

پیامد فشردگی دو نوع خاک مختلف بر غلظت آمونیوم و نیترات قابل استخراج و جذب نیتروژن توسط گندم

سحر اخوان^۱، محمود شعبانپور^{۲*}

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۰/۲۶ تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۹/۲۰

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد خاکشناسی، گروه علوم خاک، دانشگاه گیلان، رشت

۲- دانشیار گروه علوم خاک، دانشگاه گیلان، رشت

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: shabanpour@guilan.ac.ir

چکیده

برای بررسی پیامد فشردگی خاک بر فرایند معدنی‌شدن نیتروژن در خاک و جذب آن توسط گیاه گندم یک آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در دانشکده کشاورزی دانشگاه گیلان انجام گرفت. پیامد فشردگی خاک در سه سطح (فشردگی طبیعی، ۱۰ و ۲۰ درصد فشردگی)، بافت خاک در دو سطح (بافت شنی و رسی) و پنج زمان نمونه برداری (۱، ۷، ۱۴، ۳۰ و ۶۰ روز پس از کاشت گندم) بر معدنی‌شدن نیتروژن آلی بررسی شد که مجموعاً شامل ۱۸ گلدان شد. غلظت آمونیوم و نیترات خاک در پنج بازه زمانی اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که اثر فشردگی خاک، مراحل زمانی و اثر متقابل این دو بر غلظت آمونیوم و نیترات در سطح احتمال یک درصد معنادار بود و غلظت آمونیوم و نیترات در تیمار فشردگی طبیعی به ترتیب با میانگین ۳۰ و ۷۹ میلی گرم بر کیلوگرم از تیمارهای فشرده بیشتر بود. بررسی روند تغییرات غلظت آمونیوم و نیترات در مراحل زمانی مختلف نشان داد که با گذشت زمان، نیتروژن آمونیومی در خاک افزایش و نیتروژن نیتراتی کاهش یافت و کاهش معنادار غلظت آمونیوم در نمونه‌های فشرده‌تر مربوط به بازه دوم و سوم اندازه‌گیری (به ترتیب با میانگین ۲۰/۷۵ و ۱۳/۶۸ میلی گرم بر کیلوگرم در تیمار فشردگی ۲۰ درصد) بود. همچنین غلظت نیترات تحت تأثیر نوع خاک و اثر متقابل نوع خاک با مراحل زمانی برای آمونیوم در سطح احتمال پنج درصد معنادار بود. غلظت آمونیوم و نیترات خاک رسی بیشتر از خاک شنی بود. به طور کلی، با افزایش فشردگی خاک، نیتروژن کل خاک کاهش یافت. در نمونه‌های فشرده نیتروژن آلی کمتری به شکل آمونیومی در آمد و تشکیل نیترات به دنبال آمونیومی شدن، کاهش پیدا کرد. همچنین در تیمارهای فشرده نسبت به تیمار فشردگی طبیعی نیتروژن کمتری مورد استفاده گیاه قرار گرفت.

واژه‌های کلیدی: آمونیوم، فشردگی خاک، گندم، معدنی‌شدن نیتروژن، مواد آلی، نیترات

The Effect of Soil Compaction on Ammonium and Nitrate Concentrations and Wheat Nitrogen Uptake in two Different Soils

S Akhavan¹, M Shabanpour^{2*}

Received: 16 January 2016

Accepted: 10 December 2016

¹ Former Graduate Student, Soil Science Department, University of Guilan, Rasht, Iran

² Assoc. Prof., Soil Science Department, University of Guilan, Rasht, Iran

*Corresponding Author, Email: shabanpour@guilan.ac.ir

Abstract

In order to investigate the effect of soil compaction on soil nitrogen mineralization process and its uptake by wheat a factorial experiment in a completely randomized design with three replications was designed. Experiment was conducted with three levels of compaction (normal, 10% and 20% compression), two soil textures (sandy and clay) and five sampling times (1, 7, 14, 30 and 60 days after planting). Ammonium and nitrate concentrations in soil were measured at five time intervals. Results indicated that the effect of soil compaction, time interval and the interaction of soil compaction and time intervals on concentrations of ammonium and nitrate were significant ($p < 0.01$). Ammonium and nitrate concentrations in normal compression treatments were higher than those of other treatments (30 and 79 milligrams per kilogram). The temporal trend of concentration changes was increasing for ammonium nitrogen and decreasing for nitrate nitrogen. Results showed significant decrease in ammonium concentration in compressed samples related to the second and third time periods (with an average concentration of 20.75 and 13.68 mg per kg respectively in treatment with 20% compression). Also soil type had significant effect on nitrate concentration ($p < 0.05$) and interaction of soil type and time intervals had significant effect on ammonium concentration ($p < 0.05$). Ammonium and nitrate concentrations in clay soil were higher than those in the sandy soil. In general, by increasing soil compaction, soil total nitrogen was decreased. Conversion of organic nitrogen to ammonium in compressed samples was lower and the formation of nitrate was decreased, also in the compressed treatments less nitrogen was used.

Keywords: Ammonium, Nitrate, Nitrogen mineralization, Organic matter, Soil compaction, Wheat

مقدمه

می‌آید. مجموع دو شکل آمونیوم و نیترات برای گیاهان قابل جذب می‌باشد. تبدیل آمونیوم به نیترات، نیاز مبرمی به اکسیژن دارد و وقتی مقدار اکسیژن کاهش یابد، اکسید شدن آمونیوم محدود شده و به صفر می‌رسد. اثر تهویه خاک در معدنی شدن نیتروژن و نیترات سازی بسیار زیاد است و شرایط بی‌هوایی خاک ممکن است باعث تلفات مقدار زیادی نیتروژن به صورت نیترات زدایی شود (هتوری و همکاران ۲۰۱۳). شهر آیینی (۱۳۸۵) اثر فشردگی بر برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و عملکرد گندم در خاک شور و غیرشور را مورد بررسی قرار داد و مشاهده نمود که فشردگی، اثر معناداری بر غلظت عناصر غذایی خاک و گیاه در خاک شور و غیر شور دارد. دی نو و هافمن

امروزه فشردگی خاک به‌عنوان مشکلی جهانی و فرآیندی پیچیده و چند بعدی شامل تأثیر متقابل خاک- ماشین- گیاه- اقلیم شناخته شده که دارای آثار اقتصادی و زیست محیطی قابل توجهی است و به‌عنوان یک معضل پیچیده در برابر کشاورزی پایدار می‌باشد. خاک‌ورزی بیش از اندازه باعث شکسته شدن خاکدانه های خاک و ایجاد ساختمان فقیر، تخریب مواد آلی و افزایش فشردگی خاک می‌شود. در نتیجه باید به فشردگی خاک نسبت به گذشته دقت بیشتری شود (آلمند و همکاران، ۲۰۱۲). فرآیند معدنی شدن نیتروژن یکی از مهم‌ترین فرآیندهای چرخه نیتروژن است که نخستین محصول آن، آمونیوم می‌باشد که بخش قابل توجهی از آن در شرایط هوایی به‌شکل نیترات در

ویژگی‌های زیستی خاک مورد بررسی قرار دادند و مشاهده کردند که در چگالی ظاهری بالاتر از ۱/۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب، فشردگی خاک اثرات منفی بر فعالیت میکروبی، تشکیل منافذ درشت، میزان تنفس و معدنی‌شدن نیتروژن دارد. پنگتامکراتی و همکاران (۲۰۱۱) اظهار کردند که فشردگی خاک با تغییر ویژگی‌های فیزیکی می‌تواند ویژگی‌های زیستی خاک را نیز تغییر دهد که علت آن نقش ریزجانداران و فعالیتشان در منافذ خاک می‌باشد. تحقیق حاضر به‌منظور بررسی و مطالعه اثر فشردگی خاک بر فرآیند معدنی‌شدن نیتروژن در شرایط گلخانه‌ای و تاثیر فشردگی خاک بر تولید و تشکیل آمونیوم و نیترات خاک انجام شده است.

