژه‌های کلیدی: ارتقای بهره‌وری آب، افزایش عملکرد محصول، آب نامتعارف، محصول راهبردی

مقدمه

آب یکی از مهم‌ترین منابع مورد نیاز جامعه بشری و در عین حال یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های قرن حاضر است که می‌تواند سرمنشأ بسیاری از تحولات مثبت و منفی جهان قرار گیرد. عدم انطباق بین تأمین و تقاضای آب، می‌تواند بحران‌آفرین باشد و در بعد محلی، منطقه‌ای، ملی و حتی در بعد جهانی اتفاق افتد. عدم تعادل در بخش منابع آب می‌تواند ناشی از چرخه هیدرولوژی و محدودیت طبیعی منابع آب و نیز فعالیت‌های بشری نظیر استفاده بی‌رویه از منابع و آلوده کردن منابع آب باشد (Bakas et al., 2020; Ahmed et al., 2021; Khosravi et al., 2024). مطالعات مختلفی وجود دارد که خطرات ناشی از کمبود آب و آسیب‌پذیری منابع آب را در مقیاس منطقه‌ای و جهانی مورد بررسی قرار داده‌اند. با توجه به اینکه در دهه‌های اخیر، افزایش جمعیت رشد قابل توجهی داشته و در پی آن نیاز به تولید مواد غذایی و گیاهی بیشتر شده است، لذا موجب استفاده بیشتر و گسترده‌تر انسان از منابع طبیعی به‌خصوص منابع آبی گردیده است (Cosgrove & Rijsberman, 2014; Vaghefi et al., 2019; Pourgholam-Amiji et al., 2022; Ahangari Hassas et al., 2022; Pourgholam-Amiji et al., 2025). همچنین رشد جمعیت جهان و پیش‌بینی ۹/۸ میلیارد نفری جمعیت تا سال ۲۰۵۰، نیاز جهانی به غذا را افزایش داده و انتظار می‌رود سرانه غذایی تا سال ۲۰۵۰ دو برابر شود. متناسب با این نرخ افزایش، انتظار می‌رود که تقاضای غذا افزایش یابد (Alexandratos & Bruinsma, 2012). از طرفی در سال‌های اخیر، استفاده بی‌رویه از نهاده‌های شیمیائی و آب در اراضی کشاورزی منجر به معضلات زیست‌محیطی از جمله آلودگی

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب، دانشکده فناوری کشاورزی (ابوریحان)، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده فناوری کشاورزی (ابوریحان)، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
۳- دانشجوی دکتری گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: Mpourgholam6@ut.ac.ir)

منابع آب، افت کیفیت محصولات کشاورزی و کاهش میزان حاصلخیزی خاک شده است. لذا برای تولید محصول، به مدیریت صحیح آب و خاک نیاز است تا ضمن توجه به شرایط بحرانی آب، توسعه پایدار نیز حاصل گردد.

بنابراین یکی از تنگناهای اساسی که دنیا بخصوص مناطق خشک و نیمه‌خشک با آن مواجه‌اند، کافی نبودن آب برای مصارف متفاوت، اعم از شرب، صنعت، کشاورزی و نیازهای محیط‌های طبیعی-زیست‌محیطی است. نظر به موقعیت جغرافیایی کشور ما در کره‌ی زمین که از شرایط آب و هوایی از جمله مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان محسوب گشته و میانگین بارندگی سالانه آن به‌مراتب از متوسط بارندگی کره زمین کمتر می‌باشد، مدیریت صحیح منابع آبی ضروری است (Panahi et al., 2020; Viswanathan et al., 2022). با افزایش جمعیت و توسعه شهری و نیز افزایش تولیدات کشاورزی، گسترش آبیاری و تخریب منابع آب موجود، نیاز به منابع آب بیشتر و مدیریت بهینه آن افزایش یافته است. تأمین انواع نیازهای زیست‌محیطی و اکوسیستم، شهری، کشاورزی، برقابی و تفریحی با توجه به کیفیت آب در کنار محدودیت منابع آب بر پیچیدگی‌های مسئله افزوده است (Ladi et al., 2021; Radhika et al., 2022). این مهم بدون توجه به یافته‌های تحقیقاتی جدید و استفاده از منابع آب کمتر از عرف، امکان‌پذیر نبوده و نمی‌توان بدون استفاده و دخیل کردن مدیریت‌های آب خاک، بر مشکلات و بحران آب در تمام بخش‌های شرب، کشاورزی و صنعت فائق آمد و منابع آب محدود را برای دست‌یابی به امنیت غذایی پایدار به درستی مدیریت کرد.

از طرفی به دلیل افزایش نیاز روزانه انسان به غذا، کشاورزی باید از نظر تولید با منابع آب موجود توسعه یابد. در این راستا کشت آبی به توجه بیشتری نیاز دارد، زیرا میزان تولید بیشتر در واحد سطح با کشت آبی به دست می‌آید اما منابع آب جدید برای چنین توسعه‌ای محدود است. به دلیل محدودیت منابع آب، تأکید بسیار زیادی بر استفاده موثرتر از آب‌های موجود در بخش‌های مختلف می‌باشد تا با کمترین فشار وارده، هرکدام از این بخش‌ها به بالاترین بهره‌وری دست یابند (Willer & Lernoud, 2019; Worch, 2021; Ghazi et al., 2021). لذا برای داشتن یک کشاورزی موفق، صنعت کارا و بخش شرب و محیط‌زیست بدون دغدغه به دریافت حقابه‌های طبیعی خود، لازم است که با به‌کارگیری فناوری‌ها و نتایج و یافته‌های محققین و همچنین اعمال مدیریت‌های صحیح، از منابع موجود به نحو مطلوب استفاده کرد (Emadodin et al., 2019; Pourgholam-Amiji et al., 2022). بنابراین، با توجه به محدودیت آب جاری و همچنین کم بارشی و خشک‌سالی سال‌های اخیر، امنیت غذایی و تولید محصولات کشاورزی وارد مرحله خطر جدی شده است. این مهم صحیح است که باید برای استفاده از محصولات آب‌بر به واردات و تجارت آب مجازی روی آورد اما حتی‌الامکان باید از منابع موجود (آب و زمین) به نحو مطلوب استفاده کرده و تولید پایدار را حاصل کرد. این مهم بدون استفاده از آب‌های نامتعارف و دسته دوم یا چندم، امکان‌پذیر نبوده و نمی‌توان بدون استفاده از منابع نامتعارف، بر مشکلات و بحران آب در تمام بخش‌های شرب، کشاورزی و صنعت فائق آمد و منابع آب محدود را برای دست‌یابی به امنیت غذایی پایدار به درستی مدیریت کرد. به همین دلیل هرگونه مدیریتی منجر به استفاده مجدد از منابع آب آلوده به ویژه پساب تصفیه‌شده با روش‌های گوناگون (تصفیه، بازیابی و استفاده مجدد از آب‌های نامتعارف نظیر زهاب‌ها و پساب‌ها) شود، حائز اهمیت بوده و باید مورد بررسی قرار گیرد.

