University of Tehran Press

Iranian Journal of Field Crop Science

Online ISSN: 2423-8082

Homepage:https://ijfcs.ut.ac.ir/

Effects of Nitrapyrin on Yield of Forage Maize and Sorghum in Monoculture and Intercropping under Different Tillage Systems

Hosain Moghadam [1]✉| Ashkan Jalilian[2]| Mohammad Zargaran[3]| Arman Farahhi[4]| Nima Shahbazi[5]| Fatemeh Amini[6]

1. Corresponding Author, Department of Agronomy and Plant Breeding, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: hmoghadam@ut.ac.ir
2. Department of Agronomy and Plant Breeding, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: ashkanjalilian@ut.ac.ir
3. Department of Agronomy and Plant Breeding, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: mohamad.zargaran@ut.ac.ir
4. Department of Agronomy and Plant Breeding, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: armanfarrahi@alumni.ut.ac.ir
5. Department of Agronomy and Plant Breeding, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: nima.shahbazi@ut.ac.ir
6. Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Islamic Azad University, Shahr-e-Qods Branch, Tehran. Iran. Email: sogand.amini@qodsiau.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: June 16, 2024
Received in revised form: July 14, 2024
Accepted: July 23, 2024
Published online: March 21, 2025

Keywords:
Land equivalent ratio,
leaf area,
nitrification,
soil compaction,
system productivity index.

ABSTRACT

Increasing the application of chemical fertilizers and their high leaching rates leads to decreased consumption efficiency and environmental pollution. Therefore, soil nitrification inhibitors could enhance absorption efficiency and reduce the loss of urea fertilizer. Intercropping is one of the strategies to increase biodiversity and improve production efficiency per unit area; therefore, the intercropping of maize and forage sorghum was conducted in fields with different fertilizer and soil tillage systems in 2021-2022. The treatments included two tillage systems (conventional and no-tillage), three fertilizer types (control, urea, and urea + nitrapyrin). The cropping patterns were monoculture of forage maize and sorghum, and alternatives intercropping). The results showed that the highest plant height (268.83 cm), fresh forage weight (8.67 kg. m^{-2}), and absorbed light (1135.32 $MJ.m^{-2}$) were obtained in conventional tillage and urea + nitrapyrin treatment. The highest LER (1.14) and chlorophyll content (70.18%) were achieved in conventional tillage and urea + nitrapyrin treatment. In general, the results indicated that conventional tillage compared to no-tillage systems had higher performance in all traits. This superiority is attributed to better root penetration and water infiltration. Application of nitrapyrin, combined with maintaining urea in the root zone, enhanced absorption and overall performance. Intercropping demonstrated superiority over monocropping, which could significantly contribute to reducing water consumption, especially considering sorghum's drought resistance.

Cite this article: Moghadam, H., Jalilian, A., Zargaran, M., Farrahi, A., Shahbazi, N., & Amini, F. (2025). Effects of nitrapyrin on yield of forage maize and sorghum in monoculture and intercropping under different tillage systems. *Iranian Journal of Field Crop Science*, *56*(1), 77-91. Doi: 10.22059/ijfcs.2024.378079.655083.

© The Authors.
Publisher: University of Tehran Press.
DOI: http//doi.org/10.22059/ijfcs.2024.378079.655083

انتشارات دانشگاه تهران

علوم گیاهان زراعی ایران

شاپا الکترونیکی: ۸۰۸۲-۲۴۲۳

Homepage:https://ijfcs.ut.ac.ir/

تأثیر نیتراپایرین بر عملکرد ذرت و سورگوم علوفه‌ای در کشت خالص و مخلوط در شرایط متفاوت خاک‌ورزی

حسین مقدم[1]✉، اشکان جلیلیان[2]، محمد زرگران[3]، آرمان فرهی[4]، نیما شهبازی[5]، فاطمه امینی[6]

۱. نویسنده مسئول، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: hmoghadam@ut.ac.ir
۲. گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: ashkanjalilian@ut.ac.ir
۳. گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: mohamad.zargaran@ut.ac.ir
۴. گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: armanfarrahi@alumni.ut.ac.ir
۵. گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: nima.shahbazi@ut.ac.ir
۶. گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شهر قدس، تهران، ایران. رایانامه: sogand.amini@qodsiau.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۲۷
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۴/۲۴
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۰۲
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۱/۰۱

کلیدواژه‌ها:
سطح برگ، شاخص بهره‌وری سیستم، فشردگی خاک، نسبت برابری زمین، نیتریفیکاسیون.

چکیده

افزایش کاربرد کودهای شیمیایی و درصد بالای آبشویی آن‌ها منجر به کاهش کارایی آن‌ها و آلودگی محیط زیست می‌شود. از این رو مهارکننده‌های نیتریفیکاسیون خاک می‌تواند کارایی جذب را افزایش و میزان هدررفت کودهای اوره را کاهش دهد. کشت مخلوط یکی از راهکارهای افزایش تنوع زیستی و بهبود کارایی تولید در واحد سطح می‌باشد؛ از این رو، کشت مخلوط ذرت و سورگوم علوفه‌ای در سطوح متفاوت کودی و خاک‌ورزی در سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۰ در شهرستان کرج اجرا شد. تیمارها شامل سامانه‌های خاک‌ورزی (مرسوم و بدون خاک‌ورزی)، انواع متفاوت کود نیتروژن (شاهد، اوره و اوره + نیتراپایرین) بودند. الگوهای کشت نیز شامل کشت خالص سورگوم، ذرت علوفه‌ای و کشت مخلوط جایگزینی (۵۰:۵۰) آن‌ها بودند. نتایج نشان داد بالاترین ارتفاع بوته (۲۶۸/۸۳ سانتی‌متر)، وزن تر علوفه (۸/۶۷ کیلوگرم در متر مربع) و نور جذب-شده (۱۱۳۵/۳۲ مگاژول در متر مربع) در خاک‌ورزی مرسوم و تیمار اوره + نیتراپایرین به‌دست آمد. بالاترین میزان LER (۱/۱۴) و محتوی کلروفیل (۷۰/۱۸ درصد) در خاک‌ورزی مرسوم و اوره + نیتراپایرین بود. به‌طور کلی، نتایج نشان داد خاک‌ورزی مرسوم نسبت به بدون خاک‌ورزی عملکرد بالاتری در کلیه صفات داشت و این به دلیل نفوذ بهتر ریشه و آب می‌باشد. کاربرد نیتراپایرین نیز با نگه‌داشت اوره در محیط ریشه منجر به افزایش جذب و عملکرد شد. کشت مخلوط نسبت به خالص برتری داشت و این می‌تواند در کاهش مصرف آب با توجه به مقاومت سورگوم علوفه‌ای به خشکی اثرگذار باشد.

استناد: مقدم، ح.، جلیلیان، ا.، زرگران، م.، فرهی، آ.، شهبازی، ن.، و امینی، ف. (۱۴۰۴). تاثیر نیتراپایرین بر عملکرد ذرت و سورگوم علوفه‌ای در کشت خالص و مخلوط در شرایط متفاوت خاک‌ورزی. *علوم گیاهان زراعی ایران*. ۵۶(۱)، ۷۷-۹۱.
Doi: 10.22059/ijfcs.2024.378079.655083

CC BY NC

ناشر: موسسه انتشارات دانشگاه تهران. © نویسندگان

۱. مقدمه

قرار گرفتن ایران با میانگین بارندگی سالانه ۲۵۰ میلی‌متر در منطقه خشک و نیمه‌خشک و بروز خشکسالی در چند سال اخیر و از طرف دیگر نیاز روزافزون به تولید علوفه جهت تولیدات دامی باعث شده است که گیاهان زراعی با نیاز آبی کمتر در برنامه‌های تولیدی مورد توجه قرار گیرد (Eliaspour & Seyed Sharifi, 2019; Khodabin *et al*., 2022; Moghadam *et al*., 2022). سورگوم علوفه‌ای (*Sorghum bicolor* var. Sudenense) با مصرف آب کمتر نسبت به ذرت علوفه‌ای (*Zea mays* L.) و مقاومت بالاتر آن نسبت به تنش‌های خشکی در شرایط آب و هوایی ایران می‌تواند گزینه مناسبی جهت جایگزینی کامل و یا بخشی از ذرت علوفه‌ای شود (Karimi & Amirnia, 2019). جایگاه سومین گیاه زراعی مهم جهان به دلیل نقش در تغذیه انسان و دام به ذرت داده شده است (Sayfzadeh *et al*., 2022)، با این حال در سال‌های اخیر برنامه‌های بهنژادی بسیاری روی سورگوم علوفه‌ای انجام شده است تا از نظر تغذیه‌ای به کیفیت مطلوب برسد، از این رو هشت رقم سورگوم علوفه‌ای در ایران به ثبت رسیده است (SPCRI, 2021).

