بازتوزیع کاتیون‌های تبادلی در یک خاک شور - سدیمی بر اثر کاربرد مواد بهساز

نجمه یزدان‌پناه[1]*، ابراهیم پذیرا، علی نشاط، مجید محمودآبادی و هرمزد نقوی

استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمان؛ **nyazdanpanah@gmail.com**

استاد گروه خاکشناسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران؛ **ebrahimpazira@gmail.com**

استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمان؛ **a.neshat896@gmail.com**

استادیار گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان؛ **mahmoodabadi@mail.uk.ac.ir**

استادیار پژوهش، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی کرمان؛ **naghavii@yahoo.com**

چکیده

شور و سدیمی‌شدن خاک از جنبه‌های مهم تخریب اراضی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شود. تحقیق حاضر با هدف بررسی تأثیر مواد اصلاح‌کننده معدنی و آلی مختلف، در اصلاح خاک شور و سدیمی با تأکید بر بازتوزیع کاتیون‌های تبادلی انجام شد. آزمایش‌ها به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با 6 تیمار اصلاح‌کننده معدنی و آلی شامل؛ شاهد، کود گاوی، تفاله پسته، گچ، کود گاوی + گچ و تفاله پسته + گچ، 2 تیمار آب آبیاری (با و بدون اسید سولفوریک) همگی در 3 تکرار بود که در شرایط آزمایشگاهی و با استفاده از ستون خاک اجرا گردید. چهار مرحله آبیاری به روش متناوب با فواصل زمانی یک ماه هر کدام به میزان یک حجم تخلخل انجام شد. نتایج نشان داد که مصرف مواد اصلاح‌کننده در خاک، تأثیر معنی‌داری بر غلظت کاتیون‌های تبادلی و همچنین درصد سدیم تبادلی (ESP) دارد در حالی که مصرف اسید سولفوریک همراه با آب آبیاری، در میزان کاتیون‌های دوظرفیتی، اثر معنی‌داری نشان نداد. پس از عملیات اصلاح، کمترین مقدار کاتیون‌های تک‌ظرفیتی تبادلی و همچنین ESP در سطح خاک مشاهده شد و با افزایش عمق، مقدار آنها افزایش یافت در حالی‌که کاتیون‌های تبادلی دوظرفیتی تغییر معنی‌داری با عمق پیدا نکرد. در بین تیمارهای مورد مطالعه، تفاله پسته (با و بدون اسید) و گچ + تفاله پسته (بدون اسید) باعث کاهش سدیم تبادلی نسبت به شاهد شدند در حالی که سایر تیمارها افزایش آن را باعث شدند. همه تیمارها به‌ویژه تفاله پسته باعث افزایش پتاسیم تبادلی نسبت به شاهد گردیدند. کود دامی نه تنها کلسیم تبادلی را افزایش نداد بلکه تنها تیماری بود که کاهش آن را نسبت به شاهد به دنبال داشت. مصرف گچ بیشترین تأثیر را در افزایش کلسیم و منیزیم تبادلی نسبت به شاهد داشت هر چند، در حضور اسید سولفوریک برای برخی تیمارها، کاهش منیزیم تبادلی نیز مشاهده شد. نتایج حاکی از آن بود که در حضور اسید سولفوریک، تیمارهای تفاله پسته و گچ بیشترین تأثیر را در کاهش ESP داشته ولی تحت شرایط آبیاری معمولی (بدون مصرف اسید)، تیمار تفاله پسته به تنهایی و یا در ترکیب با گچ، کمترین ESP را ایجاد نمود. همچنین به‌دلیل وجود آهک، کارایی اسید سولفوریک در کاهش سدیم تبادلی بیشتر از گچ بود. در مجموع یافته‌های این تحقیق اهمیت و کارایی مطلوب تفاله پسته را در اصلاح خاک‌های شور و سدیمی تحت آبیاری معمولی روشن ساخت.

واژه‌های کلیدی: آبشویی، اسید سولفوریک، اصلاح خاک، گچ، کود دامی و تفاله پسته

---

[1] نویسنده مسئول، آدرس: کرمان، ابتدای جاده جوپار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد کرمان ، کد پستی 7635131167

* دریافت: 91/2/16 و پذیرش: 91/8/30

مقدمه

امروزه تخریب اراضی به‌عنوان یک تهدید جهانی مطرح بوده و از جنبه‌های مختلف باعث کاهش محصول و افت عملکرد در اراضی کشاورزی می‌شود. یکی از دلایل تخریب اراضی، شور و سدیمی‌شدن خاک است که بخش‌های وسیعی از مناطق خشک و نیمه‌خشک را تحت تأثیر قرار داده است. حدود نیمی از اراضی زیر کشت آبی دنیا مورد تهدید شوری و سدیم قرار گرفته‌اند (فلاژلا و همکاران، 2002). در ایران خاک‌های شور و سدیمی، وسعتی حدود 15 تا 26 میلیون هکتار (10 تا 15 درصد مساحت کشور) را به خود اختصاص داده‌اند (چرم و رنگازامی، 1997؛ مصطفی‌زاده فرد و همکاران، 2007). خاک‌های شور و سدیمی خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی نامطلوبی دارند که باعث کاهش عرضه عناصر غذایی و در نهایت افت رشد و عملکرد گیاه می‌گردد (کویرک، 2001؛ قدیر و اوستر، 2004).

به دلیل محدودیت‌های خاک‌های شور و سدیمی، ضرورت اصلاح و احیا این اراضی که پتانسیل و قابلیت کشت و کار در آنها وجود دارد، امری اجتناب‌ناپذیر است. از این رو برای اصلاح خاک‌های شور و سدیمی، روش‌های متفاوتی توسط محققان استفاده شده است (قدیر و همکاران، 2001؛ والزانو و همکاران، 2001؛ وانگ و همکاران، 2009). مبنای اصلاح خاک‌های سدیمی جایگزین نمودن سدیم تبادلی توسط کلسیم است. سدیم جایگزین شده با آبشویی از ناحیه ریشه و یا نیمرخ خاک خارج می‌شود. منبع رایج برای تأمین کلسیم ماده‌ای است که یا اینکه خود دارای کلسیم باشد و یا اینکه پس از مصرف باعث انحلال آن در محلول خاک گردد. بنابراین، دو روش در اصلاح چنین خاک‌هایی وجود دارد که شامل: 1) افزودن منبع حاوی کلسیم در خاک‌های غیرآهکی و 2) افزایش حلالیت کلسیم موجود به‌ویژه در خاک‌های آهکی است (کویرک، 2001).

ماده آلی (والزلنو و همکاران، 2001؛ لی و کرن، 2009؛ وانگ و همکاران، 2009)، گچ (میشل و همکاران، 2000؛ وانگ و همکاران، 2009) و اسید سولفوریک (آمزکتا و همکاران، 2005؛ صدیق و همکاران، 2007) برخی از این اصلاح‌کننده‌ها هستند که مورد استفاده قرار می‌گیرند. علاوه بر این، اصلاح خاک‌های شور و سدیمی از طریق آبشویی نیز توسط برخی از پژوهشگران (آناپالی و همکاران، 2001؛ اختر و همکاران، 2003؛ اماری و همکاران، 2008) انجام شده است. آن دسته از خاک‌های شور و سدیمی که آهکی نیز هستند، در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان گستره‌ای چشمگیر دارند. در این شرایط $CaCO_3$ موجود در خاک به آرامی حل شده و کلسیم را برای فرآیند اصلاح تأمین می‌کند (قدیر و همکاران، 1996). از آنجا که حلالیت آهک برای تأمین کلسیم بسیار کم است، معمولاً از یک ماده اسیدی و یا اسیدزا استفاده می‌شود (کرن، 1996).

با توجه به اینکه بسیاری از خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک آهکی هستند و از آنجا که حلالیت آهک کم است، می‌توان با افزودن ماده آلی، فشار گاز دی اکسید کربن را در خاک افزایش داده و در نتیجه حلالیت آهک افزایش و از طرفی واکنش خاک کاهش می‌یابد (حانای و همکاران، 2004). از این رو از یک طرف، شدت جایگزینی کلسیم محلول به جای سدیم تبادلی افزایش یافته و از طرف دیگر به‌دلیل بهبود شرایط ساختمان و افزایش نفوذپذیری خاک، تخلیه سدیم سریع‌تر رخ می‌دهد (وانس و همکاران، 1998؛ واکر و برنال، 2008). همچنین گچ به دلیل دارابودن کلسیم و جایگزینی آن به جای سدیم در مکان‌های تبادلی، می‌تواند باعث کاهش سدیم تبادلی و افزایش نفوذپذیری خاک گردد (آمزکتا و همکاران، 2005؛ وانگ و همکاران، 2009). به‌علاوه، در خاک‌های آهکی، اسید سولفوریک به‌دلیل واکنش با کلسیت، باعث تأمین منبع کلسیم محلول در خاک می‌گردد (صدیق و همکاران، 2003 ؛ اسمارت، 2003). به‌علت افزایش انحلال‌پذیری منابع کلسیم‌دار در حضور اسید سولفوریک می‌توان از این ماده به‌عنوان یک عامل تسریع‌کننده در اصلاح خاک‌های شور و سدیمی بهره برد (آمزکتا و همکاران، 2005؛ صدیق و همکاران، 2007).