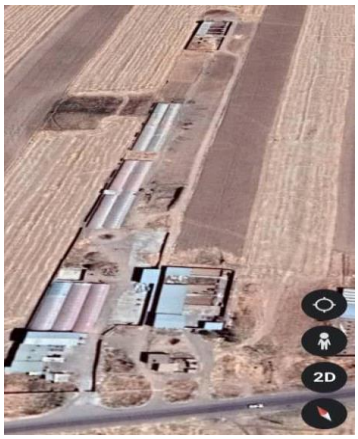
استفاده از بیوچار برای افزایش عملکرد گیاهان، در مطالعات بسیاری پیشنهاد شده است. بیوچار زغال تهیه‌شده از زیست‌توده‌های گیاهی و ضایعات کشاورزی است که به عنوان اصلاح‌کننده خاک استفاده می‌شود. این ماده به صورت جامد و سرشار از کربن است که می‌تواند به مدت هزاران سال در خود نگه دارد. بیوچار سبب اصلاح خاک شده و حاصلخیزی آن را افزایش می‌دهد. این نوع کود تناژ محصولات کشاورزی را افزایش داده و می‌تواند در برابر برخی بیماری‌های گیاهی از گیاهان محافظت کند. گسترش کشاورزی زیستی و نیز آلودگی‌های جوری از سوی دیگر باعث شده تا استفاده از این نوع کود رو به افزایش باشد. اما در ایران این ماده آلی تا حدودی ناشناخته باقی مانده است. بیوچار به توسعه پایدار کشاورزی و بهبود نگهداری آب در خاک، افزایش ظرفیت کاتیونی و تعامل با چرخه مواد غذایی خاک از طریق تعدیل pH خاک کمک می‌کند. روش‌های مختلفی برای افزایش مواد آلی خاک وجود دارند که عبارتند از افزودن کودهای دامی، افزودن مالچ، کشت گیاهان پوششی، برگرداندن بقایای گیاهی به خاک. لیکن بخش عمده این مواد در مقابل تجزیه میکروبی پایدار نبوده و به سرعت تجزیه و از خاک خارج می‌شود. با توجه به پایداری بیوچار در مقابل تجزیه میکروبی و زمان ماندگاری طولانی آن در خاک، مصرف بیوچار باعث افزایش سطح مواد آلی خاک به مدت طولانی و در نتیجه بهبود خصوصیات خاک، مخصوصاً در مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌شود. همچنین، افزودن بیوچار به عنوان یک ماده اصلاحی به خاک موجب افزایش بازهای تبادلی، ظرفیت تبادل کاتیونی و قابلیت دسترسی عناصر غذایی می‌گردد (Liang et al., 2006). بیوچار به خاطر سطح ویژه زیاد و تراکم بار سطحی بالا توانایی خاک برای نگهداری عناصر غذایی را افزایش و شستشوی عناصر غذایی و کودها را کاهش می‌دهد (Laird et al., 2010). در پژوهشی نجفی قیری تاثیر کاربرد بیوچار را بر ویژگی‌های خاک و قابلیت جذب عناصر غذایی بررسی کرد. نتایج این تحقیق نشان داد مصرف بیوچار باعث افزایش معنی‌دار ماده آلی و قابلیت هدایت الکتریکی و پتاسیم محلول و تبادلی گردید در حالی‌که قابلیت دسترسی نیتروژن، فسفر، روی و مس تحت تاثیر مصرف بیوچار قرار نگرفت (Najafi-Ghiri, 2015).

نتایج مطالعه دیوبند فشجانی و همکاران نشان داد افزودن بیوچار باگاس نیشکر تهیه شده در ۳۰۰ درجه سلسیوس و در سطوح ۰/۲، ۰/۵ و یک درصد، طی هشت ماه دوره آزمایش، باعث افزایش معنی-دار کربن آبی، ازت کل، فسفر قابل جذب، ظرفیت تبادل آنیونی، هدایت الکتریکی و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک شد (Divband Hafshejani et al., 2017). نیگوسی و همکاران تأثیر بیوچار بر خصوصیات خاک و جذب عناصر غذایی توسط کاهو را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد بیوچار موجب افزایش pH، قابلیت هدایت الکتریکی، کربن آلی، نیتروژن کل، فسفر قابل دسترس، ظرفیت تبادل کاتیونی و بازهای تبادلی می‌شود (Nigussie et al., 2012). نتایج مطالعه مستو و همکاران افزایش pH خاک (۹ درصد)، افزایش قابلیت هدایت الکتریکی خاک (۵۰ درصد)، میزان مواد آلی خاک (۱/۱۷ درصد)، نیتروژن کل (۱۰ درصد)، فسفر (۶۵ درصد) و پتاسیم (۱۱۸ درصد) را بر اثر کاربرد بیوچار نشان داد. افزایش میزان عناصر ذکر شده به افزایش pH خاک و اثر آهکی بیوچار در افزایش قابلیت جذب فسفر و افزوده شدن مستقیم پتاسیم توسط بیوچار (که در خاکستر بیوچار موجود است) نسبت داده شد (Masto et al., 2013).

