

توزیع شکل‌های نیتروژن در خاک‌های آهکی تحت کشت استان فارس و رابطه آنها با ویژگی‌های خاک

جعفر یثربی^۱، نجف علی کریمیان^۱، منوچهر مفتون^۱، علی ابطحی^۱، عبدالمجید رونقی^۱، محمد تقی آساد^۲

چکیده

به منظور اطلاع از چگونگی توزیع شکل‌های معدنی نیتروژن، تعیین هم‌بستگی بین این شکل‌ها با ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، و به دست آوردن معادله‌هایی برای پیش‌بینی شکل‌ها با بهره‌گیری از ویژگی‌های خاک در خاک‌های آهکی استان فارس، ۲۵ نمونه خاک سطحی از مناطق عمده کشاورزی استان فارس انتخاب و شکل‌های نیتروژن زیر در آنها اندازه‌گیری شد: نیتروژن کل، نیتروژن نیتراته به روش فنل دی سولفونیک اسید؛ نیتروژن نیتراته استخراجی به وسیله پتاسیم کلرید ۲ مولار، آمونیوم استخراجی به وسیله محلول‌های پتاسیم کلرید ۲ مولار، سولفوریک اسید یک نرمال؛ سدیم هیدروکسید ۰/۲۵ نرمال، نیتروژن قابل اکسایش به وسیله محلول‌های پرمنگنات اسیدی و قلیایی و نیتروژن آمونیومی استخراجی به وسیله پتاسیم کلرید ۲ مولار در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد.

بر اساس نتایج به دست آمده، بیشترین مقدار نسبی شکل‌ها (نسبت به نیتروژن کل خاک) مربوط به شکل آزاد شده با پرمنگنات قلیایی (۴/۴۷ درصد) و کمترین آن مربوط به شکل تبدلی (۰/۶ درصد) بود. شکل‌های محلول در آب و تبدلی روی هم‌رفته کمتر از ۲ درصد نیتروژن را تشکیل می‌داد. بین نیتروژن کل خاک و شکل‌های آزاد شده با پرمنگنات اسیدی و پرمنگنات قلیایی، هم‌بستگی بالایی به ترتیب با ضریب‌های هم‌بستگی ۰/۹۳۱ و ۰/۸۵۰ به دست آمد. هم‌چنین بین ماده آلی خاک و هر یک از شکل‌های نیتروژن کل خاک، آزاد شده با پرمنگنات اسیدی و آزاد شده با پرمنگنات قلیایی، معادله‌های خوبی به دست آمد که ارتباط تنگاتنگ این شکل‌ها را با ماده آلی نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: نیتروژن محلول در آب، آمونیوم تبدلی، نیتروژن آلی، ماده آلی، pH

مقدمه

ساختمان پروتئین نقش‌های عمده‌ای دارد. هم‌چنین افزایش دهنده فعالیت و توسعه ریشه بوده و در جذب سایر عناصر غذایی، و برای مصرف کربوهیدرات‌ها مورد نیاز است (۲۰). پژوهش انجام شده در مورد نیتروژن بیش از

نیتروژن از عناصر ضروری گیاه است که نقش بسیار مهمی در تغذیه گیاه دارد. این عنصر در جزء ساختمان کلروفیل، جزء ترکیب ساختمانی نوکلئیک اسیدها (DNA و RNA) و در

۱. به ترتیب دانشجوی دکتری، استادان و دانشیار خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

۲. استاد زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

سایر عناصر است. در کشاورزی مدرن، کمبود نیتروژن بیشتر از هر عنصر دیگر، عامل محدود کننده رشد می‌باشد. این عنصر به مقدار زیاد به وسیله گیاهان از خاک جذب می‌شود. بنابراین تأمین نیتروژن قابل استفاده کافی در خاک برای رشد بهینه گیاه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (۲). این موضوع با توجه به سهولت هدرروی نیتروژن از طریق آب‌شویی، فرسایش، آبدوی (Runoff)، نیترات زدایی و تصعید از اهمیت بیشتری برخوردار است (۲ و ۱۵)، بنابراین لازم است که این عنصر غذایی به تکرار به خاک اضافه شود. نیتروژن می‌تواند به صورت NH_3 از برگ‌های گیاه به اتمسفر وارد شده یا به صورت نیترات، آمونیوم و یا ترکیبات آلی محلول از طریق ترشحات ریشه خارج شود. آب خارج شده از شاخ و برگ گیاه [تعریق (Guttation)] نیز حاوی نیتروژن است (۱۱ و ۲۰). نیتروژن در خاک به شکل‌های مختلفی وجود دارد و قابلیت بهره‌گیری از این شکل‌ها برای گیاه یکسان نیست. شکل‌های نیتروژن شامل نیتروژن آلی، تبادل و محلول در آب (آمونیم و نیترات) و آمونیوم تثبیت شده به وسیله بعضی از رس‌های سیلیکاتی خاک است. مجموع این شکل‌ها نیتروژن کل خاک را تشکیل می‌دهد (۱).

اطلاع از توزیع شکل‌های نیتروژن و چگونگی تغییر و تبدیل آنها به یکدیگر در خاک می‌تواند به روشن ساختن سرنوشت کودهای نیتروژنه کمک کرده و راهنمایی برای برآورد مقدار مصرف آنها باشد. با تنظیم مقدار مصرف بهینه می‌توان از هدر رفتن انرژی، سرمایه و نیز از آلوده ساختن محیط زیست جلوگیری کرد.

روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری شکل‌های نیتروژن به کار

می‌رود. این روش‌ها را می‌توان به سه دسته عمده تقسیم کرد:

الف) روش‌های زیستی (Biological) هوازی یا بی‌هوازی که نیتروژن آلی معدنی شده را در یک مدت معین به صورت آمونیوم و نیترات یا آمونیوم نشان می‌دهد (۱۲، ۱۳، ۱۸، ۲۲ و ۲۷).

ب) اندازه‌گیری بخشی از نیتروژن معدنی شده از ماده آلی خاک به وسیله مواد شیمیایی (۲، ۹، ۱۰، ۱۲ و ۱۳).

ج) اندازه‌گیری مستقیم نیتروژن معدنی خاک (۷).

شکل‌های عمده نیتروژن معدنی خاک به صورت تبدلی (NH_4^+) ، کاملاً محلول در آب (NO_3^-) و نیتریتی (NO_2^-) است. پویایی و تحرک شکل نیتراتی (NO_3^-) زیاد بوده، بنابراین می‌تواند به راحتی شسته شده و به افق‌های پایینی خاک انتقال یابد. در حالی که شکل تبدلی، جذب کلونیدهای خاک شده و پویایی کمتری دارد. هم‌چنین به وسیله باکتری‌های نیترات‌ساز به نیترات تبدیل شده و یا این که جذب گیاه می‌شود. شکل نیتریتی معمولاً در خاک ناچیز است، مگر این که آمونیوم یا کودهای حاوی آمونیوم به خاک‌های خشتی و یا قلیایی اضافه شده باشد (۱۹). در ضمن آمونیوم می‌تواند بین لایه‌های برخی از رس‌های ۲:۱ به خصوص ورمی‌کولیت و ایلیت (میکای هیدراته) تثبیت شود که این شکل را آمونیوم غیرتبدلی می‌گویند (۱۴، ۱۹، ۲۱ و ۲۴). تفاوت بین نیتروژن کل خاک و مجموع شکل‌های محلول، تبدلی و غیرتبدلی، شکل آلی نیتروژن است که بخش عمده نیتروژن کل را تشکیل می‌دهد (۷). مقدار نسبی شکل آلی در افق‌های سطحی خاک بیشتر از افق‌های زیرین آن است، حال آن‌که شکل غیرتبدلی در افق‌های پایینی بیشتر می‌باشد (۲۱). بنا بر گزارش استیونسون (۲۹) شکل‌های نیتروژن آلی در برگیرنده آمینو اسید، قندهای آمین‌دار، آمونیومی، غیر محلول در اسید (Acid-insoluble-N) و قابل هیدرولیز ناشناخته (Hydrolyzable unknown N) هستند.