در خاک‌های شور و سدیمی، بخش قابل توجهی از ظرفیت تبادل کاتیونی (بیش از 15 درصد) را کاتیون سدیم به خود اختصاص داده است. برای رفع اثر سدیم، مطلوب آن است که در نهایت، سدیم تبادلی نسبت به سایر کاتیون‌های تبادلی، به کمتر از حد آستانه درصد سدیم تبادلی کاهش یابد (کویرک، 2001). از طرفی مواد اصلاح‌کننده مختلف، با تغییری که در ترکیب شیمیایی خاک ایجاد می‌کنند، اثرات کاملاً متفاوتی بر ترکیب و توازن کاتیون‌های تبادلی می‌گذارند. از این رو در تحقیق حاضر، بازتوزیع کاتیون‌های تبادلی در عمق‌های مختلف در پی اعمال روش‌های مختلف اصلاح خاک شور و سدیمی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

مواد و روش‌ها

خاک مورد مطالعه در این تحقیق، خاکی شور و سدیمی و همچنین آهکی است که از عمق صفر تا 30 سانتی‌متر سطح اراضی کشاورزی نمونه‌برداری شده است. پس از انتقال نمونه خاک به آزمایشگاه، در معرض هوا

خشک گردید و از الک 2 میلی‌متری عبور داده شد. سپس برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه تعیین گردید (جدول 1). پارامترهای pH و EC به‌ترتیب در گل و عصاره اشباع اندازه‌گیری شدند. عصاره‌گیری کاتیون‌های محلول و تبادلی به‌ترتیب با آب مقطر و استات آمونیوم صورت گرفت. سپس کلسیم و منیزیم با روش تیتراسیون و سدیم و پتاسیم با استفاده از دستگاه فلیم-فوتومتر اندازه‌گیری شدند. کربن آلی به روش والکی و بلاک (1934)، بافت خاک به روش هیدرومتری و میزان $CaCO_3$ معادل از روش تیتراسیون تعیین شد (پانسو و گاتیرو، 2006). همچنین برخی خصوصیات شیمیایی مواد آلی مورد استفاده، به روش‌های رایج اندازه‌گیری شد (جدول 2).

آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با 6 تیمار مواد اصلاحی معدنی و آلی، 2 تیمار آب آبیاری (در 3 تکرار)، در یک خاک شور و سدیمی، در شرایط آزمایشگاهی و با استفاده از ستون خاک اجرا شد. تیمارهای مواد اصلاح‌کننده عبارت بودند از: 1) گچ برابر با نیاز گچی خاک مورد مطالعه به مقدار 5/2 گرم در کیلوگرم (G)، 2) کود گاوی پوسیده به مقدار 50 گرم در کیلوگرم (M)، 3) تفاله پسته پوسیده به مقدار 50 گرم در کیلوگرم (P)، 4) گچ + کود گاوی (G+M)، 5) گچ + تفاله پسته (G+P) و 6) شاهد (C). همچنین دو تیمار آب آبیاری شامل آب معمولی شهر (W) و آب حاوی اسید سولفوریک معادل گچ (W+S) به‌عنوان اصلاح‌کننده مورد استفاده قرار گرفت. مواد آلی مورد استفاده به‌عنوان اصلاح‌کننده دارای خصوصیات شیمیایی متفاوتی بودند. میزان EC تفاله پسته (10/85 دسی‌زیمنس بر متر) بیشتر از کود گاوی (8/62 دسی‌زیمنس بر متر) بود. همچنین تفاله پسته pH بیشتری نسبت به کود گاوی داشت. در بین کاتیون‌های کل، میزان سدیم و منیزیم در کود گاوی نسبت به تفاله پسته، بیشتر و پتاسیم و کلسیم کمتر بود.

به‌منظور تهیه ستون خاک، از استوانه‌هایی با قطر داخلی 10 و ارتفاع 40 سانتی‌متر و جنس پی‌وی‌سی استفاده شد. پس از ساخت ستون‌ها، تیمارهای مواد آلی و معدنی به‌طور کامل با خاک مخلوط و به داخل ستون‌ها منتقل گردید. انتقال بصورت لایه به لایه (2/5 سانتیمتر) و رساندن جرم مخصوص به شرایط مزرعه (1/5 گرم بر سانتی‌متر مکعب) تا ایجاد نمونه همگن تا عمق 30 سانتی‌متر در هر ستون انجام شد. سپس نمونه‌ها به مدت یک ماه در درجه حرارت 25 درجه سانتی‌گراد و رطوبت ظرفیت زراعی نگهداری شد. پس از این مرحله، نمونه‌ها به مدت 120 روز تحت آزمایش‌های آبشویی قرار گرفت. آب آبیاری دارای EC برابر با 0/536 دسی‌زیمنس بر متر، pH برابر با 8/0 و SAR برابر با 1/3 بود. برای نزدیک‌شدن به شرایط طبیعی، آبیاری به روش متناوب با دور 30 روز و به میزان یک حجم تخلخل صورت گرفت. در مجموع، 4 آزمایش آبشویی در فواصل زمانی یک ماهه اعمال گردید. در پایان، از هر ستون خاک در سه عمق صفر تا 10، 10 تا 20 و 20 تا 30 سانتی‌متری نمونه‌برداری و کاتیون‌های تبادلی آنها اندازه‌گیری شد (پانسو و گاتیرو، 2006). به منظور تجزیه و تحلیل نتایج، تجزیه واریانس و مقایسه میانگین به روش دانکن در سطح پنج درصد با استفاده از نرم‌افزار SAS و رسم نمودارها با استفاده از نرم‌افزار EXCEL انجام گردید.

نتایج و بحث

در این مقاله نتایج حاصل از کاربرد روش‌های مختلف اصلاح خاک شور و سدیمی بر بازتوزیع چهار کاتیون تبادلی سدیم، پتاسیم، کلسیم و منیزیم بررسی می‌شود. نتایج مربوط به کاتیون‌های محلول در مقاله دیگری ارائه شده است. جدول 3 نتایج تجزیه واریانس کاتیون-های تبادلی را برای تیمارهای مورد مطالعه نشان می‌دهد. داده‌ها حاکی از آن است مواد اصلاح‌کننده‌ای که در خاک استفاده شده‌اند، تأثیر معنی‌داری در سطح یک درصد بر غلظت تمام کاتیون‌های تبادلی و همچنین درصد سدیم تبادلی داشته‌اند. این در حالی است که مصرف اسید سولفوریک همراه با آب آبیاری، تنها در میزان سدیم و پتاسیم تبادلی اثر معنی‌داری ($P<0.05$) داشته است. همچنین درصد سدیم تبادلی، به‌طور معنی‌داری ($P<0.05$)، تحت تأثیر کاربرد اسید سولفوریک قرار گرفته است. این نتایج دلالت بر این موضوع دارد که کاربرد مواد اصلاح‌کننده در خاک نسبت به مصرف اسید سولفوریک از طریق آب آبیاری تأثیر بیشتری بر بازتوزیع کاتیون‌های تبادلی دارد.

با توجه به تأثیر معنی‌دار مواد اصلاح‌کننده در بازتوزیع کاتیون‌های تبادلی، مقایسه میانگین انجام شد که نتایج در جدول 4 نشان داده شده است. در بین تیمارهای مورد مطالعه، بیشترین مقادیر سدیم، پتاسیم، کلسیم و منیزیم تبادلی، به ترتیب در تیمارهای G+M (بدون مصرف اسید)، G+P (بدون مصرف اسید)، G (با و بدون مصرف اسید) و G (با مصرف اسید) مشاهده شد. همچنین بیشترین کاهش درصد سدیم تبادلی خاک در اثر اعمال تیمار G+P (با مصرف اسید) رخ داد در حالی که تیمار G+M (بدون مصرف اسید)، کمترین تأثیر را در کاهش درصد سدیم تبادلی نشان داد. یکی از عواملی که بر این تفاوت‌ها اثرگذار است ترکیب شیمیایی مواد

اصلاح‌کننده‌ای است که به خاک اضافه می‌شوند. به‌عبارتی، از طریق انحلال و یا تجزیه مواد آلی (چرم و رنگازامی، 1997)، نسبت‌های متفاوتی از کاتیون‌ها به خاک افزوده می‌شود. این موضوع در ادامه برای هر کاتیون به‌طور جداگانه، تشریح می‌گردد.

سدیم تبادلی

نتایج نشان داد که پس از اعمال تیمارهای مختلف و اتمام عملیات آبیاری، تفاوت‌های معنی‌داری در میزان سدیم تبادلی ایجاد شده است. مطابق شکل 1، کمترین مقدار سدیم تبادلی برای تمام تیمارهای مورد مطالعه، در سطح خاک مشاهده می‌شود و با افزایش عمق، میزان آن افزایش یافته است. به نظر می‌رسد، تخلیه سدیم از لایه سطحی به‌دلیل جایگزینی آن توسط سایر کاتیون‌ها و نیز فرآیند آبشویی، باعث کاهش میزان آن در مکان‌های تبادلی شده است.