خاک‌ورزی به عنوان عملیات پیش‌کشت محصولات زراعی می‌تواند بر فرآیندهای شیمیایی و زیستی خاک اثرگذار باشد، همچنین شیوه‌های گوناگون آن از جمله بدون خاک‌ورزی و خاک‌ورزی مرسوم اثرات متفاوتی بر عملکرد محصولات زراعی دارند (Jalilian *et al*., 2023b). خاک‌ورزی شدید و مرسوم می‌تواند ساختمان خاک را تخریب کند، درحالی‌که بدون خاک‌ورزی می‌تواند فعالیت‌های زیستی و ساختمان خاک را بهبود دهد، با این حال اثرات طولانی‌مدت بدون خاک‌ورزی موجب کاهش رشد و نفوذ ریشه، عمق نفوذ آب و همچنین افزایش چگالی ظاهری خاک می‌شود (Chen *et al*., 2005; B. Ren *et al*., 2018). کشت مخلوط گیاهان زراعی بسته به دیدگاه متخصصان در جغرافیای گوناگون کشاورزی جهان هم می‌تواند سامانه کشت مدرن باشد و هم سنتی، به‌نحوی‌که در کشورهای چین، آلمان، هند و برزیل متداول و رو به افزایش است (Bourke *et al*., 2021; Jalilian *et al*., 2023; Munz *et al*., 2014). سامانه تک‌کشتی و فشرده منجر به ناپایداری در تولید، کاهش تنوع زیستی و افزایش عوامل کاهنده محصول می‌شود (Döring & Elsalahy, 2022; Jalilian *et al*., 2023)، درحالی‌که کشت مخلوط با طبیعت همگام بوده و با افزایش تنوع زیستی در جهت کشاورزی پایدار می‌باشد (HE *et al*., 2019; Khosravi *et al*., 2021). همچنین عملکرد بالاتر کشت مخلوط در واحد سطح نسبت به تک‌کشتی از مزیت‌های اصلی آن می‌باشد که این برتری در نهایت از نظر اقتصادی نیز توجیه‌پذیر می‌باشد (Cuartero *et al*., 2022; Karami *et al*., 2022).

صنعت کشاورزی با توجه به ضرورت افزایش تولید مبتنی بر رشد روزافزون جمعیت جهان ناگزیر به سمت افزایش مصرف کودهای شیمیایی از جمله اوره شده است، با این حال با توجه به کارایی مصرف و جذب پایین نیتروزن که منجر به آبشویی نیتروژن می‌شود، آثار مخرب زیست‌محیطی را به همراه داشته است (Corrochano-Monsalve *et al*., 2020; Woodward *et al*., 2021). بخشی از آثار مخرب زیست‌محیطی مصرف بی‌رویه کودهای نیتروژن به صورت N_2O می‌باشد که خود از محصولات جانبی فرآیند نیتریفیکاسیون (فرآیند تبدیل آمونیوم به نیترات توسط اکسیدکننده‌های آمونیاک) می‌باشد (Sadhukhan *et al*., 2022). در این خصوص مهارکننده‌های نیتریفیکاسیون با مهار آنزیم‌های آمونیاک‌مونواکسیژناز ماندگاری آمونیوم در خاک را افزایش داده و علاوه بر افزایش جذب آن توسط گیاه از آبشویی آن نیز تا حدودی جلوگیری می‌کند که علاوه بر افزایش عملکرد زراعی در حفظ محیط زیست نیز موثر می‌باشد (Cheng *et al*., 2022; Woodward *et al*., 2021). نیتراپایرین به عنوان ترکیب آلی و مهارکننده فرآیند نیتریفیکاسیون با کودهای نیتروژن کلاته می‌شود و طول مدت نگهداری آمونیوم در محیط ریشه را افزایش می‌دهد (Bhandari *et al*., 2020; Dawar *et al*., 2021a). کاربرد این ماده می‌تواند موجب افزایش کارایی مصرف نیتروژن (Tao *et al*., 2021)، افزایش سطح برگ (Ren *et al*., 2020)، وزن خشک گیاه (Cai *et al*., 2018) و عملکرد دانه گندم (Bhandari *et al*., 2020) شود. افزایش کارایی جذب نیتروژن در کشت‌های پرمصرف همچون ذرت حائز اهمیت می‌باشد، همچنین جایگزینی بخشی از سطح زیر کشت ذرت به سورگوم علوفه‌ای در الگوهای کشت خالص و مخلوط در شرایط متفاوت خاک‌ورزی یک ضرورت می‌باشد که این مطالعه با این هدف اجرا شد.

۲. روش‌شناسی پژوهش

این پژوهش در تابستان ۱۴۰۱ در مزرعه تحقیقاتی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران واقع در شهرستان کرج (ارتفاع از سطح دریا ۱۳۲۱ متر، طول جغرافیایی ۵۱ درجه شرقی، عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۸ دقیقه شمالی) اجرا شد. ویژگی‌های هواشناسی و خاک محل آزمایش در هر دو شرایط خاک‌ورزی اندازه‌گیری شدند که در جدول ۱ قابل مشاهده می‌باشد. بر اساس گزارش ایستگاه هواشناسی این منطقه دارای آب و هوای سرد و خشک می‌باشد و میانگین ۳۰ ساله بارندگی آن حدود ۲۵۰ میلی‌متر است. طرح آزمایشی به صورت کرت‌های دوبار خردشده بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار بود. تیمارها شامل سیستم خاک‌ورزی (به صورت بدون خاک‌ورزی و کشت مرسوم (سه بار دیسک، یک بار چیزل)) به عنوان کرت‌های اصلی، سطوح کودی بدون کاربرد اوره، کاربرد اوره و ترکیب اوره+نیتراپایرین به عنوان عامل فرعی و الگوی کشت (کشت خالص ذرت و سورگوم و کشت مخلوط جایگزینی ۵۰:۵۰) به عنوان عامل فرعی فرعی بودند. کشت خالص ذرت علوفه‌ای (رقم BK65: هیبرید، دومنظوره و متوسطرس FAO 650)، کشت خالص سورگوم علوفه‌ای (رقم اسپیدفید: هیبرید زودرس، علوفه‌ای، متحمل به خشکی با قابلیت پنجه‌زنی)، کشت ۵۰ درصد ذرت+۵۰ درصد سورگوم به صورت ردیف‌های یک در میان بود. تراکم کشت ذرت و سورگوم علوفه‌ای ۱۲ بوته در متر مربع در نظر گرفته شد؛ به‌نحوی‌که فاصله بین ردیف‌های کشت ۶۰ سانتی‌متر و روی ردیف نیز ۱۴ سانتی‌متر بود (Nikniaei *et al*., 2017).

جدول ۱. ویژگی‌های هواشناسی، فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش.

Conventional tillage	No tillage	Physicochemical properties
8.5	8.5	pH
1.06	1.91	EC (dS m^{-1})
0.59	0.71	Organic Carbon (%)
0.083	0.092	N (%)
10.2	14	P (mg/kg)
147	188	K (mg/kg)
22.1	42.8	No_3^- (mg/kg)
13.3	21.2	NH_4^+ (mg/kg)
32	28	Clay (%)
44	43	Silt (%)
24	29	Sand (%)
1.21	1.32	Bulk density (g cm^3)

Maximum temperature (°C)	Minimum temperature (°C)	Average temperature (°C)	Rainfall (mm)	ماه	Month
38.5	27.7	14.22	0	شهریور – مهر	September
29.2	17	15.8	0	مهر – آبان	October
26	6.6	8.77	53.9	آبان – آذر	November
19.1	5.8	6.13	21.9	آذر – بهمن	December
17.2	0.5	4.24	13.3	بهمن – دی	January
19.8	5.2	6.98	16	دی – اسفند	February
23.4	7.1	9.88	15.9	اسفند – فروردین	March
31.9	18.7	18.1	10.6	فروردین – اردیبهشت	April
33.7	23.9	19.83	2.8	اردیبهشت –خرداد	May
41.9	34	27.29	1	خرداد – تیر	June
40.8	30.1	27.22	5.8	تیر – مرداد	July
40.4	32.2	26.78	0.8	مرداد – شهریور	August

هر کرت آزمایشی شامل شش ردیف کشت به طول هفت متر بود. کشت با دستگاه ردیف‌کار ذرت انجام گرفت؛ به‌طوری‌که در کشت یک ردیف در میان، با تعویض صفحه موزع با سایز ۴/۵ میلی‌متر، با دستگاه ردیف‌کار کشت ذرت و سورگوم هم‌زمان انجام شد. در سیستم بدون خاک‌ورزی، از دستگاه ردیف‌کار کشت مستقیم با شیار بازکن دیسکی برشی استفاده شد. تاریخ کشت اول تیرماه بود. با توجه به علوفه‌ای‌بودن هردو گیاه زراعی و برداشت مکانیزه آن توسط چاپر، برداشت محصول در همـه کرت‌ها هم‌زمان و در مرحله خمیری دانه بـرای ذرت و در مرحله تمام گلدهی برای سورگوم و حدود ۹۰ روز پس از سبز شدن انجام شد (Beheshti *et al*., 2019). کودهای شیمیایی اضافه‌شده به میزان‌های۴۵۰ کیلوگرم در هکتار اوره، ۱۰۰ کیلو گرم در هکتار سوپرفسفات تریپل و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار سولفات پتاسیم بودند. کوددهی اولیه همراه با کشت و کودهای تقسیط‌شده با کودکار فاروئر اعمال شد. آبیاری با سیستم تحت فشار با دور آبیاری هفت روز یک‌بار انجام گرفت. مبارزه با علف‌های هرز به صورت مکانیکی صورت گرفت. کاربرد نیتراپایرین (شیمیایی رازی اصفهان) به صورت ۵۰۰ گرم در هکتار بود که به همراه تقسیط کود اوره و براساس توصیه‌نامه مصرف آن (Instinct II, Dow AgroSciences, Indianapolis, IN, USA) اعمال شد. کود اوره نیز ۴۰ درصد در مرحله چهار برگی و ۶۰ درصد در مرحله ۱۲ برگی از طریق تزریق در سیستم آبیاری (تانک کود) اعمال شدند که نیتراپایرین نیز با این نسبت در دو مرحله اعمال شد (Ren *et al*., 2020).

