

Effect of iron nano-fertilizer on grain yield and genotypic and environmental indices of cowpea genotypes

Ali Asghar Ghanbari¹, Hasanali Naghdi Badi^{2*}, Ali Akbar Ghanbari³, Amir Mohamad Naji⁴

¹ Ph.D. Student, Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Shahed University, Tehran, Iran..
Email: aaghanbari70@yahoo.com.

² Associate Professor, Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Shahed University, Tehran, Iran.
Email: Naghdebadi@yahoo.com , Naghdebadi@shahed.ac.ir. ORCID: 0000-0001-7070-8467

³ Professor, Seed and Plant Improvement Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Karaj, Iran.
Email: aghanbari2004@yahoo.com. ORCID: 0000-0003-2558-6063

⁴ Assistant Professor, Department of Agronomy and Plant Breedin, Faculty of Agriculture, Shahed University, Tehran, Iran.
Email: naji@shahed.ac.ir. ORCID: 0000-0002-5251-9934

Introduction

Cowpea (*Vigna unguiculata* L.) is a valuable food legume from the Fabaceae family. This crop originated from West Africa (Nigeria) and was then transferred to the Middle East and Europe. Cowpea is suitable for cultivation in tropical regions. In addition to its multipurpose uses (green pods, dry seeds, animal feed), it also has high agronomic value. Despite breeding research worldwide to increase cowpea production, its yield is low in most growing regions. Therefore, to increase the yield, along with breeding activities, more studies should be conducted in the field of agronomic management. One of the important factors in farm management and increasing the production of legumes, including cowpea, is the use of micronutrients, especially iron.

Materials and Methods

In the present study, the responses of 12 cowpea lines (C1 to C12) along with the Mashhad cultivar to the application of iron nanofertilizer were investigated in four regions of Iran (Karaj, Dezful, Khomein and Shiraz). The experiments were conducted in a strip plot based on a randomized complete block design with three replications in 2023. Genotypes were placed in horizontal plots and treatments of using or not using iron nanofertilizer were placed in vertical plots. Some morphological traits including yield and yield components of genotypes were evaluated in different environments.

Results and Discussion

The results showed that the effects of location, nanofertilizer and genotype on all studied traits were significant. The interaction effect of location and nanofertilizer was significant on all traits except biomass, harvest index and 100-grain weight, but the interaction effect of location and genotype was significant on all traits except the number of grains per pod. The interaction effect of genotype and nanofertilizer was significant on all traits except plant height, biomass and grain yield. All traits, except the number of seeds per pod, were significantly affected by the three-way effect of location, genotype and nanofertilizer. Lines C4 and C5 were the earliest and the most late-maturing genotypes, respectively. The highest biomass yield of 3810 kg ha⁻¹ was related to the Mashhad cultivar, and the biomass yield in all lines was lower than that of the Mashhad

cultivar. Plant height and number of branches per plant varied from 55.9-72.7 and 5.4-7.4, respectively. Only four lines, along with the Mashhad cultivar, had a grain harvest index higher than the average. The highest grain harvest index was related to C1 line (38.77%). All 13 genotypes studied responded positively to the use of iron nanofertilizer and had better growth compared to the conditions of no nanofertilizer use. The highest average percentage increase was related to the number of seeds per plant (27.25%). The use of iron nanofertilizer accelerated the maturity of the genotypes. In the absence of iron nanofertilizer, the number of pods per plant and the number of seeds per pod, and consequently the number of seeds per plant, were significantly lower than when iron nanofertilizer was applied. In line C11, although the values of these traits were lower than the average of the genotypes in the absence of iron nanofertilizer, it showed the greatest response to iron nanofertilizer application. Yield components (number of pods per plant, number of seeds per pod and 100 seed weight) showed a significant increase (17.4%, 8.8% and 3.2% respectively) under the influence of iron nanofertilizer application. Grain yield also increased by 10.8%. In accordance with our experimental results, it has been reported in various studies that the use of nanofertilizers significantly increases the yield of crop plants compared to treatments without the use of nanofertilizers. The main reason for this is the improvement of the growth of plant components and metabolic processes such as photosynthesis, which causes greater accumulation of photosynthetic products and their transport to the economic organs of the plant.

Conclusion

Based on the environmental index, the evaluated locations differed from each other. Accordingly, Dezful region had the highest value of environmental index. Line C1, along with lines C4 and C11, were the best genotypes. Although the use of iron nanofertilizers improved the growth and development of the studied genotypes, since there are limited reports on the biological consequences of nanofertilizer use and their absorption by plants, and numerous questions remain about the fate and behavior of nanomaterials in plants, the use of these types of fertilizers should be done with more caution.

Keywords: Harvest index, Maturity, Micronutrient, Nano-fertilizer, Yield

تأثیر نانوکود آهن بر عملکرد دانه و شاخص‌های ژنوتیپی و محیطی ژنوتیپ‌های لوبیا چشم‌بلبلی

علی اصغر قنبری^۱، حسنعلی نقدی بادی^{۲*}، علی اکبر قنبری^۳، امیر محمد ناجی^۴

۱- دانشجوی دکتری، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شاهد، تهران، ایران.

۲- دانشیار، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شاهد، تهران، ایران.

ایمیل: naghdibadi@yahoo.com

۳- استاد پژوهش، مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران. ایمیل:

۴- استادیار، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شاهد، تهران، ایران. ایمیل: naji@shahed.ac.ir

نام نویسنده	نحوه مشارکت
علی اصغر قنبری	جمع آوری داده‌ها، پردازش داده‌ها، تحلیل آماری، تصویرسازی نتایج، استخراج و تهیه متن اولیه
حسنعلی نقدی بادی	نظارت و مدیریت، مفهوم سازی، اعتبارسنجی، ویرایش متن
علی اکبر قنبری	مشاوره فنی، روش شناسی، خدمات نرم افزاری، ویرایش متن
امیر محمد ناجی	مشاوره فنی، تحلیل آماری، اعتبار سنجی، ویرایش متن

چکیده

با وجود تحقیقات به‌نژادی در سراسر جهان در رابطه با افزایش تولید محصول لوبیا چشم‌بلبلی، عملکرد این گیاه در اکثر مناطق کشت پایین است. بنابراین، برای افزایش عملکرد در کنار فعالیت‌های به‌نژادی، باید در زمینه مدیریت زراعی بررسی‌های بیشتری صورت گیرد. یکی از عوامل مهم در مدیریت مزرعه و افزایش تولید حبوبات، استفاده از ریزمغذی‌ها به‌ویژه آهن است. در پژوهش حاضر، واکنش ۱۲ لاین به‌همراه رقم مشهد در چهار منطقه از ایران (کرج، دزفول، خمین و شیراز) نسبت به مصرف نانوکود آهن بررسی شد. برخی صفات مورفولوژیکی و عملکرد و اجزای عملکرد دانه ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مختلف ارزیابی شدند. طبق نتایج، مصرف نانوکود آهن باعث تسریع در رسیدگی ژنوتیپ‌ها شد. اجزای عملکرد (تعداد غلاف در بوته، تعداد دانه در غلاف و وزن صد دانه) تحت تأثیر مصرف نانوکود آهن افزایش قابل توجهی (به‌ترتیب ۱۷/۴، ۸/۸ و ۳/۲ درصد) نشان دادند. شاخص برداشت دانه، زیست توده و عملکرد دانه نیز به‌ترتیب ۷/۱، ۴/۷ و ۱۰/۴ درصد افزایش یافت. مناطق مورد ارزیابی از نظر شاخص محیطی با یکدیگر تفاوت داشتند. بر این اساس، منطقه دزفول بیشترین مقدار شاخص محیطی را داشت. از نظر شاخص ژنوتیپی، بیشترین مقدار مربوط به لاین C1 بود و بیشترین عملکرد را نسبت به میانگین مناطق داشت. این لاین به‌همراه لاین‌های C4 و C11، برترین ژنوتیپ‌ها در مناطق مورد بررسی بودند.

واژه‌های کلیدی: رسیدگی، ریزمغذی، شاخص برداشت، عملکرد، نانوکود

مقدمه

حبوبات به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع گیاهی غنی از پروتئین، دومین منبع مهم غذایی انسان پس از غلات، به شمار می‌روند. این گیاهان با داشتن قابلیت تثبیت زیستی نیتروژن، نقش مهمی در بهبود حاصلخیزی خاک دارند. حبوبات در تناوب با بسیاری از گیاهان زراعی، کشت می‌شوند و بدین ترتیب با تنوع بخشی به نظام‌های کشت مبتنی بر غلات، جایگاه ویژه‌ای در کشاورزی پایدار به خود اختصاص داده‌اند. این گیاهان، کم توقع بوده و برای

کشت در نظام‌های زراعی کم نهاده مناسب می‌باشند. هم‌چنین به صورت گیاهان پوششی، در جلوگیری از فرسایش خاک مؤثرند. مجموعه این ویژگی‌ها، حبوبات را از جنبه‌های زراعی، بوم‌شناختی و زیست محیطی در جایگاه ارزشمندی قرار داده است.

لوبیا چشم‌بلبلی (*Vigna unguiculata* L.) یکی از حبوبات ارزشمند و از خانواده Fabaceae است که منشأ آن غرب آفریقا (نیجریه) بوده و از آنجا به خاورمیانه و اروپا منتقل شده است. این گیاه مناسب کشت در مناطق گرمسیر است و علاوه بر مصارف چند منظوره (غلاف سبز، دانه خشک، تعلیف دام)، دارای ارزش زراعی بالایی نیز می‌باشد (Xiong et al., 2016; Gerrano, Jansen van Rensburg, & Adebola, 2017). در سال ۲۰۲۲، سطح زیر کشت گیاه لوبیا چشم‌بلبلی در جهان ۱۵/۲ میلیون هکتار و تولید آن ۹/۷ میلیون تن با میانگین عملکرد ۶۴۳ کیلوگرم در هکتار بوده است (FAO, 2022). در آمارنامه‌های رسمی، سطح زیر کشت لوبیا چشم‌بلبلی در ایران در دسترس نیست ولی مطابق گزارش‌های غیر رسمی، سطح زیر کشت آن حدود ۱۷ هزار هکتار است و استان‌های اصلی تولید کننده این گیاه شامل خوزستان، آذربایجان شرقی، جنوب کرمان و خراسان رضوی می‌باشند (Ghanbari, 2022; Dorri, Sheikh, Sekhavat, & Darvishi, 2018; Sekhavat, Ghanbari Birgani, & Mirzashahi, 2018).

لوبیا چشم‌بلبلی را می‌توان مانند لوبیا معمولی (یعنی دانه خشک) یا لوبیا سبز (برای غلاف‌های سبز) مصرف کرد. دانه‌ها، غلاف‌ها و برگ‌های لوبیا چشم‌بلبلی قابلیت فرآوری داشته و در صنایع غذایی استفاده می‌شوند (Abebe & Alemayehu, 2022). لوبیا چشم‌بلبلی منبع غنی از اسیدهای آمینه ضروری، پروتئین‌ها، مواد معدنی، ویتامین‌ها، ترکیبات پلی فنلی و آنتی اکسیدان‌ها است. اسید آمینه موجود در دانه این گیاه مکمل غلات است و عناصر معدنی دانه آن شامل کلسیم و آهن بیشتر از گوشت، ماهی و تخم مرغ بوده و میزان آهن آن تقریباً برابر با شیر است (Alfa, Tijani, Omotoso, 2020; Junaidu, & Sezor, 2020).

لوبیا چشم‌بلبلی همانند سایر گیاهان لگوم به عناصر ریزمغذی نیاز وافر دارد. یکی از مهم‌ترین این عناصر، آهن است (Márquez-Quiroz, De-la-Cruz-Lázaro, Osorio-Osorio, & Sánchez-Chávez, 2015). آهن یکی از عناصر ضروری برای رشد گیاهان است و نقش مهمی در واکنش‌های فتوسنتزی ایفا می‌کند. آهن چندین آنزیم مختلف را در گیاهان فعال می‌کند و به سنتز RNA کمک کرده و عملکرد فتوسنتسم‌های گیاهی را بهبود می‌بخشد (Malakooti & Tehrani, 2005). این عنصر نقش مهمی در تغذیه و سلامتی انسان‌ها نیز دارد (Abbaspour, Hurrell, & Kelishadi, 2014). بخش مهمی از آن از طریق تغذیه گیاهی حاصل می‌شود (Maphosa & Jideani, 2017; Valdes-Miramontes, Rodriguez-Macias, & Ruiz-Lopez, 2019; Hasanuzzaman & Fujita, 2022). برای کاربردهای خاکی، کودهای آهن بر پایه کلات آهن با لیگاندهای مصنوعی آمینو کربوکسیلات (مانند EDDHA, DTPA, EDTA, HEDTA) هستند که در حفظ آهن در محلول خاک، حتی در خاک‌های قلیایی، و در نتیجه افزایش فراهمی زیستی آن برای جذب توسط گیاه مؤثر هستند. با این وجود، کمپلکس‌های آهن-آمینو کربوکسیلات دارای محدودیت‌هایی هستند که به‌عنوان مثال به اثربخشی وابسته به pH، پایداری، ماندگاری در محیط و واکنش‌های تبادلی لیگاند مربوط می‌شود (Zuluaga et al., 2023).

