

## برآورد ضریب گزینشگری گاپون برای تبادل سدیم با کلسیم و منیزیم در برخی خاکهای متأثر از نمک دشت تبریز

انور فرهمند<sup>۱</sup>، شاهین اوستان<sup>۲\*</sup>، علی اصغر جعفرزاده<sup>۳</sup> و ناصر علی اصغرزاد<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup>دانشجوی سابق کارشناسی ارشد، <sup>۲</sup>استادیار، <sup>۳</sup>استاد، <sup>۴</sup>دانشیار گروه خاکشناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز

### چکیده

محققان آزمایشگاه شوری ایالات متحده با استفاده از معادله تبدالی گاپون مقدار عددی  $(\text{mmol L}^{-1})^{-0.5}$  را برای ضریب گزینشگری گاپون ( $K'_G$ ) پیشنهاد کردند. از آن پس ESR خاکها، با آگاهی از مقدار عددی  $K'_G$ ، از SAR برآورد شده و ESP محاسبه می شود. با این حال، نتایج تحقیقات بعدی حاکی از آن بود که  $K'_G$  مقدار ثابتی نداشته و بسته به ویژگی های خاک می تواند دامنه نسبتاً وسیعی از مقادیر را به خود اختصاص دهد. هدف از اجرای این تحقیق پیدا کردن رابطه بین ESR و SAR و به وجود آوردن امکان برآورد ESP از SAR در برخی نمونه خاکهای متأثر از نمک در منطقه دشت تبریز بود. بدین منظور تعداد ۳۰ نمونه مرکب خاک از منطقه مزبور جمع آوری گردید. رابطه ESR و SAR برای خاکهای مورد بررسی با SAR کوچکتر از  $(\text{mmol L}^{-1})^{-0.5}$  به صورت:  $(\text{ESR} = 0.011 + 0.0072 \text{ SAR}, r^2 = 0.86)$  به دست آمد. پس از تصحیح اثر دفع آنیونی برای خاکهای با  $\text{EC}_e$  بزرگتر از  $10 \text{ dSm}^{-1}$  رابطه ی فوق به صورت:  $(\text{ESR}_{\text{corr}} = -0.041 + 0.012 \text{ SAR}, r^2 = 0.90)$  در آمد. با توجه به نتایج به دست آمده می توان چنین استنباط کرد که تصحیح اثر دفع آنیونی سبب افزایش قابل ملاحظه در مقدار عددی  $K'_G$  می گردد. با این حال،  $K'_G$  نمونه خاکهای مورد بررسی هنوز کوچکتر از مقدار پیشنهاد شده توسط آزمایشگاه شوری ایالات متحده است. این امر ممکن است به واسطه شوری زیاد خاکها در تحقیق حاضر باشد که از طریق مکانیسمهایی علاوه بر دفع آنیونی (تأثیر فشرده گی DDL و یا تشکیل کواسی کریستالها) منجر به افزایش گزینش کاتیونهای دو ظرفیتی می گردد. مقادیر  $K'_G$  خاکها قبل از تصحیح اثر دفع آنیونی همبستگی معنی داری با مقادیر  $\text{EC}_e$  و ESP داشت. در حالی که بعد از تصحیح اثر دفع آنیونی  $K'_G$  صرفاً با ESP همبستگی مثبت معنی داری را نشان داد.

**واژه های کلیدی:** معادله تبدالی، سدیمی بودن، دفع آنیونی، ESP، SAR، ESR

### مقدمه

آمونیم به جای سدیم و انحلال گچ، CEC را کمتر اندازه گیری کرده و بنابراین ESP بیشتر از مقدار واقعی برآورد می شود (Rhoades, 1982). به علاوه اندازه گیری CEC بسیار وقت گیر و پرهزینه می باشد. اندازه گیری میزان سدیم تبدالی در خاکهای با  $\text{EC}_e > 10 \text{ dSm}^{-1}$  نیز همراه با خطای اثر دفع آنیونی است. این خطا سبب می شود که میزان سدیم تبدالی کمتر از مقدار واقعی برآورد شود (Jurinak et al., 1984). به منظور غلبه بر مشکلات فوق و تعیین قابل اعتماد ESP خاک، برخی محققان ترجیح داده اند که درصد سدیم تبدالی خاک را از آنالیز عصاره اشباع خاک برآورد نمایند. نخستین شاخص درجه سدیمی بودن خاک و آب آبیاری درصد سدیم محلول (Soluble sodium percentage) یعنی درصد سدیم از کل کاتیونهای محلول بود. تحقیقات به عمل آمده در غرب تگزاس نشان داد که همبستگی معنی داری بین SSP و ESP خاک وجود ندارد (Kovda, 1973). در سال ۱۹۵۴ آزمایشگاه شوری ایالات متحده (USSL) نسبت جذب سدیم (Sodium adsorption ratio) را معرفی کرد (Richards, 1954).

