نشریه تولید گیاهان زراعی
جلد یازدهم، شماره چهارم، زمستان ۹۷
۷۱-۸۸
http://ejcp.gau.ac.ir
DOI: 10.22069/ejcp.2019.15473.2154

ارزیابی چرخه حیات ردپای بوم‌شناختی و ردپای آب و تعیین مؤلفه‌های زراعی در تولید گندم تحت اثر دور آبیاری و محلول‌پاشی نانوسیلیس و نانوکلات پتاسیم در منطقه بوشهر

محبوبه ابراهیمی[1*]، سلمان دستان[2] و رضا یدی[1]

[1]عضو هیأت‌علمی، بخش علوم کشاورزی، دانشگاه پیام‌نور، تهران، ایران.
[2]پژوهشگر پسادکتری، پژوهشگاه بیوتکنولوژی کشاورزی ایران، کرج.

تاریخ دریافت: ۹۷/۵/۱۶ تاریخ پذیرش: ۹۷/۹/۲۸

چکیده

سابقه و هدف: بر اساس مطالعه‌های انجام شده از جمله راهکارهای اساسی برای حل مشکل کم‌آبی مصرف کودهای سیلیس و پتاسیم است که می‌تواند برای افزایش تحمل گیاهان به تنش‌های زنده و غیرزنده بسیار سودمند باشد. مصرف سیلیس و پتاسیم به دلیل ایجاد مقاومت مکانیکی حالت عمودی را به برگ و ساقه می‌دهد که خود باعث افزایش نفوذ نور به درون تاج‌پوشش گیاهان می‌شود که گیاه می‌تواند میزان فتوسنتز بیشتری را انجام دهد. بنابراین، این پژوهش با هدف ارزیابی چرخه حیات ردپای بوم‌شناختی و ردپای آب تولید گندم تحت اثر دورهای آبیاری با کاربرد نانوکود سیلیس و نانوکلات پتاسیم انجام شد.

مواد و روش‌ها: آزمایش به‌صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در مزرعه تحقیقاتی واقع در بوشهر در سال زراعی ۹۶-۱۳۹۵ اجرا شد. دور آبیاری در چهار سطح شامل: ۱- فاصله آبیاری دو روز یکبار (بدون تنش)، ۲- فاصله آبیاری چهار روز یکبار، ۳- فاصله آبیاری شش روز یکبار و ۴- فاصله آبیاری هشت روز یکبار به‌عنوان عامل اصلی و محلول‌پاشی کودهای نانوسیلیس و نانوکلات پتاسیم و عدم مصرف آن‌ها (شاهد) به‌عنوان عامل فرعی در نظر گرفته شدند. محلول‌پاشی نانوسیلیس با غلظت ۲۰ قسمت در میلیون در مراحل اواسط پنجه‌زنی، اواخر پنجه‌زنی و بعد از خروج کامل سنبله صورت گرفت. محلول‌پاشی نانوکلات پتاسیم نیز در دو مرحله اواسط پنجه‌زنی و ظهور سنبله به مقدار دو در هزار انجام شد.

یافته‌ها: یافته‌های پژوهش نشان داد که با تأخیر فاصله آبیاری از دو روز به هشت روز یکبار، درصد پتاسیم و پروتئین دانه به طور معنی‌داری کاهش یافت. بیشترین عملکرد دانه (۳۵۷۲ کیلوگرم در هکتار) برای فاصله آبیاری دو و چهار روز یکبار با مصرف نانوکلات پتاسیم به‌دست آمد که به‌دلیل افزایش طول سنبله، تعداد دانه در بوته و تعداد دانه در سنبله بود. عملکرد دانه با مصرف نانوسیلیس برای فواصل آبیاری دو و چهار روز یکبار نیز در رتبه‌های بعدی قرار گرفت. با تأخیر در آبیاری از دو روز به هشت روز یکبار میزان آب مصرف شده معادل ۷/۳۵ درصد کاهش یافت. بالاترین کارایی مصرف آب (۲/۱۲ کیلوگرم بر متر مکعب) برای فاصله آبیاری دو روز یکبار به‌دست آمد. در هر چهار دور آبیاری بیشترین بهره‌وری آب با مصرف نانوسیلیس و نانوکلات پتاسیم به‌دست آمد که اثرات مثبت نانوکلات پتاسیم بیشتر بود. انتشار دی‌اکسید کربن در فاصله آبیاری دو روز یکبار معادل ۵/۴۷ درصد در مقایسه با فاصله آبیاری هشت روز یکبار کاهش ولی شاخص اشغال زمین معادل ۷/۲ درصد افزایش یافت. با افزایش فواصل آبیاری از دو روز به هشت روز یکبار مقادیر شاخص‌های کیفیت بوم‌نظام، تخلیه منابع، کمبود منابع آب و

*نویسنده مسئول: ebrahimi_mahboube@yahoo.com

شاخص کمبود آب کشاورزی به‌ترتیب برابر ۸/۲۱، ۸، ۱۰/۸۹، ۹/۲۹ و ۹/۹۱ درصد کاهش نشان داد. با مصرف نانوسیلیس و نانوکلات پتاسیم شاخص‌های تخلیه منابع، کمبود منابع آب کشاورزی، شاخص تخلیه آب و شاخص کمبود آب کمتر از تیمار عدم مصرف نانوکود بود. شاخص تخلیه آب معادل ۷/۲۸ و ۸/۲۴ درصد و شاخص کمبود آب معادل ۹/۷۰ و ۸/۵۷ درصد با مصرف نانوسیلیس و نانوکلات پتاسیم در مقایسه با تیمار عدم مصرف کاهش یافت.

نتیجه‌گیری: طبق یافته‌ها، بهترین دور آبیاری از نظر بهبود عملکرد کمی و کیفی، افزایش کارایی و بهره‌وری آب و همچنین کاهش ردپای اکولوژیک آب فواصل آبیاری دو و چهار روز یکبار بود که در یک سطح آماری قرار گرفتند. در هر چهار دور آبیاری با مصرف نانوسیلیس و نانوکلات پتاسیم عملکرد کمی و کیفی گندم افزایش و نیاز آبی گیاه کاهش یافت. بنابراین، مصرف نانوکلات پتاسیم و نانوسیلیس منجر به افزایش بهره‌وری آب و عملکرد کمی و کیفی و تحمل گیاه گندم به تنش کم‌آبی شد.

واژه‌های کلیدی: اشغال زمین، انتشار دی‌اکسید کربن، بهره‌وری آب، تخلیه منابع، کیفیت بوم‌نظام

مقدمه

در جهان امروز، آب به‌عنوان کالایی اقتصادی – اجتماعی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و مدیریت مصرف آن در مناطق با اقلیم خشک و نیمه خشک ضرورت بیشتری دارد (۲). برای اینکه بتوان اثر الگوی مصرف مردم را بر منابع طبیعی نشان داد می‌توان از مفهوم ردپای اکولوژیک استفاده کرد (۲). در همین رابطه، به کمک شاخص ردپای آب می‌توان تقاضای واقعی آب هر محصول زراعی را تعیین کرد (۱۳). در واقع، ردپای آب در کشاورزی به معنی مقدار آب مصرف شده به مقدار محصول تولید شده است (۱۶).

ردپای آب هر کشوری یک شاخص مفید تقاضای آب بوده و معادل کل آب مجازی مصرف شده در محصولات، کالاها و خدمات مصرفی است (۲۳). در همین رابطه برخی از محققان ایران را به‌عنوان یک کشور دارای تنش آبی بالا معرفی کردند (۱، ۳۸، ۵۱ و ۵۷). در مطالعه دیگر با بررسی بهره‌وری و ردپای آب در مزارع گندم آبی و ذرت در منطقه کوزران کرمانشاه گزارش شد مقادیر بهره‌وری آب برای مزارع گندم ۰/۲۷ الی ۰/۴۵ تن بر مترمکعب و در مزارع ذرت ۰/۲۵ الی ۰/۴۱ تن بر متر مکعب بود. همچنین، ردپای آب مزارع گندم آبی با سطح زیر کشت ۴۸۵۱ هکتار معادل ۱۸۲۵۱۱۵۰ متر مکعب در سال و برای ذرت با سطح زیر کشت ۲۵۲۳ هکتار معادل ۱۰۵۵۰۶۰۱ متر مکعب در سال برآورد شد که نشان می‌دهد میزان آب مصرفی تولید ذرت بیشتر از تولید گندم است (۲۹). همچنین، در تحلیل مکانی و زمانی تغییرات آب مجازی گندم در سیستان و بلوچستان مشاهده شد که آب مصرفی خالص برای تولید گندم در این استان بربر ۳/۳ میلیون متر مکعب است. علاوه بر این، ۱۰ درصد کاهش تلفات آب در نتیجه بهبود بازده آبیاری، می‌تواند با ۱/۱۷ درصد کاهش در میزان آب مصرفی برای تولید گندم، شاخص خودکفایی را ۱۸/۲ درصد افزایش و وابستگی به واردات آب مجازی به این استان را تا ۳/۶۲ درصد کاهش دهد (۴۶). باید توجه داشت که نیاز آبی هر محصول زراعی و در پی آن ردپای بوم‌شناختی آب با توجه به شرایط اقلیمی، فرهنگ کشاورزان منطقه و مدیریت مزرعه در هر منطقه متفاوت است (۸)، این مسأله موجب می‌شود که مطالعات برآورد نیاز آبی محصولات در هر منطقه امری ضروری باشد (۱۹).