در این آزمایش صفاتی همچون وزن تر و خشک علوفه، ارتفاع بوته (در زمان برداشت)، قطر ساقه (در زمان برداشت) و حداکثر شاخص سطح برگ (در مرحله تولید گل نر) در هر سه حالت خالص ذرت، خالص سورگوم و مجموع کشت مخلوط آن‌ها اندازه‌گیری شدند. پس از رسیدن به مرحله برداشت علوفه، ۱۲ بوته معادل یک متر مربع از کلیه کرت‌ها نمونه‌برداری شدند. نمونه‌برداری‌ها با رعایت فاصله حاشیه (دو ردیف از هر طرف) از وسط هر کرت انجام گرفت. ارتفاع بوته در شرایط مزرعه و سطح خاک تا بالاترین بخش گیاه اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری ارتفاع به‌صورت میانگین کل کرت کشت مخلوط بود. پس از نمونه‌برداری و انتقال به آزمایشگاه، قطر ساقه از ۱۲ بوته به وسیله کولیس ورنیه لینکز با دقت ۰/۰۲ میلی‌متر و وزن علوفه با ترازوی حساس اندازه‌گیری شدند. برگ‌های بوته‌های توزین‌شده پس از جداسازی با استفاده از دستگاه سطح برگ‌سنج مدل دلتا اندازه‌گیری شدند. حداکثر سطح برگ در گیاه ذرت هم‌زمان با بسته‌شدن تاج‌پوشش و پر شدن دانه اتفاق می‌افتد (Sun *et al.,* 2019)، از این رو، برگ‌های جدا شده از هر دو گیاه به عنوان حداکثر سطح برگ در نظر گرفته شد. سطح برگ در کشت مخلوط مجموع سطح برگ اندازه‌گیری‌شده ذرت و سورگوم می‌باشد. محتوی کلروفیل برگ نیز به وسیله دستگاه SPAD اندازه‌گیری شد. همچنین جهت بررسی نور جذب‌شده توسط تاج‌پوشش کشت خالص و مخلوط ذرت و سورگوم علوفه‌ای از دستگاه سان‌اسکن Decagon LP-80 استفاده شد؛ به‌طوری‌که یکبار نور بالای تاج‌پوشش در ساعت ۱۲، و سپس نور کف تاج‌پوشش دریافت شد. سپس با استفاده از معادله زیر تشعشع جذب‌شده محاسبه شد:

$$Iabs=I0\times(1-P)\times(1-\exp(-K\times LAI)$$

در این معادله Iabs: نور جذب‌شده تاج‌پوشش، I0: نور رسیده به بالای تاج‌پوشش، P: ضریب انعکاس نور (۰/۰۵)، K: ضریب خاموشی (۰/۷) می‌باشد (Amini *et al*., 2021). جهت مقایسه سیستم کشت مخلوط از شاخص‌های نسبت برابری زمین (رابطه ۱) و شاخص بهره‌وری سیستم (رابطه ۲) استفاده شد (Salehi Sheikhi *et al*., 2021):

$$LER= (Y_{ab}/Y_{aa}) + (Y_{ba}/Y_{bb})$$ رابطه ۱

$$SPI= (Y_{aa}/Y_{bb}) \times Y_{ba}+Y_{ab}$$ رابطه ۵

در این فرمول‌ها، Y نشان‌دهنده عملکرد، Y_{ab} عملکرد ذرت در کشت مخلوط با سورگوم، Yaa عملکرد ذرت در کشت خالص، Y_{ba} عملکرد سورگوم در کشت مخلوط با ذرت، Y_{bb} عملکرد سورگوم خالص می‌باشد. در این رابطه اگر LER=1 باشد کشت مخلوط نسبت به تک‌کشتی برتری ندارد. در موقعی کـه LER>1 باشـد، کشـت مخلـوط نسبت به خالص دارای برتری می‌باشد. درحالتی‌که LER<1 باشد کشت مخلوط در مقایسه بـا تک‌کشتی از عملکرد کمتری برخوردار است.

برای تعیین توزیع نرمال و همگنی داده‌ها قبل از انجام تحلیل واریانس (ANOVA) از آزمون Shapiro-Wilk استفاده شد. مقایسه میانگین آزمایش با آزمون LSD در سطح پنج درصد و داده‌های آزمایش با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.4 تجزیه و نمودارها با استفاده از نرم‌افزار Excel نسخه ۲۰۱۳ ترسیم شدند.

۳. نتایج پژوهش و بحث

۳-۱. صفات کمی ذرت و سورگوم علوفه‌ای

۳-۱-۱. ارتفاع بوته

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر تیمارهای خاک‌ورزی، سطوح کودی، الگوی کشت و همچنین برهمکنش خاک‌ورزی در سطوح کودی بر صفت ارتفاع بوته معنی‌دار بود (جدول ۲). بررسی مقایسه میانگین اثر الگوی کشت بر این صفت نشان داد بیشترین ارتفاع بوته (۲۲۰/۲۰ سانتی‌متر) در کشت خالص سورگوم و کمترین آن در کشت خالص ذرت علوفه‌ای به‌دست آمد (جدول ۳). بررسی برهمکنش سطوح خاک‌ورزی در سطوح کودی نیز نشان داد بالاترین ارتفاع (۲۶۸/۸۳ سانتی‌متر) در خاک‌ورزی مرسوم و سطح کودی اوره + نیتراپایرین به‌دست آمد که نسبت به اوره و شاهد در همان سطح خاک‌ورزی به‌ترتیب ۷/۷۶ و ۵۹/۲۵ درصد افزایش داشت (شکل ۱). همچنین نسبت به بدون خاک‌ورزی و سطح کودی اوره + نیتراپایرین نیز ۱۴/۹۸ درصد ارتفاع زیادتری داشت (شکل ۱). کمترین ارتفاع بوته (۱۵۱/۲۷ سانتی‌متر) در سطح بدون خاک‌ورزی و شاهد بود که نسبت به شاهد خاک‌ورزی مرسوم ۱۰/۳۸ درصد ارتفاع بوته کمتری داشت (شکل ۱). با توجه به اینکه در خاک‌ورزی مرسوم فشردگی و چگالی ظاهری خاک کاهش می‌یابد، توسعه ریشه و جذب عناصر در آن نسبت به بدون خاک‌ورزی بالاتر می‌باشد؛ از این رو ارتفاع بوته نسبت به دیگر سیستم‌ها بالاتر خواهد بود (Ren *et al*., 2018). همچنین با توجه به نسبت کشت برابر در مخلوط ذرت و سورگوم علوفه‌ای، تراکم بوته نسبت به کشت خالص تفاوتی نداشت، در شرایط کشت خالص سورگوم علوفه‌ای از ارتفاع بالاتری برخوردار بود. در شرایط کشت مخلوط نیز با توجه به اینکه ارتفاع بوته‌ها میانگین هر دو گیاه علوفه‌ای می‌باشد و ارتفاع ذرت پایین‌تر بود، میانگین ارتفاع کشت مخلوط کمتر از کشت خالص سورگوم شد. کاربرد نیتراپایرین به همراه کود اوره با افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی برگ، کارایی فتوسیستم II، کاهش فعالیت پرولین، سوپراکسیددیسموتاز منجر به بهبود رشد ذرت می‌شود (Ren *et al*., 2020).

۳-۱-۲. قطر ساقه

میانگین قطر ساقه در سامانه‌های خاک‌ورزی، نوع کود نیتروژنی و الگوی کشت معنی‌دار بود (جدول ۲). نتایج نشان داد که بیشترین میانگین قطر ساقه (۲۳/۵۰ میلی‌متر) در سامانه خاک‌ورزی مرسوم به‌دست آمد که نسبت به بدون خاکورزی ۷/۶۹ درصد بالاتر بود و بیشترین و کمترین قطر ساقه به‌ترتیب در اوره + نیتراپایرین و شاهد حاصل شد، هرچند میان سطح کودی اوره با اوره + نیتراپایرین تفاوت معنی‌داری وجود نداشت (جدول ۳). بیشترین قطر ساقه در کشت خالص ذرت (۲۷/۰۲ میلی متر) و کمترین آن در کشت خالص سورگوم (۱۸/۳۹ میلی متر) به‌دست آمد (جدول ۳). کاهش قطر ساقه می‌تواند در افزایش کیفیت علوفه تأثیرگذار باشد، از این رو ترکیب ذرت و سورگوم علوفه‌ای می‌تواند نسبت به کشت خالص ذرت به صورت میانگین و تک‌بوته، قطر ساقه کم‌تری داشته باشد. در شرایط کاهش و افزایش تراکم و رقابت درون‌گونه‌ای قطر ساقه سورگوم افزایش و کاهش یافت به‌طوری‌که در تراکم ۱۳ بوته در متر مربع ۲/۰۳ سانتی‌متر بود و با افزایش به ۲۶ بوته در متر مربع به ۱/۳۱ سانتی‌متر رسید (Damavandi *et al*., 2015). همچنین کاربرد نیتراپایرین با ممانعت از فرآیند نیتریفیکاسیون و فراهمی بیشتر کود نیتروژنی در محیط ریشه در بازه زمانی طولانی‌تر، منجر به بهبود رشد و عملکرد گیاه می‌شود (Jalilian *et al*., 2023a; Khodabin *et al*., 2023). همچنین با افزایش بهره‌وری نیتروژن منجر به بهبود رشد ذرت می‌شود (Alonso-Ayuso *et al*., 2016).

