University of Tehran Press

Iranian Journal of Field Crop Science

Online ISSN: 2423-8082

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

The Effect of Nitrification Inhibitor on Grain Yield of Wheat Cultivars and Some Soil Properties under Conventional and No-Tillage Systems

Ghorban Khodabin [1]| Ashkan Jalilian [2]✉| Ehsan Zandi Esfahan [3]|Nima Shahbazi [4]| Fatemeh Amini [5]|Shiva Ghaznavi [6]|Ali Heidarzadeh [7]

1. Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. Email: g.khodabin@modares.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: ashkanjalilian@ut.ac.ir
3. Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education, and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran.
4. Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Karaj, Iran.
5. Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agricultural Science, Islamic Azad University, Shahr-e-Qods Branch, Iran.
6. Department of Agricultural Economics, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Karaj, Iran.
7. Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: July 17, 2022
Received in revised form: November 03, 2022
Accepted: November 13, 2022
Published online: April 28, 2023

Keywords:
Ammonia-oxidizing,
N_2O,
Nitrapyrin,
Nitrification,
No-tillage.

ABSTRACT

In agriculture, nitrogen fertilizer does not effectively absorb by plants. Several biological activities in the soil convert N into various compounds. Nitrogen oxide (N_2O) is an influential greenhouse gas formed in soils due to nitrification and denitrification process. Nitrapyrin (NI) combined with ammonium (NH_4^+) based fertilizers is an effective technique for minimizing the N loss in agricultural soils by regulating ammonia-oxidizing. This research was conducted during 2019-2020 to determine the effect of NI on nitrogen emissions in soil and crop yield of wheat cultivars at three urea (UR) levels, NI+urea (NIU), and control (CO) on two cultivars (Rakhshan and Pishgam) and two tillage systems (No tillage (NT) and conventional tillage (CT)). The highest amounts of NH_4^+, NO_3^- and N_2O were found at the stem elongation stage. While NIU fertilizer treatment yielded the highest NH_4^+ (18.38 mg kg^{-1}), the UR fertilizer treatment yielded the highest NO_3^- (25.96 mg kg^{-1}) and N_2O (0.0192 kg N_2O-N ha^{-1} day^{-1}). At all developmental stages in the CT and NT systems, the NIU treatment decreased the average nitrification of NH_4^+ and its conversion to NO_3^- by 27.81 and 15.45%, respectively. Our findings, thus, showed that NI application in conjunction with UR could highly reduce N_2O emissions. In addition to the favorable economic impact, increasing N availability in the soil through minimizing nitrification by NI may reduce detrimental environmental consequences on water resources and greenhouse gas emissions.

Cite this article: 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. DOI: 10.22059/ijfcs.2022.345822.654927.

© The Authors.

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: http//doi.org/10.22059/ijfcs.2022.345822.654927

انتشارات دانشگاه تهران

علوم گیاهان زراعی ایران

شاپا الکترونیکی: ۲۴۲۳-۸۰۸۲

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

تأثیر بازدارنده نیتریفیکاسیون بر عملکرد رقم‌های گندم و برخی ویژگی‌های خاک در سامانه‌های خاک‌ورزی مرسوم و بدون خاک‌ورزی

قربان خدابین[۱]| اشکان جلیلیان[۲]✉ | احسان زندی اصفهان[۳]| نیما شهبازی[۴]| فاطمه امینی[۵]| شیوا غزنوی[۶]| علی حیدرزاده[۷]

۱. گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. رایانامه: g.khodabin@modares.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج. رایانامه: ashkanjalilian@ut.ac.ir

۳. موسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.

۴. گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج.

۵. گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شهر قدس.

۶. گروه اقتصاد کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج.

۷. گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۲۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۸/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۲۲

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۲/۰۸

کلیدواژه‌ها:
اکسیدکننده آمونیوم، بدون خاک‌ورزی، نیتراپایرین، نیتروس‌اکسید، نیتریفیکاسیون

چکیده

در کشاورزی کود نیتروژن به‌طور مؤثری جذب گیاه نمی‌شود و از طریق انتشار به هوا و آبشویی در خاک از دسترس گیاه خارج می‌شود. انتشار نیتروس‌اکسید و آبشویی نیترات در نتیجه فرایندهای نیتریفیکاسیون خاک می‌باشد و مهارکننده نیتراپایرین با اختلال در این فرایند می‌تواند باعث بهبود کارایی کاربرد نیتروژن در خاک شود. به‌همین‌منظور با هدف بررسی اثرگذاری نیتراپایرین در شرایط خاک‌ورزی متفاوت بر انتشارات خاک و عملکرد زراعی رقم‌های گندم (*Triticum aestivum*) آزمایشی به‌صورت کرت‌های خردشده فاکتوریل در قالب بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار و سه سطح کودی اوره، ترکیب نیتراپایرین+اوره و کنترل و دو رقم رخشان و پیشگام در دو سطح خاک‌ورزی مرسوم و بدون خاک‌ورزی در سال زراعی ۱۳۹۹-۱۳۹۸ در شهر کرج انجام شد. نتایج نشان داد بیشترین مقدار آمونیوم، نیترات و نیتروس‌اکسید در مرحله نموی طویل‌شدن ساقه حاصل شد. بیشترین آمونیوم ($18/38\ mg\ kg^{-1}$) در تیمار کودی نیتراپایرین+اوره و بیشترین میزان نیترات ($25/96\ mg\ kg^{-1}$) و نیتروس‌اکسید ($0/0192\ kg\ ha^{-1}\ day^{-1}$) در تیمار کودی اوره به‌دست آمد. کاربرد نیتراپایرین+اوره میانگین نیتریفیکاسیون آمونیوم و تبدیل آن به نیترات را در کل مراحل نموی گندم در خاک‌ورزی مرسوم و بی خاک‌ورزی به‌ترتیب ۲۷/۸۱ و ۱۵/۴۵ درصد کاهش داد. یافته‌ها نشان داد کاربرد نیتراپایرین به‌همراه اوره از انتشار نیتروس‌اکسید به‌میزان قابل توجهی جلوگیری کرد. فراهمی بیشتر نیتروژن در خاک از طریق کاهش نیتریفیکاسیون توسط نیتراپایرین علاوه‌بر تأثیر مثبت اقتصادی می‌تواند از اثرات زیان‌بار زیست‌محیطی بر منابع آبی و گازهای گلخانه‌ای جلوگیری کند.

استناد: خدابین، ق.، جلیلیان، ا.، زندی اصفهان، ا.، شهبازی، ن.، امینی، ف.، غزنوی، ش.، و حیدرزاده، ع. (۱۴۰۲). تأثیر بازدارنده نیتریفیکاسیون بر عملکرد رقم‌های گندم و برخی ویژگی‌های خاک در سامانه‌های خاک‌ورزی مرسوم و بدون خاک‌ورزی. *علوم گیاهان زراعی ایران*، ۵۴(۲): ۳۱-۴۶.

DOI: 10.22059/ijfcs.2022.345822.654927

© نویسندگان

ناشر: موسسه انتشارات دانشگاه تهران.

۱. مقدمه

تولیدات بخش کشاورزی و استفاده از کودهای نیتروژن‌دار در قرن گذشته افزایش چشمگیری داشته است و پیش‌بینی می‌شود با افزایش جمعیت تا سال ۲۰۵۰ تقاضا برای افزایش تولید و کاربرد نیتروژن ادامه داشته باشد (Woodward *et al*., 2021). نیتروژن موجود در کودها، به‌صورت موثری مورد استفاده قرار نمی‌گیرد و در خاک، توسط فرآیندهای زیستی به فرم‌های گوناگونی تبدیل می‌شود؛ علاوه‌براین می‌تواند به‌صورت نیترات با آبشویی از دسترس گیاه خارج و سبب بروز آلودگی آب‌های زیرزمینی شود (Corrochano-Monsalve *et al*., 2020). نیتریفیکاسیون به‌عنوان فرایند تبدیل آمونیوم به نیترات در کشاورزی بسیار مهم می‌باشد که در آن نیتروس‌اکسید نیز به‌عنوان یک محصول جانبی توسط اکسیدکننده‌های آمونیاک AOA [1]و یا AOB [2]تولید می‌شود (Cui *et al*., 2013). افزایش کاربرد کود لزوما با افزایش عملکرد گیاه همراه نخواهد شد و میزان از دست‌دادن نیتروژن پیش از جذب آن توسط گیاه نیز افزایش می‌یابد، ازاین‌رو جهت افزایش کارایی کاربرد نیتروژن، کاربرد مهارکننده‌های نیتریفیکاسیون، مانند نیتراپایرین در خاک توصیه شده است (Woodward *et al*., 2021). نیتراپایرین آنزیمی میکروبی است که نخستین مرحله نیتریفیکاسیون از آمونیوم به نیتریت را کاتالیز می‌کند و از فعالیت آمونیاک مونواکسیژناز در خاک و آب جلوگیری می‌کند (Woodward *et al*., 2021).