ذرت (Zea mays L.) که خاص مناطق مرطوب و نیمه مرطوب گرمسیری است، به دلیل قدرت سازگاری بالا، کشت آن در مناطق سردسیر نیز میسر شده است (Mehrabian et al., 2018). موارد متعدد مصرف ذرت در تغذیه انسان، دام، طیور و استخراج حدود ۱۵۰۰ فرآورده متفاوت و کاربرد آن‌ها در صنایع مختلف موجب شده که این محصول به عنوان مهم‌ترین غله جهان شناخته شود. بر اساس آخرین آمارنامه محصولات کشاورزی در ایران (۱۴۰۲)، سطح زیرکشت و میزان تولید ذرت دانه‌ای به ترتیب بالغ بر ۱۵۹۱۰۶ هکتار و ۱/۱۳۵/۹۱۰ تن بوده که رشد قابل توجه تولید در مقایسه با سال‌های گذشته را نشان داده و اهمیت این محصول در چرخه تولید مواد غذایی را بیان می‌کند. حتی در نمود جهانی، ذرت دانه‌ای با توجه به ارزش غذایی بالا و سهم زیاد آن در چرخه تولید و سطح زیرکشت، به عنوان عامل مهم و حیاتی در امنیت غذایی پایدار شناخته می‌شود. در کشور نیز سالانه بالغ بر ۱۰ میلیون تن ذرت دانه‌ای وارد شده که عموما به مصرف دام و طیور می‌رسد. هدف اصلی از انجام این پژوهش بررسی و ارزیابی تأثیر استفاده همزمان از بیوچار و پساب تصفیه‌شده بر عملکرد و بهره‌وری آب ذرت می‌باشد.

مواد و روش‌ها

جهت بررسی تأثیر بیوچار و پساب تصفیه‌شده بر رشد، عملکرد و اجزای عملکرد ذرت، آزمایشی در تابستان و پاییز ۱۴۰۱ در یکی از باغات اطراف شهر قم با عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۶۵ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۴۶ دقیقه شرقی و با ارتفاع از سطح دریای ۱۶۶۱ متر انجام شد. در شکل ۱ نقشه هوایی منطقه و محدوده انجام آزمایش ارائه شده است.



شکل ۱- منطقه انجام آزمایش پژوهش حاضر

منطقه مورد مطالعه دارای آب و هوای سرد بوده و از نظر اقلیمی خشک و کوهستانی محسوب می‌شود. بر اساس اطلاعات ثبت شده از آمار ۳۰ ساله اخیر (۲۰۲۲-۱۹۹۲) ایستگاه هواشناسی قم، متوسط بارندگی سالانه آن حدود ۲۱۳/۴ میلی‌متر، متوسط دمای سالانه ۱۱/۰۳ درجه سانتی‌گراد، میانگین حداکثر و حداق دمای منطقه به ترتیب ۳۶/۳ و ۱۴/۷- درجه سانتی‌گراد و میزان تبخیر سالانه آن ۲۰۲۳/۵ میلی‌متر می‌باشد. خاک مورد نظر قبل از انجام کشت مورد آزمایش قرار گرفت و بافت و نیاز کودی آن بر اساس آزمایش به‌دست آمد. برای تعیین بافت خاک از روش هیدرومتری استفاده گردید. جدول ۱ ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک آماده شده برای کشت را نشان می‌دهد.

آزمایشی به صورت فاکتوریل بر پایه بلوک‌های کامل تصادفی به صورت گلدانی و در هوای آزاد در شهرستان قم اجراء شد. فاکتورهای آزمایشی شامل استفاده از منابع آب مختلف برای آبیاری (آب معمول و با کیفیت مناسب به عنوان شرایط شاهد، استفاده از پساب تصفیه‌شده و استفاده ترکیبی با نسبت یکسان از دو منبع آب مذکور) و کاربرد بیوچار (۱۰، ۵ درصد حجمی و عدم استفاده از بیوچار) در بافت خاک متوسط بود. آزمایش مورد نظر به صورت گلدانی و در گلدان‌های استونه‌ای به ارتفاع ۶۰ و قطر ۳۰ سانتی‌متر انجام شد.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در پژوهش

شن	سیلت	رس	بافت خاک	درصد اشباع	ظرفیت زراعی	نقطه پژمردگی	EC	pH	مواد خنثی شونده	کربن آلی	ازت کل	فسفر قابل جذب	پتاسیم قابل جذب
درصد				درصد حجمی			dS/m		درصد			میلی‌گرم بر لیتر	
۴۰	۴۵	۱۵	لوم	۴۰	۲۲/۳	۱۱/۵	۰/۹۹	۷/۱۷	۱۰	۰/۵۵	۰/۰۷	۱۷	۲۰۰

جدول ۲- خصوصیات شیمیایی سه منبع آب مورد استفاده

نوع آب	EC	pH	کلر	کربنات	بی‌کربنات	سدیم	پتاسیم	کلسیم	منیزیم
	dS/m		میلی‌گرم بر لیتر						
معمولی (چاه)	۰/۹۸	۷/۱۲	۲۹۰/۵	۰	۷۵/۴	۱۸/۲	۰/۰۸	۲۴۸/۹	۸۵/۷
پساب تصفیه‌شده	۲/۲۱	۷/۱۹	۳۴۳/۷	۰	۱۰۴/۷	۲۵/۴	۲/۳	۲۹۴/۱	۱۲۶/۳
اختلاط چاه و پساب تصفیه‌شده	۱/۶۱	۷/۱۴	۳۱۸/۵	۰	۹۰/۷	۲۱/۹	۱/۱۱	۲۷۶/۶	۱۱۴/۳