محققان از دیرباز در اندازه گیری درصد سدیم تبدالی (Exchangeable sodium percentage) خاکهای متأثر از نمک با مشکلاتی مواجه بوده اند. اندازه گیری این پارامتر وقت گیر، پرهزینه و همراه با خطاست. خطاهای اندازه گیری ESP مربوط به هر دو عامل ظرفیت تبادل کاتیونی (Cation exchange capacity) و میزان سدیم تبدالی است. منابع خطای متعددی برای اندازه گیری CEC به روش باور (Bower et al., 1952) گزارش شده است. از جمله عدم خارج شدن کامل مازاد کاتیون شاخص طی مرحله شستشو و وجود کانی زئولیت در خاک که منجر به برآورد بیشتر CEC شده و بنابراین ESP کمتر از مقدار واقعی به دست می آید. به علاوه عدم اشباع کامل مکانهای تبدالی با کاتیون شاخص، هدر رفتن خاک و هیدرولیز کاتیون شاخص تبدالی طی مرحله شستشو، عدم جایگزینی کامل

\* پست الکترونیک مکاتبه کننده: oustan@hotmail.com

برای دامنه وسیعی از خاک‌ها با سطوح متفاوت شوری و  $Na^+$  تبدالی ثابت فرض شده است. با این وجود، برخی تحقیقات فرض فوق را مورد تردید قرار داده و نشان دادند که این ضریب برای تبادل  $Na^+$  با  $Ca^{2+}$  و  $Mg^{2+}$  متغیر می‌باشد (Agca and Dogan, 1998; Guth and Brown, 1985; Frenkel and Alperovitch, 1984; Jurinak et al., 1984; Evangelou and Marsi, 2003; Poonia et al., 1984; Kapoor et al., 1989; Doering and Willis, 1980; Bower, 1954) برخی از محققان بر این اعتقادند که تعیین مقدار عددی  $K'_G$  برای خاک‌های مناطق مختلف ضروری می‌باشد (Abrol et al., 1988; Levy and Hillel, 1968; Nadler and Margaritz, 1981; Kopttike et al., 2006; Patruno et al., 2002). برشگر و همکاران (Bresler et al., 1982) نیز معتقدند که ثبات نسبی  $K'_G$  تا حدی اتفاقی است. گزارش‌ها نشان می‌دهد که  $K'_G$  تحت تأثیر ویژگی‌های خاک از قبیل pH، EC، مقدار و نوع رس، مقدار مواد آلی، ESP و سهم منیزیم از مجموع کلسیم و منیزیم تبدالی قرار دارد (Endo et al., 2002; Paliwal and Gandhi, 1976; Bajwa and Kalkat, 1990; Pratt et al., 1962). هدف از تحقیق حاضر بررسی امکان برآورد ESP از SAR برای برخی خاک‌های متاثر از نمک دشت تبریز می‌باشد.