نیتراپایرین ترکیبی آلی کلره می‌باشد که با آمونیوم کودهای نیتروژنه می‌تواند کلاته بشود تا گیاه بتواند به‌مدت طولانی از آن استفاده کند و همچنین سبب کاهش انتشار نیتروس‌اکسید در خاک‌های زراعی شود (Bhandari *et al*., 2020; Dawar *et al*., 2021). نوع خاک می‌تواند فراوانی و ترکیب باکتری‌های اکسیدکننده آمونیاک را کنترل کند (Chen *et al*., 2010). AOA و AOB در اکثر خاک‌های کشاورزی همزیستی دارند، ولی به نظر می‌رسد جمعیت AOB در خاک‌های با نیتروژن بالا، زیاد می‌شود (Duan *et al*., 2017). روش‌های گوناگون خاک‌ورزی می‌تواند بر فعالیت نیتراپایرین و تأثیر آن بر کاهش انتشار نیتروس اکسید اثرگذار باشد (Corrochano-Monsalve *et al*., 2020). خاک‌ورزی درصورتی‌که به درستی اعمال نشود، باعث انتشار و هدرروی نیتروژن چه به‌صورت گازی و چه به صورت آبشویی می‌شود (Keshavarz Afshar *et al*., 2018). استفاده از سامانه‌های خاک‌ورزی حفاظتی مانند خاک‌ورزی حداقل یا بدون خاک‌ورزی به‌دلیل تأثیر مفید آن در ذخیره آب خاک، به‌عنوان یکی از امیدوارکننده‌ترین راهکارها برای افزایش ذخایر کربن آلی خاک در مناطق خشک بیان شده است (Plaza-Bonilla *et al*., 2014). مطالعه‌های دیگر نشان داده است که تنوع باکتریایی خاک، فراوانی نسبی و عملکرد آن‌ها در سامانه های خاک‌ورزی گوناگون، به‌دلیل ارتباط آن با ویژگی‌های فیزیکی خاک متفاوت است (Carbonetto *et al*., 2014; Souza *et al*., 2013; Thompson *et al*., 2016; Xia *et al*., 2019).

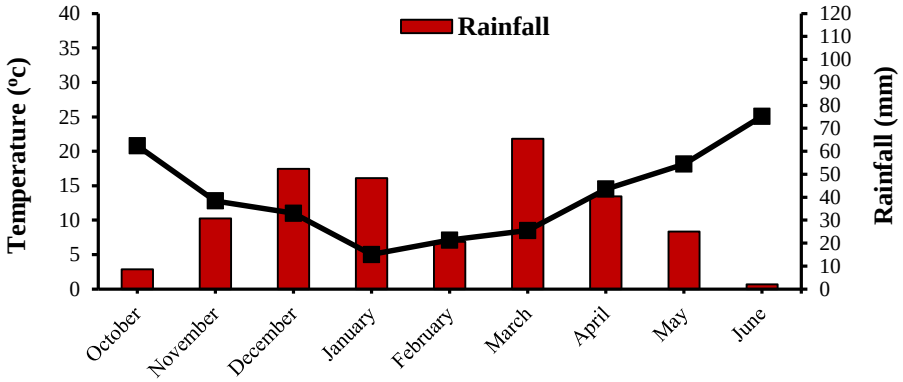
خاک‌ورزی و همچنین شیوه‌های مدیریت حاصلخیزی خاک می‌تواند بر فرایندهای فیزیکوشیمیایی و زیستی خاک تأثیرگذار باشد و در نتیجه آن پایداری سامانه‌ها را تغییر دهد (Khodabin *et al*., 2022; Moghadam *et al*., 2022). خاک‌ورزی مرسوم می‌تواند منجر به تخریب خاک و اثرات منفی بر ویژگی‌های شیمیایی و زیستی آن شود، درحالی‌که عملیات بدون خاک‌ورزی ساختار و پایداری خاک را تقویت می‌کند (Nunes *et al*., 2020). بررسی‌ها نشان داد خاک‌ورزی بر میزان آمونیوم، نیترات و نیتروس‌اکسید در کشت ذرت اثر معنی‌داری ندارد، درحالی‌که نیتراپایرین منجر به کاهش نیترات خاک شد (Borzouei *et al*., 2021). همچنین نیتراپایرین میزان نیترات خاک را ۶۵ درصد کاهش داد (Li *et al*., 2021). بررسی‌ها نشان می‌دهد میزان انتشار نیتروس‌اکسید در بدون خاکورزی ۳۰ تا ۲۰۰ درصد بیشتر از خاک‌ورزی مرسوم گزارش شده است (Grave *et al*., 2018). کاربرد نیتراپایرین عملکرد دانه گندم، کارایی استفاده از نیترژون و کارایی مصرف نیتروژن را افزایش

1. Ammonia-oxidizing archaea
2. Ammonia-oxidizing bacteria

داد (Bhandari *et al*., 2020). همچنین کاربرد نیتراپایرین باعث بهبود افزایش سطح برگ، زیست‌توده و جذب دی‌اکسید کربن می‌شود (Ren *et al*., 2020). کاربرد نیتراپایرین به همراه اوره نسبت به کاربرد خالص اوره نرخ خالص فتوسنتز و وزن خشک گیاه را افزایش می دهد (Cai *et al*., 2018). غلات و گندم سهم مهمی در برنامه‌ریزی‌های غذایی انسان دارند، به‌نحوی‌که بیش از ۷۰ درصد سطح زیر کشت گیاهان زراعی را غلات به خود اختصاص است و ۵۰ درصد از پروتئین انسان را نیز تأمین می‌کنند. سرانه مصرفی گندم در ایران ۲۳۲ کیلوگرم در سال است که نسبت به میانگین جهانی بیش از دو برابر می‌باشد (Jalilian *et al*., 2018). از این رو بررسی اثرات مهارکننده نیتریفیکاسیون در شرایط متفاوت خاک‌ورزی بر عملکرد گندم و ویژگی‌های خاک می‌تواند از اهمیت بالایی برخوردار باشد. بر این اساس این مطالعه با هدف ارزیابی اثر خاکورزی، کود اوره همراه با نیتراپایرین و رقم‌های گندم بر ویژگی‌های خاک و عملکرد دانه و انتشار نیتروس‌اکسید اجرا شد.

۲. روش‌شناسی پژوهش

این آزمایش در فصل زارعی ۱۳۹۹–۱۳۹۸ در ایستگاه تحقیقاتی پژوهشکده جنگل‌ها و مراتع استان البرز، شهرستان کرج (طول جغرافیایی ۵۰ درجه و ۹۸ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۷۶ دقیقه شمالی) انجام شد. میانگین بلندمدت بارندگی البرز ۲۳۱ میلی‌متر و بیشترین بارندگی در ماه آذر و کمترین نیز در ماه‌های مرداد و شهریور می‌باشد (شکل ۱).



شکل ۱. تغییرات دما و بارندگی در ایستگاه هواشناسی کرج در فصل زراعی ۱۳۹۹–۱۳۹۸

ویژگی‌های خاک مزرعه تحقیقاتی نیز پس از نمونه‌برداری اندازه‌گیری و در جدول ۱ آمده است. طرح آزمایشی به‌صورت کرت‌های خردشده فاکتوریل در قالب بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار بود. کرت اصلی شامل دو سطح خاک‌ورزی [بدون خاک‌ورزی (NT) و خاک‌ورزی مرسوم (CT)]، کرت فرعی سه سطح کودی [کنترل (بدون کوددهی)، ۳۵۰ کیلوگرم در هکتار اوره و ۳۵۰ کیلوگرم در هکتار اوره+۰/۵۱ کیلوگرم در هکتار نیتراپایرین] و رقم‌های گندم (رخشان و پیشگام) بود. اعمال تیمارهای کودی در دو زمان انجام شد، یک‌سوم آن در مرحله کشت و دو سوم آن در مرحله ساقه‌دهی به خاک اضافه شد. تیمار نیتراپایرین نیز هم‌زمان با تقسیط کوده اوره به‌صورت محلول‌پاشی به خاک اضافه شد (Chen *et al*., 1994). تاریخ کشت گندم در اوایل آبان‌ماه بود. هر کرت آزمایش شامل شش ردیف گندم به طول پنج متر بود. میزان بذر کشت‌شده در این تحقیق ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار بود. تمامی مراحل کشت، داشت و برداشت گندم یکسان و باتوجه‌به عرف منطقه می‌باشد که در جدول ۲ قابل مشاهده است.

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک محل اجرای آزمایش

	Conventional tillage	No- tillage
pH	7.1	6.3
EC (dS m^{-1})	1.91	1.87
Organic Carbon (%)	0.58	0.73
N (%)	0.06	0.08
P (mg/kg)	13	11
K (mg/kg)	284	258
Fe (mg/kg)	4.71	5.04
Zn (mg/kg)	1.7	1.5
Mn (mg/kg)	5.8	6.01
No_3^- (mg/kg)	20.4	19.8
NH_4^+ (mg/kg)	7.8	12.9
Clay (%)	43	43
Silt (%)	37	37
Sand (%)	20	20
Bulk density (g cm^3)	1.16	1.22

نمونه‌برداری صفات گندم بعد از رسیدگی فیزیولوژیک انجام گرفت، به‌نحوی‌که با رعایت خطوط حاشیه، دو متر مربع از هر کرت آزمایشی برای عملکرد در نظر گرفته شد. میزان انتشار نیتروس‌اکسید با استفاده از محفظه‌های بسته استاتیک که در بازه زمانی ۹ تا ۱۰ صبح و در فواصل زمانی صفر، ۱۰ و ۲۰ دقیقه (گاز از طریق سرنگ‌های مخصوص ۲۰ میلی‌لیتری از محفظه‌ها جمع‌آوری شد) از کشت تا برداشت اندازه‌گیری شد (Zhou *et al*., 2014; Liu *et al*., 2015). غلظت گاز با استفاده از سامانه کروماتوگرافی گازی (Agilent 7890 A, USA) و شیوه‌نامه فنی آن (اندازه‌گیری در صبح، کروماتوگرافی با یک ستون فولادی ضد زنگ ۴ میلی‌متری با طول ۳ متر و به همراه گاز حامل N_2 و ستون و آشکارساز به‌ترتیب در دمای ۷۰ و ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد تنظیم شد) اندازه‌گیری شد (Liu *et al*., 2015).