بنابراین حجم هر گلدان حدود ۰/۰۴۲۳۹ مترمکعب به‌دست آمد. تعداد تیمارها شامل سه سطح بیوچار و سه سطح آب سالم، اختلاط آب و پساب تصفیه‌شده و پساب تصفیه‌شده و تعداد تکرارها سه می‌باشد که در مجموع تعداد ۲۷ گلدان مورد نیاز بود. بیوچار کاربردی در این مطالعه از مواد سلولزی چوب‌های جنگل مازندران تهیه شد که جزئیات آن در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳- مشخصات بیوچار کاربردی در آزمایش

مشخصات	مقدار
عدد ید	۱۶۰–۱۸۰ میلی‌گرم بر گرم
مساحت سطح بر اساس استاندارد ASTM*	۱۷۰ متر مربع بر گرم
عدد متیلن بلو	حدود ۳۰ میلی‌گرم بر گرم
میزان رطوبت	۳–۴ درصد
pH	۸–۸/۵
درصد خاکستر	۴–۵ درصد
دانه‌بندی	۱۸۰ میکرون و کمتر
پایه	مواد سلولزی از چوب‌های جنگل مازندران

* Active Standard ASTM D5768 – Developed by Subcommittee: D01.34 – Book of Standards Volume 06.03

در پایان دوره آزمایش بر اساس عملکردهای مختلف گیاه ذرت و برای تیمارهای مختلف، مقدار عملکرد دانه، شاخص برداشت، بهره وری آب بر اساس وزن تر، خشک و دانه محاسبه و بررسی شد. محاسبات آماری با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.4 صورت پذیرفت. رسم نمودارها نیز توسط نرم‌افزار Microsoft Excel انجام شد. همچنین تجزیه واریانس برای صفات اندازه‌گیری شده انجام گرفت و سپس میانگین صفات مورد مطالعه (اثرات متقابل بیوچار و پساب تصفیه‌شده) با استفاده از آزمون مقایسه‌ای میانگین دانکن در سطح ۵ و ۱ درصد مورد مقایسه قرار گرفتند.

بر اساس عملکردهای مختلف گیاه ذرت و برای تیمارهای مختلف، مقدار بهره‌وری فیزیکی (دانه)، بهره‌وری علوفه تر و بهره‌وری علوفه خشک محاسبه و بررسی شد. از رابطه زیر برای محاسبه بهره وری گیاه ذرت استفاده شد (Kijne et al., 2003):

$$WP = \frac{Y}{I} \quad (۱)$$

که در آن، WP، بهره‌وری آب آبیاری (kg/m^3)، Y عملکرد (kg) و I حجم آب آبیاری (m^3) است. شاخص برداشت نیز با استفاده از رابطه (۲) محاسبه شد (Unkovich et al., 2010).

$$H_i = \frac{Y}{Y_b} \times 100 \quad (۲)$$

که در آن H_i شاخص برداشت برحسب درصد و Y، Y_b به ترتیب عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک است.

نتایج و بحث

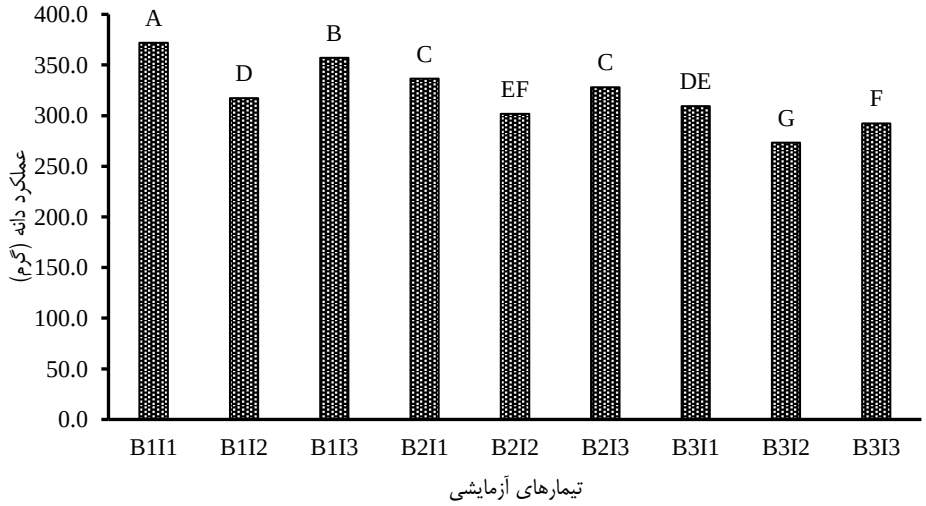
عملکرد دانه و شاخص برداشت

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر ساده کیفیت آب و همچنین کاربرد سطوح مختلف بیوچار بر عملکرد دانه در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار شد (جدول ۴). همچنین اثر متقابل نوع و کیفیت آب و بیوچار بر عملکرد دانه نیز در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار شد.

جدول ٤- تجزیه واریانس عملکرد دانه و شاخص برداشت ذرت

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات	
		عملکرد دانه	شاخص برداشت
بلوک	۲	۷۳/۱۶^{ns}	۰/۰۰۰۸**
بیوچار	۲	۷۳۳۳/۲۶**	۰/۰۲۱۵**
کیفیت آب	۲	۴۰۹۳/۴۱**	۰/۰۱۱۸**
بیوچار × کیفیت آب	۴	۱۲۳/۷۶*	۰/۰۰۰۵**
خطا	۱۷	۳۶/۶۰	۰/۰۰۰۰۷
ضریب تغییرات	-	۱/۸۸	۱/۹۹

