doi: 10.22124/cr.2021.18869.1650

(مقاله پژوهشی)

تحقیقات غلات

دوره دهم/ شماره چهارم/ زمستان ۱۳۹۹ (۳۳۸-۳۲۳)

کاربرد نانو و نیترات آهن در کشت مخلوط گندم و نخود: رهیافتی به سمت کشاورزی پایدار

لیلا سلیمانپور[۱]، سیدمحمدباقر حسینی[۲*]، لیلا مأمنی[۳] و مصطفی اویسی[۴]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۰۲

چکیده

نانوکودها با توجه به میزان اندک کود مصرفی و دقت در اختیارگیری گیاه به‌عنوان راهکاری برای کاهش نهاده‌ها و دستیابی به پایداری در تولید محصولات کشاورزی مطرح هستند. در این آزمایش، آثار کودهای نانو و نیترات آهن بر ویژگی‌های رشدی گندم در سامانه‌های مختلف کشت مخلوط گندم و نخود بررسی شد. آزمایش به‌صورت کرت‌های دوبار خردشده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در مزرعه تحقیقاتی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران در سال ۹۸-۱۳۹۷ انجام شد. کرت‌های اصلی شامل پنج الگوی کاشت (تک‌کشتی گندم، تک‌کشتی نخود و سه کشت مخلوط گندم: نخود با نسبت ۵۰:۵۰، ۵۰:۷۰ و ۵۰:۹۰)، کرت‌های فرعی شامل سه تیمار کودی (شاهد، نانوآهن و نیترات آهن) و کرت‌های فرعی‌فرعی شامل دو غلظت کود (۱۵۰۰ و ۷۵۰ میلی‌گرم بر لیتر) بود. نتایج نشان داد که کشت مخلوط ۵۰:۷۰ و غلظت ۷۵۰ نانوآهن بیش‌ترین کارآیی مصرف آهن در گندم را داشت و به‌طورکلی کارآیی مصرف آهن گندم در کشت مخلوط ۵۰:۷۰ نسبت به سایر الگوهای کشت بیش‌تر بود. در مقابل، بیش‌ترین کارآیی مصرف آهن نخود در کشت مخلوط ۹۰:۵۰ و غلظت ۷۵۰ نیترات آهن مشاهده شد. در همه تیمارهای الگوی کاشت، کارآیی مصرف کود توسط گندم و نخود در نانوآهن بیش‌تر از نیترات آهن بود. بیش‌ترین زیست‌توده و عملکرد دانه گندم در تیمارهای تک‌کشتی+نانوآهن (به‌ترتیب ۱۶۳۷۱ و ۵۰۴۲ کیلوگرم در هکتار) و تک‌کشتی+ نیترات آهن (به‌ترتیب ۱۶۰۶۲ و ۵۵۵۴ کیلوگرم در هکتار) و کم‌ترین زیست‌توده و عملکرد دانه آن (به‌ترتیب ۷۴۸۰ و ۲۴۵۴ کیلوگرم در هکتار) در کشت مخلوط ۹۰:۵۰ و نیترات آهن به‌دست آمد، اما بالاترین زیست‌توده و عملکرد دانه نخود در بیش‌تر موارد در غلظت ۷۵۰ مربوط به تیمار نیترات آهن و در غلظت ۱۵۰۰ مربوط به تیمار نانوآهن بود. نتایج این آزمایش نشان داد که در بیش‌تر تیمارهای الگوی کاشت و در تمام صفات مورد بررسی، غلظت ۷۵۰ میلی‌گرم بر لیتر نانوکود آهن مشابه یا حتی برتر از غلظت ۱۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر بود و در نتیجه می‌توان غلظت نانوکود کم‌تری را به‌کار برد و مصرف کود را کاهش داد.

واژه‌های کلیدی: پایداری، تنوع، ریزمغذی، نانوآهن، نیترات آهن

۱- دانشجوی دکتری، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده علوم و مهندسی کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۲- دانشیار، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده علوم و مهندسی کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۳- استادیار پژوهش، بخش نانوتکنولوژی، پژوهشگاه بیوتکنولوژی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

۴- دانشیار، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده علوم و مهندسی کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

* نویسنده مسئول: bhosseini@ut.ac.ir

مقدمه

آهن یکی از عناصر مهم در تغذیه گیاهان زراعی است. قابلیت دسترسی آهن در شکل نامحلول Fe^{+3}، آنرا تبدیل به یک عنصر کمیاب برای جذب گیاه می‌کند و باعث کاهش اسمیلاسیون و در نتیجه کاهش عملکرد گیاه زراعی می‌شود (Najafi Disfani *et al*., 2017; Al-Amri *et al*., 2020). بنابراین، بهبود تغذیه آهن در گیاه نه‌تنها برای افزایش تولید گیاه بلکه برای افزایش کیفیت آن نیز اهمیت بسیار دارد (Kopittke *et al*., 2019). افزایش در تولید بستگی زیادی به نوع کود مورد استفاده دارد. کودهای تولید شده با فناوری نانو در مقایسه با کودهای شیمیایی معمولی علاوه بر این که عناصر غذایی را به‌تدریج و کنترل شده در اختیار گیاه قرار می‌دهند، کارآیی کاربرد کودها را افزایش داده و آلودگی خاک و خطرات زیست‌محیطی کودهای شیمیایی معمولی را نیز کاهش می‌دهند (Pourjafar *et al*., 2016). نانوکودها می‌توانند حاوی عناصرمحرک رشد باشند که در پلیمرهای در ابعاد نانویی کپسوله شده‌اند و به همین دلیل یک انتشار آهسته، هدفمند و کارآمد دارند. این کودها جذب عناصر را سریع‌تر و عملکرد را افزایش می‌دهند (Rameshaiah *et al*., 2015). قابلیت محلول‌پاشی نانوآهن برای افزایش تغذیه گیاه در برخی مطالعات بررسی شده است (Delfani *et al*., 2014; Liu *et al*., 2016; Karny *et al*., 2018)، اما سودمندی نانوآهن زمانی که به صورت محلول‌پاشی استفاده می‌شود، هنوز به‌خوبی روشن نشده است (Kopittke *et al*., 2019). گزارش شده است که محلول‌پاشی نانوآهن موجب افزایش ارتفاع ساقه در ذرت (Whitty and Chambliss, 2005) و محلول‌پاشی نانواکسید آهن موجب افزایش عملکرد و میزان آهن در سویا شد (Sheykhbaglou *et al*., 2011). به هر حال، استفاده از نانو مواد آهن به‌عنوان کود و به‌ویژه در شرایط مزرعه هنوز نیاز به مطالعات بیش‌تری دارد. اگرچه تحقیقات زیادی در زمینه تولید نانوکودها صورت گرفته است، اما هنوز نیاز به ارائه فرمولاسیون‌های جدید و کارآمدتر نانویی و نیز بررسی نحوه و میزان دوز مؤثر نانوکودها کاملاً احساس می‌شود و توجه متحققین بسیاری را به‌خود جلب کرده است.

بازیابی تنوع در اکوسیستم‌های کشاورزی و مدیریت کارآمد آن یکی از راهکارهای مهم در کشاورزی پایدار است. کشت مخلوط به‌عنوان یک نمونه از سامانه‌های کشاورزی پایدار اهدافی مانند تعادل اکولوژیک، استفاده کارآمدتر از منابع و افزایش حاصل‌خیزی خاک را دنبال می‌کند (Dahmardeh and Hodiani, 2016). فرآیند تسهیل در کشت مخلوط ممکن است به‌طور مستقیم، یعنی از طریق تحریک میکروب‌های مفید خاک برای انتشار عناصر غذایی طی معدنی‌سازی ماده آلی، تحرک عناصر غذایی کم‌مصرف معدنی محلول یا انتقال عناصر غذایی از طریق شبکه‌های مایکوریزایی گونه‌های همراه باشد. امروزه گرایش به استفاده از سیستم‌های سازگار با محیط زیست مانند کشت مخلوط غلات-لگوم که دارای تنوع بیش‌تری هستند، جهت بازیابی موثر مواد غذایی و رسیدن به ثبات و پایداری افزایش یافته است (Bedoussac and Justes, 2011; Stoltz and Nadeau, 2014). برخی از پژوهشگران گزارش کرده‌اند که کشت مخلوط گندم و نخود موجب افزایش میزان جذب آهن نسبت به تک‌کشتی آن‌ها می‌شود (Li *et al*., 2004; Gunes *et al*., 2007; Soleimanpour *et al*., 2017). لگوم‌ها از طریق تغییر اسیدیته خاک بر جذب عناصر تأثیر می‌گذارند (Ariel *et al*., 2013). در مطالعه‌ای که بر روی کشت مخلوط ارزن مرواریدی و لوبیا چشم بلبلی انجام شد، مشخص شد که نانوآهن سبب افزایش صفات مرفولوژیک، زیست‌توده و عملکرد دانه گیاهان زراعی در مقایسه با کود آهن معمولی شد (Sabeki *et al*., 2017).