### مواد و روش‌ها

تعداد ۳۰ نمونه مرکب خاک از عمق ۲۰-۳۰ سانتی‌متری خاک‌های منطقه دشت تبریز در خرداد ماه سال ۸۴ جمع آوری گردید. خاکها پس از هوا خشک شدن از غربال ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. اندازه‌گیری قابلیت هدایت الکتریکی (EC) عصاره اشباع ( $EC_e$ )، غلظت کاتیونها (سدیم، کلسیم و منیزیم) و آنیونها (کلراید، سولفات، بی‌کربنات و کربنات) در عصاره اشباع، pH گل اشباع ( $pH_p$ )، میزان سدیم تبدالی و گچ بر مبنای روش‌های ارائه شده به وسیله ریچاردز (Richards, 1954) انجام گرفت. اندازه‌گیری کربن آلی (Nelson and Sommers, 1982)، کلسیم و منیزیم تبدالی و CEC (Bower et al, 1952) و کربنات کلسیم معادل (Jackson, 1960) خاک‌ها نیز انجام شد. درصد رس خاکها به روش هیدرومتری (Bouyococ, 1962) تعیین گردید. نهایتاً مقادیر SAR، ESR و ESP خاکها محاسبه شد. همچنین میزان دفع آنیونی خاکها با توجه به غالب بودن آنیون کلراید، با اندازه‌گیری میزان یون کلراید پس از شستشو با محلول نیترا منیزیم ۰/۱ نرمال و نیز اندازه‌گیری میزان یون کلراید در عصاره اشباع به روش باور و هاچر (Bower and Hatcher, 1962) مورد محاسبه قرار گرفت. گونه بندی محلول خاک نیز با استفاده از نرم‌افزار VMINTEQ انجام پذیرفت. در این نرم‌افزار برای قدرتهای یونی تا ۰/۵ مولار از معادله‌ی داوین

$$SAR(mmoleL^{-1})^{0.5} = \frac{[Na^+]}{\sqrt{[Ca^{2+} + Mg^{2+}]/2}}$$

که در آن غلظت  $Na^+$ ،  $Ca^{2+}$  و  $Mg^{2+}$  برحسب  $mmoleL^{-1}$  است. پیشینه ارائه شاخص SAR به مطالعات اولیه گاپون (Gapon, 1933) بر می‌گردد. معادلات متعددی برای توصیف نحوه توزیع کاتیونها بین فازهای تبدالی و محلول و پیش بینی ترکیب کاتیونی فاز تبدالی از ترکیب کاتیونی فاز محلول ارائه شده که از بین آنها می‌توان به معادلات گاپون، کر، وانسلو، دیویس و گینز-توماس اشاره کرد (Sparks, 1995). با این وجود معادله تجربی گاپون موفقیت آمیزترین معادله بوده است. آزمایشگاه شوری ایالات متحده با فرض اینکه به غیر از  $Na^+$ ،  $Ca^{2+}$  و  $Mg^{2+}$  سایر کاتیون‌های موجود در فاز محلول و تبدالی قابل صرف نظر می‌باشند، معادله گاپون را به صورت زیر تغییر داده و آن را کاربردی کرد:

$$\frac{[NaX]}{CEC - [NaX]} = K'_G \frac{[Na^+]}{\sqrt{[Ca^{2+} + Mg^{2+}]/2}}$$

که در آن X مکان تبدالی بوده و CEC و NaX برحسب  $cmole\ kg^{-1}$  می‌باشند. برخلاف معادله اولیه گاپون که براساس تبادل بین دو کاتیون بنا شده بود، محققان آزمایشگاه شوری ایالات متحده با این فرض که دو کاتیون  $Ca^{2+}$  و  $Mg^{2+}$  رفتار کاملاً مشابهی دارند، این رابطه را برای سه کاتیون  $Na^+$ ،  $Ca^{2+}$  و  $Mg^{2+}$  بازنویسی کردند. بر این اساس  $K'_G$  در معادله فوق ضریب گزینشگری تغییر یافته گاپون نامیده شد (Jurinak and Suarez, 1990).

معادله فوق را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$ESR = K'_G SAR$$

که در آن ESR نسبت سدیم تبدالی (Exchangeable sodium ratio) ثابت می‌شود که ESP خاک را می‌توان از SAR برآورد کرد:

$$ESP = \frac{100 ESR}{1 + ESR}$$

چنانچه مقدار عددی  $K'_G$  مشخص باشد می‌توان با استفاده از SAR عصاره اشباع، ESP خاک را برآورد کرد. در نخستین تحقیق رابطه بین ESR و SAR برای ۵۹ خاک از ۹ ایالت غربی آمریکا به صورت زیر به دست آمد (Richards, 1952):

$$ESR = -0.126 + 0.1475 SAR, r = 0.923$$

به طوری که ملاحظه می‌شود معادله برازش خوبی را به داده‌ها نشان داده است. با این وجود، در مقادیر خیلی کوچک SAR و ESR، رابطه این دو از معادله اصلی گاپون پیروی نمی‌کند. بعلاوه، پراکندگی نقاط در  $ESR > 0.3$  افزایش قابل ملاحظه‌ای را نشان می‌دهد. نتایج این تحقیق ثبات  $K'_G$  را برای خاکهای مختلف القاء می‌کند. به عبارت دیگر، ضریب گزینشگری گاپون