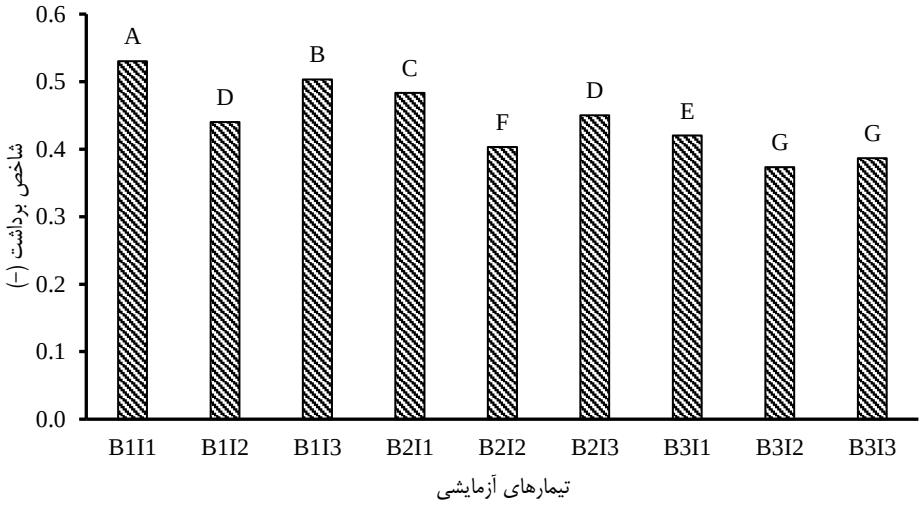
بیشترین مقدار عملکرد دانه برابر با ۳۷۱/۸۰ گرم مربوط به تیمار کاربرد ۱۰ درصد حجمی بیوچار در گلدان و آب چاه (B1I1) بود که نسبت به تیمار شاهد ۲۰ درصد افزایش داشت. دو نکته قابل‌توجه در شکل (۲) قابل مشاهده است. ابتدا اینکه با مقایسه مقدار عملکرد دانه در دو تیمار B2I1 و B2I3 مشاهده شد که تیمار B2I1 عملکرد بیشتری را داشته اما تفاوت معنی‌دار بین آن‌ها مشاهده نشد. این نشان می‌دهد که در صورت لزوم و شرایط حاد بحران آبی، می‌توان از منابع آب نامتعارف برای تولید محصولات زراعی استفاده و عملکرد مطلوبی را برداشت کرد (Abbasi et al., 2022). ثانیا عدم وجود تفاوت معنی‌دار بین عملکرد دانه ذرت در تیمارهای B1I2 و B3I1 را می‌توان مجددا به نقش موثر بیوچار در کاهش بار آلاینده‌های موجود در پساب‌ها نسبت داد (Gong et al., 2023).



شکل ۲- اثرات متقابل بیوچار و کیفیت آب بر عملکرد دانه ذرت

بعد از تحلیل و تفسیر نتایج عملکرد دانه ذرت، شاخص برداشت نیز مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۳). نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر ساده کیفیت آب، اثر ساده بیوچار و همچنین اثر متقابل کیفیت آب و بیوچار همگی در سطح احتمال ۱ درصد بر شاخص برداشت معنی‌دار شدند (جدول ۴). در هنگام مقایسه اثر ساده تیمارها بر شاخص برداشت، به ترتیب تیمار B1 از سطوح مختلف بیوچار با ۰/۴۹ و تیمار I1 از کیفیت‌های مختلف آب آبیاری یا ۰/۴۸، بیشترین میزان را داشت.

در نهایت بر اساس نتایج شکل (۳)، بیشترین مقدار شاخص برداشت برابر با ۰/۵۳ بود که از تیمار B1I1 (اعمال ۱۰ درصد حجمی بیوچار و آب چاه) به دست آمد. اختلاف این تیمار نسبت به تیماری که کمترین مقدار شاخص برداشت را داشت (یعنی B3I2)، برابر با ۰/۱۵ بود که در نوع خود جالب است. تیمارهای حاوی پساب و بیوچار با داشتن عملکرد دانه بیشتر در مقایسه با سایر تیمارها، زیست‌توده بیشتری را تولید کرده که این باعث اختلاف شاخص برداشت شد. این علت را می‌توان به تسهیم بیشتر مواد فتوسنتزی به دانه در این تیمار دانست (Mehrabian et al., 2018).



شکل ۳- اثرات متقابل بیوچار و کیفیت آب بر شاخص برداشت ذرت

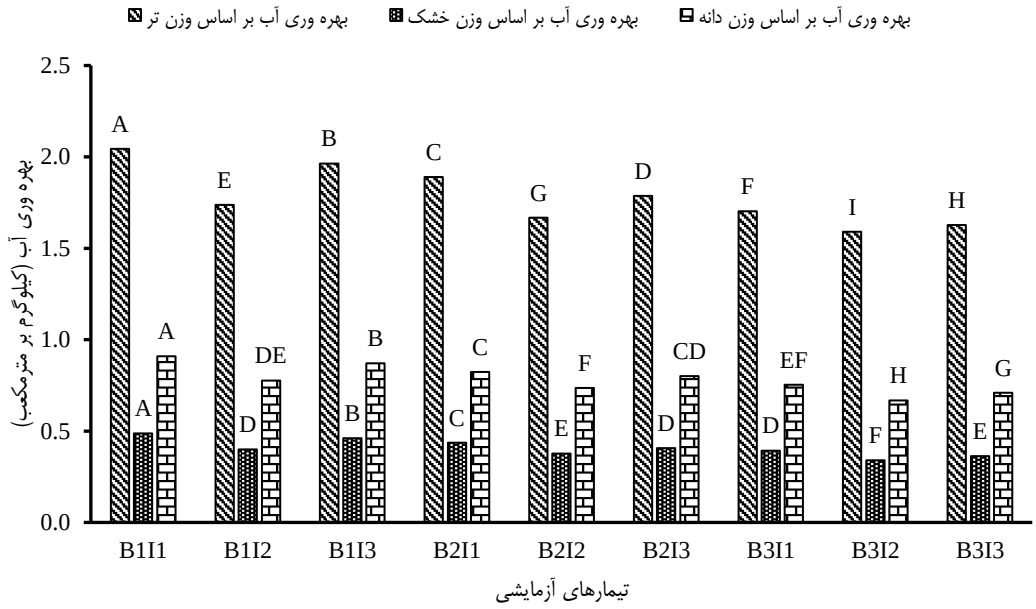
بهره‌وری آب بر اساس وزن تر، خشک و دانه ذرت

نتایج تجزیه واریانس بهره‌وری آب بر حسب عملکرد تر ذرت در جدول (۵) ارائه شده است. نتایج نشان داد که اثر ساده کیفیت آب آبیاری و کاربرد بیوچار و همچنین برهمکنش متقابل این دو عامل اثر معنی‌داری روی بهره‌وری آب بر اساس وزن تر دارد؛ به طوری که هر سه در سطح یک درصد معنی‌دار شدند.