جذب عناصر غذایی می‌تواند بر عملکرد و اجزاء عملکرد گیاهان زراعی تأثیر زیادی داشته باشد و کمبود عناصر غذایی به ویژه عناصر کم مصرف نقش مهمی در تغذیه انسان دارد (Hosseinabadi *et al*., 2007). بیشتر مطالعات در کشت مخلوط بر روی عنصر نیتروژن صورت گرفته است و مطالعه بر آهن نسبتاً اندک است. اثرات کشت مخلوط بر جذب آهن به وسیله گیاهان زراعی و تجمع در دانه‌ها عمدتاً ناشناخته است (Xue *et al*., 2016). برتری کشت مخلوط در افزایش عملکرد گیاهان زراعی در مطالعات بسیاری گزارش شده است (Chapagain and Riseman 2014; Yu *et al*., 2015; Soleimanpour *et al*., 2016). با این وجود تا جایی که بررسی‌های ما نشان می‌دهد، تحقیقات بسیار کمی در زمینه کاربرد عناصرریزمغذی به‌ویژه آهن در کشت مخلوط و مطالعه آثار آنها بر اجزای کشت مخلوط صورت گرفته است. قاسمی فسایی و منصورپور (Ghasemi-Fasaei and Mansoorpoor, 2015) نیز اظهار داشتند که مطالعات در زمینه جذب عناصر غذایی ریزمغذی در کشت مخلوط بسیار اندک است. علاوه بر این، استفاده از نانوکودهای ریزمغذی نیز در کشت مخلوط زیاد مورد توجه قرار نگرفته است. با توجه به تاثیری که عناصر

ریزمغذی در رشد و نمو گیاهان زراعی دارند، می‌توانند روابط اجزای کشت مخلوط را تحت تاثیر قرار دهند. همچنین باید توجه داشت که برای کاهش آثار کمبود آهن در گیاهان زراعی استفاده از یک راهکار به‌تنهایی ممکن است راه‌گشا نباشد و در کشاورزی پایدار رویکردهای تلفیقی بسیار مورد توجه هستند. از این‌رو استفاده همزمان از محلول‌پاشی آهن و نیز کشت مخلوط گندم با نخود می‌تواند در کاهش پیامدهای ناشی از کمبود آهن سودمند باشد. کشت مخلوط گندم و نخود نمونه‌ای از نظام‌های پایدار کشاورزی است که می‌تواند موجب بهره‌برداری بیش‌تر از منابع شود و عملکرد کمی و کیفی محصولات زراعی را افزایش دهد (Lithourgidis *et al*., 2011).

با توجه به این امر در پژوهش حاضر سعی شد آثار منابع نانویی و غیرنانویی آهن بر ویژگی‌های رشدی گندم در سامانه‌های مختلف کشت مخلوط جایگزینی و افزایشی آن با نخود مورد بررسی قرار گیرد. به‌همین دلیل در این مقاله به سوالات زیر پاسخ داده خواهد شد: ۱- آیا نانوکود آهن تاثیر منفی بر رشد و عملکرد گندم و نخود دارد؟ ۲- کارآیی نانوکود آهن نسبت به نیترات آهن چگونه است؟ ۳- آیا الگوهای مختلف تک‌کشتی و کشت مخلوط گندم و نخود در استفاده گندم و نخود از نانوآهن اثرگذار است؟

مواد و روش‌ها

آزمایش در سال زراعی ۹۸-۹۷ در مزرعه تحقیقاتی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی کرج انجام شد. تیمارهای آزمایش شامل پنج تیمار الگوی کاشت (دو سطح کشت خالص گندم و نخود و سه سطح کشت مخلوط جایگزینی گندم:نخود ۵۰:۵۰، افزایشی گندم:نخود ۷۰:۵۰ و افزایشی گندم:نخود ۹۰:۵۰ با آرایش کاشت ۱:۱)، سه تیمار کودی (نانوآهن، نیترات آهن و شاهد بدون کود) و دو غلظت کود (۱۵۰۰ و ۷۵۰ میلی‌گرم بر لیتر) بود. آزمایش به‌صورت کرت‌های دوبار خرد شده (تیمارهای الگوی کشت در کرت‌های اصلی (۲۰m×۲m)، نوع کود در کرت‌های فرعی (۱۰m×۲m) و غلظت کود در کرت‌های فرعی فرعی (۲m×۲m)) با سه تکرار انجام شد. نانوآهن (حاوی ۲۰ درصد آهن- میانگین اندازه ذرات حدود ۶۷ نانومتر) از بخش نانوتکنولوژی پژوهشگاه بیوتکنولوژی کشاورزی و نیترات آهن خالص نیز از شرکت سیگما تهیه شد.

ارقام مورد استفاده برای گندم و نخود به‌ترتیب شامل ارقام سیوند و منصور بود. رقم سیوند یک رقم بهاره، زودرس، و مختص مناطق معتدل می‌باشد و از مزرعه تحقیقاتی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران تهیه شد. رقم منصور یک رقم دیم، پائیزه و مناسب مناطق معتدل و نیمه گرمسیری است و از مرکز تحقیقات کشاورزی کرمانشاه خریداری شد. برای اعمال تیمارهای کشت مخلوط افزایشی تراکم بذرها روی ردیف‌های کاشت افزایش یافت. عملیات آماده‌سازی زمین با استفاده از گاوآهن برگردان‌دار به‌منظور ذخیره بارش‌های پائیزه و کنترل علف‌های هرز مزرعه آزمایشی در پائیز ۱۳۹۷ انجام شد. کاشت در تاریخ ۲۰ اسفند ۱۳۹۷ انجام شد. تراکم بوته مورد استفاده برای تک‌کشتی گندم و نخود به ترتیب ۳۵۰ و ۴۰ بوته در متر مربع بود. فاصله بین ردیف‌ها ۲۵ سانتیمتر در نظر گرفته شد. آبیاری با استفاده از تیپ انجام شد و کود اوره به‌میزان ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار در مرحله رشد رویشی به کرت‌های آزمایشی (در هر دو گیاه گندم و نخود) اضافه شد. نتایج آزمون خاک و اطلاعات هواشناسی مزرعه آزمایشی به‌ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است. محلول‌پاشی عناصر کودی برای گندم و نخود توسط سمپاش برقی پالمیک مدل V16 ساخت کشور اسپانیا در مرحله آبستنی (Booting Stage) گندم انجام شد. برداشت نهایی گندم در زمان رسیدگی کامل در تیرماه در سطح یک متر مربع و برداشت نخود دو هفته پس از برداشت گندم انجام شد. نسبت برابری زمین (LER, Land Equivalent Ratio) و کارآیی مصرف کود (FUE, Fertilizer Use Efficiency) به‌ترتیب بر اساس روابط (۱) (Mazaheri *et al*., 2006) و (۲) (Gerdon *et al*., 1993) محاسبه شد:

$$LER = LER_i + LER_j = \frac{Y_{ij}}{Y_{ii}} + \frac{Y_{ji}}{Y_{jj}} \qquad (۱)$$

$$FUE = \frac{Y}{F} \qquad (۲)$$

در رابطه (۱)، Y_{ii} و Y_{jj} به‌ترتیب عملکرد گونه i و j در تک‌کشتی، Y_{ij} و Y_{ji} به‌ترتیب عملکرد گونه i و j در کشت مخلوط، LER_i و LER_j به‌ترتیب LER جزئی گونه i و j و Y و F به‌ترتیب عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار) و مقدار کود مصرف شده (کیلوگرم در هکتار) هر گونه است.

برای تجزیه داده‌ها، ابتدا نرمال‌بودن داده‌ها با آزمون شاپیرو ویلک بررسی و سپس تجزیه واریانس داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS v.9.1 و مقایسه میانگین‌ها با آزمون LSD محافظت‌شده در سطح احتمال پنج درصد انجام شد.

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه آزمایشی

Table 1. Soil physicochemical properties of the experimental field

Depth (cm)	EC (dS/m)	pH	Organic matter (%)	N (ppm)	Available K (ppm)	Available P (ppm)	Fe (mg/kg)
0-30	2.01	7.3	1.69	1.25	54.72	32.59	8.6

جدول ۱- ادامه

Table 1. Continued

Depth (cm)	Mn (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Texture
0-30	15.71	2.87	3.41	34.1	29.5	36.4	Silty clay loam

جدول ۲- مشخصات هواشناسی مکان اجرای آزمایش- کرج (۹۸-۱۳۹۷)

Table 2. Meteorological parameters of the experimental site, Karaj, Iran (2018-2019)

Parameter	January	February	March	April	May	June
Mean of Precipitation(mm)	2.68	0.95	1.38	2.68	0.41	0.1
Mean of Temperature(˚c)	4.22	5.6	7.4	12.06	16.88	24.56
Minimum RH(%)	45.85	41.5	34.66	40.74	25.58	17.94
Maximum RH(%)	82.35	79.37	74.55	83.23	69.42	58.35

نتایج و بحث

زیست‌توده گندم

زیست‌توده گندم تحت تاثیر برهمکنش سه گانه الگوی کاشت، غلظت و نوع کود آهن قرار نگرفت، ولی برهمکنش دوگانه الگوی کاشت و نوع کود تاثیر معنی‌داری بر زیست‌توده گندم داشت (جدول ۳). به طور کلی به علت سطح زیر کشت بیشتر گندم در تیمارهای تک‌کشتی، زیست‌توده بیشتری نیز در این تیمارها به دست آمد (شکل ۱). بیش‌ترین زیست‌توده گندم در تیمار تک‌کشتی و نانوآهن (۱۶۳۷۱ کیلوگرم در هکتار) و تک‌کشتی و نیترات آهن (۱۶۰۶۲ کیلوگرم در هکتار) مشاهده شد. در تیمارهای شاهد و نانوآهن پس از تیمار تک‌کشتی، کشت مخلوط ۵۰:۹۰ بیشترین زیست‌توده را تولید کرد و در تیمار نیترات آهن تیمار ۵۰:۷۰ بهتر از بقیه تیمارهای کشت مخلوط بود. در تمام الگوهای کشت تیمار نانوآهن زیست‌توده بیشتری نسبت به نیترات آهن داشت. در تیمار تک‌کشتی، محلول‌پاشی عناصر کودی به ویژه نانوآهن موجب افزایش زیست‌توده گندم (در تیمار ۵۰:۷۰ به میزان ۳۸/۷۴ درصد بیشتر از شاهد و در تیمار ۵۰:۹۰ به میزان ۳۶/۱۲ درصد بیشتر از شاهد) شد. با توجه به نقش مهم آهن به عنوان یکی از عناصر ریزمغذی مهم در تغذیه گیاهان زراعی، مشخص شده است که کمبود آهن موجب زرد شدن برگ و کاهش وزن خشک می‌شود (Mahmoudi *et al*., 2005). احتمالاً نانوآهن موجب کاهش آثار تنش و رقابت در گیاهان زراعی می‌شود بنابراین می‌تواند در افزایش رشد و نمو گیاهان زراعی نقش مناسبی ایفا کند. با توجه به این که آهن در زنجیره انتقال الکترون نقش دارد می‌تواند موجب افزایش فتوسنتز شود (Yadavalli *et al*., 2012)، البته مقادیر بیشتر از حد آن موجب ایجاد سمیت و تولید رادیکال‌های آزاد می‌شود (Kobayashi and Nishizawa, 2012). در آزمایشی بر گندم مشاهده شد که مصرف سولفات آهن به میزان ۷/۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک، عملکرد دانه گندم را به صورت معنی‌داری افزایش داد (Hemantaranjan and Grag, 2008).