مواد و روش‌ها

برای بررسی اثر فشردگی بر فرآیند معدنی‌شدن نیتروژن و جذب آن توسط گیاه، آزمایشی به‌صورت گلخانه‌ای در تابستان سال ۱۳۸۹ در دانشکده کشاورزی دانشگاه گیلان انجام گرفت. به‌دلیل نقش مهم ماده آلی در معدنی‌شدن نیتروژن، یکسان‌بودن مقدار ماده آلی در خاک‌های انتخابی مورد بررسی قرار گرفت. به‌این ترتیب که از مناطق مختلف استان گیلان خاک‌های رسی و شنی انتخاب و میزان ماده آلی آنها اندازه‌گیری شد.

به‌دلیل نقش مهم ماده آلی در تراکم خاک، خاک‌های انتخاب دارای ماده آلی یکسانی بودند. زیرا ماده آلی مبین ذخیره نیتروژن خاک است و معدنی‌شدن آن ذخیره دایمی ولی محدودی از نیتروژن، فسفر و گوگرد در اختیار گیاه قرار می‌دهد. اندکی پس از وارد شدن ماده آلی در خاک، میکروب‌ها برای تامین مواد غذایی و انرژی خود شروع به تجزیه آنها کرده و تغییراتی را بر روی آنها ایجاد می‌کنند که در مجموع این تغییر و تحول را می‌توان در دو مرحله هوموسی شدن و معدنی‌شدن خلاصه نمود (ابراهیمی و همکاران ۱۳۸۴). بنابراین نمونه‌های خاک برای انجام آزمایش-های فیزیکی و شیمیایی از دو منطقه آبکنار (از توابع

(۲۰۰۰) اثر فشردگی خاک را روی معدنی‌شدن نیتروژن و کربن آلی و باقی‌مانده محصول بررسی کردند و مشاهده کردند که بعد از دو هفته دوره آزمایشی غلظت نیترات در نمونه‌هایی با چگالی ظاهری بیشتر به‌طور قابل توجهی پایین‌تر از نمونه‌هایی بود که فشردگی کمتری روی آنها اعمال شده بود و نتیجه گرفتند فرآیند نیترات‌سازی تحت تاثیر فشردگی است. متولی و همکاران (۲۰۰۳) با بررسی اثر فشردگی خاک بر دسترس بودن نیتروژن در گیاه ذرت با شخم عمیق و استفاده از کود دامی در خاک شنی پی بردند که از عوامل مؤثر بر کاهش جذب نیتروژن در خاک‌های فشرده می‌توان به کاهش آب قابل استفاده خاک به علت کاهش نفوذپذیری آب، کاهش رشد ریشه، کاهش خلل و فرج درشت و افزایش نیترات‌زدایی اشاره نمود. بلومفیلد و چن (۲۰۰۵) اثر فشردگی خاک و کشت را بر معدنی‌شدن نیتروژن طی دوره ۱۸ ماهه مورد بررسی قرار دادند و مشاهده کردند که مقدار نیتروژن نیتراتی معدنی شده در دو نوع تیمار بدون کشت و خاک زیر کشت بین ۱۰ تا ۴۰ میلی گرم بر کیلوگرم متغیر بود، در حالی که میزان نیتروژن آمونیومی در تیمارهای فوق کمتر از ۱۰ میلی گرم بر کیلوگرم گزارش شد. همچنین آنان با اصلاح فشردگی خاک از طریق شخم و دیسک افزایش معناداری در معدنی‌شدن نیتروژن و نیترات‌سازی مشاهده نمودند. تان و همکاران (۲۰۰۵) با بررسی اثر فشردگی بر ویژگی‌های میکروبی و انتقال نیتروژن خاک دریافتند که فشردگی خاک با افزایش چگالی ظاهری و کاهش تخلخل تهویه ای خاک می‌تواند مقدار رطوبت و دمای خاک را کاهش دهد. همچنین تن و چنگ (۲۰۰۷) اثر فشردگی خاک و لاشبرگ جنگل اصلاح شده را بر معدنی‌شدن خالص نیتروژن بررسی کردند و دریافتند که فشردگی بر ویژگی‌های میکروبی خاک اثر می‌گذارد. نتایج آنان نشان داد که عملیات مدیریتی با تغییر تخلخل خاک و توزیع مواد آلی در پروفیل خاک می‌تواند به‌طور چشم‌گیری حرکت نیتروژن خاک را تغییر دهد که نتیجه آن تغییر غلظت یا فراهمی نیتروژن خاک است. بیلچ و همکاران (۲۰۱۰) اثر فشردگی را بر

اشباع به روش وزنی و رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای با دستگاه صفحه فشاری اندازه‌گیری شد (کلوت، ۱۹۸۶). ویژگی‌های شیمیایی اولیه نمونه‌های خاک شامل pH با استقاده از pH متر، ماده آلی با روش والکلی-بلاک و نیتروژن کل به روش کج‌لال اندازه‌گیری شدند (پیچ و همکاران، ۱۹۸۲).

شهرستان انزلی) با بافت شنی و خاک اطراف دانشکده کشاورزی با بافت رسی تهیه شدند. برای تعیین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک قبل از کاشت (جدول ۱)، مقداری از نمونه خاک‌های مورد مطالعه به آزمایشگاه انتقال یافت، سپس ویژگی‌های فیزیکی اولیه شامل بافت خاک به روش هیدرومتر با قرائت کامل، چگالی ظاهری خاک با روش سیلندر، درصد رطوبت

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه های خاک قبل از کاشت.

pH	TN	OM	FC	SP	Bd	شن	سیلت	رس	بافت
		(%)			(g cm ⁻³)		(%)		
۷/۰۶	۰/۱۴۹	۲	۲۹/۱۸	۴۷/۴۱	۱/۳	۲۰/۶	۲۹/۴	۵۰	رسی
۶/۹۲	۰/۰۹۲	۱/۹۸	۷/۴۳	۲۱/۶۴	۱/۶۵	۹۰	۵	۵	شنی

Bd؛ چگالی ظاهری خاک، SP: درصد وزنی رطوبت اشباع، FC: درصد وزنی رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای خاک، OM: ماده آلی، TN؛ نیتروژن کل

مکعب انتخاب شدند. برای اعمال سطوح فشردگی در گلدان‌ها ابتدا Bd دست نخورده به روش سیلندر اندازه‌گیری شد و این چگالی به عنوان شاهد برای خاک غیر فشرده در نظر گرفته شد. طبق جدول ۲ با مشخص بودن حجم گلدان و چگالی ظاهری، وزن خاک لازم که باید در هر گلدان ریخته شود محاسبه گردید. برای تعیین مقدار خاک لازم برای سطوح فشردگی ۱۰ درصد و ۲۰ درصد، به ترتیب ۱۰ درصد و ۲۰ درصد به وزن خاک شاهد اضافه شد.