همچنین نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل تیمارهای دوگانه شکل (۴) نشان داد که بیشترین بهره‌وری آب بر اساس وزن تر ذرت در تیمار B1I1 به میزان ۲/۰۴ کیلوگرم بر مترمکعب به دست آمد؛ در حالی که کمترین بهره‌وری آب بر اساس وزن تر ذرت در تیمار B3I2 (۱/۵۹ کیلوگرم بر مترمکعب) به دست آمد. این نشان می‌دهد که در شرایط کمبود آب، کاربرد بیوچار به حفظ رطوبت در دسترس برای گیاه کمک کرده و کاهش عملکرد قابل‌توجهی در وزن تر ذرت حاصل نمی‌شود.

جدول ۵- تجزیه واریانس بهره‌وری آب بر اساس وزن تر، خشک و دانه ذرت

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات		
		بهره‌وری آب بر اساس وزن تر	بهره‌وری آب بر اساس وزن خشک	بهره‌وری آب بر اساس وزن دانه
بلوک	۲	۰/۰۰۴**	۰/۰۰۰۲^{ns}	۰/۰۰۰۵^{ns}
بیوچار	۲	۰/۱۶۹**	۰/۰۱۵۶**	۰/۰۴۵**
کیفیت آب	۲	۰/۱۰۴**	۰/۰۱**	۰/۰۲۴**
بیوچار × کیفیت آب	۴	۰/۰۰۹**	۰/۰۰۰۳**	۰/۰۰۰۷*
خطا	۱۷	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۰۶	۰/۰۰۰۲
ضریب تغییرات	-	۱/۰۷	۲/۰۰	۱/۹۵



شکل ٤- اثرات متقابل بیوچار و کیفیت آب بر بهره‌وری آب بر اساس وزن تر، خشک و دانه

نتایج تجزیه واریانس بهره‌وری آب بر حسب عملکرد خشک ذرت در جدول (۵) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که کیفیت آب و کاربرد بیوچار، اثر معنی‌داری روی بهره‌وری آب بر حسب عملکرد خشک ذرت دارد؛ به طوری‌که هر دو در سطح یک درصد معنی‌دار شده است. همچنین اثرات متقابل و برهمکنش دو فاکتور آزمایشی بر روی این صفت معنی‌دار شد.

نتایج نهایی نشان می‌دهد که اثر متقابل کیفیت آب و کاربرد بیوچار اثر معنی‌داری روی بهره‌وری آب بر حسب عملکرد خشک ذرت داشته و مقایسه میانگین در تیمارهای مختلف آزمایشی (شکل ۴) نشان می‌دهد که بیشترین بهره‌وری آب بر حسب عملکرد خشک ذرت (۰/۴۹ کیلوگرم بر مترمکعب) در تیمار B1I1 و کمترین آن (۰/۳۴ کیلوگرم بر مترمکعب) در تیمار B3I2 اتفاق افتاد. با توجه به نتایج بخش‌های قبلی، برای انتخاب بهترین تیمار آزمایشی در طول این مطالعه می‌توان نتیجه‌گیری کرد. برای به دست آوردن حداکثر بهره‌وری آب بر اساس عملکرد خشک ذرت، استفاده از بیوچار و کیفیت‌های مختلف آب آبیاری اجتناب ناپذیر می‌باشد و در شرایط کمبود شدید آب باید از پتانسیل موجود در کاربرد بیوچار برای حفظ رطوبت موجود و در دسترس گیاه استفاده کرد. با توجه به اینکه این آزمایش در مقیاس کوچک و در داخل گلدان انجام شده، بیوچار اثر زیادی در جلوگیری از تنش داشته و برای همین بیشترین بهره‌وری آب بر حسب عملکرد خشک ذرت در تنش شدید به دست آمد و به طور کامل نمی‌توان گفت که در شرایط مزرعه نیز می‌توان به این بهره‌وری آب بر حسب عملکرد خشک ذرت دست پیدا کرد. دیگر محققان دریافتند که افزودن بیوچار به خاک به دلیل افزایش pH خاک، افزایش ظرفیت نگهداری آب، جذب قارچ‌ها و میکروب‌های مفید، افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی، نگهداری و ابقاء عناصر غذایی، باعث ارتقاء حاصلخیزی و بهبود کیفیت خاک می‌شود (Steinbeiss et al., 2009).