برای تیمار آب آبیاری (شکل 1 الف)، تیمار تفاله پسته کمترین و ترکیب گچ با کود گاوی بیشترین میزان سدیم تبادلی را در خاک ایجاد نموده‌اند. در مقایسه با کاربرد گچ به تنهایی، افزودن توأم ماده آلی و گچ به خاک بسته به نوع ماده آلی می‌تواند تأثیر بیشتر و یا کمتری در تخلیه سدیم تبادلی داشته باشد. نتایج نشان داد که کود دامی 6/4 برابر تفاله پسته حاوی سدیم می‌باشد (جدول 2). از این رو، کاربرد آن باعث افزودن سدیم قابل توجهی به خاک شده است. البته لازم به ذکر است که هر چند تیمار ترکیب گچ با کود گاوی نسبت به سایر تیمارها بیشترین سدیم تبادلی را ایجاد نموده اما در مقایسه با خاک اولیه (جدول 1) که حاوی 10 میلی‌اکی‌والان سدیم تبادلی در 100 گرم خاک بود، کارایی قابل قبولی داشته است. به‌عبارتی، هر چند کود دامی مقداری سدیم به خاک می‌افزاید، ولی از طرف دیگر به‌دلیل جانشینی توسط سایر کاتیون‌ها و آبشویی سدیم موجود، در نهایت سدیم تبادلی را نسبت به خاک اولیه کاهش داده است. مطابق شکل 1 الف، بدون افزودن هر گونه ماده اصلاح‌کننده‌ای به خاک مورد مطالعه و صرفاً از طریق عملیات آبیاری، سدیم تبادلی تا حد زیادی کاهش یافته است. دلیل این کاهش محسوس به آهکی بودن خاک برمی‌گردد که به رغم شور و سدیمی بودن آن، دارای منبع قابل عرضه کلسیم می‌باشد. کلسیم موجود در این خاک قابلیت جایگزینی سدیم تبادلی را داشته لذا مثل یک اصلاح‌کننده عمل می‌کند. این تأثیر تا جایی بوده که حتی کارایی بیشتری نسبت به کاربرد گچ نشان می‌دهد. مقایسه روند تغییرات سدیم تبادلی تیمارهای شاهد و گچ روشن می‌سازد که به‌دلیل آهکی بودن خاک، گچ نمی‌تواند کارایی چندانی در اصلاح خاک مورد مطالعه بروز دهد. به‌نظر می‌رسد اثر آنتاگونیسمی یون مشترک کلسیم بین گچ و آهک، باعث شده است که برای کاهش سدیم تبادلی مصرف گچ توجیهی نداشته باشد. این موضوع از آنجا اهمیت دارد که در بسیاری از خاک‌های آهکی متأثر از سدیم، کشاورزان همچنان از گچ به عنوان ماده اصلاح‌کننده استفاده می‌کنند در حالی که، این خاک‌ها تنها از طریق آبیاری قابل اصلاح می‌باشند.

با افزودن اسید سولفوریک به آب آبیاری (شکل 1 ب) مشاهده می‌شود که سطح خاک، سدیم تبادلی کمتری نسبت به عمق‌های بیشتر دارد. در بین تیمارهای مورد مطالعه، کارایی گچ در حضور اسید سولفوریک برای کاهش سدیم تبادلی در مقایسه با آبیاری با آب معمولی افزایش یافته است. اسید سولفوریک باعث افزایش حلالیت منابع کلسیم‌دار شده در نتیجه کلسیم بیشتری جایگزین سدیم تبادلی می‌گردد. همچنین نسبت به آب معمولی، استفاده از اسید سولفوریک همراه با آبیاری باعث کاهش سدیم تبادلی تیمار شاهد نیز شده است. اسید سولفوریک برای اصلاح خاک‌های سدیمی حاوی آهک، موثر است (کرن، 1996). از این رو، برخی از تحقیقات گذشته تأثیر مثبت اسید سولفوریک را در اصلاح خاک‌های آهکی متأثر از سدیم، گزارش کرده‌اند (آمزکتا و همکاران، 2005). احتمالاً در این خاک‌ها، اسید سولفوریک به‌دلیل واکنش با کانی‌های کربناتی حاوی کلسیم باعث تأمین منبع کلسیم محلول در خاک می‌گردد (اوستر و همکاران، 1996). نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد که در خاک‌های آهکی که محدودیت شور و سدیمی را نیز دارند، صرفاً با افزودن اسید سولفوریک به آب آبیاری می‌توان میزان سدیم تبادلی را کاهش داد. این یافته با نتایج آمزکتا و همکاران (2005) و همچنین صدیق و همکاران (2007) همخوانی دارد که کاهش سدیم تبادلی را در اثر مصرف اسید سولفوریک در خاک‌های متأثر از سدیم گزارش کرده‌اند. به‌نظر می‌رسد در حضور اسید سولفوریک، تیمار تفاله پسته بیشترین کارایی را در کاهش سدیم تبادلی داشته باشد در حالی‌که کود دامی دلیل مقدار بیشتر سدیم (جدول 2) نسبت به سایر تیمارها پس از اتمام عملیات اصلاح، بیشترین سدیم تبادلی را دارد. نتایج همچنین نشان می‌دهد که در حضور اسید سولفوریک، ترکیب گچ و کود دامی قابلیت بیشتری در کاهش سدیم تبادلی نسبت به کاربرد کود دامی به‌تنهایی داشته است. در مقابل، ترکیب تفاله پسته و گچ کارایی کمتری نسبت به کاربرد مجزای هر یک از این دو دارد. با توجه به ترکیب شیمیایی مواد آلی و اثرات متقابل ترکیبات

اصلاح‌کننده‌ها و خاک اثرات متنوعی رخ داده است. این موضوع قبلا توسط کلارک و همکاران (2007) مورد توجه قرار گرفته است.

پتاسیم قابل جذب

پتاسیم از جمله کاتیون‌هایی است که علاوه بر نقشی که در اصلاح خاک‌های شور و سدیمی دارد، از نظر حاصلخیزی خاک نیز حائز اهمیت است. مطابق شکل 2 الف تقریباً برای تمام تیمارهای مورد مطالعه افزایش پتاسیم قابل جذب با افزایش عمق مشاهده می‌شود، هر چند این افزایش محسوس نیست. در بین تیمارها، شاهد کمترین مقدار پتاسیم قابل جذب را نشان می‌دهد که در مقایسه با خاک اولیه تفاوت معنی‌داری ندارد. به‌عبارتی در اثر آبیاری با آب معمولی، پتاسیم قابل جذب چندانی در طول ستون خاک تغییر نکرده است. در مقابل، برای تیمارهای ماده آلی چه به تنهایی و چه در ترکیب با گچ پتاسیم قابل جذب افزایش معنی‌داری داشته است. تفاوت پتاسیم تیمار شاهد با تیمارهای مواد آلی مربوط به میزان پتاسیمی است که توسط آنها به خاک افزوده شده است. در واقع، در اثر افزودن مواد آلی به خاک مقداری پتاسیم وارد خاک شده که بخش عمده‌ای از پتاسیم تحت تأثیر آبشویی به عمق‌های پایین‌تر شسته شده و بخش کمتری از آن بر روی مکان‌های تبادلی جایگزین می‌شود. در شرایط آبیاری با آب معمولی، افزودن گچ نسبت به تیمار شاهد باعث افزایش پتاسیم قابل جذب شده در واقع، گچ به‌طور مستقیم پتاسیمی به خاک نمی‌افزاید ولی به‌طور غیرمستقیم شرایطی را مهیا می‌کند که پتاسیم بیشتری بر روی مکان‌های تبادلی قرار گیرد. در حضور گچ حلالیت منابع کلسیم‌دار کاهش یافته (اوستر و فرنکل، 1980)، بدین‌ترتیب کلسیم کمتری با کاتیون‌های تک‌ظرفیتی نظیر سدیم و پتاسیم برای قرار گرفتن بر روی مکان‌های تبادلی رقابت می‌کند. نتیجه اینکه هم سدیم تبادلی و هم پتاسیم تبادلی با افزودن گچ بر روی مکان‌های تبادلی نسبت به تیمار شاهد، افزایش می‌یابند.

مطابق شکل 2 ب، مشاهده می‌شود که در حضور اسید سولفوریک، لایه سطحی تمام تیمارها کم و بیش کمترین مقدار پتاسیم قابل جذب را داشته و با افزایش عمق مقدار آن کمی افزایش یافته است. در اثر مصرف اسید سولفوریک، پتاسیم قابل جذب تیمار شاهد در مقایسه با آب معمولی افزایش یافته است. همچنین در حضور اسید تیمارهای شاهد و گچ با افزایش عمق افزایش ناچیزی در پتاسیم قابل جذب نشان می‌دهند. این افزایش در مورد تیمارهایی که در آنها ماده آلی استفاده شده بیشتر است زیرا این تیمارها به‌طور مستقیم پتاسیم را به خاک می‌افزایند. در بین تیمارهای مورد مطالعه، تیمارهای شاهد و گچ کمترین و تفاله پسته بیشترین پتاسیم قابل جذب را پس از عملیات اصلاح دارا می‌باشند. قبل از این قدیر و همکاران (2001) و همچنین والکر و برنال (2008) نیز افزایش میزان پتاسیم در اثر کاربرد مواد آلی در خاک را گزارش نموده‌اند. به‌طور کلی مشخص می‌شود که تفاله پسته کارایی مطلوبی در افزودن پتاسیم به‌عنوان یک عنصر غذایی ضروری داشته است.