این تحقیق به صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار اجرا شد که اثر عامل فشردگی خاک در سه سطح (فشردگی طبیعی، ۱۰ و ۲۰ درصد)، عامل بافت خاک در دو سطح (رسی و شنی) در پنج زمان نمونه برداری (۱، ۷، ۱۴، ۳۰ و ۶۰ روز پس از کاشت) اثر تیمارها بر معدنی شدن نیتروژن مورد بررسی قرار گرفت که مجموعاً شامل ۱۸ گلدان بود. گلدان‌ها از جنس PVC به شکل استوانه‌ای با ارتفاع ۳۵ سانتی‌متر، قطر ۱۶ سانتی‌متر و حجم ۷۰۳۳ سانتی‌متر

جدول ۲- وزن خاک مورد نیاز جهت ایجاد فشردگی.

وزن خاک لازم هر گلدان (kg)	Bd (g cm ⁻³)	فشردگی (%)	نوع خاک
۶/۵۳۱۲	۱/۳	۰	
۷/۱۸۴۳	۱/۴۳	۱۰	رسی
۷/۸۳۷۴	۱/۵۶	۲۰	
۸/۲۸۹۶	۱/۶۵	۰	
۹/۱۱۸۵	۱/۸۱	۱۰	شنی
۹/۹۴۷۵	۱/۹۸	۲۰	

باراه و بارتاکور ۱۹۹۷) و نیتروژن نیتراتی در خاک با استفاده از معرف بروسین (بولتز ۱۹۷۸) اندازه‌گیری شد. شدت رنگ برای آمونیوم و نیترات خاک در طول موج ۴۱۰ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر مورد سنجش قرار گرفت و با مقایسه آن با نتایج به دست آمده از منحنی استاندارد، غلظت نیتروژن آمونیومی و نیتراتی در خاک تعیین شد. در نمونه‌های گیاه گندم وزن تر کل اندام های هوایی با دقت ۰/۰۰۱ گرم با ترازوی دقیق و سطح برگ با استفاده از دستگاه اندازه گیری سطح برگ رومیزی اندازه گیری شد. در پایان نمونه‌ها برای تعیین وزن خشک در آن (دمای ۷۲ درجه سلسیوس به مدت ۴۸ ساعت) خشکانده شدند و سپس وزن خشک کل اندام هوایی، وزن خشک برگ، وزن خشک ساقه و وزن خشک ریشه اندازه‌گیری شدند. همچنین نسبت وزن خشک ریشه به اندام‌های هوایی در تیمارهای مختلف محاسبه شد. مقایسه میانگین‌های‌ها با آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد انجام گرفت. از نرم‌افزار SAS به منظور تجزیه داده‌ها و از نرم‌افزار Excel برای ترسیم نمودارها استفاده شد.

نتایج و بحث

در نیتروژن کل خاک اثر فشردگی و اثر متقابل فشردگی و مراحل زمانی در سطح احتمال یک درصد و اثر مراحل زمانی، اثر متقابل نوع خاک و مراحل زمانی و اثر متقابل نوع خاک، فشردگی و مراحل زمانی در سطح احتمال پنج درصد معنادار به دست آمد. مقایسه میانگین اثر متقابل به صورت مقایسه میانگین‌های سطوح فشردگی در دو بازه زمانی نشان داد که بین سطوح مختلف فشردگی در هفته دوم رشد اختلاف معناداری در مقدار نیتروژن کل خاک وجود دارد، به گونه‌ای که نمونه‌های با فشردگی طبیعی و میانگین ۰/۱۳۱ درصد بیشترین مقدار نیتروژن را نسبت به نمونه‌های تحت فشردگی بیشتر، به خود اختصاص دادند (جدول ۳). اگر

بعد از تعیین وزن خاک مورد نیاز برای هر گلدان فشرده کردن خاک گلدان‌ها با استفاده از وزنه دو کیلوگرمی انجام شد. خاک در چند مرحله به گلدان افزوده و فشرده گردید تا فشردگی به طور یکنواخت در عمق گلدان اعمال شود و در نهایت ارتفاع خاک هر گلدان به ارتفاع گلدان شاهد در رطوبت بهینه رسید. برای تعیین رطوبت بهینه (رطوبتی که در آن بیشینه فشردگی حاصل می‌شود)، از روش پراکتور^۱ استفاده شد. در این آزمایش از روش اصلاح شده تراکم خاک با استفاده از چکش پراکتور مدل ASTM D 698-78 Standard استفاده شد. خاک در ۵ لایه در قالب ریخته و هر بار با استفاده از چکش ۲/۵ کیلوگرمی که از ارتفاع ۳۰۰ میلی متری بر روی خاک ضربه می‌زد، با ۲۵ ضربه متراکم گردید. این آزمایش را ۵ بار تکرار شد و با استفاده از روابط، چگالی خشک خاک محاسبه گردید. رطوبت ظرفیت مزرع‌ای خاک با استفاده از صفحات فشاری (کلوت، ۱۹۸۶) تعیین شد و سپس به تمام گلدان‌ها یک درصد وزن خاک، ماده آلی پوسیده گاوی برای تامین نیتروژن آلی اضافه شد، سپس در هر گلدان ۶ عدد بذر گندم رقم شهریار (*Triticum aestivum* cv. Shahryar) در عمق دو سانتیمتری خاک کاشته شد و پس از جوانه‌زدن تعداد ۴ عدد به مدت دو ماه در محیط گلخانه با دمای متوسط ۲۵ درجه سلسیوس پرورش داده شدند. مقدار آب مورد نیاز جهت آبیاری تا رسیدن خاک به رطوبت ظرفیت مزرع‌ای برای هر گلدان به روش وزنی محاسبه و به گلدان‌ها افزوده شد. وضعیت رطوبت تیمارها هر هفته بررسی و در صورت نیاز آبیاری شدند. شایان ذکر است که آبیاری برای خاک رسی به مقدار زیاد و فواصل زیاد و برای خاک سنگین به مقدار کم و فواصل کم انجام می‌گرفت به گونه‌ای که آبشویی نداشته باشند. اندازه‌گیری نیتروژن کل خاک و گیاه به روش کج‌دال (پیچ و همکاران ۱۹۸۲) انجام شد. نیتروژن آمونیومی در خاک به روش رنگ‌سنجی با استفاده از معرف نسلر

^۱ Practor

چه در پایان دوره رشد افزایش معناداری در غلظت نیتروژن کل تیمار با فشردگی طبیعی مشاهده نشد. اما تغییر غلظت ها نشان می‌دهد. همچنان میزان غلظت نیتروژن کل در تیمار شاهد بیشتر از نمونه‌های فشرده است و علت این عدم معناداری مصرف کم نیتروژن در نمونه های فشرده است. می‌توان این‌گونه بیان نمود که فشردگی می‌تواند رطوبت و دمای خاک را تغییر دهد که این امر باعث کنترل فعالیت میکروبی خاک شده و عناصر غذایی خاک را کاهش دهد. کاراکا و همکاران (۱۹۹۷) با بررسی تأثیر تراکم بر روی فعالیت آنزیم اوره آز و معدنی‌شدن نیتروژن به این نتیجه رسیدند که تراکم، خاک را به هم فشرده می‌کند و منافع بزرگ را

کاهش می‌دهد که این کاهش می‌تواند منطقه بومی موجودات زنده‌ای که در چرخه عناصر غذایی خاک نقش دارند، محدود کند و بنابراین می‌تواند باعث کاهش فعالیت میکروبی شود. نتایج فوق با متولی و همکاران (۲۰۰۳) مطابقت داشت. آنان پی بردند که از عوامل مؤثر بر کاهش جذب نیتروژن در خاک‌های فشرده می‌توان به کاهش آب قابل استفاده خاک به علت کاهش نفوذپذیری آب، کاهش رشد ریشه، کاهش خلل و فرج درشت و همچنین کاهش نیتروژن خاک به علت فرایند نیترات زدایی اشاره نمود و علت کاهش نیتروژن در فشردگی بالا را عدم وجود منافذ درشت برای جریان ترجیحی و فقدان شرایط مناسب برای نیترات‌سازی دانستند.