ویژگی‌های آمونیوم و نیترات خاک در آزمایشگاه خاک‌شناسی اندازه‌گیری شد (Cui *et al*., 2013). نمونه‌برداری‌ها براساس مراحل رشدی گندم شامل پنجه‌زنی، طویل‌شدن ساقه، آبستنی، گلدهی و رسیدگی کامل انجام گرفت. محتوای آب منافذ خاک (WFPS) نیز با روش (Linn & Doran, 1984) اندازه‌گیری شد. هزینه‌های اجتماعی ایجادشده ناشی از انتشار یا کاهش یک تنی نیتروس‌اکسید در بعد زمانی و مکانی خاص نیز اندازه‌گیری شد (Nabavi-Pelesaraei *et al*., 2019). هنگامی‌که انتشار گازهای گلخانه‌ای به حداقل می‌رسد، هرچقدر مقدار هزینه اجتماعی نیتروژن بالاتر باشد، می‌تواند از خسارت به محیط زیست جلوگیری کند (Nabavi-Pelesaraei *et al*., 2019). زمانی‌که همه متغیرها ثابت بمانند، صرف هزینه بیشتر برای محدودکردن چنین انتشاراتی مطلوب می‌باشد (Nabavi-Pelesaraei *et al*., 2019). ضریب استاندارد برای محاسبه هزینه‌های اجتماعی تولید نیتروس‌اکسید معادل ۴/۵۸ دلار به‌ازای هر کیلوگرم می‌باشد (Nabavi-Pelesaraei *et al*., 2019).

داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.4 مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت. برای تعیین توزیع نرمال و همگنی داده‌ها پیش از انجام تحلیل واریانس (ANOVA) از آزمون Shapiro-Wilk استفاده شد که نتایج نشان از نرمال‌بودن داده‌ها بود. بلوک‌ها (تکرارها)، خاک‌ورزی و تیمار کود اثرات ثابت در نظر گرفته شدند. تفاوت در میانگین صفات اندازه‌گیری‌شده با استفاده از جدول واریانس ANOVA در سطح احتمال ۵ درصد تعیین شد. از آزمون کمترین تفاوت معنی‌دار (LSD) برای مقایسه میانگین‌ها استفاده شد. از نرم‌افزار اکسل نیز برای رسم شکل‌ها استفاده شده است.

جدول ۲. عملیات خاکورزی و مدیریت کشت، داشت و برداشت در طول آزمایش

Agronomic practices	No- tillage	Conventional tillage
Planting		
Plowing Machine	×	*
a. Chisel plough	×	×
b. Moldboard Plows	×	working depth= 25 cm
c. Disc Harrows	×	working depth = 15 cm × 2
Fertilization	*	*
a. Urea	F2 (1/3 (116 kg ha^{-1})) F3 (1/3+ Nitrapyrin)	F2 (1/3 (116 kg ha^{-1})) F3 (1/3 + Nitrapyrin)
b. Nitrapyrin	1/3 (0.17 kg ha^{-1}) Nitrapyrin Foliar application in soil	1/3 (0.17 kg ha^{-1}) Nitrapyrin Foliar application in soil
c. Phosphorus	130 kg ha^{-1}	130 kg ha^{-1}
Sowing	Disc drill	Disc drill
Growing		
Fertilization	*	*
a. Urea	F2 (2/3 (233 kg ha^{-1})) F3 (2/3 + Nitrapyrin)	F2 (2/3 (233 kg ha^{-1})) F3 (2/3 + Nitrapyrin)
b. Nitrapyrin	2/3 (0.34 kg ha^{-1}) Nitrapyrin Foliar application in soil	2/3 (0.34 kg ha^{-1}) Nitrapyrin Foliar application in soil
Irrigation	Furrow irrigation	Furrow irrigation
Weed management	Hand weeding	Hand weeding
Pest management	Matasystox-R 25% EC (1-1.5 L/1000 L ha^{-1})	Matasystox-R 25% EC (1-1.5 L/1000 L ha^{-1})
Harvesting	Manual sampling (2 m^2)	Manual sampling (2 m^2)

* نشان‌دهنده انجام عملیات و × نشان‌دهنده عدم انجام عملیات است.

۳. یافته‌های پژوهش و بحث

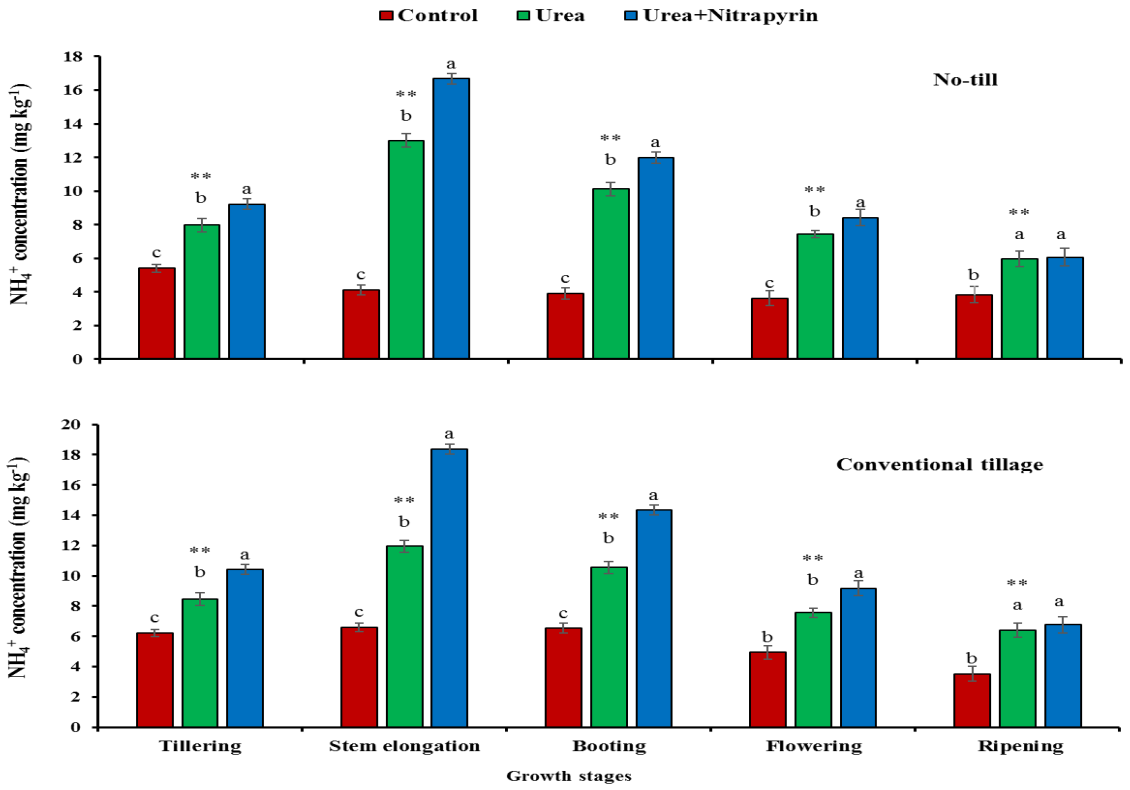
۳–۱. تجزیه واریانس

در این آزمایش تیمار خاک‌ورزی بر صفات میزان آمونیوم و نیتروس‌اکسید در مراحل مختلف رشدی معنی‌دار بود. اثر رقم بر هیچ کدام از صفات اندازه‌گیری‌شده بجز عملکرد دانه معنی‌دار نبود (جدول ۳ و ۴). تیمار کودی نیز بر کلیه صفات در همه مراحل رشدی بجز میزان نیتروس‌اکسید در مرحله رسیدگی فیزیولوژیک اثر معنی‌داری داشت (جدول ۴). برهمکنش خاک‌ورزی در سطوح کودی نیز بر صفات عملکرد دانه، هزینه اجتماعی نیتروس‌اکسید، میزان آمونیوم و نیتروس‌اکسید در مراحل رشدی معنی دار بود. برهمکنش تیمارهای خاک ورزی×رقم، رقم×سطوح کودی و خاک‌ورزی×رقم×سطوح کودی نیز تنها در صفت عملکرد دانه معنی‌دار بود (جدول ۳ و ۴).

۳–۲. آمونیوم (NH_4^+)

میزان یون آمونیوم در مراحل نموی رشد گندم در سامانه خاک‌ورزی مرسوم نسبت به بدون خاک‌ورزی بالاتر بود، به‌نحوی‌که میانگین آمونیوم در کل دوره رشد گندم در خاکورزی مرسوم ۸/۷۹ و در بدون خاک‌ورزی ۷/۸۵ بود (شکل ۲). روند میزان آمونیوم در هر دو سطح خاک‌ورزی تقریبا مشابه بود، به‌طوری‌که بیشترین میزان آمونیوم در مرحله طویل‌شدن ساقه و کمترین آن نیز در مرحله رسیدگی فیزیولوژیک وجود داشت (شکل ۲). در طول دروه نموی گندم، تیمار کودی اوره+نیتراپایرین در کلیه مراحل نسبت به اوره و کنترل میزان آمونیوم بالاتری داشت، این نسبت افزایش در بدون خاک‌ورزی و مراحل نموی پنجه‌زنی، طویل‌شدن ساقه، آبستنی و گل‌دهی به‌ترتیب ۱۵/۶۶، ۲۸/۲۰، ۱۸/۳۷، ۱۳/۳۲ و ۱/۶۷ درصد بود، همچنین در شرایط خاکورزی

مرسوم این نسبت به‌ترتیب ۲۲/۹۰، ۵۳/۸۰، ۳۵/۷۹، ۲۱/۲۹ و ۵/۲۹ درصد می‌باشد که نشان از تفاوت در دو سامانه خاک‌ورزی دارد (شکل ۲). تاثیرگذاری اوره+نیتراپایرین بر میزان آمونیوم نسبت به اوره در سامانه بدون خاک‌ورزی و مرحله طویل‌شدن ساقه نسبت به سامانه خاکورزی مرسوم ۲۵/۵۹ درصد بالاتر بود و به‌طور کلی میانگین اثرگذاری اوره+نیتراپایرین در کل دوره نموی گندم در سامانه بدون خاک‌ورزی ۱۵/۴۵ درصد و در سامانه خاکورزی مرسوم ۲۷/۸۱ درصد می‌باشد (شکل ۲).