عملکرد دانه گندم

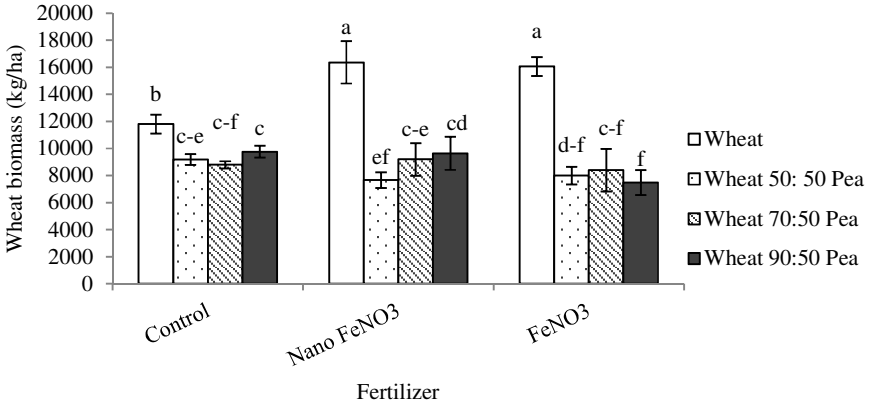
برهمکنش سه گانه الگوی کاشت، نوع و غلظت کود بر عملکرد دانه گندم معنی‌دار نبود، ولی برهمکنش الگوی کاشت و نوع کود آهن عملکرد دانه را به طور معنی‌داری تحت تاثیر قرار داد (جدول ۳). همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، به‌طور کلی عملکرد دانه گندم در تمام تیمارهای کودی در الگوی کاشت تک‌کشتی بیشتر از سایر تیمارهای کشت مخلوط بود که به‌علت کاهش سطح زیر کشت گندم در تیمارهای کشت مخلوط این امر بدیهی می‌باشد. در تیمار شاهد پس از تیمار تک‌کشتی، کشت مخلوط ۵۰:۹۰ بیش‌ترین عملکرد دانه (۲۱/۹۹ درصد و ۱۷/۳۶ درصد به‌ترتیب بیش‌تر از تیمارهای ۵۰:۷۰ و ۵۰:۵۰) را تولید کرد که به‌علت تراکم بیش‌تر گندم در این تیمار نسبت به دیگر تیمارهای کشت مخلوط است. در تیمار نانوآهن تیمارهای کشت مخلوط ۵۰:۷۰ و ۵۰:۹۰ بیش‌ترین عملکرد دانه را داشتند که تفاوت معنی‌داری بین آنها

مشاهده نشد. بنابراین با استفاده از نانوکود آهن می‌توان میزان تراکم گندم را در کشت مخلوط افزایش داد و عملکرد دانه بیش‌تری به‌دست آورد. در این آزمایش نانوآهن موجب حفظ تعادل در رشد رویشی و عملکرد دانه گندم شد. محققان اظهار داشتند که نانواکسید آهن نسبت به اکسید آهن معمولی موجب افزایش وزن دانه و عملکرد دانه گندم شد (Mazaherinia *et al*., 2010) و چون یکی از مزایای کشت مخلوط نیز استفاده بهینه از منابع غذایی و نور است، بنابراین می‌توان با استفاده از نانوکود در کشت‌های مخلوط مختلف نتایج بهتری به‌دست آورد. پس از تیمار تک‌کشتی، در تیمارهای نیترات و نانوآهن الگوی کشت ۵۰:۷۰ عملکرد دانه بیش‌تری داشت، اگرچه این تفاوت معنی‌دار نبود. در تیمار تک‌کشتی گندم، محلول‌پاشی نانوآهن و نیترات آهن عملکرد دانه را افزایش داد. این امر نشان‌دهنده اثر مثبت تیمار آهن بر گندم است. آهن یکی از عناصر ریزمغذی مهم برای گیاهان است (Ksouri *et al*., 2007). گزارش شده است که محلول‌پاشی آهن موجب افزایش عملکرد دانه گندم می‌شود (Bansal *et al*., 1990) که احتمالاً به‌علت افزایش میزان نشاسته و پروتئین در دانه گندم است (Brown *et al*, 1993; Seilsepour, 2007).

جدول ۳- تجزیه واریانس اثر تیمارهای آزمایش بر صفات گندم و نخود

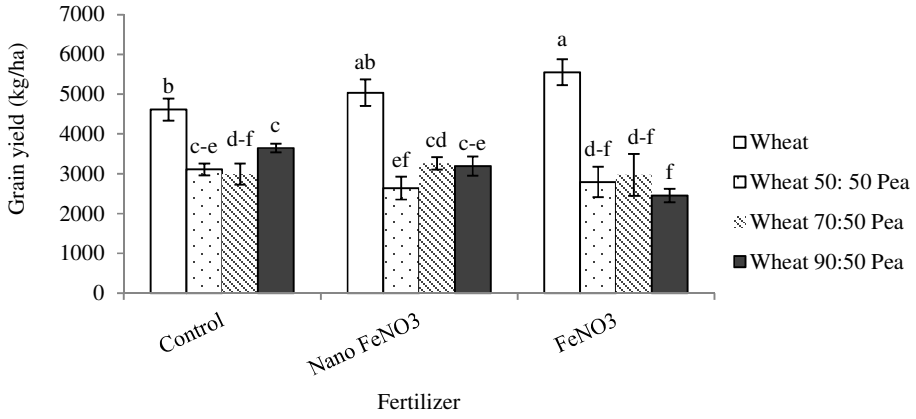
Table 3. Analysis of variance of the effect of experimental treatments on wheat and pea traits

Source of variations	df	Mean squares (the numbers in parentheses are significant levels)					
		Wheat biomass	Wheat grain yield	Wheat harvest index	Pea biomass	Pea grain yield	Pea harvest index
Replication	2	14916325 (0.039)	755017 (0.189)	12.9 (0.281)	3472365 (0.06)	155973 (0.367)	15.01 (0.418)
Planting pattern (P)	3	196572100 (0.000)	24846485 (0.000)	29.74 (0.083)	50372683 (0.000)	5709046 (0.000)	69.83 (0.051)
Error	6	2562922	339484	8.15	744998	131238	14.83
Fertilizer (F)	2	3504866 (0.169)	91562 (0.342)	32.86 (0.001)	800768 (0.238)	10209 (0.212)	131.33 (0.000)
P × F	6	11966674 (0.000)	1089294 (0.003)	28.47 (0.000)	3519045 (0.000)	175343 (0.005)	138.46 (0.000)
Error	24	1919001	267206	4.51	531396	47998	7.78
Concentration (C)	1	73427 (0.3167)	186626 (0.885)	1.04 (0.229)	92349 (0.143)	770380 (0.002)	254.93 (0.000)
P × C	3	4259508 (0.366)	349717 (0.196)	7.61 (0.192)	1075147 (0.195)	282429 (0.012)	220.42 (0.000)
F × C	2	283039 (0.726)	479825 (0.099)	47.97 (0.000)	1157394 (0.169)	1853766 (0.000)	585.26 (0.000)
P × F × C	6	3208762 (0.824)	281649 (0.258)	32.32 (0.000)	2488771 (0.002)	416660 (0.000)	155.87 (0.000)
Error	32	3896557	210849	4.55	677276	65745	19.22
CV		19.28	13.05	6.20	20.36	20.72	13.39



شکل ۱- برهمکنش الگوی کاشت و نوع کود بر زیست‌توده گندم. میله‌های عمودی خطای استاندارد هستند.

Figure 1. Planting pattern × fertilizer type interaction on wheat biomass. The vertical bars indicate the standard error.



شکل ۲- برهمکنش الگوی کاشت و نوع کود بر عملکرد دانه گندم. میله‌های عمودی خطای استاندارد هستند.
Figure 2. Planting pattern × fertilizer type interaction on wheat grain yield. The vertical bars indicate the standard error.

شاخص برداشت گندم

شاخص برداشت تابعی از عملکرد اقتصادی و عملکرد بیولوژیک گیاه زراعی است و از تقسیم عملکرد اقتصادی بر عملکرد زیستی به‌دست می‌آید. بنابراین تغییرات این دو عامل در میزان شاخص برداشت نقش مهمی دارد. برهمکنش سه گانه الگوی کاشت، نوع و غلظت کود بر شاخص برداشت گندم معنی‌دار بود (جدول ۳). در تیمارهای تک‌کشتی نانوآهن در غلظت ۷۵۰ میلی‌گرم بر لیتر شاخص برداشت بیش‌تری داشت و با افزایش غلظت میزان شاخص برداشت کاهش یافت، اما در مورد نیترات آهن این روند بر عکس بود (شکل ۳). در این الگوی کاشت، بیش‌ترین شاخص برداشت در تیمار شاهد به‌دست آمد. در کشت مخلوط ۵۰:۵۰ در تیمار نیترات آهن با افزایش غلظت شاخص برداشت افزایش یافت، اما در نانوکود آهن روند کاهشی بود. در کشت مخلوط ۵۰:۷۰ تیمار نانوآهن در غلظت ۷۵۰ شاخص برداشت بیش‌تری نسبت به غلظت ۱۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر تولید کرد و در نیترات آهن غلظت ۱۵۰۰ میزان بیش‌تری داشت. در هر دو الگوی کاشت ۵۰:۵۰ و ۵۰:۷۰ و در هر دو غلظت ۷۵۰ و ۱۵۰۰ بیش‌ترین شاخص برداشت به‌ترتیب در تیمارهای نانوآهن و نیترات آهن به‌دست آمد. در کشت مخلوط ۵۰:۹۰ در تیمار نیترات آهن، شاخص برداشت با افزایش غلظت کاهش یافت، اما در تیمار نانوآهن این موضوع برعکس بود و غلظت ۱۵۰۰ شاخص برداشت بیش‌تری داشت. در این الگوی کاشت نیز همانند تک‌کشتی گندم در هر دو غلظت ۷۵۰ و ۱۵۰۰ بیش‌ترین شاخص برداشت مربوط به تیمار شاهد بود.

