

## بررسی عوامل موثر در تثبیت پتاسیم و آمونیوم در خاک، کانی‌های رسی و نقش آن‌ها در مصرف کودهای پتاسیمی

سیروس جعفری و معصومه پیشگیر<sup>۱</sup>

دانشیار گروه خاکشناسی، دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی رامین خوزستان. [siroosjafari@yahoo.com](mailto:siroosjafari@yahoo.com)  
دانش‌آموخته سابق کارشناسی ارشد گروه خاکشناسی، دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی رامین خوزستان. [pishgir88@yahoo.com](mailto:pishgir88@yahoo.com)

دریافت: اسفند ۱۳۹۳ پذیرش: شهریور ۱۳۹۴

### چکیده

تثبیت از مهم‌ترین فرآیندهایی است که بر قابلیت دسترسی عناصر غذائی پتاسیم و آمونیوم خاک برای گیاه اثر می‌گذارد. نوع و چگالی بار لایه‌های کانی‌های رسی، پتانسیل اکسیداسیون و احیاء، درجه اشباع بین لایه‌های کانی‌های رسی ۲:۱ لایه با پتاسیم و آمونیوم، غلظت یون‌های پتاسیم و آمونیوم در فاز محلول خاک، تناوب خشک و تر شدن، مقدار رطوبت، پهاش و مقدار مواد آلی خاک از جمله مهم‌ترین عوامل تأثیر گذار بر فرآیند تثبیت پتاسیم و آمونیوم در رس‌ها و خاک‌ها به شمار می‌روند. این دو کاتیون به دلیل دارا بودن شعاع یونی مشابه دارای رفتار مشابهی برای تثبیت هستند، لذا می‌توان با کاربرد توام کود پتاسیم و آمونیوم بر افزایش قابلیت جذب آن‌ها اثر گذاشت. قرار گرفتن یون‌های آمونیوم در بین لایه‌های کانی‌های رسی موجب می‌گردد تا ظرفیت تثبیت پتاسیم در بین لایه‌ها کاهش یافته و قابلیت جذب آن برای گیاه فزونی یابد و برعکس. این موضوع از نظر اقتصادی و مدیریت مصرف کود اهمیت کاربردی فراوانی دارد به طوری که به هنگام محاسبه مقدار کودهای نیتروژن و پتاسیم مورد نیاز گیاه باید به طور کامل مورد توجه قرار گیرد. با اطلاع از عوامل اثر گذار بر تثبیت یا رهاسازی یون‌های پتاسیم و آمونیوم و هم‌چنین بررسی عوامل اثر گذار بر رقابت آن‌ها می‌توان برای مدیریت تغذیه‌ای گیاهان برنامه‌ریزی نمود. در این راستا با افزایش کودهای آمونیومی همچون اوره می‌توان بر رهاسازی پتاسیم از کانی‌ها اثر گذاشته و نیاز گیاه به این عنصر غذایی را تأمین نمود. در این مقاله تلاش گردیده است که فرآیند تثبیت پتاسیم و آمونیوم در خاک و نقش عوامل موثر بر آن بررسی و راهکارهایی برای استفاده صحیح از این دو عنصر کودی در مدیریت تغذیه‌ای گیاهان ارائه شود.

واژه‌های کلیدی: آمونیوم، کود، تثبیت، پتاسیم، کانی‌های رسی.

<sup>۱</sup> - آدرس نویسنده مسئول: دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی رامین خوزستان.

## مقدمه

به‌طور بسیار محکمی نگه داشته شود. از آنجائی که شعاع یون هیدراته<sup>۱</sup> آمونیم حدوداً برابر با یون پتاسیم است با وضعیتی مشابه در میان لایه‌های رس‌های ۲:۱ لایه تثبیت می‌گردد (هاولین<sup>۲</sup> و همکاران، ۱۹۹۱). قرار گرفتن یون‌های آمونیم در بین لایه‌های کانی‌های رسی موجب می‌گردد تا ظرفیت تثبیت پتاسیم در بین لایه‌ها کاهش یافته و قابلیت جذب آن برای گیاه فزونی یابد و برعکس. این موضوع از نظر اقتصادی و مدیریت مصرف کود اهمیت کاربردی فراوانی داشته و به هنگام محاسبه مقدار کودهای نیتروژنی و پتاسیمی باید مورد توجه کامل قرار گیرد. این پدیده در خاک‌های کشاورزی ریزبافت که ظرفیت تثبیت پتاسیم و آمونیم آن‌ها زیاد است اهمیت به سزایی دارد (ملکوتی و همایی، ۱۳۸۳).

## تثبیت پتاسیم و آمونیم

به تله افتادن یون‌های پتاسیم و آمونیم در بین لایه‌های کانی‌های رسی ۲:۱ لایه را تثبیت گویند (کیلیج<sup>۳</sup> و همکاران، ۱۹۹۹). تثبیت پتاسیم در روابط خاک، گیاه و نحوه مدیریت کودی اراضی کشاورزی از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است (موراشکینا<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۰۷). شناخت فرآیندهای موثر بر تثبیت در مدیریت کودی و حاصلخیزی خاک نقش اساسی دارد (اولک<sup>۵</sup> و همکاران، ۱۹۹۵). تثبیت پتاسیم از طریق دوفرآیند عمده (۱) تثبیت پتاسیم در فضای هشت وجهی مکعبی<sup>۶</sup> بین ورقه‌های چهار وجهی دو لایه مجاور کانی‌های رسی ۲:۱ لایه این نوع تثبیت پتاسیم سبب تشکیل کانی‌های شبه میکا<sup>۷</sup> در رس‌های ایلیت تخلیه شده از یون پتاسیم می‌شود. این فرآیند، با از دست دادن آب یون‌هایی نظیر پتاسیم، به هنگام نزدیک شدن لایه‌های مجاور سیلیکات‌های لایه‌ای

پتاسیم جزء عناصر ضروری برای رشد گیاهان بوده و اگر مقدار آن در خاک به حد کافی نباشد، رشد گیاه به شدت کاهش می‌یابد. فرآیندهای مختلفی بر قابلیت استفاده پتاسیم تأثیر می‌گذارند. یکی از فرآیندهای بسیار مهمی که قابلیت استفاده پتاسیم برای گیاهان را تحت تأثیر قرار می‌دهد، تثبیت<sup>۱</sup> آن به وسیله کانی‌های رسی خاک می‌باشد. هنگام کشت، خصوصاً کشت مترکم، این فرآیند در تأمین پتاسیم مورد نیاز گیاه از پتاسیم موجود در خاک و نیز کارایی کود مصرف شده نقش مهمی دارد. لذا شناخت عوامل موثر در تثبیت پتاسیم برای افزایش راندمان جذب آن از خاک و کود ضرورت است (سردی و سیتاری<sup>۲</sup>، ۱۹۹۸).

هنگامی که نیروهای پیوندی بین یون‌های پتاسیم و سطوح کانی‌ها (نیروی بین لایه‌ای) بیشتر از نیروهای آبپوشی (هیدراتاسیون) بین مولکول‌های آب و یون‌های منفرد پتاسیم باشد، یون پتاسیم تثبیت می‌گردد. این عمل باعث فروریزش<sup>۳</sup> جزئی ساختمان کریستالی و به دام افتادن یون‌های پتاسیم و در نتیجه کاهش آزادسازی آن می‌گردد (اسپارکس ۱۹۸۷). این فرآیند در خاک‌های حاوی مقادیر زیاد رس‌های ۲:۱ لایه و همچنین در حضور کانی ایلیت به حداکثر می‌رسد. در واقع تثبیت پتاسیم نتیجه گرفتار شدن یون‌های پتاسیم بین لایه‌ای در بین لایه‌های کانی‌های رسی ۲:۱ لایه به ویژه در رس‌هایی نظیر ایلیت است. در حالی که کانی‌های رسی ۱:۱ لایه مثل کائولینایت نمی‌توانند پتاسیم را تثبیت کنند. فضاهای خالی موجود در بین صفحه‌های اکسیژن قاعده‌ای<sup>۴</sup> (حفره سیلوکسان<sup>۵</sup>) اندازه‌ای مشابه اندازه‌ی یون پتاسیم دارند. این مسئله به همراه انرژی کم آبپوشی یون پتاسیم موجب می‌شود تا یون‌های پتاسیم به نحو مطلوبی در درون این حفرات جایگیر شده و به وسیله نیروهای الکتروستاتیکی،

<sup>6</sup> - Hydration

<sup>7</sup> - Havlin

<sup>8</sup> - Kilic

<sup>9</sup> - Murashkina

<sup>10</sup> - Olk

<sup>11</sup> - Cubooctahedron

<sup>12</sup> - Mica-Like

<sup>1</sup> - Fixation

<sup>2</sup> - Sardi and Csitari

<sup>3</sup> - Collapse

<sup>4</sup> - Basal oxygen planes

<sup>5</sup> - Siloxane cavities

تثبیت آمونیم مانند پتاسیم است. نزدیکی اندازه شعاع اتمی غیر آب پوشیده این یون (۱/۴۸ آنگستروم) به شعاع اتمی غیر آب پوشیده یون پتاسیم (۱/۳۳ آنگستروم) و کم بودن انرژی آبپوشی یون آمونیم همانند یون پتاسیم موجب می‌شود تا رفتار این دو نوع یون در خاک تا حد زیادی به یکدیگر شبیه باشد (نیلسن<sup>۴</sup>، ۱۹۷۲؛ پراساد و پاور<sup>۵</sup>، ۱۹۹۷). سرعت تثبیت آمونیم بیشتر از سرعت آزادسازی آمونیم تثبیت شده است. تثبیت و آزادسازی آمونیم نقش مهمی در بازدهی کودهای نیتروژن آمونیمی ایفاء می‌کند (جوآنگ<sup>۶</sup> و همکاران، ۲۰۰۱). خاک‌های دارای کانی‌های رسی ۲:۱ لایه، آمونیم افزوده شده به خاک را به سرعت تثبیت می‌کنند. تثبیت آمونیم به افزایش منبع نیتروژن قابل دسترس خاک‌ها کمک نموده و هدرروی نیتروژن را از طریق آبشویی نترات و فرآیند دنیتریفیکاسیون کاهش می‌دهد (لیو<sup>۷</sup> و همکاران، ۲۰۰۸).

#### اثرات تثبیت بر تغذیه گیاهان

پدیده تثبیت پتاسیم بر مقدار پتاسیم قابل دسترس خاک برای گیاه تأثیر گذاشته و به عنوان یک ویژگی منفی در خاک در نظر گرفته می‌شود که باعث کاهش جدی پتاسیم قابل استفاده گیاه می‌شود. با این وجود، گاهی تثبیت پتاسیم اضافه شده از لحاظ حاصلخیزی و تغذیه گیاه در مجموع فرآیندی نافع تلقی می‌شود. زیرا از تلفات پتاسیم به شکل آبشویی و مصرف بیش از حد نیاز آن توسط گیاه جلوگیری می‌کند (حسین پور، ۱۳۸۷).