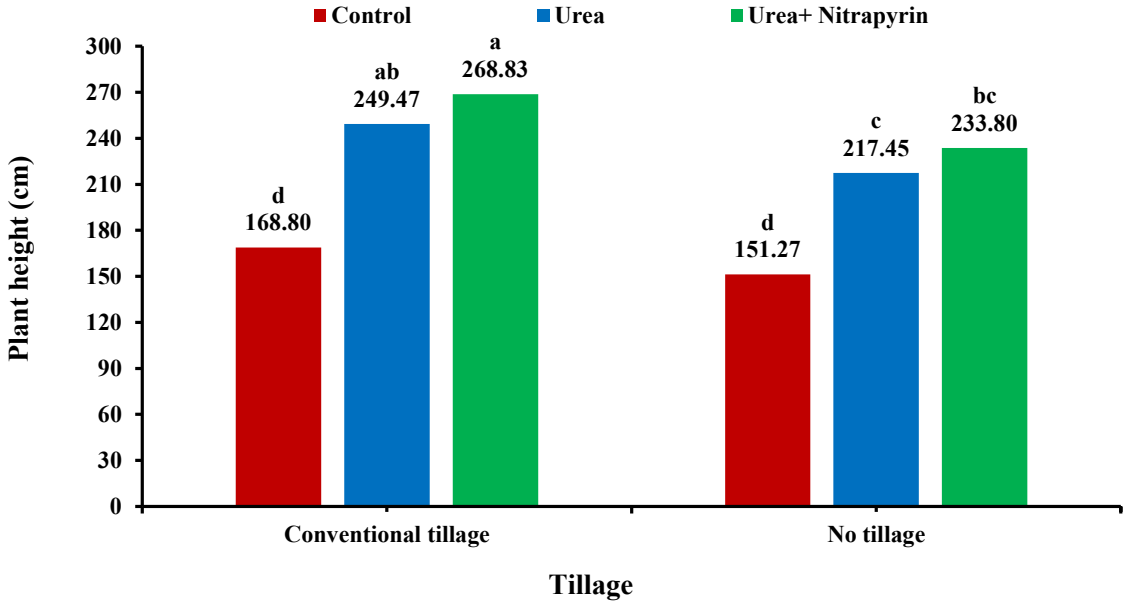
جدول ۲. تجزیه واریانس الگوی کشت، انواع متفاوت کودهای نیتروژنی و سامانه خاک‌ورزی بر صفات ذرت و سورگوم علوفه‌ای در کشت مخلوط.

S.O.V	df	Probability level						
		Plant height	Stem diameter	Leaf area index	Fresh forage yield	Dry hay yield	Absorption Radiation	Chlorophyll Content
Block (B)	2	0.0069	0.4084	0.0002	0.4332	0.0154	0.0001	0.656
Tilage (T)	1	<.0001	0.0004	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001
B×T	2	<.0001	0.7373	<.0001	0.0067	0.066	0.0002	0.34
Fertilizer (F)	2	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001
T × F	2	<.0001	1	0.9543	0.0034	0.431	0.0064	0.0502
B × T × F	8	<.0001	0.4163	0.0002	0.0008	0.3642	<.0001	0.0016
Cultivation pattern (C)	2	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	0.0003	<.0001
T × C	2	0.2964	0.5678	0.9746	0.4503	0.8275	0.4598	0.5326
F × C	4	0.7604	0.451	0.3633	0.3229	0.0385	0.6269	0.021
T × F × C	4	0.9932	0.9996	0.9995	0.9173	0.9753	0.9951	0.9606
Error	24	-	-	-	-	-	-	-
C.V.	-	5.31	6.64	4.48	7.83	8.14	3.38	2.73

جدول ۳. مقایسه میانگین الگوی کشت، انواع متفاوت کودها و سامانه خاک‌ورزی بر صفات ذرت و سورگوم علوفه‌ای در کشت مخلوط.

Treatment	Level	Plant height	Stem diameter	Leaf area index	Fresh forage yield	Dry Matter	Radiation Absorption
Tillage	Conventional tillage	-	23.50 a	5.61 a	-	1.89 a	-
	No tillage	-	21.82 b	4.85 b	-	1.69 b	-
Fertilizer	Control	-	19.94 b	4.07 b	-	1.28 c	-
	Urea	-	23.68 a	5.68 a	-	1.96 b	-
	Urea+ Nitrapyrin	-	24.36 a	5.94 a	-	2.13 a	-
Cultivation pattern	Maize monoculture	209.37 c	27.02 a	5.32 a	6.39 c	-	1111.91 a
	Sorghum monoculture	220.20 a	18.39 c	4.88 b	6.90 b	-	1102.47 b
	Mix intercropping	215.23 b	22.57 b	5.49 a	7.48 a	-	1117.39 a

Means in each column followed by similar letters are not significantly different (LSD 5%).



شکل ۱. تاثیر انواع کود نیتروژنی و سامانه خاک‌ورزی بر ارتفاع بوته ذرت و سورگوم علوفه‌ای.
در هر ستون، میانگین‌ها یا حروف مشابه تفاوت معنی‌داری ندارند (LSD 5%).

۳-۱-۳. حداکثر شاخص سطح برگ

بررسی جدول تجزیه واریانس نشان از معنی‌داری تیمارهای اصلی بر صفت حداکثر شاخص سطح برگ دارد، با این حال برهمکنش تیمارها معنی‌دار نبود (جدول ۲). مقایسه میانگین تیمارهای اصلی نشان داد در سامانه‌های خاک‌ورزی بیشترین سطح برگ در سامانه خاک‌ورزی مرسوم (۵/۶۱)، در شرایط انواع کود نیتروژنی کاربرد اوره + نیتراپایرین (۵/۹۴) و در الگوی کشت در کشت مخلوط (۷/۴۸) به‌دست آمد (جدول ۳). نتایج نشان داد بدون خاک‌ورزی منجر به کاهش ۱۳/۵۴ درصدی سطح برگ شد، همچنین اوره و اوره + نیتراپایرین به‌ترتیب نسبت به شاهد (بدون کود) منجر به افزایش ۳۹/۵۵ و ۴۵/۹۴ درصدی سطح برگ شد (جدول ۳). سطح برگ کشت مخلوط نیز نسبت به حالت خالص ذرت و کشت خالص سورگوم به‌ترتیب سطح برگ را ۳/۱۹ و ۱۲/۵۰ درصد افزایش داشت (جدول ۳). این افزایش می‌تواند به دلیل فنولوژی متفاوت ذرت و سورگوم از نظر برگ باشد، همچنین سورگوم علوفه‌ای در کشت مخلوط به دلیل فضای بالاتر نسبت به کشت خالص خود از نظر تعداد پنجه نیز می‌تواند عملکرد بالاتری داشته باشد که در نهایت منجر به افزایش سطح برگ شده باشد. کاهش سطح برگ در سامانه بدون خاک‌ورزی نیز می‌تواند به دلیل افزایش مقاومت نفوذ خاک و کاهش توسعه رشد ریشه باشد، چرا که خاک‌ورزی مرسوم نسبت به دیگر شیوه‌های خاک‌ورزی میزان نفوذ ریشه بیشتر، چگالی ظاهری خاک و مقاومت به نفوذ کمتری دارد (Ren *et al*., 2018). بررسی‌ها نشان می‌دهد بالاترین سطح برگ ذرت در سیستم کشت مرسوم بود (Ranjbar *et al*., 2017). کاربرد اوره و اوره + نیتراپایرین با فراهمی نیتروژن و جذب آن توسط گیاه منجر به افزایش سطح برگ و فتوسنتز می‌شود (Dawar *et al*., 2021; Jalilian *et al*., 2023; Khodabin *et al*., 2022).

۳-۱-۴. وزن تر و خشک علوفه

نتایج این پژوهش نشان داد اثر تیمارهای خاک‌ورزی، سطوح کودی، الگوی کاشت و همچنین برهمکنش خاک‌ورزی در سطوح کودی بر صفت وزن تر علوفه و اثر تیمارهای اصلی و برهمکنش سطوح کودی در الگوی کشت بر صفت وزن خشک علوفه معنی‌دار بود (جدول ۲). مقایسه میانگین برهمکنش سطوح خاک‌ورزی در سطوح کودی نشان داد بیشترین وزن تر علوفه(۸/۶۷ کیلوگرم در متر مربع) در کود اوره + نیتراپایرین و خاک‌ورزی مرسوم به‌دست آمد که نسبت به اوره و شاهد در همان سطح خاک‌ورزی به‌ترتیب ۷/۴۳ و ۶۷/۰۵ درصد عملکرد علوفه بالاتری داشت که نسبت به اوره این اختلاف معنی‌دار نبود (جدول ۴). همچنین نسبت به کاربرد اوره + نیتراپایرین در شرایط بدون خاک‌ورزی نیز ۱۴/۰۷ درصد عملکرد بالاتری داشت (جدول ۴). کمترین وزن تر علوفه‌ای