در گیاهان سیلیس بالا یا سیلیس دوست مانند برنج و گندم، این عنصر بیشتر در اندام‌های هوایی جذب شده و تحت تأثیر میزان تعرق قرار نمی‌گیرد

(۵۳). یکی از مهم‌ترین کارکردهای سیلیس تحریک سامانه دفاعی گیاهان در برابر تنش‌های زنده و غیرزنده است (۳۱، ۳۲، ۳۳ و ۵۸). سیلیس باعث بهبودی کارایی مصرف آب گیاهان در معرض تنش کم‌آبی شده و این سازوکار باعث افزایش رشد گیاه از طریق بهبود فتوسنتز برگ و فعالیت ریشه، کاهش تنش‌های اسمزی از طریق کاهش تعرق و حفظ بیشتر آب، تحریک فعالیت آنتی‌اکسیدان‌های دفاعی، واکنش لیپید پراکسیداز، بهبود غشای پلاسما (خارجی) و همچنین ساختار و کارکرد تونوپلاست می‌شود (۳۱ و ۴۰). همچنین، در مطالعه دیگر گزارش شد کاربرد سیلیس نقش حفاظتی در جلوگیری از جوانه‌زنی دانه روی بوته گندم تحت تنش شدید خشکی بازی می‌کند (۴۸). در مطالعه‌ای در خصوص اثر سیلیس بر گیاهان جو و ذرت تحت شرایط تنش کم‌آبی مشاهده شد با مصرف سیلیس، آب مصرفی در مزرعه به‌میزان ۲۰ تا ۳۰ درصد کاهش یافت (۴). در پژوهشی اعلام شد که مصرف سیلیس باعث افزایش عملکرد دانه، ماده خشک گیاه، تعداد پنجه و همچنین مقاومت گیاه در شرایط تنش آبی شد، از طرفی سیلیس باعث کاهش تعرق و کاهش آب مورد نیاز گیاه و به‌عبارتی کارایی و بهره‌وری مصرف آب را افزایش داد (۱۷). دیگر محققان گزارش کردند که عنصر پتاسیم بر خلاف نیتروژن و فسفر اثر قطعی و مشخصی در پنجه‌زنی گیاهان ندارد، ولی موجب افزایش تعداد خوشه‌چه‌ها در خوشه شده و درصد خوشه‌چه‌های پر و وزن هزار دانه را بالا می‌برد (۱۵)، ولی این عنصر اثر مثبت معنی‌داری بر تعداد خوشه‌چه در خوشه داشت (۵۰).

به‌طور کلی، میزان انتشار آلاینده‌های محیط‌زیستی ارتباط مستقیمی با شیوه مدیریت مزرعه و مصرف نهاده‌ها دارد (۱۲ و ۱۴). با توجه به مطالب ذکر شده باید بیان کرد که بخش تولید گیاهان زراعی یکی از منابع مهم در انتشار آلاینده‌های محیط‌زیستی بوده و ارزیابی چرخه حیات ضرورت دارد. بنابراین، ارزیابی چرخه حیات تولید گندم برای تعیین انرژی آلاینده‌های محیط‌زیستی ضرورت دارد. از این‌رو، با توجه به اینکه تاکنون گزارشی در مورد ارزیابی تولیدگندم ناشی از مصرف نانوکلات پتاسیم و نانوسیلیس در دوره‌های آبیاری با روش LCA در منطقه بوشهر گزارش نشد، نگارندگان را بر آن داشت تا به تحلیل و مقایسه جنبه‌های محیط‌زیستی ردپای بوم‌شناختی و ردپای آب تولید گندم در این منطقه بپردازند.

مواد و روش‌ها

این آزمایش به‌صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در مزرعه تحقیقاتی واقع در بوشهر در سال زراعی ۹۶-۱۳۹۵ اجرا شد. دور آبیاری در چهار سطح شامل: ۱- فاصله آبیاری دو روز یکبار (شاهد)، ۲- فاصله آبیاری چهار روز یکبار، ۳- فاصله آبیاری شش روز یکبار، و ۴- فاصله آبیاری هشت روز یکبار به‌عنوان عامل اصلی و دو سطح محلول‌پاشی شامل کاربرد کودهای نانوسیلیس و نانوکلات پتاسیم به‌همراه عدم مصرف آن‌ها (شاهد) به‌عنوان عامل فرعی بودند. در هر مرحله از آبیاری رطوبت خاک با استفاده از روش درصد رطوبت وزنی به میزان ظرفیت زراعی رسانده شد. در این تحقیق از رقم چمران گندم استفاده شد. شیوه انجام هر عملیات زراعی بر اساس عرف منطقه انجام شد. سپس، کاشت در کرت‌هایی به ابعاد ۵×۴ متر در خطوط با فاصله ۲۰ سانتی‌متر صورت گرفت. سپس، آبیاری اول انجام و بعد از آن پایش مزرعه جهت آبیاری بعدی، سله‌شکنی، وجین و مبارزه با علف‌های هرز به صورت منظم انجام شد. محلول‌پاشی نانوسیلیس بر اساس دستورالعمل شرکت سازنده با غلظت ۲۰ قسمت در میلیون در سه مرحله

به‌ترتیب در مراحل اواسط پنجه‌زنی، اواخر پنجه‌زنی و بعد از خروج کامل خوشه‌ها صورت گرفت. محلول‌پاشی نانوکلات پتاسیم بر اساس دستورالعمل شرکت سازنده در دو مرحله اواسط پنجه‌زنی و ظهور سنبله به میزان دو در هزار انجام شد. در کرت‌های آزمایشی، مصرف کودهای شیمیایی طبق نتایج آزمایش خاک و سایر عملیات زراعی طبق عرف منطقه انجام شد. بر اساس نتیجه آزمون خاک، خاک منطقه دارای بافت لومی ـ رسی، میزان اسیدیته برابر ۷/۶، هدایت الکتریکی برابر ۳/۳۵ دسی‌زیمنس بر متر، ماده آلی ۰/۴۸ درصد، فسفر برابر ۱۰/۸ میلی‌گرم در کیلوگرم و پتاسیم برابر ۱۱۵ میلی‌گرم در کیلوگرم بود. عملیات کاشت در ۱۰ آذر ماه انجام شد. در طی دوره نمو و رشد گیاه بعد از حذف اثرات حاشیه‌ای در هر کرت به‌صورت تصادفی صفات زیر اندازه‌گیری شد.

برآورد شاخص‌های کمی و کیفی: تعیین شاخص‌های زراعی شامل طول سنبله، ارتفاع بوته، تعداد پنجه در بوته، تعداد دانه در گیاه، تعداد دانه در سنبله و وزن هزار دانه با شمارش از روی هشت بوته در هر کرت انجام شد. تعیین عملکرد دانه، عملکرد کاه و کلش و عملکرد زیستی با برداشت کپه از چهار متر مربع از قسمت میانی هر کرت بر اساس رطوبت ۱۴ درصد انجام شد و شاخص برداشت از نسبت عملکرد دانه به عملکرد زیستی بر حسب درصد محاسبه شد.

تعیین درصد پروتئین دانه: برای تعیین درصد پروتئین، درصد نیتروژن در فاکتور پروتئینی ۶/۲۵ ضرب شد (۳۶ و ۴۷). درصد نیتروژن دانه به روش کجلدال اندازه‌گیری شد (۳۶ و ۴۷). همچنین، اندازگیری سیلیس دانه از روش فلاح و همکاران (۲۰۰۴) انجام شد (۱۸). برای تعیین محتوای پتاسیم دانه از روش دوبرمن و همکاران (۲۰۰۲) استفاده شد (۱۶).

محاسبه شاخص‌های بیلان آبی: با توجه به نوع دور آبیاری، میزان لازم آب به کرت‌ها بر اساس ظرفیت مزرعه داده شد و در نهایت کل آب آبیاری شده محاسبه شد. آب مصرفی در هر کرت به‌طور جداگانه محاسبه گردید. آبیاری به روش سطحی و انتقال آب از طریق لوله و شیلنگ انجام شد و کنترل دقیق مقدار آب با استفاده از کنتور حجمی صورت گرفت. پس از اندازه‌گیری کل آب مصرفی در هر کرت، شاخص‌های مربوط به آبیاری شامل بهره‌وری آب، کارایی زراعی مصرف آب و نیاز آبی گیاه محاسبه شد (۵، ۲۱ و ۵۱). بهره‌وری آب از نسبت عملکرد دانه به آب مصرفی و کارایی مصرف آب نیز از نسبت عملکرد زیستی به آب مصرفی محاسبه شد (۱۰).

تجزیه و تحلیل داده‌های زراعی: پس از جمع‌آوری داده‌ها، تجزیه و تحلیل صفات کمی و کیفی گیاه و شاخص‌های بیلان آبی از طریق نرم‌افزار آماری SAS 9.1 و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال پنج درصد انجام شد.

ارزیابی چرخه حیات (LCA[1]) مرتبط با ردپای بوم‌شناختی و ردپای آب: بر اساس استاندارد ایزو ۱۴۰۴۰، ارزیابی چرخه حیات شامل چهار بخش: تعریف اهداف و حوزه عمل مطالعه، ممیزی چرخه حیات (تعیین ورودی‌ها و خروجی‌های سامانه)، ارزیابی اثرات زیست‌محیطی چرخه حیات و تفسیر نتایج است (۲۴ و ۵۶)، که جزییات مربوط به هر بخش از دیگر مطالعات استخراج شد (۶، ۴۴، ۴۵ و ۴۹).