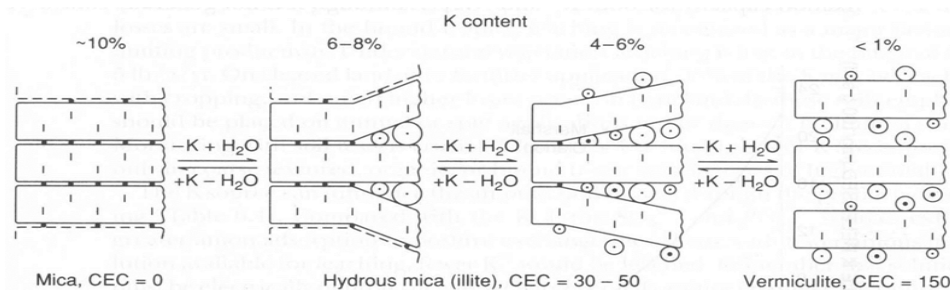
فعال می‌گردد. کم بودن مقدار انرژی آبپوشی یون پتاسیم و اندازه شعاع هیدراته آن، که هم اندازه حفرات هشت وجهی مکعبی در ورقه‌های چهاروجهی سیلیکات‌های ورقه‌ای است، همراه با فراوانی این یون در خاک در مقایسه با کاتیون‌هایی نظیر روییدیم و سزیوم، باعث گردیده تا یون پتاسیم به عنوان بهترین کاتیون برای خشتی کردن بار لایه‌ای (خشتی شدن بار منفی رس‌های خاک با بار مثبت کاتیون) و در نتیجه محبوس شدن در حفرات هشت وجهی مکعبی سیلیکات‌های ورقه‌ای ۲:۱ لایه عمل کند (راس و کلین<sup>۱</sup>، ۱۹۸۴). عمل تثبیت پتاسیم با کاهش فضای بین لایه‌ای در ساختار بلوری همراه است، چرا که یون‌های پتاسیم با نیروی کافی توسط دو لایه کشیده شده و در نتیجه دو لایه را به هم نزدیک می‌کنند (آریفین و تان<sup>۲</sup>، ۱۹۷۳). تثبیت از طریق تشکیل ترکیبات غیرمحلول پتاسیم از قبیل آلومینوسیلیکات‌ها در واکنش‌های قلیایی تشکیل چنین ترکیباتی بیشتر می‌شود (آریفین و تان، ۱۹۷۳).

در شکل (۱) طرحی از فرآیند تثبیت و آزادسازی پتاسیم نشان داده شده است. در محیط سرشار از پتاسیم، کانی‌های رسی ۲:۱ لایه قادرند یون‌های پتاسیم را در فضای بین لایه‌ای خود تثبیت کرده و اندازه این فضا را تا حدود یک نانومتر کاهش دهند. با کاهش غلظت یون‌های پتاسیم در محلول خاک، پتاسیم‌های بین لایه‌ای مجدداً می‌توانند از فضای بین لایه‌ای آزاد گردیده و به فاز محلول وارد شوند (بری<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۰۷). رس‌های ورمی‌کولایت خاک با جذب پتاسیم به رس ایلایت تبدیل شده و با کاهش غلظت پتاسیم محلول خاک عکس این روند اتفاق افتاده و پتاسیم خاک‌ها تخلیه گردیده است (بری و همکاران، ۲۰۰۸).

یکی از سرنوشت‌های احتمالی نیتروژن آمونیمی در خاک‌ها تثبیت آن به وسیله رس‌های منبسط شونده مثل ایلایت، ورمی‌کولایت و مونت‌موریلونایت است. نحوه

4- Nielsen  
5- Prasad and Power  
6- Juang  
7- Liu

1- Ross and cline  
2- Arifin and Tan  
3- Barre



شکل ۱- نمودار هوادیدگی کانی میکا و روند تحول آن به کانی‌های رسی دیگر، مثالی از آزادسازی و تثبیت پتاسیم (هاولین و همکاران، ۱۹۹۹).

از یون آمونیم اخیراً تثبیت شده در کشت اول به آسانی توسط گیاهان مورد استفاده قرار گرفته و از هدررفت آن جلوگیری می‌شود.

### عوامل موثر بر تثبیت پتاسیم و آمونیم در خاک و رس

از آنجائی که شیوه تثبیت آمونیم مشابه تثبیت پتاسیم است بنابراین تمام عواملی که بر تثبیت پتاسیم موثرند بر تثبیت آمونیم نیز اثرگذار هستند.

### نوع و ترکیب کانی‌های رسی

نوع و مقدار کانی‌های رسی تعیین کننده ظرفیت تثبیت خاک و از جمله فرآیندهای کنترل کننده تثبیت و آزادسازی پتاسیم می‌باشند (کرکمن<sup>۳</sup> و همکاران، ۱۹۹۴). ورمی کولایت، مونتوریلونایت و میکای آبدار از مهم‌ترین کانی‌های رسی ۲:۱ لایه قابل انبساط مسئول تثبیت پتاسیم هستند (سیمونسون و همکاران، ۲۰۰۹). بررسی وضعیت پتاسیم خاک‌های کشاورزی غرب همدان نشان داده که خاک‌های محدوده مطالعاتی حدود ۱۰ تا ۵۸ درصد از پتاسیم افزوده شده به خاک را به علت غالب بودن کانی‌های رسی ایلیت، ورمی کولایت و اسمکتایت جذب می‌کنند (جلالی، ۲۰۱۰). فرآیند تثبیت پتاسیم در کانیهای میکا پیچیده‌تر بوده و به درجه‌ی هوادیدگی آن‌ها بستگی دارد (بادروی و بلوم<sup>۴</sup>، ۱۹۸۹).

جعفری و باقرنژاد (۱۳۸۶)، با بررسی تثبیت پتاسیم در سیستم‌های مختلف کشت در برخی از خاک‌ها

ظرفیت تثبیت آمونیم در خاک‌های معمول کشاورزی از یک میلی‌اکی‌والان در ۱۰۰ گرم خاک یعنی حداکثر معادل ۳۵۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار تجاوز نمی‌کند لذا در تغذیه نیتروژن نباید پدیده تثبیت را به عنوان یک فرآیند مضر در نظر بگیریم، چون آمونیم تثبیت شده در بسیاری از موارد به عنوان ذخیره خاک محسوب می‌شود (اسکرر، ۱۹۹۳؛ سالاردینی، ۱۳۸۷).

زمانی که غلظت آمونیمو پتاسیم موجود در محلول خاک کاهش یابد، آمونیم و پتاسیم تثبیت شده ممکن است آزاد شده و برای گیاهان قابل دسترس شود (اسمیت و همکاران، ۱۹۹۴). این فرآیند در خاک‌های تحت کشت، بیشتر از خاک‌های بایر (کشت نشده) اتفاق می‌افتد چون در خاک‌های تحت کشت مقادیر زیادی از پتاسیم و آمونیم توسط گیاهان جذب شده و باعث کاهش غلظت این یون‌ها در ریزوسفر می‌گردد (منگل و همکاران، ۱۹۹۰؛ اسکرر و ویمار<sup>۱</sup>، ۱۹۹۴). لو<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۰)، در بررسی تثبیت و آزادسازی آمونیم در کشت‌های پی در پی در مناطق شمال شرقی چین نشان دادند که کشت پی در پی محصولات کشاورزی (کشت اول، دوم و سوم) باعث آزادسازی آمونیم اخیراً تثبیت شده می‌گردد. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد که گیاهان کشت اول ۸۰ درصد، گیاهان کشت دوم هفت درصد و گیاهان کشت سوم دو درصد از آمونیم تثبیت شده اخیر را آزاد کردند. به عبارت دیگر آزادسازی یون آمونیم در گیاهان کشت اول نسبت به گیاهان کشت دوم و سوم بیشتر بوده و بخش عمده‌ای

<sup>3</sup>- Kirkman

<sup>4</sup>- Badraoui and Bloom

<sup>1</sup>- Scherer and Weimar

<sup>2</sup>- Lu

پتاسیم بیشتری را تثبیت می‌کنند. هم چنین کانی‌هایی که منشاء بار منفی آن‌ها عمدتاً از ورقه چهار وجهی است از قدرت تثبیت پتاسیم بیشتری در مقایسه با کانی‌هایی که منشاء بار منفی آن‌ها از ورقه هشت وجهی است، برخوردار هستند. به همین دلیل قدرت تثبیت‌کنندگی رس‌های ورمی‌کولایت و ایلایت بیش از مونتوریلونایت می‌باشد (بردی و ویل<sup>۷</sup>، ۲۰۰۸). اساساً بار ورقه چهار وجهی، به دلیل نزدیکی منشاء بار به فضاهای بین لایه‌ای کانی‌های سیلیکاتی ۲:۱ لایه نقش بیشتری در تثبیت پتاسیم دارد (بایید و همکاران، ۱۹۹۱). مقدار تثبیت پتاسیم به وسیله اسمکتایت‌ها خیلی کم است مگر این‌که چگالی بار بالایی داشته باشند. کانی اسمکتایتی که بیش از ۵۰ درصد بار لایه‌ای آن از ورقه چهاروجهی منشاء گرفته باشد بیدلایت و کانی اسمکتایتی که بیش از ۵۰ درصد بار لایه‌ای آن از ورقه هشت‌وجهی منشاء گرفته باشد مونتوریلونایت نامیده می‌شود (بورچاردت<sup>۸</sup>، ۱۹۸۹).

از بین فاکتورهای موثر بر تثبیت آمونیم، نوع و ترکیب کانی‌های رسی از مهم‌ترین عوامل موثر در تثبیت به حساب می‌آیند (زانگ و همکاران، ۲۰۰۷). کانی‌های رسی ایلایت و ورمی‌کولایت نسبت به مونتوریلونایت ظرفیت تثبیت آمونیم زیادتری دارند (ریچسیگل<sup>۹</sup> و همکاران، ۱۹۸۸). کانی ورمی‌کولایت در مقایسه با کانی ایلایت بیشترین ظرفیت تثبیت آمونیم را دارا می‌باشد (استفان و اسپارکس، ۱۹۹۹). ایلایت بسته به درجه هوادیدگی ممکن است آمونیم را تثبیت نماید (دیال و هندریچز<sup>۱۰</sup>، ۱۹۵۲). لو<sup>۱۱</sup> و همکاران (۲۰۱۳)، در مطالعه مقدار خروج همزمان غلظت‌های کم آمونیم و اسید هومیک از ستون‌های حاوی ورمی‌کولایت و پالی‌گورسکایت نشان داده‌اند که در بین ستون‌ها از نظر خروج اسید هومیک اختلاف معنی‌داری مشاهده نگردیده در حالیکه از نظر خروج آمونیم در بین ستون‌ها اختلاف معنی‌دار مشاهده

و رس‌های خوزستان نشان داده‌اند که تثبیت پتاسیم در لایه سطحی خاک در اراضی که به‌طور مداوم تحت کشت نیشکر قرار داشته‌اند به مراتب بیشتر از اراضی بایر و یا اراضی که اصول تناوب زراعی در آن‌ها رعایت شده، بوده است. دلیل مقدار زیاد ظرفیت تثبیت پتاسیم در افق‌های سطحی خاک‌های تحت کشت نیشکر به تخلیه پتاسیم از فضای بین لایه‌های کانی‌های رسی ایلایت در نتیجه کشت مداوم بوده است.