پژوهندگان بسیاری با بهره‌گیری از مواد شیمیایی، بخشی از نیتروژن آلی خاک را خارج و با نیتروژن قابل معدنی شدن زیستی به صورت هوازی یا بی‌هوازی مقایسه کرده‌اند. استانفورد و اسمیت (۲۸) در ۶۲ خاک آهکی و اسیدی با استفاده از پرمنگنات پتاسیم اسیدی شده، شکل قابل اکسایش نیتروژن آلی را خارج کرده و نشان دادند که این نیتروژن به راحتی با روش‌های زیستی، معدنی می‌شود. پژوهندگان دیگری نیز از این شکل در بررسی‌های خود استفاده کردند (۱، ۲، ۱۳ و ۱۷). هاداس و همکاران (۱۴) در افق سطحی خاک‌های

۲) برآورد هم‌بستگی بین این شکل‌ها با ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، و ۳) به‌دست آوردن معادله‌هایی برای پیش‌بینی شکل‌ها با بهره‌گیری از ویژگی‌های خاک. بدین ترتیب، ضمن بررسی وضعیت شکل‌های نیتروژن در شمار بیشتر از خاک‌های استان با شرایط متنوع‌تر، هم‌بستگی‌ها و معادله‌های رگرسیون حاصل، از سطح اعتماد بیشتری برخوردار خواهد بود.

مواد و روش‌ها

شمار ۲۵ نمونه خاک از افق سطحی (۰ تا ۲۰ سانتی‌متری) از نقاط مختلف استان فارس که از لحاظ میزان نیتروژن کل، ماده آلی و دیگر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی متفاوت بودند، انتخاب و پس از خشک کردن در هوا و عبور از الک ۲ میلی‌متری، ویژگی‌های آنها مانند مقدار رس، pH، ماده آلی، ظرفیت تبادل کاتیونی و کربنات کلسیم معادل با روش‌های معمول آزمایشگاهی اندازه‌گیری شد. نام سری، رده بندی و برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی این خاک‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است. این خاک‌ها از مناطقی که طی سال‌های گذشته تحت کشت بوده‌اند، انتخاب شدند.

آزمایش برآورد شکل‌های نیتروژن

نمونه‌های خاک آورده شده از مزرعه‌ها، به‌منظور یکنواخت شدن، به‌خوبی مخلوط و بلافاصله خشک شدند تا از تغییرات شکل‌ها جلوگیری شود. سپس حدود یک کیلوگرم نمونه از هر خاک جدا شده و برای جلوگیری از جذب احتمالی آمونیاک از هوا در ظرف‌های پلاستیکی در بسته نگه‌داری شدند. به‌منظور برآورد شکل‌های نیتروژن از روش‌های زیر استفاده شد:

روش ۱

اندازه‌گیری نیتروژن کل خاک (STN) به روش میکرو کج‌دال (۴ و ۵).

روش ۲

اندازه‌گیری نیتروژن نیتراتی خاک (NPHEN) به روش فنل دی سولفونیک اسید (۸).

آهکی، مقدار نسبی این شکل (نسبت به نیتروژن کل) را ۸/۹ درصد و در خاک‌های غیر آهکی ۷/۳ درصد به دست آوردند. یثربی و کریمیان (۱) مقدار نسبی این شکل را در ۱۴ سری خاک آهکی منطقه زیر سد درودزن استان فارس، ۱۲/۱ درصد گزارش کردند. استانفورد (۲۶) در ۶۲ خاک آهکی و اسیدی، شکل قابل اکسایش نیتروژن را به‌وسیله پرمنگنات پتاسیم قلیایی شده خارج کرده و نشان دادند که این نیتروژن با نیتروژن قابل معدنی شدن به صورت زیستی ارتباط معنی‌داری دارد. پژوهندگان دیگری نیز این شکل از نیتروژن را به‌کار گرفته‌اند (۲، ۱۳ و ۲۳).

سینگ و همکاران (۲۳) مقدار نسبی این شکل را در ۲۰ نمونه از خاک‌های قلیایی هند، ۲۲/۸ درصد گزارش کرده‌اند. جیانلو و برمنر (۱۲ و ۱۳) در ۳۰ نمونه از خاک‌های آهکی و غیر آهکی با استفاده از پتاسیم کلرید در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، شکلی از نیتروژن را به نام پتاسیم کلرید داغ خارج کردند و مقدار نسبی آن را ۰/۹۳ درصد به‌دست آوردند. پاراماسیوم و بریتن بک (۲۱) مقدار نسبی شکل‌های نیتروژن را در افق سطحی خاک‌های اسیدی می‌سی‌سی‌پی بدین صورت گزارش کردند: آلی ۸۴/۹، غیرتبادلی ۱۳/۶، تبادلی و محلول هرکدام ۰/۳ درصد.

در ایران (به‌جز یک مورد) گزارش منتشر شده‌ای از توزیع شکل‌های نیتروژن در دسترس نیست. یثربی و کریمیان (۱) توزیع شکل‌های نیتروژن را در ۱۴ سری از خاک‌های آهکی منطقه زیر سد درودزن استان فارس بررسی کرده و نشان دادند که نیتروژن معدنی شده به‌وسیله پرمنگنات اسیدی، شکل غالب نیتروژن در این خاک‌ها را تشکیل می‌دهد. پژوهش یثربی و کریمیان (۱) در محدوده کوچکی از خاک‌های استان فارس بود. در ضمن آنان در اندازه‌گیری شکل‌های نیتروژن، فقط از شش روش شیمیایی بهره‌گیری کرده‌اند. بنابراین انجام یک پژوهش گسترده در منطقه وسیع‌تری از خاک‌های استان فارس لازم به‌نظر می‌رسید. بنابراین پژوهش حاضر با هدف‌های زیر به اجرا در آمد: ۱) ارزیابی توزیع شکل‌های نیتروژن با ۹ روش شیمیایی در شماری از خاک‌های مهم کشاورزی استان فارس،

جدول ۱. نام سری، رده بندی، و بعضی از ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک های مورد بررسی