جدول ۳- مقایسه میانگین‌های نیتروژن کل خاک (%) برای سطوح فشردگی خاک در دو بازه زمانی.

هفته دوم رشد	انتهای دوره رشد
فشرده‌گی طبیعی	فشرده‌گی طبیعی
فشرده‌گی ۱۰٪	فشرده‌گی ۱۰٪
فشرده‌گی ۲۰٪	فشرده‌گی ۲۰٪

کاهش می‌یابد و اگر C:N کمتر از ۲۵-۲۰ باشد ازت ماده آلی توسط میکروارگانیسم‌ها تثبیت می‌گردد و ایموبیل می‌شود. همچنین در نسبت های C:N کمتر از ۲۰، ازت آلی به فرم معدنی تبدیل می‌شود. در نمونه های تحت فشردگی نیز میزان نیتروژن کل زیاد و نسبت کربن به نیتروژن پایین بود که همین امر موجب از دست رفتن نیتروژن به شکل آمونیاکی شد و به‌علت متناسب نبودن مقدار آن نسبت به ماده آلی فرآیند معدنی‌شدن و نیترات‌سازی به‌کندی صورت گرفت. تغییراتی که در مسیر معدنی‌شدن و آلی شدن اتفاق می‌افتد فقط بستگی به مقدار نیتروژن یا کربن قابل استفاده برای توده میکروبی خاک دارد. اگر مقدار کربن بیش از نیاز باشد نیتروژن آلی می‌شود و برعکس وقتی مقدار مواد نیتروژنی بیش از احتیاج است معدنی‌شدن صورت می‌گیرد (هافتن ۲۰۰۷).

همچنین مقایسه میانگین‌های سطوح فشردگی خاک در دو بازه زمانی برای نسبت C:N نشان داد که میزان آن با افزایش سطح فشردگی افزایش یافت (جدول ۴). قابلیت استفاده نسبی نیتروژن و کربن آلی که به خاک داده شده با نسبت کربن به نیتروژن نمایش داده می‌شود. کاربرد این نسبت دارای مزیت است که وضعیت هر دو عنصر را توأمأ بررسی می‌کند. ضمناً می‌توان به‌جای این قسمت مقدار نسبی درصد نیتروژن را نیز به کار برد (جنسن و همکاران، ۲۰۰۰). نسبت کربن به نیتروژن فاکتور مهمی در ارزیابی حاصلخیزی خاک است به‌طوری که بالا بودن C:N نشان‌دهنده مصرف نیتروژن خاک و کاهش حاصلخیزی خاک می‌باشد و اگر این نسبت پایین باشد نشان‌دهنده از دست رفتن نیتروژن به‌صورت آمونیاک است. تحقیقات نشان داده که با افزایش C:N روند معدنی‌شدن ازت آلی

جدول ۴- مقایسه میانگین‌های سطوح فشردگی خاک در دو بازه زمانی بر نسبت کربن به نیتروژن.

انتهای دوره رشد		هفته دوم رشد	
a./۰۹۲	فشردگی طبیعی	a./۱۳۱	فشردگی طبیعی
a./۰۸۶	فشردگی ۱۰٪	b./۰۸۹	فشردگی ۱۰٪
a./۰۸۴	فشردگی ۲۰٪	b./۰۷۷	فشردگی ۲۰٪

درصد) و وزن خشک ساقه (SDW) (در سطح احتمال پنج درصد) گیاه گندم تفاوت معناداری داشتند (جدول ۵).

نتایج تجزیه واریانس نشان داد سطوح فشردگی، نوع خاک و اثر متقابل سطوح فشردگی در نوع خاک برای وزن تر و وزن خشک کل اندام‌های هوایی و وزن خشک برگ (LDW) (در سطح احتمال یک

جدول ۵- تجزیه واریانس اثر سطوح فشردگی و نوع خاک بر صفات اندازه گیری شده اندام هوایی گیاه گندم.

میانگین مربعات							منابع تغییر
R/S	وزن خشک ساقه	وزن خشک برگ	وزن خشک کل اندام هوایی	وزن تر اندام هوایی	درجه آزادی		
۰/۰۰۱۵ ^{ns}	۲۴/۳*	۰/۰۸۸*	۱/۵۲**	۲/۷۰**	۵۷/۹۷**	۲	فشردگی
۰/۰۰۴۳ ^{ns}	۱۳۴**	۰/۰۵۲ ^{ns}	۰/۳۰ ^{ns}	۰/۹۰**	۲۴۱/۴۸**	۱	نوع خاک
۰/۰۰۱۹*	۱۸/۷*	۰/۰۹۲*	۰/۲۹*	۰/۸۷**	۷۰/۴۱**	۲	فشردگی × نوع خاک
۰/۰۰۲۸	۴/۴۰	۰/۰۱۸	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۸۵	۱۰	خطا
۲۷/۲۲	۱۳/۴۵	۴۲/۹۲	۲۹/۴۱	۱۹/۳۴	۱۸/۵۷		ضریب تغییرات (%)

R/S: نسبت وزن خشک ریشه به اندام‌های هوایی

که با افزایش نسبت وزن خشک ریشه به اندام‌های هوایی در نمونه‌های فشرده همراه بود. علت این موضوع را می‌توان ناشی از اثر بیشتر فشردگی خاک بر رشد ساقه نسبت به رشد ریشه دانست. پاندر و همکاران (۲۰۱۲) دریافتند در شرایطی که آب و مواد غذایی به مقدار کافی وجود دارد، گیاهان در خاک‌های متراکم با سرعت کمتری رشد می‌نمایند. رشد اندام‌های هوایی گیاه در پاسخ به پیغام‌های هورمونی تولید شده در ریشه‌ها کاهش یافت. نتایج مشابهی توسط میرانصاری و همکاران (۲۰۰۸) گزارش شد. تهویه ضعیف، معدنی‌شدن مواد آلی را به تعویق می‌اندازد و این امر می‌تواند معدنی‌شدن نیتروژن و سایر مواد غذایی را کاهش دهد، همچنین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک تحتانی بر جذب نیتروژن و سایر عناصر