شکل ۲. میزان یون آمونیوم تیمارهای کودی در سطوح گوناگون خاک‌ورزی در مراحل رشدی گندم. تفاوت‌های معنی‌دار ($P<0.05$) بین تیمارها با حرف متفاوت نشان داده شده است. خطای استاندارد مقادیر گرفته‌شده از سه تکرار (n=3) می‌باشد.

فعالیت نیتراپایرین در خاک با گذشت زمان روند کاهشی دارد (عموما چهار هفته) که در دیگر مطالعات نیز به آن اشاره شده است (Cui *et al*., 2013; O'Callaghan *et al*., 2010)، بنابراین زمان کابرد آن بر میزان فعالیت باکتری‌های اکسید-کننده مؤثر است.

در این پژوهش باتوجه‌به تقسیط کاربرد کود، در دو مرحله ابتدای رشد و مرحله ساقه‌دهی گندم (جدول ۲) میزان اثرگذاری نیتراپایرین نیز متفاوت بود. به نظر می‌رسد روند کاهشی اثرگذاری نیتراپایرین طی مراحل نموی به‌دلیل کاهش اثرگذاری در خاک باشد. بررسی‌ها نشان می‌دهد غلظت آمونیوم در خاک بعد از کوددهی به اوج خود می‌رسد، اما پس از مدتی به‌سرعت مصرف شده و پس از آن آمونیوم از طریق کانی‌سازی نیتروژن در خاک تأمین می‌شود (Ouyang *et al*., 2017). به‌همین‌دلیل بالاترین میزان آمونیوم (۱۸/۳۸ mg kg^{-1}) در مرحله طویل‌شدن ساقه که همزمان با تقسیط کود اوره

جدول ۳. تجزیه واریانس آزمایش صفات نیترات و آمونیوم تحت تاثیر تیمارهای خاکورزی، رقم و سطوح کودی

		NO_3					NH_4				
S.O.V	**df**	**Tillering**	**Stem elongation**	**Booting**	**Flowering**	**Rippening**	**Tillering**	**Stem elongation**	**Booting**	**Flowering**	**Rippening**
Block (R)	2	5.81 ns	3.09 ns	11.33 ns	5.87 ns	10.14*	0.35 ns	6.02*	1.84 ns	4.82 ns	3.27**
Tillage (T)	1	18.3 ns	20.77ns	17.80ns	10.06 ns	6.17 ns	10.55 *	7.11 *	9.03**	10.72 *	3.88 *
Main error	2	11.84	9.32	15.78	5.22	4.04	0.33	1.21	0.48	2.19	0.39
Cultivar (C)	1	13.25 ns	8.62 ns	9.41 ns	3.01 ns	2.42 ns	2.74 ns	4.07 ns	0.77 ns	1.37ns	1.02 ns
T*C	1	8.14ns	2.91 ns	11.19 ns	13.88ns	1.73 ns	5.19 ns	2.84 ns	5.14ns	7.12ns	2.45 ns
Fertilizer (F)	2	27.09 **	35.8**	46.56**	20.27**	16.58**	19.78**	30.05**	15.33**	24.43**	8.51**
T*F	2	2.91 ns	12.01ns	15.03 ns	7.83 ns	6.14 ns	8.26*	13.88**	8.59*	9.79*	2.01*
F*C	2	15.72 ns	7.11 ns	2.71 ns	1.49 ns	7.72 ns	3.91 ns	6.11 ns	4.41ns	1.02ns	1.19 ns
T*C*F	2	2.66ns	9.75 ns	5.31 ns	9.09 ns	3.11 ns	8.38 ns	1.15 ns	2.25ns	10.75 ns	0.93 ns
Error	20	1.71	8.95	14.11	9.69	5.19	0.43	0.66	0.6	0.21	0.09
CV (%)		11.11	9.55	14.37	7.77	5.23	7.44	10.75	5.96	8.90	3.23

ns غیر معنی‌دار، * و ** به‌ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد می‌باشند.

جدول ٤. تجزیه واریانس آزمایش صفات نیتروس‌اکسید، عملکرد دانه و هزینه اجتماعی انتشار نیتروس‌اکسید تحت تاثیر تیمارهای خاکورزی، رقم و سطوح کودی

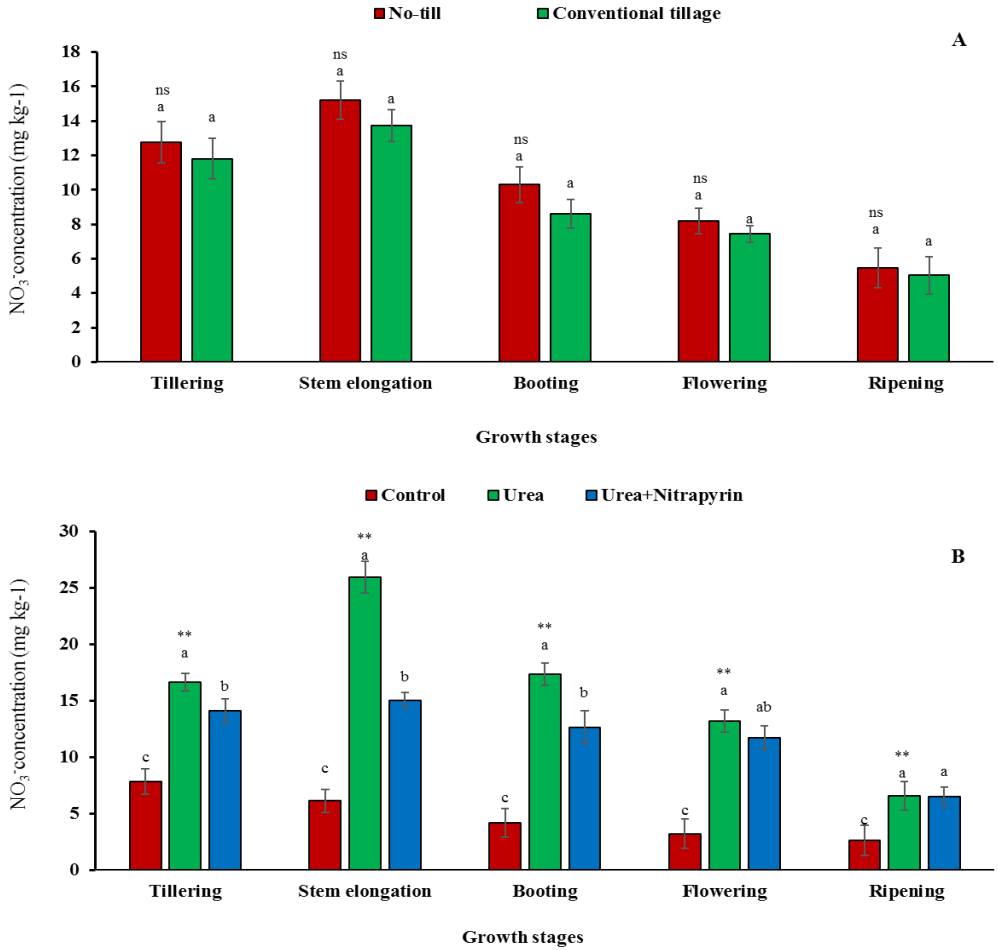
		N_2O						
S.O.V	**df**	**Tillering**	**Stem elongation**	**Booting**	**Flowering**	**Rippening**	**Grain yield**	**Social cost N_2O emission**
Block (R)	2	0.0001 ns	0.0009 *	0.0007 ns	0.00003 ns	0.00017 ns	965984 ns	1.24 ns
Tillage (T)	1	0.0022**	0.025**	0.049**	0.0002*	0.0031*	7948037**	11.11 **
Main error	2	0.0008	0.0011	0.014	0.0005	0.0047	3979030	0.93
Cultivar (C)	1	0.0003 ns	0.0001 ns	0.0064 ns	0.00008 ns	0.00008 ns	19871460**	0.85 ns
T*C	1	0.0005ns	0.00007 ns	0.0004 ns	0.000073ns	0.00025 ns	4662462*	3.27 ns
Fertilizer (F)	2	0.0151**	0.0321**	0.0979**	0.0037**	0.00036 ns	83372169**	15.78**
T*F	2	0.0093**	0.019**	0.0547**	0.00019*	0.0094 ns	4124217*	8.39*
F*C	2	0.0007 ns	0.0005 ns	0.0092 ns	0.000025 ns	0.0009 ns	3739039*	5.14 ns
T*C*F	2	0.00009ns	0.00002 ns	0.00035 ns	0.00001ns	0.0007 ns	5296068**	2.68 ns
Error	20	0.07	0.004	0.0219	0.00029	0.0003	923915	0.71
CV (%)		8.42	11.81	16.37	4.04	9.19	10.12	12.75

ns غیر معنی‌دار، * و ** به‌ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد می‌باشند.

بود مشاهده شد. نیتراپایرین با مهار فرایند نیتریفیکاسیون باعث افزایش میزان آمونیوم قابل دسترس در محیط خاک می‌شود و این امر می‌تواند باعث افزایش میزان pH در خاک شود (O'Callaghan *et al*., 2010). بررسی‌ها نشان می‌دهد ماندگاری و فعالیت نیتراپایرین در خاک به دما، فعالیت میکروبی خاک و رطوبت آن حساس می‌باشد و خاک‌ورزی با تأثیر بر میزان PH می‌تواند بر فعالیت نیتراپایرین مؤثر باشد (Ramotowski & Shi, 2022).

۳-۳. میزان نیترات (NO_3^-)

بررسی میزان نیترات در سامانه خاک‌ورزی نشان داد بالاترین میزان در هر دو سطح خاک‌ورزی در مراحل نموی ابتدای رشد (طویل‌شدن ساقه) بود و با طی‌شدن مراحل نموی میزان آن روند کاهشی داشت، بااین‌حال میزان نیترات در کلیه مراحل نموی نسبت به یکدیگر تفاوت معنی‌داری را نشان نداد (شکل ۳).