شماره خاک	نام سری	رده بندی *	رس (g kg ⁻¹)	pH در تعلیق ۱ به ۲ خاک به آب	ماده آلی (g kg ⁻¹)	ظرفیت تبادل کاتیونی (cmol(+) kg ⁻¹)	کربنات کلسیم معادل (g kg ⁻¹)
۱	چهارطاقی	CHF	۱۷۹	۸/۲۸	۸/۴	۱۱/۶۸	۳۳۶
۲	چیت گر	TCP	۱۷۳	۸/۳۴	۷/۸	۱۲/۲۲	۶۳۹
۳	رباط	THF	۱۵۹	۸/۰۴	۱۳/۶	۱۴/۱۳	۴۸۸
۴	دالین ۱	CHF	۳۳۹	۸/۱۳	۱۵/۷	۲۲/۸۳	۲۵۳
۵	نظرآباد	ArCP	۳۹۲	۸/۱۱	۱۶/۳	۱۷/۹۳	۲۹۲
۶	سلمان	AeHP	۲۳۹	۸/۱۱	۱۳/۶	۱۴/۱۳	۵۵۹
۷	دالین ۲	CHF	۲۳۹	۸/۰۹	۱۰/۹	۲۵/۰۰	۲۹۷
۸	امین آباد	THP	۲۱۹	۸/۰۳	۱۷/۱	۱۰/۳۵	۵۰۸
۹	فتح آباد	THP	۴۳۲	۸/۰۳	۱۷/۴	۱۴/۱۳	۳۳۴
۱۰	کوشکک ۱	TCP	۵۰۶	۸/۰۸	۱۵/۳	۲۰/۶۵	۴۹۶
۱۱	کوشکک ۲	TCP	۳۵۲	۷/۹۲	۲۲/۱	۱۴/۱۳	۴۷۱
۱۲	دانشکده ۱	TCP	۵۰۶	۸/۱۱	۱۷/۸	۲۳/۱۰	۲۷۸
۱۳	ارژن	FHP	۲۱۳	۸/۱۸	۲۳/۱	۱۷/۹۳	۶۴۰
۱۴	دانشکده ۲	TCP	۳۰۶	۸/۲۲	۲۳/۸	۲۰/۶۵	۵۵۳
۱۵	ده پاگاه ۱	CHF	۳۵۲	۸/۱۸	۲۵/۱	۱۱/۱۴	۴۴۲
۱۶	مرودشت	THP	۴۱۲	۸/۰۲	۲۴/۸	۱۹/۸۴	۳۵۴
۱۷	کفترک ۱	THP	۳۴۶	۷/۹۰	۲۱/۰	۱۵/۴۹	۵۲۹
۱۸	تخت جمشید	CHF	۴۳۲	۸/۰۶	۱۸/۸	۱۵/۴۹	۳۳۹
۱۹	دانشکده ۳	TCP	۵۸۶	۸/۲۲	۱۷/۴	۲۵/۰۰	۴۵۸
۲۰	دانشکده ۴	TCP	۴۸۶	۸/۱۲	۲۱/۰	۲۳/۴۰	۲۹۱
۲۱	ده پاگاه ۲	CHF	۳۸۶	۸/۱۵	۲۲/۱	۲۳/۱۰	۶۲۹
۲۲	کفترک ۲	THP	۴۰۶	۸/۰۵	۳۰/۰	۲۵/۸۲	۶۴۸
۲۳	کفترک ۳	AqHP	۵۸۶	۸/۲۹	۳۱/۴	۱۹/۵۷	۶۴۸
۲۴	سپیدان	TCP	۴۶۶	۸/۰۶	۳۲/۴	۳۶/۱۴	۳۵۷
۲۵	دانشکده ۵	TCP	۴۸۵	۸/۱۸	۳۵/۰	۳۰/۷۱	۲۶۸
دامنه تغییرات							
۱۵۹-۵۸۶							
۷/۹-۸/۳۴							
۷/۸-۳۵/۰							
۱۰/۳۵-۳۶/۱۴							
۲۵۳-۶۴۸							
میانگین							
۳۶۸							
۸/۱۲							
۲۰/۰۸							
۱۹/۳۸							
۴۴۴							

*AeHP= Aerice Haploquepts; AqHP= Aquic Haploxerepts; ArCP= Aridic Calcixerepts; CHF= Calcic Haploxerepts; FHP= Fluventic Haploxerepts; TCP= Typic Calcixerepts; THF= Typic Haploxerepts; THP= Typic Haploxerepts.

روش های ۳ و ۴

یک ساعت تکان داده شده و سپس از کاغذ صافی گذرانده شد. در بخشی از عصاره، نیتروژن آمونیومی استخراجی به وسیله روش تقطیر بخاری با MgO اندازه گیری گردید. به منظور برآورد نیتروژن نیتراتی، به بخش دیگری از عصاره

اندازه گیری نیتروژن آمونیومی (NNH₄) و نیتراتی اولیه خاک (NKCL) (۶ و ۱۹).
۵ گرم خاک با ۵۰ میلی لیتر پتاسیم کلرید ۲ مولار به مدت

بالا، MgO و آلیاژ دواردا (Devarda's alloy) افزوده شده و به وسیله تقطیر بخاری، نیتروژن آمونیومی اندازه‌گیری شد. اختلاف دو اندازه‌گیری بالا، نیتروژن نیتراتی است.

هیدرولیز در قلیا گویند (NAOHNB). تفاوت دو مقدار اندازه‌گیری شده بالا نیتروژن آمونیومی رها شده بر اثر اکسایش ماده آلی است (BOX-NB).

روش‌های ۵ و ۶

اندازه‌گیری نیتروژن آمونیومی استخراجی بر اثر اکسایش ماده آلی به وسیله محلول اسیدی پرمنگنات (۱۳، ۱۷ و ۲۸). در این روش، یک گرم خاک در لوله سانتریفوژ ریخته و بعد از اضافه کردن ۲۵ میلی‌لیتر سولفوریک اسید یک نرمال به مدت یک ساعت تکان داده و سانتریفوژ شده و محلول زلال رویی نگه‌داری گردید. نیتروژن آمونیومی رها شده با سدیم هیدروکسید ۱۰ مولار تقطیر بخاری شده و اندازه‌گیری شد. این نیتروژن، نیتروژن آمونیومی قابل هیدرولیز در اسید نامیده می‌شود (NHSULN). به باقی‌مانده خاک درون لوله سانتریفوژ ۲۵ میلی‌لیتر محلول پتاسیم پرمنگنات ۰/۰۵ نرمال که در سولفوریک اسید یک نرمال تهیه شده افزوده شد و بعد از یک ساعت تکان دادن، سانتریفوژ گردید. نیتروژن آمونیومی استخراجی بر اثر اکسایش ماده آلی با سدیم هیدروکسید ۱۰ مولار، تقطیر بخاری شده و اندازه‌گیری شد (NHOX-NH).

روش‌های ۷ و ۸

اندازه‌گیری نیتروژن آمونیومی استخراجی بر اثر اکسایش ماده آلی به وسیله محلول قلیایی پرمنگنات (پرمنگنات قلیایی شده) (۱۳ و ۲۶).

در این روش یک گرم خاک در فلاسک تقطیر ریخته و با ۱۰ میلی‌لیتر سدیم هیدروکسید ۰/۲۵ نرمال که حاوی ۰/۱ گرم پتاسیم پرمنگنات است، تیمار شد. نیتروژن آمونیومی به دست آمده بر اثر اکسایش ماده آلی به وسیله چهار دقیقه تقطیر بخاری با MgO برآورد شد.

یک نمونه یک گرمی دیگر هم با ۱۰ میلی‌لیتر سدیم هیدروکسید ۰/۲۵ نرمال، بدون اضافه کردن پتاسیم پرمنگنات، به مدت چهار دقیقه با MgO تقطیر بخاری و نیتروژن آمونیومی به دست آمده اندازه‌گیری شد. این نیتروژن را نیتروژن قابل

روش ۹

اندازه‌گیری نیتروژن آمونیومی معدنی شده از نیتروژن آلی خاک به وسیله پتاسیم کلرید ۲ مولار (HOTKCLN) به مدت چهار ساعت در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد (۱۲ و ۱۳).

در این روش، ۳ گرم خاک با ۲۰ میلی‌لیتر پتاسیم کلرید ۲ مولار در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت چهار ساعت در دستگاه Tecator AB Block Digestion حرارت داده شد. نیتروژن آمونیومی به وسیله تقطیر بخاری با MgO اندازه‌گیری شد.

یک نمونه ۳ گرمی دیگر با ۲۰ میلی‌لیتر پتاسیم کلرید ۲ مولار بدون حرارت دادن با MgO تقطیر بخاری شده و نیتروژن آمونیومی اولیه خاک اندازه‌گیری گردید. تفاوت دو اندازه‌گیری نیتروژن آمونیومی رها شده بر اثر حرارت دادن نمونه با پتاسیم کلرید است.

