تحقیقات آب و خاک ایران، دورهٔ ۴۸، شمارهٔ ۴، آذر و دی ۱۳۹۶ (ص ۹۰۴-۸۹۱) DOI: 10.22059/ijswr.2017.214952.667530

بررسی توزیع نیترات و آمونیوم در زیر جویچه و پشته و جذب نیتروژن توسط ذرت در شرایط کاربرد مقادیر مختلف کود اوره

آرش رنجبر[۱]، علی رحیمی خوب[۲*]، مریم وراوی پور[۳] ، حامد ابراهیمیان طالشی[۴]

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آبیاری و زهکشی پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

۲. استاد، گروه مهندسی آبیاری و زهکشی پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

۳. دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و زهکشی پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

۴. استادیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۶/۱۷ – تاریخ بازنگری: ۱۳۹۵/۱۱/۱۷ – تاریخ تصویب: ۱۳۹۵/۱۱/۱۸)

چکیده

به دلیل اینکه انتقال املاح در نواحی زیر پشته و جویچه‌های آبیاری باهم متفاوت هستند، لذا برای استفاده بهینه از کود و کاهش تلفات آن باید مطالعات دقیقی بروی چگونگی توزیع شکل‌های مختلف نیتروژن در زیر پشته و جویچه‌های آبیاری در طول دوره رشد گیاه انجام شود. هدف اصلی از این تحقیق، بررسی تأثیر کاربرد مقادیر مختلف کود اوره روی جذب، توزیع و حرکت نیترات و آمونیوم زیر پشته و جویچه‌های آبیاری در زمان‌های مختلف در طول فصل رشد بود. بدین منظور گیاه ذرت تحت سه تیمار کود صفر، ۱۵۰ و ۲۵۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار و به‌صورت بلوک‌های کاملاً تصادفی با سه تکرار، در سال ۱۳۹۴ در مزرعه تحقیقاتی پردیس ابوریحان کشت شد. مقادیر ماده خشک تولیدی و جذب نیتروژن طی فصل رشد و غلظت نیترات و آمونیوم خاک دو روز قبل از کوددهی و نیز دو و چهار روز بعد از کوددهی و همچنین در انتهای فصل کشت، در اعماق مختلف زیر پشته و جویچه‌ها اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان داد که میزان کود و عمق خاک دو عامل مؤثر روی توزیع نیترات و آمونیوم زیر جویچه و پشته‌ها بودند. بعد از کوددهی غلظت نیترات زیر پشته و جویچه با افزایش عمق به ترتیب کاهش و افزایش یافت. همچنین مشخص شد که با افزایش ۶۷ درصدی کاربرد کود، مقدار جذب نیتروژن حدود ۲۱ درصد افزایش و کارایی زراعی نیتروژن از ۳۱/۵۳ به ۲۸/۵۶ کاهش داشت و تجمع نیترات در انتهای فصل کشت نسبت به ابتدای فصل، در عمق ۶۰ سانتیمتری زیر جویچه و پشته‌ها به ترتیب بیش از ۳ و ۷ برابر افزایش داشت. همچنین با کاربرد کود، تجمع نیترات در نواحی زیر پشته‌ها حدود سه برابر نواحی زیر جویچه‌ها بود. علاوه بر این مشخص شد که غلظت نیترات در تیمارهای مختلف قبل و بعد از کوددهی در زیر جویچه و پشته‌های آبیاری با یکدیگر تفاوت معنی‌داری داشتند.

واژهای کلیدی: جذب نیتروژن، نیترات، آمونیوم، آبیاری جویچه‌ای، ذرت.

مقدمه

عنصر نیتروژن بعد از کمبود آب یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده رشد گیاهان است (Lemaire *et al*, 2008). معمولاً کمتر خاکی است که مقدار کافی نیتروژن به شکل قابل‌استفاده گیاه (نیترات یا آمونیوم) داشته باشد. لذا این نقصان در خاک‌ها معمولاً توسط کود اوره که یکی از رایج‌ترین کودهای نیتروژنه در کشاورزی است جبران می‌شود. به دلیل اثر مثبت نیتروژن بر روی عملکرد گیاه، کود اوره به‌طور بی‌رویه مورد استفاده قرار می‌گیرد. درحالی‌که کارایی مصرف این کودها[۱] (NUE) در تولید غلات در سطح جهانی ۳۳ درصد محاسبه شده است (Raun and Johnson, 1999)؛ بنابراین مصرف این کودها بیش از حد نیاز گیاه علاوه بر زیان‌های اقتصادی، موجب آلودگی منابع آب، کاهش راندمان مصرف نیتروژن و افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای گردیده است (Guo *et al*, 2010). کود اوره در آب به‌راحتی حل می‌شود و به خاک منتقل می‌گردد. بعد از انجام عملیات کوددهی، اوره داخل خاک هیدرولیز شده و آمونیوم ایجاد می‌شود و در ادامه، طی فرآیند نیترات‌زایی[۲] توسط باکتری‌های موجود در خاک، آمونیوم به نیتریت و سپس به نیترات تبدیل می‌شود. البته در این بین فرآیندهای دیگری نظیر

* نویسنده مسئول: akhob@ut.ac.ir

1. Nitrogen Use Efficiency

2. Nitrification

تصعید اوره، تثبیت نیتروژن و ... ممکن است اتفاق بیافتد که بررسی انتقال و تغییر شکل اوره در خاک را بسیار دشوار می‌کند (Du *et al*, 2005). نیترات و آمونیوم دو شکل نیتروژن معدنی قابل‌جذب توسط گیاه هستند. همچنین نیترات به دلیل تحرک بالایی که در خاک دارد به‌راحتی در معرض آبشویی قرار می‌گیرد. به همین دلیل مطالعات فراوانی در زمینه تغییر شکل و انتقال نیترات و آمونیوم در مجموعه به هم پیوسته گیاه – خاک انجام گرفته است. نتایج این تحقیقات نشان داده‌اند که انتقال این املاح در خاک تحت تأثیر فاکتورهای زیادی مثل مقدار آب و کود مصرفی، زمان و نحوه مصرف کود، ویژگی‌های خود املاح، ویژگی‌های فیزیکی و لایه‌بندی خاک و شرایط اقلیمی است.

در همین راستا، تأثیر میزان کود نیتروژن و آب آبیاری بر آبشویی نیترات و آمونیوم در تناوب ذرت – گندم توسط Fang *et al.* (2006) بررسی شد. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش میزان کود، غلظت نیترات در لایه ۱۰۰ سانتیمتری خاک افزایش یافت اما غلظت آمونیوم به‌وسیله میزان کود تحت تأثیر قرار نگرفت. آن‌ها در خاک‌های با بافت سنگین تجمع نیتروژن در لایه‌های سطحی را مشاهده کردند درحالی‌که انتقال نیترات به لایه‌های عمیق‌تر ناچیز بود. Zhou *et al* (2006) توزیع نیترات و آمونیوم حاصل از سه نوع کود مختلف در ستون‌های خاکی ساخته‌شده را بررسی کردند. در مطالعه آن‌ها از دو روش کوددهی به‌صورت پخش سطحی و کودآبیاری قطره‌ای استفاده شده بود. یکی از اهداف آن‌ها بررسی توزیع نیترات و آمونیوم در پروفیل خاک بعد از یک نوبت کوددهی بود. یکی از نتایج مهم آن‌ها این بود که در طول کودآبیاری و تا یک روز بعد از آن، هیدرولیز اوره باعث افزایش غلظت آمونیوم در خاک می‌شد. این افزایش غلظت تا پنج روز بعد از کوددهی ادامه داشت و بعد از آن به خاطر فرآیند نیترات‌زایی تا روز دهم غلظت آمونیوم کاهش یافت. حرکت نیترات در یک خاک لوم رسی با هدایت هیدرولیکی پایین، تحت تأثیر مقادیر مختلف نیتروژن و آب آبیاری نیز توسط Novokova and Nagel (2009) مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش عمق خاک، غلظت نیترات کاهش یافته و جذب نیترات توسط گیاه نسبت به حرکت آن به سمت لایه‌های زیرین بیشتر بود. Soroush *et al* (2011) حرکت شکل‌های مختلف نیتروژن در یک خاک با بافت سنگین و هدایت هیدرولیکی پایین، تحت تأثیر مقادیر مختلف اوره در کشت ذرت منطقه شمال خوزستان را بررسی کردند. آن‌ها از نمونه‌هایی که ۸ تا ۱۰ روز قبل و بعد از کودآبیاری در عمق‌های مختلف برداشت کرده بودند برای بررسی غلظت نیترات و آمونیوم استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که کاربرد کود باعث افزایش غلظت نیترات در خاک شده بود. به‌طوری‌که بیشترین افزایش در تیمار با بیشترین سطح کودی (۳۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار) بود. درحالی‌که غلظت آمونیوم در خاک به‌وسیله میزان کود تحت تأثیر قرار نگرفته بود.