در پایان، نتایج مقایسه میانگین بهره‌وری آب بر اساس وزن دانه در تیمارهای کیفیت آب و سطوح بیوچار نشان داد که تمامی تیمارها دارای اختلاف معنی‌داری با یکدیگر می‌باشند. حداکثر مقدار بهره‌وری دانه برابر با ۰/۹۱ کیلوگرم بر مترمکعب بود که از تیمار کاربرد ۱۰ درصد حجمی بیوچار و آب چاه (B1I1) به‌دست آمد و که دارای افزایش ۲۱/۳ درصدی نسبت به تیمار شاهد بود (جدول ۵ و شکل ۴). در همین راستا پژوهشگران نشان دادند که در تیمار پساب تصفیه‌شده، میزان کلروفیل موجود در برگ‌ها افزایش یافته و در نتیجه باعث افزایش تولید شیره پرورده و همچنین سرعت پر شدن دانه و در نهایت افزایش عملکرد بلال می‌شود. همچنین با افزایش شاخص سطح برگ، مقدار فتوسنتز افزایش یافته و در مرحله پر شدن دانه‌ها، مواد به دانه‌ها منتقل شده و باعث افزایش وزن آن‌ها می‌شود (Asgari et al., 2008). نتایج این بخش از پژوهش با یافته‌های کریمی و همکاران مطابقت دارد؛ آن‌ها گزارش کردند که استفاده از پساب تصفیه‌شده شهری در مقایسه با آب معمولی، به دلیل وجود مواد غذایی بیشتر، به‌طور مؤثری اجزای عملکرد ذرت را بهبود می‌بخشد (Karimi et al., 2019). بالا بودن غلظت نیتروژن، فسفر و مواد آلی موجود در پساب، باعث افزایش وزن هزار دانه و در نتیجه بهره‌وری

آب شده است.

نتیجه‌گیری

با توجه به مشکل کمبود منابع آب و بحران‌های جاری، استفاده از پساب تصفیه‌شده به همراه روش دوست‌دار محیط‌زیست بیوچار می‌تواند نقش قابل‌توجهی در توسعه پایدار و کاهش هزینه‌های آبیاری و کوددهی داشته باشد. استفاده از پساب تصفیه‌شده و بیوچار با تغییر در خصوصیات فیزیکی خاک، می‌تواند آب قابل دسترس گیاه را افزایش دهد که پایداری در منابع آب و خاک را به همراه خواهد داشت. به همین منظور در این پژوهش، اثر بیوچار و پساب تصفیه‌شده بر رشد، عملکرد دانه، شاخص برداشت و بهره‌وری آب ذرت بررسی شد. نتایج نشان داد که آبیاری با کیفیت‌های مختلف آب چاه و پساب تصفیه‌شده در حضور بیوچار، باعث افزایش تمامی شاخص‌های مورد بررسی در خصوص ذرت شد و این افزایش در تمامی بخش‌ها معنی‌دار بود. با اعمال بیوچار، در نتیجه با جذب بهتر عناصر غذایی خاک و بهبود ظرفیت نگهداری آب در خاک می‌توان عملکرد و بهره‌وری مصرف آب ذرت را افزایش داد و مدیریت آبیاری ذرت را با استفاده از رویکردهای جدید در استفاده مؤثرتر و اقتصادی‌تر از منابع محدود آب، بهبود بخشید.

منابع

Abbasi, P., Babazadeh, H., Yargholi, B. and Bakhoda, H. 2023. Development of forage maize yield–water functions by applying simultaneous different levels of irrigation and treated municipal wastewater. Irrigation and Drainage. 72(1): 119-137.

Ahangari Hassas, M. and Taghizadegan Kalantari, N. 2022. The energy-water-food nexus: Concept, challenges and prospects. Journal of Energy Management and Technology. 6(1): 9-14.

Ahmed, S. S., Bali, R., Khan, H., Mohamed, H. I. and Sharma, S. K. 2021. Improved water resource management framework for water sustainability and security. Environmental Research. 111527.

Alexandratos, N. and Bruinsma, J. 2012. World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision.

Asgari, K., Solimani, A. and Najafi P. 2008. Effects of treated urban wastewater on grain yield index and its components in sunflower plant under different irrigation treatments. Iranian Water Research Journal. 2(2): 45-52.

Bakas, T., Papadimitriou, I., Xeroheimonas, I., Mariolis, D., Megas, P. and Argyri, P. 2020. Water crisis-beyond the destruction. Open Schools Journal for Open Science, 3(3).

Cosgrove, W. J. and Rijsberman, F. R. 2014. World water vision: making water everybody's business. Routledge.

Divband Hafshejani, L., Naseri, A. A., Hooshmand, A., Abbasi, F. and Soltani Mohammadi, A. 2017. Effect of Sugarcane Bagasse Biochar Application on Chemical Properties a Sandy Loam Soil. Irrigation Sciences and Engineering. 40(1): 63-72.

Emadodin, I., Reinsch, T. and Taube, F. 2019. Drought and desertification in Iran. Hydrology. 6(3): 1-12.

Ghazi, B., Jeihouni, E. and Kalantari, Z. 2021. Predicting groundwater level fluctuations under climate change scenarios for Tasuj plain, Iran. Arabian Journal of Geosciences. 14(2): 1-12.

Gong, X., Zou, L., Wang, L., Zhang, B. and Jiang, J. 2023. Biochar improves compost humification, maturity and mitigates nitrogen loss during the vermicomposting of cattle manure-maize straw. Journal of Environmental Management. 325: 116432.

Karimi, B., Abdi, C., and Fathi Tileko, Z. 2019. Effects of Irrigation with Treated Urban Wastewater on Yield and Some Growth Characteristics of Tomato and Corn in Greenhouse Condition. Water and Soil Science. 28(4): 19-29.

Khosravi, R., Bafkar, A. and Azari, A. 2024. Evaluation of sustainable agriculture indicators in the west of Iran based on Water, Food and Energy Nexus. Iranian Water Researches Journal. 18(1): 37-47.

Kijne, J. W., Tuong, T. P., Bennett, J., Bouman, B., and Oweis, T. 2003. Ensuring food security via improvement in crop water productivity. Challenge Program on water and Food Background Paper. 1: 20-26.

Ladi, T., Mahmoudpour, A. and Sharifi, A. 2021. Assessing impacts of the water poverty index components on the human development index in Iran. Habitat International. 113: 102375.

Laird, D., Fleming, P., Wang, B., Horton, R. and Karlen, D. 2010. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil. Geoderma. 158(3-4): 436-442.

Liang, B., Lehmann, J., Solomon, D., Kinyangi, J., Grossman, J., O'neill, B., ... and Neves, E. G. 2006. Black carbon increases cation exchange capacity in soils. Soil Science Society of America Journal. 70(5): 1719-1730.