در برآورد شکل‌های نیتروژن از سه تکرار استفاده و میانگین آنها در محاسبات به کار برده شد. شاخص‌ها با استفاده از برنامه آماری Minitab و SPSS و از طریق رگرسیون‌های ساده خطی و چند متغیره با یکدیگر و با ویژگی‌های خاک ربط داده شدند.

خلاصه روش‌های اندازه‌گیری شکل‌های نیتروژن مورد بررسی، در جدول ۲ ارائه شده است.

نتایج و بحث

نام سری، رده‌بندی و نتایج برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد بررسی همراه با میانگین و دامنه تغییرات آنان در جدول ۱ نشان داده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها از دامنه تغییرات نسبتاً وسیعی برخوردار است.

جدول ۲. روش‌های اندازه‌گیری شکل‌های نیتروژن و علامت اختصاری آنها

شماره روش	شرح مختصر روش	علامت اختصاری	منابع
۱	نیتروژن کل خاک	STN	برمنر (۵)
۲	نیتروژن نیتراته خاک، روش فنل‌دی‌سولفونیک اسید	NPHEN	چاپمن و پرات (۸)
۳	نیتروژن نیتراته خاک، استخراجی به‌وسیله پتاسیم کلرید ۲ مولار	NKCL	برمنر و کی‌نی (۶)
۴	نیتروژن آمونیومی، استخراجی به‌وسیله پتاسیم کلرید ۲ مولار	NNH4	برمنر و کی‌نی (۶)
۵	نیتروژن آمونیومی خاک، استخراجی به‌وسیله اسید سولفوریک یک نرمال	NHSULN	استانفورد و اسمیت (۲۸)
۶	نیتروژن آمونیومی استخراجی بر اثر اکسایش ماده آلی به‌وسیله محلول اسیدی پرمنگنات	NHOX-NH	استانفورد و اسمیت (۲۸)
۷	نیتروژن آمونیومی استخراجی به‌وسیله سدیم هیدروکسید ۰/۲۵ نرمال	NAOHNB	استانفورد (۲۶)
۸	نیتروژن استخراجی بر اثر اکسایش ماده آلی به‌وسیله محلول قلیایی پرمنگنات پتاسیم	BOX-NB	استانفورد (۲۶)
۹	نیتروژن آمونیومی استخراجی به‌وسیله پتاسیم کلرید ۲ مولار در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به‌مدت چهار ساعت	HOTKCLN	جیانلو و برمنر (۱۲ و ۱۳)

گزارش کردند. بالا بودن میانگین STN در گزارش‌های پژوهشگران نام‌برده، به سبب ماده آلی زیاد در این خاک‌ها، به‌علت میانگین دمای سالیانه کمتر و بارش بیشتر می‌باشد (۳). استان فارس در منطقه خشک و نیمه خشک با دمای نسبتاً بالا واقع شده است. بنابراین برای تجمع ماده آلی شرایط مطلوبی ندارد.

شکل‌های NPHEN و NKCL، نشان‌دهنده شکل کاملاً محلول در آب (نیترات) است و در خاک‌های مورد بررسی به‌ترتیب از ۱/۲۵ تا ۴۲/۰ (با میانگین ۱۱/۶۷) و ۱/۸۵ تا ۴۰/۲۵ (با میانگین ۱۵/۴) میلی‌گرم در کیلوگرم خاک تغییر می‌کند (جدول ۴). با توجه به میانگین به‌دست آمده در مورد هر دو روش دیده می‌شود که در مقایسه با خاک‌های مناطق مرطوب، مقدار آن بالاتر است. پاراماسیوم و بریتن‌بک (۲۱) در خاک‌های مناطق مرطوب و اسیدی میانگین شکل NKCL را ۳/۲ میلی‌گرم در کیلوگرم گزارش کرده‌اند، در حالی که یربی و کریمیان (۱) در خاک‌های آهکی منطقه درودزن استان فارس، میانگین شکل‌های NPHEN و NKCL را به‌ترتیب ۷/۶ و ۱۶/۳ میلی‌گرم در کیلوگرم به‌دست آوردند.

شرح مختصری از روش‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. جدول ۳، مقدار نیتروژن اندازه‌گیری شده به روش‌های نه‌گانه در خاک‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد. چنان‌که دیده می‌شود مقدار شکل‌های مختلف نیتروژن در خاک‌ها از دامنه تغییرات وسیعی برخوردار است که نشان‌دهنده توزیع متفاوت نیتروژن استخراج شده در خاک‌هاست (جدول‌های ۳ و ۴). علت اصلی این روند، انتخاب نمونه‌های خاک از مناطقی با میزان ماده آلی با دامنه وسیع است (جدول ۱).

دامنه تغییرات نیتروژن کل خاک (STN) بین ۴۴۵ تا ۲۰۲۹ با میانگین ۱۱۲۱ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک بود (جدول ۴). مقدار این شکل را یربی و کریمیان (۱) در ۱۴ نمونه از خاک‌های آهکی منطقه زیر سد درودزن استان فارس، ۶۲۰ تا ۱۶۴۰، با میانگین ۹۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم گزارش کرده‌اند. پاراماسیوم و بریتن‌بک (۲۱) در خاک‌های اسیدی می‌سی‌سی‌پی ایالات متحده آمریکا، نیتروژن کل را ۷۲۰ تا ۲۵۲۰، با میانگین ۱۹۳۰ میلی‌گرم در کیلوگرم اعلام کردند. جیانلو و برمنر (۱۳) در خاک‌های اسیدی و آهکی ایوا ایالات متحده آمریکا، میانگین STN را ۲۱۵۳ میلی‌گرم در کیلوگرم

جدول ۳. مقدار نیتروژن خاک‌های تحت بررسی (mg kg^{-1})، اندازه‌گیری شده با روش‌های مختلف