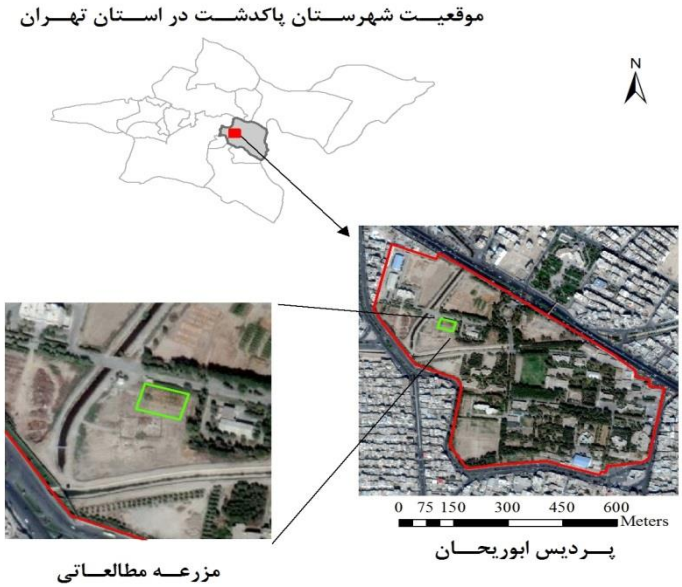
روش‌های آبیاری سطحی، تقریباً در ۹۰ درصد از اراضی تحت کشت آبی دنیا در حال اجرا هستند و در بین روش‌های سطحی، روش جویچه‌ای به دلیل اینکه راندمان کاربرد آب بیشتری دارد متداول‌تر است (Siyal *et al*,2012). نتایج مطالعاتی که روی آبیاری جویچه‌ای انجام‌شده نیز نشان داده‌اند که جریان آب و توزیع املاح در خاک نواحی زیر جویچه و پشته‌ها با سایر روش‌های آبیاری سطحی متفاوت می‌باشد و بهتر است از مدل‌های دوبعدی در بررسی و شبیه‌سازی آن‌ها استفاده شود (Ebrahimian *et al*,2013). در همین راستا Siyal *et al* (2012) با بررسی سناریوهای مختلف مدیریت سطح خاک و محل قرار دادن کود در آبیاری جویچه‌ای و بدون حضور گیاه دریافتند که نفوذ عمقی و آبشویی نیترات از نواحی کف جویچه بیشتر از نواحی زیر پشته است. طوری که اگر خاک کف جویچه متراکم شود یا با یک لایه پلاستیک پوشیده شود می‌تواند تا حدود ۳۰ درصد از هدر رفت آب و تا حدود ۱۰۰ درصد از آبشویی نیترات جلوگیری کند. این در حالی است که با حضور گیاه روی پشته، جریان آب و املاح نیز از نواحی مختلف به سمت پشته بیشتر خواهد شد که این پدیده باعث می‌شود غلظت نیترات و آمونیوم در زیر جویچه و پشته‌ها تحت تأثیر قرار بگیرند. با توجه به نکات اشاره‌شده می‌توان نتیجه گرفت که آگاهی از میزان جذب و چگونگی توزیع شکل‌های مختلف نیتروژن در زیر جویچه و پشته به ازای کاربرد مقادیر مختلف کود اوره می‌تواند راهنمای مناسبی در تعیین مقدار و شیوه مناسب کاربرد کود باشد به‌طوری‌که هم باعث کاهش آبشویی نیترات و هم افزایش عملکرد محصول و راندمان مصرف کود شود.

ذرت به‌عنوان یکی از کشت‌های اصلی تابستانه در شهرستان پاکدشت واقع در جنوب شرقی استان تهران بشمار می‌رود که در مقایسه با سایر غلات به‌صورت ردیفی کشت می‌شود و برای داشتن عملکرد مناسب به مقدار قابل‌توجهی آب و کود اوره نیاز دارد. در این منطقه که همانند اکثر نقاط ایران دارای اقلیمی گرم و خشک است اکثراً از روش جویچه‌ای برای آبیاری مزارع ذرت استفاده می‌شود. این در حالی است که در جویچه‌های با بافت خاک لوم رسی، آبشویی نیترات ممکن است به بیش از ۴۰ درصد برسد (Artiola, 1991). مسلماً این مقدار برای خاک‌های با بافت لوم شنی و سبک‌تر بیشتر خواهد شد.

Wylie *et al* (1994) آبشویی نیترات از جویچه‌های اراضی تحت کشت ذرت را به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین عوامل آلودگی منابع آب زیرزمینی در مناطق زراعی معرفی کردند. علاوه بر این تحقیقاتی که روی آبخوان دشت ورامین و پاکدشت صورت گرفته حاکی از وجود آلودگی نیترات در منابع آب زیرزمینی این منطقه بوده و یکی از دلایل اصلی آن نیز مصرف بی‌رویه کود-های نیتروژنه در کشاورزی قلمداد شده است (Rangzan *et al.*,2008). بررسی مطالعات قبلی نشان می‌دهد که اکثر تحقیقات انجام‌شده، توزیع شکل‌های مختلف نیتروژن را یا در شرایط یک‌بعدی (فقط کف جویچه) و یا در شرایط آزمایشگاهی و بدون حضور گیاه بررسی کرده‌اند. درحالی‌که درروش جوی و پشته، توزیع و حرکت املاح باید در دو بعد (هم در نواحی زیر جویچه و هم زیر پشته‌ها) بررسی گردد. علاوه بر این، برای بررسی دقیق‌تر توزیع نیترات و آمونیوم در زیر جویچه و پشته‌ها لازم است نمونه‌های بیشتری از گیاه و خاک در طول دوره کشت و قبل و بعد از عملیات کوددهی برداشت شوند. لذا با توجه به موارد مذکور، اهداف اصلی این تحقیق شامل بررسی میزان و نرخ جذب نیتروژن و تولید ماده خشک در طول فصل رشد به ازای کاربرد مقادیر مختلف کود اوره و نیز بررسی تحرک نیترات و آمونیوم در نواحی زیر جویچه و پشته‌ها قبل و بعد از کوددهی به ازای کاربرد مقادیر مختلف کود اوره می‌باشد.

مواد و روش‌ها:

به‌منظور انجام این تحقیق، گیاه ذرت (سینگل کراس ۷۰۴) تحت آبیاری کامل و به‌صورت جوی و پشته‌ای در تاریخ ۱۰ خرداد ۱۳۹۴ کشت شد. منطقه مورد آزمایش، اراضی کشاورزی پردیس ابوریحان دانشگاه تهران واقع در شهرستان پاکدشت در جنوب شرقی تهران بود (شکل ۱). این منطقه با ارتفاع ۱۰۲۰ متری از سطح دریا، ازنظر جغرافیایی در طول ´۶۶ °۵۱ شرقی و عرض ´۴۶ °۳۵ شمالی واقع شده است. میانگین سالانه دمای هوای منطقه طی دهه گذشته در حدود ۱۹ درجه سانتی‌گراد بوده است که ماه‌های جولای (تیر) و ژانویه (دی) به ترتیب با ۳۴ و ۶/۸ درجه سانتی‌گراد بیشترین و کمترین میانگین دما را داشته‌اند. متوسط بارندگی در این منطقه ۱۶۵ میلی‌متر در سال می‌باشد و بر اساس طبقه‌بندی دومارتن دارای اقلیمی خشک است.



شکل ۱. موقعیت مزرعه تحقیقاتی پردیس ابوریحان دانشگاه تهران

در این مطالعه تیمارها شامل سه سطح صفر به‌عنوان شاهد (N0، سطح بدون کود)، ۱۵۰ (N150، سطح نزدیک بهینه) و ۲۵۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار (N250، سطح بیش از نیاز گیاه) توسط کود اوره (حاوی ۴۶٪ نیتروژن) و به‌صورت طرح بلوک‌های کاملاً تصادفی و با سه تکرار ایجاد شدند. این سطوح بر اساس آزمون خاک و آب قبل از کاشت، با استفاده از نمونه‌برداری در عمق‌های ۲۰-۰، ۴۰-۲۰ و ۶۰-۴۰ سانتیمتری به‌گونه‌ای تعیین شدند که گیاه در معرض مقادیر کم تا زیاد نیتروژن قرار داشته باشد. برای این منظور از دستورالعمل مدیریت تلفیقی حاصلخیزی خاک و تغذیه گیاه ذرت (Gheibi *et al.*, 2014) استفاده شد. خلاصه‌ای از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک و آب در جدول (۱) و (۲) ارائه شده است.

همچنین بر اساس مقادیر اولیه فسفر و پتاسیم موجود در خاک (جدول ۱) مشخص شد که خاک هیچ‌گونه کمبودی از این عناصر ندارد. درصد ذرات خاک نیز با استفاده از آزمایش هیدرومتری تعیین شدند. بافت خاک از روی مثلث بافت خاک، از نوع لوم تعیین شد. هدایت هیدرولیکی اشباع (Ks) نیز ۱۲۴ سانتیمتر در روز به دست آمد.

عملیات کوددهی به‌گونه‌ای انجام شد که گیاه در مراحل حساس رشد رویشی و زایشی با تنش نیتروژنی مواجه نشود؛ بنابراین مقدار کود محاسبه‌شده در هر تیمار به‌صورت سرک و طی سه نوبت در زمان‌های ۲۲ (مرحله ۷-۶ برگی)، ۵۲ (مرحله ساقه رفتن) و ۶۵ (مرحله گلدهی) روز بعد از کشت انجام گرفت. به ترتیب ۴۰، ۳۰ و ۳۰ درصد از کل کود مشخص‌شده برای هر تیمار در هر نوبت کوددهی با دقت اندازه‌گیری می‌شد و بلافاصله بعد از اتمام آبیاری در روزهای مذکور، داخل آب جویچه‌ها به‌طور یکنواخت توزیع می‌گشت. درنهایت بعد از ۱۱۹ روز از تاریخ کاشت و در تاریخ ۵ مهر برداشت نهایی انجام شد. طول هر کرت چهار متر و عرض آن سه متر در نظر گرفته شد. فاصله ردیف‌ها در هر کرت ۷۵ سانتیمتر و فاصله بین هر گیاه در ردیف‌های کشت ۱۵ سانتیمتر بود. برای جلوگیری از تأثیر کرت‌ها روی نتایج یکدیگر بین آن‌ها حاشیه یک متری لحاظ گردید.

به‌منظور تعیین زمان مناسب آبیاری تغییرات رطوبت خاک در طول فصل کشت با استفاده از روش انعکاس سنجی زمانی (با دستگاه TDR) به‌طور مستمر رصد می‌شد و بعد از اتمام میزان آب سهل‌الوصول (و رسیدن رطوبت خاک به حدود ۲۰ درصد حجمی) اقدام به آبیاری مجدد می‌گردید تا گیاه با هیچ‌گونه تنش رطوبتی مواجه نشود. آب موردنیاز آبیاری نیز از چاه موجود در پردیس ابوریحان تأمین می‌شد. آبیاری با شیلنگ انجام می‌گرفت و مقدار آب آبیاری و زمان آن با استفاده از پارامترهای رطوبت ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی خاک (جدول ۱) و با در نظر گرفتن ضریب مدیریتی مجاز آبیاری[3] (MAD) برای گیاه ذرت (۰/۵) محاسبه می‌گردید؛ بنابراین آبیاری زمانی انجام می‌شد که حدود ۵۰ درصد کل آب قابل‌استفاده مصرف شده بود. مقدار آب آبیاری بر اساس رابطه (۱) محاسبه شد:

$$d_n = (FC - PWP) \times MAD \times Z_r \quad \text{(رابطه ۱)}$$

در این رابطه، dn، عمق آب آبیاری (mm)، Zr، عمق توسعه ریشه (mm)، MAD، حداکثر تخلیه مجاز رطوبتی (بدون بعد)، WP و FC، رطوبت حجمی نقطه پژمردگی و ظرفیت زراعی ($cm^3.cm^{-3}$) می‌باشند. در این تحقیق در هر آبیاری از طریق سطلی مدرج دبی حجمی آب اندازه‌گیری و سپس بر اساس دبی، مساحت هر بلوک و عمق آبیاری محاسبه‌شده، زمان و حجم آبیاری برای تیمارهای مختلف محاسبه می‌گردید و به‌منظور دقت بیشتر و کاهش خطا این عمل چندین بار تا پایان آبیاری صورت می‌گرفت. در مجموع ۱۹ نوبت آبیاری به‌طور دقیق در طول فصل کشت انجام گرفت. بر اساس رابطه (۱)، مشخصات فیزیکی خاک و عمق ریشه، عمق آب آبیاری در چهار نوبت ابتدای فصل (تا ۲۲ روز بعد از کشت) ۲۱ میلی‌متر و در ۱۵ نوبت بعدی (تا انتهای فصل کشت) ۴۱ میلی‌متر محاسبه شد.