شکل ۳. میزان نیترات در سطوح مختلف خاک‌ورزی (A) و تیمارهای کودی (B) در مراحل رشدی گندم. تفاوت‌های معنی‌دار ($P<0.05$) بین تیمارها با حرف متفاوت نشان داده شده است. خطای استاندارد مقادیر گرفته‌شده از سه تکرار (n=3) می‌باشد.

بالاترین میزان نیترات (۲۵/۹۶ میلی گرم در کیلوگرم خاک) در سطح کودی اوره و مرحله طویل‌شدن ساقه بود، این سطح نسبت به اوره+نیتراپایرین ۴۲/۹۷ درصد و نسبت به شاهد ۷۶/۴۰ درصد نیترات بیشتری داشت (شکل ۳). با طی‌شدن مراحل نموی گندم، میزان نیترات نیز روند کاهشی داشت، به‌طوری‌که میزان نیترات در تیمار اوره نسبت به اوره+نیتراپایرین در مراحل نموی پنجه‌زنی، طویل‌شدن ساقه، آبستنی و گلدهی به‌ترتیب ۱۵/۳۰، ۴۲/۰۳، ۲۷/۰۸ و ۱۱/۲۵ درصد بود، این میزان در مرحله رسیدگی فیزیولوژیک صرفاً ۱/۹۶ درصد بود، ولی معنی‌دار نبود (شکل ۳). کمترین میزان نیترات نیز در کلیه مراحل نموی گندم، در سطح

شاهد بود، هرچند روند آن مشابه دیگر تیمارها می‌باشد (شکل ۳). نتایج دیگر نشان داد سطح خاک‌ورزی بر میزان آمونیوم نیترات و انتشار نیتروس‌اکسید در شرایط کشت ذرت اثر معنی‌داری ندارد، درحالی‌که نیتراپایرین اثر معنی‌داری داشت و باعث کاهش میزان نیترات در خاک شد (Borzouei *et al*., 2021). مطالعه دیگری نشان داد در شرایط کاربرد نیتراپایرین مقدار نیترات از ۹۵/۵۹ به ۳۳/۴۹ میلی‌گرم در کیلوگرم کاهش یافت (Li *et al*., 2021). در این بررسی نیز کاربرد نیتراپایرین در مرحله پنجه‌زنی میزان نیترات را ۱۶/۶۴ به ۱۴/۱ ($mg\ kg^{-1}$) کاهش داد (شکل ۳) که این روند در دیگر مراحل نموی گندم نیز وجود نداشت. به نظر می‌رسد نیتراپایرین با تأثیر بر باکتری‌های اکسیدکننده آمونیوم باعث کاهش فعالیت نیتریفیکاسیون شده است. همچنین کاهش تفاوت میان سطوح کودی در اواخر دوره رشد می‌تواند به‌دلیل دوره فعالیت نیتراپایرین باشد (O'Callaghan *et al*., 2010). به‌طور کلی می توان گفت غلظت نیترات خاک کمتر از آمونیوم بود و تحت تأثیر تیمار اوره+نیتراپایرین قرار گرفت. این امر نشان‌دهنده تأثیر نیتراپایرین بر فرایند نیتریفیکاسیون می‌باشد و که منجر به افزایش مدت زمان محتوی آمونیوم در خاک می‌شود. ازاین‌رو می‌تواند در کاهش انتشار نیتروس‌اکسید و آبشویی نیترات مؤثر باشد (Dawar *et al*., 2021).

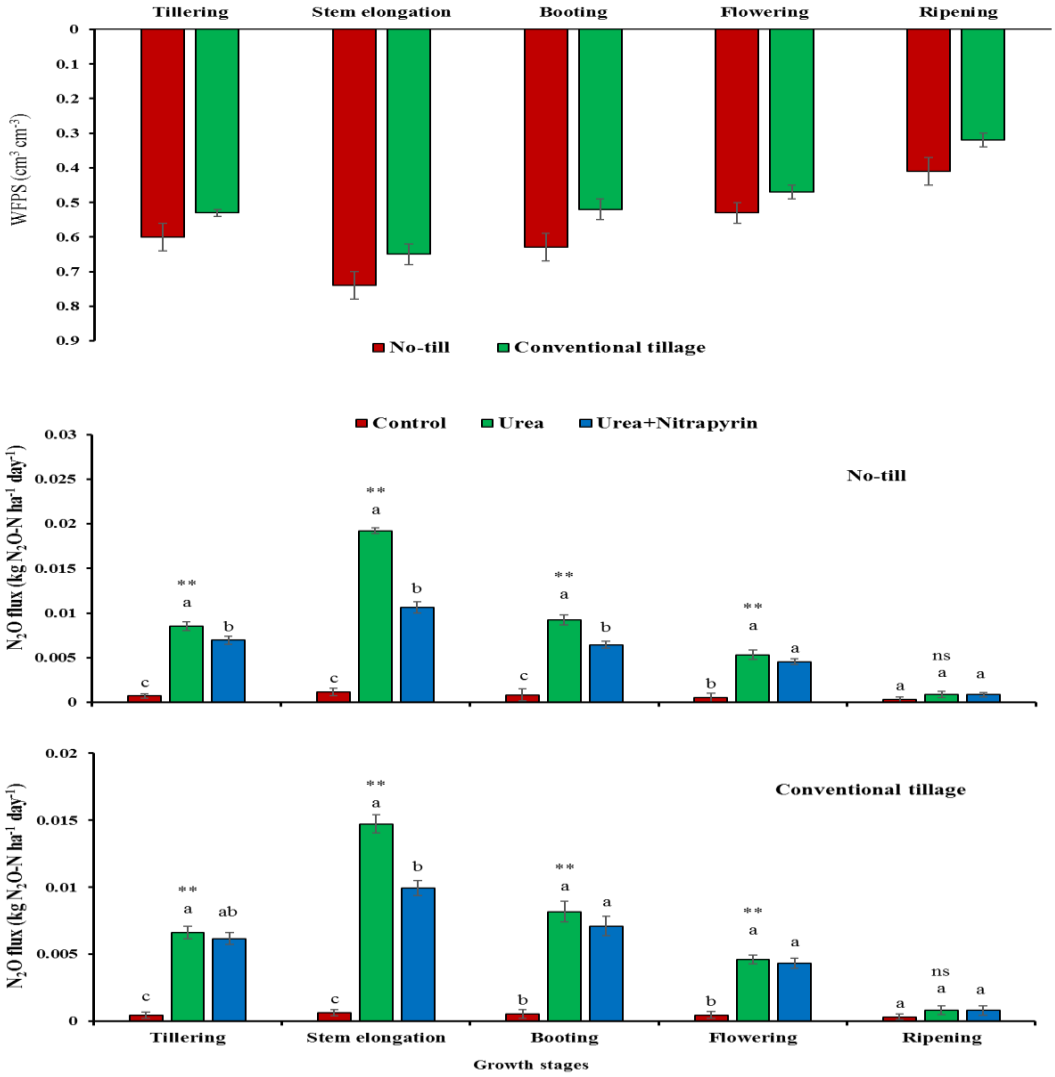
۴-۳. نیتروس اکسید (N_2O)

تأثیر خاک‌ورزی بر میزان اثرگذاری نیتراپایرین معنی‌دار بود، به‌طوری‌که در شرایط بدون خاک‌ورزی میزان انتشار نیتروس‌اکسید بالاتر بود. همچنین میانگین کاهش نیتروس‌اکسید در تیمار اوره+نیتراپایرین نسبت به اوره در کل دوره نموی گندم ۲۲/۳۲ درصد و در خاک‌ورزی مرسوم ۱۲/۰۶ درصد بود. این امر نشان می‌دهد عواملی که تحت تأثیر خاک‌ورزی در طولانی‌مدت باعث تغییر خصوصیات خاک از جمله pH و FWPS ایجاد شده است، بر میزان فعالیت نیتراپایرین نیز مؤثر بوده است. در مرحله طویل‌شدن ساقه تیمار کودی اوره در سامانه خاکورزی مرسوم و بدون خاکورزی به‌ترتیب با میزان غلظت نیتروس اکسید ۰/۰۱۴۷ و ۰/۰۱۹۲ ($kg\ N_2O\text{-}N\ ha^{-1}\ day^{-1}$) بیشترین میزان و تیمار کنترل در شرایط خاک‌ورزی مرسوم (۰/۰۰۰۳) کمترین میزان انتشار نیتروس اکسید را داشتند (شکل ۴). نتایج نشان داد که میزان انتشار نیتروس‌اکسید در سامانه بدون خاکورزی در شرایط کاربرد نیتراپایرین در مراحل نموی پنجه‌زنی، طویل‌شدن ساقه، آبستنی و گلدهی به‌ترتیب ۱۸/۳۱، ۴۴/۵۰، ۳۰/۱۰، ۱۴/۸۶ و ۳/۸۱ درصد کاهش یافت، این میزان در سامانه خاک‌ورزی مرسوم به‌ترتیب ۶/۸۹، ۳۲/۵۱، ۱۳/۰۴، ۶/۱۵ و ۱/۷۳ درصد بود (شکل ۴).