استفاده از کودهای شیمیایی به دلیل اثرات مضر که بر محیط زیست و کیفیت غذا دارند، مورد نکوهش قرار گرفته است (Cui, Sun, Liu, 2010; Jiang & Gu, 2010). بنابراین استفاده از فناوری‌های جدید در بهبود کیفیت محصولات کشاورزی در دهه‌های اخیر رشد چشم‌گیری داشته است. یکی از

این موارد، کاربرد عناصر معدنی به شکل‌های مختلف است که می‌توان به فناوری نانو و نقش آن در افزایش کمی و کیفی محصولات اشاره کرد (Nongbet et al., 2022). عرضه کودهای شیمیایی به شکل نانو ذرات اخیراً مورد توجه قرار گرفته است و نتایج مطالعات موجود بیانگر واکنش متفاوت گونه‌ها و ارقام مختلف گیاهان به مواد غذایی تهیه شده به شکل نانو می‌باشد به‌طوری که اثر نانو ذرات بر روی گیاهان می‌تواند مفید (رشد و نمو بیشتر جوانه) یا غیر مفید (ممانعت از رشد ریشه) باشد (Zhu, Han, & Jin, 2008). در آزمایشی، تأثیر نانوکود کلات آهن بر رشد و عملکرد دانه گیاه لوبیا چشم‌بلبلی بررسی شد و نتیجه گرفته شد که مصرف نانو کلات آهن باعث افزایش معنی‌دار تعداد شاخه فرعی، طول غلاف، عملکرد و اجزای عملکرد در مقایسه با تیمارهای عدم مصرف نانوکود شد (Khalaj, Baradaran Firouzabadi, & Delfani, 2020). در آزمایش دیگری که در گیاه سویا انجام شد، استفاده از نانوکود آهن اثر معنی‌داری بر تعداد شاخه فرعی و وزن صد دانه نداشت اما تأثیر معنی‌دار آن بر افزایش عملکرد مشاهده شد (Sheykhbaglou, Sedghi, Tajbakhsh, & Shishevan, 2010). در مکزیك، واکنش گیاه لوبیا چشم‌بلبلی به مصرف سطوح مختلف نانوکود آهن بررسی شد و محققین نتیجه گرفتند که در غلظت ۲۵ میکرو مول بر لیتر، تعداد غلاف در بوته، تعداد دانه در بوته و عملکرد دانه افزایش معنی‌دار نسبت به عدم مصرف نانوکود داشتند اما با افزایش غلظت نانوکود آهن، این صفات کاهش قابل توجهی نشان دادند و مقادیر آنها در مقایسه با عدم مصرف نانوکود، به‌طور معنی‌دار کمتر بود (Márquez-Quiroz, De-la-Cruz-Lázaro, Osorio-Osorio, & Sánchez-Chávez, 2015).

با وجود ضرورت توجه به تغذیه گیاهان با عناصر مغذی، عوامل مهم دیگری در رشد و نمو آنها تأثیرگذار هستند. هر محصولی حداکثر رشد و عملکرد خود را در مجموعه خاصی از شرایط محیطی دارد. در این میان، نه تنها محصولات، بلکه ارقام مختلف یک محصول نیز تفاوت‌های زیادی را در سازگاری با محیط‌های مختلف نشان می‌دهند (Khajehpoor, 2000). بنابراین، یکی از مشکلات مهم در توصیه ارقام زراعی، وجود برهمکنش ژنوتیپ و محیط (GEI) است. این عامل می‌تواند موجب پنهان ماندن ارزش ژنوتیپی ارقام زراعی به دلیل وجود اثرات محیطی گردد (Cruz, Regazzi, & Carneiro, 2014).

اثر متقابل ژنوتیپ × محیط (GEI) از عوامل موثر بر میزان تولید محصولات کشاورزی است. هر چه میزان این اثر متقابل کمتر باشد، پایداری تولید بیشتر خواهد شد. وقتی ارقام در محیط‌های گوناگون با یکدیگر مقایسه می‌شوند، واکنش متفاوتی از خود نشان می‌دهند و این مسئله سبب می‌شود که نتوان برتری یکی را بر دیگری بطور کامل و در همه مناطق مشخص کرد. یک رقم ممکن است در یک محیط حداکثر عملکرد و در محیط‌های دیگر عملکرد ناچیزی داشته باشد. تغییرات در عملکرد نسبی ژنوتیپ‌ها در محیط‌های مختلف به اثر متقابل ژنوتیپ × محیط نسبت داده می‌شود (Farshadfar, 1998; Farshadfar & Sutka, 2006).

یکی از راه‌های ارزیابی تأثیر متقابل ژنوتیپ × محیط، انجام آزمایشات سازگاری و پایداری است. معمولاً به‌نژادگران ژنوتیپ‌هایی را انتخاب می‌کنند که عملکرد بالا و پایداری عملکرد بالاتری در همه سال‌ها و مکان‌ها دارند. یک ژنوتیپ زمانی پایدار است که عملکرد آن از میانگین عملکرد یک گروه از ژنوتیپ‌های استاندارد در محیط‌های مختلف انحراف نداشته باشد (Gancales, Bortoletto, Mellomartins, Costa, & Gallo, 2003).

پوراسماعیل و همکاران (Pouresmael, Saneinejad, Ghanbari, & Sekhavat, 2021) در بررسی ۵۶ ژنوتیپ از ژرم پلاسما لوبیا چشم‌بلبلی از بانک ژن گیاهی ملی ایران، تنوع قابل ملاحظه‌ای از نظر همه صفات مورد بررسی به‌ویژه عملکرد و اجزای آن بین ژنوتیپ‌ها مشاهده نمودند. صفات زیست‌توده، تعداد غلاف در بوته، تعداد دانه در غلاف، طول غلاف و وزن صد دانه، دارای بیشترین ضریب تغییرات فنوتیپی بودند. در آزمایشی چهار ساله که برای انتخاب لاین‌های برتر لوبیا چشم‌بلبلی در خوزستان انجام شد، هشت لاین که عملکرد نهایی بالاتری از توده محلی (شاهد) داشتند و بازارپسندی دانه آنها نیز نسبت به سایر لاین‌ها برتر بود، انتخاب شدند (Sekhavat, 2006). در آزمایش چهار ساله دیگری، تعداد ۱۹۴ ژنوتیپ لوبیا چشم‌بلبلی از پانزده استان مختلف جمع‌آوری و صفات مورفولوژیکی آنها ارزیابی شد و ۶۲ ژنوتیپ با صفات مطلوب به‌عنوان ژنوتیپ برتر انتخاب شدند (Vaezi, 2010).

در بررسی ۲۱ لاین اصلاحی لوبیا چشم‌بلبلی مشخص شد که لاین‌ها از نظر دوره رسیدگی، اجزای عملکرد و عملکرد دانه متفاوت بودند (Aliyu & Makinde, 2016). در ارزیابی ۱۸ صفت مورفولوژیکی و زراعی در ۲۸ ژنوتیپ لوبیا چشم‌بلبلی، اختلاف معنی‌داری بین آنها از نظر صفات ارتفاع بوته، تعداد شاخه و تعداد روز تا گلدهی گزارش شد (Hutchinson et al., 2017). در بررسی تنوع ژنتیکی ۱۰۰ ژنوتیپ لوبیا چشم‌بلبلی جنوب آفریقا، صفات زراعی و مورفولوژیکی بررسی و مشخص شد که تعداد غلاف در بوته، طول غلاف و تعداد دانه در غلاف از مؤثرترین صفات در انتخاب ژنوتیپ‌های برتر از نظر عملکرد دانه بودند (Nkhoma, Shimelis, & Laing, 2020).

از آنجا که یکی از عوامل مهم در بهبود کمی و کیفی دانه لوبیا چشم‌بلبلی، تعیین پاسخ‌های مورفو-فیزیولوژیک ارقام و لاین‌های مختلف آن در مناطق تولید و واکنش آنها به عوامل محیطی است، بنابراین آزمایش حاضر برای بررسی واکنش ژنوتیپ‌های مختلف لوبیا چشم‌بلبلی در مناطق مختلف تولید نسبت به مصرف نانوکود آهن انجام شد.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در چهار منطقه از ایران (کرج، دزفول، خمین و شیراز) اجرا شد و طی آن ۱۲ لاین لوبیا چشم‌بلبلی (C1 تا C12) به‌همراه رقم مشهد به‌صورت کرت‌های نواری (اسپلیت استریپ پلات) در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در سال ۱۴۰۲ کشت و مورد ارزیابی قرار گرفتند. لاین‌ها و رقم مشهد در کرت‌های افقی و مصرف یا عدم مصرف نانوکود آهن در کرت‌های عمودی بررسی شد. بذور ژنوتیپ‌های مورد بررسی در این آزمایش از مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر تهیه شدند.

جدول ۱- فهرست ژنوتیپ‌های مورد بررسی

Table 1- List of evaluated cowpea genotypes

رنگ بذر	کد بانک ژن گیاهی ملی ایران	کد ژنوتیپ
Seed Color	IR National Plant Gene Bank Code	Genotype Code
Cream, Black-eyed	TN-38-7013	C1
Cream, Black-eyed	TN-38-7158	C2
Cream, Black-eyed	TN-38-7162	C3

C4	TN-38-7248	Cream, Black-eyed
C5	TN-38-7265	Cream, Black-eyed
C6	TN-38-7281	Cream, Black-eyed
C7	TN-38-7284	Cream, Black-eyed
C8	TN-38-7285	Cream, Black-eyed
C9	TN-38-7290	Cream, Black-eyed
C10	TN-38-7292	Cream, Black-eyed
C11	TN-38-7296	Cream, Black-eyed
C12	TN-38-7309	Cream, Black-eyed
Mashhad	Traditional variety	Cream, Black-eyed

جدول ۲- ویژگی‌های مناطق مورد بررسی و زمان کشت ژنوتیپ‌ها

Table 2- Characteristics of four studied locations and sowing date of the genotypes

مکان Location	موقعیت جغرافیایی			برخی ویژگی‌های خاک			وضعیت آب و هوایی				زمان کشت	
	Geographical characteristics			Soil characteristics			Weather characteristics				Sowing	
	طول	عرض	ارتفاع	بافت خاک	pH	آهن	ماه	بیشینه دما	کمینه دما	میانگین دما	رطوبت نسبی	Date
	جغرافیایی	جغرافیایی	Elevation	Soil		Fe	Month	Max Temp.	Min Temp.	Mean	Humidity	
	Longitude	Latitude	(m)	texture		(mg.kg ⁻¹)		(°C)	(°C)	Temp. (°C)	(%)	
کرج Karaj	50° 55'	35° 47'	1255	Clay Loam	7.5	8.8	June	30.2	14.8	22.5	31.6	June 1th
							July	35.4	19.0	27.2	22.2	
							August	33.4	18.4	25.9	35.5	
							September	30.5	16.5	23.5	21.3	
دزفول Dezful	48° 30'	32° 24'	154	Loam Clay	7.1	8.5	August	47.3	29.3	38.3	32.3	August 2th
							September	43.7	25.0	34.3	37.1	
							October	35.5	19.7	29.1	38.3	
							November	29.5	16.4	23.0	64.8	
خمین Khomein	49° 57'	33° 39'	1885	Loam Clay	7.2	8.3	June	38.7	13.3	25.8	11.6	June 19th
							July	39.6	16.6	27.5	19.6	
							August	35.8	14.9	25.3	20.0	
							September	34.7	11.0	22.4	16.6	
شیراز Shiraz	52° 41'	29° 47'	1596	Clay Loam	7.9	5.2	July	38.8	20.3	29.5	26	June 28th
							August	36.3	19.6	28.0	36	
							September	33.9	15.1	24.5	33	
							October	30.2	10.6	20.4	34	

بذور هر ژنوتیپ در چهار ردیف به طول پنج متر با فاصله روی ردیف ۱۰ سانتی متر و فاصله بین خطوط ۷۵ سانتی متر در تاریخ کاشت مرسوم هر منطقه کشت شدند. بر اساس توصیه شرکت سازنده نانوکود آهن (شرکت فناور نانو پژوهش مرکزی)، به مقدار ۳ گرم در هر کرتچه (۲ کیلوگرم در هکتار) با آب آبیاری و قبل از گلدهی مصرف شد. مصرف کودهای شیمیایی ماکرو نیز بر اساس توصیه کودی (قبل از کشت به میزان ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار فسفات آمونیوم، ۷۰ کیلوگرم در هکتار پتاس و ۵۰ کیلوگرم در هکتار اوره) و مبارزه با آفات (سم دیازینون ۲ لیتر در هکتار برای مبارزه با شته، تریپس و زنجره) و علف‌های هرز (سم بازگران ۲ لیتر در هکتار برای مبارزه با علف‌های هرز پهن برگ در مرحله دو برگه و سم گالانت ۲ لیتر در هکتار برای مبارزه با علف‌های هرز باریک برگ دو روز پس از سم بازگران) انجام شد.