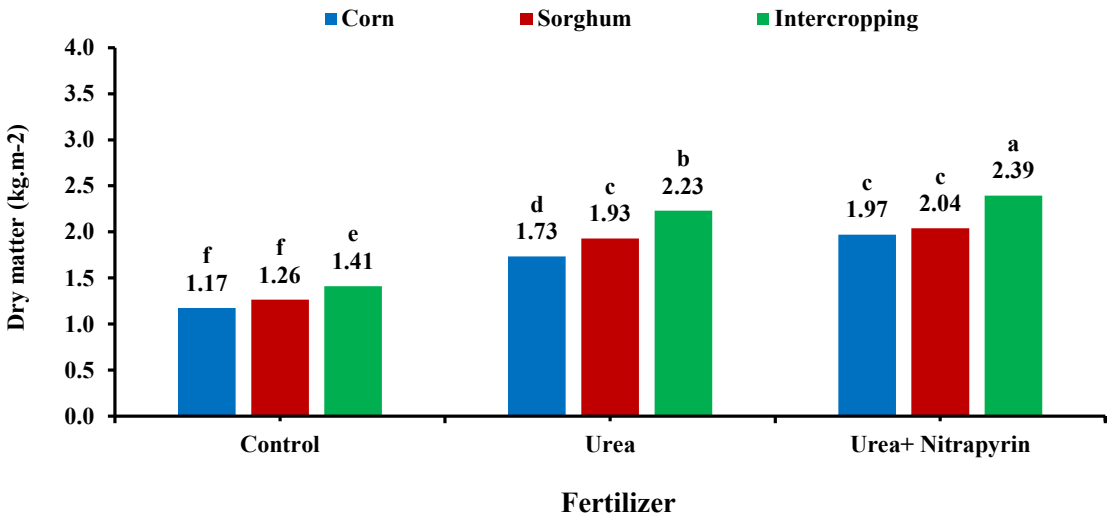
نیز در سطح شاهد و بدون خاک‌ورزی (۴/۸۸ کیلوگرم در متر مربع) بود (جدول ۴). کاربرد اوره به‌تنهایی و افزودن نیتراپایرین به آن با فراهمی نیتروژن که نیاز اصلی گیاه زراعی می‌باشد عملکرد را افزایش می‌دهد، همچنین نیتراپایرین با مهار فرایند نیتریفیکاسیون خاک تبدیل اوره به سایر ترکیبات شیمیایی را کند کرده و این امر باعث افزایش جذب آن توسط ریشه می‌شود، از این رو عملکرد علوفه بالاتر بود (Borzouei *et al*., 2021). بررسی الگوی کشت بر وزن تر علوفه نیز نشان داد بیشترین و کمترین مقدار(۷/۴۸ و ۶/۳۹ کیلوگرم در متر مربع) در کشت مخلوط و کشت خالص ذرت به‌دست آمد (جدول ۳). به نظر می‌رسد افزایش ارتفاع بوته در شرایط مخلوط و همچنین افزایش سطح برگ در کنار عملکرد بالای سورگوم باعث افزایش علوفه تر در کشت مخلوط نسبت به خالص شده است. بررسی عملکرد وزن خشک علوفه در سطوح خاک‌ورزی نشان داد بدون خاک‌ورزی منجر به کاهش ۱۰/۵۸ درصدی وزن خشک علوفه می‌شود، همچنین کاربرد اوره و اوره + نیتراپایرین عملکرد وزن خشک را نسبت به شاهد به‌ترتیب ۵۳/۱۲ و ۶۶/۴۰ درصد افزایش داد که نشان از اثرگذاری کود بر عملکرد علوفه می‌باشد (جدول ۳). برهمکنش سطوح کودی در الگوی کشت نیز نشان داد بیشترین وزن خشک علوفه (۲/۳۹ کیلوگرم در متر مربع) در سطح کودی اوره + نیتراپایرین و کشت مخلوط به‌دست آمد که نسبت به کشت خالص ذرت و سورگوم به‌ترتیب ۲۱/۳۱ و ۱۷/۱۵ درصد عملکرد بالاتری داشت (شکل ۲). کمترین وزن خشک علوفه نیز با ۱/۱۷ کیلوگرم در متر مربع در سطح کودی شاهد و ذرت خالص به‌دست آمد (شکل ۲). نتایج نشان داد در هر سه سطح کودی کشت مخلوط عملکرد بالاتری نسبت به حالت خالص داشت، همچنین عملکرد در سطح کودی اوره + نیتراپایرین بالاتر از دیگر سطوح کودی بود (شکل ۲).

ترکیب تیمار اوره با نیتراپایرین می‌تواند منجر به افزایش سطح برگ، جذب CO_2 و افزایش فتوسنتز در گیاه شود، که این امر در نهایت با افزایش عملکرد گیاه همراه خواهد بود (Ren *et al*., 2020). همچنین بهبود عملکرد گیاه در شرایط کاربرد نیتراپایرین می‌تواند به دلیل انرژی مصرفی کمتر در جذب آمونیوم نسبت به نیترات برای گیاه باشد (Dawar *et al*., 2011; Zaman *et al*., 2008). نیتراپایرین با بهبود سامانه آنتی‌اکسیدانی برگ و عملکرد فتوسنتز در گیاه ذرت باعث افزایش عملکرد گیاه شد (Ren *et al*., 2020). با توجه به بررسی‌های انجام‌شده، کشت طولانی‌مدت در شرایط بی‌خاک‌ورزی باعث کاهش عمق نفوذ آب و ریشه می‌شود که در نهایت کاهش عملکرد را به همراه دارد. در این شرایط، خاک‌ورزی مرسوم به‌عنوان راهکار موثری به منظور افزایش عملکرد می‌باشد (Li *et al*., 2015; Ren *et al*., 2018; Säle *et al*., 2015). دیگر بررسی‌ها نیز نشان داد در شرایط کشت مرسوم و خاک‌ورزی کامل عملکرد ذرت و سورگوم نسبت به کم و بدون خاک‌ورزی بالاتر بود (Ramadhan & Muhsin, 2021; Ranjbar *et al*., 2017).

جدول ٤. تاثیر انواع متفاوت کودهای نیتروژنی و سامانه‌های خاک‌ورزی بر صفات ذرت و سورگوم علوفه‌ای در کشت مخلوط.

Treatment	Level	Fresh forage yield (kg m^{-2})	Radiation Absorption (MJ m^{-2})	Chlorophyll Content (%)
Conventional tillage	Control	5.19 d	1091.23 b	50.22 c
	Urea	8.07 ab	1131.45 a	67.02 a
	Urea + nitrapyrin	8.67 a	1135.32 a	70.18 a
No tillage	Control	4.88 d	1060.87 c	45.40 d
	Urea	7.15 c	1119.56 ab	60.55 b
	Urea + nitrapyrin	7.60 bc	1125.12 a	62.56 b

Means followed by similar letters in columns are not significantly different at 5% probability level by LSD test.



شکل ۲. تاثیر تیمارهای الگوی کشت و انواع متفاوت کود نیتروژنی بر وزن خشک علوفه ذرت و سورگوم علوفه‌ای.
در هر ستون، میانگین‌ها یا حروف مشابه تفاوت معنی‌داری ندارند (LSD 5%).

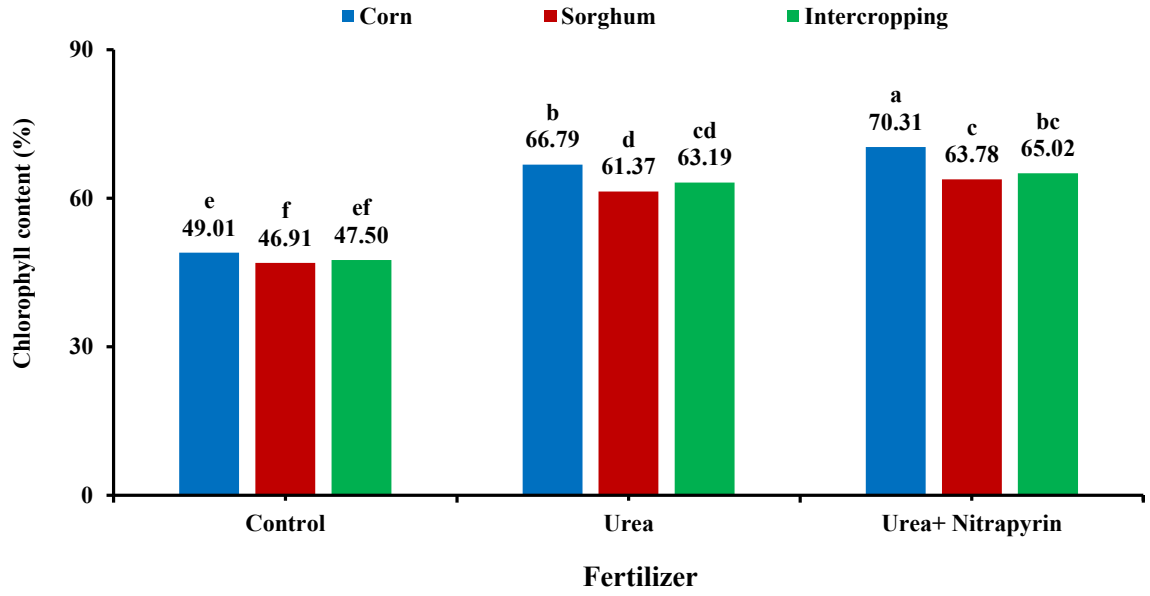
۳-۱-۵. نور جذب‌شده

اثر سامانه‌های خاک‌ورزی،کودی، الگوی کشت و همچنین برهمکنش خاک‌ورزی و کود بر نور جذب‌شده معنی‌دار بود (جدول ۲). مقایسه میانگین الگوی کشت نشان داد بیشترین نور جذب‌شده (۱۱۱۷/۳۹ مگاژول در در متر مربع) در کشت مخلوط و کمترین آن در کشت خالص سورگوم علوفه‌ای به‌دست آمد (جدول ۳). میان نور جذب‌شده در کشت مخلوط و کشت خالص ذرت تفاوت معنی‌داری وجود نداشت، این امر می‌تواند به دلیل سطح برگ نزدیک به یکدیگر باشد (جدول ۳). برهمکنش سامانه‌های خاک‌ورزی و کودی نشان داد بالاترین نور جذب‌شده (۱۱۳۵/۳۲ مگاژول در متر مربع) در خاک‌ورزی مرسوم و کاربرد اوره + نیتراپایرین به‌دست آمد، کمترین آن (۱۰۶۰/۸۷ مگاژول در متر مربع) درکود شاهد و عدم خاک‌ورزی بود (جدول ۴). کاربرد اوره و نیتراپایرین با فراهمی نیتروژن، ماندگاری آن در محیط ریشه و همچنین جذب آن توسط گیاه موجب افزایش سطح برگ خواهد شد، این افزایش با جذب نور رابطه معنی‌داری دارد. در شرایط خاک‌ورزی مرسوم توسعه ریشه بیشتر خواهد بود، این امر و فراهمی نیتروژن در محیط ریشه می‌تواند هم‌افزایی در جذب نور از طریق توسعه سطح برگ باشد. همچنین کاربرد کود اوره منجر به افزایش کلروفیل و جذب نور در ذرت شد (Fateh *et al*., 2022). مطالعه دیگری نشان داد با افزایش سطح کود اوره، میزان جذب تابش در تاج‌پوشش ذرت افزایش یافت، این افزایش از طریق توسعه برگ، دوام برگ و رشد گیاه به‌دست آمد (Ahmadi *et al*., 2017).