در این مطالعه میانگین میزان انتشار نیتروس اکسید در کل دوره رشد گندم در سامانه بدون خاک‌ورزی $kg\ N_2O\text{-}N\ ha^{-1}\ day^{-1}$ ۰/۰۰۵۰۸ بود که نسبت به خاک‌ورزی مرسوم (۰/۰۰۴۳۷) ۱۳/۹۲ درصد انتشار بیشتری داشت (شکل ۴). همزمانی تقسیط کودی در مرحله طویل‌شدن ساقه و WFPS بالاتر در این مرحله یکی از دلایل اصلی انتشار بالاتر نیتروس‌اکسید در سامانه بدون خاک‌ورزی و مرحله طویل‌شدن ساقه می‌باشد. نتایج دیگر مطالعات نشان داد میزان انتشار نیتروس‌اکسید در شرایط بدون خاک‌ورزی و WFPS بالا، ۳۰ تا ۲۰۰ درصد بیشتر از خاک‌ورزی مرسوم بود (Grave *et al*., 2018). اثرگذاری نیتراپایرین در مرحله طویل‌شدن ساقه بالاترین بود که علت آن می‌تواند به دلیل هم‌زمانی تقسیط کاربرد کود اوره و کاربرد نیتراپایرین در این مرحله نموی باشد و کاهش میزان اثرگذاری نیتراپایرین در اواخر دوره رشد نیز می‌تواند به‌دلیل کاهش اثرگذاری نیتراپایرین به‌دلیل نیمه‌عمر فعالیت آن، جذب و تجزیه آن در خاک باشد که بر انتشار نیتروس‌اکسید بسیار مؤثر است (Wolt, 2000). چرا که تجزیه یا جذب بالای نیتراپایرین در اغلب خاک‌های کشاورزی بین ۵ تا ۴۲ روز گزارش شده است (Cui *et al*., 2013). همچنین باتوجه‌به حضور گندم و جذب نیتروژن در خاک، در اواخر دوره رشد به‌طور کلی میزان نیتروژن کاهش می‌یابد (Lognoul *et al*., 2017).

بررسی‌ها نشان می‌دهد حداکثر میزان انتشار نیتروس‌اکسید در گیاه گندم بعد از کوددهی به‌صورت پایه و سرک می‌باشد (Bhandari *et al*., 2020)، در این مطالعه نیز این روند مشاهده شد. بررسی‌های دیگر نیز نشان می‌دهد نیتراپایرین با کاهش نرخ نیتریفیکاسیون از طریق مهار فعالیت آمونیاک مونواکسیژناز باعث کاهش میزان انتشار نیتروس‌اکسید می‌شود (Barrena *et al*., 2017; Pokharel & Chang, 2021).

کاهش میزان نیتروس‌اکسید در شرایط کاربرد نیتراپایرین می‌تواند یکی از راهکارهای مناسب در جهت کاهش اثار زیان‌بار زیست‌محیطی نیتروس‌اکسید باشد. نتایج مطالعات نشان می‌دهد کاربرد نیتراپایرین به‌صورت قابل توجهی میزان انتشار تجمعی نیتروس‌اکسید را در خاک‌ورزی معمولی و حداقل خاک‌ورزی به‌ترتیب ۴۱ و ۳۲ درصد کاهش می‌دهد (Borzouei *et al*., 2021).



شکل ٤. میزان نیتروس‌اکسید در سطوح مختلف خاک‌ورزی و تیمارهای کودی در مراحل رشدی گندم. محتوی آب منافذ خاک در مراحل رشدی گندم در سامانه‌های خاک‌ورزی. تفاوت‌های معنی‌دار ($P<0.05$) بین تیمارها با حرف متفاوت نشان داده شده است. خطای استاندارد مقادیر گرفته‌شده از سه تکرار ($n=3$) می‌باشد.

میزان انتشار نیتروس‌اکسید در سامانه‌های خاک‌ورزی متفاوت است، چرا که ساختار خاک به‌دلیل حفظ بقایا، دست‌خوردگی کم‌تر و همچنین بهبود خصوصیات کیفی خاک می‌تواند از ویژگی‌های مؤثر بر انتشار نیتروس‌اکسید به شمار آید. به‌طور کلی دیگر نتایج نیز نشان می‌دهد انتشار نیتروس‌اکسید از سطح بدون خاک‌ورزی، میزان نیتروژن بالاتر و WFPS بالا در مقایسه با خاک‌ورزی مرسوم بالاتر بود (Bayer *et al*., 2015; Bhatia *et al*., 2010; Corrochano, *et al*., 2020; Corrochano, *et al*., 2020; Marquina *et al*., 2015). مطالعات دیگری نیز وجود دارد که افزایش میزان انتشار نیتروس‌اکسید را در خاک‌ورزی مرسوم گزارش کرده‌اند (Koga, 2013; Mutegi *et al*., 2010; Plaza-Bonilla *et al*., 2014; Wang & Dalal, 2015).

۵–۳. هزینه اجتماعی (N_2O)

برآورد هزینه اجتماعی تولید نیتروس‌اکسید در سطوح کودی و سامانه خاک‌ورزی متفاوت بود، به‌طوری‌که باتوجه‌به میزان انتشار نیتروس‌اکسید تجمعی در کل دوره رشد گندم و حاصل‌ضرب آن در هزینه اجتماعی به‌ازای هر کیلوگرم نیتروس‌اکسید انتشاریافته در محیط زیست (۴/۵۸ دلار)، بالاترین هزینه اجتماعی با ۷/۹۱ دلار در ازای انتشار ۱/۷۲ kg N_2O-N ha^{-1} در تیمار کودی کاربرد اوره و سامانه بدون خاک‌ورزی به‌دست آمد (شکل ۵). در سطح بدون خاک‌ورزی، کاربرد نیتراپایرین منجر به کاهش ۳۱/۷۶ درصدی

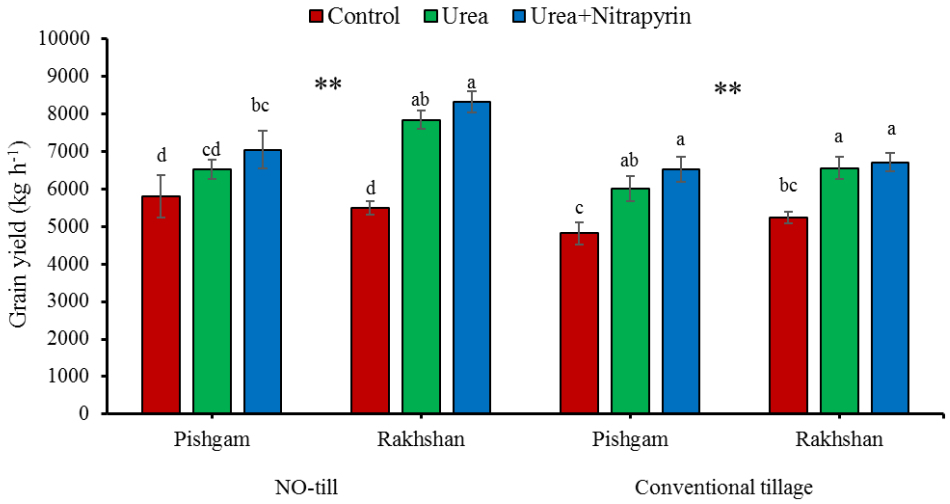
هزینه اجتماعی شد، به‌طوری‌که به‌ازای تولید ۱/۱۷ $kg\ N_2O\text{-}N\ ha^{-1}$ ۵/۳۹ دلار هزینه اجتماعی داشت (شکل ۵). در سامانه خاک‌ورزی مرسوم نیز کاربرد نیتراپایرین کاهش ۱۸/۹۱ درصدی هزینه اجتماعی را به همراه داشت، به‌طوری‌که هزینه اجتماعی را از ۶/۴۰ دلار در تیمار اوره به ۵/۱۹ دلار در تیمار نیتراپایرین+اوره کاهش داد، این میزان به‌ترتیب به‌ازای تولید ۱/۳۹ و ۱/۱۳ $kg\ N_2O\text{-}N\ ha^{-1}$ در طول دوره رشد گندم بود (شکل ۵). کمترین هزینه اجتماعی در تیمار کنترل و در هر دو سطح خاک‌ورزی مشاهده شد، بااین‌حال به‌طور کلی میزان هزینه اجتماعی در بدون خاک‌ورزی در تمامی تیمارها نسبت به خاک‌ورزی مرسوم بالاتر بود (شکل ۵). نتایج نشان داد میزان هزینه اجتماعی در تیمار کنترل، اوره و اوره+نیتراپایرین در سطح خاک‌ورزی مرسوم نسبت به بدون خاک‌ورزی به‌ترتیب ۳۴/۵۷، ۱۹/۰۸ و ۳/۸۳ درصد کمتر بود، که علت آن میزان بالاتر انتشار نیتروس‌اکسید در سامانه بدون خاک‌ورزی نسبت به خاک‌ورزی مرسوم می‌باشد. بررسی میزان انتشار نیتروس‌اکسید در بازه زمانی ۷ساله نشان داد میانگین انتشار نیتروس‌اکسید و همچنین دی‌اکسید کربن در سامانه بدون خاک‌ورزی به‌طور قابل توجهی نسبت به خاک‌ورزی مرسوم بالاتر بود که علت آن می‌تواند به‌دلیل حفظ بقایا و افزایش میزان کربن و نیتروژن کل خاک و زیست‌توده میکروبی در لایه‌های بالایی خاک باشد که هم‌زمان با افزایش میزان محتوای آب منافذ خاک میزان انتشار نیتروس‌اکسید نیز افزایش یافت (Lognoul *et al*., 2017).