شماره خاک	شماره روش ^۱								
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
۱	۵۸۸	۳/۵	۸/۷۵	۶/۳۰	۱۵/۳۱	۲۵/۷۵	۹/۱۰	۲۳/۸۰	۱۹/۳۰
۲	۴۴۵	۳/۴۵	۷/۰۰	۲/۱۰	۵/۲۵	۱۹/۲۵	۳/۵۰	۱۵/۴۰	۱۴/۰۰
۳	۷۴۶	۶/۰۰	۱۲/۲۵	۶/۳۰	۱۹/۲۵	۳۱/۵۰	۴/۹۰	۳۳/۶۰	۲۱/۹۳
۴	۸۷۲	۲/۷۵	۳/۵۰	۵/۲۵	۱۴/۰۰	۳۱/۵۰	۷/۷۰	۴۲/۰۰	۲۴/۷۳
۵	۸۵۶	۲/۲۵	۷/۰۰	۹/۱۰	۱۴/۵۰	۲۶/۲۵	۱۰/۵۰	۴۳/۴۰	۲۴/۷۳
۶	۷۴۹	۱/۲۵	۳/۵۰	۷/۰۰	۲۴/۵۰	۲۶/۲۵	۹/۱۰	۳۲/۲۰	۱۷/۲۷
۷	۶۹۶	۶/۵۰	۱۰/۵۰	۱/۷۵	۸/۷۵	۲۱/۰۰	۳/۵۰	۳۳/۶۰	۱۹/۶۰
۸	۸۹۵	۱۱/۷۵	۱۷/۵۰	۱۸/۲۰	۴۰/۴۷	۵۰/۳۱	۲۷/۳۰	۴۲/۰۰	۱۴/۴۷
۹	۹۰۳	۲۴/۰۰	۲۹/۷۵	۳/۵۰	۱۵/۳۱	۳۳/۲۵	۱۰/۵۰	۳۷/۸۰	۱۴/۹۳
۱۰	۸۰۴	۵/۱۳	۷/۰۰	۱/۷۵	۱۲/۲۵	۳۱/۵۰	۴/۹۰	۳۹/۲۰	۲۲/۴۰
۱۱	۱۱۹۱	۲۱/۵۰	۲۶/۲۵	۸/۷۵	۲۲/۷۵	۴۵/۵۰	۱۶/۱۰	۴۷/۶۰	۱۹/۶۰
۱۲	۱۰۳۳	۹/۰۰	۸/۷۵	۱/۷۵	۲۲/۰۰	۳۱/۵۰	۶/۳۰	۵۴/۶۰	۲۱/۴۷
۱۳	۱۱۶۷	۵/۹۵	۷/۰۰	۸/۷۵	۱۷/۵۰	۴۵/۵۰	۱۸/۹۰	۶۰/۲۰	۱۵/۴۰
۱۴	۱۳۰۹	۴/۰۰	۳/۵۰	۳/۵۰	۱۲/۲۵	۵۴/۶۹	۱۳/۳۰	۷۰/۰۰	۲۳/۸۰
۱۵	۱۴۵۰	۵/۰۰	۸/۷۵	۳/۵۰	۲۳/۰۰	۴۶/۵۴	۱۸/۹۰	۸۱/۲۰	۲۶/۱۳
۱۶	۱۲۶۴	۳۱/۰۰	۴۰/۲۵	۱۴/۷۰	۳۵/۰۰	۴۸/۳۵	۳۱/۵۰	۵۰/۴۰	۱۷/۲۷
۱۷	۱۱۴۵	۱۷/۳۸	۳۱/۵۰	۵/۲۵	۲۹/۷۵	۵۶/۰۰	۲۱/۷۰	۵۱/۸۰	۲۲/۸۷
۱۸	۹۴۰	۸/۰۰	۸/۷۵	۵/۲۵	۱۹/۲۵	۴۰/۲۵	۱۳/۳۰	۵۳/۲۰	۲۱/۰۰
۱۹	۹۷۳	۸/۷۵	۷/۰۰	۸/۷۵	۱۵/۷۵	۳۱/۵۰	۱۰/۵۰	۳۶/۴۰	۲۶/۱۳
۲۰	۱۲۹۶	۴۲/۰۰	۴۰/۲۵	۷/۰۰	۲۶/۲۵	۴۲/۰۰	۳۲/۹۰	۵۸/۸۰	۱۶/۳۳
۲۱	۱۳۴۰	۱/۳۸	۱/۸۵	۲/۸۰	۲۲/۷۵	۵۰/۳۱	۹/۱۰	۷۱/۴۰	۱۷/۲۷
۲۲	۱۶۳۳	۲۹/۵۰	۳۶/۷۵	۲۵/۲۰	۵۶/۳۸	۶۳/۰۰	۳۹/۹۰	۴۶/۲۰	۱۳/۰۷
۲۳	۱۸۲۷	۶/۷۵	۸/۷۵	۲/۸۰	۲۶/۷۵	۷۵/۲۵	۱۰/۵۰	۶۸/۶۰	۱۶/۳۳
۲۴	۲۰۲۹	۲۲/۰۰	۲۸/۰۰	۳/۵۰	۴۷/۲۵	۶۳/۴۴	۱۰/۵۰	۹۸/۰۰	۱۸/۶۷
۲۵	۱۸۷۴	۱۳/۰۰	۲۱/۰۰	۵/۲۵	۲۲/۷۵	۷۲/۱۹	۱۳/۳۰	۶۱/۶۰	۲۱/۴۷

۱. برای شرح روش‌ها به جدول ۲ مراجعه شود.

شکل تبدالی را در ۱۲ خاک غیرآهکی ترکیه ۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم به‌دست آورد.

دامنه تغییرات شکل NHSULN، در خاک‌های مورد بررسی ۵/۲۵ تا ۵۶/۳۸ با میانگین ۲۲/۷۶ میلی‌گرم در کیلوگرم است. یشربی و کریمیان (۱) در خاک آهکی میانگین این شکل را ۱۲۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک گزارش کردند.

دامنه تغییرات شکل NHOX-NH، ۱۹/۲۵ تا ۷۵/۲۵ با

شکل NNH4 یعنی نیتروژن آمونیومی بومی خاک (تبدالی) در خاک‌های مورد بررسی دارای دامنه ۱/۷۵ تا ۲۵/۲ و میانگین ۶/۷۲ میلی‌گرم در کیلوگرم می‌باشد (جدول ۴) که در مقایسه با شکل محلول در آب کمتر است. استالین و همکاران (۲۵) در شالیزارهای هند، میانگین این شکل را ۲۰/۵ و سینگ و همکاران (۲۳) در خاک‌های قلیایی هند، میانگین آن را ۴۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک گزارش کرده‌اند. آنتپ (۲) میانگین

جدول ۴. دامنه و میانگین شکل‌های نیتروژن در خاک‌های مورد بررسی

شماره روش	علامت اختصاری روش	دامنه	میانگین ^۱	مقدار نسبی ^۲
			mg kg ⁻¹	%
۱	STN	۴۴۵-۲۰۲۹	۱۱۲۱	---
۲	NPHEN	۱/۲۵-۴۲/۰۰	۱۱/۶۷	۱/۰۴
۳	NKCL	۱/۸۵-۴۰/۲۵	۱۵/۴۰	۱/۳۷
۴	NNH4	۱/۷۵-۲۵/۲۰	۶/۷۲	۰/۶۰
۵	NHSULN	۵/۲۵-۵۶/۳۸	۲۲/۷۶	۲/۰۳
۶	NHOX-NH	۱۹/۲۵-۷۵/۲۵	۴۲/۵۰	۳/۷۹
۷	NAOHNB	۳/۵۰-۳۹/۹۰	۱۴/۳۱	۱/۲۸
۸	BOX-NB	۱۵/۴۰-۹۸/۰۰	۵۰/۱۲	۴/۴۷
۹	HOTKCLN	۱۳/۰۷-۲۶/۱۳	۱۹/۶۰	۱/۷۵

۱. هر عدد میانگین ۲۵ خاک است

۲. مقدار نسبی بر اساس نیتروژن کل (STN) محاسبه شده است.

جدول ۵. ضریب هم‌بستگی^۲ (r) بین شکل‌های نیتروژن

شکل‌ها	شکل‌ها							
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
۲	۰/۳۹۹							
۳	۰/۳۹۰	۰/۹۵۸						
۴	۰/۱۲۷	۰/۴۳۷	۰/۴۷۴					
۵	۰/۶۲۳	۰/۵۷۷	۰/۶۲۷	۰/۶۷۷				
۶	۰/۹۱۳	۰/۳۴۵	۰/۳۸۷	۰/۲۴۴	۰/۶۴۲			
۷	۰/۳۹۹	۰/۷۳۲	۰/۷۲۵	۰/۷۸۵	۰/۷۱۲	۰/۴۷۹		
۸	۰/۸۵۰	۰/۱۸۸	۰/۱۴۵	-۰/۱۴۲	۰/۴۲۶	۰/۷۲۰	۰/۲۲۲	
۹	-۰/۰۶۲	-۰/۳۹۳	-۰/۴۳۰	-۰/۴۳۰	-۰/۳۸۶	-۰/۱۶۳	-۰/۳۶۲	۰/۱۳۸

۱. شرح شماره‌ها در جدول ۲ آمده است.

۲. ۲ بین ۰/۳۹۶ و ۰/۵۰۵ در سطح ۵ درصد، بین ۰/۵۰۵ و ۰/۶۲۶ در سطح ۱ درصد و بالاتر از ۰/۶۲۶ در سطح ۰/۱ درصد معنی دار می‌باشد.