مطابق نتایج ارائه شده در جدول ۶ مقایسه میانگین اثر متقابل فشردگی خاک در نوع خاک نشان داد که فشردگی خاک منجر به کاهش وزن تر اندام‌های هوایی در هر دو نوع خاک شد، به گونه ای که فشردگی صفر درصد در خاک رسی و شنی (به ترتیب با میانگین ۱۵/۸۵ و ۷/۳۷ گرم)، بالاترین مقدار وزن تر اندام‌های هوایی را در مقایسه با نمونه‌های فشرده شده خاک داشتند. بالاترین وزن خشک اندام‌های هوایی نیز مربوط به تیمار شاهد (صفر درصد فشردگی) با میانگین ۲/۷۴ گرم گلدان در خاک رسی و با میانگین ۱/۴۱ گرم گلدان در خاک شنی بود که تفاوت معناداری با سایر فشردگی‌ها داشتند. اثر متقابل فشردگی در نوع خاک برای نسبت وزن خشک ریشه به اندام‌های هوایی (Root/Soot) در سطح احتمال پنج درصد معنادار بود،

غذایی تأثیر می‌گذارد، رشد ریشه‌های گیاهان در خاک تحتانی به‌وسیله ویژگی‌های ضعیف خاک محدود می‌شود که باعث تجمع نیتروژن معدنی در خاک تحتانی شده و مانع جذب توسط گیاه می‌شود. سطوح فشردگی خاک (در سطح احتمال یک درصد) و نوع خاک و اثر متقابل آن‌ها برای سطح برگ تک بوته (LA) (در سطح احتمال پنج درصد) تفاوت

معناداری را نشان دادند. بیشترین سطح برگ مربوط به تیمار صفر درصد فشردگی خاک رسی (با میانگین ۲۰/۶۴ سانتی‌متر مربع برگ گل‌دان) بود. فشردگی خاک باعث کاهش سطح برگ شد، به‌گونه‌ای که فشردگی ۲۰ درصد در خاک رسی و شنی (به‌ترتیب با میانگین ۱۰/۶۸ و ۱۰/۸۶ سانتی‌متر مربع برگ گل‌دان) کم‌ترین میزان سطح برگ را داشتند (جدول ۶).

جدول ۶- مقایسه میانگین‌های سطوح فشردگی در نوع خاک بر صفات اندام هوایی گیاه گندم.

R/S	سطح برگ (cm ²)	وزن خشک ساقه (g)	وزن خشک برگ (g)	وزن خشک اندام هوایی (g)	وزن تر اندام هوایی (g)	فشردگی	نوع خاک
۰/۱۰۳ ^a	۲۰/۶۴ ^a	۰/۶۴ ^a	۱/۸۱ ^a	۲/۷۴ ^a	۱۵/۸۵ ^a	٪۰	رسی
۰/۲۳۷ ^b	۱۸/۹۴ ^a	۰/۲۵ ^b	۰/۸۷ ^b	۱/۱۸ ^b	۶/۸۴ ^b	٪۱۰	
۰/۲۱۸ ^b	۱۰/۶۸ ^b	۰/۲۱ ^b	۰/۳۹ ^c	۰/۷۵ ^b	۳/۲۰ ^c	٪۲۰	
۰/۲۳۷ ^a	۱۹/۸۵ ^a	۰/۲۵ ^a	۱/۰۶ ^a	۱/۴۱ ^a	۷/۳۷ ^a	٪۰	شنی
۰/۱۴۶ ^a	۱۲/۵۸ ^b	۰/۳۲ ^a	۰/۷۳ ^{ab}	۱/۱۴ ^{ab}	۴/۴۷ ^b	٪۱۰	
۰/۲۳۰ ^a	۱۰/۸۶ ^b	۰/۲۰ ^a	۰/۵۰ ^b	۰/۷۸ ^b	۳/۳۵ ^b	٪۲۰	

R/S: نسبت وزن خشک ریشه به اندام‌های هوایی

هم چنین مقایسه میانگین اثر متقابل فشردگی در مراحل زمانی برای نیتروژن برگ نشان داد که نیتروژن کل اندام‌های هوایی در تیمار صفر درصد فشردگی در هفته دوم رشد با میانگین ۷/۶۷ درصد، از سایر سطوح بیشتر بود، در حالی که میزان نیتروژن اندام‌های هوایی سطوح فشردگی در انتهای دوره رشد تفاوت معناداری از هم نداشتند (جدول ۷). از آن جایی که منبع اصلی نیتروژن قابل دسترس گیاه، معدنی‌شدن نیتروژن آلی و کود‌های معدنی نیتروژن بود، هر عاملی که سبب تغییر معدنی‌شدن نیتروژن خاک شود می‌تواند بر جذب

نیتروژن قابل دسترس گیاه اثر بگذارد. آلمد و ویلر (۲۰۱۲) نشان دادند افزایش مقاومت مکانیکی و تهویه ضعیف خاک که در اثر فشردگی خاک حاصل شد رشد ریشه را محدود کرد و این امر خصوصاً بر کاهش جذب نیتروژن اثرگذار بود. همچنین هتوری و همکاران (۲۰۱۳) گزارش کردند رشد ریشه‌های گیاهان در خاک تحتانی به‌وسیله ویژگی‌های ضعیف خاک محدود شد که باعث تجمع نیتروژن معدنی در خاک تحتانی شده و مانع جذب توسط گیاه شد.

جدول ۷- مقایسه میانگین‌های اثر متقابل سطوح فشردگی خاک در مراحل زمانی بر نیتروژن کل اندام هوایی.

مرحله زمانی	نیتروژن کل اندام هوایی (٪)	مرحله زمانی	نیتروژن کل اندام هوایی (٪)
فشردگی طبیعی	۷/۶۷ ^a	نیتروژن کل اندام هوایی (٪)	۳/۹۰ ^a
فشردگی ۱۰٪	۴/۶۸ ^b	نیتروژن کل اندام هوایی (٪)	۳/۶۱ ^a
فشردگی ۲۰٪	۴/۰۹ ^b	نیتروژن کل اندام هوایی (٪)	۳/۲۹ ^a

فاکتوریل انجام شد. نتایج تجزیه واریانس در جدول ۸ ارائه شد. همان طور که مشاهده می‌شود، اثر تراکم خاک، مراحل زمانی و اثر متقابل این دو برای غلظت آمونیوم و نیترات در سطح احتمال ۱٪ و اثر متقابل نوع خاک، تراکم و مراحل زمانی در سطح احتمال ۵٪ معنادار بود. بنابراین غلظت نیترات تحت تأثیر نوع خاک و تراکم خاک قرار گرفت و با توجه به اثر متقابل تراکم با مراحل زمانی می‌توان استنباط نمود اختلاف بین سطوح تراکم در مراحل مختلف، متفاوت از هم بوده است. همچنین واکنش مشابهی برای دو نوع بافت خاک مشاهده شد.

برای بررسی اثر تراکم خاک بر معدنی‌شدن نیتروژن، داده‌های حاصل مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت. قبل از انجام تجزیه واریانس و سایر تجزیه‌های آماری مفروضات تجزیه واریانس بررسی شد که نتایج این بررسی بیانگر برقراری مفروضات بود. بر این اساس تجزیه‌های آماری انجام شد. نتایج تجزیه واریانس اولیه بر اساس طرح کرت‌های خردشده نشان داد برای تمامی صفات خطای کرت اصلی غیرمعنادار بود، بنابراین به منظور بالا بردن قدرت آزمون و اجتناب از وقوع اشتباه تیپ دوم در قضاوت‌های آماری، از ادغام واریانس خطاهای آزمایشی واحد اصلی و فرعی استفاده شد و تجزیه واریانس به صورت یک آزمایش

جدول ۸- نتایج تجزیه واریانس تأثیر تراکم، بافت و زمان نمونه برداری بر غلظت آمونیوم و نیترات خاک.