در هر تیمار نمونه‌های خاک در سه عمق ۲۰-۰، ۴۰-۲۰ و ۶۰-۴۰ سانتیمتری از روی پشته و کف جویچه مجاورش به‌صورت جداگانه برداشت شدند. نمونه‌ها به ترتیب یک روز قبل و همچنین دو و چهار روز بعد از هر نوبت کوددهی (در مجموع سه سری نمونه برای هر نوبت کوددهی) برداشت شدند. در پایان فصل کشت و بعد از برداشت محصول نیز یک سری نمونه خاک در عمق‌های مذکور برداشت شد. این نمونه‌ها از قسمت‌های مرکزی تیمارها و با استفاده از حفره ایجادشده توسط آگری به قطر سه سانتیمتر برداشت می‌شد. سپس حفره‌های ایجادشده با خاک اطراف پر می‌شدند. نمونه‌ها بعد از انتقال به آزمایشگاه جهت تعیین غلظت نیترات و آمونیوم با استفاده از روش تقطیر بخار آب مورد تجزیه قرار گرفتند (Bremner and Keeney, 1965). سپس نتایج به‌دست‌آمده در سه گروه نمونه‌برداری کلی قرار داده شدند که شامل داده‌های غلظت نیترات و آمونیوم برداشت‌شده در فاصله یک روز مانده به کوددهی (BF1)، دو روز بعد از کوددهی (AF2) و چهار روز بعد از کوددهی (AF4) بود.

نمونه‌های گیاهی از زمان ۲۶ روز بعد از کاشت تا انتهای فصل کشت طی شش نوبت برداشت شدند. در هر مرحله نمونه‌برداری شش گیاه از ردیف‌های میانی هر کرت آزمایشی انتخاب و از سطح خاک بریده می‌شدند و بعد از انتقال سریع به آزمایشگاه در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد خشک می‌شدند. فرآیند خشک شدن در آون تا جایی که وزن نمونه‌ها به ثبات می‌رسید ادامه داشت. سپس نمونه‌ها وزن شده و آسیاب می‌گشتند. علاوه بر این، با استفاده از روش استاندارد کجلدال (Horowitz, 1970) میزان نیتروژن کل آن‌ها اندازه‌گیری می‌شد. درنهایت داده‌های شامل وزن خشک و غلظت نیتروژن برای نمونه برداشت‌شده از کل تیمارها اندازه‌گیری گردید. تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها به کمک نرم‌افزار SAS صورت گرفت و

3. Management Allowed Depletion

برای مقایسه میانگین در بخش بررسی اثر کود بر ماده خشک و جذب نیتروژن از آزمون LSD (حداقل اختلاف معنی‌داری) و در سایر موارد از مقایسات مستقل بر مبنای آزمون توکی استفاده شد.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه آزمایشی

پارامتر		عمق ۰ تا ۲۰ سانتیمتر	عمق ۲۰ تا ۴۰ سانتیمتر	عمق ۴۰ تا ۶۰ سانتیمتر
جرم مخصوص ظاهری (گرم بر سانتیمتر مکعب)		۱/۶۰	۱/۶۱	۱/۶۱
ظرفیت زراعی (درصد حجمی)		۲۶/۱۹	۲۶/۵۵	۲۷/۸۸
رطوبت پژمردگی (درصد حجمی)		۱۳/۰۰	۱۳/۲۸	۱۳/۸۴
نیترات (میلی‌گرم در کیلوگرم)		۱۰/۵۰	۵/۹۰	۲/۸۵
آمونیوم (میلی‌گرم در کیلوگرم)		۷/۲۰	۵/۱۵	۳/۵۰
نیتروژن (٪)		۰/۱	۰/۰۹	۰/۰۹
فسفر در دسترس (میلی‌گرم در کیلوگرم)		۵۳	۴۷/۴۶	۳۲/۲۲
پتاسیم در دسترس (میلی‌گرم در کیلوگرم)		۵۶۱/۵	۵۴۲/۵	۵۱۹/۵
بافت خاک		لوم	لوم	لوم
درصد ذرات خاک	رس	۱۳/۶	۱۳/۶	۱۷/۶
	سیلت	۳۴/۶	۳۶/۶	۳۴/۶
	شن	۵۱/۸	۴۹/۸	۴۷/۸

جدول ۲. نتایج آنالیز شیمیایی آب آبیاری

پارامتر	مقدار
نیترات (میلی‌گرم در کیلوگرم)	۲۲/۳
آمونیوم (میلی‌گرم در کیلوگرم)	۱۶/۴
نیتروژن (٪)	۰/۰۱
فسفر در دسترس (میلی‌گرم در کیلوگرم)	<۰/۱
پتاسیم در دسترس (میلی‌گرم در کیلوگرم)	۵/۱
اسیدیته (pH)	۷/۸
هدایت الکتریکی (dS.m-1)	۰/۶۶

نتایج و بحث

اثر کود بر ماده خشک و جذب نیتروژن توسط گیاه:

نتایج بررسی اثر کود بر جذب نیتروژن در تیمارهای مختلف که در شکل (۲) و جدول (۳) آمده است نشان داد که بین میزان جذب نیتروژن توسط گیاه و سطوح مختلف کاربرد نیتروژن در تیمارها همبستگی معنی‌دار و مثبتی وجود داشته است ($R=0.946$ و $p< 0.0001$). علاوه بر این بین میزان ماده خشک تولیدشده (اندام هوایی) و سطوح مختلف کاربرد نیتروژن در تیمارها نیز همبستگی معنی‌دار و مثبتی وجود داشت ($R=0.743$ و $p< 0.0001$). همانند مطالعه Yin *et al* (2007)، در این مطالعه نیز نرخ جذب نیتروژن در ابتدای فصل رشد آهسته و در اواسط رشد سریع و بعد از آن مجدداً آهسته بود. در اوایل دوره رشد و تا ۲۶ روز بعد از کشت مقدار نیتروژن جذب‌شده در تیمارهای N0، N150 و N250 به ترتیب ۶/۶۶، ۱۱/۶۸ و ۱۴/۳۸ کیلوگرم نیتروژن در هکتار بود و بین تیمارها اختلاف معنی‌دار وجود داشت (جدول ۳). از ۲۶ تا ۴۵ روز بعد از کشت، نرخ جذب نیتروژن در تیمارهای N0، N150 و N250 به ترتیب ۲/۱۳، ۴/۷ و ۴/۸ کیلوگرم نیتروژن در هکتار در روز محاسبه شد که بیشترین نرخ جذب در طول فصل رشد بود. درنهایت از ۴۵ روز بعد از کشت تا انتهای فصل رشد میزان جذب توسط گیاه به‌تدریج کاهش یافت. این نتایج نشان می‌دهند که با افزایش کاربرد نیتروژن میزان جذب توسط ذرت نیز افزایش می‌یابد (شکل ۲ و جدول ۳). نتایج مطالعه Yin *et al* (2007) نیز نشان داد که در اوایل دوره رشد و تا ۷ روز بعد از کشت که

هنوز گیاه دارای برگ و اندام هوایی فراوانی نمی‌باشد، نرخ جذب نیتروژن کم است و بعد از آن تا ۳۷ روز بعد از کشت، به دلیل افزایش سرعت رشد ذرت نرخ جذب نیتروژن متناسب با افزایش مقدار نیتروژن کاربردی زیاد می‌شود. علاوه بر این در شکل (۲) به‌وضوح مشخص است که میزان جذب نیتروژن تا زمان ۶۳ روز بعد از کشت در دو تیمار N150 و N250 در سطح یک درصد با یکدیگر تفاوت معنی‌داری نداشتند و بعد از آن تا زمان برداشت متفاوت بودند. تا ۶۳ روز بعد از کشت میزان تولید ماده خشک در دو تیمار N150 و N250 به ترتیب ۹/۱۶ و ۹/۹۳ تن در هکتار اندازه‌گیری شد. نهایتاً موقع برداشت در زمان ۱۱۹ روز پس از کشت، مقدار کل ماده خشک تولیدشده در تیمارهای N0، N150 و N250 به ترتیب ۱۰/۰۹، ۲۲/۲۲ و ۲۴/۳۶ تن در هکتار و مقدار کل نیتروژن جذب‌شده به ترتیب ۹۹/۵۱، ۲۲۱/۶۲ و ۲۶۷/۱۳ کیلوگرم در هکتار اندازه‌گیری شد. علاوه بر این، مقدار عملکرد دانه به‌دست‌آمده از تیمارهایN0 ، N150 و N250 به ترتیب برابر ۳/۴۴، ۸/۱۷ و ۱۰/۵۸ تن در هکتار بود. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهند که باوجود اینکه اختلاف مقدار نیتروژن کاربردی بین دو تیمار N150 و N250 برابر ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار بود اما اختلاف ماده خشک تولیدشده در این تیمارها ۲/۱۴ تن در هکتار و اختلاف مقدار نیتروژن جذب‌شده در این تیمارها ۴۵/۵۲ کیلوگرم در هکتار به دست آمد.

شاخص کارایی زراعی نیتروژن[1] که عبارت است از نسبت بین اختلاف عملکرد در تیمار معین با تیمار شاهد (کیلوگرم در هکتار) به مقدار نیتروژن مصرفی در تیمار معین (کیلوگرم در هکتار) (Dobermann, 2005)، برای دو تیمار N150 و N250 به ترتیب ۳۱/۵۳ و ۲۸/۵۶ به دست آمد. به‌عبارت‌دیگر به ازای مصرف هر کیلو کود به‌صورت نیتروژن خالص، در تیمار N150 نسبت به تیمار N250، مقدار بیشتری دانه تولید شده بود. همچنین شاخص کارایی بازیافت نیتروژن[2] که عبارت است از نسبت بین اختلاف مقدار نیتروژن جذب‌شده توسط گیاه در تیمار معین با تیمار شاهد (کیلوگرم در هکتار) به مقدار کود نیتروژن مصرفی در تیمار معین (کیلوگرم در هکتار) (Dobermann, 2005)، برای دو تیمار N150 و N250 به ترتیب ۰/۸۱ و ۰/۶۷ به دست آمد. این شاخص نشان می‌دهد که به ازای مصرف هر کیلوگرم کود نیتروژن، چه نسبتی از آن توسط گیاه جذب شده است. بدیهی است که مقدار نیترات و آمونیوم بیشتری در تیمار N250 به شکل‌های مختلف تلف شده است.