میانگین ۵۰/۱۲ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک است. سنگ و همکاران (۲۳) در خاک‌های هاریانای هند، میانگین این شکل را ۱۰۱، استالین و همکاران (۲۵) در شمالی‌زارهای هند ۸۲/۵، آنتپ (۲) در خاک‌های غیرآهکی ترکیه ۱۱۰/۴۰ و جیانلو و برمنر (۱۳) در خاک‌های اسیدی و آهکی ایوا ایالات متحده ۱۱۳ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک گزارش کردند.

شکل HOTKCLN دارای دامنه تغییرات ۱۳/۷۰ تا ۲۶/۱۳ با میانگین ۱۹/۶۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک است که نسبت به

میانگین ۴۲/۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک است. میانگین این شکل را یشری و کریمیان (۱) ۱۰۵، آنتپ (۲) در خاک‌های غیرآهکی آنرا ۳۰/۴۰ و جیانلو و برمنر (۱۳) در خاک‌های اسیدی و آهکی ۹۶ میلی‌گرم در کیلوگرم گزارش کرده‌اند.

دامنه تغییرات شکل NAOHNB در خاک‌های مورد بررسی از ۳/۵ تا ۳۹/۹ با میانگین ۱۴/۳۱ میلی‌گرم در کیلوگرم به دست آمد (جدول ۴).

شکل BOX-NB دارای دامنه تغییرات ۱۵/۴ تا ۹۸/۰ با

را کمتر از ۲ درصد نیتروژن کل گزارش کردند. مجموع شکل‌های هیدرولیز قلیایی (NAOHNB) و پرمنگنات قلیایی (BOX-NB) ۵/۷۵ درصد و مجموع شکل‌های هیدرولیز اسیدی (NHSULN) و پرمنگنات اسیدی (NHOX-NH) نیز ۵/۸۲ درصد از نیتروژن کل را شامل می‌شوند (جدول ۴). این مقادیر بخشی از نیتروژن آلی است که در زمان معین معدنی شده است. پژوهندگان دیگر نیز بیشترین مقدار شکل‌های استخراجی را مربوط به روش پرمنگنات قلیایی شده (BOX-NB) گزارش کرده‌اند. مقدار نسبی این شکل به‌وسیله جیانلو و برمنر (۱۳) در خاک‌های اسیدی و قلیایی ۵/۲۵، آنتپ (۲) در خاک‌های غیر آهکی ۹/۲۱، استالین و همکاران (۲۵) در خاک‌های آهکی ۱۰/۹ و سینگ و همکاران (۲۳) ۲۲/۸ درصد نیتروژن کل گزارش شده است. یتربی و کریمیان (۱) در خاک‌های آهکی مورد آزمایش خود مجموع شکل‌های محلول در آب و تبادلی را کمتر از ۵ درصد و شکل پرمنگنات اسیدی شده (NHOX-NH) را ۱۱/۳ درصد نیتروژن کل به‌دست آوردند.

با توجه به مطالب گفته شده می‌توان نتیجه گرفت که بیشترین مقدار نسبی نیتروژن در درجه اول مربوط به شکل‌های قابل اکسایشی به‌وسیله پرمنگنات قلیایی یا اسیدی شده و کمترین مقدار نسبی، مربوط به شکل‌های محلول در آب و تبادلی است. شکل‌های محلول در آب و تبادلی نیتروژن یعنی NKCL و NNH₄ معیاری از فاکتور شدت (Intensity) نیتروژن در خاک است، در حالی که شکل‌های هیدرولیز اسیدی و پرمنگنات اسیدی (NHSULN و NHOX-NH) و یا هیدرولیز قلیایی و پرمنگنات قلیایی (NAOHNB و BOX-NB) را می‌توان معیاری از فاکتور ظرفیت (Capacity) نیتروژن در خاک به‌حساب آورد (۱).

ضریب‌های هم‌بستگی (r) بین شکل‌های نیتروژن در جدول ۵ نشان داده شده است. شکل STN، بیشترین ضریب هم‌بستگی را با روش‌های NHOX-NH و BOX-NB به ترتیب با ضریب‌های هم‌بستگی ۰/۹۱۳ و ۰/۸۵۰ دارد. بالا بودن

سایر روش‌ها از دامنه تغییرات کمتری برخوردار است. مقدار این شکل به‌وسیله جیانلو و برمنر (۱۳) در خاک‌های اسیدی و آهکی آیوا ایالات متحده آمریکا، ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم گزارش شده است.

با توجه به جدول ۴، دیده می‌شود که بیشترین مقدار نیتروژن استخراجی در درجه اول مربوط به شکل BOX-NB و در درجه دوم مربوط به NHOX-NH، به‌ترتیب با میانگین ۵۰/۱۲ و ۴۲/۵۰ بوده و کمترین آن NNH₄، با میانگین ۶/۷۲ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک است. به‌طور کلی ترتیب فراوانی شکل‌های نیتروژن به صورت زیر است:

BOX-NB > NHOX-NH > NHSULN > HOTKCLN > NKCL > NAOHNB > NPHEN > NNH₄

یتربی و کریمیان (۱) ترتیب شکل‌های نیتروژن را در بخشی از خاک‌های استان فارس به‌صورت زیر گزارش کردند:

NHOX-NH > NHSULN > NNH₄ > NKCL > NPHEN

علت این‌که روش‌های پرمنگنات قلیایی (BOX-NB) و پرمنگنات اسیدی (NHOX-NH) بیشترین مقدار نیتروژن را خارج کرده‌اند، به‌دلیل ارتباط این شکل‌های اکسایشی با نیتروژن قابل معدنی شدن به‌صورت هوازی در طول مدت معین است (۲۶ و ۲۸). این روش‌ها توانسته‌اند بخشی از نیتروژن آلی که در یک مدت زمان معین قابل معدنی شدن هستند را خارج کنند. از طرف دیگر با توجه به جدول ۴ که مقدار نسبی شکل‌های نیتروژن نسبت به نیتروژن کل خاک را نشان می‌دهد، می‌توان دید که بیشترین مقدار نیتروژن استخراجی مربوط به شکل BOX-NB با ۴/۴۷ و کمترین آن مربوط به شکل NNH₄ با ۰/۶۰ درصد نیتروژن کل است. شکل‌های محلول در آب و تبادلی (NKCL+NNH₄) روی هم‌رفته کمتر از ۲ درصد نیتروژن کل را شامل می‌شوند (جدول ۴). به گفته باندی و می‌زینگر (۷) نیتروژن معدنی خاک تنها ۱ تا ۳ درصد نیتروژن کل را شامل می‌شود.

پارماسیوم و بریتن‌بک (۲۱) در خاک‌های مرطوب و اسیدی می‌سی‌سی‌پی ایالات متحده آمریکا، شکل‌های محلول در آب و تبادلی را به ترتیب ۰/۲ و ۰/۳ و آنتپ (۲) مجموع این دو شکل

معادله‌های هم بستگی بین شکل‌های نیتروژن و ویژگی‌های خاک

به منظور بررسی ارتباط بین شکل‌های نیتروژن و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک از معادله‌های رگرسیون خطی ساده و چند متغیره بهره‌گیری شد. انتخاب معادله برتر در معادله‌های ساده، بر اساس بالا بودن ضریب تبیین (R^2) و در معادله‌های چند متغیره، علاوه بر ضریب تبیین، معنی‌دار بودن متغیر غیر وابسته موجود در معادله بوده است.

بین STN و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک رابطه معنی‌دار زیر به دست آمد:

$$STN = -1.50 + 55.9 (OM) \quad [1]$$

$$R^2 = 0.957 \quad (P < 0.001)$$

در معادله بالا، OM ماده آلی خاک بر حسب گرم در کیلوگرم خاک و STN نیز در جدول ۲ تعریف شده است. وارد کردن سایر ویژگی‌های خاک به طریقه رگرسیون گام به گام (Stepwise regression)، با این که سبب افزایش ناچیزی در ضریب تبیین شد، ولی حضور این ویژگی‌ها در معادله معنی‌دار نبود. علت بیشتر بودن ارتباط بین STN و OM این است که معمولاً ۵ تا ۵/۵ درصد ماده آلی خاک را نیتروژن آلی خاک تشکیل می‌دهد (۱۶).