کانی‌های رسی ورمی‌کولایت و بیدلایت در مقایسه با مونتوریلونایت ظرفیت بیشتری برای تثبیت پتاسیم دارند (داگلاس<sup>۱</sup>، ۱۹۸۹). ظرفیت تثبیت پتاسیم خاک‌های تحت کشت برنج در فیلیپین نشان داد که کانی بیدلایت دارای بیشترین مقدار ظرفیت تثبیت پتاسیم بوده (۸۰ درصد) و کانی ورمی‌کولایت (۶۹ درصد) در مرتبه بعدی قرار دارد (باجوا<sup>۲</sup>، ۱۹۸۱). مقدار تثبیت پتاسیم در کانی‌های رسی مونتوریلونایت، رس‌های بی‌شکل<sup>۳</sup>، میکای آبدار، هالوسایت، کلرایت و کائولینایت ناچیز است. چیتمارت<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۱۰)، در بررسی تثبیت پتاسیم کانی‌های رسی خاک‌های ورتی‌سولز تایلند نشان داده‌اند که مقدار تثبیت پتاسیم در خاک‌های ورتی‌سولز اراضی مرتفع به علت حضور کانی‌های رسی ورمی‌کولایت بیشتر از ورتی‌سول‌های اراضی پست است. در خاک‌های اسیدی، کانی رسی موثر در تثبیت پتاسیم ورمی‌کولایت‌های دوجائی<sup>۵</sup> است (بایید<sup>۶</sup> و همکاران، ۱۹۹۱).

تراکم بار الکتریکی کل و توزیع آن در ورقه‌های چهار وجهی و هشت وجهی از ویژگی‌های بسیار مهم موثر بر تثبیت پتاسیم توسط کانی‌های رسی ۲:۱ لایه است (هانگ، ۲۰۰۵). کانی‌های رسی دارای چگالی بار منفی زیاد، غالباً در مقایسه با کانی‌های با چگالی بار منفی کم،

<sup>1</sup> - Douglas

<sup>2</sup> - Bajwa

<sup>3</sup> - Amorphous

<sup>4</sup> - Chittamart,

<sup>5</sup> - Dioctahedral

<sup>6</sup> - Bouabid

<sup>7</sup> - Brady and Weil

<sup>8</sup> - Borchardt

<sup>9</sup> - Rehcigl

<sup>10</sup> - Dyal and Hendricks

<sup>11</sup> - Lv

ورمی‌کولایت در خاک‌های مورد مطالعه ذکر کرده‌اند. در برخی از موارد نتایج متفاوتی نیز حاصل شده است. دوراکوهمکاران (۱۹۹۶)، در بررسی مقدار تثبیت آمونیم دو گروه بزرگ خاک‌های ترکیه و پیشگیر (۱۳۹۰)، در بررسی مقایسه تثبیت پتاسیم و آمونیم رس‌ها در اراضی با کاربری‌های مختلف نیشکر، اراضی تناوبی، نخلستان و بایر در استان خوزستان نشان داده‌اند که با افزایش همزمان پتاسیم و آمونیم به خاک‌ها، مقدار آمونیم تثبیت شده بیشتر از پتاسیم بود. کانی‌های رسی غالب در خاک‌های مورد مطالعه عمدتاً از رس‌های اسمکتایت و ایلایت بوده است. باجوا (۱۹۸۵ و ۲۰۰۸)، نشان داد که رس‌های مونت‌موریلونایت در مقایسه با پتاسیم بیشترین مقدار تثبیت آمونیم را داشته‌اند (۹۸ درصد). کانی‌های رسی ورمی‌کولایت و بیدلایت هر دو یون‌های پتاسیم و آمونیم را به شدت تثبیت می‌نمایند. اما کانی ورمی‌کولایت تمایل بیشتری برای تثبیت آمونیم (۸۸ درصد) و کانی بیدلایت تمایل بیشتری برای تثبیت پتاسیم (۸۴ درصد) دارد. در کانی‌های رسی بی‌شکل، تثبیت آمونیم بر تثبیت پتاسیم مقدم‌تر است. کانی‌های رسی میکای آبدار، کلرایت و هالوسایت ظرفیت کمتری برای تثبیت یون‌های پتاسیم و آمونیم افزوده شده را دارند.

#### مقدار رس

در اغلب خاک‌های زراعی، مقدار تثبیت یون‌های پتاسیم و آمونیم تابع مقدار رس خاک است. هرچه مقدار رس بیشتر باشد ظرفیت تثبیت نیز بیشتر است. این امر در خاک‌های دارای رس ورمی‌کولایت به نحو بارزتری مشاهده می‌شود. گاهی نیز رابطه‌ای بین نوع رس و مقدار رس خاک مشاهده نمی‌شود (جعفری و باقرزاد، ۱۳۸۶؛ سالاردینی، ۱۳۸۷).

متغیر بودن همبستگی‌های گزارش شده بین مقدار رس و مقدار تثبیت پتاسیم به دلیل تفاوت در مقدار و نوع کانی رس در خاک‌ها مختلف می‌باشد. افزایش مقدار رس ممکن است سبب افزایش تثبیت پتاسیم شود. از

شده است. درستون‌های پر شده از کانی ورمی‌کولایت یون آمونیم توسط این کانی جذب شده است اما در ستون‌های حاوی هر دو کانی با نسبت ۱:۱، آمونیم عمدتاً در ته ستون تجمع یافته است.

از گروه اسمکتایت‌ها، بیدلایت در مقایسه با مونت‌موریلونایت ظرفیت بیشتری برای تثبیت آمونیم دارد. دلیل این امر احتمالاً آن است که در کانی بیدلایت جانشینی هم‌شکل بیشتر در ورقه چهار وجهی صورت گرفته است (فیگین‌بوآم<sup>۱</sup> و همکاران، ۱۹۹۴). کانی کائولینایت در گروه گروه کانی‌های رسی ۱:۱ لایه قادر به نگهداری یون‌های آمونیم به دلیل وجود پیوندهای هیدروژنی در فضای بین لایه‌ای نیست (میلایا، ۱۹۶۲). دوراک<sup>۳</sup> و همکاران (۱۹۹۶)، در بررسی تثبیت آمونیم دو گروه بزرگ خاک‌های ترکیه با کانی‌های رسی مختلف در طی فصل رشد گیاه نشان داده‌اند که مقدار تثبیت آمونیم در کانی رسی کائولینایت حداقل، در کانی ایلایت متوسط و در کانی اسمکتایت زیاد بوده است. کیلیچ و همکاران (۱۹۹۹)، در بررسی اثر کاربرد پتاسیم بر مقدار تثبیت آمونیم در خاک‌های ترکیه نشان داده‌اند که خاک‌های حاوی کانی کائولینایت دارای کمترین و خاک‌های حاوی کانی اسمکتایت دارای بیشترین مقدار تثبیت آمونیم بوده‌اند. احمد و همکاران (۱۹۸۲)، در خاک‌های غرب هند نشان دادند که مقدار تثبیت آمونیم در خاک‌های غنی از کانی‌های رسی اسمکتایت بیشتر بود.

کیلیچ و همکاران (۱۹۹۹)، معتقدند فرآیند تثبیت یون‌های پتاسیم و آمونیم در حضور همزمان این دو نوع یون تا حدود زیادی به ترکیب کانی‌های رسی خاک وابسته است. توفیقی و عباسیان (۲۰۰۹)، در سیستم تثبیت پتاسیم و آمونیم نشان داده‌اند که در هر دو نوع خاک‌های کشور کانادا و ایران مقدار تثبیت یون پتاسیم در مقایسه با مقدار تثبیت یون آمونیم بیشتر است. آن‌ها دلیل این امر را حضور کانی‌های رسی میکا، ایلایت و

<sup>۱</sup>-Feigenbaum

<sup>۲</sup>- Mela Mela

<sup>۳</sup>- Durak

شده و مقدار سیلت خاک همبستگی وجود ندارد. توفیقی و عباسیان (۲۰۰۹)، نشان دادند که در برخی از مواقع به علت حضور کانی‌های میکا و ورمی‌کولایت در جزء سیلت خاک‌ها مقادیر قابل ملاحظه‌ای از پتاسیم و برخی اوقات آمونیم توسط این جزء از خاک تثبیت می‌شود. موراشکینا و همکاران (۲۰۰۷)، نشان دادند که بیشترین مقدار تثبیت پتاسیم در بخش سیلت خاک‌ها به علت حضور کانی‌های رسی ورمی‌کولایت و بیوتایت آبدار صورت گرفته است.

### پتانسیل اکسیداسیون و احیاء

واکنش‌های اکسیداسیون و احیاء با ایجاد تغییر در مقدار بار لایه‌ای کانی‌های رسی می‌تواند در تثبیت و یا رهاسازی این کاتیون‌ها موثر باشد. با کاهش پتانسیل اکسیداسیون و احیاء خاک، آهن ساختمانی موجود در کانی‌های رسی احیاء شده و از فرم پایدار سه ظرفیتی به فرم محلول دو ظرفیتی تغییر حالت می‌دهد. این امر باعث افزایش بار منفی در واحد سلولی شده و منجر به افزایش نیروی جاذبه بین کاتیون‌های بین لایه‌ای و لایه‌های رسی‌های سیلیکاتی می‌گردد. این فرآیند باعث انتشار بیشتر یون‌های آمونیم و پتاسیم در فضای بین لایه‌ای کانی‌های رسی و افزایش مقدار تثبیت می‌گردد (چن<sup>۶</sup> و همکاران، ۱۹۸۷؛ کومادل<sup>۷</sup> و همکاران، ۲۰۰۶). اشنایدر و اسکرر<sup>۸</sup> (۱۹۹۸)، در خاک‌های غرقابی برنج نشان دادند که با افزایش پتانسیل اکسیداسیون و احیاء، بار منفی لایه کانی‌های رسی کاهش یافته که منجر به کاهش مقدار تثبیت یون آمونیم و افزایش قابلیت دسترسی آن می‌شود.

رابطه درجه اشباع بین لایه‌ای با تثبیت پتاسیم و آمونیم ظرفیت تثبیت پتاسیم و آمونیم به شدت به درجه اشباع بین لایه‌ای کانی‌های رسی ۲:۱ لایه با یون‌های پتاسیم و آمونیم بستگی دارد. اگر مقدار پتاسیم در خاک

آنچائی که تثبیت پتاسیم بیشتر به خصوصیات شبکه تبلور رس‌ها و نه به مقدارشان بستگی دارد. لذا در همه خاک‌ها الزاماً نبایستی بین مقدار رس و مقدار تثبیت پتاسیم همبستگی قوی دیده شود (نینگاپا و واسوکی<sup>۱</sup>، ۱۹۸۹). بستانی و ثواقبی (۱۳۹۰)، در بررسی تثبیت پتاسیم خاک‌های تحت کشت نیشکر استان خوزستان همبستگی منفی و معنی‌داری بین میزان تثبیت پتاسیم و مقدار رس مشاهده نموده‌اند.