میانگین مربعات			
نیترات	آمونیم	درجه آزادی	منبع تغییرات
۱۱۳۵*	۲۴/۹ ^{ns}	۱	نوع خاک
۷۸۰۷**	۶۶۷**	۲	فشردگی
۱۴/۹ ^{ns}	۳۴/۲ ^{ns}	۲	نوع خاک × فشردگی
۵۵۲۱**	۳۶۱۵**	۴	مراحل زمانی
۳۵۲ ^{ns}	۷۴/۶*	۴	نوع خاک × مراحل زمانی
۹۱۰**	۱۷۳**	۸	فشردگی × مراحل زمانی
۶۰۲**	۵۹/۳*	۸	نوع خاک × فشردگی × مراحل زمانی
۲۱۰	۲۶/۹	۶۰	خطا
۲۳/۸	۲۰/۱		ضریب تغییرات (%)

* و ** به ترتیب در سطح احتمال پنج و یک درصد معنادار است.

معدنی‌شدن آمونیوم و همچنین تشکیل نیترات به دنبال آمونیومی شدن، کاهش پیدا کرد. همچنین نتایج فوق با گزارش نیولپریز و همکاران (۲۰۱۳) مطابقت داشت، آنان گزارش کردند که کاهش نیتروژن در نمونه‌های فشرده مربوط به منافذ پر از آب، قطر منافذ و ساختمان خاک بود، در حالی که پنگتامکراتی و همکاران (۲۰۰۶) تجمع نیتروژن آمونیومی را در نمونه‌های فشرده نسبت به نمونه‌های غیر فشرده گزارش کردند و اظهار نمودند که سرعت نیترات سازی در نمونه‌های فشرده کاهش

مقایسه میانگین‌های سطوح مختلف فشردگی برای مقدار آمونیوم نشان داد که معدنی‌شدن نیتروژن در نمونه‌های تحت فشردگی دارای اختلاف معناداری با نمونه‌های فشردگی طبیعی بود، به گونه‌ای که سطح فشردگی ۲۰ درصد با میانگین ۲۱ میلی گرم بر کیلوگرم کمترین مقدار نیتروژن آمونیومی را به خود اختصاص داد (شکل ۱) و این بیانگر این مطلب است که در نمونه‌های فشرده‌تر نیتروژن آلی کمتری به شکل آمونیومی در آمد در نتیجه در نمونه‌های فشرده

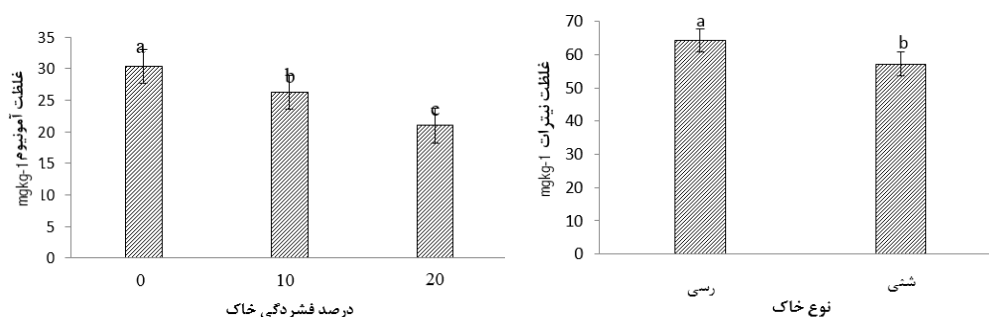
ویژگی‌های مهم دیگر خاک شنی برای نفوذ ریشه، مقدار ذرات ریز، مواد آلی و مواد چسبنده می‌باشد. به علت سطح ویژه کم خاک شنی، درصد کمی از سیلت و رس برای چسباندن مقداری شن نسبت به حجم مشابه از ذرات ریز تر کافی می‌باشد. به نظر می‌رسد که فشار یا مقاومت مکانیکی چنین ترکیبی به اندازه این فشار برای خاک لوم رس سیلتی با ۳۵ درصد رس باشد. اثرات تراکم معمولاً در خاک رسی نسبت به خاک با بافت درشت‌تر و متوسط از پایداری کمتری برخوردار است. اثر تراکمی خاک‌های رسی، به‌خصوص آن‌هایی که دارای کانی‌های ۲:۱ هستند می‌تواند در نتیجه نیروی انبساط و انقباض، کمتر شود، این عمل همراه آبگیری و آبدهی می‌باشد. خاک‌های رده ورتی سول و از نوع مونت موریلونیت ممکن است در طی چند روز این عمل کاهش تراکم را انجام دهند (هینونن ۱۹۸۶).

یافت در نتیجه نیتروژن آمونیومی کمتری تحت نیترات سازی قرار گرفت و در خاک تجمع یافت. مقایسه میانگین‌های نوع خاک برای مقدار نیترات نشان داد که معدنی‌شدن نیتروژن در نمونه‌های خاک رسی دارای اختلاف معناداری با نمونه‌های خاک شنی بود، به‌گونه‌ای که خاک رسی با میانگین ۶۲/۲۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم مقدار نیتروژن نیتراتی بیشتری را به خود اختصاص داد (شکل ۲) و این بیانگر این مطلب است که در نمونه‌های خاک رسی نیتروژن آمونیومی بیشتری به شکل نیتراتی در آمد در نتیجه در نمونه‌های خاک شنی تشکیل نیترات به دنبال آمونیومی شدن، کاهش پیدا کرد. کراوفورد (۱۹۸۱) بیان کرد در خاک‌های با بافت درشت، مقاومت مکانیکی محدود کننده رشد ریشه ممکن است به خاطر سطح ذرات شن باشد که در مقابل جابه‌جا شدن ذرات در اثر لغزیدن مقاومت می‌کنند. یکی از

جدول ۱۰- مقایسه میانگین‌های سطوح فشردگی در مراحل زمانی مختلف بر آمونیوم و نیترات.

نیترات (mg kg^{-1})	آمونیم (mg kg^{-1})	مراحل زمانی/تراکم
۳۴/۹۴ ^a	۴۸/۶۵ ^a	فشرده‌گی طبیعی
۳۲/۵۸ ^a	۴۸/۱۶ ^a	فشرده‌گی ۱۰٪
۲۲/۱۸ ^a	۴۵/۵۱ ^a	فشرده‌گی ۲۰٪
۹۲/۱۹ ^a	۴۴/۷۷ ^a	فشرده‌گی طبیعی
۵۷/۴۵ ^b	۲۸/۳۵ ^b	فشرده‌گی ۱۰٪
۶۴/۳۹ ^b	۲۰/۷۵ ^c	فشرده‌گی ۲۰٪
۱۱۲/۰۶ ^a	۲۹/۲۴ ^a	فشرده‌گی طبیعی
۵۸/۴۸ ^b	۲۵/۵۹ ^a	فشرده‌گی ۱۰٪
۴۵/۱۴ ^b	۱۳/۶۸ ^b	فشرده‌گی ۲۰٪
۷۶/۲۲ ^a	۱۰/۳۱ ^a	فشرده‌گی طبیعی
۶۲/۳۲ ^{ab}	۱۲/۳۰ ^a	فشرده‌گی ۱۰٪
۵۵/۷۸ ^b	۱۰/۹۶ ^a	فشرده‌گی ۲۰٪
۸۰/۱۴ ^a	۱۹/۱۴ ^a	فشرده‌گی طبیعی
۵۸/۴۷ ^b	۱۶/۸۴ ^a	فشرده‌گی ۱۰٪
۵۷/۹۶ ^b	۱۴/۱۴ ^a	فشرده‌گی ۲۰٪