در اواخر مرحله پر شدن غلاف‌ها، از هر کرتچه با حذف اثر حاشیه‌ای، تعداد پنج بوته به طور تصادفی انتخاب و ارتفاع آنها از سطح زمین برحسب سانتی متر و تعداد شاخه فرعی، شمارش و ثبت شد. برای این منظور، شاخه‌هایی با حداقل یک غلاف سالم لحاظ شد. همچنین، شاخص برداشت دانه برحسب درصد و طبق روش فاگنریا و سانتوس (Fageria & Santos, 2008) تعیین شد. در زمان رسیدگی و برداشت (زمانی که ۸۰ درصد غلاف‌ها زرد شده و دانه‌ها خشک بودند)، تعداد غلاف در بوته از شمارش غلاف‌های پنج بوته از هر کرتچه با حذف اثر حاشیه‌ای به طور تصادفی و تعداد دانه در غلاف از شمارش دانه‌های موجود در ۱۰ غلاف تعیین شد. برای تعیین وزن دانه، چهار نمونه ۱۰۰ عددی توزین و میانگین آنها به عنوان وزن صد دانه ثبت شد. برای تعیین وزن اندام هوایی، وزن خشک اندام هوایی بر حسب گرم در بوته تعیین شد. برای این منظور، در زمان رسیدگی دانه پنج بوته از هر کرت برداشت شده و پس از خشک کردن در آون با دمای ۷۵ درجه سانتی گراد به مدت ۴۸ ساعت، میانگین وزن آنها به عنوان وزن خشک اندام هوایی ثبت شد. برای تعیین عملکرد دانه هر تیمار، بوته‌های موجود در دو خط کاشت میانی هر کرتچه با رعایت اثر حاشیه‌ای برداشت و پس از کوبیدن و جداکردن دانه‌ها از غلاف‌ها، دانه‌ها (با رطوبت ۱۲ درصد) توزین و عملکرد بر حسب کیلوگرم در هکتار ثبت شد. شاخص محیطی که نشان‌دهنده وضعیت محیط آزمایش می‌باشد، از تفاوت میانگین عملکرد ژنوتیپ‌ها در هر مکان آزمایشی با میانگین کل عملکرد در مکان‌ها تعیین شد. شاخص ژنوتیپی نیز که نشان‌دهنده وضعیت ژنوتیپ‌های آزمایش است، از تفاوت میانگین کل عملکرد ژنوتیپ با میانگین کل ژنوتیپ‌ها محاسبه و تعیین شد.

پس از جمع آوری داده‌ها، جهت اطمینان از صحت و دقت آنها، آزمون‌های یکنواختی واریانس‌ها و نرمال بودن داده‌ها انجام شد. تجزیه واریانس ساده صفات برای هر منطقه بطور جداگانه انجام شد. همچنین، داده‌های مربوط به صفات مختلف برای چهار منطقه مورد تجزیه واریانس مرکب قرار گرفت. تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم افزار SAS 9.4 انجام و از روش LSD برای مقایسه میانگین صفات استفاده شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس صفات مورد بررسی در جداول ۳ و ۴ نشان داده شده است. طبق نتایج، اثرات مکان، نانوکود و ژنوتیپ بر همه صفات مورد بررسی معنی‌دار بود. اثر متقابل مکان و نانوکود به جز در مورد صفات زیست توده، شاخص برداشت و وزن صد دانه برای سایر صفات معنی‌دار بود؛ اما اثر

متقابل مکان و ژنوتیپ برای همه صفات به جز صفت تعداد دانه در غلاف معنی دار به دست آمد. اثر متقابل ژنوتیپ و نانوکود به جز ارتفاع بوته، زیست توده و عملکرد دانه بر همه صفات معنی دار بود. همه صفات به جز تعداد دانه در غلاف، تحت تأثیر معنی دار اثر سه جانبه مکان، ژنوتیپ و نانوکود قرار گرفتند. جدول ۳- تجزیه واریانس صفات تعداد روز تا رسیدگی، ارتفاع بوته، تعداد شاخه فرعی، عملکرد زیست توده و شاخص برداشت ژنوتیپ‌های لوبیا چشم‌بلبلی در چهار مکان تحت شرایط مصرف و عدم مصرف نانوکود آهن

Table 3- Analysis of variance of days to maturity, plant height, No. of branches per plant, biomass yield and harvest index (HI) of cowpea genotypes at four locations under two Fe conditions (use and non-use)

منابع تغییر S.O.V.	درجه آزادی df	میانگین مربعات M.S.				
		تعداد روز تا رسیدگی	ارتفاع بوته	تعداد شاخه فرعی	عملکرد زیست توده	شاخص برداشت
		Days to maturity	Plant height	Branches per plant	Biomass yield	HI
مکان Location (L)	3	1515.15 **	41482.17 **	120.29 **	16058090.03 **	1754.78 **
تکرار (مکان) rep (L)	8	53.82	169.25	0.71	261280.45	12.11
نانوکود آهن Fe	1	980.15 **	1138.51 **	36.01 **	2061150.26 **	406.98 **
مکان×نانوکود آهن L*Fe	3	26.33 **	66.43 **	0.55 *	99738.62 ns	17.79 ns
تکرار (مکان×نانوکود آهن) rep (L*Fe)	8	0.35	1.54	0.08	59043.34	5.26
ژنوتیپ Genotype (G)	12	224.56 **	552.93 **	6.73 **	953790.50 *	191.46 **
مکان×ژنوتیپ L*G	36	260.62 **	609.49 **	5.40 **	1824096.00 **	49.08 **
تکرار (مکان×ژنوتیپ) rep (L*G)	96	42.66	46.23	1.06	404841.63	24.13
نانوکود آهن×ژنوتیپ Fe*G	12	2.26 **	3.17 ns	0.37 *	19980.49 ns	2.57 *
مکان×نانوکود آهن×ژنوتیپ L*Fe*G	36	2.99 **	3.86 *	0.27 *	27726.62 **	1.96 *
خطا Error	96	0.58	2.21	0.17	12846.1	1.26
ضریب تغییرات CV (%)		0.74	2.31	6.83	3.24	3.38

ns, * و **: به ترتیب غیر معنی دار و معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد و ۱ درصد بر اساس آزمون حداقل تفاوت معنی دار.

ns, * and ** are: non significant and significant at the 5% and 1% levels of probability based on LSD method, respectively.

محققین توانایی ژنوتیپ‌های مختلف گیاهی در جذب و مصرف عناصر غذایی را مورد بررسی قرار داده و اظهار داشتند که تفاوت کارایی آنها در استفاده از عناصر غذایی به جذب ریشه‌ها، یا مصرف توسط گیاه و یا هر دو بستگی دارد و اهمیت نسبی هر کدام از آنها بسته به نوع عنصر و نوع گونه گیاهی می‌تواند متفاوت باشد (Vaneckhaute et al., 2014).

جدول ۴- تجزیه واریانس عملکرد و اجزای عملکرد ژنوتیپ‌های لوبیا چشم‌بلبلی در چهار مکان تحت شرایط مصرف و عدم مصرف نانوکود آهن

Table 4- Analysis of variance of the yield and yield components of cowpea genotypes at four locations under two Fe conditions (use and non-use)

منابع تغییر S.O.V.	درجه آزادی df	میانگین مربعات M.S.				
		تعداد غلاف در بوته	تعداد دانه در غلاف	تعداد دانه در بوته	وزن صد دانه	عملکرد دانه
		Pods per plant	Seeds per pod	Seeds per plant	100 seed weight	Grain yield
مکان Location (L)	3	952.05 **	35.31 **	126924.7 **	1046.71 **	6715437.67 **
تکرار (مکان) rep (L)	8	60.17	1.35	6606.9	2.32	48313.82
نانوکود آهن Fe	1	308.01 **	51.53 **	63446.7 **	28.64 **	1096836.54 **
مکان×نانوکود آهن L*Fe	3	8.92 **	2.70 **	451.48 *	0.34 ns	16055.59 ns
تکرار (مکان×نانوکود آهن) rep (L*Fe)	8	0.19	0.32	94.78	0.13	12640.81
ژنوتیپ Genotype (G)	12	41.61 **	6.47 **	7091.53 **	25.69 **	451364.11 **
مکان×ژنوتیپ L*G	36	48.85 **	1.87 ns	5305.88 **	13.17 **	441509.39 **
تکرار (مکان×ژنوتیپ) rep (L*G)	96	9.36	1.82	860.51	1.22	145159.27
نانوکود آهن×ژنوتیپ Fe*G	12	5.13 **	0.84 **	1110.32 **	1.14 **	3577.60 ns
مکان×نانوکود آهن×ژنوتیپ L*Fe*G	36	1.20 **	0.17 ns	95.69 *	0.17 *	4757.48 *
خطا Error	96	0.47	0.16	55.74	0.09	2657.25
ضریب تغییرات CV (%)		5.57	4.28	6.15	1.64	4.33

ns, * و **: به ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد و ۱ درصد بر اساس آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار.

ns, * and ** are: non significant and significant at the 5% and 1% levels of probability based on LSD method, respectively.

همان‌طور که در نتایج آزمایش حاضر مشاهده می‌شود، همه لاین‌ها و رقم مشهد به مصرف نانوکود آهن واکنش مثبت داده و رشد و نمو بهتری

در این شرایط داشتند. البته برخی از ژنوتیپ‌ها پاسخ کمتری به افزایش دسترسی به آهن نشان دادند، که به اعتقاد محققین (Tamuk et al., 2024) ممکن

است منعکس کننده نیاز ذاتی کمتر آهن در این ژنوتیپها برای تکمیل چرخه زندگی آنها باشد. در یافته‌های تحقیقاتی مختلف، ثابت شده است که ژنوتیپها از نظر توانایی جذب و مصرف عناصر معدنی تفاوت زیادی دارند. این تفاوتها، اهمیت زیادی در انتخاب یا اصلاح ارقام مناسب برای بهره‌وری بیشتر جذب و مصرف عناصر معدنی دارند ([Dhaliwal et al., 2022](#)).

میانگین صفات مورد بررسی در همه مکانها و در شرایط مصرف و عدم مصرف نانوکود آهن در جداول ۵ و ۶ آورده شده است. در مناطق مورد بررسی، لاینهای C4 و C5 به ترتیب زودرس‌ترین و دیررس‌ترین ژنوتیپها در هر دو شرایط کودی بودند. زودرس‌ترین ژنوتیپ، لاین C3 با دوره رشد ۸۰/۳ روز در کرج و در شرایط مصرف نانو کود آهن بود. دیررس‌ترین ژنوتیپ، لاین C10 در شرایط عدم مصرف نانوکود آهن با دوره رشد ۱۲۰ روز در منطقه خمین بود. بیشترین میانگین عملکرد زیست توده در مناطق با ۳۸۱۰ کیلوگرم در هکتار مربوط به رقم مشهد بود و تولید ماده خشک (زیست توده) همه لاینها کمتر از این رقم بود. لاین C10 در دزفول و در شرایط مصرف نانوکود آهن، با ۵۱۴۳ کیلوگرم در هکتار، بیشترین عملکرد را داشت. لاین C6 در شیراز و در شرایط عدم مصرف نانوکود آهن، کمترین عملکرد زیست توده (۲۰۸۵ کیلوگرم در هکتار) را داشت. این لاین، بیشترین ارتفاع بوته را در کرج و در شرایط مصرف نانوکود آهن با ۱۱۵/۶ سانتی‌متر داشت. بیشترین و کمترین تعداد شاخه فرعی مربوط به لاین C12 به ترتیب در خمین (۹ شاخه) و دزفول (۲ شاخه) بود. از نظر این صفت، منطقه دزفول کمترین میانگین را در هر دو شرایط کودی داشت.

میزان تغییرات (جدول ۷) صفات مورد بررسی در ژنوتیپهای لوبیا چشم‌بلبلی نشان داد که مصرف آهن باعث کاهش دوره رشد ژنوتیپها و زودرسی آنها شد. بیشترین تأثیر بر زودرسی، مربوط به لاینهای C10 و C5 بود. برخی محققان معتقدند که زودرسی ممکن است به فرار از خشکی کمک کند، در حالی که دیررسی به ویژه در ارقام رشد نامحدود، ممکن است باعث بهبود جزئی پس از تنش و بازیابی توان رشد و نمو گیاه گردد اما زودرسی معمولاً با کاهش پتانسیل عملکرد رابطه دارد ([Singh, 2007](#)). طبق نتایج آزمایش ایقائی اسکویی و همکاران ([Ighaiee Oskoie, Ghanbari, & Mirhadi, 2018](#))، استفاده از نانو ذرات آهن سبب افزایش دوره رشد رویشی گیاه لوبیا سبز شد که این عامل می‌تواند موجب افزایش تولید ذخایر در گیاه و بهبود رشد و نمو و عملکرد آن شود.