۳-۱-۶. محتوی کلروفیل (SPAD)

بررسی اثر تیمارهای این آزمایش بر محتوی کلروفیل برگ نشان از معنی‌داری تیمارهای اصلی و برهمکنش سطوح خاک‌ورزی در انواع کودی و همچنین سطوح کودی در الگوی کشت بود (جدول ۲). بیشترین محتوی کلروفیل برگ (۷۰/۱۸ درصد) در شرایط خاک‌ورزی مرسوم و کود اوره + نیتراپایرین به‌دست آمد که نسبت به شاهد و کود اوره به‌ترتیب برتری ۳۹/۷۴ و ۴/۷۱ درصدی داشت، این برتری نسبت به اوره معنی‌دار نبود (جدول ۴). کمترین میزان این صفت (۴۵/۴۰ درصد در سطح شاهد و بدون خاک‌ورزی به‌دست آمد، در حالت بدون خاک‌ورزی نیز تفاوتی میان کود اوره با اوره + نیتراپایرین مشاهده نشد (جدول ۴). برهمکنش تیمارهای سطوح کودی و الگوی کشت نیز نشان داد بالاترین میزان محتوی کلروفیل با ۷۰/۳۱ درصد در شرایط اوره + نیتراپایرین و کشت خالص ذرت به‌دست آمد، کمترین آن (۴۶/۹۱ درصد) در کشت خالص سورگوم علوفه‌ای و شاهد وجود داشت (شکل ۳). به نظر می‌رسد در شرایط خاک‌ورزی مرسوم به دلیل رشد بهتر ریشه مطابق با منابع مورد بررسی جذب عناصر غذایی بهتر صورت گرفته است، از این رو کاربرد اوره و همراهی نیتراپایرین با فراهمی بهتر نیتروژن و طول ماندگاری آن در خاک موجب افزایش محتوی کلروفیل شده است. همچنین محتوی کلروفیل برگ با میزان نیتروژن رابطه معنی‌داری دارد؛ از این رو، با کاهش سطح اوره میزان محتوی کلروفیل برگ نیز کاهش یافت. همچنین بالاتر بودن این شاخص در کشت مخلوط نسبت به کشت خالص سورگوم

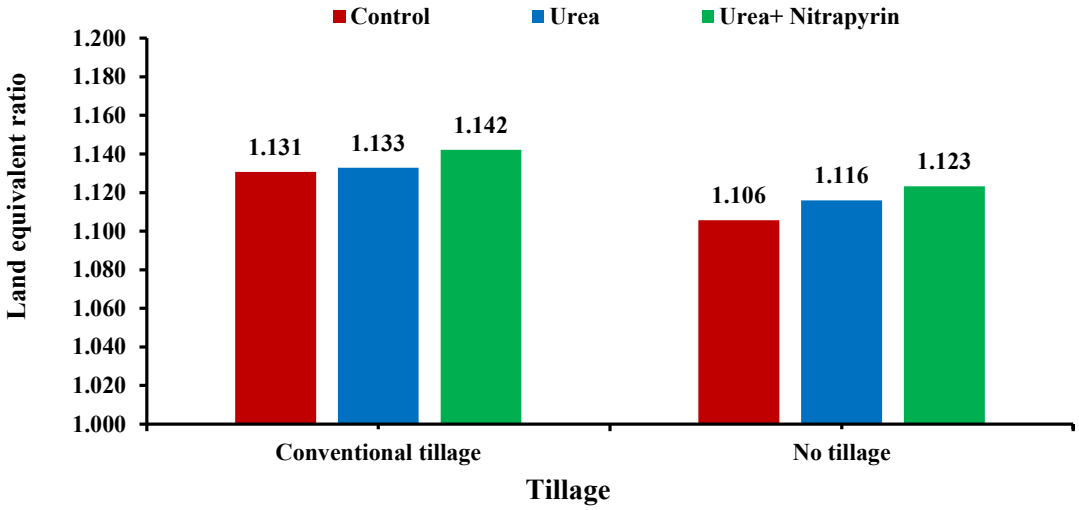
علوفه‌ای به دلیل میانگین اندازه‌گیری کل بوته‌ها در یک متر مربع می‌باشد؛ از این رو، نسبت به کشت خالص بالاتر می‌باشد. در مقایسه با استفاده از اوره به تنهایی، استفاده از اوره به همراه نیتراپایرین می‌تواند منجر به افزایش شاخص سطح برگ و جذب دی‌اکسید کربن شود. این موضوع در نتیجه، به افزایش فتوسنتز خالص برگ و افزایش عملکرد گیاه منجر می‌شود (Ren *et al*., 2020). استفاده از نیتراپایرین در ذرت، به کاهش فعالیت پرولین، سوپراکسیددیسموتاز، و مالون‌دی‌آلدئید منجر شد. در عین حال، فعالیت فتوسنتز و میزان کلروفیل به دلیل فراهمی نیتروژن در خاک افزایش می‌یابد (Rácz *et al*., 2021). بررسی‌ها نشان داد نیتراپایرین با فراهمی بیشتر نیتروژن و جذب آن توسط گیاه باعث افزایش میزان کلروفیل، سبزینگی و فتوسنتز برگ شد (Dawar *et al*., 2021b; Sowiński & Głąb, 2018; Subbarao *et al*., 2006).



شکل ۳. تاثیر الگوی کشت و انواع کود نیتروژن بر محتوی کلروفیل برگ‌های ذرت و سورگوم علوفه‌ای.
در هر ستون، میانگین‌ها یا حروف مشابه تفاوت معنی‌داری ندارند (LSD 5%).

۳-۲. نسبت برابری زمین (LER)

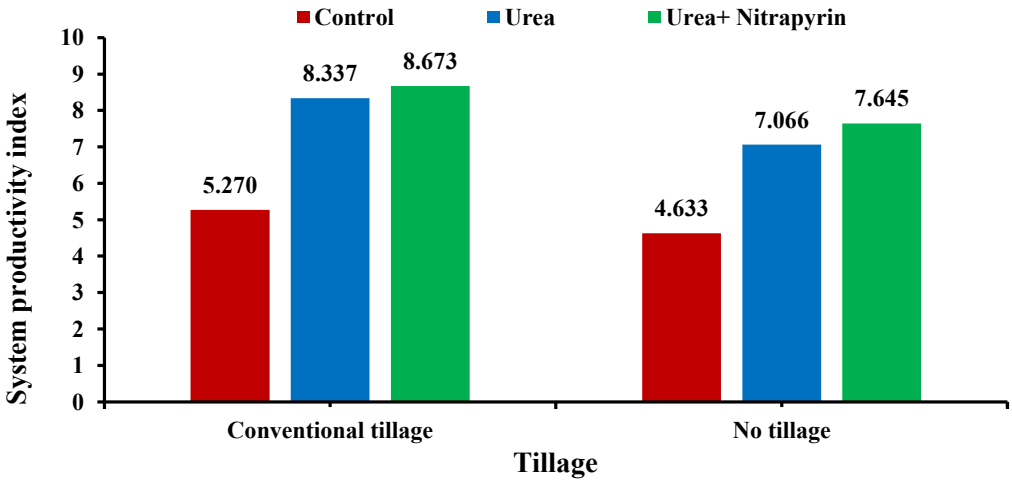
بالاترین میزان LER (۱/۱۴) در شرایط خاک‌ورزی مرسوم و کود اوره + نیتراپایرین و کمترین آن (۱/۱۰) در شاهد و بدون خاک‌ورزی به‌دست آمدند (شکل ۴). در هر دو سامانه خاک‌ورزی کود اوره + نیتراپایرین نسبت به دیگر انواع کودی برتری داشت، همچنین کلیه انواع کودی LER بالاتر از یک را برخوردار بودند که نشان از برتری کشت مخلوط ذرت و سورگوم علوفه‌ای نسبت به کشت خالص دارد (شکل ۴). مطابق با بخش‌های گذشته، شرایط بدون خاک‌ورزی منجر به کاهش عملکرد گیاه شد، این کاهش می‌تواند به دلیل فشردگی خاک و کاهش نفوذ آب و ریشه باشد. از این رو منجر به کاهش LER نسبت به خاک‌ورزی مرسوم شده است. از دیگر دلایل LER مثبت در کشت مخلوط ذرت و سورگوم نیز می‌توان به شباهت فنولوژیک این دو گیاه اشاره کرد. کاربرد اوره و اوره + نیتراپایرین نیز با فراهمی بهتر نیتروژن، ماندگاری در خاک و تاثیر مثبت بر فرآیندهای فتوسنتزی گیاه، موجب افزایش عملکرد و به تبع، افزایش LER شده است (Borzouei *et al*., 2021; Jalilian *et al*., 2023a; Meng *et al*., 2020). بررسی کشت مخلوط ذرت و سورگوم علوفه‌ای نشان داد عملکرد خالص سورگوم بالاتر از کشت مخلوط آن بود، با این حال LER کشت مخلوط آن ۱/۲ بود (Samarappuli & Berti, 2018). نتایج دیگر پژوهش‌ها نشان داد کشت مخلوط ذرت دانه‌ای و سورگوم علوفه‌ای در نسبت کشت ۵۰:۵۰ نسبت به حالت خالص برتری داشت و LER آن ۱/۴ بود (Hasanvand *et al*., 2019).



شکل ٤. شاخص نسبت برابری زمین کشت‌های مخلوط در سامانه‌های خاک‌ورزی و انواع کود نیتروژنی.