سئال و همکاران (۲۰۰۶)، در بررسی تثبیت پتاسیم خاک‌های مناطق شرقی هند نشان داده‌اند که به علت زیاد بودن مقدار رس درافق‌های سطحی خاک نسبت به افق‌های عمقی، مقدار تثبیت پتاسیم بیشتر بوده است. اوستان و همکاران (۲۰۰۸)، همبستگی مثبتی بین میزان تثبیت پتاسیم و مقدار رس تحت شرایط هوا خشک مشاهده نموده بطوریکه با افزایش رس به مقدار ۱۰ درصد، مقدار تثبیت ۱۷ درصد افزایش یافت. کوالینکو و یو<sup>۲</sup> (۱۹۹۶)، در خاک‌های جنوب کلمبیا، ریچسیگل و همکاران (۱۹۸۸) در ایالت دلاویر<sup>۳</sup>، ون و همکاران (۲۰۰۰) و زانگ و همکاران (۲۰۰۷)، در برخی از اراضی کشاورزی چین همبستگی مثبتی بین مقدار رس و تثبیت آمونیم مشاهده نموده‌اند. الماسی و همکاران (۲۰۰۲)، در بررسی خصوصیات تثبیت آمونیم خاک‌های تحت کشت ترکیه نشان داده‌اند که به علت تنوع در نوع کانی‌های رسی خاک، بین مقدار رس خاک و تثبیت آمونیم همبستگی معنی‌دار وجود ندارد.

علاوه بر تثبیت آمونیم توسط رس‌ها، سیلت نیز قادر به تثبیت آمونیم می‌باشد، اما مقدار تثبیت در رس بسیار بیشتر از سیلت است (سان<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۰۰؛ زانگ و لی<sup>۵</sup>، ۲۰۰۳). کوالینکو و یو (۱۹۹۶)، در بررسی آمونیم محلول، قابل تبادل و تثبیت شده رس‌ها در خاک‌های کلمبیا نشان داده‌اند که بین مقدار آمونیم تثبیت

<sup>۱</sup>- Ningappa and Vasuki

<sup>۲</sup>- Kowalenko and Yu

<sup>۳</sup>-Delaware

<sup>۴</sup>- Sun

<sup>۵</sup>- Zhang and Li

<sup>۶</sup>- Chen

<sup>۷</sup>-Komadel

<sup>۸</sup>- Schneiders and Scherer

(۱۳۹۰)، ضمن مقایسه فرآیند تثبیت یون‌های پتاسیم و آمونیم توسط کانی‌های رسی خاک‌های استان خوزستان نشان داد که مصرف زیاد پتاسیم باعث آزادسازی آمونیم و مصرف زیاد آمونیم باعث آزادسازی پتاسیم گردید.

#### کودهای پتاسیمی اضافه شده

فرآیندهای تثبیت و آزادسازی پتاسیم در خاک برگشت-پذیر بوده و برگشت‌پذیری آن‌ها به جذب گیاهان و مصرف کود وابسته است (سیمونسون و همکاران، ۲۰۰۷). مصرف کودهای پتاسیمی بر غلظت پتاسیم فاز محلول خاک و پتاسیم تبادلی و غیرتبادلی و همچنین تثبیت پتاسیم تأثیر دارد. کاهش غلظت پتاسیم تبادلی و غیرتبادلی باعث افزایش ظرفیت تثبیت پتاسیم در خاک می‌گردد. زیرا با افزایش کودهای پتاسیمی به خاک، غلظت پتاسیم در فاز محلول خاک افزایش یافته و در نتیجه تعادل بین پتاسیم محلول و تثبیت شده به سمت تثبیت پتاسیم سوق می‌یابد. بنابراین، تثبیت و یا آزادسازی پتاسیم اضافه شده (کود پتاسیمی) به غلظت آن در محلول خاک بستگی دارد (کرکمن و همکاران، ۱۹۹۴؛ جلالی، ۲۰۰۷). تحقیقات متعدد انجام شده نشان داده است که با افزایش پتاسیم به خاک مقدار تثبیت پتاسیم افزایش یافته است (حسین‌پور و کلباسی، ۱۳۸۰؛ جلالی، ۱۳۸۱؛ سئال<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۰۶؛ جعفری و باقرنژاد، ۱۳۸۶؛ گلستانی‌فرد و توفیقی، ۱۳۷۸؛ اوستان و همکاران، ۲۰۰۸؛ حسین‌پور و پناهی، ۱۳۸۹؛ بستانی و ثوابی، ۱۳۹۰؛ پیشگیر، ۱۳۹۰). در مواردی نیز عکس این موضوع گزارش گردیده است. گلی‌کلانیا و همکاران (۱۳۸۴)، با مطالعه ظرفیت خاک برای تثبیت پتاسیم و کانی‌شناسی جزء رس، سیلت و شن خاک‌های زیر کشت انگور منطقه ارومیه نشان دادند که تثبیت پتاسیم با افزایش پتاسیم مصرفی (تا غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم پتاسیم) به‌طور خطی افزایش یافته است. بر اساس نتایج حاصله شدت تثبیت پتاسیم با افزایش مصرف کود پتاسیمی اندکی زیاد شده و سپس کاهش یافته

زیاد باشد فضای بین لایه‌ای با پتاسیم اشباع شده و به مقدار کمتری با یون‌های آمونیم اشباع می‌گردد (اسکرر، ۱۹۸۲). علاوه بر مقدار، زمان مصرف پتاسیم نیز در تثبیت آمونیم موثر است. وقتی پتاسیم قبل از آمونیم به خاک داده شود مقدار آمونیم تثبیت شده کم می‌شود. همچنین اگر مصرف کودهای آمونیمی مقدم بر کودهای پتاسیمی باشد، مقدار تثبیت آمونیم در لایه‌های رسی بیشتر خواهد بود (جعفری و باقرنژاد، ۱۳۸۶؛ هاولین و همکاران، ۲۰۰۵).

کیلیچ و همکاران (۱۹۹۹)، نشان دادند اضافه کردن پتاسیم قبل از افزایش آمونیم، تثبیت آمونیم را توسط کانی‌های رسی کاهش داده اما اضافه کردن پتاسیم بعد از افزایش آمونیم، تأثیری بر تثبیت آمونیم نداشته است. کینزن<sup>۱</sup> (۲۰۰۶)، در بررسی اثر آمونیم بر تثبیت و آزادسازی پتاسیم در خاک نشان داده است که ظرفیت تثبیت پتاسیم در خاک‌های با آبشویی آمونیم به شدت کاهش یافته و تنها چهار درصد از کود پتاسیم اضافه شده تثبیت شده است. آمونیم تثبیت شده در خاک‌ها سبب کاهش تثبیت پتاسیم کودی اضافه شده گردیده و از اینرو باعث افزایش کارایی کود پتاسیم شده است. کمترین مقدار تثبیت پتاسیم هفت روز پس از افزایش یون آمونیم (حدود ۴/۷-۱۷/۸ درصد) و بیشترین مقدار تثبیت هفت روز قبل از افزایش آمونیم (حدود ۱۴/۹-۳۰/۵ درصد) صورت گرفته است. در حالت افزایش همزمان پتاسیم و آمونیم مقدار تثبیت پتاسیم در حد متوسط (۴/۷-۲۴/۱ درصد) اندازه‌گیری شده است.

اگر غلظت یون پتاسیم در محیط زیاد باشد پتاسیم کانی‌های رسی را وادار به انقباض کرده و از اینرو مانع آزادسازی یون آمونیم تثبیت شده می‌گردد و برعکس (منگل و همکاران، ۱۹۹۰؛ مرزدوری<sup>۲</sup> و همکاران، ۱۹۹۴). یان و همکاران (۲۰۰۸)، نشان دادند که مصرف زیاد پتاسیم همراه با مواد آلی با نسبت کربن به نیتروژن زیاد موجب افزایش غلظت پتاسیم در فاز محلول خاک شده و مانع آزادسازی آمونیم تثبیت شده می‌گردد. پیشگیر

<sup>۱</sup>- Qinzhen

<sup>۲</sup>- Marzadori

<sup>۳</sup>- Seal



### رطوبت خاک

مقدار رطوبت خاک بر فرآیند تثبیت و آزاد شدن یون‌های پتاسیم و آمونیم تبادل‌ی خاک موثر است. در خاک‌هایی که همیشه مرطوب نگه‌داری شده‌اند تثبیت یا صورت نمی‌گیرد و یا در صورت وقوع نیز مقدار آن جزئی است. در خاک‌های مرطوب، کانی‌های رسی انبساط یافته و امکان تثبیت کاهش می‌یابد. اولکوه‌مکاران (۱۹۹۵)، در بررسی سینتیک تثبیت پتاسیم در خاک‌های دارای ورمی‌کولایت تحت رژیم‌های رطوبتی مختلف نشان داده‌اند که با ثابت بودن سایر شرایط، مقدار پتاسیم تثبیت شده در سطوح رطوبتی کمتر خاک افزایش می‌یابد. همچنین گئوویا و ائودوکسی<sup>۵</sup> (۲۰۰۷)، نشان دادند که تثبیت یون آمونیم در بین لایه کانی‌های رسی در خاک مرطوب کاهش یافته است.

در شرایط هوا خشک و یا در شرایطی که مقدار رطوبت خاک در فشارهای ماتریک زیاد قرار دارد در یک حجم کم محلول خاک، غلظت پتاسیم و آمونیم قابل دسترس<sup>۶</sup> خاک افزایش یافته و در نتیجه، افزایش شیب غلظت منجر به از دست رفتن آب بین لایه‌ای و انقباض لایه‌ها گردیده و با محبوس شدن یون آمونیم و پتاسیم مقدار تثبیت افزایش می‌یابد. چون یخبندان آب بین لایه را خارج می‌کند، می‌تواند همانند فرآیند خشک شدن در تثبیت یون‌های پتاسیم و آمونیم موثر باشد (معز اردلان و ثوابی، ۱۳۸۸؛ اوستان و همکاران، ۲۰۰۸). زانگ و اسکرر (۱۹۹۹)، نشان داده‌اند که هوا خشک کردن خاک‌های غرقابی باعث افزایش تثبیت یون آمونیم شده است. علت این امر افزایش غلظت آمونیم و انتشار یون‌های آمونیم به فضاهای بین لایه‌ای کانی‌های رسی اعلام گردیده است.