مصرف نانوکود آهن به‌طور میانگین باعث افزایش ۶ و ۱۲ درصدی ارتفاع بوته و تعداد شاخه فرعی در ژنوتیپهای لوبیا چشم‌بلبلی شد (جدول ۵). تعداد شاخه در گیاه در گونه‌های مختلف حبوبات متفاوت است و به‌عنوان یک معیار مهم برای عملکرد دانه محسوب می‌شود. شاخه‌دهی در گیاه به شدت تحت تأثیر شرایط محیطی به‌ویژه خصوصیات فیزیکی خاک و یا وضعیت آب خاک قرار می‌گیرد، بنابراین شرایط محیطی می‌تواند سهم شاخه‌ها را از عملکرد نهایی گیاه تغییر دهد ([Khalaj, Baradaran Firouzabadi, & Delfani, 2020](#)). طبق نتایج تحقیقی که در گیاه لوبیا سبز انجام شد، استفاده از نانوکودها می‌تواند به توزیع بهتر شاخه‌های فرعی کمک نماید ([Ighaiee Oskoie, 2018](#)). در آزمایشی که روی گیاه سویا انجام شد، استفاده از نانو اکسید آهن در غلظت‌های مختلف تأثیر معنی‌داری بر تعداد شاخه فرعی گیاه سویا نداشت ([Sheykhbaglou, Sedghi, Tajbakhsh Shishevan, & Sharifi, 2010](#)) اما در گیاه نخود، بیشترین تعداد شاخه فرعی و تعداد غلاف در بوته نخود دیم (لاین ILC482) تحت تأثیر مصرف ۳ در هزار نانوکود کلات آهن حاصل شد ([Mir, Daneshvar, Nazarian, & Khosravi, 2016](#)).

جدول ۵- مقایسه میانگین صفات ژنوتیپ‌های لوبیا چشم‌بلبلی در مناطق مورد بررسی تحت شرایط مصرف و عدم مصرف نانوکود آهن

Table 5- The means of evaluated traits of cowpea genotypes in the studied locations under two conditions of Nano-fertilization (-Fe, without iron; +Fe, with iron)

LSD (5%)	درصد تغییر % Change	میانگین Mean	ژنوتیپ Genotype													نانوکود آهن Fe Nano-fertilizer	مکان Location	صفت Trait
			C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	Mashhad			
0.43	تعداد روز تا رسیدگی	Karaj	-Fe	105.6	84.3	81.0	82.3	106.3	106.3	99.3	105.3	104.6	108.3	109.0	108.3	107.3	100.6	-3.3
			+Fe	102.0	83.6	80.3	81.3	102.3	102.3	98.0	101.0	101.0	103.0	103.6	103.3	102.6	97.2	
	Days to maturity	Dezful	-Fe	105.0	103.0	103.6	94.0	104.3	104.0	103.6	104.3	103.6	105.0	102.3	100.3	99.3	102.4	-3.1
			+Fe	101.0	99.3	100.6	92.0	100.0	100.3	100.6	100.6	100.6	101.3	99.0	97.6	97.3	99.2	
	Khomein	-Fe	109.3	111.3	113.3	111.3	119.3	113.6	112.3	95.6	114.6	120.0	96.6	115.0	118.6	111.6	-4.6	
		+Fe	105.0	106.0	107.0	105.6	112.3	107.6	107.3	94.3	108.3	113.0	95.3	109.3	112.6	106.4		
	Shiraz	-Fe	93.0	107.6	107.3	108.6	106.0	103.0	102.0	102.0	108.3	102.0	96.0	102.6	101.6	103.0	-2.3	
		+Fe	91.6	104.6	104.3	105.6	103.3	100.6	100.0	99.3	105.3	100.0	94.6	100.3	98.6	100.6		
0.85	ارتفاع بوته (سانتی‌متر)	Karaj	-Fe	99.6	73.6	80.0	53.6	106.6	107.0	106.6	89.6	102.6	99.3	105.0	99.6	113.0	95.0	6.6
			+Fe	108.3	82.6	89.3	61.6	114.0	115.6	110.0	95.3	105.3	106.0	111.6	103.6	115.6	101.4	
	Plant height (cm)	Dezful	-Fe	54.0	45.0	42.3	43.3	56.6	47.3	52.6	46.6	49.0	50.0	52.3	54.0	50.0	49.4	7.2
			+Fe	56.6	48.6	47.3	47.6	58.6	51.3	55.3	51.3	53.6	53.6	56.0	57.0	53.0	53.0	
	Khomein	-Fe	58.0	56.0	67.6	76.0	59.3	81.3	46.6	50.0	54.3	51.0	48.3	57.3	53.3	58.3	3.4	
		+Fe	60.3	58.6	68.6	76.6	60.3	81.0	50.6	54.0	56.6	53.3	50.0	60.0	55.0	60.3		
	Shiraz	-Fe	50.6	43.6	44.0	41.6	51.0	48.6	44.0	56.0	40.3	46.6	44.3	48.3	51.0	46.9	6.9	
		+Fe	55.0	48.3	46.3	46.6	55.0	50.0	47.6	57.6	43.3	50.6	48.0	50.6	53.3	50.1		
0.23	تعداد شاخه فرعی	Karaj	-Fe	5.6	5.6	4.6	3.6	4.6	4.6	5.6	4.3	5.3	3.0	4.6	3.6	6.0	4.6	15.9
			+Fe	6.3	6.0	5.3	4.0	6.0	6.0	6.6	4.3	6.0	4.3	5.3	4.3	6.3	5.4	
	Branches per plant	Dezful	-Fe	7.6	4.6	3.3	6.3	4.6	3.3	4.3	4.3	4.0	5.0	4.0	2.0	3.3	4.3	20.6
			+Fe	8.0	5.3	4.6	6.6	6.0	4.3	5.3	5.0	5.3	5.3	5.0	3.6	4.0	5.2	
	Khomein	-Fe	8.3	5.0	6.0	5.0	7.0	5.6	6.0	7.0	7.6	8.3	8.3	8.0	7.0	6.8	8.5	
		+Fe	8.3	6.3	7.0	6.0	7.3	7.0	6.3	7.3	8.3	8.3	8.3	9.0	7.3	7.4		
	Shiraz	-Fe	7.0	6.0	6.3	7.0	7.0	6.0	7.6	7.0	6.3	7.3	7.3	6.3	7.0	6.7	7.2	
		+Fe	8.3	6.6	7.0	7.0	8.0	7.0	7.6	7.6	6.3	7.6	7.6	6.6	7.3	7.2		

ادامه جدول ۵-

Table 5- Continued

Table 3 - Continued																				
صفت	مکان	نانوکود آهن	ژنوتیپ													میانگین	درصد تغییر	LSD		
Trait	Location	Fe Nano-fertilizer	Genotype													Mean	% Change	(5%)		
			C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	Mashhad					
عملکرد زیست توده (کیلوگرم در هکتار) Biomass yield (kg ha ⁻¹)	Karaj	-Fe	3362	4621	3875	3297	3765	2888	4211	3186	2566	3123	2477	3261	3915	3426	5.7	64.94		
		+Fe	3516	4783	4100	3533	3866	3076	4316	3390	2850	3366	2850	3450	4016	3624				
	Dezful	-Fe	3352	2844	2208	4002	4035	3543	3680	3844	4058	5093	4976	4252	3920	3831	3.8			
		+Fe	3456	3352	2650	3940	4200	3630	3660	3950	4250	5143	4923	4316	4233	3977				
	Khomein	-Fe	3458	4031	3110	3768	3648	4070	3865	3330	3993	3643	3433	3293	3893	3656	1.9			
		+Fe	3550	3983	3183	3766	3730	4033	3906	3500	4050	3800	3566	3356	4033	3727				
	Shiraz	-Fe	3490	2915	2874	3037	2941	2085	2658	2618	2251	2175	2894	2499	3134	2736	8.6			
		+Fe	3523	3033	3053	3093	3166	2650	2883	2960	2483	2716	3066	2683	3333	2972				
	شاخص برداشت (درصد) HI (%)	Karaj	-Fe	34.4	31.7	25.9	29.6	27.8	24.3	28.3	25.1	24.6	27.3	25.2	22.6	26.3	27.1		5.6	0.64
			+Fe	35.0	31.3	27.2	31.5	28.8	25.4	29.1	27.4	26.8	29.1	30.0	24.6	27.0	28.7			
		Dezful	-Fe	39.5	29.2	25.0	40.3	35.6	30.4	38.0	36.3	36.6	39.6	43.5	40.0	36.3	36.1		5.9	
			+Fe	42.0	31.6	30.8	41.5	37.8	36.2	39.0	37.7	38.3	41.3	45.1	40.2	36.9	38.3			
Khomein		-Fe	39.2	36.9	31.9	40.3	32.9	36.1	37.8	32.5	37.1	35.6	36.1	33.1	37.0	35.8	5.6			
		+Fe	42.2	39.5	33.9	42.9	35.1	38.4	39.2	34.8	38.2	37.1	39.2	34.7	37.6	37.9				
Shiraz		-Fe	37.4	28.0	26.5	33.9	28.0	19.8	29.7	26.5	23.9	23.6	33.3	25.0	33.7	28.4	12.9			
		+Fe	40.2	31.2	29.9	36.1	31.3	26.4	33.9	31.2	28.8	27.7	36.7	28.5	35.2	32.0				

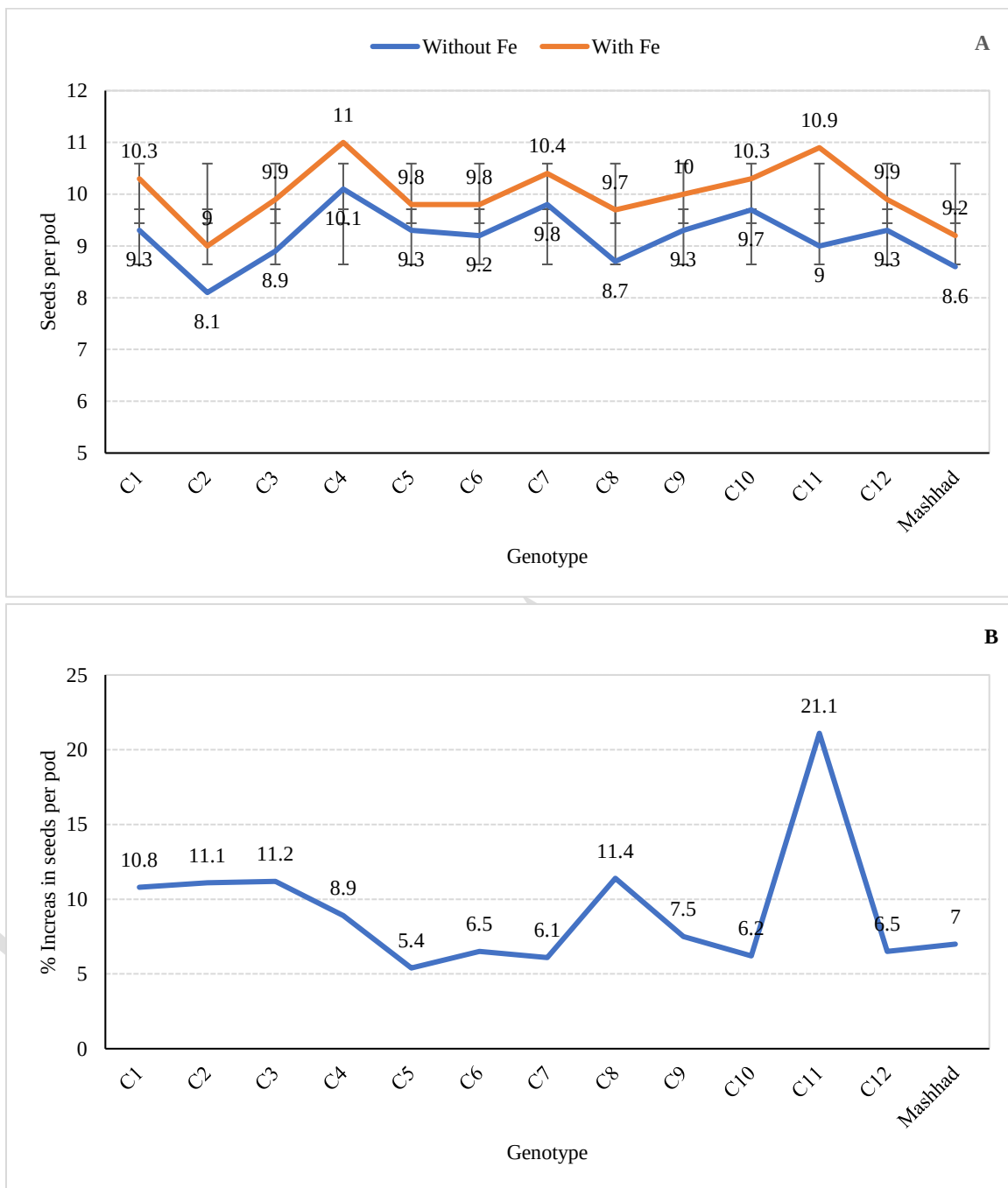
نتایج نشان داده است که ارتفاع بوته لوبیا چشم‌بلبلی با تولید ماده خشک ارتباط دارد. تأثیر مستقیم ارتفاع گیاه بر ماده خشک اندام هوایی مربوط به ماده خشک ساقه و شاخه است، به‌طوری که گیاهان بلندتر ماده خشک ساقه و شاخه‌های بیشتری دارند. افزایش ارتفاع بوته در اثر تیمار بذور با نانوذرات آهن احتمالاً به علت تأثیر بر رشد رویشی گیاه بوده و باعث افزایش تعداد گره‌های بوته شده و در نهایت باعث افزایش تعداد گیرنده‌های نوری و فتوسنتز بالاتر شده‌اند (Digrado et al., 2022). این امر با نظر فراهانی و همکاران (Farahani, Sangi, Dorri, Bamdad, & Mahdih, 2014) در لوبیا نیز مطابقت دارد. طبق نتایج آزمایش‌های دیگری نیز که روی گیاهان اسپرس (Tadayyon & Raiesi, 2008) و عدس (Nadri, 2014) انجام شد، مصرف آهن باعث افزایش ارتفاع بوته شد. محققین دیگر نیز اعلام کردند که استفاده از کودهای حاوی ذرات نانو باعث افزایش ارتفاع گیاه گندم می‌شود (Xiao, 2008). Zhang, Wang, Zhang, & Zhang, 2008). از آنجا که عنصر آهن نقش اساسی در تعداد گرانای کلروپلاست دارد، در اثر کمبود آهن اندازه کلروپلاست کاهش می‌یابد و در نهایت در اثر کاهش فرآورده‌های فتوسنتزی منجر به کاهش ارتفاع گیاه می‌شود (Ning et al., 2023). به نژادی برای ایجاد کانوپی و بوته‌های بلندتر ممکن است به انتخاب ارقام علوفه‌ای پرمحصول کمک کند (Digrado et al., 2022). مطالعات دیگر نیز یک همبستگی مثبت بین ارتفاع بوته و عملکرد دانه در لوبیا چشم‌بلبلی گزارش کرده‌اند (Thapa, Adhikari, Darai, & Kandel, 2021)، که مد نظر قرار دادن ارتفاع بوته را به‌عنوان صفتی برای انتخاب برای بهبود عملکرد دانه پیشنهاد می‌کند (Digrado et al., 2022).