Masto, R. E., Kumar, S., Rout, T. K., Sarkar, P., George, J. and Ram, L. C. 2013. Biochar from water hyacinth (Eichornia crassipes) and its impact on soil biological activity. Catena. 111: 64-71.

Mehrabian, S., Naseri, A., Houshmand, A. and Meskar Bashee, M. 2018. The Effect of Dripper Depth and Zeolite Amount on Corn Yield and Yield Criteria.

B. B. 2022. IoT-Based Water Quality and Quantity Monitoring System for Domestic Usage. In Immersive Technology in Smart Cities (pp. 205-227). Springer, Cham.

Steinbeiss, S., Gleixner, G., and Antonietti, M. 2009. Effect of biochar amendment on soil carbon balance and soil microbial activity. Soil Biology and Biochemistry. 41(6): 1301-1310.

Unkovich, M., Baldock, J., and Forbes, M. 2010. Variability in harvest index of grain crops and potential significance for carbon accounting: examples from Australian agriculture. Advances in agronomy. 105: 173-219.

Vaghefi, S. A., Keykhai, M., Jahanbakhshi, F., Sheikholeslami, J., Ahmadi, A., Yang, H. and Abbaspour, K. C. 2019. The future of extreme climate in Iran. Scientific reports. 9(1): 1-11.

Viswanathan, S. P., Chellian, S. K., Varghese, S. and Semeon, J. 2022. Sustainable Water for Smart Villages–A Case Study. In Smart Villages (pp. 285-299). Springer, Cham.

Willer, H. and Lernoud, J. 2019. The world of organic agriculture. Statistics and emerging trends 2019 (pp. 1-336). Research Institute of Organic Agriculture FiBL and IFOAM Organics International.

Worch, E. 2021. Adsorption technology in water treatment. de Gruyter.

Water and Irrigation Management. 8(2): 321-335.

Moshir Panahi. D., Kalantari, Z., Ghajarnia, N., Seifollahi-Aghmiuni, S. and Destouni, G. 2020. Variability and change in the hydro-climate and water resources of Iran over a recent 30-year period. Scientific reports. 10(1): 1-9.

Najafi-Ghiri, M. 2015. Effect of Different Biochars Application on Some Soil Properties and Nutrients Availability in a Calcareous Soil. Iranian Journal of Soil Research. 29(3): 352-358.

Nigussie, A., Kissi, E., Misganaw, M. and Ambaw, G. 2012. Effect of biochar application on soil properties and nutrient uptake of lettuces (Lactuca sativa) grown in chromium polluted soils. American-Eurasian Journal of Agriculture and Environmental Science. 12(3): 369-376.

Pourgholam-Amiji, M., Ahmadaali, K. and Liaghat, A. 2025. A novel early stage drip irrigation system cost estimation model based on management and environmental variables. Scientific Reports. 15(4089): 1-29.

Pourgholam-Amiji, M., Khoshravesh, M., Divband Hafshejani, L. and Ghadami Firouzabadi, A. 2022. The effect of irrigation with treated magnetic effluent on water productivity of maize. Iranian Journal of Irrigation & Drainage. 16(1): 243-253.

Radhika, V., Srinivasan, K., Ramya, R. and Sharmila,

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No.6, Vol. 18, Feb.-Mar. 2025, p. 927-936

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۸، بهمن - اسفند ۱۴۰۳، ص. ۹۳۶-۹۲۷

The effect of Biochar and Irrigation Water Quality on Maize Yield and Water Productivity

M. Zanjani[1*], M. Mashal[2], M. Pourgholam-Amiji[3*]

Recived: Sep.11, 2024 Accepted: Dec. 14, 2024

Abstract

Unconventional waters are the most reliable water resources available in situations of scarcity, adverse climatic conditions, and crises. Also, given Iran's geographical location is arid and semi-arid, any evaporative water losses must be prevented. For this reason, this study was conducted to investigate the effect of biochar and treated effluent on yield and water productivity based on maize's fresh, dry, and grain weight. Therefore, a factorial experiment based on randomized complete blocks was conducted in cylindrical pots with a height of 60 cm and a diameter of 30 cm and in the open air in Qom City in the 2022-2023 crop year. Experimental treatments were as follows: Three types of water with suitable quality (well) (I1), treated effluent (I2) and water and treated effluent mixing with the same ratio (I3) and three levels of biochar (made from cellulose materials from forest woods) including 10% of the volume of pots (B1), 5% volume percentage of pots was (B2) and no use of biochar (B3). The source of water supply was from a well around the desired land of suitable quality, which after storing in the pool with a drip irrigation system, the pots were watered. Also, the desired effluent was prepared from the Qom City wastewater treatment plant. The results showed that the interaction effect of water quality and the application of different levels of biochar on the harvest index, and water productivity based on wet, dry, and maize grain weight was significant at the 1% probability level, and grain yield was significant at the 5% probability level. The highest amounts of the harvest index and maize water productivity based on fresh, dry and grain weight traits were respectively 0.53, 2.04 kg/m^3, 0.49 kg/m^3, and 0.91 kg/m^3, as well as the grain yield of 371.81 gr from B1I1 treatment. These traits increased by 43.2, 28.3, 44.1 and 35.8%, and grain yield by 36.1%, respectively, compared to the minimal treatments. The results showed that irrigation with different qualities of well water and treated effluent in the presence of biochar increased all the investigated indicators regarding maize and this increase was significant in all sections. The summarized results indicated that under constant water quality conditions, biochar can ensure increased yield, harvest index, and water productivity of maize by maintaining nutrients and moisture in the soil.

Keywords: Improving Water Productivity, Increasing Crop Yield, Strategic Crops, Unconventional Water

1- MS.c. Graduated, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Technology (Aborihan), College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
2- Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Technology (Aborihan), College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
3- Ph.D. Candidate, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
(*Corresponding Author: Mpourgholam6@ut.ac.ir)