مطالعه دیگری نیز نشان داد بالاترین میزان انتشار نیتروس‌اکسید در شرایط بدون خاک ورزی و بالاترین میزان کاربرد نیتروژن در کشت ذرت به‌دست آمد که در این سامانه محتوای آب منافذ خاک بالای ۶۰ درصد بود درحالی‌که در خاکورزی مرسوم با محتوای آب منافذ خاک کمتر ۴۰ درصد کمترین میزان انتشار نیتروس اکسید نیز مشاهده شد (Pareja-Sánchez *et al*., 2020). باتوجه‌به این مطالب می‌توان میزان هزینه اجتماعی بالاتر در سامانه بدون خاک‌ورزی نسبت خاکورزی مرسوم را به‌دلیل بالاتربودن نیتروس-اکسید آن دانست. Kanter *et al.* (2021)گزارش دادند که اثرات نیتروس‌اکسید بر محیط زیست و سلامت و نقش ان در تخریب لایه ازن در برآوردهای هزینه اجتماعی به‌خوبی برآورد نشده است که این امر هزینه اجتماعی تولید و انتشار نیتروس‌اکسید را کاهش داده است، درصورتی‌که اگر خسارت آن بر لایه ازن را نیز وارد کنیم، میزان هزینه اجتماعی آن حدود ۲۰ درصد بیشتر نیز خواهد شد. استفاده روز افزون از کودهای شیمیایی در حال افزایش است تا بتواند تقاضای مواد غذایی جهان را برآورده سازد، این استفاده بی‌رویه از کود نه تنها پایداری اکوسیستم را به خطر انداخته است، بلکه اثرات جانبی منفی به شکل هزینه‌های اجتماعی پنهان برای جامعه ایجاد می‌کند (ul Haq *et al*., 2020).

۶-۳. عملکرد دانه

بالاترین عملکرد دانه ارقام گندم در سطح کم خاک‌ورزی با ۲۸۳ ± ۸۳۳۱ کیلوگرم در هکتار در رقم رخشان و سطح کودی اوره+نیتراپایرین به‌دست آمد، هرچند نسبت به سطح کودی اوره تفاوت معنی‌داری را نشان نداد (شکل ۶). تیمار کودی اوره+نیتراپایرین و اوره به‌ترتیب منجر به افزایش ۵۱/۷۵ و ۴۲/۹۲ درصدی عملکرد دانه نسبت به تیمار عدم کوددهی (شاهد) شد (شکل ۶). رقم پیشگام نیز رفتار مشابهی نسبت به تیمارهای اعمال‌شده از خود نشان داد (شکل ۶). در شرایط خاک‌ورزی مرسوم عملکرد رقم رخشان در سطح کودی اوره+نیتراپایرین (۲۴۵ ± ۶۷۱۴ کیلوگرم در هکتار) نسبت به دیگر سطوح کودی بالاتر بود، بااین‌حال تفاوت معنی‌داری با رقم پیشگام در سطح کودی اوره و اوره+نیتراپایرین نداشت (شکل ۶). افزایش عملکرد دانه نسبت به شاهد در رقم رخشان در سطح کودی اوره ۲۴/۹ درصد و در سطح کودی اوره+نیتراپایرین ۲۷/۸ درصد بود، این نسبت در رقم پیشگام به‌ترتیب ۲۴/۵ و ۳۵/۲ درصد بود (شکل ۶).

مقایسه عملکرد دانه گندم در دو سطح خاک‌ورزی نشان می‌دهد عملکرد دانه گندم در کم خاک‌ورزی بالاتر می‌باشد، به‌طوری‌که رقم رخشان در تیمار اوره+نیتراپایرین و شرایط کم‌خاک‌ورزی نسبت به خاک‌ورزی مرسوم ۲۴ درصد عملکرد بالاتری داشت، این نسبت در کود اوره نیز ۱۹/۵ درصد بود (شکل ۶). باتوجه‌به نقش نیتراپایرین بر میزان نیتروفیکاسیون، به نظر می‌رسد فراهمی نیتروژن در محیط ریشه با بهبود خصوصیات فیزیولوژیک مؤثر بر عملکرد دانه، باعث افزایش عملکرد ارقام گندم در هردو سطح خاکورزی شده است. بااین‌حال سطح کم‌خاک‌ورزی باتوجه‌به میزان ماده آلی بالاتر و خصوصیات کیفی بهتر نسبت به خاکورزی مرسوم، عملکرد بالاتری را به‌دست آورد. عملکرد دانه ارقام گندم به‌دلیل خصوصیات متفاوت ژنتیکی می‌تواند متفاوت باشد، در این تحقیق نیز میان ارقام رخشان و پیشگام تفاوت‌ها معنی‌دار بود. بررسی‌ها نشان می‌دهد ترکیب تیمار اوره با نیتراپایرین می‌تواند منجر



شکل ٦. برهمکنش تیمارهای خاک‌ورزی×کود×رقم بر عملکرد دانه گندم. تفاوت‌های معنی‌دار ($P < 0.05$) بین تیمارها با حرف متفاوت نشان داده شده است. خطای استاندارد مقادیر گرفته‌شده از سه تکرار (n=3) می‌باشد.

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). در این بررسی نیز به‌طور میانگین کاربرد نیتراپایرین منجر به افزایش ۴/۳۹ درصدی عملکرد دانه نسبت به اوره شد، هرچند این تفاوت معنی‌دار نمی‌باشد (شکل ۶). بهبود عملکرد گیاه در شرایط کاربرد نیتراپایرین می‌تواند به‌دلیل انرژی مصرفی کمتر در جذب آمونیوم نسبت به نیترات برای گیاه باشد (Dawar *et al*., 2011; Zaman *et al*., 2008). عملکرد دانه گندم در شرایط کاربرد نیتراپایرین+اوره نسبت به اوره خالص ۲۳ درصد و جذب کل نیتروژن تا ۳۰ درصد افزایش یافت (Dawar *et al*., 2021). نیتراپایرین با بهبود سامانه آنتی‌اکسیدانی برگ و عملکرد فتوسنتز در گیاه ذرت باعث افزایش عملکرد گیاه شد (Ren *et al*., 2020).

در این زمینه مطالعاتی نقش نیتراپایرین را مثبت و برخی مطالعات نیز کاربرد آن را بدون اثر منفی و یا مثبت بر عملکرد دانه گندم گزارش کردند (Corrochano-Monsalve *et al*., 2020; Huérfano *et al*., 2015, 2016). در این مطالعه به‌طور میانگین عملکرد دانه گندم در شرایط کم‌خاک‌ورزی نسبت به خاک‌ورزی مرسوم رشد ۱۴/۴۰ درصدی داشت و از ۵۹۲/۸۳ کیلوگرم در هکتار به ۶۸۴۴/۶۶ کیلوگرم در هکتار رسید. دیگر مطالعه نیز نشان داد در شرایط کاهش خاک‌ورزی عملکرد دانه گندم و زیست‌توده کل ۱۸ و ۱۵ درصد در مقایسه با خاک‌ورزی مرسوم افزایش یافت (Hofmeijer *et al*., 2019). همچنین در شرایط بدون خاک‌ورزی در کشت گندم درصد کربن آلی خاک ۸/۲ درصد بالاتر بود که این امر می‌تواند در افزایش عملکرد دانه گندم اثرگذار باشد (Nadeem *et al*., 2019).

۴. نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد کاربرد اوره نسبت به شرایط کنترل باعث افزایش میزان انتشار نیتروس‌اکسید در هردو سامانه خاک‌ورزی و مراحل نموی گندم شد. همچنین کاربرد نیتراپایرین در ترکیب با اوره منجر به کاهش انتشار نیتروس‌اکسید در سامانه‌های خاک‌ورزی شد. روند اثرگذاری نیتراپایرین با طی‌شدن مراحل نموی گندم کاهش یافت که رابطه مستقیم با نیمه‌عمر فعالیت آن دارد، به‌طوری‌که بالاترین میزان اثرگذاری هم‌زمان با اعمال تیمار نیتراپایرین و تقسیط کود اوره بود و کمترین آن در اواخر دوره رشد مشاهده شد. عملکرد گندم در شرایط کاربرد نیتراپایرین افزایش یافت، هرچند این برتری معنی‌دار نبود، بااین‌حال افزایش درآمد اقتصادی کشاورزان در کنار کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌تواند مسیر تولید پایدارتری نسبت به شرایط کاربرد اوره باشد. شرایط بدون خاک‌ورزی نیز از نظر عملکرد دانه بهتر از شرایط خاک‌ورزی مرسوم بود. شرایط بدون خاک‌ورزی می‌تواند در صرفه‌جویی اقتصادی

و حفظ محیط زیست نیز مؤثرتر باشد، چرا که نسبت به خاک‌ورزی مرسوم می‌تواند ذخیره کربن آلی و رطوبت بالاتری داشته باشد. کاهش مصرف نیتروژن در کشاورزی با جایگزینی آن با کودهای زیستی و همچنین تثبیت‌کننده‌های نیتروژن در کنار کاربرد نیتراپایرین می‌تواند از راهکارهای اساسی در جهت کاهش انتشارات گازهای گلخانه‌ای باشد.

۵. منابع

Barrena, I., Menéndez, S., Correa-Galeote, D., Vega-Mas, I., Bedmar, E.J., González-Murua, C., & Estavillo, J.M. (2017). Soil water content modulates the effect of the nitrification inhibitor 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP) on nitrifying and denitrifying bacteria. *Geoderma*, *303*, 1–8.

Bayer, C., Gomes, J., Zanatta, J.A., Vieira, F.C.B., Piccolo, M., de, C., Dieckow, J., & Six, J. (2015). Soil nitrous oxide emissions as affected by long-term tillage, cropping systems and nitrogen fertilization in Southern Brazil. *Soil and Tillage Research*, *146*(PB), 213–222.

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.

Bhatia, A., Sasmal, S., Jain, N., Pathak, H., Kumar, R., & Singh, A. (2010). Mitigating nitrous oxide emission from soil under conventional and no-tillage in wheat using nitrification inhibitors. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *136*(3–4), 247–253.

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.

Cai, W., Ai, T., Li, R., Jin, Z., … J.X.S., & F., & 2018, U. (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.

Carbonetto, B., Rascovan, N., Álvarez, R., Mentaberry, A., & Vázquez, M.P. (2014). Structure, composition and metagenomic profile of soil microbiomes associated to agricultural land use and tillage systems in Argentine Pampas. *PLOS ONE*, *9*(6), e99949.