شکل NPHEN با pH یا OM به تنهایی ارتباط معنی‌داری نشان نداد ولی استفاده هم‌زمان از هر دو در معادله، سبب افزایش ضریب تبیین شده و معادله زیر به دست آمد:

$$NPHEN = 356 - 43.8(pH) + 0.544(OM) \quad [2]$$

$$R^2 = 0.347 \quad (P < 0.001)$$

در معادله بالا pH، پ هاش در تعلق ۲ به ۱ آب به خاک بوده و بقیه اجزای معادله در جدول‌های ۱ و ۲ تعریف شده‌اند.

معادله [۲] نشان می‌دهد که با افزایش مقدار ماده آلی، مقدار نیتروژن نیتراته افزایش می‌یابد که امری بدیهی بوده و دور از انتظار نیست. منفی بودن ضریب pH را می‌توان چنین توجیه کرد که چون با افزایش pH بار متغیر رس‌های ۲:۱ و ماده آلی کمی زیادتر می‌شود، احتمالاً آمونیوم بیشتری جذب نقاط تبدیلی می‌شود. بنابراین مقدار کمتری در دسترس موجودات قرار می‌گیرد

ضریب‌های هم‌بستگی این دو شکل با STN را می‌توان این‌گونه توجیه کرد که شکل‌های قابل اکسایش نیتروژن آلی، بازتابی از نیتروژن کل خاک هستند. مقدار نسبی این دو شکل نسبت به سایر شکل‌ها بیشتر است به طوری که شکل پرمنگنات قلیایی (BOX-NB) ۴/۴۷ و شکل پرمنگنات اسیدی (NHOX-NH) ۳/۷۹ درصد STN را شامل می‌شوند (جدول ۴). این مقادیر با مشاهدات استانفورد و اسمیت (۲۸)، که گزارش کردند حدود یک‌سوم نیتروژن قابل معدنی شدن (که خود حدود ۱۰ تا ۲۰ درصد نیتروژن کل در خاک‌های تحت بررسی آنها بوده) به وسیله روش پرمنگنات اسیدی شده (NHOX-NH) با نرمالیه ۰/۰۵ خارج شده است، هم‌آهنگی دارد.

بین NPHEN و NKCL نیز هم‌بستگی بسیار معنی‌دار ($P < ۰/۰۰۱$) با $r = ۰/۹۵۸$ برقرار است که این دور از انتظار نیست، زیرا هر دو، از شکل‌های کاملاً محلول در آب هستند که یکی با آب و دیگری با پتاسیم کلرید عصاره‌گیری می‌شود. علت هم‌بستگی بین NPHEN و NNH4 این است که NNH4، نیتروژن آمونیومی بومی خاک بوده و NAOHNB نیز شامل نیتروژن آمونیومی بومی خاک به علاوه نیتروژن قابل هیدرولیز در قلیا می‌شود (جدول ۴).

بین شکل پرمنگنات قلیایی شده (BOX-NB) و پرمنگنات اسیدی شده (NHOX-NH) هم‌بستگی بسیار معنی‌دار ($P < ۰/۰۰۱$) با $r = ۰/۷۲۱$ برقرار است که علت آن این است که هر دو شکل قابل اکسایش نیتروژن آلی هستند (۲۶ و ۲۸).

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در خاک‌های مورد بررسی بالاترین ضریب هم‌بستگی بین STN و شکل‌های نیتروژن در درجه اول مربوط به شکل پرمنگنات اسیدی (NHOX-NH) با $r = ۰/۹۱۳$ و در درجه دوم مربوط به شکل پرمنگنات قلیایی (BOX-NB) با $r = ۰/۸۵۰$ است. شکل‌های محلول و تبدیلی نیتروژن خاک (NKCL، NNH4 و NPHEN) دارای تحرک بالقوه نسبتاً بیشتری بوده، بنابراین بیشتر در معرض آب‌شویی هستند. در خاک‌هایی که NKCL یا NPHEN بیشتری وجود دارند، احتمال آب‌شویی نیتروژن بیشتر است.

بنابراین از بررسی معادله‌های [۱] تا [۶] می‌توان نتیجه‌گرفت که برترین معادله‌هایی که ارتباط بین شکل‌های نیتروژن (غیر از نیتروژن کل) و ویژگی‌های خاک را نشان می‌دهند، معادله‌های [۱]، [۵]، و [۶] هستند که از بین آنها معادله [۵] دارای ضریب تبیین بالایی بوده و از لحاظ کاربردی نیز عملی‌تر است، بنابراین به‌عنوان معادله برتر انتخاب می‌شود. با بهره‌گیری از معادله‌های یاد شده می‌توان شکل‌های نیتروژن را از روی ویژگی‌هایی نظیر OM و pH با دقت بسیار بالا (معادله‌های [۱] و [۵]) و برخی دیگر از شکل‌های نیتروژن را با دقت خوب (معادله [۶]) تخمین زد.

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان چنین نتیجه گرفت:

۱. در خاک‌های آهکی تحت کشت استان فارس توزیع شکل‌های نیتروژن به‌صورت زیر است:

BOX-NB > NHOX-NH > NHSULN > HOTKCLN > NKCL > NAOHNB > NPHEN > NNH4

۲. بیشترین مقدار نسبی شکل‌های نیتروژن مربوط به شکل‌های پرمنگنات قلیایی شده (BOX-B) و پرمنگنات اسیدی شده (NHOX-NH) به ترتیب با ۴/۴۷ و ۳/۷۹ درصد بوده در حالی‌که شکل‌های محلول در آب و تبادل نیتروژن کمتر از ۲ درصد STN هستند.

۳. نیتروژن کل خاک با شکل‌های پرمنگنات اسیدی و قلیایی، هم‌بستگی معنی‌داری به‌ترتیب با ضریب‌های هم‌بستگی ۰/۹۳۱ و ۰/۸۵۰ دارد.

۴. بین شکل‌های نیتروژن کل (STN) و پرمنگنات اسیدی شده (NHOX-NH) با ماده آلی خاک (OM) معادله‌های یک متغیره خوبی به شرح زیر به‌دست آمد:

$$STN = -1.50 + 55.9 (OM) \quad [۱]$$

$$R^2 = 0.957 (P < 0.001)$$

$$NHOX-NH = 1.68 + 2.03 (OM) \quad [۵]$$

$$R^2 = 0.866 (P < 0.001)$$

تا به نیترات تبدیل شده و در محلول خاک باقی بماند. از طرف دیگر چون با افزایش ماده آلی خاک معمولاً pH خوانده شده کاهش می‌یابد، می‌توان گفت که افزایش pH به معنی کمتر شدن ماده آلی خاک و بنابراین کمتر شدن مقدار نیترات خاک است.