ارزیابی تأثیر در چرخه حیات: در این مرحله باید مشخص ساخت که کدام طبقه تأثیر لحاظ شود و نیز برای ارزیابی تأثیر از چه روشی استفاده شود. لذا، با توجه به اهمیت مباحث محیط‌زیستی در تولید گندم، شاخص‌های رده‌اثر مهم و تأثیرگذار ردپای

1- Life cycle assessment

بوم‌شناختی و ردپای آب با مدل‌های LCA در نرم‌افزار SimaPro 8.2 برآورد شدند (۴۹). به این ترتیب برای محاسبه LCA ابتدا گروه‌های رده‌اثر صورت‌برداری شده و تأثیر کارکرد کشت گندم در دور آبیاری و کاربرد نانوکودهای سیلیس و پتاسیم بر آن‌ها به‌صورت کمی تعیین شد.

نتایج و بحث

شاخص‌های زراعی، عملکرد کمی و کیفی: یافته‌های جدول تجزیه واریانس نشان داد که صفات طول سنبله، ارتفاع بوته، تعداد پنجه در بوته، تعداد دانه در بوته، تعداد دانه در سنبله، شاخص برداشت و محتوای پروتئین دانه از نظر آماری تحت اثر ساده دور آبیاری معنی‌دار شدند (جدول‌های ۱ و ۲). همچنین، تنها صفت ارتفاع بوته تحت اثر ساده نانوکود در سطح احتمال پنج درصد قرار گرفت. علاوه بر این، در برهمکنش دور آبیاری در نانوکود نیز طول سنبله، ارتفاع بوته، تعداد دانه در بوته، تعداد دانه در سنبله، عملکرد دانه و محتوای سیلیس دانه تفاوت آماری معنی‌داری را نشان دادند (جدول‌های ۱ و ۲). مقایسه میانگین اثر ساده دور آبیاری نشان داد که با افزایش دور آبیاری از دو روز یکبار به هشت روز، تعداد پنجه در بوته به میزان ۲۴/۴۰ درصد کاهش یافت که علت اصلی آن را می‌توان به کاهش میزان رطوبت خاک در پای بوته در مرحله پنجه‌زنی نسبت داد. طبق یافته‌ها، این صفت برای دور آبیاری دو و چهار روز (به‌ترتیب ۹/۷۹ و ۹/۷۳ پنجه) در یک سطح آماری و دور آبیاری شش و هشت روز یکبار (به‌ترتیب ۸/۴۴ و ۷/۸۷ پنجه) نیز در یک سطح آماری قرار گرفتند (جدول ۳).

جدول ۱- میانگین مربعات عملکرد و اجزای عملکرد گندم تحت اثر دور آبیاری و کاربرد نانوسیلیس و نانو پتاسیم

Table 1. Mean square of yield and yield components of wheat under the effect of irrigation interval and application of nano-silicon and nano-potassium.

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	طول سنبله Spike length	ارتفاع بوته Plant height	تعداد پنجه در بوته No. of tiller per plant	تعداد دانه در بوته No. of grain per plant	تعداد دانه در سنبله No. of grain per spike	عملکرد دانه Grain yield	شاخص برداشت Harvest index
تکرار Replication	2	0.82^{ns}	89.28^{**}	4.05^{ns}	36.81^{**}	5.93^{*}	86701^{ns}	4.85^{ns}
دور آبیاری Irrigation interval (I)	3	5.56^{**}	48.43^{*}	8.24^{*}	48.75^{**}	11.18^{**}	20987^{ns}	9.38^{*}
خطای اصلی Error	6	1.07	15.40	2.14	11.76	3.06	70810	3.45
نانوکود Nano-fertilizer (F)	2	0.28^{ns}	55.27^{*}	3.42^{ns}	4.81^{ns}	1.48^{ns}	29606^{ns}	4.42^{ns}
دوره آبیاری × نانوکود I×F	6	1.27^{*}	69.12^{**}	0.76^{ns}	14.95^{**}	5.00^{**}	75996^{*}	9.62^{ns}
خطای فرعی Error	16	0.38	12.07	2.39	2.86	0.80	38284	7.92
ضریب تغییرات (درصد) CV (%)	-	6.58	4.05	17.25	5.32	5.67	5.85	6.84

ns، * و ** به‌ترتیب عدم معنی‌داری و معنی‌داری در سطح احتمال پنج و یک درصد.

ns, * and ** show no significant and the probability at 5 and 1 percent level, respectively.

جدول ٢- میانگین مربعات صفات کیفی گندم تحت اثر دور آبیاری و کاربرد مصرف نانوسیلیس و نانوکلات پتاسیم.

Table 2. Mean square of qualitative traits of wheat under the effect of irrigation interval and application of nano-silicon and nano-potassium.

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	محتوای پتاسیم دانه Grain K content	محتوای سیلیس دانه Grain Si content	محتوای پروتئین دانه Grain protein content	آب مصرفی Consumed water	کارایی مصرف آب Water use efficiency	بهره‌وری آب Water productivity	نیاز آبی گیاه Plant water requirement
تکرار Replication	2	0.0001^{ns}	0.27^{ns}	2.45^{*}	1075919^{**}	0.07^{*}	0.02^{**}	0.0525^{**}
دور آبیاری Irrigation interval (I)	3	0.001^{ns}	0.42^{ns}	2.11^{*}	148892^{*}	0.07^{*}	0.01^{*}	0.0127^{ns}
خطای اصلی Error	6	0.001	0.60	0.78	23586	0.02	0.003	0.0077
نانوکود Nano-fertilizer (F)	2	0.002^{ns}	1.03^{ns}	0.72^{ns}	80169^{ns}	0.004^{ns}	0.005^{ns}	0.01123^{ns}
دوره آبیاری × نانوکود I×F	6	0.0002^{ns}	1.90^{*}	0.95^{ns}	24725^{ns}	0.03^{ns}	0.01^{*}	0.01361^{*}
خطای فرعی Error	16	0.003	0.65	1.58	36461	0.02	0.003	0.0065
ضریب تغییرات (درصد) CV (%)	-	8.36	4.78	8.43	4.66	7.72	6.96	6.57

ns، * و ** به‌ترتیب عدم معنی‌داری و معنی‌داری در سطح احتمال پنج و یک درصد.

ns, * and ** are no significant and significant at 5 and 1 percent level, respectively.

بالاترین شاخص برداشت نیز از نظر آماری برای دور آبیاری دو و چهار روز (به‌ترتیب ۴۲/۰۸ و ۴۲ درصد) به‌دست آمد. کمترین شاخص برداشت در دور آبیاری شش و هشت روز حاصل شد (جدول ۳). تغییر در مقادیر شاخص برداشت ناشی از تغییرات مقادیر عملکرد دانه و عملکرد زیستی در سطوح مختلف دورهای آبیاری نسبت داد که منجر به کاهش و یا افزایش شاخص برداشت شد.

جدول ٣- مقایسه میانگین مؤلفه‌های گندم تحت اثر دور آبیاری.

Table 3. Mean square of wheat parameters under effect of irrigation interval.

تیمار Treatment	تعداد پنجه در بوته No. of tiller per plant	شاخص برداشت (درصد) Harvest index (%)	محتوای پتاسیم دانه (درصد) Grain K content (%)	محتوای پروتئین دانه (درصد) Grain protein content (%)	آب مصرف شده (متر مکعب) Consumed water (m^3)	کارایی مصرف آب (کیلوگرم در مترمکعب) Water use efficiency (kg/m^3)
دور آبیاری Irrigation interval						
I_1	9.79 a	42.08 a	0.34 a	15.32 a	4234.44 a	2.12 a
I_2	9.73 a	42.00 a	0.33 a	15.13 ab	4161.11 ab	2.01 ab
I_3	8.44 b	40.47 b	0.31 b	14.92 ab	4038.89 bc	1.95 b
I_4	7.87 b	40.12 b	0.31 b	14.21 b	3944.44 c	1.92 b
LSD 0.05	1.69	2.11	0.038	1.02	177.15	0.14

*: حروف مشترک در هر ستون نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد بر اساس آزمون LSD است.

I_1, I_2, I_3, I_4: به‌ترتیب فاصله آبیاری دو روز یکبار، چهار روز یکبار، شش روز یکبار، هشت روز یکبار هستند.

*: Values within a column followed by same letter are not significantly different based on LSD test ($P \leq 0.05$). I_1, I_2, I_3 and I_4 are irrigation intervals by 2, 4, 6 and 8 days, respectively.

در همین رابطه، عنابی میلانی و زمانی (۲۰۱۴) گزارش کردند تعداد پنجه در بوته و شاخص برداشت گندم با افزایش دور آبیاری روند کاهشی را نشان داد (۴۲). قمرنیا و همکاران (۲۰۱۲) نیز بیان کردند تعداد پنجه در بوته و شاخص برداشت در بین تیمارهای آبیاری معنی‌دار بود که تیمار تک آبیاری در مقایسه با آبیاری تکمیلی موجب افزایش این دو صفت در ارقام گندم شد (۲۰). دیگر محققان نیز نتایج مشابهی را گزارش کردند (۴۳).