افزایش معنی‌دار ماده خشک اندام هوایی (عملکرد زیست توده) و شاخص برداشت ژنوتیپ‌ها در اثر مصرف نانوکود آهن در سطح احتمال یک درصد مشاهده شد (جداول ۳ و ۵). در هر دو شرایط مصرف نانوکود آهن، تنها چهار لاین (C1, C4, C7 و C11) شاخص برداشت دانه بالاتر از میانگین داشتند. لاین C3 با وجود این که کمترین عملکرد دانه را در هر دو شرایط کودی داشت، پس از لاین C6، از نظر شاخص برداشت دانه بیشترین واکنش مثبت (افزایش ۱۱/۴ درصد) را به مصرف نانوکود آهن نشان داد. لاین C11 در دزفول با مصرف نانوکود آهن بیشترین شاخص برداشت دانه (۴۵/۱ درصد) را داشت و کمترین مقدار این شاخص (۱۹/۸ درصد) مربوط به لاین C6 در شیراز و در شرایط عدم مصرف نانوکود آهن بود. در مجموع مناطق مورد بررسی و در هر دو شرایط کودی، لاین‌های C3 و C1 به‌ترتیب کمترین و بیشترین درصد شاخص برداشت را داشتند. هم‌چنین، مصرف نانوکود آهن باعث افزایش ۷/۳ درصدی شاخص برداشت دانه در مجموع مناطق شد (جدول ۷). طبق نتایج تحقیقات انجام شده، بسیاری از تغییرات مشاهده شده در مقادیر شاخص برداشت ناشی از طیف متنوع اقلیم و خاک است که از ویژگی‌های هر منطقه زراعی است. بنابراین، یافتن روابط بین اقلیم منطقه و شاخص برداشت ممکن است برای تغییر شاخص برداشت از نظر زمانی و مکانی استفاده شود. از آنجایی که شاخص برداشت تحت تأثیر مدیریت زراعی متفاوت است، این احتمال وجود دارد که انتخاب برای شاخص برداشت، پتانسیل عملکرد بالا را تنها در محیطی که برای آن انتخاب شده است، تضمین کند. این موضوع ممکن است لزوماً به انعطاف‌پذیری عملکرد در هر دو شرایط نرمال و تنش‌زا منجر نشود. شاخص برداشت ممکن است به‌عنوان معیاری استفاده شود تا نشان دهد که می‌توان اقدامات بیشتری برای بهبود عملکرد انجام داد، اما برهمکنش بین شاخص برداشت و تغییرات محیطی پیچیده بوده و ممکن است بر اساس آن نتوان با عملکرد کل ارتباط برقرار کرد. به‌طور کلی، افزایش شاخص برداشت توسط هر دو عامل منبع و مقصد محدود می‌شود. از نظر تئوری، شاخص برداشت دارای یک حداکثر است و افزایش بیش از این نیاز به زیست توده اندام هوایی بیشتری دارد (Smith, Rao, & Merchant, 2018).

به اعتقاد محققین، ژنوتیپ‌های متحمل به کمبود آهن، محتوای آهن بیشتری را نشان می‌دهند که منجر به بهبود رشد ریشه و افزایش عملکرد ماده خشک گیاه در شرایط آهن کم می‌شود (Nogiya, Pandey, & Singh, 2016; Mishra et al., 2020). آهن نقش کلیدی در تشکیل کلروفیل و فتوسنتز داشته و از اهمیت زیادی در سیستم آنزیمی و تنفس گیاهان برخوردار می‌باشد، بنابراین کاربرد آن اثر مثبت بر تولید ماده خشک گیاه خواهد داشت (Briat, Curie, & Gaymard, 2007). نتایج آزمایش‌های مختلف نشان می‌دهد که ماده خشک بالا، محتوای ماده آلی خاک را به نفع محصول بعدی تناوب افزایش می‌دهد. در میان ژنوتیپ‌ها، رقم مشهد ماده خشک بیشتری تولید کرد. این موضوع می‌تواند به کشاورزان در بهبود وضعیت حاصلخیزی خاک در صورت انتخاب برای استفاده در سیستم‌های تناوب کمک کند (Simunji, Munyinda, Lungu, Mweetwa, & Phiri, 2019).

همان‌طور که در جداول ۶ و ۷ مشاهده می‌شود، لاین C4 از نظر تعداد غلاف در بوته، در وضعیت بهتری نسبت به سایر لاین‌ها و رقم مشهد قرار دارد، اگرچه وزن صد دانه آن نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها در هر دو شرایط کودی و در میانگین مناطق مورد بررسی کمتر است. عملکرد دانه این لاین در شرایط عدم مصرف نانوکود آهن، با میانگین ۱۲۹۶ کیلوگرم در هکتار، در رتبه اول قرار دارد. در مجموع مناطق مورد بررسی، تنها دو لاین C4 و C11 از نظر تعداد غلاف در بوته، در شرایط مصرف نانوکود آهن نسبت به رقم مشهد برتری داشتند اما در شرایط عدم مصرف نانوکود آهن، تعداد غلاف در بوته همه لاین‌ها کمتر از رقم مشهد بود. منطقه دزفول از نظر این صفت برتری قابل توجهی نسبت به سایر مناطق داشت و در هر دو شرایط کودی بیشترین تعداد غلاف در بوته مربوط به این لاین بود. لاین C8 در منطقه خمین و در مجموع مناطق کمترین تعداد غلاف در بوته را نشان داد. در مجموع مناطق مورد بررسی، مصرف نانوکود آهن باعث افزایش ۱۷/۳ درصدی تعداد غلاف در بوته شد. بیشترین واکنش مثبت به مصرف نانوکود آهن با ۴۳ درصد افزایش، مربوط به لاین C11 و در بین مناطق مورد بررسی، با ۳۲/۵ درصد مربوط به منطقه خمین بود.

از نظر تعداد دانه در غلاف، در هر دو شرایط کودی، همه لاین‌ها به جز لاین C2 از رقم مشهد برتر بودند. لاین C4 در هر دو شرایط کودی بیشترین تعداد دانه در غلاف را داشت. لاین C11 با وجود اینکه در شرایط مصرف نانوکود آهن پس از لاین C4 تعداد دانه در غلاف بیشتری تولید کرد، اما در شرایط عدم مصرف نانوکود، کاهش قابل توجهی در تعداد دانه در غلاف نشان داد (شکل ۱A). با این وجود، بیشترین واکنش مثبت به مصرف نانوکود آهن با ۲۱/۱ درصد افزایش تعداد دانه در غلاف مربوط به این لاین بود (شکل ۱B). یکی از دلایل کم بودن تعداد دانه در غلاف و بوته در شرایط عدم مصرف آهن، کمبود مواد فتوسنتزی لازم برای رشد جنین و تکامل بذر است. با کاهش منبع، ظرفیت تعدادی از مخازن خالی می‌ماند و عملاً تعدادی از دانه‌ها در گیاه لوبیا سقط می‌شوند (Daylami & Mojaddam, 2019). صفاپور و همکاران (Safapur, Ardakani, Rejali, Khagani, & Teymuri, 2010) در بررسی‌های خود در گیاه لوبیا اعلام کردند که در ژنوتیپ‌های مختلف با تیپ رشدی متفاوت، صفت تعداد دانه در غلاف دارای اختلاف معنی‌دار می‌باشد. قنبری و طاهری مازندرانی (Ghanbari & Taheri Mazandarani, 2003) گزارش دادند که تغییرات تعداد دانه در غلاف کمتر تحت تأثیر عوامل محیطی قرار می‌گیرد و این صفت بیشتر تحت کنترل ژنتیکی است. محققین گزارش کردند که در حبوبات، تعداد دانه در بوته تقریباً موازی با تعداد غلاف تغییر می‌کند زیرا تعداد دانه در غلاف تقریباً ثابت است (Tanaka, 1980).



شکل ۱- میانگین تعداد دانه در غلاف ژنوتیپ‌های لوبیا چشم‌بلبلی در دو شرایط کودی (A) و درصد افزایش آن در تحت تأثیر مصرف نانوکود آهن (B)

Figure 1- No. of seeds per pod in the cowpea genotypes under two fertilization conditions (A) and its increase (%) under the influence of iron nano-fertilizer application (B)

در مطالعات مختلف تأثیر معنی‌دار مصرف نانوکود آهن بر بهبود عملکرد و اجزای عملکرد گیاهان زراعی گزارش شده است (Farahani et al., 2014; Ighaiee Oskoie et al., 2018; Bayat, Ghanbari, & Bayramzade, 2020). دلیل تغییرات اجزای گیاهی، تعداد بیشتر ذرات در واحد وزن و سطح ویژه ذرات نانو مقیاس می‌باشد که باعث تماس بیشتر کود با گیاه و در نتیجه افزایش جذب آهن می‌شود. علاوه بر این، نانوذرات آهن با اندازه کمتر از ۱۰۰ نانومتر، احتمالاً بازده آهن را بیشتر و حلالیت آن را در آب مؤثرتر می‌کند، بنابراین فعالیت نانو ذرات افزایش یافته و در نتیجه عملکرد گیاه را بهبود می‌بخشد (Joseph & Morrison, 2006). طبق یافته‌های ایرانشاهی و همکاران (Iranshahi, Sajedi, & Changizi, 2013)، نانو ذرات آهن بر اجزای عملکرد لوبیا (تعداد غلاف در بوته، تعداد دانه در غلاف، وزن دانه) و طول غلاف تأثیر مستقیم دارد. در بررسی اثرات نانوکود آهن و مقایسه آن با سولفات آهن و کلات آهن بر رشد و محصول دو رقم لوبیا چیتی، محققین به این نتیجه رسیدند که ترکیبات آهن و نوع رقم بر همه صفات مورد مطالعه اثر معنی‌دار داشتند و تیمار نانوکود بیشترین تأثیر را بر اجزای عملکرد نشان داد (Farahani et al., 2014). در آزمایش دیگری، استفاده از نانوکود آهن در گیاه لوبیا چشم‌بلبلی، تعداد غلاف در بوته و وزن صد دانه را به‌ترتیب ۴۷ و ۷۵ درصد نسبت به شاهد افزایش داد (Delfani, Firouzabadi, Farrokhi, & Makarian, 2014).