۳-۳. شاخص بهره‌وری سیستم (SPI)

بررسی شاخص بهره‌وری سامانه نشان داد بالاترین میزان آن (۸/۶۷) در سطح خاک‌ورزی مرسوم و سطح کودی اوره + نیتراپایرین و کمترین آن (۴/۶۳) در سطح شاهد و بدون خاک‌ورزی حاصل شد (شکل ۵). نتایج نشان داد کاربرد نیتراپایرین به همراه اوره نسبت به اوره خالص و شاهد در سطح خاک‌ورزی مرسوم به‌ترتیب موجب افزایش ۴/۰۸ و ۶۴/۵۱ درصدی و در سطح بدون خاک‌ورزی به‌ترتیب ۸/۲۱ و ۶۵/۰۱ درصدی شد (شکل ۵). کاربرد اوره و همراهی نیتراپایرین با تاثیر بر صفات وزن تر و دیگر صفات کمی موجب بهبود شاخص SPI شده است، همچنین عدم خاک‌ورزی با کاهش عملکرد نسب به خاک‌ورزی مرسوم، میزان SPI کمتری داشت. بررسی‌ها نشان داد میان مقدار شاخص SPI و بهره‌وری سیستم کشت مخلوط رابطه خطی معنی‌داری وجود داشت (Ghanbari *et al*., 2017)؛ از این رو، افزایش عملکرد هر گیاه در کشت مخلوط و خالص آن در شرایط مدیریت خاک‌ورزی می‌تواند شاخص بهره‌وری سیستم را بهبود بخشد. نتایج دیگر مطالعات نیز نشان داد کشت مخلوط با توجه به میزان SPI بالای آن سودمندی قابل توجهی دارد (Hodiani Mehr *et al*., 2021; Mojtabaie Zamani & Norouzi, 2017; Nakhzari Moghaddam, 2016).



شکل ۵. شاخص بهره‌وری سیستم کشت مخلوط در سیستم‌های سطوح خاک‌ورزی و کودی.

۴. نتیجه‌گیری

این پژوهش در زمینه کشت مخلوط سورگوم و ذرت علوفه‌ای همراه با سیستم‌های متفاوت خاک‌ورزی و کودهای نیتروژنی نشان داد که این روش، علاوه بر افزایش بهره‌وری سامانه کشت، عملکرد قابل قبولی نیز دارد. در شرایط کشت جایگزینی و با تراکم برابر اختصاص بخشی از سطح کشت به گیاه مقاوم به خشکی می‌تواند در شرایط کم‌آبیاری عملکرد قابل قبولی داشته باشد. کشت مخلوط سورگوم و ذرت در این شرایط با توجه به نسبت برابری زمین بالاتر از یک می‌تواند در افزایش بهره‌وری از آب موثر باشد. مهارکننده نیتریفیکاسیون خاک نیز با افزایش زمان حضور اوره در محیط ریشه، جذب آن را بهبود و عملکرد را افزایش می‌دهد، همچنین با جذب بیشتر اوره میزان هدررفت آن کاهش یافته و می‌تواند باعث کاهش آبشویی کود در محیط خاک شود. خاک‌ورزی مرسوم با افزایش میزان نفوذپذیری ریشه و آب می‌تواند عملکرد را افزایش دهد، با این حال جهت مقایسه دقیق‌تر سطوح متفاوت خاک‌ورزی می‌بایست شاخص‌های اقتصادی، انرژی و زیست‌محیطی نیز مورد بررسی قرار گیرد تا بتوان به یک نتیجه‌گیری جامع‌تر رسید.

۵. منابع

Ahmadi, M., Mondani, F., Khoramivafa, M., Mohammadi, G., & Shirkhani, A. (2017). The effect of nitrogen on radiation use efficiency and growth indices of maize hybrids (*Zea mays* L.) under Kermanshah condition. *Iranian Journal of Field Crops Research*, *15*(4), 885–900. (In Persian).

Alonso-Ayuso, M., Gabriel, J.L., & Quemada, M. (2016). Nitrogen use efficiency and residual effect of fertilizers with nitrification inhibitors. *European Journal of Agronomy*, *80*, 1–8.

Amini, E., Mehrabi, A.A., Hatami, A., Fasihi, K., & Alizadeh, Y. (2021). Effect of drought stress on light absorption, radiation use efficiency and yield of different maize varieties (*Zea maize* L.) under Ilam conditions. *Iranian Journal of Field Crop Science*, *52*(1), 109–121. (In Persian).

Beheshti, A., Kiani Feriz, M.R., Basaf, M., & Nabavi, G. (2019). The impact of maize and sorghum intercropping on water use efficinecy and forage production. *Research Achievements for Field and Horticulture Crops*, *7*(2), 187–196. (In Persian).

Bhandari, M., Ma, Y., Men, M., Wu, M., Xue, C., Wang, Y., Li, Y., & Peng, Z. (2020). Response of winter wheat yield and soil N_2O emission to nitrogen fertilizer reduction and nitrapyrin application in North China plain. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, *51*(4), 554–565.

Borzouei, A., Mander, U., Teemusk, A., Sanz-Cobena, A., Zaman, M., Kim, D.G., Muller, C., Kelestanie, A.A., Amin, P.S., Moghiseh, E., Dawar, K., & Pérez-Castillo, A.G. (2021). Effects of the nitrification inhibitor nitrapyrin and tillage practices on yield-scaled nitrous oxide emission from a maize field in Iran. *Pedosphere*, *31*(2), 314–322.

Bourke, P.M., Evers, J.B., Bijma, P., van Apeldoorn, D.F., Smulders, M.J.M., Kuyper, T.W., Mommer, L., & Bonnema, G. (2021). Breeding beyond monoculture: Putting the "intercrop" into crops. *Frontiers in Plant Science*, *12*, 2602.

Cai, W., Ai, T., Li, R., Jin, Z., …. (2018). Effects of controlled release fertilizer and urea additive on photosynthetic characteristics and yield of double cropping rice. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, *3*, 54–60.

Chen, Y., Cavers, C., Tessier, S., Monero, F., & Lobb, D. (2005). Short-term tillage effects on soil cone index and plant development in a poorly drained, heavy clay soil. *Soil and Tillage Research*, *82*(2), 161–171.

Cheng, Y., Elrys, A.S., Wang, J., Xu, C., Ni, K., Zhang, J., Wang, S., Cai, Z., & Pacholski, A. (2022). Application of enhanced-efficiency nitrogen fertilizers reduces mineral nitrogen usage and emissions of both N*2*O and NH3 while sustaining yields in a wheat-rice rotation system. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 324, 107720.

Corrochano-Monsalve, M., Huérfano, X., Menéndez, S., Torralbo, F., Fuertes-Mendizábal, T., Estavillo, J.M., & González-Murua, C. (2020). Relationship between tillage management and DMPSA nitrification inhibitor efficiency. *Science of the Total Environment*, *718*, 134748.

Cuartero, J., Pascual, J.A., Vivo, J.M., Özbolat, O., Sánchez-Navarro, V., Egea-Cortines, M., Zornoza, R., Mena, M.M., Garcia, E., & Ros, M. (2022). A first-year melon/cowpea intercropping system improves soil nutrients and changes the soil microbial community. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *328*, 107856.

Damavandi, A., Latifi, N., & Darbanian, M. (2015). The effect of plant density on morphological traits and yield of four forage sorghum cultivars in Damghan region. *Applied Field Crops Research*, *28*(106), 171–177. (In Persian).

Dawar, K., Khan, A., Sardar, K., Fahad, S., Saud, S., Datta, R., & Danish, S. (2021a). Effects of the nitrification inhibitor nitrapyrin and mulch on N_2O emission and fertilizer use efficiency using 15N tracing techniques. *Science of the Total Environment*, *757*, 143739.

Dawar, K., Khan, A., Sardar, K., Fahad, S., Saud, S., Datta, R., & Danish, S. (2021b). Effects of the nitrification inhibitor nitrapyrin and mulch on N_2O emission and fertilizer use efficiency using 15N tracing techniques. *Science of the Total Environment*, *757*, 143739.

Dawar, K., Sardar, K., Zaman, M., Muller, C., Sanz-Cobena, A., Khan, A., Borzouei, A., & Perez-castillo, A.G. (2021). Effects of the nitrification inhibitor nitrapyrin and the plant growth regulator gibberellic acid on yield-scale nitrous oxide emission in maize fields under hot climatic conditions. *Pedosphere*, *31*(2), 323–331.

Dawar, K., Zaman, M., Rowarth, J.S., Blennerhassett, J., & Turnbull, M.H. (2011). Urea hydrolysis and lateral and vertical movement in the soil: Effects of urease inhibitor and irrigation. *Biology and Fertility of Soils*, *47*(2), 139–146.

Döring, T.F., & Elsalahy, H. (2022). Quantifying compensation in crop mixtures and monocultures. *European Journal of Agronomy*, *132*, 126408.

Eliaspour, S., & Seyed Sharifi, R. (2019). Evaluation of yield and yield components of forage sorghum using zinc sulfate and nitrogen fertilizer. *Journal of Agricultural Science And Sustainable Production*, *29*(4), 145–158. (In Persian).

Fateh, M., Kazemi Arbat, H., Mohammadi, S., Farahvash, F., & Zand, E. (2022). Effect of plant number and urea fertilizer on agronomic characteristics of corn hybrids and dry matter accumulation in pigweed (*Amaranthus retroflexus* L.). *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, *32*(1), 227–243.

Ghanbari, S., Moradi Telavat, M., & Siadat, S.A. (2017). Evaluation of competitive indices in barley intercropped with fenugreek under manure applications. *Journal of Crops Improvement*, *18*(4), 821–834. (In Persian).

Hasanvand, M., Hoseini, S.M.B., & Jahansooz, M.R. (2019). Effect of replacing ratios of maize: Sorghum intercropping on yield and yield components. *Iranian Journal of Field Crop Science*, *50*(3), 109–120. (In Persian).