معادله بین شکل NKCL و pH، به تنهایی از ضریب تبیین ۰/۳۱۴ برخوردار است. با وارد کردن OM قدرت پیش‌بینی معادله از ۳۱/۴ به ۴۳/۸ درصد افزایش یافت:

$$NKCL = 498 - 61.0 (pH) + (OM) \quad [۳]$$

$$R^2 = 0.438 (P < 0.001)$$

هنگامی که تنها OM در پیش‌بینی NHSULN در نظر گرفته شود، معادله معنی‌داری با ضریب تبیین ۰/۳۸۰ به‌دست می‌آید، ولی وقتی pH نیز در نظر گرفته شود این ضریب تبیین به ۰/۵۰۵ افزایش یافته و معادله زیر به‌دست می‌آید:

$$NHSULN = 326 + 0.957 (OM) - 39.7 (pH) \quad [۴]$$

$$R^2 = 0.505 (P < 0.001)$$

بین شکل NHOX-NH و OM رابطه زیر به‌دست آمد:

$$NHOX-NH = 1.68 + 2.03 (OM) \quad [۵]$$

$$R^2 = 0.866 (P < 0.001)$$

به‌طوری‌که دیده می‌شود معادله [۵] توانسته است ۸۷/۶ درصد تغییرات NHOX-NH را بیان کند. وارد کردن سایر ویژگی‌های خاک در معادله باعث افزایش چشم‌گیری در ضریب تبیین نشد.

بین شکل BOX-NB و OM رابطه زیر به‌دست آمد:

$$BOX-NB = 8.39 + 2.08 (OM) \quad [۶]$$

$$R^2 = 0.643 (P < 0.001)$$

وارد کردن سایر ویژگی‌های خاک در معادله [۶] ضریب تبیین را تغییر چندانی نداد.

علت ارتباط بین شکل‌های NHOX-NH (پرمنگنات اسیدی شده) و BOX-NB (پرمنگنات قلیایی شده) با ماده آلی خاک (معادله‌های [۵] و [۶]) این است که این دو شکل اکسایشی بوده و شامل نیتروژنی که بر اثر اکسایش ماده آلی آزاد شده است، می‌شوند (۲۶ و ۲۸).

بین شکل‌های NAOHNB، NNH4، HOTKCLN و ویژگی‌های خاک ارتباط معنی‌داری به‌دست نیامد.

منابع مورد استفاده

۱. یثربی، ج. و ن. کریمیان. ۱۳۷۳. توزیع شکل‌های مختلف ازت در خاک‌های اراضی زیر سد درودزن استان فارس. گزیده مقالات سومین کنگره علوم خاک ایران ۲: ۱۰۸-۱۱۷.
2. Antep, S. 1997. Evaluation of some chemical methods of soil nitrogen available based on ¹⁵nitrogen technique. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 28: 537-550.
3. Brady, N. C. and R. R. Weil. 1999. *Nature and Properties of Soils*. 12th ed., Prentice - Hall Inc., Upper Saddle River, N J.
4. Bremner, J. M. 1965. Total nitrogen. PP. 1149-1176. *In: C. A. Black (Ed.), Methods of Soil Analysis. Part 2, ASA, Madison, WI.*
5. Bremner, J. M. 1996. Nitrogen. Total. PP. 1085- 1121. *In: D.L. Sparks, A. L. Page, P. A. Helmke, R. H. Soltanpour, M. A. Tabatabai, G. T. Johnston, and M. E. Sumner (Ed.), Methods of Soil Analysis. Part 3, SSSA, ASA, Madison, WI.*
6. Bremner, J. M. and D. R. Keeney. 1965. Steam distillation methods for determination of ammonium, nitrate, and nitrite. *Anal. Chem. Acta.* 32: 485-495.
7. Bundy, L. G. and J. J. Meisinger. 1994. Nitrogen availability indices. PP. 951-984. *In: R.W. Weaver (Ed.), Methods of Soil Analysis. Part 2, SSSA. 5, SSSA., Madison, WI.*
8. Chapman, H. D. and P. F. Pratt. 1961. *Method of Analysis for Soils, Plants, and Waters*. Agric. Sci., Univ. Calif.
9. Fox, R. H. and W. P. Piekielek. 1978. Field testing of several nitrogen availability indexes. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42: 747-750.
10. Fox, R. H. and W. P. Piekielek. 1978. A rapid method for estimating the nitrogen-supplying capability of a soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42: 751-753.
11. Francois, D. D., J. S. Schepers and M. F. Vigid. 1993. Post - anthesis nitrogen loss from corn. *Agron. J.* 85: 659-372.
12. Gianello, C. and J. M. Bremner. 1986. A simple chemical method of assessing potentially available organic nitrogen in soil. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 17: 195-214.
13. Gianello, C. and J. M. Bremner. 1986. Comparison of chemical methods of assessing potentially available organic nitrogen in soil. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 17: 215-236.
14. Hadas, A., S. Feigenbaum, A. Feigin and R. Portnoy. 1986. Distribution of nitrogen forms and availability indices in profiles of differently managed soil types. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50: 308-313.
15. Hart, S. C., J. M. Stark, E. A. Davidson and M. K. Firestone. 1994. Nitrogen mineralization, immobilization, and nitrification. PP. 985-1018. *In: R.W. Weaver (Ed.), Methods of Soil Analysis. Part 2. SSSA. Book Series No.5, SSSA, Madison, WI.*
16. Havlin, J. L., J. D. Beaton, S. L. Tisdale and W. L. Nelson. 1999. *Soil Fertility and Fertilizers. An introduction to Nutrient Management*. 6th ed., Prentice - Hall Inc., Upper Saddle River, N J.
17. Hussain, F., K. A. Malik and F. Azam. 1984. Evaluation of acid permanganate extraction as an index of soil nitrogen availability. *Plant Soil* 79: 249-254.
18. Jalil, A., C. A. Campell, J. Schoenau, J. L. Henry, Y. W. Jane and G. P. Laford. 1996. Assessment of two chemical extraction methods as indices of available nitrogen. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60: 1954-1960.
19. Mulvaney, R. L. 1996. Nitrogen. Inorganic forms. PP. 1123-1184. *In: D.L. Sparks, A. L. Page, P. A. Helmke, R. H. Soltanpour, M. A. Tabatabai, G. T. Johnston and M. E. Sumner (Eds.), Methods of Soil Analysis. Part 3, SSSA, ASA, Madison, WI.*
20. Olson, R. A. and L. T. Kurtz. 1982. Crop nitrogen requirements, utilization, and fertilization. PP. 567-604. *In: F.G. Stevenson (Ed.), Nitrogen in Agricultural Soils. Agron. 22, ASA, SSSA, Madison, WI.*
21. Paramasivam, S. and G. A. Breitenbeck. 1994. Distribution of nitrogen in soils of the southern Mississippi River alluvial plain. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 25: 247-267.
22. Setatou, H. B. and A. D. Simonis. 1996. Laboratory methods of measuring soil nitrogen status and correlation of measurements with crop responses. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 27: 651-663.
23. Singh, J. P, D. J. Dahiya, V. Kumar and M. Singh. 1992. Distribution and status of different forms of nitrogen in soils of Haryana. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 40: 698-704.
24. Smith, S. J., J. F. Power and W. D. Kemper. 1994. Fixed ammonium and nitrogen availability indexes. *Soil Sci.* 158:132-140.
25. Stalin, P., A. Dobermann, K. G. Cassman, T. M. Thiyagarayan and H. F. M. Ten Berge. 1996. Nitrogen supplying capacity of lowland rice soils in southern India. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 27: 2851-2874.

26. Stanford, G. 1978. Evaluation of ammonium release by alkaline permanganate extraction as an index of soil nitrogen availability. *Soil Sci.* 126: 244-253.
27. Stanford, G. and S. J. Smith. 1972. Nitrogen mineralization potentials of soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 36: 465-472.
28. Stanford, G., and S. J. Smith. 1978. Oxidative release of potentially mineralizable Soil nitrogen by acid permanganate extraction. *Soil Sci.* 126: 210-218.
29. Stevenson, F. J. 1996. Nitrogen. Organic forms. PP. 1185-1200. *In: D. L. Sparks, A. L. Page, P. A. Helmke, R. H. Soltanpour, M. A. Tabatabai, G. T. Johnston and M. E. Sumner (Eds.), Methods of Soil Analysis. part 3, SSSA, ASA, Madison, WI.*