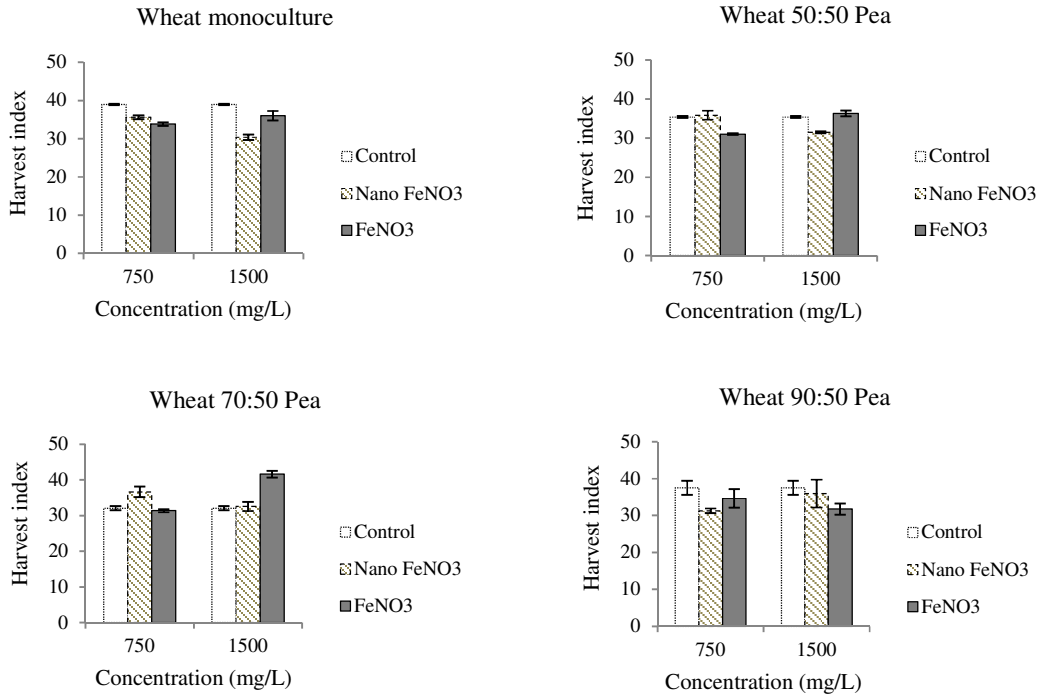
شاید کودها موجب افزایش رقابت درون گونه‌ای گندم در کشت مخلوط ۵۰:۹۰ و تک‌کشتی شده و با کاهش عملکرد دانه نسبت به زیست‌توده موجب کاهش شاخص برداشت گندم در این تیمارها می‌شوند. در غلظت ۷۵۰ در تیمار نانوآهن بیش‌ترین شاخص برداشت در الگوی کشت ۵۰:۷۰ و در غلظت ۱۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر در کشت مخلوط ۵۰:۹۰ مشاهده شد. با افزایش غلظت نانوآهن می‌توان به‌علت تغذیه بهتر گیاهان زراعی تراکم در واحد سطح را افزایش داده و از کشت مخلوط افزایشی برای افزایش شاخص برداشت استفاده کرد. بهترین الگوهای کشت در تیمار نیترات آهن در غلظت‌های ۷۵۰ و ۱۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر به‌ترتیب کشت مخلوط ۵۰:۹۰ و ۵۰:۷۰ بودند. احتمالاً به علت این‌که با افزایش غلظت نیترات آهن رقابت افزایش می‌یابد. بنابراین برای افزایش شاخص برداشت گندم باید سهم گندم در کشت مخلوط را تا حدودی کاهش داد. در تیمارهای تک‌کشتی و کشت مخلوط ۵۰:۵۰ و ۵۰:۷۰ در غلظت ۷۵۰ میلی‌گرم بر لیتر نانوآهن شاخص برداشت بیش‌تری نسبت به نیترات آهن داشت و در غلظت ۱۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر نیترات آهن بهتر عمل کرد، اما در کشت مخلوط ۵۰:۹۰ عکس این موضوع مشاهده شد. ممکن است به‌دلیل دسترسی آهسته ولی مداوم عناصر غذایی در نانوآهن، افزایش غلظت آن موجب افزایش بیش‌تر زیست‌توده گندم نسبت به عملکرد دانه آن شود و در نتیجه شاخص برداشت کاهش می‌یابد. در تیمار شاهد بیش‌ترین شاخص برداشت در تک‌کشتی گندم به‌دست آمد و پس از آن کشت مخلوط ۵۰:۹۰ بیش‌ترین شاخص برداشت را به

خود اختصاص داد. این موضوع نشان می‌دهد که افزایش رقابت درون‌گونه‌ای موجب می‌شود گندم بخش بیش‌تری از مواد فتوسنتزی خود را به دانه تخصیص دهد. در غلظت‌های ۷۵۰ و ۱۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر تیمار نانوآهن بیش‌ترین شاخص برداشت به‌ترتیب در کشت مخلوط ۵۰:۷۰ (۳۶/۶۴) و ۵۰:۹۰ (۳۵/۹۳) به‌دست آمد و بر عکس، بیش‌ترین شاخص برداشت در غلظت‌های ۷۵۰ و ۱۵۰۰ تیمار نیترات آهن به‌ترتیب مربوط به تیمارهای کشت مخلوط ۵۰:۹۰ (۳۴/۶) و ۵۰:۷۰ (۴۱/۶۲) بود. این نتایج حاکی از آن است که با افزایش غلظت نانوآهن می‌توان تراکم گندم را در کشت مخلوط افزایش داد، ولی با افزایش غلظت نیترات آهن تراکم گندم در کشت مخلوط با نخود باید کاهش یابد. نانوکودها فراهمی عناصر غذایی کم‌مصرف را برای گیاهان زراعی حتی در بدترین شرایط افزایش می‌دهند (Liu and Lal, 2015) و عملکرد گیاه را بیش‌تر از کودهای معمولی افزایش می‌دهند (Delfani *et al*., 2014). همچنین، مشخص شده است که نانوآهن موجب افزایش عملکرد دانه و شاخص برداشت گندم می‌شود (Harsinia *et al*., 2014).

زیست‌توده نخود

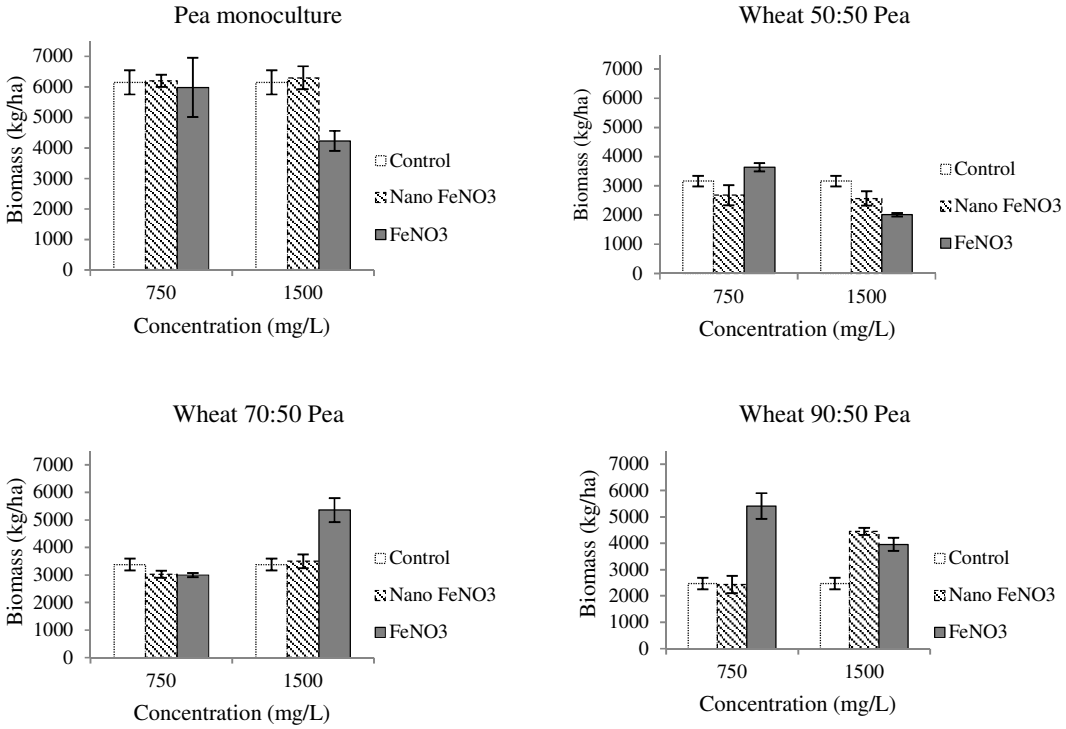
برهمکنش سه گانه الگوی کاشت، نوع و غلظت کود بر زیست‌توده نخود معنی‌دار بود (جدول ۳). در تک‌کشتی‌ها افزایش غلظت نانوآهن موجب افزایش زیست‌توده نخود شد، ولی در تیمار نیترات آهن غلظت ۷۵۰ میلی‌گرم بر لیتر زیست‌توده بیش‌تری نسبت به غلظت ۱۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر داشت (شکل ۴). بیش‌ترین زیست‌توده را تیمار نانوآهن در هر دو غلظت ۷۵۰ و ۱۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر (به‌ترتیب با ۳/۶ و ۴۸/۹ درصد افزایش نسبت به غلظت‌های ۷۵۰ و ۱۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر نیترات آهن) به‌خود اختصاص داد. در کشت مخلوط ۵۰:۵۰ افزایش غلظت نیترات آهن موجب کاهش زیست‌توده نخود شد، ولی تفاوت معنی‌داری بین دو غلظت نانوآهن مشاهده نشد. بیش‌ترین زیست‌توده نخود در غلظت ۷۵۰ میلی‌گرم بر لیتر در تیمار نیترات آهن و در غلظت ۱۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر در تیمار شاهد مشاهده شد. در مقابل، در کشت مخلوط ۵۰:۷۰ افزایش غلظت هر دو تیمار نانوآهن و نیترات آهن موجب افزایش زیست‌توده نخود شد و بیش‌ترین زیست‌توده نخود در غلظت‌های ۷۵۰ و ۱۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر به‌ترتیب در تیمارهای شاهد و نیترات آهن مشاهده شد. در کشت مخلوط ۵۰:۹۰ نیز افزایش غلظت نانوآهن موجب افزایش زیست‌توده و افزایش غلظت نیترات آهن موجب کاهش معنی‌دار زیست‌توده نخود شد. در این شرایط، تیمار نیترات آهن در غلظت ۷۵۰ و تیمار نانوآهن در غلظت ۱۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر بیش‌ترین زیست‌توده را به خود اختصاص دادند. در کشت مخلوط ۵۰:۵۰ به‌علت فضای بیش‌تری که در اختیار گندم است و در تیمار ۵۰:۹۰ به‌دلیل تراکم بسیار بیش‌تر گندم در مقایسه با نخود، رقابت بین گونه‌ای بیش‌تری وجود دارد و بنابراین افزایش غلظت نیترات آهن باعث تشدید رقابت شده و زیست‌توده نخود را کاهش می‌دهد. کاهش زیست‌توده نیز به‌نوبه خود می‌تواند موجب کاهش عملکرد دانه شود. نانوآهن به‌علت انتشار آهسته‌تر نقشی در افزایش تنش رقابتی نداشت.