HE, H.M., Liu, L.N., Munir, S., Bashir, N.H., Wang, Y., Yang, J., & LI, C.Y. (2019). Crop diversity and pest management in sustainable agriculture. *Journal of Integrative Agriculture*, *18*(9), 1945–1952.

Hodiani Mehr, A., Dahmardeh, M., Khammari, I., & Asgharipoor, M.R. (2021). Evaluation of competitive indices in roselle- mung bean intercropping under various tillage systems. *Crop Science Research in Arid Regions*, *2*(2), 255–265. (In Persian).

Jalilian, A., Jahansouz, M.R., Ghasemi Mobtaker, H., Oveisi, M., & Moghadam, H. (2023). Evaluation of economic and competitive indicators of okra (*Abelmoschus esculentus*) intercropping with cucumber (*Cucumis sativus*) in Khuzestan province. *Iranian Journal of Field Crop Science*, *54*(1), 41–57. (In Persian).

Jalilian, A., Jahansuz, M.R., Oveisi, M., & Moghadam, H. (2023). Evaluation of environmental indicators of okra (*Abelmoschus esculentus* L.) production in monoculture, intercropping and agroforestry systems in Khuzestan province. *Journal of Researches in Mechanics of Agricultural Machinery*, *12*(1), 95–110. (In Persian).

Jalilian, A., Khodabin, G., Khayat Moghadam, M.S., Zandi Esfahan, E., Amini, F., Shahbazi, N., & Zargaran, M. (2023a). Investigating the performance and physiological characteristics of wheat cultivars under the influence of nitrapyrin application in different tillage conditions. *Journal of Crops Improvement*, *25*(4), 943–956. (In Persian).

Jalilian, A., Mondani, F., Bagheri, A., & Khorrami Vafa, M. (2023). Evaluation of radiation absorption and use efficiency of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) and wild oat (*Avena ludoviciana* L.) in nitrogen fertilizer levels and wild oat additive densities. *Iranian Journal of Field Crop Science*, *54*(1), 59–79. (In Persian).

Karami, E., Almasi, A., Kashi, A., & Etminani, A. (2022). The effect of wind breaking of sweet corn and okra on growth indices and yield of cucumber in strip intercropping system. *Iranian Journal of Horticultural Science*, *52*(4), 789–798. (In Persian).

Karimi, R., & Amirnia, R. (2019). Effects of chemical and organic fertilizer on some qualitative and quantitative characteristics of forage sorghum (*Sorghum bicolor* L. Var. Speed Feed) in various phenological stages. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, *29*(3), 27–38. (In Persian).

Khodabin, G., Jalilian, A., Zandi Esfahan, E., Shahbazi, N., Amini, F., Ghaznavi, S., & Heidarzadeh, A. (2023). The effect of nitrification inhibitor on grain yield of wheat cultivars and some soil properties under conventional and no-tillage systems. *Iranian Journal of Field Crop Science*, *54*(2), 31–46. (In Persian).

Khodabin, G., Lightburn, K., Hashemi, S.M., Moghadam, M.S.K., & Jalilian, A. (2022). Evaluation of nitrate leaching, fatty acids, physiological traits and yield of rapeseed (*Brassica napus*) in response to tillage, irrigation and fertilizer management. *Plant and Soil*, 1–18. (In Persian).

Khosravi, M., Tavassoli, A., Piri, I., & Babaeian, M. (2021). Effect of weeds management on yield and nutrient content of sesame (*Sesamum indicum* L.) and bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in intercropping. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, *31*(4), 1–16. (In Persian).

Li, S., Jiang, X., Wang, X., & Wright, A.L. (2015). Tillage effects on soil nitrification and the dynamic changes in nitrifying microorganisms in a subtropical rice-based ecosystem: A long-term field study. *Soil and Tillage Research*, *150*, 132–138.

Meng, X., Li, Y., Yao, H., Wang, J., Dai, F., Wu, Y., & Chapman, S. (2020). Nitrification and urease inhibitors

improve rice nitrogen uptake and prevent denitrification in alkaline paddy soil. *Applied Soil Ecology*, *154*, 103665.

Moghadam, M.S.K., Rad, A.H.S., Khodabin, G., Jalilian, A., & Bakhshandeh, E. (2022). Application of silicon for improving some physiological characteristics, seed yield, and oil quality of rapeseed genotypes under late-season drought stress. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 1–19.

Mojtabaie Zamani, M., & Norouzi, S. (2017). Evaluation of different intercropping patterns of barley (*Hordeum vulgare* L.) and faba bean (*Vicia faba* L.) through competitive and economic indices. *Journal of Crop Production and Processing*, 7(3), 145–158. (In Persian).

Munz, S., Feike, T., Chen, Q., Claupein, W., & Graeff-Hönninger, S. (2014). Understanding interactions between cropping pattern, maize cultivar and the local environment in strip-intercropping systems. *Agricultural and Forest Meteorology*, *195–196*, 152–164.

Nakhzari Moghaddam, A. (2016). Effects of nitrogen and different intercropping arrangements of barley (*Hordeum vulgare* L.) and pea (*Pisum sativum* L.) on forage yield and competitive indices. *Journal of Agroecology*, *8*(1), 47–58. (In Persian).

Nikniaei, A., Akbari, G., Chaeichi, M.R., Rahimian Mashhadi, H., Afzalzadeh, A., & Ghorbani Javid, M. (2017). The effect of additive intercropping of maize and sorghum with legumes on yield, forage quality and weed dry weight. *Journal of Agroecology*, *7*(1), 17–32. (In Persian).

Rácz, D., Szőke, L., Tóth, B., Kovács, B., Horváth, É., Zagyi, P., Duzs, L., & Széles, A. (2021). Examination of the productivity and physiological responses of maize (*Zea mays* L.) to nitrapyrin and foliar fertilizer treatments. *Plants*, *10*(11), 2426.

Ramadhan, M., & Muhsin, S. (2021). Evaluation of the response of sorghum to tillage systems and nitrogen fertilization. *International Journal of Agronomy*, 1–12.

Ranjbar, M.H., Gherekhloo, J., & Soltani, A. (2017). Effect of different tillage systems on growth indices and yield of *Zea mays* L. (Corn forage). *Iranian Journal of Field Crops Research*, *15*(2), 267–285. (In Persian).

Ren, B., HU, J., Zhang, J., Dong, S., Liu, P., & Zhao, B. (2020). Effects of urea mixed with nitrapyrin on leaf photosynthetic and senescence characteristics of summer maize (*Zea mays* L.) waterlogged in the field. *Journal of Integrative Agriculture*, *19*(6), 1586–1595.

Ren, B., Li, X., Dong, S., Liu, P., Zhao, B., & Zhang, J. (2018). Soil physical properties and maize root growth under different tillage systems in the North China Plain. *The Crop Journal*, *6*(6), 669–676.

Ren, X., Zhu, B., Bah, H., & Raza, S.T. (2020). How tillage and fertilization influence soil N_2O emissions after forestland conversion to cropland. *Sustainability*, *12*(19), 7947.

Sadhukhan, R., Jatav, H.S., Sen, S., Sharma, L.D., Rajput, V.D., Thangjam, R., Devedee, A.K., Singh, S.K., Gorovtsov, A., Choudhury, S., & Patra, K. (2022). Biological nitrification inhibition for sustainable crop production. *Plant Perspectives to Global Climate Changes*, 135–150.

Säle, V., Aguilera, P., Laczko, E., Mäder, P., Berner, A., Zihlmann, U., van der Heijden, M.G.A., & Oehl, F. (2015). Impact of conservation tillage and organic farming on the diversity of arbuscular mycorrhizal fungi. *Soil Biology and Biochemistry*, *84*, 38–52.

Salehi Sheikhi, M., Nakhzari Moghaddam, A., Rahemi Karizaki, A., & Mohamad Eamaeili, M. (2021). Effect of pea cultivar and replacement and additive intercropping ratios of pea and spinach on yield and competition indices. *Journal of Crops Improvement*, *23*(4), 952–939. (In Persian).

Sayfzadeh, S., Norouzi, J., Eradatmand Asli, D., Zakerin, H.R., Hadidi Masouleh, I., & Yousefi, M. (2022). Effect of nitrogen fertilizer splitting on eco-physiological traits of two maize cultivars under normal irrigation and stress. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, *32*(1), 115–132. (In Persian).

Sowiński, J., & Głąb, L. (2018). The effect of nitrogen fertilization management on yield and nitrate contents in sorghum biomass and bagasse. *Field Crops Research*, *227*, 132–143.

Subbarao, G., Ito, O., Sahrawat, K., Berry, W., Nakahara, K., Ishikawa, T., Watanabe, T., Suenaga, K., Rondon, M., & Rao, I. (2007). Scope and strategies for regulation of nitrification in agricultural systems—Challenges and opportunities. *Critical Reviews in Plant Sciences*, *25*(4), 303–335.

Tao, R., Zhao, X., Wu, X., Hu, B., Vanyanbah, K.B., Li, J., & Chu, G. (2021). Nitrapyrin coupled with organic amendment mitigates N_2O emissions by inhibiting different ammonia oxidizers in alkaline and acidic soils. *Applied Soil Ecology*, *166*, 104062.

Woodward, E.E., Edwards, T.M., Givens, C.E., Kolpin, D.W., & Hladik, M.L. (2021). Widespread use of the nitrification inhibitor nitrapyrin: Assessing benefits and costs to agriculture, ecosystems, and environmental health. *Environmental Science & Technology*, *55*(3), 1345–1353.

Zaman, M., Nguyen, M.L., Blennerhassett, J.D., & Quin, B.F. (2008). Reducing NH_3, N_2O and No_3 –N losses from a pasture soil with urease or nitrification inhibitors and elemental S-amended nitrogenous fertilizers. *Biology and Fertility of Soils*, *44*(5), 693–705.