مقایسه میانگین اثر ساده دور آبیاری نشان داد که از بین صفات کیفی نیز محتوای پتاسیم دانه و درصد پروتئین دانه با تأخیر در فاصله آبیاری از دو روز به هشت روز به‌طور معنی‌داری به‌ترتیب برابر ۸/۸۲ و ۷/۲۵ درصد کاهش یافت که علت اصلی آن را می‌توان به اثر منفی تنش کم‌آبی در سازوکارهای فیزیولوژیک جذب عناصر نیتروژن و پتاسیم نسبت داد. حداکثر غلظت پتاسیم دانه برای دور آبیاری دو و چهار روز (۰/۳۴ و ۰/۳۳ درصد) و کمترین مقدار آن با آبیاری شش و هشت روز یکبار برابر ۰/۳۱ درصد حاصل شد (جدول ۳). علاوه بر این، بیشترین غلظت پروتئین دانه (۱۵/۳۲ درصد) برای دور آبیاری با فاصله دو روز و کمترین درصد آن (۱۴/۲۱ درصد) برای دور آبیاری هشت روز یکبار مشاهده شد. طبق یافته‌ها، غلظت پروتئین دانه برای دور آبیاری چهار و شش روز در یک سطح قرار گرفت (جدول ۳). مک‌جینلی (۲۰۰۲) با بررسی اثر آبیاری بر گندم نتیجه گرفت آبیاری با دوره کوتاه به‌ویژه در مراحل انتهایی رشد، درصد پروتئین دانه را کاهش داد (۳۷)، که با یافته‌های عنابی میلانی و زمانی (۲۰۱۴) مطابقت دارد (۴۲). در همین رابطه، بودر (۲۰۰۳) گزارش کرد میزان پروتئین دانه با افزایش عملکرد دانه گندم کاهش یافت (۳).

مقایسه میانگین برهمکنش دور آبیاری در نانوکود نشان داد که طول سنبله و ارتفاع بوته با تأخیر در آبیاری از دو روز به هشت روز یکبار روند کاهشی معنی‌دار را نشان دادند که اثر کاهشی آن در سطح شاهد (عدم مصرف نانوکود) بالاتر از از نانوسیلیس و نانوکلات پتاسیم به‌دست آمد (جدول ۴)، این یافته‌ها نشان می‌دهد که می‌توان با کاربرد نانوسیلیس و نانوکلات پتاسیم اثر منفی کم‌آبیاری و یا تنش‌های خشکی احتمالی را کاهش داد. علاوه بر این، بیشترین طول سنبله و ارتفاع بوته در دور آبیاری دو روز با مصرف نانوکلات پتاسیم و نانوسیلیس حاصل شد که اثر مثبت نانوکلات پتاسیم بالاتر از نانوسیلیس بود. روند اثرگذاری نانوکود و سطح شاهد در سطوح تیمار آبیاری یکنواخت بود که دور آبیاری چهار روز بعد از دور آبیاری دو روز یکبار در رتبه دوم قرار گرفت و دورهای آبیاری شش و هشت روز یکبار نیز به‌ترتیب در رتبه‌های سوم و چهارم قرار گرفتند (جدول ۴). کریمی و همکاران (۲۰۱۱) نیز با بررسی اثر دور آبیاری گزارش کرد عملکرد دانه بین سطوح مختلف آبیاری معنی‌دار نبود (۲۷). در همین رابطه، عنابی میلانی و زمانی (۲۰۱۴) دریافتند طول سنبله و ارتفاع بوته تحت اثر دورهای آبیاری متفاوت بود که در دورهای آبیاری بالاتر روند کاهشی را نشان داد (۴۲). مقصودی و امام (۲۰۱۶) گزارش کردند تنش خشکی موجب کاهش معنی‌دار طول سنبله، ارتفاع بوته و عملکرد دانه ارقام گندم شد که با محلول‌پاشی سیلیس افزایش طول سنبله و عملکرد دانه مشاهده شد (۳۴)، که با نتایج کرملاچعب و همکاران (۲۰۱۴) در همین رابطه برای گیاه گندم مطابقت داشت. در واقع، سیلیس با افزایش مقاومت به خشکی منجر به افزایش ماده خشک گیاه می‌شود (۴۱).

جدول ٤- مقایسه میانگین برهمکنش دور آبیاری و کاربرد نانوکود بر صفات کمی و کیفی گندم.

Table 4. Interaction of irrigation regime and nano-fertilizer on qualitative and quantitative traits of wheat

برهمکنش Interaction	طول سنبله (سانتی‌متر) Spike length (cm)	ارتفاع بوته (سانتی‌متر) Plant height (cm)	تعداد دانه در بوته No. of grain per plant	تعداد دانه در سنبله (کیلوگرم در هکتار) No. of grain per spike	عملکرد دانه (درصد) Grain yield (kg/ha)	محتوای سیلیس دانه (درصد) Grain Si content (%)	بهره‌وری آب (کیلوگرم در مترمکعب) Water productivity (kg/m^3)	نیاز آبی گیاه (مترمکعب در کیلوگرم) Plant water requirement (m^3/kg)
I_1F_1	10.30 a	92.57 a	33.83 ab	16.77 ab	3372 ab	3.20 a	0.87 a	1.15 d
I_1F_2	10.40 a	89.70 ab	36.20 a	18.17 a	3572 a	2.07 abc	0.88 a	1.15 c
I_1F_3	9.60 ab	82.50 abc	33.73 ab	16.23 ab	3251 bc	1.17 c	0.82 ab	1.22 abc
I_2F_1	10.13 a	88.33 a	33.20 ab	16.77 ab	3417 ab	2.37 ab	0.83 a	1.21 bc
I_2F_2	10.30 a	90.33 a	34.40 ab	17.23 a	3493 a	1.40 bc	0.84 a	1.19 bc
I_2F_3	9.50 ab	84.80 ab	28.73 bc	14.37 bc	3204 bc	1.17 c	0.78 abc	1.29 ab
I_3F_1	9.37 ab	81.23 abc	32.07 abc	15.90 ab	3330 abc	2.43 ab	0.81 ab	1.26 ab
I_3F_2	10.07 a	90.33 a	32.87 ab	16.53 ab	3400 ab	1.38 bc	0.85 a	1.17 bcd
I_3F_3	8.23 bc	81.00 abc	31.47 abc	15.50 abc	3253 bc	1.23 c	0.75 c	1.32 a
I_4F_1	8.33 bc	82.33 ab	28.73 bc	14.03 bc	3283 bc	1.63 bc	0.80 ab	1.24 abc
I_4F_2	8.80 abc	86.80 ab	29.27 bc	14.63 bc	3438 ab	1.17 c	0.86 a	1.18 bcd
I_4F_3	8.07 c	79.00 c	27.40 c	13.50 c	3144 c	1.17 c	0.76 c	1.34 a

*: حروف مشترک در هر ستون نشان دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد بر اساس آزمون LSD است.

I_1, I_2, I_3, I_4: به‌ترتیب فاصله آبیاری دو روز یکبار، چهار روز یکبار، شش روز یکبار، هشت روز یکبار هستند.

F_1, F_2, F_3: به‌ترتیب محلول‌پاشی نانوسیلیس، نانو کلات پتاسیم و شاهد و عدم مصرف آنها می‌باشد.

*: Values within a column followed by same letter are not significantly different based on LSD test ($P \leq 0.05$). I_1, I_2, I_3 and I_4 are irrigation intervals by 2, 4, 6 and 8 days, respectively.

F_1, F_2 and F_3 are consumption of nano-silicon, nano-potassium and control (no-consumption), respectively.

در برهمکنش دور آبیاری و نانوکود، تعداد دانه در بوته و تعداد دانه در سنبله نیز نتایج مشابه با صفات طول سنبله و ارتفاع بوته را نشان دادند که با تأخیر در آبیاری از دو روز به هشت روز یکبار، تعداد دانه در بوته و تعداد دانه در سنبله کاهش نشان داد که اثرات منفی آن در سطح شاهد (عدم مصرف نانوکود) مشهودتر بود که از این نظر نانوسیلیس و نانوکلات پتاسیم به‌ترتیب در رتبه‌های دوم و سوم قرار گرفتند. همچنین، بیشترین تعداد دانه در بوته در برهمکنش فاصله آبیاری دو روز یکبار با مصرف نانوکلات پتاسیم و حداکثر تعداد دانه در سنبله برای دور آبیاری دو و چهار روز یکبار با مصرف نانوسیلیس و نانوکلات پتاسیم حاصل شد. کمترین تعداد دانه در بوته و تعداد دانه در سنبله نیز در برهمکنش فاصله آبیاری هشت روز یکبار و عدم مصرف نانوکود به‌دست آمد (جدول ۴). بر اساس یافته‌ها می‌توان بیان کرد استفاده از نانوکلات پتاسیم و نانوسیلیس منجر به افزایش تحمل گیاه به تنش کم‌آبی شده که اثر منفی کم‌آبی را در مقایسه با سطح شاهد (عدم مصرف نانوکود) به‌طور معنی‌داری جبران کرد. در همین رابطه، عنابی میلانی و زمانی (۲۰۱۴) با بررسی روش‌های آبیاری در گندم گزارش کردند تعداد دانه در بوته با افزایش دور آبیاری کاهش یافت (۴۲). مقصودی و امام (۲۰۱۶) با بررسی واکنش ارقام گندم به محلول‌پاشی سیلیس در شرایط تنش خشکی بعد از گلدهی گزارش کردند تنش خشکی موجب کاهش معنی‌دار تعداد دانه در سنبله همه ارقام شد که با محلول‌پاشی سیلیس، این صفت افزایش یافت (۳۴). در واقع، مصرف سیلیس از طریق افزایش مقاومت به خشکی و افزایش تعداد پنجه در بوته، تعداد دانه در بوته و ماده خشک گیاه می‌شود (۴۱).