در تیمار شاهد، بیش‌ترین زیست‌توده پس از تیمار تک‌کشتی در کشت مخلوط ۵۰:۷۰ (به‌ترتیب ۶/۹ و ۳۶/۷ درصد افزایش نسبت به تیمارهای کشت مخلوط ۵۰:۵۰ و ۹۰:۵۰) به‌دست آمد و در سایر تیمارهای کودی در بسیاری از موارد بیش‌ترین زیست‌توده را کشت مخلوط ۵۰:۷۰ به‌خود اختصاص داد. نخود برای افزایش قدرت رقابت خود با گندم، رشد رویشی خود را در این تیمار افزایش می‌دهد و در این تیمار ظاهراً رقابت درون گونه‌ای و بین گونه‌ای متعادلی وجود دارد. چپاگین و رایسمن (Chapagain and Riseman, 2014) اظهار داشتند که افزایش رقابت بین گونه‌ای موجب افزایش رشد رویشی به منظور کاهش و حذف اثر رقابت دانستند. لیتورجیدیس و همکاران (Lithourgidis *et al*., 2011) گزارش کردند که کشت مخلوط گندم و نخود می‌تواند بهره‌وری بیش‌تری از منابع داشته باشد و یک تعادل اکولوژیک مناسب ایجاد کند و در نتیجه عملکرد گیاهان زراعی را افزایش دهد.



شکل ۳- برهمکنش الگوی کاشت، نوع و غلظت کود بر شاخص برداشت گندم. میله‌های عمودی خطای استاندارد را نشان می‌دهند.

Figure 3. Interaction of planting pattern, type and concentration of fertilizer on wheat harvest index. The vertical bars indicate the standard error.



شکل ۴ – برهمکنش الگوی کاشت، نوع و غلظت کود بر زیست‌توده نخود. میله‌های عمودی خطای استاندارد را نشان می‌دهند.

Figure 4. Interaction of planting pattern, type and concentration of fertilizer on pea biomass. The vertical bars indicate the standard error.

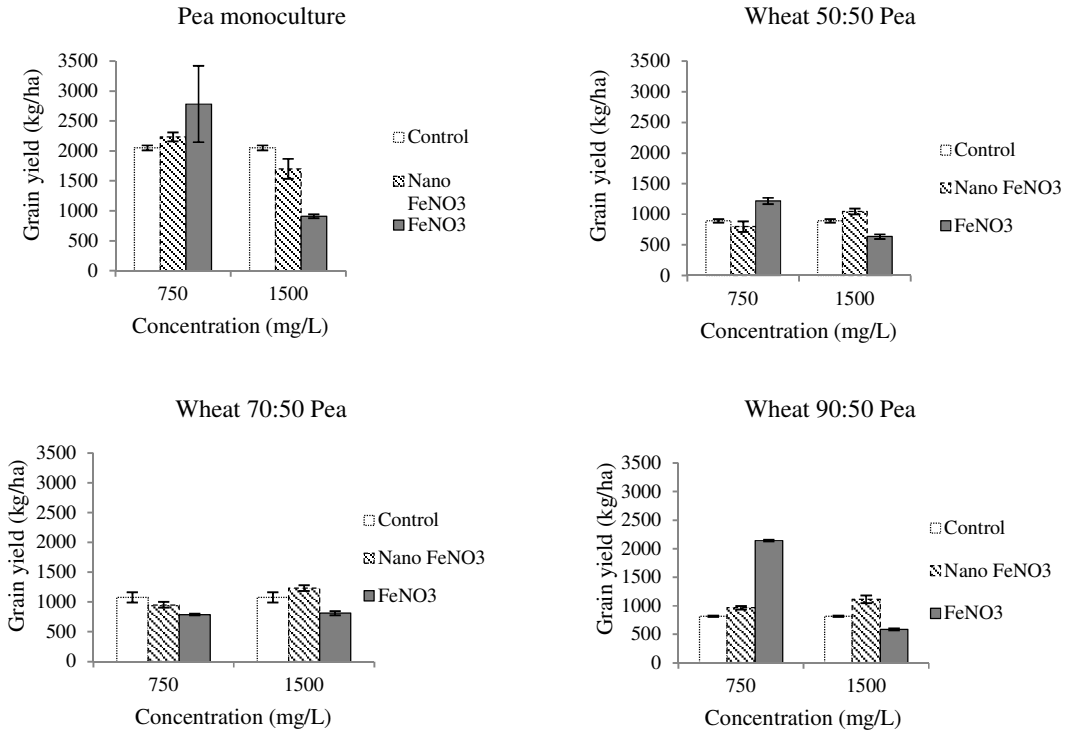
عملکرد دانه نخود

عملکرد دانه نخود تحت تاثیر برهمکنش سه گانه الگوی کاشت، نوع و غلظت کود قرار گرفت (جدول ۳). با توجه به شکل ۵ عملکرد دانه نخود در تک‌کشتی‌ها با افزایش غلظت نانوآهن و نیترات آهن کاهش یافت. در غلظت‌های ۷۵۰ و ۱۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر بیش‌ترین عملکرد دانه در تیمارهای نیترات آهن و شاهد به‌دست آمد. احتمالاً در غلظت ۱۵۰۰ چون کودها موجب افزایش رشد گیاه زراعی و در نتیجه افزایش رقابت می‌شوند، تیمار شاهد عملکرد دانه بیش‌تری تولید کرده است. در کشت مخلوط ۵۰:۵۰ افزایش غلظت نانوآهن میزان عملکرد دانه را افزایش داد، ولی در نیترات آهن روند عکس بود. بیش‌ترین عملکرد دانه در تیمار نیترات آهن در غلظت ۷۵۰ و در تیمار نانوآهن در غلظت ۱۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر به‌دست آمد. عملکرد دانه نخود در کشت مخلوط ۵۰:۷۰ با افزایش غلظت نانوآهن یافت، ولی تفاوت زیادی بین غلظت‌های نیترات آهن وجود نداشت. در غلظت‌های ۷۵۰ و ۱۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر بیش‌ترین عملکرد دانه نخود به‌ترتیب در تیمارهای شاهد و نانوآهن به‌دست آمد. در کشت مخلوط ۵۰:۹۰ افزایش غلظت نانوآهن موجب افزایش عملکرد دانه نخود شد، ولی در مورد نیترات آهن عکس این روند مشاهده شد.

افزایش غلظت کود موجب افزایش رشد اجزاء کشت مخلوط می‌شود و با توجه به این که گندم رقابت‌گر قوی‌تری نسبت به نخود است (Lithourgidis *et al*., 2011) انتظار می‌رود که افزایش غلظت کودها میزان عملکرد دانه نخود را کاهش دهد، در صورتی که عکس این موضوع در مورد نانوآهن مشاهده می‌شود. در غلظت ۷۵۰ میلی‌گرم بر لیتر بیش‌ترین عملکرد دانه مربوط به نیترات آهن بود و در غلظت ۱۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر تیمار نانوآهن بیش‌ترین عملکرد دانه را به‌خود اختصاص داد. نانوآهن موجب شده است که نخود با تنش رقابت درون گونه‌ای و برون گونه‌ای کم‌تری رو به رو شود و در نتیجه عملکرد آن افزایش یابد. گزارش شده است که کاربرد نانوآهن به‌صورت محلول‌پاشی موجب افزایش عملکرد می‌شود (Khalaj *et al*., 2009). میزان مورد نیاز و سمیت عناصر ریز مغذی به هم نزدیک است و بنابراین ممکن است در یک غلظت خاصی آثار سمی بر گیاه زراعی داشته باشند. راهکاری که برای حل این معضل در نظر گرفته شده است، استفاده از کودهای نانو می‌باشد (Naderi *et al*., 2013). در اکثر تیمارهای کودی، بیش‌ترین عملکرد دانه پس از تیمارهای تک‌کشتی در کشت مخلوط ۵۰:۷۰ مشاهده شد. برای نمونه در تیمار شاهد، عملکرد دانه نخود در کشت مخلوط ۵۰:۷۰ نسبت به تیمارهای ۵۰:۵۰ و ۹۰:۵۰ به‌ترتیب ۲۰/۸ و ۳۲/۵ درصد بیش‌تر بود. احتمالاً در این تیمار نخود در رقابت با گندم رشد رویشی خود را افزایش داده و بخش بیش‌تری از منابع خود را به عملکرد دانه اختصاص داده تا قدرت بقای خود را افزایش دهد. غالی و همکاران (Ghaley *et al*., 2005) بیان داشتند که کشت مخلوط دارای راهکار خودتنظیمی است و نخودفرنگی توانست در مخلوط با گندم قدرت رقابتی خود را افزایش دهد، در حالی‌که برای گندم این چنین نبود. می و همکاران (Mei *et al*. 2012) نیز گزارش کردند که عملکرد دانه باقلا در کشت مخلوط با ذرت، ۱۹۷-۳۰ درصد نسبت به تک‌کشتی آن افزایش یافت.