مولار است (Helgeson, 1969)، ولی برای سایر محلولهای الکترولیت بین قدرت یونی ۰/۳ تا ۱ مولار معتبر می‌باشد (Bethke, 1996).

### نتایج و بحث

#### ویژگی‌های خاکها

دامنه، میانگین، انحراف معیار و ضریب تغییرات برخی ویژگی‌های خاکهای مورد بررسی در این تحقیق در جدول ۱ ارائه شده است. با توجه به بزرگی ضریب تغییرات اکثر ویژگی‌ها می‌توان چنین استنباط کرد که خاک‌های مورد بررسی (۹۰ درصد شور- سدیمی) دارای تنوع زیادی می‌باشند.

(Davies, 1962)  $\log \gamma_i = AZ_i^2 \left( \frac{I^{0.5}}{1+I^{0.5}} - 0.3I \right)$  و برای

قدرت‌های یونی ۰/۵ تا ۱ مولار از معادله‌ی بی‌دات (B) هلگسون (Helgeson, 1969)  $\left( \log \gamma_i = -AZ_i^2 \frac{I^{0.5}}{1+a^{\circ}BI^{0.5}} + B^{\circ}I \right)$  با

$B^{\circ} = 0.41 \text{ L mol}^{-1}$  در  $C^{\circ} = 25$  استفاده شد. در این معادله  $a^{\circ}$  پارامتر وابسته به بار یون است که برای یونهای یک ظرفیتی  $4 \times 10^{-8} \text{ cm}$  و برای یون‌های دو ظرفیتی  $5 \times 10^{-8} \text{ cm}$  در نظر گرفته می‌شود (Kerrisk, 1981). مقادیر پارامترهای  $a^{\circ}$  و  $B^{\circ}$  در بانک اطلاعاتی نرم افزار وارد گردید. سه خاک به دلیل داشتن قدرت یونی بیشتر از ۱ مولار کنار گذاشته شدند. زیرا گرچه بهترین کارایی معادله فوق برای محلول NaCl تا قدرت یونی ۳

جدول ۱- حداقل، حداکثر، میانگین، انحراف معیار و ضریب تغییرات ویژگی‌های خاکهای مورد مطالعه.

ویژگی خاک	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات
رس (%)	۱۰/۱۹	۷۵/۳۳	۳۷/۱۱	۱۸/۵۴	۴۶
SP (%)	۲۱/۹	۷۷/۸	۴۶/۱۵	۱۴/۲۳	۳۰/۸
pH <sub>p</sub>	۷/۲۸	۸/۹۶	۷/۴۷	-۰/۳۱۵	۴/۲۱
بیکربنات محلول (mmol L <sup>-1</sup> ) <sup>*</sup>	۰/۱	۸/۹	۲/۶۹	۲/۱۶	۸۰/۱
کلسیم محلول (mmol L <sup>-1</sup> )	۰/۵۳۵	۱۹۷/۹	۷۰/۰۶	۵۷/۴۴	۸۲
منیزیم محلول (mmol L <sup>-1</sup> )	۱/۳۳	۲۴۶/۱	۷۱/۰۸	۵۷/۸۱	۸۱/۳
سدیم محلول (mmol L <sup>-1</sup> )	۱/۹	۱۸۹۰	۵۰۵/۷	۴۵۲	۸۹/۴
پتاسیم محلول (mmol L <sup>-1</sup> )	۰/۳۳۳	۱۱/۸	۴/۲۷	۳/۷۶	۸۸/۱
کلراید محلول (mmol L <sup>-1</sup> )	۱/۵	۲۰۷۰	۵۸۳/۱	۴۵۹/۸	۸۵/۰
سولفات محلول (mmol L <sup>-1</sup> )	۱/۳۸	۲۶۲/۷	۶۶/۴۶	۵۶/۱۷	۸۴/۵
EC <sub>e</sub> (dSm <sup>-1</sup> )	۰/۵۴۷	۱۳۶/۴	۴۹/۸۲	۳۶/۱۴	۷۳/۶
CEC (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	۷	۲۷/۵	۱۶/۱۴	۶	۳۷/۲
گچ (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	۰/۰۰۳۱	۳۱/۹۸	۸/۲۹	۹/۶۲	۱۱۶
کربن آلی (%)	۰/۳۵۲	۱/۳۰۶	۰/۷۳۵	۰/۲۵۹	۳۵/۳
کربنات کلسیم معادل (%)	۱۰/۷۸	۴۴/۱۸	۲۰/۴۵	۶	۲۹/۳
SAR (mmol L <sup>-1</sup> ) <sup>۰/۵</sup>	۱/۲۲	۴۸۳/۷	۶۵/۹۹	۸۷/۳۹	۱۳۲/۴
ESP (%)	۰/۹۳	۶۵/۴	۲۵/۳	۱۶/۱۷	۶۳/۹