یکی از مهم‌ترین راه‌های تلفات نیتروژن و آلودگی منابع آب زیرزمینی در اراضی کشاورزی، آبشویی نیترات تجمع یافته در پایین ناحیه توسعه ریشه است (Ju *et al*, 2006). عامل اصلی تجمع و آبشویی نیترات نیز استفاده بیش از حد از آب و کود-های نیتروژنه می‌باشد (Ramos *et al*, 2012). همان‌طور که در بخش مواد و روش‌ها توضیح داده شد، برنامه‌ریزی آبیاری در تمام تیمارها به‌طور یکسان و بر اساس کمبود رطوبت خاک تا عمق ۶۰ سانتیمتری، به صورتی انجام شد که نیاز آبی گیاه به‌طور کامل برطرف شود و هیچ‌گونه کم و یا بیش‌آبیاری اتفاق نیافتد؛ بنابراین بخشی از مازاد نیتروژن مصرفی در تیمارهای مختلف (که مورد نیاز گیاه نبوده است) قابلیت این را داشته تا به‌صورت نیترات و آمونیوم در زیر جویچه و پشته‌ها انباشته شود. لذا در راستای اهداف این تحقیق، تغییرات غلظت نیترات و آمونیوم در تیمارها و اعماق مختلف زیر جویچه و پشته‌ها، قبل و بعد از کوددهی و در انتهای فصل کشت بررسی گردید.

تأثیر کاربرد کود در غلظت نیترات و آمونیوم زیر جویچه:

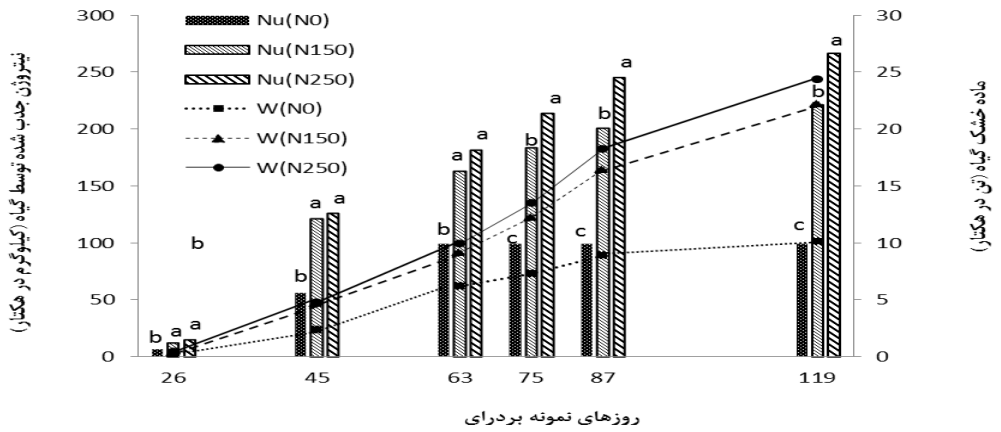
نتایج تجزیه واریانس غلظت نیترات و آمونیوم خاک در سه مرحله نمونه‌برداری زیر جویچه نشان دادند که تأثیر میزان کود بر غلظت نیترات و آمونیوم در هر سه مرحله نمونه‌برداری (BF1, AF2, AF4) معنی‌دار بود (جدول ۴). در حالت کلی بعد از کود دهی و هیدرولیز اوره، آمونیوم ایجادشده طی فرآیند نیترات‌زایی به نیتریت و سپس به نیترات تبدیل می‌شود که این فرآیند می-تواند تحت تأثیر عواملی نظیر مقدار رطوبت و اکسیژن موجود در خاک، دما و سطح کود کاربردی در تیمار باشد (Zhang *et al*, 2015)؛ بنابراین بعد از کوددهی (AF2 و AF4) مطابق انتظار، با افزایش کاربرد کود مقدار غلظت نیترات و آمونیوم در خاک افزایش داشته است (شکل ۳). دلیل اینکه در مرحله قبل از کوددهی (BF1) تأثیر تیمارها بر غلظت نیترات و آمونیوم معنی-دار بود این است که کوددهی در سه مرحله در طول فصل کشت انجام گرفته است. قبل از مرحله اول کوددهی که هنوز نیتروژن وارد خاک نشده بود، مطابق انتظار تأثیر تیمار بر غلظت نیترات و آمونیوم در خاک معنی‌دار نبود ($P> 0.05$) و متوسط غلظت نیترات و آمونیوم خاک به ترتیب ۲۲/۹ و ۵/۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود؛ اما مرحله BF1 در دومین و سومین نوبت کوددهی در طول فصل، تحت تأثیر نوبت کوددهی قبلی قرار گرفته است، بنابراین به‌طورکلی تأثیر تیمارها بر غلظت نیترات و آمونیوم در BF1 معنی‌دار شد (جدول ۴). در شکل (۳) نیز به‌وضوح مشخص شده است که در مرحله BF1 نوبت اول کوددهی، میانگین غلظت نیترات و آمونیوم در نواحی زیر جویچه و پشته

1. Agronomic Nitrogen Efficiency
2. Crop Recovery Efficiency

برای تیمارهای مختلف با هم تفاوت معنی‌داری نداشته است ($P> 0.05$)؛ اما در نوبت کوددهی دوم و سوم، غلظت نیترات و آمونیوم بین تیمارهای مختلف با یکدیگر متفاوت شده است. به‌عبارت‌دیگر وقتی کود واردشده به خاک به شکل نیترات و آمونیوم تبدیل می‌شود، گیاه بر اساس نیاز و شرایط رشدش از آن‌ها برداشت می‌کند و گاهی ممکن است کل نیتروژن واردشده به خاک تا مرحله بعدی کوددهی مصرف نگردد؛ بنابراین باقیمانده نیتروژن در خاک، روی نمونه‌های برداشت‌شده برای نوبت بعدی کوددهی مؤثر واقع می‌شود. مشابه با چنین نتیجه‌ای نیز در مطالعه Soroush *et al* (2011) گزارش شده است. از طرف دیگر نتایج تحقیقات Zhang *et al* (2015) نشان داده است که سرعت معدنی شدن و نیترات‌زایی در خاک تیمارهایی که کود نیتروژن بیشتری دریافت می‌کنند، بیشتر است. همچنین در خاک‌های تحت آبیاری، معدنی شدن خالص در فصل تابستان که شرایط رطوبتی و دمای مناسبی دارد، حتی در خاک‌های با محتوای پایین مواد آلی، می‌تواند با سرعت بالایی اتفاق بیافتد که این خود باعث افزایش غلظت نیترات و آمونیوم در خاک می‌شود (Diez *et al*, 2006). تفاوت بین مقادیر غلظت-های نیترات و آمونیوم در تیمارهای N0، N150 و N250 در شکل (۳) نیز می‌تواند به خاطر همین دلایل باشد.

با مقایسه مقادیر غلظت آمونیوم در طول مراحل قبل و بعد از کوددهی مشخص می‌شود که هیدرولیز اوره در روز دوم و چهارم بعد از کوددهی اثر خود را نشان داده و غلظت آمونیوم افزایش یافته است. این مشاهدات با نتایج Zhou *et al* (2006) تقریباً مشابه بود. آن‌ها تغییر شکل کود اوره در خاک را مورد بررسی قرار دادند و مشاهده کردند که در روز اول پس از کودآبیاری، غلظت نیتروژن آمونیومی در خاک افزایش یافت و در روز پنجم به حداکثر خود رسید و تا روز دهم مجدداً در نتیجه نیترات‌زایی غلظت آمونیوم کاهش یافت. به همین دلیل در مطالعه Soroush *et al* (2011) چون نمونه‌برداری از خاک ۸ تا ۱۰ روز بعد از کودآبیاری صورت گرفته بود عملاً تغییرات آمونیوم در تیمارهای مختلف معنی‌دار نبود. مقایسه مقادیر غلظت آمونیوم در تیمارهای مختلف در مراحل بعد از کوددهی نشان می‌دهد که غلظت آمونیوم در تیمار N250 با دو تیمار دیگر از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری داشت.

مقایسه مقادیر غلظت نیترات در تیمارهای مختلف در روز دوم و چهارم بعد از کوددهی نشان می‌دهد که غلظت نیترات در تیمارهای N250 و N150 با تیمار N0 از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری داشت. همچنین در تیمار N250 غلظت نیترات از روز دوم تا چهارم بعد از کوددهی با افزایش روبرو بود (جدول ۵). یکی از دلایل این امر می‌تواند ایجاد شرایط مناسب پدیده نیترات‌زایی نظیر دما، تهویه، رطوبت و سطح نیتروژن موجود در خاک نواحی زیر جویچه در دومین روز بعد از انجام کوددهی باشد (Ebrahimian *et al*,2013). به همین دلیل غلظت نیترات در AF4 خیلی بیشتر از AF2 می‌باشد. این پدیده با شدت کمتری در تیمارهای N0 و N150 اتفاق افتاده است. دلیل دیگر آن می‌تواند مربوط به بافت لوم خاک مزرعه موردمطالعه باشد که ضریب آبگذری آن در حدود ۱۲۴ سانتیمتر در روز بود. لذا بعد از هر کوددهی که همراه با آبیاری اتفاق می‌افتاد احتمالاً مقداری نیترات از نواحی زیر جویچه شسته و به اعماق پایین‌تر منتقل می‌شد که همین مسئله باعث کاهش غلظت نیترات نواحی زیر جویچه در روز دوم بعد از کوددهی تیمار N250 شده است. البته در تمامی مراحل، حجم آب آبیاری بر اساس مراحل رشد گیاه ذرت و کمبود رطوبت خاک تخمین زده شد تا از بیش‌آبیاری و آبشویی نیترات به خارج از ناحیه توسعه ریشه جلوگیری شود.