شهبازی و توفیقی (۱۳۸۶)، اثر رژیم‌های رطوبتی مختلف بر پتاسیم خاک‌های مناطق مختلف زراعی ایران را بررسی و نشان داده‌اند که در بسیاری از خاک‌های مورد مطالعه در اثر خشک شدن، یون‌های پتاسیم موجود در

است. کمبود پتاسیم خاک در چند دهه اخیر به علت مصرف زیاد کودهای نیتروژنی و فسفاتی افزایش یافته است. وانگ<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۰)، در تحقیقی در خاک‌های چین تأثیر چند نوع کود مختلف شامل سولفات آمونیم، مونو کلسیم فسفات و کلرید پتاسیم افزوده شده به خاک را بر اشکال مختلف پتاسیم در خاک مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج نشان داد که حضور سولفات آمونیم، توزیع پتاسیم بومی و پتاسیم افزوده شده به خاک‌ها را به‌طور معنی‌داری تغییر داده است. در حالی که افزایش مونو کلسیم فسفات هیچگونه تأثیری بر اشکال مختلف پتاسیم در خاک نداشته است. همچنین سولفات آمونیم، غلظت پتاسیم محلول در آب را افزایش و مقدار پتاسیم قابل تبادل خاک را کاهش داده است. این کاهش در کلیه خاک‌ها به استثنای خاک شالیزاری که دارای مقادیر قابل ملاحظه‌ای از انواع کانی‌های رسی ۱:۲ لایه بوده مشاهده گردیده است. این محققین افزون بر این که برای بهبود بازدهی کودهای پتاسیمی به ترکیب این کودها با کودهای آمونیم سولفات توصیه نموده‌اند.

### کودهای آمونیمی اضافه شده

هر قدر مقدار آمونیم موجود در خاک زیادتر باشد تثبیت آمونیم خاک نیز بیشتر خواهد بود. بر طبق اظهارات لیانگ و مککنزی<sup>۲</sup> (۱۹۹۴)، با مصرف کود آمونیمی بر میزان تثبیت آمونیم در خاک افزوده شده اما این افزایش مستقیماً متناسب با مقدار کود نیتروژن افزوده شده نیست (گیلدیال و سینگ،<sup>۳</sup> ۱۹۶۱؛ اوپواریبو و اودو،<sup>۴</sup> ۱۹۷۸؛ احمد و همکاران، ۱۹۸۲؛ دورام و ایوانز، ۱۹۸۳؛ دوراک و همکاران، ۱۹۹۶؛ جوآنگ و همکاران، ۲۰۰۱؛ پیشگیر، ۱۳۹۰).

<sup>۱</sup>- Wang

<sup>۲</sup>-Liang and Mackenzie

<sup>۳</sup>- Ghildyal and Singh

<sup>۴</sup>- Opuwaribo and Odu.

<sup>۵</sup>-Gouveia and Eudoxie

<sup>۶</sup>-Labile

و دوره‌های غرقاب شدن خاک در خاک‌های تحت کشت برنج، ظرفیت جذب آمونیم در خاک‌های زراعی کمتر از خاک‌های شالیزاریبوده است. بر طبق اظهارات آن‌ها احیای اراضی باتلاقی باعث افزایش دفع آمونیم و هدرروی نیتروژن خاک می‌گردد.

جعفری و باقرنژاد (۱۳۸۶)، با بررسی اثرات خشک و تر شدن و سیستم‌های کشت بر مقدار تثبیت پتاسیم خاک‌ها و رس‌ها نشان دادند که میزان تثبیت پتاسیم با افزایش تعداد دفعات خشک و تر کردن، روند نزولی داشته است. آن‌ها دلیل این امر را تنوع کانی‌های رسی خاک‌های مذکور و کاهش ظرفیت تبادل کاتیونی رس‌ها در اثر فرآیند تثبیت اعلام کردند.

تثبیت یا آزادسازی پتاسیم با خشک و تر شدن خاک تا حد بسیار زیادی به وضعیت کلوئیدهای موجود در خاک و غلظت یون‌های پتاسیم در محلول خاک بستگی دارد (هانگ و همکاران، ۲۰۰۵). در خاک‌های با پتاسیم تبدالی زیاد، خشک شدن باعث تثبیت پتاسیم شده در حالی که در خاک‌های با مقدار پتاسیم تبدالی کم خشک شدن باعث آزاد شدن پتاسیم می‌شود. علت این موضوع آن است که پتاسیم تبدالی و محلول باهم به حال تعادل درمی‌آیند. اگر پتاسیم اضافه شود، تعادل به طرف تثبیت می‌رود در صورتی که پتاسیم محلول خاک کم باشد پتاسیم از کانی‌ها آزاد خواهد شد (استینکمپ<sup>۲</sup> و همکاران، ۱۹۸۹؛ اولک و همکاران، ۱۹۹۵). بستانی و ثواقبی (۱۳۹۰)، در خاک‌های تحت کشت نیشکر استان خوزستان نشان داده‌اند که خشک کردن نمونه‌های خاک سبب رهاسازی بیشتر پتاسیم در تیمار شاهد و تثبیت بیشتر پتاسیم در تیمارهای مختلف مصرف پتاسیم شده است.

خشک کردن خاک نه تنها به دلیل افزایش شیب غلظت باعث پخشیدگی یون پتاسیم به عمق لایه‌های کانی‌های رسی ۲:۱ لایه و خالی شدن مجدد مواضع تثبیت در لبه‌ها (که در هنگام مرطوب بودن توسط یون‌های پتاسیم اشغال شده بودند) می‌شود، بلکه به سبب ایجاد

فضای بین لایه‌ای رس‌ها به همراه سایر کاتیون‌ها آب خود را از دست می‌دهد. این عمل سبب فروریزش لایه‌ها و در نتیجه تثبیت پتاسیم می‌گردد. بخش عمده پتاسیمی که بدین طریق تثبیت می‌شود در مرحله بعد توسط یون‌های آمونیم که خود سبب فروریزش لایه‌ای و مسدود شدن فضای بین لایه‌ای می‌گردند، نمی‌تواند آزاد شود. اگر خاک مرطوب شود در اثر آبگیری کاتیون‌ها و به ویژه آبگیری یون پتاسیم امکان آزاد شدن بخشی از پتاسیم تثبیت شده فراهم می‌شود. با این کار مقدار پتاسیم تبدالی نسبت به خاک هوا خشک افزایش خواهد یافت. آنان هم چنین نشان داده‌اند که در تعداد معدودی از خاک‌ها، خشک کردن خاک باعث آزاد شدن پتاسیم از شکل تثبیت شده، به شکل تبدالی می‌گردد.

#### تناوب خشک و تر شدن

اثر چرخه‌های خشک و تر شدن خاک بر مقدار تثبیت پتاسیم به خوبی ثابت شده است. تحقیقات مختلف نشان داده است که هوا خشک کردن خاک باعث افزایش تثبیت پتاسیم اضافه شده می‌شود (زنگ و همکاران، ۲۰۰۰).

با افزایش تعداد دوره‌های خشک و تر شدن مقدار تثبیت یون آمونیم به طور معنی‌داری افزایش می‌یابد (احمد و همکاران، ۱۹۸۲؛ اولک و همکاران، ۱۹۹۵). یو<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۱)، در بررسی اثر چرخه‌های یخ بستن و ذوب شدن در جذب و دفع آمونیم خاک‌های اراضی مرطوب نشان داده‌اند که با افزایش چرخه‌های یخ بستن و ذوب شدن، مقدار جذب آمونیم افزایش و هدرروی نیتروژن کاهش یافته است. خاک‌های شالیزار بیشترین مقدار ظرفیت جذب و کمترین مقدار ظرفیت دفع آمونیم را در مقایسه با دیگر خاک‌های زراعی داشته‌اند. دلیل این امر احتمالاً زیاد بودن مقدار ظرفیت تبادل کاتیونی رس‌های خاک در خاک‌های زراعی است. نتایج آن‌ها نشان داده است که به علت تغییر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی

<sup>2</sup>-Steenkamp

<sup>1</sup>- Yu

اینونی<sup>۵</sup> (۱۹۸۳)، ضمن بررسی فرآیند تثبیت پتاسیم توسط کانی رسی مونتموریلونایت نشان داده است که در دما و غلظت ثابت پتاسیم با افزایش pH خاک از ۶ به ۱۰/۷، مقدار تثبیت پتاسیم به طور متوسط از ۱۲ درصد به ۲۵ درصد افزایش یافته است. احتمالاً در pH زیاد، اکسیدهای آلومینیم بین لایه‌ای حل شده و در این شرایط پتاسیم می‌تواند با نزدیک شدن لایه‌ها در بین لایه‌های رس تثبیت شود (بوهن و همکاران، ۲۰۰۱). سیمونسون و همکاران (۲۰۰۹)، با بررسی تثبیت و آزادسازی پتاسیم خاک‌های جنوب و مرکز سودان نشان داده‌اند که در نمونه‌های خاک با pH کم و در حضور هیدروکسی آلومینیم بین لایه‌ای مقدار تثبیت پتاسیم توسط کانی‌های رس کاهش یافته است. سنال و همکاران (۲۰۰۶)، در خاک‌های شرقی هند همبستگی مثبت و معنی‌داری (۰/۶۵۵) بین مقدار تثبیت پتاسیم و pH خاک یافته‌اند. بستانی و ثوابی (۱۳۹۰)، در بررسی خاک‌های تحت کشت استان خوزستان نشان داده‌اند که بین مقدار پتاسیم تثبیت شده و pH خاک همبستگی منفی وجود دارد.

مقدار آمونیم تثبیت شده در خاک‌ها به شدت به طبیعت مواد مادری و نوع استفاده از خاک بستگی دارد. چنانکه در خاک‌های حاصل از مواد آهکی و نمکی، مقدار آمونیم تثبیت شده نسبت به خاک‌های حاصل از مواد گرانیتی بیشتر است (زانگ و همکاران، ۲۰۰۷). گیلدیل و سینگ (۱۹۶۱)، با بررسی تثبیت آمونیم خاک‌های زراعی و جنگلی هند نشان داده‌اند که خاک جنگلی در مقایسه با خاک زراعی دارای واکنش قلیایی بیشتر، تمایل بیشتری برای تثبیت آمونیم دارد. دورام و ایوانز (۱۹۸۳)، نشان دادند که در خاک‌های هالیدمن<sup>۶</sup> با pH کم در مقایسه با خاک‌های گلف<sup>۷</sup> آمونیم کمتری تثبیت شد است.

لغزش لایه‌ها بر روی هم، دسترسی به بعضی مواضع تثبیت پراثرژی درونی‌تر را افزایش می‌دهد (اسپارکس و هانگ، ۱۹۸۵). در خاک‌هایی که به آن‌ها پتاسیم اضافه نشده است، دوره‌های خشک و تر شدن بسته به نوع و خصوصیات کانی‌های خاک، مقدار پتاسیم قابل دسترس و دما موجب افزایش تثبیت یا آزاد شدن پتاسیم می‌گردد (مکلین و واتسون<sup>۱</sup>، ۱۹۸۵). کانی‌های خاک از جمله میکای هوادیده و ورمی‌کولایت، پتاسیم را در شرایط رطوبتی مثل شرایط خشک تثبیت می‌کنند. در صورتی که برخی اسمکتایت‌ها پتاسیم را تنها در شرایط خشک تثبیت می‌کنند (هانگ و همکاران، ۲۰۰۵). خاک‌هایی که حاوی هیدروکسی آلومینیم بین لایه‌ای و مقدار قابل توجهی پتاسیم باشند نمی‌توانند در اثر خشک شدن پتاسیم آزاد کنند (هانگ، ۲۰۰۵).