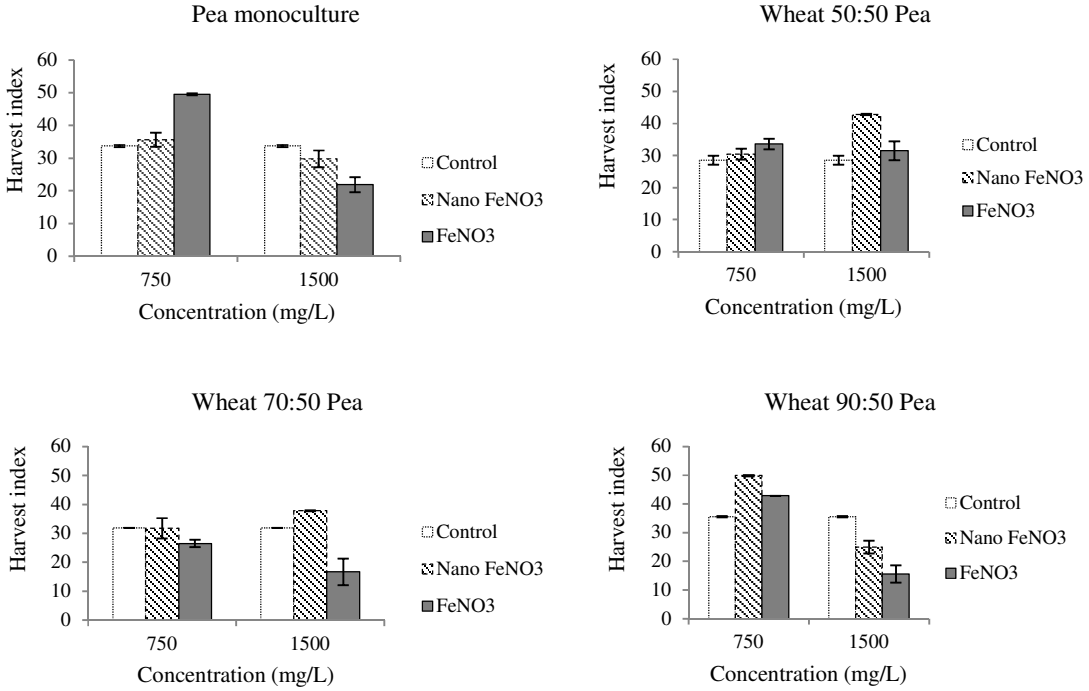
شاخص برداشت نخود

برهمکنش سه گانه الگوی کاشت، نوع و غلظت کود تاثیر معنی‌داری بر شاخص برداشت نخود نشان داد (جدول ۳). شاخص برداشت نخود در تیمارهای تک‌کشتی با افزایش غلظت نانوآهن و نیترات آهن کاهش یافت (شکل ۶). در غلظت ۷۵۰ میلی‌گرم بر لیتر بیش‌ترین شاخص برداشت در تیمار نیترات آهن و در غلظت ۱۵۰۰ در تیمار شاهد به‌دست آمد. با توجه به این که افزایش غلظت تیمارهای نانوآهن و نیترات آهن زیست‌توده نخود را بیش‌تر از عملکرد دانه آن افزایش دادند، موجب کاهش شاخص برداشت نخود شدند. در کشت مخلوط ۵۰:۵۰ افزایش غلظت نانوآهن موجب افزایش شاخص برداشت نخود شد و بین غلظت‌های نیترات آهن تفاوت معنی‌داری وجود نداشت. در غلظت ۷۵۰ و ۱۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر به‌ترتیب نیترات آهن و نانوآهن بیش‌ترین شاخص برداشت را به خود اختصاص دادند. در کشت مخلوط ۵۰:۷۰ افزایش غلظت نانوآهن موجب افزایش شاخص برداشت شد، ولی در مورد نیترات آهن روند عکس بود. به‌طور کلی در این الگوی کاشت شاخص برداشت در هر دو غلظت در نیترات آهن کم‌تر از نانوآهن بود. همانند تک‌کشتی، در کشت مخلوط ۵۰:۹۰ نیز افزایش غلظت نانوآهن و نیترات آهن موجب کاهش شدید در شاخص برداشت شد. به‌نظر می‌رسد که افزایش غلظت نانوآهن و نیترات آهن در این دو الگوی کاشت، عملکرد دانه نخود را نسبت به زیست‌توده آن بیش‌تر کاهش می‌دهد.



شکل ۵- برهمکنش الگوی کاشت، نوع و غلظت کود بر عملکرد دانه نخود. میله‌های عمودی خطای استاندارد را نشان می‌دهند.

Figure 5. Interaction of planting pattern, type and concentration of fertilizer on pea grain yield. The vertical bars indicate the standard error.



شکل ۶- برهمکنش الگوی کاشت، نوع و غلظت کود بر شاخص برداشت نخود. میله‌های عمودی خطای استاندارد را نشان می‌دهند.

Figure 6. Interaction of planting pattern, type and concentration of fertilizer on pea harvest index. The vertical bars indicate the standard error.

بالاترین شاخص برداشت در غلظت‌های ۷۵۰ و ۱۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر مربوط به تیمارهای نانوآهن و شاهد بود. در تیمار شاهد بیش‌ترین شاخص برداشت نخود مربوط به کشت مخلوط ۵۰:۹۰ بود. در سایر تیمارهای کودی نیز تیمارهای کشت مخلوط شاخص برداشت بیش‌تری نسبت به تیمار تک‌کشتی داشتند. این موضوع نشان می‌دهد که همیشه رقابت به ضرر گیاهان زراعی نیست و رقابت تا حدی موجب افزایش رشد و عملکرد گیاه زراعی می‌شود. گزارش شده است که افزایش رقابت بین‌گونه‌ای می‌تواند موجب افزایش رشد رویشی در کشت مخلوط گندم و نخود شود (Chapagain and Riseman, 2014).

کارآیی مصرف آهن

نتایج نشان داد که در تمامی الگوهای کاشت در بیش‌تر موارد تیمار نانوآهن بالاترین کارآیی مصرف آهن را داشت، به‌ویژه در تیمارهای کشت مخلوط که اختلاف بین نانوآهن و نیترات آهن مشهودتر بود (جدول‌های ۴ و ۵). همچنین، کارآیی مصرف آهن در غلظت ۷۵۰ میلی‌گرم بر لیتر بیش‌تر از ۱۵۰۰ بود. بنابراین، در غلظت ۷۵۰ میلی‌گرم بر لیتر با مصرف کود کم‌تر می‌توان کارآیی بیش‌تری به‌دست آورد. افزایش غلظت می‌تواند موجب افزایش رقابت یا سمیت در گیاهان زراعی شود و کارآیی مصرف کود را کاهش دهد. کشت مخلوط ۵۰:۷۰ بیش‌ترین کارآیی مصرف آهن را در گندم نسبت به سایر الگوهای کاشت در هر دو منبع کودی (به‌جز غلظت ۱۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر نیترات آهن) داشت. در مورد نخود نیز در بیش‌تر موارد تیمارهای کشت مخلوط موجب افزایش کارآیی مصرف کود آهن نسبت به تک‌کشتی شدند. گزارش شده است که کشت مخلوط گیاهان تک‌لپه‌ای و دولپه‌ای می‌تواند موجب کاهش آثار کمبود آهن در گیاهان زراعی شود (Zuo and Zhang, 2009; Cañasveras *et al*., 2014).

نسبت برابری زمین (LER)

در تمام الگوهای کشت و در هر دو غلظت ۷۵۰ و ۱۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، نانوآهن بیش‌ترین نسبت برابری زمین را داشت (شکل ۷). در کشت‌های مخلوط ۵۰:۵۰ و ۵۰:۷۰ تیمارهای نانوآهن و نیترات آهن در غلظت ۱۵۰۰ نسبت برابری زمین بیش‌تری نسبت به غلظت ۷۵۰ داشتند، ولی در تیمار ۵۰:۹۰ عکس این موضوع مشاهده شد. احتمالاً زمانی که تراکم گیاهان زراعی در واحد سطح افزایش می‌یابد، افزایش غلظت کودها موجب افزایش رقابت می‌شود. به‌طور کلی، نسبت برابری زمین در بیش‌تر تیمارهای کشت مخلوط، بیش‌تر از یک بود که نشان‌دهنده برتری آن‌ها نسبت به تیمارهای تک‌کشتی بود. در بسیاری از موارد تیمار ۵۰:۹۰ بیش‌ترین نسبت برابری زمین را داشت. گزارش شده است که کشت مخلوط غلات با لگوم می‌تواند باعث افزایش عملکرد در واحد سطح غلات و در نتیجه افزایش کارآیی استفاده از زمین شود (Soleimanpour *et al*., 2016). در آزمایشی نسبت برابری زمین در تیمارهای کشت مخلوط جو-نخود نسبت به تیمارهای تک‌کشتی ۳۲ درصد بیش‌تر بود (Chapagain and Riseman, 2014). کشت مخلوط عملکرد بیش‌تری در واحد سطح نسبت به تک‌کشتی تولید می‌کند که به‌دلایل مختلفی مانند استفاده بهتر از مواد غذایی، نور و آب است (Barker and Dennett, 2013).