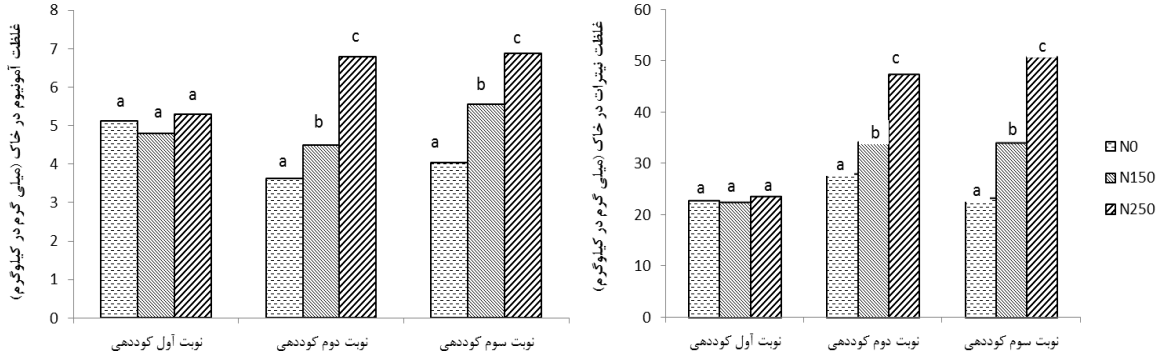


شکل ۲. اثر کود بر مقدار نیتروژن جذب‌شده توسط گیاه (Nu که با نمودار ستونی مشخص شده است) و تولید ماده خشک اندام هوایی گیاه (W که با نمودار خطی مشخص شده است). حروف روی نمودار ستونی با استفاده از مقایسه میانگین به روش LSD در سطح معنی‌داری ۵ درصد به دست آمده است.

جدول ۳. تجزیه واریانس تأثیر تیمارها بر نیتروژن جذب‌شده توسط گیاه

منبع تغییرات	روز نمونه‌برداری / درجه آزادی	۲۶	۴۵	۶۳	۷۵	۸۷	۱۱۹
تیمار	۲	۴۶/۷۲*	۴۶۰۲/۱۳**	۵۶۷۲/۱۶*	۱۰۸۲۱/۸۰**	۱۷۶۶۸/۴۶**	۲۶۵۵۷/۲۶**
تکرار	۲	۱۹/۶۶	۶۰/۶۸	۳۹۶/۴۰	۱۵۲/۸۳	۲۶۱/۵۳	۴۰۰/۴۹
خطا	۴	۳/۶۱	۱۶۸/۵۱	۵۰۷/۱۱	۵۷/۸۶	۲۰۴/۶۹	۱۶۵/۷۸
ضریب تغییرات	(٪)	۱۷/۳۸	۱۲/۸۲	۱۵/۱۷	۴/۶۰	۷/۹۰	۶/۷۱

* در سطح ۵ درصد معنی‌دار است. ** در سطح ۱ درصد معنی‌دار است. ns: از نظر آماری معنی‌دار نیست.



شکل ۳. میانگین غلظت نیترات و آمونیوم خاک (نواحی زیر جویچه و پشته) در تیمارهای مختلف در مرحله قبل از کوددهی (BF1) برای سه نوبت کوددهی. حروف روی نمودار ستونی با استفاده از مقایسه میانگین به روش توکی در سطح معنی‌داری ۵ درصد به دست آمده است.

جدول ۴. تجزیه واریانس غلظت نیترات و آمونیوم خاک در سه مرحله نمونه‌برداری زیر جویچه

منبع تغییرات	مرحله نمونه‌برداری / درجه آزادی	BF1	AF2	AF4	BF1	AF2	AF4
		نیترات			آمونیوم		
تیمار	۲	۷۱۶/۷۴**	۱۲۰۸/۳۷**	۲۷۷۱/۴۸**	۰/۶۸**	۱/۱۵**	۰/۶۳*
عمق	۲	۱۳۷/۸۹*	۲۴۳/۹۳*	۸۲/۶۲ns	۲/۷۰**	۳/۵۰**	۴/۶۵**
تیمار× عمق	۴	۶۱/۱۸ ns	۳۱/۲۶ ns	۱۳۴/۷۴ ns	۰/۱۵**	۰/۱۷*	۰/۸۶*
خطا	۸	۳۲/۱۸	۲۹/۸۴	۳۷/۴۲	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۱۷
ضریب تغییرات	(٪)	۲۵/۷۶	۲۶/۰۶	۲۱/۳۳	۵/۸۸	۸/۹۰	۱۷/۴۸

* در سطح ۵ درصد معنی‌دار است. ** در سطح ۱ درصد معنی‌دار است. ns: از نظر آماری معنی‌دار نیست.

جدول ۵. تأثیر میزان کود بر غلظت نیترات و آمونیوم خاک طی سه مرحله نمونه‌برداری از قبل و بعد از کوددهی زیر جویچه (مقایسه میانگین به روش توکی در سطح معنی‌داری ۵ درصد انجام شده است).

تیمار	مرحله BF1	AF2	AF4	BF1	AF2	AF4
	غلظت نیترات (میلی‌گرم بر کیلوگرم)			غلظت آمونیوم (میلی‌گرم بر کیلوگرم)		
N0	۱۳/۰۸c	۷/۶۰b	۹/۸۹c	۳/۶۶b	۳/۸۵c	۳/۸۸b
N150	۲۲/۰۵b	۲۷/۰۲a	۳۱/۴۹b	۴/۷۷b	۶/۱۳b	۶/۷۴ab
N250	۳۰/۹۳a	۲۸/۲۶a	۴۴/۶۵a	۷/۱۸a	۹/۲۴a	۹/۸۲a

تأثیر کاربرد کود در غلظت نیترات و آمونیوم زیر پشته:
همانند نتایج به دست آمده برای نواحی زیر جویچه، تأثیر میزان کود بر غلظت نیترات در زیر پشته برای هر سه مرحله نمونه‌برداری (BF1, AF2, AF4) معنی‌دار بود (جدول ۶). جدول (۷) به‌خوبی نشان می‌دهد که بعد از کوددهی مقدار غلظت نیترات به‌طور معنی‌داری در تیمارها به‌صورت N250>N150>N0 است. یون نیترات به دلیل داشتن بار منفی، به‌راحتی همراه با رطوبت خاک منتقل می‌شود. بعد از نفوذ آب به داخل جویچه‌ها، جریان آب تحت تأثیر پتانسیل ثقلی (به‌صورت جریان قائم به سمت پایین ناحیه ریشه) و پتانسیل

ماتریک ناشی از مکش ایجادشده از جذب آب توسط ریشه و تبخیر آب از سطح خاک پشته (به‌صورت جریان جانبی و رو به بالا) می‌باشد؛ بنابراین هر چه کود بیشتر از نیاز گیاه وارد خاک شود، غلظت نیترات محلول در زیر جویچه و پشته بیشتر می‌شود. دلیل معنی‌دار بودن اختلاف غلظت نیترات در زیر پشته‌های سه تیمار در مرحله BF1 نیز مشابه دلیلی است که در بخش قبلی برای همین مرحله در ناحیه زیرین جویچه‌ها مطرح شد.

متفاوت با شرایطی که برای نیترات در زیر پشته وجود داشت، تأثیر میزان کود بر غلظت آمونیوم برای مرحله BF1 معنی‌دار نبود اما برای دو مرحله بعد از کوددهی یعنی AF2 و AF4 معنی‌دار بود و در هر دو مرحله مقدار غلظت آمونیوم در N250 به‌طور معنی‌داری بیشتر از N150 و N0 بود. ازآنجایی‌که تحرک آمونیوم در خاک کمتر از نیترات است، تغییر غلظت آمونیوم در خاک زیر پشته در تیمارهای مختلف نسبت به خاک زیر جویچه کمتر بود (جدول ۷). نتایج به دست آمده در جدول (۷) نشان می‌دهند که کود اضافه‌شده در تیمار N150 باعث افزایش غلظت آمونیوم نواحی زیر پشته نشده است. به‌عبارت‌دیگر در تیمار N150 تقریباً کل آمونیوم تولیدشده از هیدرولیز اوره در نواحی زیر جویچه‌ها باقیمانده و از آنجا طی پدیده نیترات‌زایی به نیترات تبدیل‌شده و سپس همراه با جریان رطوبت به زیر پشته‌ها منتقل می‌گردد.

جدول ۶. تجزیه واریانس غلظت نیترات و آمونیوم خاک در سه مرحله نمونه‌برداری زیر پشته

منبع تغییرات	مرحله نمونه‌برداری	BF1	AF2	AF4	BF1	AF2	AF4
	درجه آزادی	نیترات			آمونیوم		
تیمار	۲	۵۰۱/۰۸*	۳۱۳۸/۰۳**	۲۱۰۳/۸۸**	۰/۰۳	۰/۳۴**	۰/۵۱**
عمق	۲	۲۴۸/۸۱^{ns}	۴۸۶/۵۲*	۲۱۱/۶۰**	۰/۳۲**	۰/۳۷**	۰/۱۸**
تیمار× عمق	۴	۲۶۱/۷۲^{ns}	۳۹۰/۵۲*	۲۰۳/۵۴**	۰/۰۱^{ns}	۰/۰۱^{ns}	۰/۰۵^{ns}
خطا	۸	۸۴/۱۸	۷۳/۸۵	۲۲/۲۵	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲
ضریب تغییرات	(٪)	۲۲/۰۶	۱۵/۵۸	۸/۰۹	۶/۱۱	۵/۶۲	۵/۴۷

* در سطح ۵ درصد معنی‌دار است. ** در سطح ۱ درصد معنی‌دار است. ns: از نظر آماری معنی‌دار نیست.

جدول ۷. تأثیر میزان کود بر غلظت نیترات و آمونیوم خاک طی سه مرحله نمونه‌برداری از قبل و بعد از کوددهی زیر پشته (مقایسه میانگین به روش توکی در سطح معنی‌داری ۵ درصد انجام شده است).