### pH خاک

واکنش خاک از طریق تأثیر بر فرآیند تثبیت و آزادسازی یون‌های پتاسیم و آمونیم نقش مهمی در تغییر مقدار قابل دسترس این عناصر در خاک دارد. خاک‌های اسیدی قدرت تثبیت چندانی ندارند. در خاک‌های اسیدی، آلومینیم سه ظرفیتی، گونه‌های هیدروکسید آلومینیم و پلیمرهای آن، مکان‌های پیوندی انتخابی روی کانی‌های رسی را اشغال می‌کنند. همچنین تحت شرایط اسیدی حضور هیدروکسیدهای آلومینیم و هیدروکسیدهای آهن بین لایه‌ای کانی‌های رسی منبسط شونده از فرو ریزش ورقه‌های چهاروجهی که لازمه تثبیت پتاسیم و آمونیم است جلوگیری می‌کنند. با افزایش pH خاک‌های اسیدی، اولاً افزایش غلظت یون OH باعث رسوب کاتیون آلومینیم سه ظرفیتی گردیده و دوماً با افزایش یون‌های OH بار مثبت هیدروکسیدهای آلومینیم بتدریج خنثی می‌شود (مالولتا<sup>۳</sup>، ۱۹۸۵؛ بوهن<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۰۱).

<sup>5</sup> - Inoue

<sup>6</sup> - Halidmand

<sup>7</sup> - Guelph

<sup>1</sup> - Mclean and Watson

<sup>2</sup> - OH

<sup>3</sup> - Malovolta

<sup>4</sup> - Bohn

## ظرفیت تبادل کاتیونی

در شرایط یکسان، خاک‌های رسی با ظرفیت تبادل کاتیونی بیشتر یون‌های پتاسیم بیشتری جذب می‌کنند. در این خاک‌ها ذخیره پتاسیم تثبیت شده به شکل غیر قابل تبادل افزایش و جذب پتاسیم کاهش می‌یابد (گورلی<sup>۱</sup>، ۱۹۹۹). بخشی از ظرفیت تبادل کاتیونی که نقش اصلی را در فرآیند تثبیت پتاسیم ایفاء می‌کند ظرفیت تبادل کاتیونی نشأت گرفته از مکان‌های موجود در فضای بین لایه‌ای رس‌هایی همچون اسمکتایت و ورمی‌کولایت بوده که برای این رس‌ها بیش از ۹۰ درصد کل بار را شامل می‌شود (لاقالی<sup>۲</sup>، ۱۹۸۱). با افزایش مقدار ظرفیت تبادل کاتیونی خاک (CEC) و به‌ویژه رس‌ها، میزان تثبیت پتاسیم نیز افزایش می‌یابد (بابیدو همکاران، ۱۹۹۱؛ حسین‌پور و کلباسی، ۱۳۸۰؛ سنال و همکاران، ۲۰۰۶؛ جعفری و باقرنژاد، ۱۳۸۶). گلستانی فرد (۱۳۷۵)، همبستگی ضعیف بین میزان تثبیت پتاسیم و مقدار ظرفیت تبادل کاتیونی خاک را به وجود مقدار زیاد ماده آلی در خاک مربوط دانست. زیرا بخش اعظمی از ظرفیت تبادل کاتیونی در خاک‌های مورد مطالعه از مواد آلی نشأت گرفته که اصولاً فاقد خصوصیات تثبیت می‌باشد. گلستانی فرد و توفیقی (۱۳۷۸)، در خاک‌های شالیزاری شمال ایران (مازندران و گیلان) و بستانی و ثوابی (۱۳۹۰)، در خاک‌های استان خوزستان بین تثبیت پتاسیم و مقدار ظرفیت تبادل کاتیونی خاک همبستگی معنی‌داری مشاهده نکرده‌اند. تثبیت پتاسیم و یا آمونیم به دلیل ایجاد تغییر در ساختمان کانی‌های رسی و کاهش چگالی بار الکتریکی در واحد سلولی رس‌ها، سبب کاهش ظرفیت تبادل کاتیونی خاک می‌شود (جعفری و باقرنژاد، ۱۳۸۶).

## مواد آلی خاک

شواهد زیادی دال بر اثر مواد آلی بر قابلیت استفاده پتاسیم و یا تثبیت آن وجود دارد (استینکمپ و همکاران، ۱۹۸۹). لیائو<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۳)، در خاک‌های شالیزاری نشان داده‌اند که ماده آلی بر جذب سطحی پتاسیم در غلظت‌های کم ( $120 \leq$  میلی‌گرم بر لیتر) اثرات مثبت و در غلظت‌های بیشتر ( $240$  میلی‌گرم بر لیتر) اثرات منفی دارد. در این مطالعه پس از حذف ماده آلی خاک، میزان جذب سطحی پتاسیم ۶۰ تا ۱۵۸ درصد نسبت به خاک‌هایی که ماده آلی آن‌ها حذف نگردیده بود افزایش یافته است. رفاهی (۱۳۵۹)، در بررسی تثبیت پتاسیم خاک‌های اسیدی و آهکی ایران نشان داده است که ماده آلی تأثیری در تثبیت پتاسیم خاک ندارد. اسپارکس و لیهارد<sup>۴</sup> (۱۹۸۲)، در بررسی‌های خود در خاک‌های دلاویر نشان داده‌اند که در نمونه‌های یک خاک‌رخ، تثبیت پتاسیم در افق سطحی (که دارای ماده آلی بیشتری بود) نسبت به افق‌های تحت‌الارضی کمتر می‌باشد. احتمالاً ماده آلی بعضی از مکان‌های تبدالی بین لایه‌ای را اشغال می‌کند.

تثبیت آمونیم در مواد آلی خاک ناچیز است (کوالینکو و کامرون<sup>۵</sup>، ۱۹۷۶). مواد آلی به علت وزن ملکولی کم، مانع انتشار یون‌های آمونیم به بین لایه‌های کانی‌های رسی خاک گردیده و از این طریق مانع تثبیت آمونیم در خاک می‌شوند (پرت و استوارت<sup>۶</sup>، ۱۹۷۰). زانگ و همکاران (۲۰۱۳)، در بررسی اثر اسید هومیک بر واکنش‌های یون‌های پتاسیم و آمونیم با کانی‌های رسی خاک نشان داده‌اند که اسید هومیک با تشکیل پوشش بر روی سطوح کانی‌های رسی بر واکنش‌های پتاسیم و آمونیم با کانی‌های رسی موثر واقع شده و ممکن است قابلیت دسترسی کاتیون‌های تغذیه‌ای گیاهان در خاک‌های با مواد آلی را بهبود بخشیده باشد. پوشش اسید هومیک به‌طور معنی‌دار جذب کاتیون آمونیم را افزایش داده که این امر احتمالاً نشان دهنده آن است که پوشش اسید

<sup>3</sup> - Liao<sup>4</sup> - Libhardt<sup>5</sup> - Cameron<sup>6</sup> - Porter and Stewart<sup>1</sup> - Gourley<sup>2</sup> - Lagaly

هومیک رقابت آمونیم برای مکان‌های تثبیت را افزایش داده است.

نتایج برخی از تحقیقات نشان می‌دهد که با افزایش عمق خاک بر میزان تثبیت آمونیم در خاک افزوده می‌شود. محققان متعددی دلیل این امر را احتمالاً ناشی از کم شدن مقدار مواد آلی در خاک با افزایش عمق دانسته‌اند (نیلسن، ۱۹۷۲؛ ریچسیگل و همکاران، ۱۹۸۸؛ الماسی و همکاران، ۲۰۰۲؛ زانگ و همکاران، ۲۰۰۷). گیلدیال و سینگ (۱۹۶۱)، با بررسی تثبیت آمونیم خاک‌های تحت کشت و جنگلی هند نشان داده‌اند که در خاک‌های کشت شده، مقدار تثبیت آمونیم در لایه‌های سطحی خاک بیشتر از لایه‌های عمقی بوده در حالی که در خاک‌های جنگلی مقدار تثبیت آمونیم با افزایش عمق بیشتر شده است. به عبارت دیگر در عمق خاک، مقدار تثبیت آمونیم بیشتر از سطح خاک است که دلیل این امر احتمالاً دخالت مواد آلی خاک و غنی بودن لایه‌های سطحی خاک از مواد آلی می‌باشد. احمد و همکاران (۱۹۸۲)، نشان دادند که تثبیت آمونیم در بخش اسید فولویک مواد آلی بیشتر از بخش اسید هومیک مواد آلی (به ترتیب ۶۹-۲۵ درصد و ۳-۰ درصد) بوده است.

### رهیافت ترویجی

با توجه به این که تثبیت پتاسیم توسط رس‌ها بر قابلیت جذب آن در خاک اثر گذاشته و اشباع شدن تمام مکان‌های خالی در ساختار رس با یون‌های پتاسیم از نظر اقتصادی عملی نمی‌باشد می‌توان تا حدی از رقابت شدید یون‌های آمونیمو پتاسیم برای محل‌های بین لایه‌های رس در مدیریت مصرف کود پتاسیم استفاده برد. به تله افتادن یون آمونیم در فضای بین لایه‌ای با فرآیندی مشابه با پتاسیم صورت می‌پذیرد. قرار گرفتن یون آمونیم در فضای بین لایه‌ای باعث کاهش ظرفیت تثبیت پتاسیم افزوده شده به خاک شده و در نتیجه قابلیت جذب پتاسیم برای گیاه

افزایش می‌یابد. قرار گرفتن یون آمونیم در فضای بین لایه‌ای مانع از آبشویی نیتروژن شده و سبب می‌شود که آمونیم تثبیت شده به طور تدریجی در طی فصل رشد گیاه آزاد شده و به صورت نترات در اختیار گیاه قرار گیرد. اطلاع از پتانسیل تثبیت پتاسیم و آمونیم خاک و عوامل موثر بر آن می‌تواند در مدیریت صحیح حاصلخیزی خاک و تغذیه گیاه به ویژه به هنگام محاسبه مقدار کودهای نیتروژنی و پتاسیمی مورد نیاز کمک نماید. با توجه به نتایج مطالعات ارائه شده در این مقاله تثبیت و رهاسازی پتاسیم تابع غلظت پتاسیم در محلول خاک است بنابراین مصرف بیش از اندازه پتاسیم از طرفی سبب جذب بیش از حد در گیاهان و از سوئی دیگر باعث تثبیت آن توسط خاک‌ها می‌شود. بعلاوه مصرف بیش از اندازه کودهای پتاسیمی، سبب آزاد شدن آمونیم از خاک شده و در اثر تبدیل به نترات می‌تواند از خاک‌رخ شسته شده و سبب آلودگی محیط‌زیست شود. نظر به اینکه مصرف آمونیم نیز می‌تواند سبب آزاد سازی پتاسیم شود بنابراین در مصرف کودهای پتاسیمی باید اثرات مصرف بیش از حد کودهای پتاسیمی و یا کودهای آمونیمی نیز لحاظ گردد. همچنین نتایج نشان داده است که در مدیریت خاک‌های شالیزاری توجه به میزان ماده آلی در تثبیت و نگهداری یون آمونیم خاک قابل توجه است. استفاده بیش از اندازه کودهای ازته آمونیمی می‌تواند در تخلیه بیشتر کانی‌ها از پتاسیم و افزایش قابلیت استفاده آن برای گیاهان زراعی بنحو چشمگیری اثرگذار باشد. عدم مصرف کود پتاسیمی در بسیاری از خاک‌های ایران و همچنین عدم واکنش برخی از گیاهان زراعی به مصرف کودهای پتاسیمی ممکن است به آزاد شدن پتاسیم در اثر ورود مقادیر زیاد آمونیم از کودهای حاوی این ترکیب بخصوص اوره باشد. این فرآیند باید در کاربرد کودهای پتاسیمی و یا مطالعات علمی آن‌ها مورد توجه قرار گیرد.