مقایسه میانگین برهمکنش دور آبیاری در نانوکود نشان داد که بیشترین عملکرد دانه (۳۵۷۲ کیلوگرم در هکتار) برای دورهای آبیاری دو روز و چهار روز یکبار با مصرف نانوکلات پتاسیم به‌دست آمد که به دلیل افزایش طول سنبله، تعداد دانه در بوته و تعداد دانه در سنبله بود. عملکرد دانه با مصرف نانوسیلیس در دور آبیاری دو و چهار روز یکبار نیز در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. کمترین عملکرد دانه (۳۱۴۴ کیلوگرم در هکتار) در برهمکنش دور آبیاری هشت روز یکبار و عدم مصرف نانوکود (شاهد) تولید شد (جدول ۴). کاهش عملکرد دانه در دورهای آبیاری شش و هشت روز را می‌توان به اثر منفی کم‌آبی بر صفات زراعی عنوان کرد که منجر به کاهش عملکرد دانه شد، که اثر منفی آن در سطح شاهد (عدم مصرف نانوکود) بالاتر بود. طبق یافته‌ها، بیشترین غلظت سیلیس دانه (۳/۲ درصد) برای برهمکنش دور آبیاری دو روز یکبار و کاربرد نانوسیلیس حاصل شد. بیشترین درصد سیلیس دانه در هر چهار سطح آبیاری با مصرف نانوسیلیس مشاهده شد و مصرف نانوکلات پتاسیم در رتبه دوم قرار گرفت. کمترین غلظت سیلیس دانه نیز در هر چهار سطح آبیاری برای تیمار عدم مصرف نانوکود به‌دست آمد (جدول ۴). باید توجه داشت که با مدیریت صحیح آبیاری و افزایش مصرف سیلیس و پتاسیم می‌توان باعث جلوگیری از اتلاف محصول تولید و صرفه‌جویی بیشتر در مصرف آب شد که منجر به افزایش بهره‌وری آب می‌شود. بر اساس یافته‌های این آزمایش، افزایش مصرف آب نه تنها باعث افزایش عملکرد نشد، بلکه باعث کاهش بهره‌وری آب نیز شد. با توجه به اینکه کاربرد خاکی عناصر غذایی تحت شرایطی که آب قابل دسترس محدود باشد در افزایش جذب و انتقال مواد غذایی به شاخ و برگ گیاه همیشه مؤثر نیست، در چنین شرایطی استفاده از روش محلول‌پاشی شاخ و برگ گیاه مفیدتر از کاربرد خاکی عناصر غذایی برای بهبود شرایط تغذیه‌ای گیاه است (۲۶ و ۳۵)، که در این مطالعه نیز از روش محلول‌پاشی سیلیس و پتاسیم استفاده شد. دیگر محققان با بررسی اثرمحلول‌پاشی پتاسیم در دورهای مختلف آبیاری گندم نتایج مشابه با این مطالعه را گزارش کردند. در مطالعه دیگر نیز گزارش شد مصرف پتاسیم باعث افزایش محتوای پتاسیم دانه و عملکرد دانه شده که نتیجه آن افزایش تحمل به تنش خشکی در گیاه مؤثر بود (۹)، که با یافته‌های لرکی و همکاران (۲۰۱۵) در مورد اثر کود نانوکلات پتاسیم بر گندم مطابقت دارد (۳۰). همچنین، جعفرزاده و همکاران (۲۰۱۳) با بررسی اثر منابع مختلف پتاسیم بر گندم گزارش کردند محلول‌پاشی نانوکلات پتاسیم موجب افزایش عملکرد و اجزای عملکرد دانه (طول سنبله، تعداد دانه در سنبله و وزن هزار دانه) گندم شد (۲۵). عنابی میلانی و زمانی (۲۰۱۴) گزارش کردند عملکرد دانه و عملکرد زیستی گندم با افزایش دور آبیاری روند کاهش را نشان دادند (۴۲). مقصودی و امام (۲۰۱۶) با بررسی واکنش ارقام گندم به محلول‌پاشی سیلیس در شرایط تنش خشکی بعد از گلدهی گزارش کردند تنش خشکی موجب کاهش معنی‌دار عملکرد دانه، عملکرد زیستی و شاخص برداشت همه ارقام شد که با محلول‌پاشی سیلیس، افزایش ۱۶/۱۱ درصدی عملکرد حاصل شد (۳۴). علاوه بر این، مصرف سیلیس در شرایط تنش خشکی موجب افزایش عملکرد دانه گندم شد (۲۸). همچنین، در مطالعه‌ای دیگر اعلام شد که مصرف سیلیکات پتاسیم موجب افزایش عملکرد دانه به نسبت ۳۴/۲ درصد در مقایسه با عدم مصرف (شاهد) شد (۵۴). در واقع، مصرف سیلیس از طریق افزایش مقاومت به خشکی و افزایش تعداد پنجه در بوته، تعداد دانه و وزن هزار دانه موجب افزایش عملکرد و ماده خشک گیاه می‌شود

(۴۱). مصرف سیلیس در جذب و توزیع عناصر مؤثر است، به‌طوری که محتوای پروتئین دانه گندم با مصرف سیلیس کمی افزایش یافت (۲۲).

شاخص‌های بیلان آبیاری: شاخص‌های میزان آب مصرفی، بهره‌وری آب و کارایی مصرف آب از نظر آماری تحت اثر ساده دور آبیاری تفاوت معنی‌داری را نشان دادند. همچنین، شاخص‌های بهره‌وری آب و نیاز آبی گیاه نیز تحت برهمکنش دوگانه دور آبیاری و نانوکود در سطح احتمال پنج درصد قرار گرفتند (جدول ۳).

مقایسه میانگین اثر ساده دور آبیاری نشان داد که بیشترین آب مصرفی (۴۲۳۴ متر مکعب) و بالاترین کارایی مصرف آب (۲/۱۲ کیلوگرم بر متر مکعب) برای دور آبیاری دو روز یکبار به‌دست آمد که علت آن را می‌توان به افزایش عملکرد زیستی در این دور آبیاری نسبت داد. میزان آب مصرفی در دور آبیاری به فاصله چهار و شش روز یکبار به ترتیب در رتبه‌های دوم و سوم قرار گرفتند. کمترین آب مصرفی (۳۹۴۴ متر مکعب) برای فاصله آبیاری هشت روز یکبار مشاهده شد. طبق یافته‌ها، با تأخیر در آبیاری از دو روز یکبار به هشت روز میزان آب مصرف شده معادل ۷/۳۵ درصد کاهش یافت (جدول ۳). علاوه بر این، کمترین کارایی مصرف آب نیز برای دور آبیاری با فواصل شش و هشت روز یکبار (به‌ترتیب ۱/۹۵ و ۱/۹۲ کیلوگرم بر متر مکعب) حاصل شد که در یک سطح آماری قرار گرفتند (جدول ۳). علت پایین بودن کارایی مصرف آب در دورهای آبیاری شش و هشت روز را می‌توان به کاهش عملکرد زیستی در این سطوح ربط داد که نشان دهنده اثر منفی دورهای آبیاری شش و هشت روز بر بوته گندم است.

مقایسه میانگین برهمکنش دور آبیاری در نانوکود نشان داد که در هر چهار دور آبیاری بیشترین بهره‌وری آب با مصرف نانوسیلیس و نانوکلات پتاسیم به‌دست آمد که اثرات مثبت نانوکلات پتاسیم بیشتر از کاربرد نانوسیلیس بود. طبق یافته‌ها حداکثر بهره‌وری آب برای فاصله آبیاری دو روز یکبار حاصل شد و دور آبیاری با فواصل چهار و شش روز یکبار در رتبه‌های دوم و سوم قرار گرفتند. کاهش میزان بهره‌وری آب در دورهای آبیاری بالاتر را می‌توان به کاهش معنی‌دار در مقدار عملکرد دانه نسبت داد. همچنین، کمترین بهره‌وری آب در هر چهار دور آبیاری برای سطح عدم مصرف نانوکود (شاهد) حاصل شد که کمترین بهره‌وری آب نیز برای دور آبیاری با فاصله هشت روز یکبار مشاهده شد (جدول ۴).