کلسیم تبادلی

علاوه بر کاتیون‌های تک‌ظرفیتی، کاتیون‌های دوظرفیتی نیز می‌توانند بر روی مکان‌های تبادلی قرار گیرند. استفاده از مواد اصلاح‌کننده اثرات متفاوتی بر روند تغییرات کلسیم تبادلی در عمق‌های مختلف داشت. به‌طور کلی، در شرایطی که از آب معمولی به منظور آبیاری ستون‌های خاک استفاده شد (شکل 3 الف)، کلسیم تبادلی برای همه تیمارهای مورد مطالعه، تغییر معنی‌داری با عمق نشان نداد. کلسیم نسبت به کاتیون‌های تک‌ظرفیتی تمایل بیشتری به قرار گرفتن در مکان‌های تبادلی دارد زیرا به‌دلیل دوظرفیتی بودن جداشدن آن از مکان‌های تبادلی توسط کاتیون‌های تک‌ظرفیتی مشکل‌تر است (دیوید و دیمیتریوس، 2002). نتایج بررسی روند تغییرات کاتیون‌های سدیم و پتاسیم در فازهای محلول و تبادلی نشان داد که این کاتیون‌ها به‌دلیل تک‌ظرفیتی بودن، توانایی کمتری به جایگزینی در مکان‌های تبادلی داشته و از طرفی بیشتر در معرض آبشویی قرار می‌گیرند. این در حالیست که هر چند، مقداری کلسیم از طریق آبشویی از خاک تخلیه می‌گردد، ولی غلظت آن در فاز محلول و تبادلی با عمق تغییر چندانی پیدا نکرده است. در شرایط کاربرد آب معمولی از بین تیمارهای مورد مطالعه، کود دامی دارای کمترین مقدار کلسیم تبادلی بوده، در حالی‌که تفاله پسته و گچ باعث قرار گرفتن کلسیم بیشتری بر روی مکان‌های تبادلی شده است. یافته‌های این تحقیق نشان داد که با افزودن ماده آلی، pH خاک احتمالاً به‌دلیل فرآیند نیتریفیکاسیون (هیرسین و همکاران، 1994) و یا در اثر افزایش فشار جزئی CO_2 ناشی از تجزیه ماده آلی (چرم و رنگازامی، 1997) کاهش یافته و منجربه افزایش حلالیت آهک می‌گردد. تفاله پسته دارای کلسیم بیشتری نسبت به کود دامی بوده بنابراین، مصرف آن می‌تواند کلسیم بیشتری وارد خاک نماید.

همچنین با افزودن گچ به مواد آلی، کلسیم بیشتری وارد خاک شده و در نتیجه کلسیم تبادلی افزایش یافته است. گچ اضافه شده به خاک‌های سدیمی می‌تواند اثر سدیم را هم به‌دلیل افزایش غلظت الکترولیت و هم اثرات

کاتیون تبادلی، کاهش دهد (لاودی، 1976). استفاده از تفاله پسته و نیز تیمارهای حاوی گچ، باعث قرار گرفتن کلسیم بیشتری بر روی مکان‌های تبادلی نسبت به تیمار شاهد و تا حدی نسبت به خاک اولیه (5 میلی‌اکی‌والان در 100 گرم خاک) شده است. در حالی‌که کود دامی نه تنها کلسیم تبادلی را افزایش نداده، بلکه باعث کاهش نسبی آن نسبت به تیمار شاهد می‌گردد. تیمار شاهد هر چند کلسیمی به‌طور مستقیم وارد نکرده است ولی به‌دلیل آهکی بودن خاک، دارای منبع کلسیم بوده که می‌تواند بر روی مکان‌های تبادلی قرار گیرد.

در شرایطی که به جای آب معمولی، از آب تیمار شده با اسید سولفوریک به منظور آبشویی استفاده گردد (شکل 3 ب)، کلسیم تبادلی با افزایش عمق، کاهش یافته است. به‌عبارتی، حضور اسید سولفوریک باعث افزایش کلسیم تبادلی نزدیک به سطح خاک شده و تأثیر آن در جایگزینی کلسیم بر روی مکان‌های تبادلی با افزایش عمق کاهش یافته است. از آنجا که آبیاری ستون‌های خاک از سطح آنها انجام می‌شد، بدیهی است که اسید سولفوریک در ابتدا لایه سطحی را تحت تأثیر قرار داده باشد و در اثر افزایش تجزیه و یا حلالیت ترکیبات حاوی کلسیم نظیر مواد آلی و آهک، کلسیم بیشتری بر روی مکان‌های تبادلی قرار گرفته باشد. باید توجه داشت که در اصلاح خاک‌های شور و سدیمی، افزودن اسید از سطح خاک و از طریق آبیاری، لایه سطحی را بیشتر متأثر ساخته و بنابراین در اعماق کارایی لازم را ندارد. این موضوع به‌ویژه در مورد درختانی که دارای ریشه‌های عمیق نسبت به گیاهان زراعی هستند، از اهمیت زیادی برخوردار است. یکی از راهکارهای پیشنهادی برای افزایش کارایی مصرف اسید سولفوریک به‌ویژه در اعماق، استفاده از عملیات شخم قبل از اعمال این تیمار است (صدیق و همکاران، 2007). در حضور اسید سولفوریک، تیمار کود دامی کمترین کلسیم تبادلی را داشته، در حالی‌که مصرف گچ باعث افزایش کلسیم تبادلی شده است. همچنین افزودن گچ به تنهایی و یا همراه با مواد آلی به خاک باعث افزایش کلسیم تبادلی گردید. به دلیل وجود عنصر کلسیم در ساختار شیمیایی گچ، در اثر مصرف این اصلاح‌کننده مقدار قابل توجهی کلسیم به خاک اضافه می‌شود (حانای و همکاران، 2004؛ آمزکتا و همکارتن، 2005).

منیزیم تبادلی

مشابه با کلسیم تبادلی، منیزیم تبادلی نیز برای تمام تیمارها در شرایطی که از آب معمولی برای آبیاری ستون‌های خاک استفاده شده است، با افزایش عمق تغییر معنی‌داری نشان نداد (شکل 4 الف). در خاک‌های آهکی، منیزیم تبادلی نمی‌تواند اثر مستقیمی بر کاهش پراکنده‌شدن ذرات خاک داشته باشد ولی به‌طور غیرمستقیم حضور منیزیم تبادلی، حلالیت $CaCO_3$ را بالا برده و از پراکنده‌شدن ذرات رس جلوگیری می‌کند (کرن، 1996). نتایج نشان داد که تیمار گچ، بیشترین میزان منیزیم تبادلی را داشته که یکی از دلایل این موضوع اثر یون مشترک کلسیم موجود در آهک و گچ است که حلالیت منابع کلسیم‌دار را کاهش می‌دهد. بنابراین کلسیم کمتری برای جانشینی منیزیم عرضه می‌شود. هر چند کلسیم و منیزیم، دوظرفیتی هستند ولی به‌دلیل شعاع هیدراته کوچکتر کلسیم (دیوید و دیمیتریوس، 2002)، مکان‌های تبادلی تمایل بیشتری به جذب آن نسبت به منیزیم دارند. در مقابل، تیمار ترکیب تفاله پسته با گچ، کمترین مقدار منیزیم تبادلی را به دنبال داشته است. تفاله پسته نسبت به کود دامی دارای کلسیم بیشتر و منیزیم کمتری است. بنابراین استفاده از آن به‌ویژه زمانی‌که با گچ نیز ترکیب گردد، باعث عرضه مقدار قابل توجهی کلسیم می‌شود.

در شرایطی که به جای آب معمولی از آب تیمار شده با اسید سولفوریک استفاده گردید (شکل 4 ب)، بیشترین کاهش منیزیم تبادلی، در تیمار شاهد مشاهده شد. در حضور اسید سولفوریک، حلالیت آهک افزایش یافته (قدیر و اوستر، 2004) بنابراین، کلسیم بیشتری وارد فاز محلول شده و منیزیم بیشتری در مکان‌های تبادلی توسط کلسیم جایگزین می‌شود. این در حالیست که در حضور اسید سولفوریک، تیمار گچ بیشترین منیزیم تبادلی را پس از اتمام عملیات آبشویی نشان می‌دهد. استفاده از گچ در خاک آهکی باعث بروز اثرات آنتاگونیسمی بین گچ و آهک می‌شود (اوستر و فرنکل، 1980). نتیجه آنکه کلسیم کمتری به خاک عرضه شده و از این رو، منیزیم کمتری نیز جایگزین می‌گردد. در این شرایط کاربرد کود دامی نسبت به تفاله پسته، مقدار منیزیم تبادلی کمتری را نشان می‌دهد.

درصد سدیم تبادلی

درصد سدیم تبادلی (ESP) یکی از مهمترین معیارهای بررسی وضعیت خاک‌های متأثر از سدیم محسوب می‌شود. نتایج حاکی از آن بود که مواد اصلاح‌کننده اثرات مختلفی بر اصلاح خاک شور و سدیمی داشته است. مطابق شکل 5 الف، مشاهده می‌شود که از طریق آبیاری با آب معمولی، در همه تیمارهای مورد مطالعه، کمترین مقادیر ESP در سطح خاک به‌وجود آمده و با افزایش عمق مقدار ESP افزایش یافته است. به‌دلیل اینکه عملیات آبیاری از سطح خاک صورت می‌گرفت،

بنابراین جهت حرکت املاح از سطح به عمق بوده است. نتایج دلالت بر آن داشت که در مجموع، سدیم بیشتری در سطح خاک توسط کاتیون‌های دیگر به‌ویژه کلسیم جایگزین شده است. به‌تدریج که سدیم وارد فاز محلول می‌شود، از طریق آبشویی به عمق‌های بیشتر شسته شده و در نتیجه غلظت سدیم محلول در عمق بیشتر از لایه‌های سطحی است.