تیمار	مرحله BF1	AF2	AF4	BF1	AF2	AF4
	غلظت نیترات (میلی‌گرم بر کیلوگرم)			غلظت آمونیوم (میلی‌گرم بر کیلوگرم)		
N0	۳۶/۲۷^{b}	۳۸/۱۰^{c}	۴۴/۴۸^{c}	۴/۱۴	۴/۳۶^{b}	۴/۸۵^{b}
N150	۳۸/۳۹^{ab}	۵۲/۲۷^{b}	۵۵/۶۷^{b}	۴/۳۰	۴/۷۳^{b}	۵/۱۲^{b}
N250	۵۰/۱۲^{a}	۷۵/۱۱^{a}	۷۴/۷۲^{a}	۵/۴۶	۶/۲۸^{a}	۶/۹۱^{a}

تأثیر عمق بر غلظت نیترات و آمونیوم در زیر جویچه و پشته:
نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که بعد از انجام کوددهی، عمق باعث بروز تغییرات در غلظت آمونیوم در نواحی زیر جویچه می‌شود. چون آمونیوم یک یون با تحرک نسبتاً کم است لذا اکثر آن در لایه‌های بالایی خاک (صفر تا ۴۰ سانتیمتری) می‌ماند. به همین دلیل در همه مراحل قبل و بعد از کوددهی، غلظت آمونیوم در لایه ۲۰ سانتیمتری زیر جویچه بیشتر از عمق‌های ۴۰ و ۶۰ سانتیمتر می‌باشد؛ بنابراین انتقال آمونیوم به اعماق بیشتر با سرعت کم اتفاق می‌افتد. در جدول (۸) و (۹) کاملاً مشخص است که غلظت آمونیوم زیر پشته نسبت به زیر جوی بسیار کمتر است. علاوه بر این تغییرات غلظت آمونیوم نسبت به عمق در زیر پشته در مقایسه با نواحی زیر جویچه دارای شیب کمتری است. بااین‌حال در هر سه مرحله غلظت آمونیوم در لایه ۲۰ سانتیمتری زیر پشته نیز به‌طور معنی‌داری بیشتر از لایه ۶۰ سانتیمتری است. Soroush *et al* (2011) در مطالعه خود گزارش دادند که عمق تأثیر معنی‌داری بر غلظت آمونیوم خاک در هیچ‌یک از مراحل نمونه‌برداری نداشته و توزیع آن در طول پروفیل خاک یکنواخت بوده است. همان‌طور که قبلاً هم اشاره شد، نمونه‌برداری آن‌ها حدود ۸ تا ۱۰ روز بعد از کودآبیاری انجام گرفته بود و عملاً در این فاصله زمانی بخش زیادی از آمونیوم به دست آمده از مرحله هیدرولیز اوره، طی فرآیند نیترات‌زایی به نیترات تبدیل شده بود؛ اما در مطالعه حاضر

نمونه‌ها به فاصله زمانی ۲ و ۴ روز بعد از کوددهی برداشت شده است و بر همین اساس اثر عمق روی غلظت آمونیوم در خاک، همانند اثر تیمار معنی‌دار شده است.

همان‌طور که جدول (۸) نشان می‌دهد، در زیر جویچه و در مرحله AF2 غلظت نیترات نسبت به عمق به‌صورت معنی-داری افزایش می‌یابد. در مرحله AF4 چون بعد از گذشت ۴ روز از کوددهی در عمق‌های مختلف غلظت نیترات تقریباً به تعادل می‌رسد لذا هیچ‌گونه تفاوت معنی‌داری در مقادیر غلظت نیترات نسبت به عمق وجود ندارد. دلیل رسیدن به تعادل می‌تواند فرآیند نیترات‌زایی در لایه‌های کم‌عمق‌تر باشد که به دلیل وجود غلظت بیشتر آمونیوم در آنجا و تهویه بهتر، با سرعت بالاتری انجام می‌گیرد. پیش از اولین کوددهی غلظت نیترات در عمق-های مختلف زیر پشته در سه تیمار با یکدیگر تفاوت معنی‌داری نداشت ($P>0.05$)؛ اما با انجام کوددهی اثر عمق روی غلظت نیترات زیر پشته مشهود شد. بدین‌صورت که در عمق‌های کمتر غلظت نیترات زیادتر از عمق‌های بیشتر است. این تأثیر دقیقاً برعکس آنچه در زیر جویچه اتفاق می‌افتد می‌باشد. بدین‌صورت که در زیر جویچه با افزایش عمق غلظت نیترات به‌طور معنی-داری افزایش یافته است (جدول ۸). این نتایج تفاوت توزیع نیترات در زیر جویچه و پشته را با یکدیگر و نقش جذب نیترات توسط ریشه گیاه را نشان می‌دهد. چون تجمع ریشه و نسبت جذب رطوبت توسط گیاه در نواحی زیر پشته بیشتر بود بنابراین تا ۴ روز بعد از کوددهی، نیترات تولیدشده از پدیده نیترات‌زایی در قسمت‌های کم‌عمق زیر پشته بیشتر تجمع داشت؛ اما با گذشت زمان و تکرار آبیاری و جذب توسط گیاه، غلظت نیترات در سرتاسر عمق زیر پشته نیز به حالت تعادل نزدیک می‌شود.

جدول ۸. تأثیر عمق بر غلظت نیترات و آمونیوم خاک طی سه مرحله نمونه‌برداری از قبل و بعد از کوددهی زیر جویچه (مقایسه میانگین به روش توکی در سطح معنی‌داری ۵ درصد انجام شده است).

عمق (cm)	مرحله BF1	AF2	AF4	BF1	AF2	AF4
	غلظت نیترات (میلی‌گرم بر کیلوگرم)			غلظت آمونیوم (میلی‌گرم بر کیلوگرم)		
۰-۲۰	۱۶/۰۵ ^{b}	۱۶/۹۷^{b}	۲۳/۷۰	۸/۷۵^{a}	۱۰/۸۵^{a}	۱۲/۵۰^{a}
۲۰-۴۰	۲۳/۱۳^{ab}	۲۰/۵۵^{ab}	۲۸/۱۷	۴/۱۷^{b}	۵/۵۱^{b}	۵/۱۸^{b}
۴۰-۶۰	۲۵/۸۸^{a}	۲۶/۳۶^{a}	۳۳/۱۷	۲/۶۸^{c}	۲/۸۵^{c}	۲/۷۶^{c}

جدول ۹. تأثیر عمق بر غلظت نیترات و آمونیوم خاک طی سه مرحله نمونه‌برداری از قبل و بعد از کوددهی زیر پشته (مقایسه میانگین به روش توکی در سطح معنی‌داری ۵ درصد انجام شده است).

عمق (cm)	مرحله BF1	AF2	AF4	BF1	AF2	AF4
	غلظت نیترات (میلی‌گرم بر کیلوگرم)			غلظت آمونیوم (میلی‌گرم بر کیلوگرم)		
۰-۲۰	۴۷/۵۹	۶۷/۱۸^{a}	۶۶/۷۸^{a}	۶/۱۰^{a}	۶/۳۱^{a}	۶/۲۵^{a}
۲۰-۴۰	۳۹/۴۴	۵۲/۵۷^{ab}	۵۶/۴۹^{b}	۵/۱۹^{a}	۴/۸۷^{b}	۵/۳۴^{ab}
۴۰-۶۰	۳۷/۷۵	۴۵/۷۴^{b}	۵۱/۶۰^{b}	۴/۱۴^{b}	۴/۱۹^{b}	۴/۶۴^{b}

اثر متقابل تیمار و عمق بر غلظت نیترات و آمونیوم در زیر جویچه و پشته:

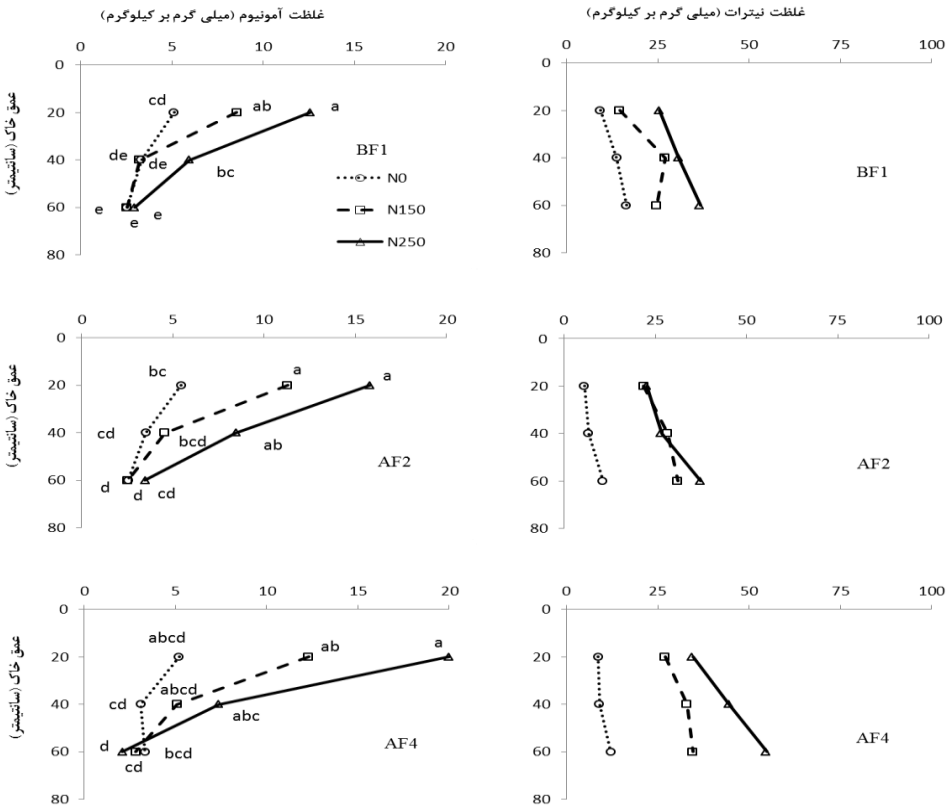
بر اساس نتایج تجزیه واریانس به دست آمده در جداول (۳) و (۵)، اثرات متقابل میزان کود و عمق بر غلظت آمونیوم در همه مراحل نمونه‌برداری در زیر جویچه و بر غلظت نیترات در مراحل AF2 و AF4 زیر پشته معنی‌دار بود؛ بنابراین در شکل (۴) اثر متقابل تیمار و عمق فقط برای این مراحل بررسی گردیده است. در مرحله BF1 و در عمق ۲۰ سانتیمتری زیر جویچه، به ترتیب غلظت آمونیوم به‌صورت N250> N150> N0 بود به‌طوری‌که غلظت در N0 با N150 و N250 اختلاف معنی‌داری داشت و این خود به‌وضوح نشان می‌دهد که در لایه ۲۰ سانتیمتری زیر جویچه، آمونیوم واردشده از کوددهی در مراحل قبلی باعث شده است که اثر متقابل تیمار و عمق در مرحله BF1 معنی‌دار باشد. در مرحله AF2 و AF4 در عمق ۲۰ سانتیمتری زیر جویچه نیز غلظت آمونیوم با افزایش مقدار کود کاربردی، زیاد شده است (N250>N150>N0) و این اختلاف در عمق‌های پایین‌تر کمتر می‌شود و دلیل آن نیز کم بودن تحرک آمونیوم در خاک است. برای کلیه مراحل نمونه‌برداری (BF1, AF2,AF4) در عمق ۶۰ سانتیمتری غلظت آمونیوم در هیچ‌کدام از تیمارها با یکدیگر تفاوت معنی‌داری ندارد. این نشان می‌دهد که حتی با کاربرد

مقادیر مختلف کود، علیرغم اینکه هدایت هیدرولیکی خاک موردمطالعه متوسط و در حدود ۱۲۴ سانتیمتر در روز است، تغییری در غلظت آمونیوم در عمق ۶۰ سانتیمتری ایجاد نمی‌شود.