مطابق نتایج آزمایش حاضر (جداول ۶ و ۷)، در شرایط عدم کاربرد نانوکود آهن، تعداد غلاف در بوته، تعداد دانه در غلاف و در نتیجه تعداد دانه در بوته به مقدار قابل توجهی کمتر از زمانی بود که نانوکود آهن مصرف شد. بیشترین و کمترین تعداد دانه در بوته، به‌ترتیب مربوط به لاین‌های C4 و C2 در مناطق دزفول و خمین بود. منطقه خمین، کمترین میانگین تعداد دانه در بوته را در بین مناطق مورد بررسی و در هر دو شرایط کودی داشت. در مجموع مناطق، لاین C4 برترین ژنوتیپ از نظر تعداد دانه در بوته بود. میانگین افزایش تعداد دانه در بوته ژنوتیپ‌ها در اثر مصرف نانوکود آهن، ۲۶/۶ درصد بود. در آزمایش حاضر، منطقه دزفول از نظر وزن صد دانه نسبت به سایر مناطق برتر بود. در این صفت نیز، منطقه خمین کمترین وزن صد دانه را در هر دو شرایط کودی داشت اما در بین مناطق، بیشترین واکنش مثبت (۵/۴ درصد) را به مصرف نانوکود آهن نشان داد. لاین C4 با وجود اینکه کمترین وزن صد دانه را در هر دو شرایط کودی نشان داد، اما واکنش آن به مصرف نانوکود آهن بیش از سایر ژنوتیپ‌ها بود و مصرف نانوکود باعث افزایش ۱۲/۷ درصدی وزن دانه آن شد. وزن دانه یک خصوصیت ژنتیکی است که مقدار آن متأثر از شرایط دوران رشد نیز می‌باشد. این شرایط ممکن است موجب تغییراتی بین ۲۰ تا ۳۰ درصد در وزن دانه شوند (Ighaiee Oskoie, 2018). یافته‌های محققین دیگر نیز نتایج مشابهی را نشان داده است به‌طوری که اثر کودهای مختلف را روی گیاه لوبیا بررسی کرده و نتیجه گرفتند که وزن صد دانه تحت تأثیر کاربرد کود افزایش می‌یابد (Qadiri, Mutawakel, & Saeedi, 2023).

عملکرد دانه که به‌عنوان مهم‌ترین معیار ارزیابی و مقایسه ارقام در آزمایشات مختلف بررسی می‌شود، در ژنوتیپ‌های مورد بررسی تفاوت قابل توجهی نشان داد (جداول ۶ و ۷). در هر دو شرایط کودی، تنها سه لاین C1، C4 و C11 عملکرد بیشتری نسبت به رقم مشهد داشتند اما نسبت به میانگین عملکرد ژنوتیپ‌ها، عملکرد هفت لاین بیشتر بود. در شرایط عدم مصرف نانوکود آهن، میانگین عملکرد دانه ژنوتیپ‌ها در چهار منطقه، ۱۲۹۶-۸۳۳ کیلوگرم در هکتار و در شرایط مصرف نانوکود آهن، ۱۴۰۴-۹۸۳ کیلوگرم در هکتار بود. با مصرف نانوکود آهن، درصد افزایش عملکرد دانه با میانگین ۱۰/۴ درصد،

بین ۷/۳-۱۹/۶ درصد در بین مناطق متغیر بود. لاین C3 در هر دو شرایط مصرف و عدم مصرف نانوکود آهن کمترین عملکرد دانه را نشان داد اما درصد تغییر عملکرد دانه آن (۱۷/۹ درصد) در واکنش به مصرف نانوکود آهن بیشتر از سایر لاین‌ها و رقم مشهود بود. منطقه دزفول از نظر عملکرد دانه برترین منطقه بود و منطقه شیراز با توجه به نتایج هم‌زمان، در مقایسه با سایر مناطق برای تولید دانه مناسب نبود.

گیاهان برای فرایندهای مهم بیوشیمیایی و متابولیکی به آهن نیاز دارند. کمبود یا بیشبود آهن در محیط، منجر به محدودیت رشد و نمو و عملکرد گیاهان می‌شود. آگاهی از سیگنال‌ها و عوامل مؤثر بر هر یک از مراحل جذب آهن از خاک و توزیع آن در گیاه، درک ما را نسبت به تغذیه معدنی گیاه بهبود می‌بخشد. در خصوص کمبود آهن، سرعت تثبیت دی اکسید کربن و فتوسنتز در واحد سطح برگ کاهش پیدا می‌کند و در نتیجه با کاهش ذخیره نشاسته و قند در برگ‌ها، وزن دانه و عملکرد اقتصادی کاهش می‌یابد ([Alvarez-Fernandez, Garcia-Lavifia, Fidalgo, Abadia, & Abadia, 2004](#)).

مطابق نتایج آزمایش حاضر، در تحقیقات مختلف گزارش شده است که کاربرد نانوکودها باعث افزایش معنی‌دار عملکرد گیاهان زراعی در مقایسه با تیمارهای بدون مصرف نانوکود می‌شود که علت اصلی آن بهبود رشد اجزای گیاه و فرایندهای متابولیک مانند فتوسنتز و در نتیجه تجمع بیشتر محصولات فتوسنتزی و انتقال آنها به اندام‌های اقتصادی گیاه ذکر شده است ([Joseph & Morrison, 2006](#); [Dhaliwal et al., 2022](#)).

در تحقیقی که بر روی گیاه لوبیا چشم‌بلبلی انجام شد، کاربرد بیشترین سطح نانو کلات آهن (۳ در هزار) باعث تولید بیشترین عملکرد دانه (۱۰۲۱ کیلوگرم در هکتار) شد ([Sabeki, Asgharipour, Ghanbari, & Miri, 2017](#)). محققین معتقدند که بهبود عملکرد توسط نانوکود می‌تواند ناشی از کارایی ساختار نانو در رسانش و فراهمی بهینه عنصر آهن در فرایندهای فیزیولوژیکی باشد. احتمالاً با فعال شدن فرایندهای فیزیولوژیکی تشکیل کلروفیل افزایش یافته که در پی آن موجب بهبود فرایند فتوسنتز شده و منجر به افزایش عملکرد می‌شود ([Maghsoodi & Najafi, 2017](#)). از طرفی، عملکرد دانه که مهم‌ترین صفت مورد مطالعه در آزمایش‌های مختلف در گیاهان زراعی است، به طور معنی‌داری تحت تأثیر ژنوتیپ قرار دارد ([Ghanbari, 2022](#)). ژنوتیپ‌های مورد بررسی در آزمایش حاضر، از نظر واکنش به مصرف نانوکود آهن تفاوت قابل توجهی داشتند. لاین C3 در هر دو شرایط کودی کمترین عملکرد دانه را تولید کرد اما بیشترین مقدار واکنش به مصرف نانوکود آهن را به خود اختصاص داد و از این نظر کارآمدترین ژنوتیپ بود. ژنوتیپ کارآمد از نظر جذب و مصرف مواد مغذی، ژنوتیپی است که در شرایط یکسان با مقدار معینی از مواد غذایی مصرف شده یا جذب شده نسبت به سایر ژنوتیپ‌ها عملکرد اقتصادی بیشتری تولید می‌کند ([Dhaliwal et al., 2022](#)). با توجه به خواص ویژه نانومواد مانند نسبت سطح به حجم بیشتر، ظرفیت جذب بالاتر، استفاده هدفمند و رهاسازی کنترل شده، مشخص شده است که نانوکودها از نظر تأمین مواد غذایی ضروری گیاهان کارآمد هستند ([Tripathi, Shweta Singh,](#)

[Singh, Pandey, & Chauhan, 2017](#); [Mittal, Kaur, Singh, Yadav, & Ali, 2020](#)

جدول ۶- مقایسه میانگین عملکرد و اجزای عملکرد ژنوتیپ‌های لوبیا چشم‌بلبلی در مناطق مورد بررسی تحت شرایط مصرف و عدم مصرف نانوکود آهن

Table 6- The means of yield and its components of cowpea genotypes in the studied locations under two conditions of Nano-fertilization (-Fe, without iron; +Fe, with iron)

LSD (5%)	درصد تغییر % Change	میانگین Mean	ژنوتیپ Genotype													نانوکود آهن Fe Nano-fertilizer	مکان Location	صفت Trait	
			C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	Mashhad				
0.39	8.0	14.2	19.3	14.7	15.7	13.0	17.6	8.6	16.6	14.6	17.9	8.6	10.5	13.7	15.0	-Fe	Karaj	تعداد غلاف	
																+Fe			16.3
	18.0	17.2	14.5	17.0	12.0	12.3	15.6	14.3	8.5	4.8	8.8	10.3	6.5	9.0	5.4	6.0	9.6	Khomein	Pods per plant
	32.5	9.9	7.4	7.2	5.6	5.6	10.0	8.5	4.8	8.8	10.3	6.5	9.0	5.4	6.0	9.6	Khomein	Pods per plant	
																			+Fe
	18.3	10.9	9.2	10.0	7.0	8.0	8.6	8.0	12.6	8.6	10.0	10.6	10.3	11.3	10.6	10.3	-Fe	Shiraz	Pods per plant
																	+Fe		
	4.27	18.5	132.5	166.3	128.1	153.4	127.8	156.5	71.4	167.9	131.3	175.9	93.6	95.5	122.6	133.0	-Fe	Karaj	تعداد دانه در بوته
																	+Fe		
22.5		147.8	162.9	123.4	133.1	161.3	157.0	98.2	156.6	145.8	114.4	280.5	184.0	114.4	114.4	114.4	90.6	Dezful	Seeds per plant
52.3		93.2	61.1	50.6	46.0	42.9	80.2	63.6	35.2	81.2	89.0	55.6	77.1	45.2	41.9	86.9	Khomein	Seeds per plant	
																			+Fe
27.8		86.5	90.6	70.0	63.3	86.6	80.3	118.3	83.6	91.3	100.3	103.6	69.0	74.6	93.6	131.3	-Fe	Shiraz	Seeds per plant
																	+Fe		

ادامه جدول ۶-

Table 6- Continued

صفت Trait	مکان Location	نانوکود آهن Fe Nano-fertilizer	ژنوتیپ Genotype													میانگین Mean	درصد تغییر % Change	LSD (5%)
			C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	Mashhad			
وزن صد دانه (گرم)	Karaj	-Fe	22.5	21.9	21.6	19.1	19.9	20.6	20.4	20.8	19.7	20.1	19.0	18.5	21.0	20.3	2.2	0.18
		+Fe	22.8	22.1	22.1	20.3	20.3	21.0	20.8	20.8	20.1	20.6	20.0	19.1	21.1	20.8		
	Dezful	-Fe	20.4	24.9	24.9	14.5	22.6	23.6	21.7	21.6	21.6	18.7	22.3	24.0	23.2	21.8	2.4	

100 seed		+Fe	21.0	25.0	25.0	17.0	23.1	23.6	22.0	22.1	22.3	19.3	23.0	24.1	23.5	22.3	
weight (g)	Khomein	-Fe	13.7	14.1	13.2	14.0	13.0	12.5	14.2	14.7	13.6	12.5	14.8	12.1	13.1	13.5	5.4
		+Fe	14.6	15.0	14.0	15.3	13.6	13.3	15.3	15.0	14.0	13.0	15.3	12.6	14.0	14.2	
	Shiraz	-Fe	23.5	21.3	20.4	15.0	20.2	20.2	19.9	19.5	20.4	19.8	19.2	19.9	19.6	19.9	3.5
		+Fe	24.3	21.6	20.6	18.0	20.6	20.3	20.6	20.0	21.0	20.6	20.0	20.3	20.3	20.6	
عملکرد دانه	Karaj	-Fe	1162	1471	1009	980	1048	704	1195	803	632	856	627	744	1032	943	10.7
		+Fe	1233	1500	1117	1116	1119	783	1250	933	766	983	850	850	1083	1044	
(کیلوگرم در هکتار)	Dezful	-Fe	1352	827	558	1635	1452	1226	1413	1428	1525	2027	2176	1719	1453	1445	7.8
		+Fe	1466	1058	816	1666	1600	1333	1450	1516	1666	2133	2234	1750	1583	1559	
Grain yield (kg ha ⁻¹)	Khomein	-Fe	1358	1498	993	1518	1215	1470	1465	1096	1483	1303	1246	1093	1443	1321	7.3
		+Fe	1500	1583	1083	1616	1316	1550	1533	1216	1550	1416	1400	1166	1516	1418	
	Shiraz	-Fe	1307	825	774	1054	841	419	824	718	541	565	984	633	1067	811	19.6
		+Fe	1416	950	916	1133	1000	700	1000	933	716	783	1133	766	1183	971	

29.53

جدول ۷- درصد تغییرات صفات مورد بررسی در ژنوتیپ‌های لوبیا چشم‌بلبلی در همه مناطق تحت شرایط مصرف و عدم مصرف نانوکود آهن

Table 7- Changes (%) of the studied traits cowpea genotypes in all locations under two conditions of Nano-fertilization (-Fe, without iron; +Fe, with iron)