Chen, D., Freney, J., Mosier, A., & Chalk, P. (1994). Reducing denitrification loss with nitrification inhibitors following presowing applications of urea to a cottonfield. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, *34* (1), 75.

Corrochano-Monsalve, M., González-Murua, C., Estavillo, J.M., Estonba, A., & Zarraonaindia, I. (2020). Unraveling DMPSA nitrification inhibitor impact on soil bacterial consortia under different tillage systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *301*, 107029.

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.

Cui, P., Fan, F., Yin, C., Li, Z., Song, A., Wan, Y., & Liang, Y. (2013). Urea- and nitrapyrin-affected N2O emission is coupled mainly with ammonia oxidizing bacteria growth in microcosms of three typical Chinese arable soils. *Soil Biology and Biochemistry*, *66*, 214–221.

Dawar, K., Khan, A., Sardar, K., Fahad, S., Saud, S., Datta, R., & Danish, S. (2021). 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., Müller, C., Sanz-Cobena, A., Khan, A., Borzouei, A., & Pérez-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.

Duan, Y.F., Kong, X.W., Schramm, A., Labouriau, R., Eriksen, J., & Petersen, S.O. (2017). Microbial N transformations and N2O emission after simulated grassland cultivation: Effects of the nitrification inhibitor 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP). *Applied and Environmental Microbiology*, *83*(1).

Grave, R.A., Nicoloso, R.da.S., Cassol, P.C., da Silva, M.L.B., Mezzari, M.P., Aita, C., & Wuaden, C.R. (2018). Determining the effects of tillage and nitrogen sources on soil N_2O emission. *Soil and Tillage Research*, *175*, 1–12.

Hofmeijer, M., Krauss, M., Berner, A., Peigné, J., Mäder, P., & Armengot, L. (2019). Effects of reduced tillage on weed pressure, nitrogen availability and winter wheat yields under organic management. *Agronomy*, *9*(4), 180.

Huérfano, X., Fuertes-Mendizábal, T., Duñabeitia, M.K., González-Murua, C., Estavillo, J.M., & Menéndez, S. (2015). Splitting the application of 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP): Influence on greenhouse gases emissions and wheat yield and quality under humid Mediterranean conditions. *European Journal of Agronomy*, *64*, 47–57.

Huérfano, X., Fuertes-Mendizábal, T., Fernández-Diez, K., Estavillo, J.M., González-Murua, C., & Menéndez, S. (2016). The new nitrification inhibitor 3,4-dimethylpyrazole succinic (DMPSA) as an alternative to DMPP for reducing N2O emissions from wheat crops under humid Mediterranean conditions. *European Journal of Agronomy*, *80*, 78–87.

Jalilian, A., Mondani, F., Khorramivafa, M., & Bagheri, A. (2018). Evaluation of CliPest model in simulation of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) and wild oat (*Avena ludoviciana* L.) competition in Kermanshah. *Journal of Agroecology*, *10*(1), 248–266. (In Farsi)

Kanter, D.R., Wagner-Riddle, C., Groffman, P.M., Davidson, E.A., Galloway, J.N., Gourevitch, J.D., van Grinsven, H.J.M., Houlton, B.Z., Keeler, B.L., Ogle, S.M., Pearen, H., Rennert, K.J., Saifuddin, M., Sobota, D.J., & Wagner, G. (2021). Improving the social cost of nitrous oxide. *Nature Climate Change*, *11*(12), 1008–1010.

Keshavarz Afshar, R., Lin, R., Mohammed, Y.A., & Chen, C. (2018). Agronomic effects of urease and nitrification inhibitors on ammonia volatilization and nitrogen utilization in a dryland farming system: Field and laboratory investigation. *Journal of Cleaner Production*, *172*, 4130–4139.

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*, *2022*, 1–18.

Koga, N. (2013). Nitrous oxide emissions under a four-year crop rotation system in northern Japan: Impacts of reduced tillage, composted cattle manure application and increased plant residue input. *Soil Science and Plant Nutrition*, *59*(1), 56–68.

Li, J., Kwak, J.H., Chen, J., An, Z., Gong, X., & Chang, S.X. (2021). Canola straw biochars produced under different pyrolysis temperatures and nitrapyrin independently affected cropland soil nitrous oxide emissions. *Biology and Fertility of Soils*, *57*(2), 319–328.

Linn, D.M., & Doran, J.W. (1984). Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and nontilled soils. *Soil Science Society of America Journal*, *48*(6), 1267–1272.

Liu, Y.N., Li, Y.C., Peng, Z.P., Wang, Y.Q., Ma, S.Y., Guo, L.P., Lin, E.Da., & Han, X. (2015). Effects of different nitrogen fertilizer management practices on wheat yields and N2O emissions from wheat fields in North China. *Journal of Integrative Agriculture*, *14*(6), 1184–1191.

Lognoul, M., Theodorakopoulos, N., Hiel, M.P., Regaert, D., Broux, F., Heinesch, B., Bodson, B., Vandenbol, M., & Aubinet, M. (2017). Impact of tillage on greenhouse gas emissions by an agricultural crop and dynamics of N2O fluxes: Insights from automated closed chamber measurements. *Soil and Tillage Research*, *167*, 80–89.

Marquina, S., Pérez, T., Donoso, L., Giuliante, A., Rasse, R., & Herrera, F. (2015). NO, N_2O and CO_2 soil emissions from Venezuelan corn fields under tillage and no-tillage agriculture. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, *101*(1), 123–137.

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 2022*, 1–19.

Mutegi, J.K., Munkholm, L.J., Petersen, B.M., Hansen, E.M., & Petersen, S.O. (2010). Nitrous oxide emissions and controls as influenced by tillage and crop residue management strategy. *Soil Biology and Biochemistry*, *42*(10), 1701–1711.

Nabavi-Pelesaraei, A., Rafiee, S., Mohtasebi, S.S., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., & Chau, K.W. (2019). Comprehensive model of energy, environmental impacts and economic in rice milling factories by coupling adaptive neuro-fuzzy inference system and life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, *217*, 742–756.

Nadeem, F., Farooq, M., Nawaz, A., & Ahmad, R. (2019). Boron improves productivity and profitability of bread wheat under zero and plough tillage on alkaline calcareous soil. *Field Crops Research*, *239*, 1–9.

Nunes, M.R., Karlen, D.L., Veum, K.S., Moorman, T.B., & Cambardella, C.A. (2020). Biological soil health indicators respond to tillage intensity: A US meta-analysis. *Geoderma*, *369*, 114335.

O'Callaghan, M., Gerard, E.M., Carter, P.E., Lardner, R., Sarathchandra, U., Burch, G., Ghani, A., & Bell, N. (2010). Effect of the nitrification inhibitor dicyandiamide (DCD) on microbial communities in a pasture soil amended with bovine urine. *Soil Biology and Biochemistry*, *42*(9), 1425–1436.

Ouyang, Y., Norton, J.M., & Stark, J.M. (2017). Ammonium availability and temperature control contributions of ammonia oxidizing bacteria and archaea to nitrification in an agricultural soil. *Soil Biology and Biochemistry*, *113*, 161–172.

Pareja-Sánchez, E., Cantero-Martínez, C., Álvaro-Fuentes, J., & Plaza-Bonilla, D. (2020). Impact of tillage and N fertilization rate on soil N2O emissions in irrigated maize in a Mediterranean agroecosystem. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *287*, 106687.

Plaza-Bonilla, D., Álvaro-Fuentes, J., Arrúe, J.L., & Cantero-Martínez, C. (2014). Tillage and nitrogen fertilization effects on nitrous oxide yield-scaled emissions in a rainfed Mediterranean area. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *189*, 43–52.

Pokharel, P., & Chang, S.X. (2021). Biochar decreases the efficacy of the nitrification inhibitor nitrapyrin in mitigating nitrous oxide emissions at different soil moisture levels. *Journal of Environmental Management*, *295*, 113080.

Ramotowski, D., & Shi, W. (2022). Nitrapyrin-based nitrification inhibitors shaped the soil microbial community via controls on soil pH and inorganic N composition. *Applied Soil Ecology*, *170*, 104295.

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.

Souza, R.C., Cantão, M.E., Vasconcelos, A.T.R., Nogueira, M.A., & Hungria, M. (2013). Soil metagenomics reveals

differences under conventional and no-tillage with crop rotation or succession. *Applied Soil Ecology*, *72*, 49–61.

Thompson, K.A., Bent, E., Abalos, D., Wagner-Riddle, C., & Dunfield, K.E. (2016). Soil microbial communities as potential regulators of in situ N2O fluxes in annual and perennial cropping systems. *Soil Biology and Biochemistry*, *103*, 262–273.

ul Haq, S., Boz, I., Shahbaz, P., & Yıldırım, Ç. (2020). Evaluating eco-efficiency and optimal levels of fertilizer use based on the social cost and social benefits in tea production. *Environmental Science and Pollution Research*, *27*(26), 33008–33019.

Wang, W., & Dalal, R.C. (2015). Nitrogen management is the key for low-emission wheat production in Australia: A life cycle perspective. *European Journal of Agronomy*, *66*, 74–82.

Wolt, J.D. (2000). Nitrapyrin behavior in soils and environmental considerations. *Journal of Environmental Quality*, *29*(2), 367–379.

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.

Xia, X., Zhang, P., He, L., Gao, X., Li, W., Zhou, Y., Li, Z., Li, H., & Yang, L. (2019). Effects of tillage managements and maize straw returning on soil microbiome using 16S rDNA sequencing. *Journal of Integrative Plant Biology*, *61*(6), 765–777.

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.

Zhou, M., Zhu, B., Butterbach-Bahl, K., Wang, X., & Zheng, X. (2014). Nitrous oxide emissions during the non-rice growing seasons of two subtropical rice-based rotation systems in southwest China. *Plant and Soil*, *383*(1–2), 401–414.