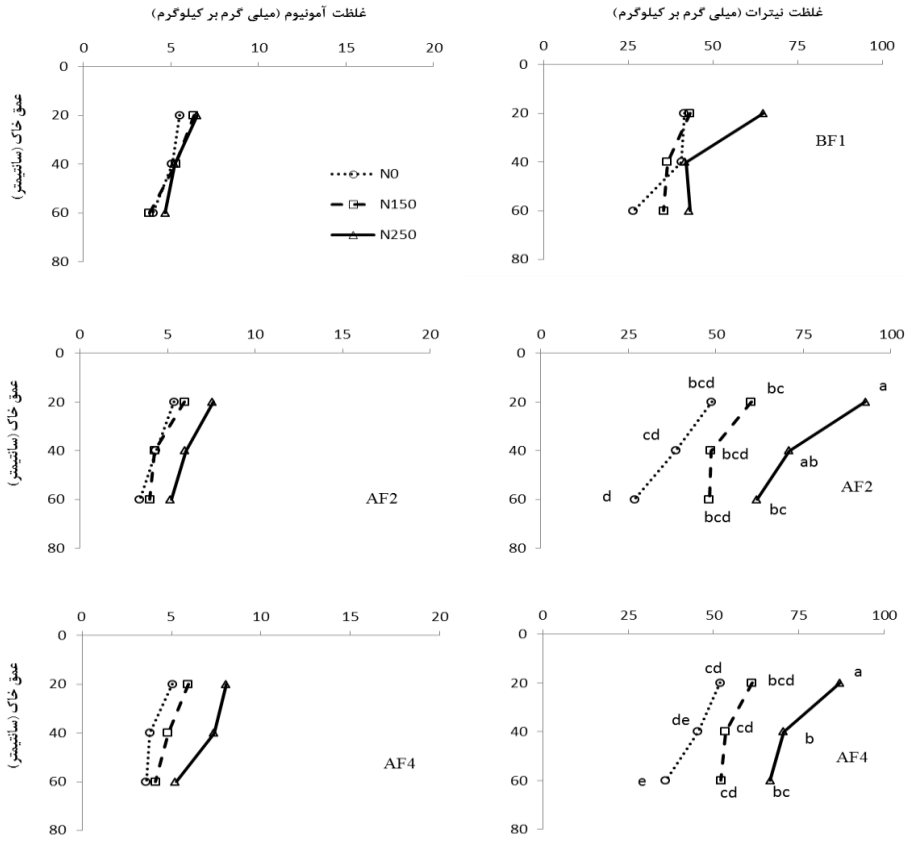
همان‌طور که گفته شد، اثر متقابل تیمار و عمق بر غلظت نیترات زیر پشته فقط در مراحل بعد از کوددهی یعنی AF2 و AF4 معنی‌دار بود. در مرحله AF2 و AF4 یعنی دو و چهار روز بعد از کوددهی، در تیمار N250 غلظت نیترات در عمق‌های ۲۰، ۴۰ و ۶۰ سانتیمتری زیر پشته با تیمار N0 اختلاف معنی‌داری داشت و به‌طورکلی غلظت‌ها به‌صورت N250>N150>N0 بودند. به‌عبارت‌دیگر در تیمار N250، اثر کود بیشتر طی دو روز بعد از کوددهی تا عمق ۶۰ سانتیمتری زیر پشته‌ها کاملاً نمایان شده بود. در هر تیمار با بیشتر شدن عمق، غلظت نیترات کم شد (شکل ۴).

مقایسه غلظت نیترات و آمونیوم خاک در زمان‌های قبل از شروع کوددهی و بعد از برداشت محصول:

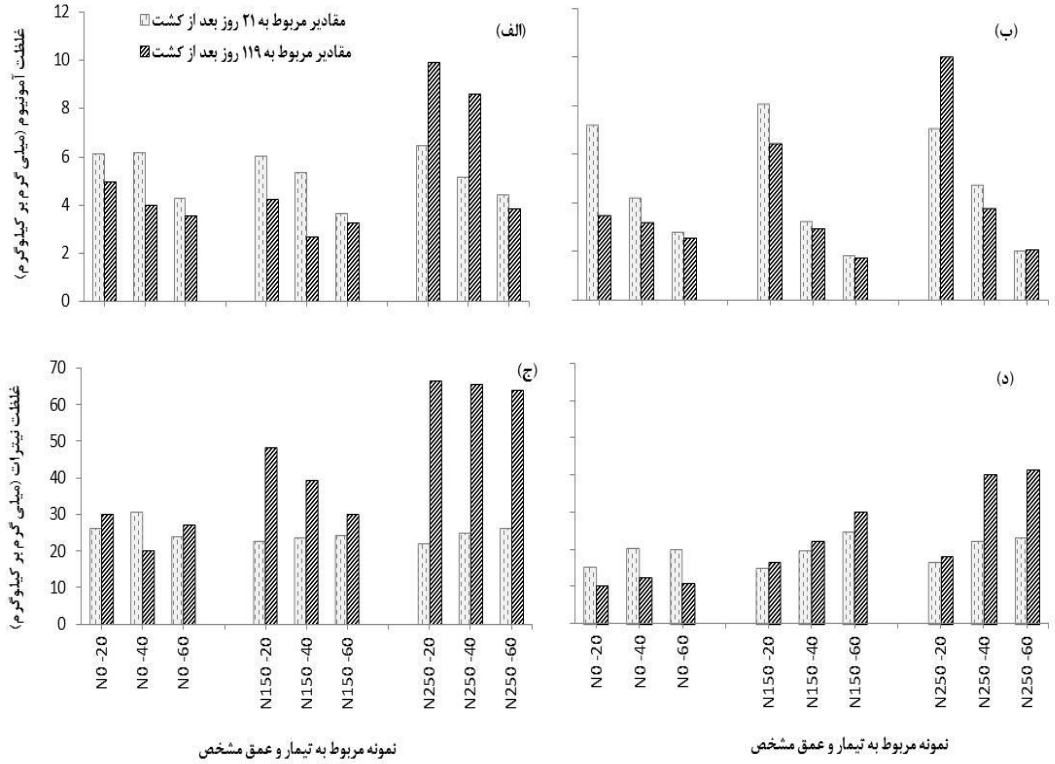
همان‌طور که در شکل (۶- الف و ب) نشان داده شده است در تیمارهای N0 و N150 غلظت آمونیوم در هر دو ناحیه زیر پشته و جویچه در روز برداشت نهایی کمتر از روز قبل از اولین کوددهی بود. فقط تیمار N250 از این قاعده مستثنی بوده است. همان‌طور که Zhang *et al* (2015) نشان دادند که افزایش کاربرد کود نیتروژن در خاک می‌تواند باعث افزایش سرعت معدنی شدن نیتروژن آلی شود، ممکن است افزایش غلظت آمونیوم در تیمار N250 نیز به همین دلیل باشد. علاوه بر این، غلظت نیترات در همه اعماق تیمارهای N150 و N250 در روز برداشت نهایی بیشتر از روز قبل از اولین کوددهی بود (شکل ۶- ج و د). این اختلاف غلظت در هر دو ناحیه زیر جویچه و پشته‌ها برای تیمار N250 بسیار بیشتر از N150 بود که دلیل آن مصرف بیش از حد کود در تیمار N250 می‌باشد. میانگین غلظت نیترات نقاط زیر جویچه برای تیمار N150، در زمان‌های قبل از کوددهی و بعد از برداشت محصول به ترتیب ۱۹/۷۷ و ۲۲/۹۰ میلی‌گرم در کیلوگرم (شامل ۱۶ درصد افزایش) بود. این مقادیر برای نقاط زیر پشته به ترتیب ۲۳/۶۸ و ۳۹/۳۱ میلی‌گرم در کیلوگرم (شامل ۶۶ درصد افزایش) بود. میانگین غلظت نیترات نقاط زیر جویچه برای تیمار N250، در زمان‌های قبل از کوددهی و بعد از برداشت محصول به ترتیب ۲۰/۶۶ و ۳۳/۳۴ میلی‌گرم در کیلوگرم (شامل ۶۱ درصد افزایش) و برای نقاط زیر پشته به ترتیب ۲۴/۴۵ و ۶۵/۴۸ میلی‌گرم در کیلوگرم (شامل ۱۶۸ درصد افزایش) بود. مقدار نیترات اضافه‌شده به نواحی زیر پشته‌ها در هر دو تیمار N150 و N250 حدود سه برابر نواحی زیر جویچه‌ها بوده است. به‌عبارت‌دیگر، تجمع نیترات در اعماق زیر پشته‌ها، بخصوص در تیمارهای با مصرف کود بالاتر، بیشتر بود. درنهایت مشخص شد که در زمان برداشت محصول از تیمار N250، مقدار کل غلظت نیترات اضافه‌شده به عمق ۶۰ سانتیمتری زیر جویچه و پشته‌ها (در مقایسه با زمان قبل از اولین کوددهی) به ترتیب بیش از ۳ و ۷ برابر مقادیر متناظر در تیمار N150 بود. این نتایج تجمع نیترات باقیمانده در عمق ۶۰ سانتیمتری خاک بعد از برداشت نهایی محصول در تیمار N250 را نشان می‌دهند. با توجه به اینکه عمق توسعه ریشه ذرت در منطقه موردمطالعه کمتر از ۶۰ سانتیمتر است، می‌توان گفت که در طول فصل کشت و در تیمار N250، عملاً آبشویی نیترات اتفاق افتاده است که می‌تواند زمینه‌ساز آلودگی منابع آب زیرزمینی گردد. تجمع نیترات در لایه‌های کم‌عمق‌تر خاک‌های با بافت نسبتاً سبک نیز می‌تواند با بارش‌های خارج از فصل کشت موجب آبشویی نیترات از عمق و سطح مزارع گردد. این در حالی است که در بخش‌های قبلی مشخص شد که دو شاخص کارایی زراعی و بازیافت نیتروژن در تیمار N150 بیشتر از تیمار N250 بود. این نتایج گویای این واقعیت هستند که اگرچه ماده خشک تولیدی در تیمار N250 نسبت به N150 حدود ۱۰ درصد افزایش داشت اما احتمال آبشویی نیترات و تخریب محیط‌زیست در نتیجه مصرف ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن بیشتر، چندین برابر افزایش خواهد یافت. با توجه به بافت و ویژگی‌های فیزیکی خاک موردمطالعه، ممکن است اقداماتی نظیر متراکم کردن یا کشیدن پلاستیک در کف جویچه‌ها و یا قرار دادن کود در دیواره یا روی سطح پشته‌ها که در بعضی تحقیقات نظیر مطالعه Siyal *et al* (2012) توصیه شده بتواند آبشویی نیترات از کف جویچه را کاهش دهد، اما همان‌طور که نتایج نشان دادند، سهم بیشتری از تجمع نیترات مازاد در نواحی زیر پشته‌ها به وجود آمده بود؛ بنابراین در چنین شرایطی قبل از اقداماتی نظیر کاهش نفوذپذیری کف جویچه‌ها و یا انتخاب محل مناسب قرارگیری کود روی پشته‌ها، لازم است تا بر اساس اولویت‌های اقتصادی و زیست‌محیطی موجود در هر منطقه، بهینه‌ترین سطح کودی تعیین گردد.