\* فقط در یکی از خاکهای مورد بررسی میزان یون کربنات mmol L<sup>-1</sup> ۶ اندازه‌گیری گردید.

خاک دیگر بود  $[K'_G = 0.039 \text{ (mmol L}^{-1}\text{)}^{-0.5}]$  که کنار گذاشته شد. پالیوال و مالیوال (Paliwal and Maliwal, 1971) نیز عدم صحت معادله تبدالی گاپون را در قلیائیت‌های بالا گزارش کرده‌اند. به طوری که ملاحظه می‌شود مقدار عددی  $K'_G$  خیلی کوچکتر از مقدار پیشنهاد شده توسط آزمایشگاه شوری ایالات متحده  $[0.1475 \text{ (mmol L}^{-1}\text{)}^{-0.5}]$  می‌باشد. نتایج مشابهی توسط سایر محققان ارائه گردیده است (Bazargan and Towfighi, 1990; Agca and Dogan, 1998; Amrhein and Suarez, 1991; Jurinak et al., 1984; Doering and Willis, 1980; Paliwal and Gandhi, 1976; Patrino et al., 2002; Poonia and Pal, 1979; Poonia and Talbudeen, 1977; Van-Bladel et al., 1972). گرچه مقادیر  $K'_G$  خیلی بزرگتر از  $(0.1475 \text{ (mmol L}^{-1}\text{)}^{-0.5})$  نیز توسط برخی محققان گزارش شده است (Evangelou and Marsi, 2003; Frenkel and

#### برازش معادله گاپون

دامنه‌ی مقادیر  $[(ESR \text{ Na}_{ex}/(CEC-\text{Na}_{ex}))]$  در ۳۰ نمونه خاک مورد مطالعه از ۰/۰۰۹۳ تا ۱/۸۹ (به طور متوسط ۰/۴۱۵) تغییر می‌کند. شکل ۱ رابطه‌ی ESR و SAR را برای ۲۹ نمونه خاک نشان می‌دهد:

$$\text{mmol L SAR } 00618/0 + 0458/0 = \text{ESR}^{-1/5}$$

$$(r^2 = 0.692 \text{ و } SEE = 0.16)$$

شیب رابطه‌ی خطی مزبور همان  $K'_G$   $(\text{mmol L}^{-1}\text{)}^{-0.5}$  است. دامنه‌ی مقادیر  $K'_G$  در خاک‌های مورد مطالعه ۰/۰۰۳۵ تا  $(\text{mmol L}^{-1}\text{)}^{-0.5}$  ۰/۱۴۱ است. رابطه‌ی ESR و SAR برای یکی از ۳۰ نمونه خاک مورد بررسی (خاکی با  $\text{pH}_p = 8.96$  و حاوی یون کربنات در عصاره‌ی اشباع که SAR آن  $(\text{mmol L}^{-1}\text{)}^{0.5}$  ۴۸۴ اندازه‌گیری گردید) بسیار متفاوت از ۲۹