صفت Trait	نانوکود آهن Fe Nano-	ژنوتیپ Genotype												
	fertilizer	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	Mashhad
تعداد روز تا رسیدگی Days to maturity	-Fe	103.2	101.5	101.3	99.0	108.9	106.7	104.3	101.8	107.7	108.8	100.9	106.5	106.7
	+Fe	99.9	98.3	98.0	96.1	104.4	102.7	101.4	98.8	103.8	104.3	98.1	102.6	102.7
	%Change	-3.22	-3.13	-3.21	-2.95	-4.13	-3.77	-2.71	-2.95	-3.69	-4.14	-2.82	-3.68	-3.68
ارتفاع بوته Plant height	-Fe	65.5	54.5	58.4	53.6	68.3	71.0	62.4	60.5	61.5	61.7	62.4	64.8	66.8
	+Fe	70.0	59.5	62.8	58.1	71.9	74.4	65.8	64.5	64.7	65.8	66.4	67.8	69.2
	%Change	6.86	9.12	7.52	8.34	5.27	4.82	5.48	6.61	5.12	6.72	6.28	4.63	3.59
تعداد شاخه فرعی Branches per plant	-Fe	7.1	5.3	5.0	5.4	5.8	4.8	5.8	5.6	5.8	5.9	6.0	4.9	5.8
	+Fe	7.7	6.0	5.9	5.9	6.8	6.0	6.4	6.0	6.4	6.3	6.5	5.8	6.2
	%Change	8.42	14.15	18.32	7.76	17.67	24.62	9.79	7.08	11.64	8.05	8.26	18.09	6.87
عملکرد زیست توده Biomass yield	-Fe	3415	3602	3016	3526	3597	3146	3603	3244	3217	3508	3445	3326	3715
	+Fe	3511	3787	3246	3583	3740	3347	3691	3450	3408	3756	3601	3451	3903
	%Change	2.80	5.13	7.62	1.62	3.98	6.38	2.44	6.33	5.94	7.06	4.54	3.76	5.07
شاخص برداشت HI	-Fe	37.6	31.4	27.3	36.0	31.0	27.6	33.4	30.1	30.5	31.5	34.5	30.1	33.3
	+Fe	39.8	33.4	30.4	38.0	33.2	31.6	35.3	32.7	33.0	33.8	37.7	32.0	34.1
	%Change	5.91	6.20	11.44	5.48	7.00	14.29	5.53	8.89	8.10	7.22	9.34	6.05	2.55
تعداد غلاف در بوته Pods per plant	-Fe	10.8	10.4	10.8	13.2	11.7	12.3	12.3	8.9	12.1	11.8	10.4	9.8	13.3
	+Fe	13.3	11.8	12.4	16.2	13.7	13.4	13.7	10.7	13.5	13.8	14.8	11.4	14.3
	%Change	23.84	14.18	15.28	22.50	17.23	9.35	11.36	20.51	11.98	17.58	43.03	16.54	7.48
تعداد دانه در بوته Seeds per plant	-Fe	101.0	88.3	98.4	138.7	111.5	114.3	122.3	80.7	114.3	98.1	91.8	117.6	107.0
	+Fe	138.6	109.3	124.3	180.3	136.0	132.8	142.9	105.6	135.9	143.8	164.9	113.3	134.1
	%Change	37.24	23.71	26.29	30.05	21.92	16.20	16.86	30.76	18.85	26.19	68.04	23.32	14.09
وزن صد دانه 100 seed weight	-Fe	20.0	20.5	20.0	15.6	18.9	19.2	19.0	19.1	18.8	17.7	18.8	18.6	19.2
	+Fe	20.6	20.9	20.4	17.6	19.4	19.5	19.6	19.4	19.3	18.3	19.5	19.0	19.7
	%Change	3.25	1.82	2.00	12.78	2.51	1.69	3.28	1.70	2.79	3.38	3.98	2.15	2.60
عملکرد دانه Grain yield	-Fe	1294	1155	833	1296	1139	954	1224	1011	1045	1187	1258	1047	1248
	+Fe	1403	1272	983	1382	1258	1091	1308	1149	1174	1328	1404	1133	1341
	%Change	8.42	10.17	17.94	6.63	10.51	14.32	6.86	13.67	12.37	11.87	11.60	8.19	7.41

برای تعیین واکنش ژنوتیپ‌های مورد مطالعه به محیط‌های مختلف، شاخص‌های محیطی و ژنوتیپی بررسی شدند که نتایج مربوطه در جدول ۸

آورده شده است. شاخص محیطی نشان‌دهنده وضعیت محیط آزمایش می‌باشد. به عبارت دیگر، هر چه شاخص محیطی بیشتر باشد، شرایط محیطی برای

رشد و نمو محصول بهتر است. شاخص محیطی به عواملی مانند اقلیم، خواص فیزیکی و شیمیایی خاک، مقدار و نوع آبیاری، نحوه تغذیه، مدیریت مزرعه، آفات و بیماری‌ها و غیره بستگی دارد.

جدول ۸- عملکرد دانه و شاخص‌های ژنوتیپی و محیطی ژنوتیپ‌های لوبیا چشم‌بلبلی در مناطق مورد بررسی.

Table 8- Grain yield (kg ha^{-1}) and genotypic and environmental indices of cowpea genotypes in the studied locations.

ژنوتیپ Genotype	مکان Location				میانگین Mean	شاخص ژنوتیپی Genotypic index	درصد تغییر % Change
	کرج Karaj	دزفول Dezful	خمین Khomein	شیراز Shiraz			
C1	1198	1409	1429	1362	1350	160	13.44
C2	1486	957	1540	887	1218	28	2.35
C3	1063	688	1038	845	909	-281	-23.61
C4	1048	1651	1567	1093	1340	150	12.61
C5	1082	1526	1266	920	1199	9	0.76
C6	744	1280	1510	559	1023	-167	-14.03
C7	1222	1431	1499	912	1266	76	6.39
C8	868	1472	1157	825	1081	-109	-9.16
C9	700	1596	1516	629	1110	-80	-7.26
C10	919	2080	1360	674	1258	68	5.71
C11	738	2205	1323	1058	1331	141	11.85
C12	797	1734	1130	700	1090	-100	-8.40
Mashhad	1057	1518	1480	1125	1295	105	8.82
Mean	994	1504	1371	892	1190		
شاخص محیطی Environmental index	-196	314	181	-298			
درصد تغییر % Change	-16.47	26.39	15.21	-25.04			

میانگین عملکرد ژنوتیپ‌ها در مکان‌های مورد بررسی در جدول ۸ مشخص شده است. میانگین عملکرد کلیه ژنوتیپ‌ها در مکان‌های مورد بررسی ۱۱۹۰ کیلوگرم در هکتار بود. میانگین عملکرد ژنوتیپ‌ها در کرج، دزفول، خمین و شیراز به ترتیب ۹۹۴، ۱۵۰۴، ۱۳۷۱ و ۸۹۲ کیلوگرم در هکتار بود. با توجه به نتایج شاخص محیطی، بهترین منطقه برای کشت این ژنوتیپ‌ها، دزفول است.

شاخص محیطی برای شیراز و کرج به ترتیب ۲۹۸- و ۱۹۶- کیلوگرم و برای دزفول و خمین به ترتیب ۳۱۴ و ۱۸۱ کیلوگرم بود. به عبارت دیگر، شرایط محیطی در شیراز و کرج نسبت به مناطق دزفول و خمین نامناسب‌تر بود. با توجه به این شاخص، ژنوتیپ‌های مورد بررسی در دامنه مناسبی از محیط‌های مورد ارزیابی قرار گرفتند.

هر چه شاخص ژنوتیپی بیشتر باشد، شرایط ژنتیکی برای رشد و نمو محصول بهتر است. شاخص ژنوتیپی به عوامل مختلفی از جمله پتانسیل ژنتیکی ژنوتیپ‌ها و میزان تحمل به تنش‌های زیستی و غیر زیستی بستگی دارد. میانگین عملکرد کلیه ژنوتیپ‌ها در مکان‌های مختلف ۱۱۹۰ کیلوگرم در هکتار بود. میانگین عملکرد لاین C1 در مجموع مناطق ۱۳۵۰ کیلوگرم و بر این اساس شاخص ژنوتیپی آن ۱۶۰ کیلوگرم می‌باشد. این مقدار به معنی آن است که میزان عملکرد لاین C1 نسبت به میانگین کل ۱۳/۴۴ درصد بیشتر است. میانگین عملکرد رقم مشهد در مناطق، ۱۲۹۵ کیلوگرم در هکتار و شاخص ژنوتیپی آن ۱۰۵ کیلوگرم بود. این عدد معادل ۸/۸۲ درصد عملکرد بیشتر نسبت به میانگین کل می‌باشد (جدول ۸).

نتیجه‌گیری

مناطق مورد ارزیابی از نظر شاخص محیطی با یکدیگر تفاوت داشتند. بنابراین ژنوتیپ‌ها در دامنه‌ای از شرایط محیطی متفاوت کشت شدند. بر این اساس، منطقه دزفول بهترین محیط برای کشت گیاه لوبیا چشم‌بلبلی است. بر اساس شاخص ژنوتیپی، لاین C1 مناسب‌ترین ژنوتیپ بود و به همراه لاین‌های C4 و C11 که از عملکرد بالا و صفات مطلوب برخوردار بودند، می‌توانند به عنوان رقم برتر در اختیار کشاورزان قرار داده شوند. ژنوتیپ‌هایی که واکنش بهتری به مصرف نانوکود آهن نشان دادند، می‌توانند به عنوان منابع ژنی در برنامه‌های به‌نژادی لوبیا چشم‌بلبلی استفاده شوند. با وجود این که مصرف نانوکود آهن باعث بهبود رشد و نمو ژنوتیپ‌های مورد بررسی شد، اما از آنجا که درباره پیامدهای زیستی مصرف نانوکودها و جذب آنها توسط گیاهان گزارشات محدود وجود دارد و سوالات متعددی درباره سرنوشت و رفتار نانومواد در گیاهان باقی مانده است، استفاده از این نوع کودها باید با احتیاط بیشتری صورت گیرد.

سپاسگزاری

از اساتید و کارکنان دانشکده کشاورزی دانشگاه شاهد و مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر که در اجرای آزمایش و تهیه این مقاله نقش داشتند، سپاسگزاری می‌نماییم.

منابع

- Abbaspour, N., Hurrell, R. & Kelishadi, R. (2014). Review on iron and its importance for human health. *Journal of Research in Medical Science*, 19(2), 164-174.
- Abebe, B. K., & Alemayehu, M. T. (2022). A review of the nutritional use of cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp) for human and animal diets. *Journal of Agriculture and Food Research*, 10, 100383. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100383>

- Alfa, A. A., Tijani, K. B., Omotoso, O. D., Junaidu, Y., & Sezor, A. A. (2020). Nutritional values and medicinal health aspects of brown, brown-black and white cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp.) grown in Okene, Kogi State, Nigeria. *Asian Journal of Advanced Research and Reports*, 14(4), 114-124. <https://doi.org/10.9734/AJARR/2020/v14i430348>
- Aliyu, O. M., & Makinde, B. O. (2016). Phenotypic analysis of seed yield and yield components in cowpea (*Vigna unguiculata* L., Walp). *Plant Breeding and Biotechnology*, 4(2), 252-261. <https://doi.org/10.9787/PBB.2016.4.2.252>
- Alvarez-Fernandez, A., Garcia-Lavafia, P., Fidalgo, C., Abadia, J., & Abadia, A. (2004). Foliar fertilization to control iron chlorosis in pear (*Pyrus communis* L.) trees. *Plant and Soil*, 263(1), 5-15. <https://doi.org/10.1023/B:PLSO.0000047717.97167.d4>
- Bayat, N., Ghanbari, A. A., & Bayramzade, V. (2020). Nanopriming a method for improving crop plants performance: a case study of red beans. *Journal of Plant Nutrition*, 44(2), 1-10. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1806304>
- Briat, J. F., Curie, C., & Gaymard, F. (2007). Iron utilization and metabolism in plants. *Current Opinion in Plant Biology*, 10(3), 276-282. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2007.04.003>
- Cruz, C. D., Regazzi, A. J., & Carneiro, P. C. S. (2014). *Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético*. Viçosa: UFV.
- Cui, H. X., Sun, C. J., Liu, Q., Jiang, J., & Gu, W. (2010). *Applications of nanotechnology in agrochemical formulation, perspectives, challenges and strategies*. International Conference on Nanoagri. Sao Pedro, Brazil.
- Daylami, S., & Mojaddam, M. (2019). Studying the effect of application time of humic acid foliar spraying on qualitative and quantitative characteristics of cowpea (*Vigna unguiculata* L.) under different irrigation regimes. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 12(1), 85-94. (in Persian). <https://doi.org/10.22077/escs.2018.1056.1209>
- Delfani, M., Firouzabadi, M. B., Farrokhi, N. & 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. <https://doi.org/10.1080/00103624.2013.863911>
- Dhaliwal, S. S., Sharma, V., Shukla, A. K., Verma, V., Kaur, M., Shivay, Y. S., Nisar, S., Gaber, A., Brestic, M., Barek, V., Skalicky, M., Ondrisik, P., & Hossain, A. (2022). Biofortification-A frontier novel approach to enrich micronutrients in field crops to encounter the nutritional security. *Molecules*, 27, 1340. <https://doi.org/10.3390/molecules27041340>
- Digrado, A., Gonzalez-Escobar, E., Owston, N., Page, R., Baba Mohammed, S., Umar, M. L., Boukar, O., Ainsworth, E. A., & Carmo-Silva, E. (2022). Cowpea leaf width correlates with above ground biomass across diverse environments. *Legume Science*, 4(4), e144. <https://doi.org/10.1002/leg3.144>
- Fageria, N. K., & Santos, A. B. (2008). Yield physiology of dry bean. *Journal of Plant Nutrition*, 31, 983-1004. <https://doi.org/10.1080/01904160802096815>
- FAO (2022). FAOSTAT. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>
- Farahani, M., Sangi, M., Dorri, H. R., Bamdad, F., & Mahdieh, M. (2014). *Investigating the effect of iron oxide nanoparticles and comparing it with other iron sources on bean growth and yield*. 5th Iranian Pulses Symposium, Karaj, Iran.
- Farshadfar, E. (1998). *Application of quantitative genetics in plant breeding*. Razi University, Kermanshah, Iran.
- Farshadfar, E., & Sutka, J. (2006). Biplot analysis of genotype-environment interaction in durum wheat using the AMMI model. *Acta Agronomica Hungarica*, 54(4), 459-467. <https://doi.org/10.1556/AAgr.54.2006.4.8>