پس از اتمام عملیات آبیاری، ESP همه تیمارها نسبت به خاک اولیه که حدود 40 درصد بود، تا حد قابل قبولی کاهش نشان داد (شکل 5 الف). با توجه به اینکه در منابع، حد آستانه ESP برابر با 15 درصد ذکر می‌شود، بنابراین به‌نظر می‌رسد همه تیمارهای مورد مطالعه در کاهش ESP به کمتر از حد آستانه کارایی مطلوبی داشته‌اند. مواد آلی با افزایش انحلال آهک، سبب تولید یون کلسیم شده (والکر و برنال، 2008) و همچنین، از ورود سدیم به مکان‌های تبادلی جلوگیری کرده و باعث کاهش ESP خاک می‌شوند (قدیر و همکاران، 2001؛ والکر و برنال، 2008). با این وجود در بین تیمارهای مورد مطالعه، تفاله پسته بهترین قابلیت را در کاهش ESP خاک دارد در حالی‌که کود دامی، وضعیت ضعیف‌تری نشان می‌دهد به نحوی که ترکیب کود دامی و گچ، کمترین کارایی را در کاهش ESP داشته است. تجادا و همکاران (2006) با افزودن بقایای پوسیده پنبه به خاک شور و سدیمی دریافتند که میزان ESP کاهش یافته است. در مقابل، نتایج مطالعات متعددی اثر کود دامی را در کاهش ESP گزارش نموده است (قدیر و همکاران، 2001؛جلالی و رنجبر، 2009). نتایج تحقیق حاضر روشن ساخت که در خاک‌های آهکی میزان کارایی ماده آلی به ترکیب شیمیایی آن بستگی دارد. مطابق جدول 2، کود دامی 6/4 برابر تفاله پسته، سدیم دارد. بنابراین، مصرف کود دامی کارایی چندانی در کاهش درصد سدیم تبادلی خاک نداشته است. به همین دلیل، نتایج کلارک و همکاران (2007) نشان داد که نسبت مجموع کاتیون‌های کلسیم، منیزیم و پتاسیم به سدیم در ماده آلی اضافه شده به خاک، همبستگی منفی با درصد سدیم تبادلی دارد.

نتایج همچنین حاکی از آن است که در شرایط آبیاری با آب معمولی، مواد آلی زمانی‌که با گچ ترکیب می‌شوند، بازده آنها در کاهش ESP کاهش می‌یابد. با این وجود، نتایج نشان از کاهش ESP نسبت به خاک اولیه، با استفاده از مواد آلی به تنهایی و یا در ترکیب با گچ دارد. گچ به تنهایی و یا در ترکیب با ماده آلی از طریق رهاسازی کاتیون کلسیم و افزایش غلظت الکترولیت خاک و در نتیجه کاهش ضخامت لایه دوگانه پخشیده باعث هماوری ذرات رس شده و از پراکنده‌شدن آنها جلوگیری می‌کند (چرم و رنگازامی، 1997؛ نلسون و همکاران، 1999). به‌طور مشابهی نتایج الشاراوی و همکاران (2008) نشان داد که با افزودن ماده آلی و گچ به‌عنوان اصلاح‌کننده به خاک، درصد سدیم تبادلی به‌طور معنی‌داری کاهش می‌یابد. علاوه بر این، وانگ و همکاران (2009) گزارش کردند که با افزودن ماده آلی و گچ به‌ویژه در ترکیب با یکدیگر، ESP خاک کاهش می‌یابد. مطابق شکل 5 الف، افزودن گچ به تنهایی کارایی کمتری نسبت به تیمار شاهد در کاهش اثر سدیم تبادلی داشت. با این وجود نسبت به خاک اولیه، درصد سدیم تبادلی را تا حد قابل قبولی کاهش داد. نتایج تحقیقات قبل نیز نشان می‌دهد که با مصرف گچ، تخلیه سدیم از خاک افزایش و ESP کاهش می‌یابد (سینگ و باجوا، 1991). با توجه به اینکه خاک مورد مطالعه علاوه بر شور و سدیمی بودن، آهک قابل توجهی نیز دارد، افزودن گچ به تنهایی و یا در ترکیب مواد آلی به‌دلیل اثرات آنتاگونیسمی بین گچ و آهک، باعث کاهش کمتر ESP شده است. یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که در خاک آهکی، تنها از طریق آبیاری معمولی نیز می‌توان ESP خاک را تا حد مطلوبی کاهش داد. محسنی‌فر و همکاران (1385) نیز با انجام آبشویی به میزان عمق خاک، کاهش 85 درصدی سدیم تبادلی را گزارش نمودند.

در شرایطی که به جای آب معمولی از تیمار آب آبیاری با اسید سولفوریک استفاده شده (شکل 5 ب) نتایج قدری متفاوت است. همچنان روند افزایش ESP، با عمق برای تمام تیمارهای مورد مطالعه وجود دارد. نتایج نشان داد که در حضور اسید سولفوریک، کارایی گچ در کاهش ESP خاک افزایش یافته است، هر چند تیمار تفاله پسته صرفنظر از عمق نیز عملکرد مشابهی نشان می‌دهد. به رغم اثرات آنتاگونیسمی بین گچ و آهک با ورود اسید سولفوریک، مقدار بیشتری از منابع کلسیم‌دار وارد فاز محلول می‌شود، در نتیجه برای تیمار گچ، ESP خاک کاهش محسوسی یافته است. نقش اسید سولفوریک به‌گونه‌ای است که در خاک شاهد نیز باعث کاهش بیشتر ESP گردیده است. نتایج برخی از تحقیقات گذشته نیز نقش مؤثر اسید سولفوریک را در اصلاح خاک‌های آهکی سدیمی، گزارش کرده‌اند (آمزکتا و همکاران، 2005). در تحقیق حاضر در حضور اسید سولفوریک، تیمار گچ نتیجه بهتری نسبت به شاهد از خود نشان داد. همچنین به‌دلیل آهکی بودن خاک، کارایی اسید سولفوریک در کاهش سدیم تبادلی بیشتر از گچ است. از نتایج چنین برمی‌آید که در حضور اسید سولفوریک همچنان تفاله

پسته تأثیر بهتری نسبت به کود دامی در کاهش ESP داشته است.

برای مقایسه تیمارهای مختلف بر تغییر کاتیون‌های تبادلی نسبت به تیمار شاهد پارامتر تأثیر نسبی، تعیین گردید. به این منظور، درصد تغییر غلظت هر کاتیون نسبت به غلظت همان عنصر در تیمار شاهد، محاسبه و نتایج در جدول 5 ارائه گردید. بر این اساس، اعداد منفی و مثبت به‌ترتیب مبین کاهش و افزایش غلظت عنصر مورد نظر نسبت به تیمار شاهد است. در بین تیمارهای مورد مطالعه، تفاله پسته (با و بدون اسید) و گچ + تفاله پسته (بدون اسید) باعث کاهش سدیم تبادلی نسبت به شاهد شده در حالی که سایر تیمارها افزایش آن را باعث شده‌اند. این نتیجه نشان از کارایی نسبی تفاله پسته در کاهش اثر مخرب سدیم تبادلی دارد. همه تیمارهای مورد مطالعه به‌ویژه تفاله پسته باعث افزایش پتاسیم تبادلی نسبت به شاهد شدند. با توجه به اینکه پتاسیم یکی از عناصر غذایی پرمصرف گیاه است، تفاله پسته در افزودن این عنصر به خاک قابلیت بیشتری نشان می‌دهد. جالب اینکه کود دامی نه تنها کلسیم تبادلی را افزایش نداد بلکه تنها تیماری بود که کاهش کلسیم تبادلی را نسبت به شاهد به دنبال داشت. در این بین، گچ تأثیر بیشتری در افزودن کلسیم به خاک از خود نشان می‌دهد. در بین تیمارهای مورد مطالعه، مصرف گچ بیشترین تأثیر را در افزایش منیزیم تبادلی نسبت به شاهد داشته هر چند، در حضور اسید سولفوریک برای برخی تیمارها، کاهش منیزیم تبادلی نیز مشاهده می‌شود. نتایج همچنین نشان می‌دهد که در حضور اسید سولفوریک، تفاله پسته و گچ بیشترین تأثیر را در کاهش ESP دارند در حالی که تحت شرایط آبیاری معمولی (بدون مصرف اسید)، تیمار تفاله پسته به تنهایی و یا در ترکیب با گچ، کمترین درصد سدیم تبادلی را ایجاد نموده است.