طبق یافته‌های برهمکنش دوگانه دور آبیاری و مصرف نانوکود مشاهده شد که بر خلاف بهره‌وری آب، شاخص نیاز آبی گیاه در هر چهار دور آبیاری با مصرف نانوسیلیس و نانوکلات پتاسیم کاهش یافت و بیشترین نیاز آبی گیاه در هر چهار سطح آبیاری برای تیمار عدم مصرف نانوکود (شاهد) به‌دست آمد که علت اصلی آن را می‌توان به افزایش تحمل گیاه با مصرف نانوکود نسبت داد که منجر به کنترل کاهش عملکرد دانه در مقایسه با عدم مصرف نانوکود شد. همچنین، بیشترین نیاز آبی گیاه، تحت برهمکنش دور آبیاری شش و هشت روز و عدم مصرف نانوکود حاصل شد و کمترین نیاز آبی گیاه نیز تحت برهمکنش دور آبیاری دو روز یکبار و مصرف نانوسیلیس حاصل شد (جدول ۴). در همین رابطه، عنابی میلانی و زمانی (۲۰۱۴) با بررسی اثر روش‌های آبیاری در گندم گزارش کردند بیشترین کارایی مصرف آب با دور آبیاری با عمق یک تشت تبخیر کلاس A در مراحل آغاز ریشه‌دوانی و گلدهی به‌دست آمد (۴۲)، که با یافته‌های دیگر محققان مطابقت داشت (۳۹). بطور کلی هرچه مقدار آب مصرفی در مزرعه کمتر باشد کارایی مصرف آب

بالاتر خواهد بود (۱۱). همچنین، برخی از محققان گزارش کردند کاهش ۵۰ میلی‌متری در آب مصرفی مورد نیاز گندم اثر منفی بر عملکرد نداشته و در عوض موجب افزایش بهره‌وری آب شد (۵۲، ۵۹ و ۶۰). قمرنیا و همکاران (۲۰۱۲) نیز گزارش کردند کارایی مصرف آب در بین تیمارهای آبیاری در گندم معنی‌دار بود که تیمار تک آبیاری در مقایسه با آبیاری تکمیلی موجب افزایش کارایی مصرف آب شد (۲۰)، دیگر محققان نیز گزارش کردند اعمال آبیاری تکمیلی منجر به افزایش کارایی مصرف آب شد (۴۳).

آنالیز چرخه حیات مربوط به ردپای بوم‌شناختی و ردپای آب: بر اساس یافته‌های شاخص رده‌اثر ردپای بوم‌شناختی مشاهده می‌شود بیشترین انتشار دی‌اکسید کربن در دور آبیاری با فواصل دو و چهار روز یکبار (به‌ترتیب ۱۶۵۷ و ۱۶۳۳ متر مربع در سال) حاصل شد که در یک گروه آماری قرار گرفتند. کمترین انتشار دی‌اکسید کربن در دو فاصله آبیاری شش و هشت روز یکبار (۱۵۹۱ و ۱۵۷۱ متر مربع در سال) به‌دست آمد که در یک سطح آماری قرار گرفتند (جدول ۴).

جدول ۵- مقایسه شاخص‌های رده‌اثر ردپای بوم‌شناختی و ردپای آب در تولید گندم تحت اثر دورهای آبیاری و مصرف نانوسیلیس و نانوکلات پتاسیم از طریق LCA.

Table 5. Comparison of impact categories of ecological footprint and water footprint in wheat production under the effect of irrigation regimes and nano-silicon and nano-potassium consumption by LCA.

تیمار Treatment	ردپای بوم‌شناختی Ecological footprint			ردپای آب Water footprint				
	دی‌اکسید کربن (مترمربع در سال) CO_2 (m^2a)	اشغال زمین (مترمربع در سال) Land occupation (m^2a)	کیفیت بوم‌نظام (پتانسیل از بین رفته بخشی از گونه در مترمربع در سال) Ecosystem quality (PAD*m^2yr)	تخلیه منابع (مگاژول منابع باقی مانده) Resource depletion (MJ surplus)	کمبود آب کشاورزی Agricultural water scarcity (DALY)	منابع طبیعی (فقط آب) Natural resource (only water) UBP	شاخص تخلیه آب (مترمکعب) Water depletion index (WDI) (m^3)	شاخص کمبود آب (مترمکعب) Water scarcity index (WSI) (m^3)
آبیاری Irrigation								
I_1	1657	297.18	938.98	3385	1.12	138304	89.93	913.64
I_2	1633	302.50	876.74	3165	1.03	128052	89.35	843.48
I_3	1591	313.31	868.41	3136	1.02	126607	87.94	832.51
I_4	1571	320.24	867.73	3134	1.01	126542	87.36	831.27
میانگین Mean	1613	308.31	887.97	3205	1.05	129876	88.65	855.23
اشتباه استاندارد SE	19.54	5.20	17.13	60.42	0.03	2831	0.60	19.66
CV (%)	2.42	3.38	3.86	3.77	4.85	4.36	1.35	4.60
نانوکود Nano-fertilizer								
نانوسیلیس Nano-Si	1591	306.10	849.14	3066	1.01	123971	86.75	815.15
نانوپتاسیم Nano-K	1554	295.81	857.56	3095	1.01	125298	85.85	825.33
شاهد Control	1696	323.23	937.43	3384	1.10	137048	93.56	902.72
میانگین Mean	1614	308.41	881.38	3182	1.04	128772	88.72	847.73
اشتباه استاندارد SE	42.53	8.02	28.14	101.51	0.03	4156	2.43	27.65
CV (%)	4.56	4.51	5.53	5.53	5.00	5.59	4.75	5.65

I_1, I_2, I_3, I_4: به‌ترتیب فاصله آبیاری دو روز یکبار، چهار روز یکبار، شش روز یکبار، هشت روز یکبار هستند.

I_1, I_2, I_3 and I_4 are irrigation intervals by 2, 4, 6 and 8 days, respectively.

انتشار دی‌اکسید کربن در فاصله آبیاری دو روز یکبار معادل ۵/۴۷ درصد در مقایسه با فاصله آبیاری هشت روز یکبار کاهش نشان داد (جدول ۵). طبق یافته‌ها می‌توان بیان کرد سهم آب آبیاری در انتشار دی‌اکسید کربن بیشتر از میزان تولید (عملکرد دانه و عملکرد کاه و کلش) بوده که منجر به افزایش انتشار دی‌اکسید کربن در دورهای آبیاری پایین‌تر شد. بر خلاف شاخص رده‌اثر انتشار دی‌اکسید کربن، بالاترین میزان اشغال زمین برای دو فاصله آبیاری شش و هشت روز یکبار و کمترین مقدار آن برای فواصل آبیاری دو و چهار روز یکبار مشاهده شد. شاخص اشغال زمین در فاصله آبیاری دو روز یکبار معادل ۷/۲ درصد کمتر از فاصله آبیاری هشت روز یکبار بود (جدول ۵). طبق یافته‌ها می‌توان گزارش کرد که اثر میزان عملکرد بر شاخص اشغال زمین بالاتر از آب مصرفی بوده که منجر به کاهش اشغال زمین با افزایش دور آبیاری شد. مقایسه اثر کاربرد نانوکود بر شاخص‌های ردپای بوم‌شناختی نشان داد حداکثر میزان شاخص‌های انتشار دی‌اکسید کربن و اشغال زمین برای عدم مصرف نانوکود (شاهد) و حداقل مقادیر آن با مصرف نانوکلات پتاسیم به‌دست آمد. میزان انتشار دی‌اکسید کربن در تیمار عدم مصرف نانوکود در مقایسه با کاربرد نانوسیلیس و نانوکلات پتاسیم به‌ترتیب معادل ۶/۶۰ و ۹/۱۴ درصد بیشتر بود. همچنین، میزان اشغال زمین در تیمار شاهد در مقایسه با مصرف نانوسیلیس و نانوکلات پتاسیم معادل ۵/۶۰ و ۹/۲۷ درصد بالاتر بود (جدول ۵). این نتایج نشان می‌دهد که کاربرد نانوکود در مقایسه با شاهد به‌علت عملکرد دانه و کاه و کلش بالاتر دارای مقادیر پایین‌تر شاخص رده‌اثر انتشار دی‌اکسید کربن و اشغال زمین بود.

بر اساس یافته‌های ردپای آب مشاهده می‌شود که بیشترین مقدار شاخص‌های رده‌اثر کیفیت بوم‌نظام، تخلیه منابع، کمبود منابع آب، منابع طبیعی (فقط آب) و شاخص کمبود آب برای دور آبیاری با فاصله دو روز یکبار به‌دست آمد و کمترین مقدار این شاخص‌ها در فواصل آبیاری چهار، شش و هشت روز مشاهده شد. با افزایش فواصل آبیاری از دو روز به هشت روز یکبار مقادیر شاخص‌های کیفیت بوم‌نظام، تخلیه منابع، کمبود منابع آب، منابع طبیعی (فقط آب) و شاخص کمبود آب به‌ترتیب برابر ۸/۲۱، ۸، ۱۰/۸۹ و ۹/۲۹، ۹/۹۱ درصد کاهش نشان داد. بیشترین مقدار شاخص تخلیه آب نیز برای فواصل آبیاری دو و چهار روز یکبار و کمترین مقدار آن برای فواصل آبیاری شش و هشت روز یکبار حاصل شد (جدول ۵). بنابراین، می‌توان بیان کرد کاهش مصرف آب آبیاری منجر به کاهش انتشار آلاینده‌های محیط‌زیستی شده و سهم آب مصرفی در انتشار آلاینده‌ها بالاتر از میزان تولید بود که در دورهای آبیاری دو و چهار روز مشاهده شد.