## فهرست منابع

۱. بستانی، ع. و غ. ر. ثوابی فیروزآبادی. ۱۳۹۰. بررسی ظرفیت تثبیت پتاسیم در تعدادی از خاک‌های زیر کشت نیشکر خوزستان. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۵: ۹۹۳-۹۸۲.
۲. پیشگیر، م. ۱۳۹۰. مقایسه تثبیت پتاسیم و آمونیم در اراضی با کاربری‌های مختلف. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی رامین، خوزستان.
۳. جعفری، س. و م. باقرنژاد. ۱۳۸۶. بررسی اثرات تر و خشک شدن و سیستم‌های کشت بر تثبیت پتاسیم در برخی از خاک‌ها و رس‌های خوزستان. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. دانشگاه صنعتی اصفهان. ۱۱(۴۱): ۷۵-۹۰.
۴. جلالی، م. ۱۳۸۱. اثر تیمارهای پتاسیم بر پتاسیم محلول و تبادل خاک. مجله علوم آب و خاک. ۱۶ (۱): ۱-۱۱.
۵. حسین‌پور، ع. و م. ر. پناهی. ۱۳۸۹. گنجایش تثبیت پتاسیم و ویژگی‌های بار در شماری از خاک‌های آهکی استان همدان. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک. ۱۴ (۵۲): ۷۳-۶۵.
۶. حسین‌پور، ع. ۱۳۸۷. شیمی و حاصلخیزی خاک. انتشارات دانشگاه پیام‌نور. تهران. ۱۷۰-۱۱۶.
۷. حسین‌پور، ع. و م. کلباسی. ۱۳۸۰. تثبیت پتاسیم و ویژگی‌های بار الکتریکی رس خاک در شماری از خاک‌های مناطق مرکزی و شمال ایران. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. ۵ (۳): ۹۳-۷۹.
۸. رفاهی، ح. ۱۳۵۹. مقایسه تثبیت پتاسیم در برخی از خاک‌های آهکی و اسیدی ایران. مجله علوم کشاورزی ایران. ۱۱ (۱ و ۲ و ۳): ۷۴-۶۲.
۹. سالاردینی، ع. ا. ۱۳۸۷. کودها و حاصلخیزی خاک. انتشارات دانشگاه تهران. ۴۲۸.
۱۰. شهبازی، ک. و ح. توفیقی. ۱۳۸۶. اثر رژیم‌های رطوبتی مختلف بر پتاسیم تبدلی خاک. مجله علوم کشاورزی ایران. ۳۸ (۱): ۱۷۱-۱۶۱.
۱۱. گلستان‌فرد، ع. و ح. توفیقی. ۱۳۷۸. بررسی تثبیت در خاک‌های شالیزاری شمال ایران. مجله علوم کشاورزی ایران. ۳۹(۱): ۱۸۵-۱۷۳.
۱۲. گلستانی فرد، ع. ۱۳۷۵. بررسی تثبیت پتاسیم در خاک‌های شالیزاری شمال ایران. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشکده کشاورزی دانشگاه تهران.
۱۳. گلی‌کلانیا، ا.، م. ح. روزی طلب، م. ج. ملکوتی و ع. صمدی. ۱۳۸۴. مطالعه ظرفیت خاک برای تثبیت پتاسیم و کانی شناسی جزء رس، سیلت و شن خاک‌های زیر کشت انگور منطقه ارومیه با پراش پرتو ایکس. نهمین کنگره علوم خاک ایران. تهران. ۳۸۸-۳۸۷.
۱۴. معزاردلان، م. و غ. ثوابی فیروزآبادی. ۱۳۸۸. مدیریت حاصلخیزی خاک برای کشاورزی پایدار. تهران. انتشارات دانشگاه تهران. ۳۸۷.
۱۵. ملکوتی، م. ج. و م. همایی. ۱۳۸۳. حاصلخیزی خاک‌های مناطق خشک و نیمه خشک (مشکلات و راه حل‌ها). انتشارات دانشگاه تربیت مدرس. ۲۷۸-۶۸.
16. Ahmad, N., E.D. Reid., M. Nkrumah., S.M. Griffith., and L. Gabriel. 1982. Crop utilization and fixation of added ammonium in soils of the west. *Journal Plant and Soil*. 67: 167-186.
17. Arifin, H.F., and K.H. Tan. 1973. Potassium fixation and reconstitution of micaceous structure in soils. *Soil Science*. 116: 31-35.

18. Badraoui, M., and P.R. Bloom.1989. The effect of wetting and drying cycles, temperature and extracting solution on measured potassium fixation in soils of two region of Morocco. *Commune. Soil Science Plant Analyses*. 20: 1353-1375.
19. Bajwa, M.I. 2008. Comparative ammonium and potassium fixation by some wetland rice soil clay as affected by mineralogical composition and treatment sequence. *Journal of Agronomy and Crop Science*. 158 (1): 65-68.
20. Bajwa, M.I. 1985. Ammonium and potassium fixation by wetland rice soils. *Journal of Agric Reserch*. 6 (1): 23-25.
21. Bajwa, M.I. 1981. Soil clay mineralogy in relation to fertility management: effect of soil clay mineral composition on potassium fixation under conditions of upland rice soils. *Fertilizer Research*. 2: 193-197.
22. Barre, P., B. Velde., C. Fontaine., N. Catel., and L. Abbadie. 2008. Which 2:1 clay minerals are involved in the soil potassium reservoir? Insights from potassium addition or removal experiments on three temperate grassland soil clay assemblages. *Geoderma*. 146: 216-223.
23. Barre, P., B. Velde., N. Catel., and L. Abbadie. 2007. Soil plant potassium transfer: impact of plant activity on clay minerals as seen from X-ray diffraction. *Plant Soil*. 292: 137-14
24. Bohn, H.L., B.L. Mcneal., and G.A. O'connor. 2001. *Soil Chemistry*. 3nd. Wiley and Sons, New York. 309.
25. Borchardt, G. 1989. Smectites. In: Dixon, J. B. and Weed, S. B. (Eds.). *Minerals in soil environments*. 2nd. Soil Science Society America. Madison, Wisconsin. 675-728.
26. Bouabid, R., M. Badraoui., and P.R. Bloom. 1991. Potassium fixation and charge characteristics of soil clays. *Soil Science Society of American Journal*. 55: 1493-1498.
27. Brady, C.N., and R.R. Weil. 2008. *The Nature and properties of soils*. (15 Ed.) Prentice Hall, Upper Saddle River. New Jersey 07458.
28. Chen, S.Z., P.F. Low., and C.B. Roth. 1987. Relation between potassium fixation and the oxidation state of octahedral iron. *Soil Science Society American, Journal*. 51: 82-86.
29. Chittamart, N., A. Suddhiprakaran., I. Kheoruenromne., and R.J. Gilkes. 2010. Charge properties and potassium fixation by clay from Thai Vertisols. 19th Congress of Soil Science. 26-29.
30. Doram, D.R., and L.J. Evans. 1983. Native fixed ammonium and fixation of added ammonium in relation to clay mineralogy in some Ontario soils. *Can. Journal Soil Science Society*. 63: 631-639.
31. Douglas, L.A. 1989. Vermiculites. In: Dixon, B. and Weed, S. B, (eds), *Minerals in soil environments*. Soil Science Society American. Madison, Wisconsin. 635-673.
32. Durak, A., K. Kilic., and H. Yildiz. 1996. The ammonium fixation in two great soil groups having different clay mineralogy during growth season. *European Society for New Methods in Agricultural Research*. 15-21.
33. Dyal, R.S., and S.B. Hendricks. 1952. Formation of mixed layer minerals by potassium fixation in montmorillonite. *Soil Science Society of America*. 16: 45-48.
34. Elmaci, O.L., M. Secer., O. Erdemir., and N. Iqbal. 2002. Ammonium fixation properties of some arable soils from the Aegean region of Turkey. *European Journal of Agronomy*. 17: 199-208.

35. Feigenbaum, S., A. Hadas., M. Sofer., and J.A.E. Molina. 1994. Clay fixed ammonium as a source of available nitrogen. *Soil Science Society American Journal*. 58: 980-985.
36. Ghildyal, B.P., and P.N. Singh. 1961 Ammonium fixation in cultivated and afforested alluvial soil. *Soil Science and Plant Nutrition*. 6 (4): 164-169.
37. Gourley, C.J.P. 1999. Potassium. In *Soil analysis and interpretation manual*. (Eds. Peverill, K. I., Sparrow, L. A. and Reuter, D. J). CSIRO Publishing, Collinwood, VIC 3066, Australia. 229-243.
38. Gouveia, G.A., and G.D. Eudoxie. 2007. Distribution of fertilizer N among fixed ammonium fraction as affected by moisture and fertilizer source and rate. *Biol Fertil Soils*. 44: 9-18.
39. Havlin, J.L., J.D. Beaton., S.L. Tisdale., and W.L. Nelson. 2005. *Soil fertility and fertilizers*. Prentice-Hall, Inc, USA.
40. Havlin, J.L., J.D. Beaton., S.L. Tisdale., and W.L. Nelson. 1999. *Soil fertility and fertilizers*. Prentice-Hall, Inc, USA. 207.
41. Havlin, J.L., J.D. Beaton., S.L. Tisdale., and W.L. Nelson. 1991. *Soil fertility and fertilizers in introduction to nutrient management*. Prentice-Hall. 196-216.
42. Huang, P.M. 2005. Chemistry of potassium in soils. In: Tabatabai, M. A. and Sparks, D. L. (Eds.). *Chemical Processes in Soils*. Soil Science Society of America. Madison Wisconsin, USA. 227-292.
43. Huang, P.M., J.M. Zhou., J.C. Xie., and M.K. Wang. 2005. Potassium in soils. In: *Encyclopedia of Soils in the Environment* (Ed. Daniel Hillel et al.). Academic Press, New York, USA. 303-314.
44. Inoue, A. 1983. Potassium fixation by clay minerals during hydrothermal treatment. *Clay and Clay Minerals*. 31 (2): 81-91.
45. Jalali, M. 2010. Multivariate statistical analysis of potassium status in agricultural soils in Hamadan, Western Iran. *Pedosphere*. 20: 293-303.
46. Jalali, M. 2007. A study of quantity/intensity relationships of potassium in some calcareous soils of Iran. *Arid Land Res Management*. 21: 133-141.
47. Juang, T.C., M.K. Wang., H.J. Chen., and C.C. Tan. 2001. Ammonium fixation by surface soils and clays. *Soil Science*. 166: 345-352.
48. Kilic, K., M.R. Derici., and K. Saltali. 1999. The ammonium fixation in great soil groups of tokat region and some factors affecting the fixation. *Journal of Agriculture and Forestry*. 23: 673-678.
49. Kirkman, J.H., A. Basker., A. Surapaneni., and H. MacGregor. 1994. Potassium in the soils of New Zealand a review. *New Zealand Journal of Agricultural Research*. 37: 207-227.
50. Komadel, P., J. Madejova., and J.W. Stucki. 2006. Structural Fe (III) reduction in smectites. *Apply. Clay Science*. 34: 88-94.
51. Kowalenko, C.G., and S. Yu. 1996. Solution, exchangeable and clay-fixed ammonium in south coast British Columbia soils. *Agriculture and Agri-Food Canada*. 473-483.
52. Kowalenko, C.G., and D.R. Cameron. 1976. Nitrogen transformations in an incubated soil as affected by combination of moisture and temperature and adsorption fixation of ammonium. *Canadian Journal Soil Science*. 56: 63-70.
53. Lagaly, M. 1981. Characterization of clay by organic compounds. *Clay Minerals*. 16: 1-21.
54. Liang, B.C., and A.F. Mackenzie. 1994. Fertilization rates and clay fixed ammonium in two Quebec soils. *Plant and Soil*. 163: 103-109.