نتیجه‌گیری

نتایج تحقیق حاضر در بررسی بازتوزیع کاتیون‌های تبادلی در اثر اعمال روش‌های مختلف اصلاح خاک شور و سدیمی نشان داد مواد اصلاح‌کننده‌ای که در خاک استفاده شده‌اند، تأثیر معنی‌داری در سطح یک درصد بر غلظت کاتیون‌های تبادلی و همچنین درصد سدیم تبادلی داشتند. این در حالی بود که مصرف اسید سولفوریک همراه با آب آبیاری، در میزان سدیم و پتاسیم تبادلی و همچنین ESP، اثر معنی‌داری ($P<0.05$) نشان داد. پس از عملیات اصلاح، کاتیون‌های تک‌ظرفیتی تبادلی با عمق، افزایش یافتند در حالی که کاتیون‌های دو ظرفیتی تبادلی تغییر چندانی با عمق پیدا نکردند. در همه تیمارهای مورد مطالعه، کمترین مقادیر ESP در سطح خاک مشاهده شد و با افزایش عمق مقدار آن افزایش یافت. در عدم حضور اسید سولفوریک، تیمار تفاله پسته کمترین و ترکیب گچ با کود گاوی بیشترین میزان سدیم تبادلی را در خاک ایجاد نمودند. نتایج نشان داد که در خاک‌های آهکی که محدودیت شور و سدیمی نیز دارند، صرفاً با افزودن اسید سولفوریک به آب آبیاری می‌توان میزان سدیم تبادلی را تا حد مطلوبی کاهش داد. در حضور اسید سولفوریک، تیمارهای شاهد و گچ کمترین و تفاله پسته بیشترین پتاسیم قابل جذب را پس از عملیات اصلاح دارا بودند. به‌طور کلی، کود دامی کمترین و تفاله پسته و گچ بیشترین مقدار کلسیم تبادلی را نشان دادند. تیمار گچ، بیشترین میزان منیزیم تبادلی را به دنبال داشت و در مقابل، تیمار تفاله پسته + گچ، کمترین مقدار منیزیم تبادلی را ایجاد نمود. همه تیمارهای مورد مطالعه در کاهش ESP به کمتر از حد آستانه کارایی مطلوبی داشتند. با این وجود، تفاله پسته بهترین قابلیت را در کاهش ESP نشان داد در حالی‌که کود دامی، وضعیت به مراتب ضعیف‌تری داشت. به دلیل وجود آهک، افزودن گچ به تنهایی و یا در ترکیب با مواد آلی به‌دلیل اثرات آنتاگونیسمی بین گچ و آهک، باعث کاهش کمتر ESP به نحوی که، کارایی اسید سولفوریک در کاهش سدیم تبادلی بیشتر از گچ بود. نتایج مقایسه تیمارها با شاهد نشان داد که در بین تیمارهای مورد مطالعه، تفاله پسته (با و بدون اسید) و گچ + تفاله پسته (بدون اسید) باعث کاهش سدیم تبادلی نسبت به شاهد شدند در حالی که سایر تیمارها افزایش آن را باعث شدند. همه تیمارهای مورد مطالعه به‌ویژه تفاله پسته باعث افزایش پتاسیم تبادلی نسبت به شاهد گردیدند. کود دامی نه تنها کلسیم تبادلی را افزایش نداد بلکه تنها تیماری بود که کاهش کلسیم تبادلی را نسبت به شاهد به دنبال داشت. در این بین، گچ تأثیر بیشتری در افزودن کلسیم به خاک از خود نشان داد. مصرف گچ بیشترین تأثیر را در افزایش منیزیم تبادلی نسبت به شاهد داشت هر چند، در حضور اسید سولفوریک برای برخی تیمارها، کاهش منیزیم تبادلی نیز مشاهده شد. نتایج همچنین نشان داد که در حضور اسید سولفوریک، تیمارهای تفاله پسته و گچ بیشترین تأثیر را در کاهش ESP داشته ولی تحت شرایط آبیاری معمولی (بدون مصرف اسید)، تیمار تفاله پسته به تنهایی و یا در ترکیب با گچ، کمترین درصد سدیم تبادلی را ایجاد نمود.

جدول 1- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه

ویژگی (واحد)	مقدار	ویژگی (واحد)	مقدار
سدیم محلول ($meq\ L^{-1}$)	264/5	هدایت الکتریکی ($dS\ m^{-1}$)	19/81
پتاسیم محلول ($meq\ L^{-1}$)	4/19	pH	7/8
کلسیم محلول ($meq\ L^{-1}$)	37/0	کربن آلی (%)	0/49
منیزیم محلول ($meq\ L^{-1}$)	98/0	شن (%)	48
سدیم تبادلی ($meq\ 100g^{-1}$)	10/0	سیلت (%)	40
پتاسیم تبادلی ($meq\ 100g^{-1}$)	7/8	رس (%)	12
کلسیم تبادلی ($meq\ 100g^{-1}$)	5/0	نسبت جذب سدیم	32/2
منیزیم تبادلی ($meq\ 100g^{-1}$)	1/8	درصد سدیم تبادلی	40/6
کربنات کلسیم معادل (%)	20/75	جرم مخصوص ظاهری ($g\ cm^{-3}$)	1/55

جدول 2- برخی خصوصیات شیمیایی مواد آلی مورد استفاده

ماده آلی	$EC_{(1:10)}$	$pH_{(1:10)}$	سدیم	پتاسیم	کلسیم	منیزیم
	$dS\ m^{-1}$		درصد			
کود دامی	8/62	7/69	1/22	2/45	2/4	0/92
تفاله پسته	10/85	8/05	0/19	6/70	2/87	0/58

جدول 3- نتایج تجزیه واریانس کاتیون‌های تبادلی برای تیمارهای مختلف (اعداد میانگین مربعات است)

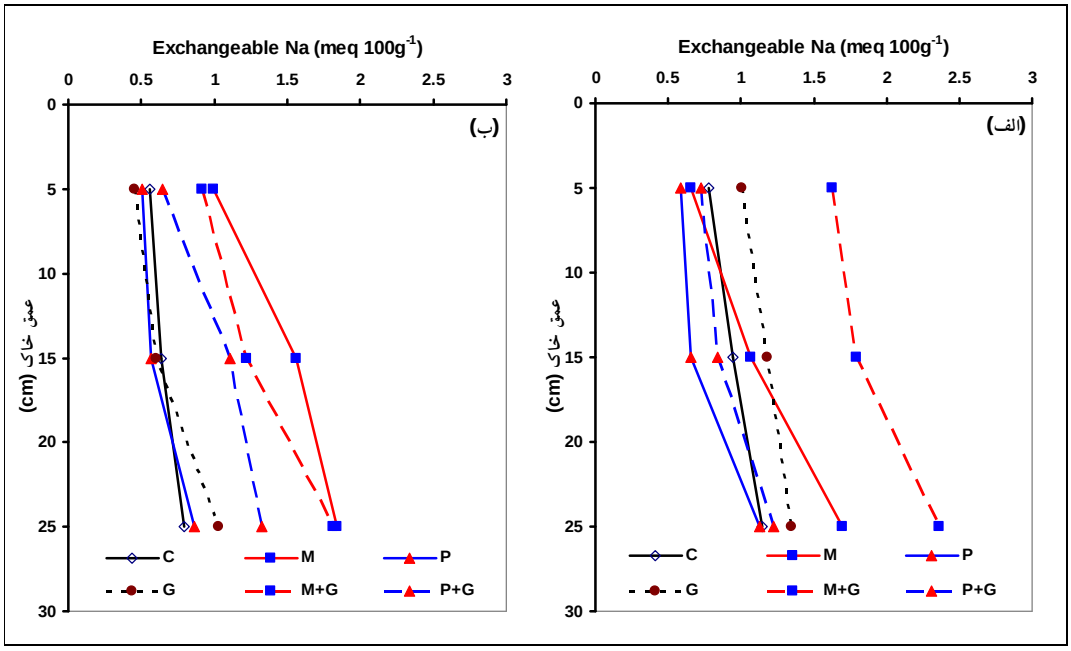
منبع تغییرات	درجه آزادی	سدیم تبادلی	پتاسیم تبادلی	کلسیم تبادلی	منیزیم تبادلی	ESP
		($meq\ 100\ g^{-1}$)				(درصد)
اصلاح‌کننده	5	0/694**	23/76**	3/733**	1/096**	23/76**
اسید سولفوریک	1	0/308*	9/66*	0/008 ns	0/813 ns	9/66*
اصلاح‌کننده *اسید	5	0/186*	5/64*	0/116 ns	0/468 ns	5/64*
خطا	24	0/068**	2/28**	0/126**	0/228**	2/28**

* معنی‌دار در سطح پنج درصد، ** معنی‌دار در سطح یک درصد، ns عدم معنی‌داری

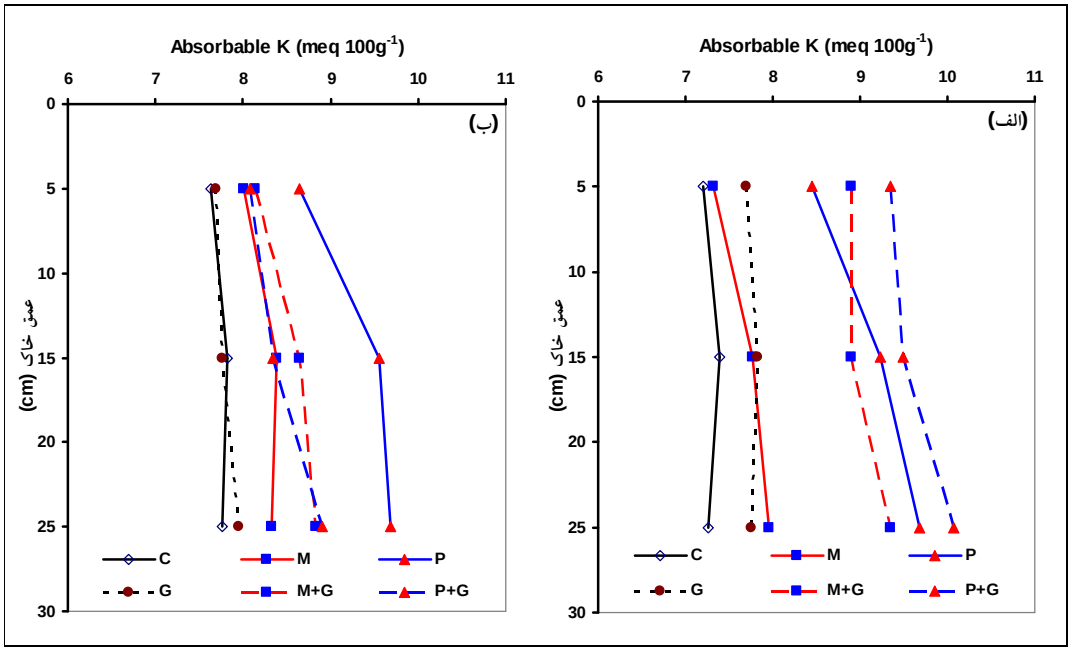
جدول 4- مقایسه میانگین بین تیمارهای مواد اصلاح‌کننده برای کاتیون‌های تبادلی مورد مطالعه (مقایسه بین میانگین عمق‌ها انجام شده است)