جدول ۴- کارآیی مصرف آهن گندم

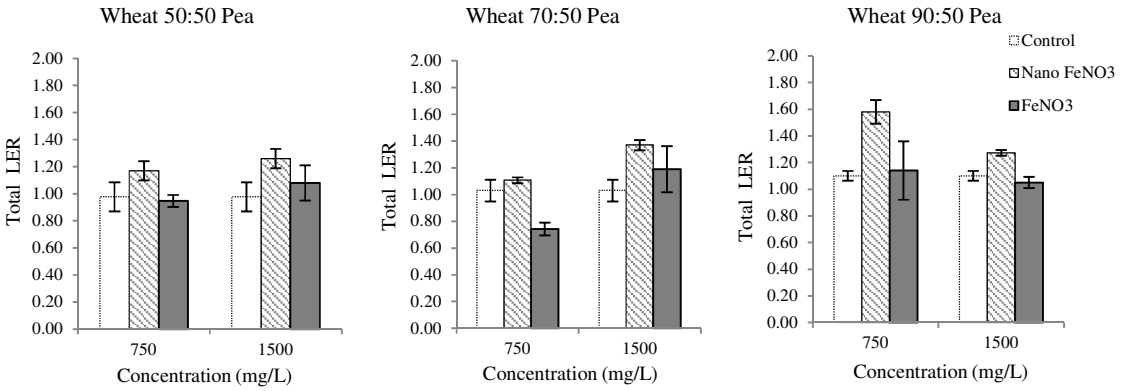
Table 4. Iron use efficiency of wheat

Planting pattern	Iron source	Applied iron concentration (mg/L)	Iron use efficiency
Wheat monoculture	Iron nano fertilizer	1500	531
		750	955
	Iron nitrate	1500	426
		750	926
Wheat 50:50 pea intercropping	Iron nano fertilizer	1500	470
		750	1172
	Iron nitrate	1500	462
		750	866
Wheat 70:50 pea intercropping	Iron nano fertilizer	1500	657
		750	1295
	Iron nitrate	1500	566
		750	771
Wheat 90:50 pea intercropping	Iron nano fertilizer	1500	640
		750	1275
	Iron nitrate	1500	372
		750	827
LSD			17.74

جدول ۵- کارآیی مصرف آهن نخود

Table 5. Iron use efficiency of pea

Planting pattern	Iron source	Applied iron concentration (mg/L)	Iron use efficiency
Pea monoculture	Iron nano fertilizer	1500	170
		750	447
	Iron nitrate	1500	73
		750	445
Wheat 50:50 pea intercropping	Iron nano fertilizer	1500	209
		750	319
	Iron nitrate	1500	102
		750	390
Wheat 70:50 pea intercropping	Iron nano fertilizer	1500	247
		750	381
	Iron nitrate	1500	130
		750	253
Wheat 90:50 pea intercropping	Iron nano fertilizer	1500	223
		750	386
	Iron nitrate	1500	94
		750	685
LSD			15.33



شکل ۷- نسبت برابری زمین در تیمارهای مختلف کشت مخلوط میله‌های روی ستون‌ها نشان‌دهنده خطای استاندارد هستند.

Figure 7- Land equivalent ratio of different intercropping treatments The bars on the columns indicate the standard error.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج این آزمایش نشان داد که نانوکود آهن نه‌تنها تاثیر منفی بر رشد و عملکرد گندم و نخود نداشت، بلکه موجب افزایش زیست‌توده، عملکرد و شاخص برداشت دو گیاه نیز شد. همچنین، در بیش‌تر موارد نانوآهن نسبت به نیترات آهن آثار بهتری بر رشد گندم و نخود نشان داد. تیمارهای کشت مخلوط به‌ویژه کشت‌های ۵۰:۷۰ و ۵۰:۹۰ موجب افزایش کارآیی استفاده از نانوکود آهن شدند. از نظر نسبت برابری زمین، الگوهای کاشت ۵۰:۹۰ و ۵۰:۷۰ به‌ترتیب در غلظت‌های ۷۵۰ و ۱۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر (برای هر دو نوع کود نانو و نیترات آهن) بهترین تیمارها بودند. بنابراین می‌توان با استفاده از تیمارهای کودی میزان تراکم گیاهان را در کشت مخلوط افزایش داد و از کشت مخلوط افزایشی به‌منظور افزایش پایداری و کارآیی تولید گیاهان زراعی بهره برد. کارآیی مصرف آهن نیز در بیش‌تر موارد در نانوکود بیش‌تر از نیترات آهن و در غلظت ۷۵۰ میلی‌گرم بر لیتر بیش‌تر از ۱۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر بود. با توجه به این نتایج توصیه می‌شود در راستای دستیابی به کشاورزی پایدار و کاهش آثار منفی کشاورزی مدرن بر محیط زیست از نانوکودها در کشت مخلوط بهره‌برداری لازم انجام گیرد.

References

Al-Amri, N., Tombuloglu, H., Slimani, Y., Akhtar, S., Barghouthi, M., Almessiere, M., Alshammari, T., Baykal, A., Sabit, H., Ercan, I. and Ozcelik, S., 2020. Size effect of iron (III) oxide nanomaterials on the growth, and their uptake and translocation in common wheat (*Triticum aestivum* L.). **Ecotoxicology and Environmental Safety** 194: 1-11.

Ariel, C. E., Eduardo, O. A., Benito, G. E. and Lidia, G. 2013. Effects of two plant arrangements in corn (*Zea mays* L.) and soybean (*Glycine max* L. Merrill) intercropping on soil nitrogen and phosphorus status and growth of component crops at an Argentinean Argiudoll. **American Journal of Agriculture and Forestry** 1 (2): 22-31.

Bansal, R. L., Singh, S. P. and Nayyar, V. K. 1990. The critical Zinc deficiency level and response to Zinc application of Wheat on typic ustochrepts. **Exprimental Agriculture** 26 (3): 303-306.

Barker, S. and Dennett, M. D. 2013. Effect of density, cultivar and irrigation on spring sown monocrops and intercrops of wheat (*Triticum aestivum* L.) and faba beans (*Vicia faba* L.). **European Journal of Agronomy** 51: 108-116.

Bedoussac, L. and Justes, E. 2011. A comparison of commonly used indices for evaluating species interactions and intercrop efficiency: Application to durum wheat–winter pea intercrops. **Field Crops Research** 124: 25-36.

Brown, P. H., Cakmak I. and Zhang, Q. 1993. Form and function of zinc in plants. In: Zinc in soils and plants. Robson, A. D. (Ed.). Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands. pp: 107- 118.

Cañasveras, J. C., del Campillo, M. C., Barrón, V. and Torrent, J. 2014. Intercropping with grasses helps to reduce iron chlorosis in olive. **Soil Science and Plant Nutrition** 14 (3): 554-564.

Chapagain, T. and Riseman, A. 2014. Barley-pea intercropping: Effects on land productivity, carbon and nitrogen transformations. **Field Crops Researc**. 166: 18-25.

Dahmardeh, M. and Hodiani, A. 2016. Assessment of soil elements in intercropping based on mathematical modeling. **Computers and Electronics in Agriculture** 122: 218-224.

Delfani, M., Baradarn Firouzabadi, M., Farrokhi, N. and Makarian, H. 2014. Some physiological responses of black-eyed pea to iron and magnesium nanofertilizers. **Communications in Soil Science and Plant Analysis** 45: 530-540.

Delfani, M., Firouzabadi, M. B., Farrokhi N. and Makarian, H. 2014. Some physiological responses of black-eyed pea to iron and magnesium nanofertilizers. **Communications in Soil Science and Plant Analysis** 45: 530-540.

Gerdon, W. B., Whitney, B. A. and Raney, R. J. 1993. Nitrogen management in furrow irrigated, ridge- tilled corn. **Production in Agriculture** 6: 213-217.

Ghaley, B. B., Hauggaard-Nielsen, H., Jensen, H. H. and Jensen, E. S. 2005. Intercropping of wheat and pea as influenced by nitrogen fertilization. **Nutrient Cycling in Agroecosystem**. 73: 201-212.

Ghasemi-Fasaei, R. and Mansoorpoor, Y. 2015. Metal micronutrients relationships in crop, soil and common weeds of two maize (*Zea mays* L.) fields. **Archives of Agronomy and Soil Science** 61 (12): 1733-1741.

Gunes A., Inal, A., Adak, M. S., Alpaslan, M., Bagci, E. G., Erol, T. and Pilbeam, D. J. 2007. Mineral nutrition of wheat, chickpea and lentil as affected by intercropped cropping and soil moisture. **Nutrient Cycling in Agroecosystems** 78: 83-96.

Harsinia, M. G., Habibib, H. and Talaei, G. H. 2014. Study the effects of iron nano chelated fertilizers foliar application on yield and yield components of new line of wheat cold region of Kermanshah provence. **Agricultural Advances** 3 (4): 95-102.

Hemantaranjan, A. and Grag, O. K. 2008. Iron and zinc fertilization with reference to the grain quality of *Triticum asetivum* L. **Plant Nurtition** 7 (1-5): 23-46.

Hosseinabadi, A., Galavi, M. and Heidari, M. 2007. Effects of micronutrients (Fe, Zn and Mn) on quality and quantities yield of Hamoon cultivar wheat in the Sistan region. **New Findings in Agriculture** 1 (2): 103-110. (In Persian with English Abstract).

Karny, A., Zinger, A., Kajal, A., Shainsky-Roitman, J. and Schroeder, A. 2018. Therapeutic nanoparticles penetrate leaves and deliver nutrients to agricultural crops. **Scientific Reports**. 8: 7589.