R/S: نسبت وزن خشک ریشه به اندام‌های هوایی

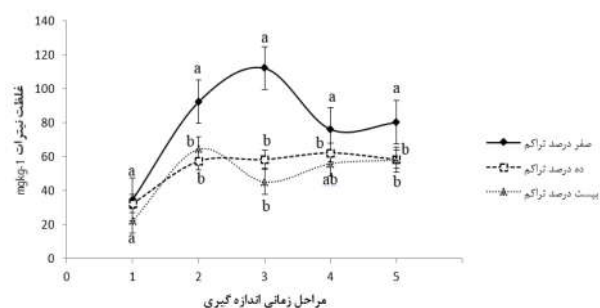


شکل ۱ و ۲- مقایسه میانگین‌های اثر نوع خاک بر غلظت آمونیوم و نیترات.

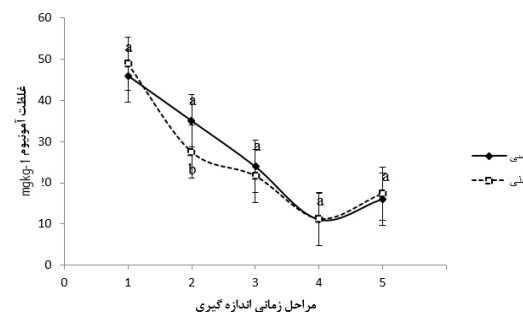
خاک دیده نشد (شکل ۳). نتایج فوق با گزارش تان و چنگ (۲۰۰۵)، مبنی بر تحت تأثیر قرار گرفتن تثبیت نیتروژن از بافت خاک مطابقت داشت، آنها گزارش کردند که بین نوع خاک، منبع نیتروژن و سطوح فشردگی در مقدار نیتروژن تولید شده تفاوت معناداری داشت. مقایسه میانگین‌های سطوح مختلف فشردگی برای مقدار نیترات نشان داد که غلظت نیترات در نمونه‌های با فشردگی طبیعی و با میانگین میلی گرم بر کیلوگرم ۷۹ بیشتر از سطوح فشرده‌تر بود (شکل ۴). به نظر می‌رسد فشردگی خاک می‌تواند تجزیه مواد آلی و معدنی شدن نیتروژن را به تعویق بیاندازد و نیترات سازی را کاهش دهد. بریلند و هانسن (۱۹۹۶) نشان دادند که تراکم خاک می‌تواند تجزیه مواد آلی و معدنی شدن نیتروژن را به تعویق بیاندازد و تلفات نیتروژن گازی را افزایش دهد. تراکم خاک مقدار منافذ بزرگتر از ۳۰ میلی‌متر را کاهش می‌دهد. در نتیجه منافذ قابل دسترس برای نماتدها از ۳۰/۴ به ۱۴/۶ درصد کاهش پیدا می‌کند، اما مقدار منافذ کوچکتر از ۳ میلی‌متر که غیر قابل دسترس برای ارگانسیم‌های سلولی است و فقط برای باکتری‌ها و قارچ‌ها قابل دسترس است، از ۱۲/۷ به ۱۵/۶ درصد افزایش پیدا می‌کند. نتایج آن‌ها نشان دهد که معدنی شدن نیتروژن در خاک متراکم علی‌رغم حفاظت فیزیکی و توده میکروبی خاک کاهش می‌یابد که علت آن حمله نماتدها به سایر میکروارگانسیم‌های خاک است. همچنین نتایج حاصل با گزارش نیولپریز و همکاران (۲۰۱۳) مطابقت داشت.

نتایج حاصل از مقایسه میانگین برای غلظت آمونیوم نشان داد که کاهش معنادار غلظت آمونیوم در نمونه‌های فشرده‌تر به‌طور دقیق مربوط به بازه دوم و سوم اندازه‌گیری (یک هفته تا چهارده روز پس از کاشت بذر) بوده است به‌گونه‌ای که غلظت آمونیوم در سطح فشردگی ۲۰ درصد در بازه دوم اندازه‌گیری با میانگین ۲۰/۷۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم و در بازه سوم اندازه‌گیری با میانگین ۱۳/۶۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم کاهش معناداری با سایر سطوح فشردگی خاک در این دو بازه داشت (جدول ۱۰). همچنین جدول ۳ نشان داد که اختلاف معناداری در غلظت نیترات بین سطوح فشردگی خاک از بازه دوم اندازه‌گیری به بعد (یک هفته پس از کاشت بذر) وجود داشت، به‌گونه‌ای که از این بازه به بعد نمونه‌های با فشردگی طبیعی (صفر درصد) بیشترین غلظت نیترات را نسبت به نمونه‌های تحت فشردگی (۱۰ و ۲۰ درصد) به‌خود اختصاص دادند، علت افزایش معنادار غلظت نیترات در نمونه فشردگی طبیعی یک هفته پس از کاشت، شروع نیترات‌سازی در خاک بود که یک تا دو هفته بعد از افزودن کود دامی به خاک هم‌زمان با شروع کشت صورت گرفت. مقایسه میانگین اثر متقابل نوع خاک با مراحل زمانی برای غلظت آمونیوم نشان داد که در بازه دوم اندازه‌گیری (هفت روز پس از کاشت) اختلاف معناداری بین غلظت آمونیوم در دو نوع خاک وجود دارد، به‌گونه‌ای که غلظت آمونیوم خاک شنی با میانگین ۲۷/۵۴ نسبت به خاک رسی کاهش معناداری داشت اما در سایر مراحل زمانی تفاوت معناداری بین غلظت آمونیوم در دو نوع

دارد و در بازه سوم اندازه گیری (۱۴ روز پس از کاشت بذر) به بیشینه مقدار می‌رسد. دی نو و هافمن (۲۰۰۰) عنوان نمودند که غلظت نیترات نمونه‌هایی با چگالی ظاهری ۱/۵ و ۱/۶ گرم بر سانتی متر مکعب به‌طور قابل توجهی پایین‌تر از نمونه‌هایی بود که فشردگی کمتری روی آن‌ها اعمال شد و نتیجه گرفتند فرایند نیترات سازی تحت تأثیر فشردگی بود. همچنین نتایج مشابهی توسط تان و چنگ (۲۰۰۷) گزارش شد.



مقایسه میانگین اثر متقابل سطوح فشردگی با مراحل زمانی برای غلظت نیترات نشان داد که این افزایش غلظت نیترات در بازه سوم اندازه‌گیری به دلیل افزایش معنادار غلظت نیترات در نمونه‌های با فشردگی طبیعی نسبت به نمونه‌های فشرده بود و برای هر سه سطح فشردگی کمترین مقدار غلظت نیترات مربوط به بازه اول اندازه‌گیری بود که به‌طور معناداری کمتر از سایر مراحل بود (شکل ۴). زیرا نیتروفیکاسیون فرایند زیستی، فیزیکی و شیمیایی است که پیوسته با زمان اثر متقابل



شکل ۳ و ۴- به ترتیب مقایسه میانگین‌های دو نوع خاک در مراحل زمانی مختلف بر غلظت آمونیوم و مقایسه میانگین‌های سطوح فشردگی در مراحل زمانی مختلف بر نیترات.