- Gancales, P. S., Bortoletto, N. A., Mellomartins, L., Costa, R. B., & Gallo, P. B. (2003). Genotype-environment interaction and phenotypic stability for girth growth and rubber yield hevea clones in saopaulo state, Brazil. *Genetics and Molecular Biology*, 26, 441-448. <https://doi.org/10.1590/S1415-47572003000400007>
- Gerrano, A. S., Jansen van Rensburg, W. S., & Adebola, P. O. (2017). Nutritional composition of immature pods in selected cowpea *Vigna unguiculata* (L.) Walp. genotypes in South Africa. *Australian Journal of Crop Science*, 11(2), 134-141. <https://doi.org/10.21475/ajcs.17.11.02.p72>
- Ghanbari, A. A. (2022). Grain yield efficiency index, a criterion for selecting the best bean genotypes in drought stress conditions. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 52(4), 63-71. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/ijfcs.2020.302878.654721>
- Ghanbari, A. A., & Taheri Mazandarani, M. (2003). Effects of planting arrangement and weed control on yield and yield components of red bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cv. Akhtar. *Seed and Plant Journal*, 19(1), 37-47. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/spij.2017.110938>
- Ghanbari, A. A., Dorri, H. R., Sheikh, F., Sekhavat, R., & Darvishi, B. (2018). *Technical instructions for the production of irrigated pulses seeds (common beans, fava bean, mung bean, cowpea)*. AREEO, SPII, Karaj, Iran.
- Hasanuzzaman, M., & Fujita, M. (2022). Plant Responses and Tolerance to Salt Stress: Physiological and Molecular Interventions. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(9), 4810. <https://doi.org/10.3390/ijms23094810>
- Hutchinson, M. J., Muniu, F. K., Ambuko, J., Mwakangalu, M., Mwang'ombe Okello, A. W., Olubayo, J. J., & Kirimi, J. (2017). Morphological and agronomic characterization of local vegetable cowpea accessions in coastal Kenya. *African Journal of Horticultural Science*, 11, 47-58.
- Ighaiee Oskoie, A. (2018). *Evaluation of the effects of iron nanoparticles (green, chemical, magnetic) on the growth stages and quantitative and qualitative yield of bean genotypes*. Faculty of Agriculture, Islamic Azad University Science and Research Branch, Tehran, Iran.
- Ighaiee Oskoie, A., Ghanbari, A. A., & Mirhadi, M. J. (2018). *The effect of iron nano-particles (magnetic, green, and chemical) on the germination characteristics of common bean genotypes*. 15th National Iranian Crop Science Congress. Karaj, Iran.
- Iranshahi, S., Sajedi, N., & Changizi, M. (2013). *The effect of different sources of iron fertilizer on the quality characteristics of pinto beans*. 5th Iranian Pulses Symposium. Karaj, Iran.
- Joseph, T., & Morrison, M. (2006). *Nanotechnology in agriculture and food*. Nanoforum Report. European Nanotechnology Gateway.
- Khajehpoor, M. R. (2000). *Principles of Agronomy*. Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
- Khalaj, H., Baradaran Firouzabadi, M., & Delfani, M. (2020). Effect of nano iron and magnesium chelate fertilizers on growth and grain yield of *Vigna sinensis* L. *Plant Process and Function*, 9(35), 161-177. (in Persian with English abstract).
- Maghsoodi, M., & Najafi, N. (2017). Effects of nano-micronutrient fertilizers on plant nutrition. *Land Management Journal*, 4(2), 115-132. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/lmj.2017.109483>
- Malakooti, M. J., & Tehrani, M. M. (2005). *The role of micronutrients in increasing yield and improving the quality of agricultural products*. Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

- Maphosa, Y., & Jideani, V. A. (2017). *The Role of Legumes in Human Nutrition*. PP 103-121 in Hueda, M. C. ed. Functional Food - Improve Health through Adequate Food. Tecnalia, Spain.
- Márquez-Quiroz, C., De-la-Cruz-Lázaro, E., Osorio-Osorio, R., & Sánchez-Chávez, E. (2015). Biofortification of cowpea beans with iron: iron's influence on mineral content and yield. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 15(4), 839-847. <https://doi.org/10.4067/s0718-95162015005000058>
- Mir, Y., Daneshvar, M., Nazarian, F., & Khosravi, H. (2016). Effect of foliar application nano iron chelate on Yield and growth traits of chickpea cultivars. *Journal of Plant Ecophysiology*, 8(24), 183-195. (in Persian with English abstract).
- Mishra, A., Shamim, M., Siddiqui, M. W., Singh, A., Srivastava, D., & Singh, K. N. (2020). Genotypic variation in spatial distribution of Fe in rice grains in relation to phytic acid content and ferritin gene expression. *Rice Science*, 27(3), 227-36. <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2020.04.005>
- Mittal, D., Kaur, G., Singh, P., Yadav, K., & Ali, S. A. (2020). Nanoparticle-Based sustainable agriculture and food science: recent advances and future outlook. *Frontiers in Nanotechnology*, 2, 579954. <https://doi.org/10.3389/fnano.2020.579954>
- Nadri, Y. (2014). *The effect of iron chelate nanofertilizer on agronomic traits of lentil genotypes under environmental conditions of Khorramabad*. Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khoramabad, Iran.
- Ning, X., Lin, M., Huang, G., Mao, J., Gao, Z., & Wang, X. (2023). Research progress on iron absorption, transport, and molecular regulation strategy in plants. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1190768. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1190768>
- Nkhoma, N., Shimelis, H., & Laing, M. D. (2020). Assessing the genetic diversity of cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp.) germplasm collections using phenotypic traits and SNP markers. *BMC Genetics*, 21, 110. <https://doi.org/10.1186/s12863-020-00914-7>
- Nogiya, M., Pandey, R. N., & Singh, B. (2016). Physiological basis of iron chlorosis tolerance in rice (*Oryza sativa*) in relation to the root exudation capacity. *Journal of Plant Nutrition*, 39(11), 1536-1546. <https://doi.org/10.1080/01904167.2016.1161786>
- Nongbet, A., Mishra, A. K., Mohanta, Y. K., Mahanta, S., Ray, M. K., Khan, M., Baek, K. H., & Chakrabarty, I. (2022). Nanofertilizers: a smart and sustainable attribute to modern agriculture. *Plants*, 11, 2587. <https://doi.org/10.3390/plants11192587>
- Pouresmael, M., Saneinejad, A. A., Ghanbari, A. A., & Sekhvat, R. (2021). Assessment of agro-morphological traits diversity in local cowpea accessions. *Journal of Crop Breeding*, 13(38), 95-106. (in Persian with English abstract). <https://doi:10.52547/jcb.13.38.95>
- Qadiri, A., Mutawakel, A., & Saeedi, M. (2023). Effect of organic and inorganic fertilizers on yield and yield components of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in Badakhshan, Afghanistan. *Journal for Research in Applied Sciences and Biotechnology*, 2(2), 253-258. <https://doi.org/10.55544/jrasb.2.2.36>
- Sabeki, M., Asgharipour, M., Ghanbari, A., & Miri, K. (2017). The effect of nano-iron chelate fertilizer on ecomorphological characteristics of pearl millet- cowpea intercropping. *Journal of Agroecology*, 7(1), 96. (in Persian).
- Safapur, M., Ardakani, M. R., Rejali, F., Khagani, S., & Teymuri, M. (2010). Effect of co-inoculation of Mycorrhiza and Rhizobium on common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *New Finding in Agriculture*, 5, 21-35. (in Persian with English abstract).

- Sekhavat, R. (2006). *Selection of superior lines from the local cowpea population in Khuzestan*. AREEO, Safiabad, Iran. (in Persian).
- Sekhavat, R., Ghanbari Birgani, D., & Mirzashahi, K. (2018). Instructions for planting, growing, and harvesting cowpeas in Khuzestan. AREEO, Safiabad, Iran. (in Persian).
- Sheykhabglou, R., Sedghi, M., Tajbakhsh Shishevan, M., & Sharifi, R. (2010). Effects of nano-iron oxide particles on agronomic traits of soybean. *Notulae Scientia Biologicae*, 2(2), 112-113. <https://doi.org/10.15835/nsb224667>
- Simunji, S., Munyinda, K. L., Lungu, O. I., Mweetwa, A. M., & Phiri, E. (2019). Evaluation of cowpea (*Vigna unguiculata* L. walp) genotypes for biological nitrogen fixation in maize-cowpea crop rotation. *Sustainable Agriculture Research*, 8(1), 82-93. <https://doi.org/10.5539/sar.v8n1p82>
- Singh, S. P. (2007). Drought resistance in the race Durango dry bean landraces and cultivars. *Agronomy Journal*, 99, 1219-1225. <https://doi.org/10.2134/agronj2006.0301>
- Smith, M. R., Rao, I. M., & Merchant, A. (2018). Source-sink relationships in crop plants and their influence on yield development and nutritional quality. *Frontiers in Plant Science* 9, 1889. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01889>
- Tadayyon, A., & Raiesi, F. (2008). The response of various ecotypes of common sainfoin (*Onobrychis viciifolia* L.) to the foliar application of nitrogen, iron and zinc in a cold climate of Chaharmahal va Bakhtyari province. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 6(1), 41-48. (in Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/gsc.v6i1.1174>
- Tamuk, P., Pandey, R. N., Purakayastha, T. J., Barman, M., Chakraborty, D., Gurung, B., Choudhury, S., Trivedi, A., & Singh, B. (2024). Grain and shoot iron (Fe) content and root phytosiderophore release are the major determinants of Fe-deficiency tolerance index (FeDTI) and the reliable screening markers to breed Fe-efficient rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Plant Nutrition*, 9, 1-25. <https://doi.org/10.1080/01904167.2024.2320212>
- Tanaka, A. (1980). *Source and sink relationship in crop production*. ASPAC Food and Fertilizer Technical Center, Taipei city, Taiwan.
- Thapa, B., Adhikari, N. R., Darai, R., & Kandel, B. P. (2021). Genotypic variability of exotic cowpea genotypes for agromorphological traits in mid-western region of Nepal. *Alinteri Journal of Agricultural Sciences*, 36(1), 47-54. <https://doi.org/10.47059/alinteri/v36i1/ajas21008>
- Tripathi, D. K., Shweta Singh, S., Singh, S., Pandey, R., & Chauhan, D. K. (2017). An overview on manufactured nanoparticles in plants: uptake, translocation, accumulation, and phytotoxicity. *Plant Physiology and Biochemistry*, 110, 2-12. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.07.030>
- Vaezi, S. (2010). *Collection, restoration and evaluation of agromorphological diversity of cowpea in Iran*. ARREO, SPII, Karaj, Iran. (in Persian).
- Valdes-Miramontes, E. H., Rodriguez-Macias, R., & Ruiz-Lopez, M. (2019). *Vegetal Sources of Iron*. PP 1-23 in Rodrigo, L. ed. Iron deficiency anemia. University of Oviedo, Spain.
- Vaneeckhaute, C., Ghekiere, G., Michels, E., Vanrolleghem, P. A., Tack, F. M. G., & Meers, E. (2014). Assessing nutrient use efficiency and environmental pressure of macronutrients in biobased mineral fertilizers: a review of recent advances and best practices at field scale. *Advances in Agronomy*, 128, 137-180. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802139-2.00004-4>

- Xiao, Q., Zhang, F., Wang, Y., Zhang, J., & Zhang, S. (2008). Effects of slow/controlled release fertilizers felted and coated by Nano-materials on nitrogen recovery and loss of crops. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 14(4), 779-785. <https://doi.org/10.11674/zwyf.2008.0425>
- Xiong, H., Shi, A., Mou, B., Qin, J., Motes, D., Lu, W., Ma, J., Weng, Y., Yang, W., & Wu, D. (2016). Genetic diversity and population structure of cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp). *Plos One*, 11, e0160941. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0160941>
- Zhu, H., Han, J. Q., & Jin, Y. (2008). Uptake, translocation, and accumulation of manufactured iron oxide nanoparticles by pumpkin plants. *Journal of Environmental Monitoring*, 10, 713-717. <https://doi.org/10.1039/b805998e>
- Zuluaga, M. Y. A, Cardarelli, M., Roupahel, Y., Cesco, S., Pii, Y., & Colla, G. (2023). Iron nutrition in agriculture: From synthetic chelates to biochelates. *Scientia Horticulturae*, 312, 111833. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.111833>