مقایسه شاخص‌های رده‌اثر ردپای آب با مصرف نانوکود نشان داد که با مصرف نانوسیلیس و نانوکلات پتاسیم شاخص‌های تخلیه منابع، کمبود منابع آب، منابع طبیعی (فقط آب)، شاخص تخلیه آب و شاخص کمبود آب کشاورزی کمتر از عدم مصرف نانوکود (شاهد) بود که این شاخص‌ها تحت اثر مصرف نانوسیلیس و نانوکلات پتاسیم در یک سطح آماری قرار گرفتند (جدول ۵). با مصرف نانوسیلیس و نانوکلات پتاسیم شاخص کیفیت بوم‌نظام معادل ۹/۶۲ و ۸/۵۲ درصد در مقایسه با تیمار شاهد کاهش یافت. همچنین، شاخص تخلیه منابع معادل ۹/۴۰ و ۸/۵۴ درصد و شاخص کمبود منابع آب کشاورزی معادل ۸/۱۸ درصد با مصرف نانوسیلیس و نانوکلات پتاسیم در مقایسه با عدم مصرف نانوکود کاهش نشان دادند. علاوه بر این، شاخص تخلیه آب معادل ۷/۲۸ و ۸/۲۴ درصد و شاخص کمبود آب کشاورزی معادل ۹/۷۰

و ۸/۵۷ درصد با مصرف نانوسیلیس و نانوکلات پتاسیم در مقایسه با تیمار عدم مصرف (شاهد) کاهش نشان داد (جدول ۵). طبق یافته‌ها می‌توان گزارش کرد با کاربرد نانوذرات آب مصرفی در گیاه کاهش یافته و از طرف دیگر این کود منجر به افزایش عملکرد شد. بنابراین، کاهش مصرف آب و افزایش عملکرد دو متغیر اثرگذار بر شاخص‌های رده‌اثر آلاینده‌های محیط‌زیستی بوده که منجر به کاهش اثرات سوء محیط‌زیستی می‌شوند. در واقع، در تولید محصولات کشاورزی نهاده‌های زیادی مصرف می‌شود در نتیجه سامانه تولید اثرات محیط‌زیستی گسترده‌ای را ایجاد می‌کند (۶). در همین رابطه، در آلمان گزارش شد برای تولید یک تن گندم اسیدیته و گرمایش جهانی از اثرات عمده محیطی بوده‌اند (۷). در مطالعه دیگر، تخلیه انرژی برای محصول گندم با شاخص نهایی ۰/۱۴ مهم‌ترین شاخص محیط‌زیستی بود (۵۵).

نتیجه‌گیری کلی

۱- یافته‌های پژوهش نشان داد بیشترین عملکرد دانه برای دور آبیاری دو روز و چهار روز یکبار با مصرف نانوکلات پتاسیم به‌دست آمد که به‌دلیل افزایش طول سنبله، تعداد دانه در بوته و تعداد دانه در سنبله بود که با مصرف نانوسیلیس برای فواصل آبیاری دو و چهار روز یکبار در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. با تأخیر در آبیاری از دو روز به هشت روز یکبار میزان آب مصرف شده معادل ۷/۳۵ درصد کاهش یافت که منجر به افزایش کارایی مصرف آب شد. در هر چهار سطح آبیاری با مصرف نانوکلات پتاسیم و نانوسیلیس عملکرد کمی و کیفی گندم افزایش یافته و نیاز آبی گیاه کاهش یافت.

۲- انتشار دی‌اکسید کربن در فاصله آبیاری دو روز یکبار معادل ۵/۴۷ درصد در مقایسه با فاصله آبیاری هشت روز یکبار کاهش و شاخص اشغال زمین معادل ۷/۲ درصد افزایش یافت. همچنین، با افزایش فواصل آبیاری از دو روز به هشت روز یکبار مقادیر شاخص‌های کیفیت بوم‌نظام، تخلیه منابع، کمبود منابع آب کشاورزی و شاخص کمبود آب کاهش نشان دادند. با مصرف نانوسیلیس و نانوکلات پتاسیم شاخص‌های تخلیه منابع، کمبود منابع آب، شاخص تخلیه آب و شاخص کمبود آب نیز کمتر از سطح عدم مصرف نانوکود (شاهد) بود.

۳- بر اساس یافته‌ها می‌توان بیان کرد بهترین دور آبیاری از نظر بهبود عملکرد کمی و کیفی، افزایش کارایی آب، بهره‌وری آب و همچنین کاهش ردپای بوم‌شناختی و ردپای آب فواصل آبیاری دو و چهار روز یکبار بود که در یک سطح آبیاری قرار گرفتند. علاوه بر این، کاربرد نانوکلات پتاسیم و نانوسیلیس حتی در دورهای آبیاری شش و هشت روز نیز منجر به افزایش بهره‌وری آب و افزایش عملکرد کمی و کیفی شد.

منابع

1. Alcamo, J., Henrichs, T., and Rosch, T. 2000. World Water in 2025: Global Modeling and Scenario Analysis for the World Commission on Water for the 21th Century, Center for Environmental Systems Research, Report A0002. University of Kassel. Germany, P, 49.
2. Arabi Yazdi, A., Nik Nia, N., Majidi, N., and Emami, H. 2015. Water security assessment in arid climates based on water footprint concept (case study: South Khorasan province). Iran. J. Irrig. Drain., 4(8): 735-746. (In Persian)
3. Bauder, J. 2003. Wheat production. Montana State University. Water Quality and Irrigation Management web site.

4. Bocharnikova, E.A., and Benes, S. 2011. Effect of Si on barley and corn under simulated drought condition. International Conference on Silicon in Agriculture September 13-18, Beijing, China.
5. Boumann, B.A.M., and Toung, T.P. 2002. Field water management to save water increase its productivity in irrigated lowland rice. Agric. Water Manage., 49: 11-30.
6. Brentrup, F., Kusters, J., Kuhlmann, H., and Lammel, J. 2004a. Environmental impact assessment of agricultural production systems using the life cycle assessment methodology: I. Theoretical concept of a LCA method tailored to crop production. Eur. J. Agro., 20(3): 247-264.
7. Brentrup, F., Kusters, J., Lammel, J., Barraclough, P., and Kuhlmann, H. 2004b. Environmental impact assessment of agricultural production systems using the life cycle assessment (LCA) methodology: II. The application to N fertilizer use in winter wheat production systems. Eur. J. Agron., 20 (3): 265-279.
8. Chapagain, A.K., Hoekstra, A.Y., Savenije, H.H.G., and Gautam, R. 2006. The water footprint of cotton consumption: An assessment of the impact of worldwide consumption of cotton products on the water resources in the cotton producing countries. Ecol. Econ., 60: 186-203.
9. Collins, R.P., Harris, P.J.C., Bateman, M.J., and Henderson, J. 2008. Effect of calcium and potassium nutrition on yield, ion content, and salt tolerance of *Brassica campestris* (rapa). J. Plant Nut., 31: 1461-1481.
10. Cook, S., Gichuki, F., and Turral, H. 2006. Agricultural water productivity: Issues, concepts and approaches, Basin Focal Project Working Paper. Chal. Prog. Water Food, 1: 19.
11. Cremona, M.V., Stutzel, H., and Kage, H. 2004. Irrigation scheduling of kohlrabi (*Brassica oleracea* var. *gongylodes*) using crop water stress index. Hort. Sci., 39(2): 276-279.
12. Dastan S., Soltani, A., Noormohamadi, Gh., and Madani, H. 2015a. CO_2 emission and global warming potential (GWP) of energy consumption in paddy field production systems. J. Agroecol., 6(4), 823-835. (In Persian)
13. Dastan, S., Ghareyazie, B., Soltani, A., and Jafari Kelarijani, S.M. 2016. Life cycle assessment of water using of improved and traditional cultivars of rice according to water footprint estimation in conventional, intensive and conservation systems. 2nd International and 14th National Iranian Crop Science Congress. University of Guilan, Rastht, Iran. Aug. 30-Sep. 1. (In Persian)
14. Dastan, S., Noormohamadi, Gh., Madani, H., and Soltani, A. 2015b. Analysis of energy indices in rice production systems in Neka region. J. Environ. Sci., 13(1), 53-66. (In Persian)
15. Dobermann, A., and Fairhust, T. 2000. Rice. Nutrient disorders and nutrient management. Handbook Series, Potash & Phosphate Institute (PPI), Potash and Phosphate Institute of Canada (PPIC) and International Rice Research Institute (IRRI), 191 p.
16. Dobermann, A.C., Witt, D., Dawe, S., Adulrachman, H.C., Gines, R., Agarajan, S., Satawa Thananont, S., Son, T.T., Tan, P.S., Wang, G.H., Chien, N.V., Thoa, V.T.K., Phung, C.V., Stalin, P., Muthukrishnan, P., Rani, V., Babu, M., Chatuorn, S., Sook Thongsa, L., Sun, Q., Fu, R., Simbahun, J.C., and Adviento, M.A.A. 2002. Site-specific nutrient management for intensive rice cropping system in Asia. Field Crops Res., 74: 37-66.
17. Du, Y.H., Zhuang, Z.J., Zhang, C.Y., Xu, Z.W., and Chen, H.Y. 2011. A novel silicate-dissolving bacteria strain: Silicate-releasing capacity in soil and its agronomic implications in rice. International Conference on Silicon in Agriculture September 13-18, Beijing, China.
18. Fallah, A., Visperas, R.M., and Alejar, A.A. 2004. The interactive effect of silicon and nitrogen on growth and spikelet filling in rice (*Oryza sativa* L.). PHL. Agric. Sci., 87: 174-176.
19. Finger, R. 2013. More than the mean- a note on heterogeneity aspects in the assessment of water footprints. Ecolo. Indic., 29: 145-147.