زیرا خاک رسی علی‌رغم تهویه نامطلوب از حاصلخیزی بیشتری نسبت به خاک شن‌ی برخوردار بود. خاک رسی نسبت به خاک شن‌ی قابلیت فشردگی پذیری بیشتری داشت و با افزایش فشردگی مقاومت مکانیکی آن نیز افزایش پیدا کرد و تهویه نامطلوبی نسبت به خاک شن‌ی داشت اما علت محدود کنندگی ریشه در خاک شن‌ی، سطح ذرات شن بود که در مقابل جا به جا شدن مقاومت کرد. در تیمارهای تحت فشردگی نسبت به تیمار فشردگی طبیعی نیتروژن کمتری مورد استفاده گیاه قرار گرفت. از آنجایی‌که منبع اصلی نیتروژن قابل دسترس گیاه، معدنی شدن نیتروژن آلی و کودهای معدنی نیتروژن بود، هر عاملی که سبب تغییر معدنی شدن نیتروژن خاک شود توانست بر جذب نیتروژن قابل دسترس گیاه اثر بگذارد.

نتیجه‌گیری کلی

با گذشت زمان نیتروژن آمونیومی در خاک افزایش و نیتروژن نیتراتی کاهش یافت. فشردگی خاک تأثیری غیر مستقیم بر معدنی شدن نیتروژن داشت، با افزایش چگالی ظاهری و کاهش منافذ درشت، مناطق بومی موجودات زنده‌ای که در چرخه نیتروژن نقش داشتند را محدود کرد و با کاهش فعالیت میکروبی (بر اساس آزمایش تنفس و فعالیت آنزیم اوره آز انجام شده) منجر به کاهش معدنی شدن نیتروژن شد. در نمونه‌های فشرده نیتروژن آلی کمتری به شکل آمونیومی در آمد و تشکیل نیترات به دنبال آمونیومی شدن، کاهش پیدا کرد. معدنی شدن نیتروژن تحت تأثیر بافت خاک بود، به‌گونه‌ای که غلظت آمونیوم در بازه دوم اندازه‌گیری (یک هفته پس از کاشت) و غلظت نیترات در کل مراحل زمانی در خاک رسی بیشتر از خاک شن‌ی دیده شد،

منابع مورد استفاده

- ابراهیمی س، بهرامی ح و ملکوتی م ج، ۱۳۸۴. اثر مواد آلی در اصلاح فاکتور کربن به ازت (C/N) خاک. موسسه تحقیقات خاک و آب. نشریه شماره ۴۴۸. انتشارات سنا. ۲۱ صفحه.
- شهرآیینی ا، ۱۳۸۵. اثر تراکم بر برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک و عملکرد گندم در خاک شور و غیر شور. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه گیلان.
- Alameda D and Villar R, 2012. Linking root traits to plant physiology and growth in *Fraxinus angustifolia* Vahl. seedlings under soil compaction conditions. *Environmental and Experimental Botany* 79:49-57.
- Alameda D, Villar R and Iriondo J, 2012. Spatial pattern of soil compaction: Trees' footprint on soil physical properties. *Forest Ecology and Management* 283:128-137.
- Barauh TC and Barthakur HP, 1997. *A Textbook of Soil Analysis*. India.
- Beylich A, Oberholzer HR, Schrader S, Hoper H and Wilke BM, 2010. Evaluation of soil compaction effects on soil biota and soil biological processes in soils. *Soil and Tillage Research* 109: 133-143.
- Blumfield TJ and Chen C, 2005. Mineral nitrogen dynamics following soil compaction and cultivation during hoop pine plantation establishment. *Forest Ecology and Management* 204:131-137.
- Bolts F, 1978. Colorimetric determination of nonmetals. *Soil Science & Environmental Services* 235-242.
- Breland, TA and Hansen S, 1996. Nitrogen mineralization and microbial biomass as affected by soil compaction. *Soil Biology and Biochemistry* 28: 655-663.
- Crawford RM, 1981. Biochemical and ecological similarities in marsh plants and diving animals. *Botanical Society of Scotland* 1(1): 77-82.
- Deneve S and Hofman G, 2000. Influence of soil compaction on carbon and nitrogen mineralization of soil organic matter and crop residues. *Biology and fertility of soils* 30(5): 544-549.
- Ponder Jr, Robert L and Fleming SB, 2012. Effects of organic matter removal, soil compaction and vegetation control on 10th year biomass and foliar nutrition. *Forest Ecology and Management* 278: 35-54.
- Hattori D, Kenzo T, Okamura k, Irino C, Joseph Jawa Kendawang d, Ikuo Ninomiya E and Katsutoshi S, 2013. Effects of soil compaction on the growth and mortality of planted dipterocarp seedlings in a logged-over tropical rainforest in Sarawak, Malaysia. *Forest Ecology and Management* 310:770-776.
- Houghton RA, 2007. Balancing the global carbon budget. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 30(35): 313-347.
- Heinonen, R. 1986. Alleviation of soil compaction by natural forces and cultural practices, in *Land Clearing and Development in the Tropics* 285-297
- Jensen LS, Mcqueen DJ and Shepherd TG, 2000. Effects of soil compaction on N mineralization and microbial C and N. I. Field measurements. *Soil and Tillage Research* 35:56-75.
- Karaka A, Baran A and Kaktanir K, 1997. The effect of compaction on urease enzyme activity, carbon dioxide evaluation and nitrogen mineralization. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry* 24(4):437-442.
- Klute A, 1986. *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. Madison, Wisconsin, USA
- Miransari M, Bahrami HA, Rejali F and Malakouti MJ, 2009. Effects of soil compaction and arbuscular mycorrhiza on corn (*Zea mays* L.) nutrient uptake. *Soil and Tillage Research* 103: 282-290.
- Motavalli P, Stevens WE and Hartwing G, 2003. Remediation of subsoil compaction and compaction effects on corn availability by deep tillage and application. *Soil and Tillage Research* 71: 121-131.
- Newell-Price A, Whittingham MJ, Chambers BJ and Peel S, 2013. Visual soil evaluation in relation to measured soil physical properties in a survey of grassland soil compaction in England and Wales. *Soil and Tillage Research* 127:65-73.
- Page AL, Miller RH and Keeney DR, 1982. *Methods of soil analysis. Part2. Chemical and microbiological properties*. American Society of Agronomy, Soil Science Society of America. 1159-1982
- Pengthamkeerati P, Motavalli PP, Kremer RJ and Anderson SH, 2006. Soil compaction and poultry litter effects on factors affecting nitrogen availability in a clay pan soil. *Soil and Tillage Research* 91:109-119.

- Pengthamkeerati P, Motavalli PP and Kremer RJ, 2011. Soil microbial activity and functional diversity changed by compaction, poultry litter and cropping in a clay pan soil. *Applied Soil Ecology* 48(1):71-80.
- Tan X, Chang SX and Kabzems R, 2005. Effects of soil compaction and forest floor removal on soil microbial properties and N transformations in a boreal forest long-term soil productivity study. *Forest Ecology and Management* 217:158-170.
- Tan X and Chang S, 2007. Soil compaction and forest litter amendment affect carbon and net nitrogen mineralization in a boreal forest soil. *Soil and Tillage Research* 93:77-86.