55. Liao, Y.L., S.X. Zheng., J. Nie., J. Xie., Y.H. Lu., and X.B. Qin. 2013. Long-term effect of fertilizer and rice straw on mineral composition and potassium adsorption in a reddish paddy soil. *Journal of Integrative Agriculture*. 12: 694-710.
56. Liu, Y.L., B. Zhang., C.L. Li., F. Hu., and B. Velde. 2008. Long-term fertilization influence on clay mineral composition and ammonium adsorption in rice paddy soils. *Soil Science Society American Journal*. 72: 1580-1590.
57. Lu, C., X. Zhang., X. Chen., Y. Shi., J. Ma., M. Zhao., G. Chi., and B. Huang. 2010. Fixation of labeled (15NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and its subsequent release in black soil of Northeast China over consecutive crop cultivation. *Soil and Tillage Research*. 106: 329-334.
58. Lv, G., X. Wang., L. Liao., Z. Li., and M. He. 2013. Simultaneous removal of low concentrations of ammonium and humic acid from simulated groundwater by vermiculite/palygorskite columns. *Applied Clay Science*. 86: 119-124.
59. Malovolta, E. 1985. Potassium status of tropical and subtropical region soils in Potassium in Agriculture. Munson, R.D. (Ed.). American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin. 163-200.
60. Marzadori, C., L. Vittori., and P. Gioacchini. 1994. Turnover of interlayer ammonium in soil cropped with sugar beet. *Biol Fertil Soils*. 18: 27-31.
61. Mclean, E.O., and M.E. Watson. 1985. Soil measurements of plant available potassium. In: Munson, R. D. (ed), Potassium in agriculture. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI. 277-308.
62. Mela Mela, P. 1962. Fixation of ammonium by clay minerals in relation to probable effects on the vegetative development of plants. *Soil Science*. 93: 189-194.
63. Mengel, K., D. Horn., and H. Tributh. 1990. Availability of interlayer ammonium as related to root vicinity and mineral type. *Soil Science*. 149 (3): 131-137.
64. Murashkina, M.A., R.J. Southard., and G.S. Petty-grove. 2007. Potassium fixation in San Joaquin valley soils derived from granitic and non-granitic alluvium. *Soil Science Society American Journal*. 71: 125-132.
65. Murashkina, M.A., R.J. Southard., and G.S. Petty-grove. 2007. Silt and fine sand fractions dominate K fixation in soils derived from granitic alluvium of the San Joaquin Valley, California. *Geoderma*. 141:283-293.
66. Nielsen, J.D. 1972. Fixation and release of potassium and ammonium ions in Danish soils. *Plant and Soil*. 36: 71-88.
67. Ningappa, N., and N. Vasuki. 1989. Potassium fixation in acid soils of Karnataka. *Soil Science Society Journal*. 37: 391-392.
68. Olk, D.C., K.G. Cassman., and R.M. Carlson. 1995. Kinetics of potassium fixation in vermiculite soils under different moisture regimes. *Soil Science Society of American Journal*. 59: 423-429.
69. Opuwaribo, E., and C.T.I. Odu. 1978. Ammonium fixation in Nigerian soils: 4. the effects time, potassium and wet and dry cycles on Ammo fixation. *Journal Soil Science*. 125.
70. Oustan, S.H., M. Asghari., M.R. Neyshabouri., and A. Bybordi. 2008. Potassium fixation affected by moisture conditions in some soils of Azerbaijan. *International meeting on soil fertility land management and agro-climatology*. Turkey. 619-625.
71. Porter, L.K., and B.A. Stewart. 1970. Organic interferences in the fixation of ammonium by soils and clay minerals. *Soil Science*. 100: 229-233.
72. Prasad, R., and J. Power. 1997. Soil fertility management for sustainable agriculture. Boca New York. 219-223.
73. Qinzhen, F. 2006. Influence of ammonium on release and fixation of potassium in soil. *Institute of Soil Science. Academia Sinica*.

74. Rechcigl, J.E., M.R. Teel., and D.L. Spark. 1988. Ammonium fixation from area as influenced by nitrapyrin. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 19 (14): 1583-1591.
75. Ross, G.J., and A.R. Cline. 1984. Potassium exchange characteristics in relation to mineralogical properties and potassium uptake by grapes of selected soils in Niagara Peninsula of southern Ontario. *Can. Journal Soil Science*. 64: 87-98.
76. Sardi, K., and G. Csitari. 1998. Potassium fixation of different soil types and nutrient levels. *Commun. Soil Science and Plant Anal*. 29: 1843-1850.
77. Scherer, H.W., and S. Weimar. 1994. Fixation and release of ammonium by clay minerals after slurry application. *European Journal of Agronomy*. 3: 23-28.
78. Scherer, H.W. 1993. Dynamics and availability of the non-exchangeable  $\text{NH}_4^+$ -N. *European Journal of Agronomy*. 2: 149-160.
79. Scherer, H.W. 1982. Fixed  $\text{NH}_4$ -N in relation to EUF-extractable K. *Plant Soil*. 64: 67-71.
80. Schneiders, M., and H. Scherer. 1998. Fixation and release of ammonium in flooded rice soils as affected by redox potential. *European Journal of Agronomy*. 8: 181-189.
81. Seal, A., R. Bera., K. Mukhopadhyay., and P. Bhattacharyya. 2006. Potassium fixation capability of some acid Alfisols developed under tropical environment in Eastern India. *International Journal of Soil Science*. 1 (2): 128-133.
82. Simonsson, M., S. Hillier., and I. Oborn. 2009. Change in clay minerals and potassium fixation capacity as a result of release and fixation of potassium in long-term field experiments. *Geoderma*. 151: 109-120.
83. Simonsson, M., S. Andersson., Y. Rangel., S. Hillier., L. Mattsson., and I. Oborn. 2007. Potassium release and fixation as a function of fertilizer application rate and soil parent material. *Geoderma*. 140: 188-198.
84. Smith, S.J., J.W. Power., and W.D. Kemper. 1994. Fixed ammonium and nitrogen availability indexes. *Soil Science*. 158: 132-140.
85. Sparks, D.L. 1987. Potassium dynamics in soils. In: Stewart, B.A. (Ed.), *Advances in soil science*. 6: 1-63
86. Sparks, D.L., and P.M. Huang. 1985. Physical chemistry of soil potassium. In Munson, R. D. (Ed.). *Potassium in agriculture*. American Society of Agronomy, Madison Wisconsin. 201-276.
87. Sparks, D.L., and W.C. Libhardt. 1982. Effect of long-term lime and potassium application on quantity- intensity relationships in sandy soil. *Soil Science Society American, Journal*. 66: 780-790.
88. Steenkamp, C.J., A.A. Theron., and J.A. De.Bruy. 1989. Potassium fixation in an Arcadia soil. II. Fixation by the clay fraction South Africa. *Journal of Plant and Soil*. 6 (2): 86-91.
89. Steffens, D., and D.L. Sparks. 1999. Effect of residence time on the Kinetics of non-exchangeable ammonium release from illite and vermiculite. *Plant Nutrient Soil Science*. 162: 599-605.
90. Sun, Y., S.R. Wu., and J.L. Lu. 2000. Studies on the fixed- $\text{NH}_4$  capacity and the accumulating supplying N ability in Lou soil. *Agricultural Research in the Arid Areas*. Chine. 18: 8-15.
91. Tofighi, H., and S. Abasiyan. 2009. Kinetics of competitive fixation of potassium and ammonium ions by some soils and their clay and silt components. XIV International Clay Conference. Castellaneta Marina Italy. 579.

92. Wang, H.Y., J.M. Zhou., C.W. Du., and X.Q. Chen. 2010. Potassium Fractions in Soils as Affected by Monocalcium Phosphate, Ammonium Sulfate, and Potassium Chloride Application. *Pedosphere*. 20: 368-377.
93. Wen, Q.X., L.L. Cheng., and B.Y. Cheng. 2000. Fixed ammonium in soils of China. *Acta Pedologica Sinica*. Chine. 37: 145-155.
94. Yan, T., W. Xiao-zhi., Z. Hai-Tao., and F. Ke. 2008. Effect of potassium and C/N Ratios on conversion of  $\text{NH}_4$  in soils. *Pedosphere*. 18 (4): 539-544.
95. Yu, X.F., Y.X. Zhang., Y.C. Zou., H.M. Zhao., X.G. Lu., and G.P. Wang. 2011. Adsorption and Desorption of Ammonium in Wetland Soils Subject to Freeze-Thaw Cycles. *Pedosphere*. 21: 251-258.
96. Zeng, Q.I., P. Brown., and Q.P. Zeng. 2000. Soil potassium mobility and uptake by corn under different soil moisture regimes. *Plant and Soil*. 221 (2): 121-134.
97. Zhang, W.Z., X.Q. Chen., J.M. Zhou., D.H. Liu., H.Y. Wang., and C.W. DU. 2013. Influence of Humic Acid on Interaction of Ammonium and Potassium Ions on Clay Minerals. *Pedosphere*. 23: 493-502.
98. Zhang, Y.Z., S.H. Huang., D.J. Wan., Y.X. Huang., W.J. Zhou., and Y.B. Zou. 2007. Fixed ammonium content and maximum capacity of ammonium fixation in major types of tillage soils in Hunan Province, China. *Agricultural Sciences in China*. 6(4): 466-474.
99. Zhang, C.Y., and S.X. Li. 2003. The studies on fixed  $\text{NH}_4^+$  and effecting factors on it in soils from west China. *Agricultural Research in the Arid Areas*. Chine. 21: 54-58.
100. Zhang, Y.S., and H.W. Scherer. 1999. Ammonium fixation by clay minerals in different layers of two paddy soils after flooding. *Biol Fertile Soils*. 29: 152-156.