20. Ghamarni, H., Farmanifard, M., and Sasani, S.H. 2012. The effects of supplementary irrigation on yield and water use efficiency of three new wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars. Water. Irrig. Manage., 2(2): 69-83. (In Persian)
21. Gheewala, S. H., Nilsalab, T., Mungkung, P., Perret, R., and Chaiyawannakarn, S.R. 2014. Water, 6, 1698-1718; doi:10.3390/w6061698.
22. Greger, M., Landberg, T., Vaculik, M., and Lux, A. 2011. Silicon influences nutrient status in plants. International Conference on silicon in Agriculture. Beijing, China September, 13(18): 56-57.
23. Hoekstra, A.Y., and Chapagain, A.K. 2007. Water footprint of nations: water use by people as a function of their consumption pattern. Water Resour. Manage., 21(1): 35-48.
24. Iriarte, A., Rieradevall, J., and Gabarrell, H. 2010. Life cycle assessment of sunflower and rapeseed as energy crops under Chilean condition. J. Clean. Prod., 18: 336-345.
25. Jafarzade, R., Jami Moeini, M., and Hokmabadi, M. 2013. Response of yield and yield components in wheat to soil and foliar application of nano-potassium fertilizer. Crop Manage. Res., 5(2): 189-197. (In Persian)
26. Jahanbin, Sh., Vafapour, M., Yadavi, A., and Behzadi, B. 2015. Assessment of growth and some characteristics of wheat cultivar of Alvand under deficit irrigation and foliar application of potassium dehydrogenate phosphate. J. Agric. Sci. Sustain. Prod., 25(3): 103-118. (In Persian)
27. Karimi, A., Meskarbashee, M., Nabipour, M., and Broomandnasab. S. 2011. The study of some quantity and quality characteristics of two wheat cultivars under different planting method and irrigation levels conditions. J. Agric. Sci. Sustain. Prod., 21(4): 95-104. (In Persian)
28. Karmollachaab, A., Bakhshandeh, A., Gharineh, M.H., Moradi Telavat, M.R., Fathi, G. 2015. Effect of silicon application on morpho-physiological characteristics, grain yield and nutrient content of bread wheat under water stress conditions. J. Crop Prod. Process., 4 (14):133-145. (In Persian)
29. Khoramivafa, M., Nouri, M., Mondani, F., and Veisi, H. 2017. Evaluation of virtual water, water productivity and ecological footprint in wheat and maize farms in west of Iran: A case study of Kouzaran region, Kermanshah Province. J. Water. Sustain. Dev., 3(2): 19-56. (In Persian)
30. Larki, S., Rahnama., and Aynehband, A. 2015. Effect of application of potassium fertilizers on physiological traits and cadmium accumulation in grain of two durum wheat (*Triticum turgidum* ssp. *durum* (Desf.) Husn.) Cultivars. Iran. J. Crop Sci., 17(3): 223 -235. (In Persian)
31. Liang, Y., Sun, W., and Zhu, Y.G. 2007. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: A review. Environ. Pollut., 147: 422-428.
32. Liang, Y.C. 2008. Effect of Si on growth and tolerance to stressful environments and plant diseases in higher plants including protein and oil bearing crops. Silicon in Agriculture Conference. Wild Coast Sun, South Africa, 26-31 October.
33. Ma, J.F., and Yamaji, N. 2006. Silicon uptake and accumulation in higher plants. Trends Plant Sci., 11: 392-397.
34. Maghsoudi, K., and Emamm, Y. 2016. Response of bread wheat cultivars to foliar application of silicon under post anthesis drought stress conditions. J. Crop Prod. Process, 6 (19):1-13. (In Persian)
35. Marschner, H. 2012. Marschners's mineral nutrition of higher plants. Academic, Londen.
36. Martre, P., Porter, J.R., Jamieson, P.D., and Triboi, E. 2003. Modeling grain nitrogen accumulation and protein composition to understand the sink/source regulations of nitrogen remobilization for wheat. Plant Physiol., 133: 1959-1967.
37. Mc Ginely, S. 2002. Irrigation efficiency for durum wheat. Agricultural experiment station research report. The University of Arizona College of Agricultural and Life Science. pp: 8-9.
38. Mekonnen, M.M., Hoekstra, A.R. 2010. The green, blue and grey footprint of crops and derived crop products, Volume 1: Main report, Value of Water Research Report Series No.47.

39. Montajabi, N. 2009. Effect of four irrigation management on yield and water use efficiency of wheat in Golpayegan. Second conference of drought impact and its managerial solutions. http://www.jkmt.ir/images/sub/Maghale/hkhEsf/Dem2-08-119.pdf. (In Persian)
40. Motomura, H., Mita, N., and Suzuki, M. 2002. Silica accumulation in long-lived leaves of *Sasaveitchii*. Ann. Bot., 90: 149-152.
41. Nolla, A., Faria, R.J., Korndorfer, G.H., and Silva, T.R.B. 2012. Effect of Slicon on drught tolerance of upland rice. J. Agric. Environ., (1): 269-267.
42. Onnabi Milani, A., and Zamani, S. 2014. Effect of irrigation scheduling methods on crop yield and water use efficiency of wheat (*Triticum aestivum*). Water Res. Agric., 28(3): 459-502.
43. Oweis, T., Hachum, A., and Kijne, J. 1999. Water harvesting and supplemental irrigation for improved water use efficiency in dry areas. SWIM. Paper No. 7.
44. Rebitzer, G., Ekvall, T., Frischknecht, R., Hunkeler, D., Norris, G., Rydberg, T., Schmidt, W., Suh, S., Weidema, B.P. and Pennington, D.W. 2004. Life cycle assessment. Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. Environ. Int., 30: 701-720.
45. Roy, P., Nei, D., Orikasa, T., Xu, Q., Okadome, H., Nakamura, N., and Shiina, T. 2009. A review of life cycle assessment (LCA) on some food products. J. Food Eng., 90: 1-10.
46. Salari, S., Karandish, F., and Darzi Naftchal, A. 2014. Spatial and temporal analyses of the wheat virtual water variations in Sistan and Blouchestan province. Iran. Irrig. Water Eng., 5(18): 81-94. (In Persian)
47. Samonte, S.O., Wilson, L.T., Medley, J.C., Pinson, S.R.M., McClung, A.M., and Lales, J.S. 2006. Nitrogen utilization efficiency: Relationships with grain yield, grain protein, and yield-related traits in rice. Agron. J., 98: 168-176.
48. Sara, T.A., and Raheem, H. 2011. Influence of exogenous silicon on germination indices of wheat (*Triticum aestivum* L.) under drought stress. International Conference on Silicon in Agriculture September 13-18, Beijing, China.
49. SimaPro. 2011. Software and database Mmanual. Pré Consultants BV, Amersfoort, the Netherlands.
50. Singh, S., and Jain, M.C. 2000. Growth and yield response of traditional tall and improved semi-tall rice cultivars to moderate and high nitrogen, phosphorus levels. India. J. Plant Physiol., 5: 38-46.
51. Smakthin, V., Revenga, C., and Doll, P. 2004. Taking into account environmental water requirements in Gglobal-scale water resources assessments. Comprehensive assessment of water management in agriculture, research report 2, IWMI, Colombo, Sri Lanka.
52. Sun, H.Y, Liu, C.M., Zhang, X.Y., Shen, Y.J., and Zhang, Y.Q. 2006. Effects of irrigation on water balance, yield and WUE of winter wheat in the North China Plain. Agr. Water Man., 85: 211-218.
53. Tanaka, A., and Park, Y.D. 1996. Significant of the absorption and distribution of silica in the growth of rice plants. Soil Sci. Plant Nutr., 12: 25-28.
54. Wang, D.J., and Du, F.B. 2011. Agronomic effects of silicon-potash fertilizer in wheat/maize and wheat/ soybean rotation system during 2008-2010. Proceedings of the 5th International Conference on Silicon in Agriculture. Beijing, China. 13-18 September 2011.
55. Wang, M., Wu, W, Liu, W., and Bao, Y. 2009. Life cycle assessment of the winter wheat-summer maize production system on the North China Plain. Int. J. Sustain. Dev. World Ecol., 14(4), 400-407.
56. Wang, M., Xia, X., Zhang, Q., and Liu, J. 2010. Life cycle assessment of a rice production system in Taihu region, China. Int. J. Sustain. Dev. World Ecol., 17(2): 157-161.
57. Yang, H., Reichert, P., Abbaspour, K., and Zehnder, A.J.B. 2003. A water resources threshold and its implications for food security. Environ. Sci. Technol., 37: 3048-3054.
58. Yimamu, F. 2008. Silicon status and its relationship with major physic-chemical properties of soils in the northern highlands of Ethiopia. Proceedings of the 4th International Conference on Silicon in

Agriculture. South Africa, 26-31 October 2008.
59. Zhang, X.Y., Chen, S.Y., Liu, M.Y., and Sun, H.Y. 2005. Improved water use efficiency associated with cultivars and agronomic management in the North China Plain. Agron. J., 97: 783-790.
60. Zhang, X.Y., Pei, D., Sun, H.Y., and Yang, Y.H. 2006. Performance of double-cropped winter wheat–summer maize under minimum irrigation in the north China Plain. Agron. J., 98: 1620-1626.