تیمار اصلاح کننده	تیمار اسید سولفوریک	سدیم تبادلی	پتاسیم تبادلی	کلسیم تبادلی	منیزیم تبادلی	درصد سدیم تبادلی
		(meq 100 g^{-1})				(درصد)
شاهد	بدون اسید	0/95cde	7/3e	4/6de	1/8bc	6/4cde
	با اسید	0/66e	7/7de	4/6de	1/4bc	4/6de
کود دامی	بدون اسید	1/14bcde	7/7e	4/0f	1/6bc	7/8bc
	با اسید	1/46b	8/2cd	4/1ef	1/6bc	9/4ab
تفاله پسته	بدون اسید	0/79de	9/1b	5/0cd	1/8bc	4/7de
	با اسید	0/65e	9/3ab	5/0cd	2/0bc	3/8e
گچ	بدون اسید	1/18bcd	7/8de	6/3a	2/2b	6/8bcd
	با اسید	0/69de	7/8de	6/2a	3/2a	3/9de
گچ+کود دامی	بدون اسید	1/93a	9/1b	4/9cd	2/0bc	10/7a
	با اسید	1/32bc	8/5c	5/2cd	2/1bc	7/6bc
گچ+تفاله پسته	بدون اسید	0/93cde	9/6a	6/0ab	1/2c	5/1cde
	با اسید	1/03bcde	8/4c	5/5bc	2/2b	6/0cde

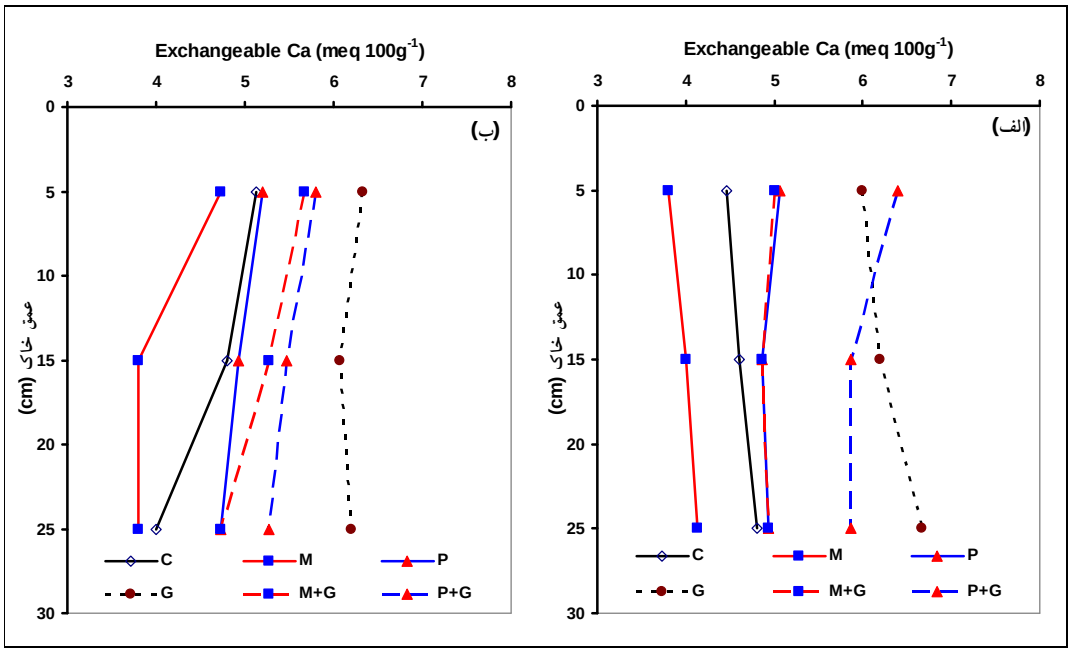
حروف غیرمشابه در هر ستون مبین اختلاف معنی‌دار در سطح 5 درصد از طریق آزمون دانکن است.



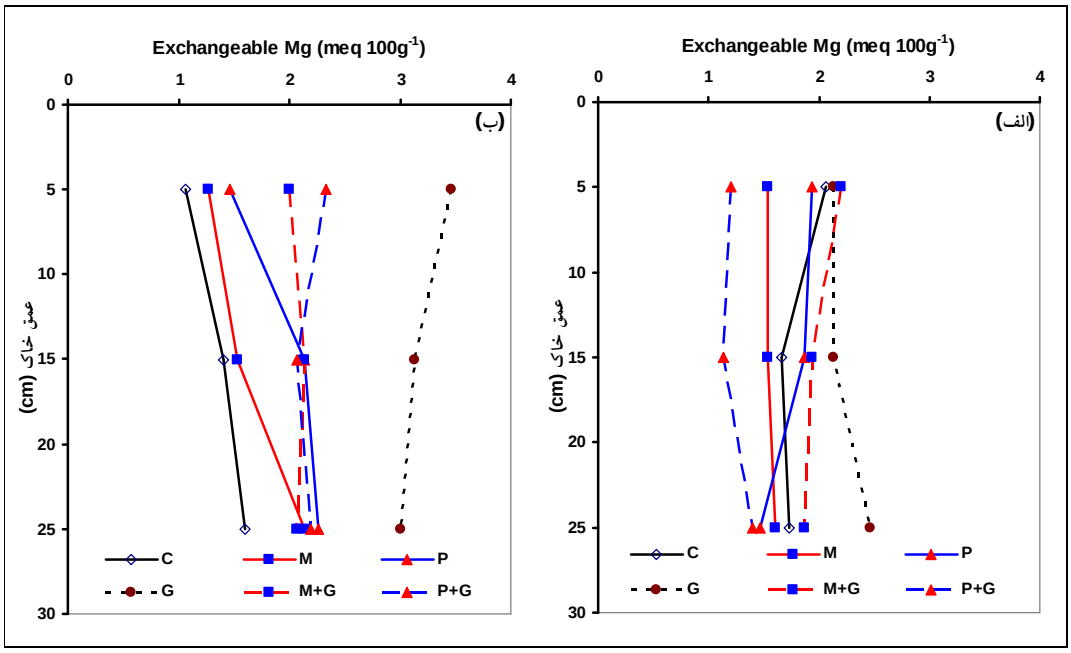
شکل 1- تغییرات غلظت سدیم تبادلی در عمق‌های مختلف خاک برای تیمارهای مورد مطالعه پس از آبیاری با الف) آب معمولی و ب) آب تیمارشده با اسید سولفوریک



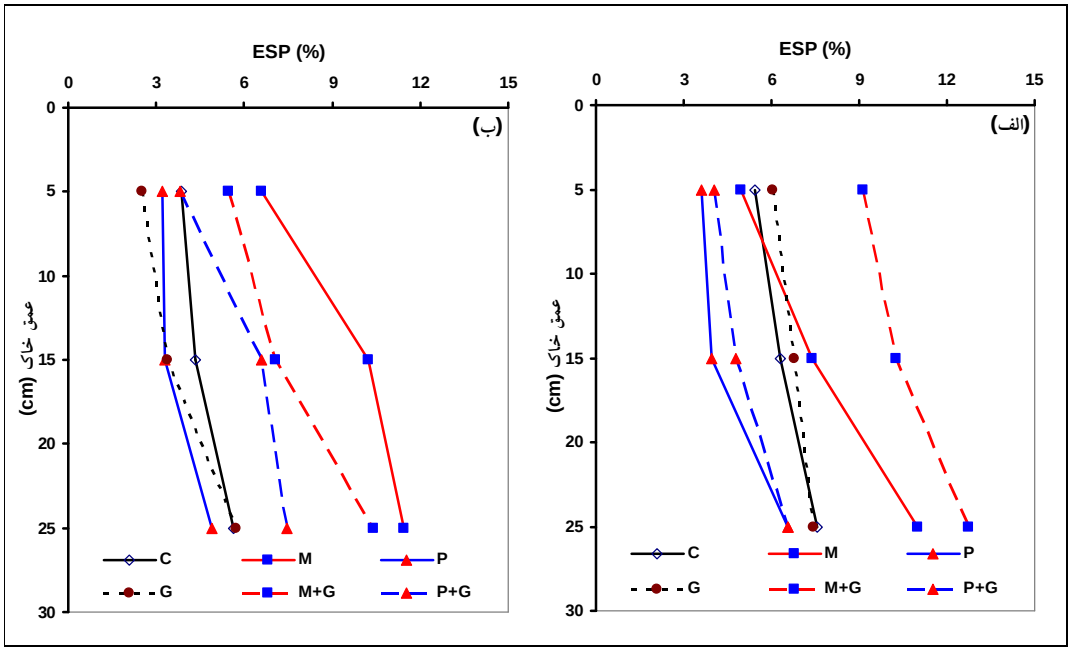
شکل 2- تغییرات غلظت پتاسیم قابل جذب در عمق‌های مختلف خاک برای تیمارهای مورد مطالعه پس از آبیاری با الف) آب معمولی و ب) آب تیمارشده با اسید سولفوریک