شکل ۴. توزیع غلظت نیترات و آمونیوم در زیر جویچه در سه مرحله نمونه‌برداری (BF1: یک روز قبل از کوددهی، AF2 : دو روز بعد از کود دهی، AF4: چهار روز بعد از کود دهی) در تیمارهای مختلف. (مقایسه میانگین به روش توکی در سطح معنی‌داری ۵ درصد انجام شده است).



شکل ۵. توزیع غلظت نیترات و آمونیوم در زیر پشته در سه مرحله نمونه‌برداری (BF1: یک روز قبل از کود دهی، AF2 : دو روز بعد از کود دهی، AF4: چهار روز بعد از کود دهی) در تیمارهای مختلف. (مقایسه میانگین به روش توکی در سطح معنی‌داری ۵ درصد انجام شده است).



شکل ۶. مقایسه غلظت نیترات و آمونیوم در روز قبل از اولین کوددهی (۲۱ روز بعد از کشت) با روز برداشت نهایی محصول (۱۱۹ روز بعد از کشت) در عمق و تیمارهای مختلف. شکل‌های (الف) و (ج) مربوط به نواحی روی پشته و شکل‌های (ب) و (د) مربوط به نواحی زیر جویچه هستند.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج به دست آمده در این مطالعه حاکی از آن بود که با افزایش کود، مقدار جذب نیتروژن و تولید ماده خشک گیاه نیز افزایش داشت. نرخ جذب نیتروژن در ابتدای فصل رشد آهسته و در اواسط رشد سریع و بعد از آن مجدداً آهسته بود. از ۲۶ روز تا ۴۵ روز بعد از کشت، نرخ جذب نیتروژن در تیمارهای N0، N150 و N250 به ترتیب ۲/۱۳، ۴/۷ و ۴/۸ کیلوگرم نیتروژن در هکتار در روز محاسبه شد که بیشترین نرخ جذب در طول فصل رشد بود. همچنین دو شاخص کارایی زراعی و بازیافت نیتروژن نشان دادند که در تیمار N150 نسبت به N250، به ازای هر کیلوگرم نیتروژن اضافه‌شده به خاک محصول بیشتری تولید شده بود و گیاه مقدار بیشتری نیتروژن از خاک جذب کرده بود. هر دو عامل عمق و مقدار کود در تغییرات غلظت نیترات و آمونیوم زیر جویچه و پشته بعد از کوددهی، مؤثر بودند. بیشترین مقدار غلظت آمونیوم در محدوده عمق ۲۰ سانتیمتری زیر جویچه‌ها مشاهده شد و با افزایش عمق در نواحی زیر پشته و جویچه غلظت آمونیوم به‌شدت کم می‌شد. در حالت کلی غلظت آمونیوم به دلیل کم‌تحرک بودن در خاک، در اعماق مختلف زیر پشته کمتر از نقاط زیر جویچه بود. علاوه بر این توزیع غلظت نیترات نیز در نقاط زیر جویچه و پشته متفاوت بود. به‌طوری‌که تا دو روز بعد از کوددهی، در زیر جویچه با افزایش عمق، غلظت نیترات افزایش می‌یافت؛ اما چهار روز بعد از کوددهی و به دلیل فرآیند نیترات‌زایی، در لایه‌های کم‌عمق‌تر نیز غلظت نیترات افزایش داشت. از طرف دیگر، بعد از کوددهی غلظت نیترات در اعماق کمتر زیر پشته بیشتر می‌شد و با افزایش عمق، غلظت کاهش می‌یافت. درنهایت مشخص شد که در زمان برداشت محصول از تیمار N250، مقدار کل غلظت نیترات اضافه‌شده به عمق ۶۰ سانتیمتری زیر جویچه و پشته‌ها (در مقایسه با زمان قبل از اولین کوددهی) چندین برابر مقادیر متناظر در تیمار N150 بود که درواقع تجمع نیترات مازاد در پایین عمق توسعه ریشه در تیمار N250 را نشان می‌داد. همچنین، در زمان برداشت محصول تجمع نیترات مازاد در اعماق زیر پشته‌ها بیشتر بود. این نتایج نشان می‌دهند که برای کاهش آبشویی نیترات، مصرف مقدار بهینه کود در طول دوره رشد می‌تواند بسیار تأثیرگذارتر از استراتژی‌هایی نظیر کاهش نفوذپذیری خاک کف جویچه در خاک‌های با بافت لوم باشد. لذا پیشنهاد می‌گردد مطالعاتی دقیقتر در این راستا بروی بافت‌های مختلف خاک صورت بگیرد.

REFERENCES

Artiola, J.F., (1991). Non-uniform leaching of nitrate and other solutes in a furrowirrigated, sludge amended field. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 22, 1013–1030.

Bremner, J.M., and Keeney D.R. (1965). Steam distillation methods for determination of ammonium nitrite and nitrate. *Analytica Chimica Acta*, 32:485-495.

Diez, J.A., Tarquis, A., Catagena, M.C., and Vallejo, A. 2006. Optimisation of N application for a maize crop grow in a shallow, irrigated soil. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 4(4): 373-380.

Dobermann AR (2005) Nitrogen Use Efficiency - State of the Art. *Agronomy & Horticulture* - Faculty Publications. from http://digitalcommons.unl.edu/agronomyfacpub/316

Du, Z. Y., Zhou, J. M., Wang, H. Y., Du, C. W. and Chen, X. Q. (2005). Effect of nitrogen fertilizers on movement and transformation of phosphorus in an acid soil. *Pedosphere*. 15(4): 424-431.

Ebrahimian, H., Liaghat, A., Parsinejad, M., Playan, E., Abbasi, F., Navabian M. (2013). Simulation of 1D surface and 2D subsurface water flow and nitrate transport in alternate and conventional furrow fertigation. *Journal of Irrigation Science*, 31(3): 310-316.

Fang, Q., Yu, Q., Wng, E., Chen, Y., Zhang, G., Wang, J., and Li, L. (2006). Soil nitrate accumulation and crop nitrogen use influenced by fertilization and irrigation in an intensive wheat-maiz double cropping system in the North China plain. *Journal of Plant and Soil*, 284(1-2): 335-350.

Gheibi. M. N., Asadi. F., Tehrani. M. M. (2014) Guidelines for integrated soil fertility and plant nutrition management of maize. *Karaj*: *Soil and Water Research Institute*.

Guo JH, Liu XJ, Zhang Y, Shen JL, Han WX, *et al*. (2010) Significant acidification in major Chinese croplands. *Science* 327: 1008–1010.

Horowitz, W. (1970). Official Methods of Analysis. 11th Edition.vAssociation of Official Analytical Chemists,vWashington,vD.C.

Ju XT, Kou CL, Zhang FS, Christie P (2006): Nitrogen balance and groundwater nitrate contamination: comparison among three intensive cropping systems on the North China Plain. *Environ Pollut* 143, 117–125.

Lemaire G., Jeuffroy M., Gastal F. (2008). Diagnosis tool for plant and crop N status in vegetative stage Theory and practices for crop N management. *European Journal of Agronomy* 28: 614–624.

Novokova, K., and Nagel, D. (2009). The influence of irrigation on nitrate movment in soil and risk of subsoil contamination. *Soil and Water Research Journal*, 4(2): 131-136.

Ramos, T.B., Šimunek, J., Goncalves, M.C., Martins, J.C., Prazeres, A., Pereira, L.S., (2012). Two-dimensional modeling of water and nitrogen fate from sweet sorghum irrigated with fresh and blended saline waters. *Agricultural Water Management*. 111, 87–104.

Rangzan,R., Ziyaieyan firoozabadi,P., Mirzaie,L., Alijani,F. (2008). State-wide of vulnerability in Varamin aquifer using DRASTIC and Empirical assessment of the unsaturated zone influence in GIS. *Iranian Journal of Geology*, 2(6), 21-32. .(In farsi).

Raun, W.R., and Johnson, G.V. (1999). Improving nitrogen use efficiency for cereal production. *Agronomy Journal*, 91(3): 357-363.

Siyal.A.A, Bristow. K.L, Simunek. J,. (2012). Minimizing nitrogen leaching from furrow irrigation through novel fertilizer placement and soil surface management strategies. *Agricultural Water management* 115 , 242– 251.

Soroush, N., Sayad,Gh,A., Moezi, A,A., Khoramian,M. (2011). Mobility of Different Forms of Nitrogen in Soil Influenced by Different Rates of Urea Fertilizer in Maize Fertigation System in the North of Khuzestan. *Journal of Agricultural Engineering*,), 41-53 (in farsi).

Wylie, B.K., Shaffer, M.J., Brodahl, M.K., Dubois, D., Wagner, D.G., (1994). Predicting spatial distributions of nitrate leaching in northeastern Colorado. *Journal of Soil and Water Conservation* 49, 288–293.

Yin, F., Fu, B., and Mao, R. (2007). Effect of nitrogen fertilizer application rates on nitrate nitrogen distribution in salin soil in the Hai river basin, china. *Journal of Soils and Sediments*, 7(3):136-142.

Zhang.X., Wang.Q., Xu.J., Gilliam. F. S, Tremblay. N., Li. C. (2015). In Situ Nitrogen Mineralization, Nitrification, and Ammonia Volatilization in Maize Field Fertilized with Urea in Huanghuaihai Region of Northern China. *PLOS ONE*, 10(1):1-15.

Zhou, J.B., Xl, J.G., Chen, Z.J., and Li, S.X. (2006). Leaching and transformation of nitrogen fertilizer in soil after application of N with irrigation: A soil column method. *Pedosphere Journal*, 6(2): 245-25.