Khalaj, H., Razazi, A., Nazaran, M.H., Labbafi, M.R. and Beheshti, B., 2009. Efficiency of a nanoorganic fertilizer with chelated iron in an external fertilizer on survival and quality characteristics of greenhouse cucumber. Proceedings of the 2nd National Conference on Application of Nanotechnology in Agriculture. 23-25 Sep., Karaj, Iran. (In Persian).

Kobayashi, T. and Nishizawa, N. K. 2012. Iron uptake translocation, and regulation in higher plants. **Plant Biology** 63: 131-152.

Kopittke, P. M., Lombi, E., Wang, P., chjoerring, J. K. and Husted, S. 2019. Nanomaterials as fertilizers for improving plant mineral nutrition and environmental outcomes. **Environmental Science: Nano** 6: 3513-3524.

Ksouri, R., Debez, A., Mahmoudi, H., Ouerghi, Z., Gharsalli, M. and Lachaa, M. 2007. Genotypic variability within Tunisian grapevine varieties (*Vitis vinifeera* L.) facing bicarbonate-induced iron deficiency. **Plant Physiology and Biochemistry** 45: 315-322.

Li, L., Tang, C., Rengel, Z. and Zhang, F. S. 2004. Calcium, magnesium and microelement uptake as affected by phosphorus sources and interspecific root interactions between wheat and chickpea. **Plant and Soil** 261: 29-37.

Lithourgidis, A. S., Vlachostergios, D. N., Dordas, C. A. and Damalas, C. A. 2011. Dry matter yield, nitrogen content, and competition in pea-cereal intercropping systems. **European Journal of Agronomy** 34: 287-294.

Liu, R. and Lal, R. 2015. Potentials of engineered nanoparticles as fertilizers for increasing agronomic productions. **Science of the Total Environment** 514: 131-139.

Liu, R., Zhang, H. and Lal, R. 2016. Effects of stabilized nanoparticles of copper, zinc, manganese, and iron oxides in low concentrations on lettuce (*Lactuca sativa*) seed germination: Nanotoxicants or nanonutrients? **Water, Air and Soil Pollution** 227 (42). doi: 10.1007/s11270-015-2738-2.

Mahmoudi, H., Ksouri, R., Gharsalli, M. and Lachaal, M. 2005. Differences in responses to iron deficiency between two legumes: lentil (*Lens culinaris*) and chickpea (*Cicer arietinum*). **Plant Physiology** 162 (11): 1237-1245.

Mazaheri, D., Madani, A. and Oveysi, M. 2006. Assessing the land equivalent ratio (LER) of two corn (*Zea mays* L.) varieties intercropping at various nitrogen levels in Karaj, Iran. **Central European Agriculture** 7 (2): 359- 364.

Mazaherinia, S., Astaraei, A. R., Fotovat, A. and Monshi, A. 2010. Nano iron oxide particles efficiency on Fe, Mn, Zn and Cu concentrations in wheat plant. **World Applied Sciences Journal** 7 (1): 36-40.

Mei, P. P., Gui, L. G., Wang, P., Hung, J. C., long, H. Y., Christie, P. and Li, L. 2012. Maize/faba bean intercropping with rhizobia inoculation enhances productivity and recovery of fertilizer P in a reclaimed desert soil. **Field Crops Research** 130: 19-27.

Naderi, M., Danesh-Shahraki, A. and Naderi, R. 2013. The role of nanotechnology in improving the use efficiency of nutrients and chemical fertilizers. **Nanotechnology** 11 (12): 16-32.

Najafi Disfani, M., Mikhak, A., Kassaee, M. Z. and Maghari, A. 2017. Effects of nano Fe/ SiO_2 fertilizers on germination and growth of barley and maize. **Agronomy and Soil Science** 63 (6): 817-826.

Pourjafar, L., Zahedi, H. and Sharghi, Y. 2016. Effect of foliar application of nano iron and manganese chelated on yield and yield component of canola (*Brassica napus* L.) under water deficit stress at different plant growth stages. **Agricultural Science Digest** 36 (3): 172-178.

Rameshaiah, G. N., Pallavi, J. and Shabnam, S. 2015. Nano fertilizers and nano sensors: An attempt for developing smart agriculture. **Engineering Research and General Science** 3 (1): 314-320.

Sabeki, M., Asgharipour, M. R., Ghanbari A. and Miri, K. 2017. The effect of nano-iron chelate fertilizer on ecomorphological characteristics of pearl millet-cowpea intercropping. **Journal of Agroecology** 7 (1): 96-108. (In Persian with English Abstract).

Seilsepour, M. 2007. The study of Fe and Zn effects on quantitative and qualitative parameters of winter wheat and determination of critical levels of these elements in Varamin plain soils. **Pajouhesh and Sazandegi** 76: 123-133. (In Persian with English Abstract).

Sheykhbaglou, R., Sedghi, M., Tajbaksh Shishevan, M. and Seyed Sharifi, R. 2011. Effect on foliar nano oxide iron mineral elements in soybean. Proceedings of the First National Congress on Modern Agricultural Sciences and Technologies. 10-12 Sep. 2011, Zanjan, Iran. (In Persian).

Soleimanpour, L., Naderi, R., Bijanzadeh, E., Behpouri, A. and Emam, Y. 2016. Response of yield and yield components of wheat, barley and triticale to intercropping with legumes under weed interference. **Plant Ecophysiology** 9 (32): 1-12. (In Persian with English Abstract).

Soleimanpour, L., Naderi, R. and Najafi Ghiri, M. 2017. Evaluation of metal micronutrients uptake in cereal-legume intercropping. **Crops Improvement** 18 (4): 1017-1031. (In Persian with English Abstract).

Stoltz, E. and Nadeau, E. 2014. Effects of intercropping on yield, weed incidence, forage quality and soil residual N in organically grown forage maize (*Zea mays* L.) and faba bean (*Vicia faba* L.). **Field Crops Research** 169: 21-29.

Whitty, E. N. and Chambliss, C. G. 2005. Fertilization of field and forage crops. Nevada State University Publication.

Xue, Y., Xia, H., Christie, P., Zhang, Z., Li, L. and Tang, T. 2016. Crop acquisition of phosphorus, iron and zinc from soil in cereal/legume intercropping systems: a critical review. **Annals of Botany** 117 (3): 1-15.

Yadavalli, V., Neelam, S., Rao, A. S. V. C., Reddy, A. R. and Subramanyam, R. 2012. Differential degradation of photosystem I subunits under iron deficiency in rice. **Plant Physiology** 169: 753-759.

Yu, Y., Stomph, T. J., Makowski, D. and van der Werf, W. 2015. Temporal niche differentiation increases the land equivalent ratio of annual intercrops: A meta-analysis. **Field Crops Research** 184: 133-144.

Zuo, Y. and Zhang, F. 2009. Iron and zinc biofortification strategies in dicot plants by intercropping with gramineous species. A review. **Agronomy for Sustainable Development** 29: 63-71.

University of Guilan
Faculty of Agricultural Sciences

doi: 10.22124/cr.2021.18869.1650

(Research Article)

Cereal Research
Vol. 10, No. 4, Winter 2021 (323-338)

Application of nano iron and iron nitrate in wheat and pea intercropping: An approach to sustainable agriculture

Leila Soleimanpour[1], Seyed Mohammad Baqer Hosseini[2*], Leila Ma'mani[3] and Mostafa Oveisi[4]

Received: November 11, 2020 Accepted: February 20, 2021

Abstract

Nano-fertilizers due to the small amount of used fertilizer and the accuracy of plant acquisition are considered as a strategy to reduce inputs and achieve sustainability in agriculture production. In this experiment, the effects of nano iron and iron nitrate on the growth characteristics of wheat in different wheat and chickpea intercropping systems were investigated. The experiment was performed as split-split plot in randomized complete plot design with three replications in the research field of Campus of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran, in 2019. The main plots included five planting patterns (wheat monoculture, pea monoculture and three intercroppings of wheat:pea with 50:50, 70:50 and 90:50 ratio), sub-plots included three fertilizer treatments (control, nano-iron and iron nitrate) and sub-sub-plots included two fertilizer concentrations (1500 and 750 mg/L). The results showed that the 50:70 intercropping and concentration of 750 nano-iron had the highest iron use efficiency of wheat and in total, the iron use efficiency of wheat in 50:70 intercropping was higher than the other planting patterns. In contrast, the highest iron use efficiency of pea was observed in 50:90 intercropping and 750 concentration of iron nitrate. In all intercropping treatments, the fertilizer use efficiency by wheat and pea in nano-iron was higher than iron-nitrate. The highest wheat biomass and grain yield was obtained in monoculture + nano-iron (16371 and 5042 kg/ha, respectively) and monoculture + iron-nitrate (16062 and 5554, respectively), and the lowest wheat biomass and grain yield was related to 90:50 intercropping and iron-nitrate, but the highest pea biomass and grain yield in most fertilizer treatments at the concentrations of 750 and 1500 mg/L was related to iron-nitrate and nano-iron, respectively. The results of this experiment showed that in most of the planting pattern treatments and in all studied traits, the concentration of 750 mg/L iron nano-fertilizer was similar or even higher than the concentration of 1500 mg/L and therefore, a lower concentration of nano-fertilizer can be used and the consumption of fertilizer can be reduced.

Keywords: Diversity, Iron nitrate, Micronutrients, Nano-iron, Sustainability

1. Ph. D. Student, Dept. of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agricultural Sciences and Engineering, Agriculture and Natural Resources Campus, University of Tehran, Karaj, Iran
2. Assoc. Prof., Dept. of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agricultural Sciences and Engineering, Agriculture and Natural Resources Campus, University of Tehran, Karaj, Iran
3. Research Assist. Prof., Dept. of Nanotechnology, Agricultural Biotechnology Research Institute of Iran (ABRII), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran
4. Assoc. Prof., Dept. of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agricultural Sciences and Engineering, Agriculture and Natural Resources Campus, University of Tehran, Karaj, Iran
* Corresponding author: bhosseini@ut.ac.ir