شکل 3- تغییرات غلظت کلسیم تبادلی در عمق‌های مختلف خاک برای تیمارهای مورد مطالعه پس از آبیاری با الف) آب معمولی و ب) آب تیمارشده با اسید سولفوریک



شکل 4- تغییرات غلظت منیزیم تبادلی در عمق‌های مختلف خاک برای تیمارهای مورد مطالعه پس از آبیاری با
الف) آب معمولی و ب) آب تیمارشده با اسید سولفوریک



شکل 5- تغییرات ESP در عمق‌های مختلف خاک برای تیمارهای مورد مطالعه پس از آبیاری با
الف) آب معمولی و ب) آب تیمارشده با اسید سولفوریک

جدول 5- تأثیر نسبی کاربرد تیمارهای مختلف بر تغییر کاتیون‌های تبادلی نسبت به تیمار شاهد

تیمار	سدیم تبادلی		پتاسیم تبادلی		کلسیم تبادلی		منیزیم تبادلی		ESP	
	بدون اسید	با اسید	بدون اسید	با اسید	بدون اسید	با اسید	بدون اسید	با اسید	بدون اسید	با اسید
کود دامی	19/3	121/3	5/4	6/5	-13/9	-11/5	-14/6	21/3	21/1	104/8
تفاله پسته	-17/4	-2/4	25/2	20/1	7/2	6/7	-3/7	44/3	-26/7	-17/2
گچ	23/7	4/5	6/6	0/8	36/1	33/5	23/2	136/1	5/2	-15/9
گچ+کود دامی	102/0	99/1	24/3	10/4	6/7	12/4	9/8	52/5	66/5	66/2
گچ+تفاله پسته	-2/7	55/3	32/3	9/0	30/8	18/7	-31/7	62/3	-20/1	29/5

اعداد منفی و مثبت به‌ترتیب نشان‌دهنده کاهش و افزایش نسبت به تیمار شاهد است.

فهرست منابع:

1. Akhtar M.S., T.S. Steenhuis, B.K. Richards, and M.B. McBride. 2003. Chloride and lithium transport in large arrays of undisturbed silt loam and sandy loam soil columns. Vadose Zone J. 2: 715-727.
2. Amezketa, E., R. Aragues, and R. Gazol. 2005. Efficiency of sulfuric acid, mined gypsum and two gypsum by-products in soil crusting prevention and sodic soil reclamation. Agron. J. 97: 983-989.
3. Ammari T.G., A.B. Tahboub, H.M. Saoub, B.I. Hattar, and Y.A. Al-Zubi. 2008. Salt removal efficiency as influenced by phyto-amelioration of salt-affected soils. J. Food Agri., Environ. 6: 456-460.
4. Anapali, O., V. Sahin, T. Oztas, and A. Hanay. 2001. Defining effective salt leaching regions between drains. Turk. J. Agric. 25: 51-56.
5. Chorom, M. and P. Rengasamy. 1997. Carbonate chemistry, pH and physical properties of an alkaline sodic soil as affected by various amendments. Aust. J. Soil Res. 35: 149-161.
6. Clark, G.J., N. Dodgshun, P.W.G. Sale, and C. Tang. 2007. Changes in chemical and biological properties of a sodic clay subsoil with addition of organic amendments. Soil Biol. Biochem. 39: 2806-2817.
7. David, R. and P. Dimitrios. 2002. Diffusion and cation exchange during the reclamation of saline structured soils. Geoderma. 107: 271-279.
8. Elsharawy, M.A.O., M.M. Elbording, and A.A. Sedeka. 2008. Improvement of a salt affected soil on Bahr EL-Bakar Area using certain industrial by products. J. Appl. Sci. Res. 47: 839-846.
9. Flagella, Z., V. Cantore, M.M. Giuliani, E. Tarantino, and A. De Caro. 2002. Crop salt tolerance. Physiological, yield and quality aspects. Rec. Res. Dev. Plant Biol. 2: 155-186.
10. Hanay, A., F. Buyuksanmz, F.M. Kiziloglu, and M.V. Canbolat. 2004. Reclamation of saline-sodic soils with gypsum and MSW compost. Compost Sci. Util. 12(4): 175-179.
11. Harrison, R., D. Xue, C. Henry, and D.W. Cole. 1994. Long term effects of heavy applications of biosolids on organic matter and nutrient content of a coarse-textured forest soil. Forest Ecol. Manag. 66: 165-177.
12. Jalali, M. and F. Ranjbar 2009. Effects of sodic water on soil sodicity and nutrient leaching in poultry and sheep manure amended soils. Geoderma. 153: 194-204.
13. Keren, R. 1996. Reclamation of sodic-affected soils. In: Agassi, M. (Ed.), Soil Erosion, Conservation and Rehabilitation. pp. 353-374. Marcel Dekker Inc, New York.

14. Li, F.H. and R. Keren. 2009. Calcareous sodic soil reclamation as affected by corn stalk application and incubation: A laboratory study. Pedosphere. 19(4): 465-475
15. Loveday, J. 1976. Relative significance of electrolyte and cation exchange effects when gypsum is applied to a sodic clay soil. Aust. J. Soil Res. 14: 361-371.
16. Mitchell, J.P., C. Shennan, M.J. Singer, D.W. Peters, R.O. Miller, T. Prichard, S.R. Grattan, J.D. Rhoades, D.M. May, and D.S. Munk. 2000. Impacts of gypsum and winter cover crops on soil physical properties and crop productivity when irrigated with saline water. Agri. Water Manag. 45: 55-71.
17. Mostafazadeh-Farad, B., M. Heidarpour, A. Aghakhani, and M. Feizi. 2007. Effects of irrigation water salinity and leaching on soil chemical properties in an arid region. Int. J. Agri. Biol. 9(3): 466-469.
18. Nelson, P.N., J.A. Baldock, P. Clarke, J.M. Oades, and G.J. Churchman. 1999. Dispersed clay and organic matter in soil: Their nature and associations. Aust. J. Soil Res. 37: 289-315.
19. Oster, J.D. and H. Frenkel. 1980. The chemistry of the reclamation of sodic soils with gypsum and lime. Soil Sci. Soc. Am. J. 44: 41-45.
20. Oster, J.D., I. Shainberg, and I.P. Abrol. 1996. Reclamation of salt-affected soil. In: Agassi, M. (Ed.), Soil Erosion, Conservation and Rehabilitation. pp. 315-352. Marcel Dekker Inc, New York.
21. Pansu, M. and J. Gautheyrou. 2006. Handbook of Soil Analysis, Mineralogical, Organic and Inorganic Methods. Springer. 993 p.
22. Qadir, M. and J.D. Oster. 2004. Review, Crop and irrigation management strategies for saline-sodic soils and waters aimed at environmentally sustainable agriculture. Sci. Total Envir. 323: 1-19.
23. Qadir, M., A. Ghafoor, and G. Murtaza. 2001. Use of saline-sodic waters through phytoremediation of calcareous saline-sodic soils. Agr. Water Manag. 50: 197-210.
24. Qadir, M., R.H. Qureshi, and N. Ahmad. 1996. Reclamation of a saline-sodic soil by gypsum and Leptochloa fusca. Geoderma. 74: 207-217.
25. Quirk, J.P. 2001. The significance of the threshold and turbidity concentrations in relation to sodicity and microstructure. Aust. J. Soil Res. 39: 1185-1217.
26. Sadiq, M., G. Hassan, G.A. Chaudhry, N. Hussain, S.M. Mehdi, and M. Jamil. 2003. Appropriate land preparation methods and sulfuric acid use for amelioration of salt affected soils. Pakistan J. Agronomy. 138-145.
27. Sadiq, M., G. Hassan, S.M. Mehdi, N. Hussain, and M. Jamil. 2007. Amelioration of saline-sodic soils with tillage implements and sulfuric acid application. Pedosphere. 17(2): 182-190.
28. Singh, H. and M.S. Bajwa. 1991. Effect of sodic irrigation and gypsum on the reclamation of sodic soil and growth of rice and wheat plants. Agri. Water Manag. 20(2): 163-171.
29. Smart, M.K. 2003. Effect of long term irrigation with reclaimed water on soils of the northern Adelaide plains. Aust. J. Soil Res. 1-16.
30. Tejada M., C. Garcia J.L. Gonzalez, and M.T. Hernandez. 2006. Use of organic amendment as a strategy for saline soil remediation: Influence on the physical, chemical and biological properties of soil. Soil Bio. Biochem. 38: 1413-1421.
31. Valzano, F.P., R.S.B. Greene, B.W. Murphy, P. Rengasamy, and S.D. Jarwal. 2001. Effects of gypsum and stubble retention on the chemical and physical properties of a sodic grey Vertosol in western Victoria. Aust. J. Soil Res. 39: 1333-1347.
32. Vance, W.H., J.M. Tisdell, and B.M. McKenzie. 1998. Residual effects of surface application of organic matter and calcium salts on the sub-soil of a red-brown earth. Aust. J. Exp. Agri. 38: 595-600.

33. Walker, D.J. and M.P. Bernal. 2008. The effects of olive mill waste compost and poultry manure on the availability and plant uptake of nutrients in a highly saline soil. Biores. Tech. 99: 396-403.
34. Walkley, A. and I.A. Black. 1934. An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter, and proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Sci. 37: 29-38.
35. Wong, V.N.L., R.C. Dalal, and R.S.B. Greene. 2009. Carbon dynamics of sodic and saline soils following gypsum and organic material additions: A laboratory incubation. Appl. Soil Ecol. 41: 29-40.