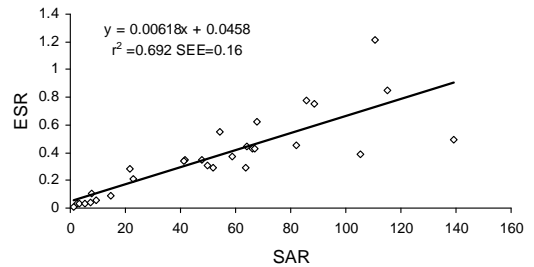
تنهایی سبب گزینش کاتیونهای دو ظرفیتی (کلسیم و منیزیم) در مقایسه با کاتیونهای یک ظرفیتی (سدیم) گردد. بنا به اظهار Shainberg et al. (۱۹۸۰) این موضوع صرفاً برای سطوح خارجی صادق بوده و در مورد سطوح داخلی برعکس است. بر مبنای گزارش Jurinak et al. (۱۹۸۴) در یک نمونه کائولینیتی، با افزایش کل نمکهای محلول (Total soluble salts) از ۱۰ به  $500 \text{ mmol L}^{-1}$   $K'_G$  از  $0.138$  به  $0.047 \text{ (mmol L}^{-1})^{-1/5}$  کاهش یافت. در حالی که در یک نمونه مونتوریلونیتی و برای همین دامنه TSS،  $K'_G$  ثابت بود. Bower (۱۹۵۴) نیز نتیجه مشابهی را برای مونتوریلونیت گزارش کرده بود. در عین حال، Doering and Willis (۱۹۸۰) گزارش کرده‌اند که  $K'_G$  یک نمونه مونتوریلونیتی شدیداً وابسته به غلظت بوده و با افزایش آن کاهش می‌یابد. Kopttike et al. (۲۰۰۶) معتقدند که کاهش  $K'_G$  با افزایش شوری به دلیل تشکیل کواسی کریستالها (quasicrystals) است که با ایجاد سطوح داخلی منجر به افزایش گزینش کاتیونهای دو ظرفیتی می‌گردد. با این حال، Amrhein and Suarez (۱۹۹۱) بر این اعتقادند که گزینشگری در واکنش تبدالی  $\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+}$  مستقل از غلظت است. Bazargan and Towfighi (۱۹۹۰) علت رابطه معکوس  $K'_G$  و EC را خطای دفع آنیونی می‌دانند. همبستگی مثبت بین  $K'_G$  و EC نیز گزارش شده است (Paliwal and Gandhi, 1976; Szabolcs and Darab, 1966). همچنین برخی محققان با افزایش شوری، افزایش تمایل خاک به جذب سدیم را ملاحظه کرده‌اند (Evangelou and Marsi, 2003; Guerrero-Alves et al., 2002; Richards, 1954).

دفع آنیونی (Anion exclusion) در ۲۴ نمونه خاک (خاکهای با  $10 \text{ dS m}^{-1} > EC_e$ ) اندازه‌گیری شد. میزان دفع آنیونی از  $0.21$  تا  $4/44$  سانتی مول بار بر کیلوگرم (به طور متوسط  $1/74$  سانتی مول بر کیلوگرم یعنی  $10/8$  درصد CEC خاکها) متغیر بود. شکل ۴ رابطه‌ی ESR تصحیح شده برای اثر دفع آنیونی ( $ESR_{corr}$ ) و SAR را برای خاکهای با SAR کوچکتر از  $(\text{mmol L}^{-1})^{-1/5}$   $100$  نشان می‌دهد:  $ESR_{corr} = -0.0415 SAR + 0.120$  ( $r^2 = 0.90$  و  $SEE = 0.116$ )

به طوری که ملاحظه می‌شود افزایش ضریب تعیین رابطه‌ی ESR و SAR پس از تصحیح اثر دفع آنیونی جزئی ( $4/5$  درصد) است. با این حال، در خاک‌های مورد مطالعه توسط Bazargan and Towfighi (۱۹۹۰) این ضریب به طور قابل ملاحظه‌ای از  $0.53$  به  $0.81$  افزایش یافته است. شیب رابطه‌ی خطی ESR و SAR نیز پس از تصحیح اثر دفع آنیونی از  $0.071$  به  $0.120 \text{ (mmol L}^{-1})^{-1/5}$  افزایش می‌یابد. این

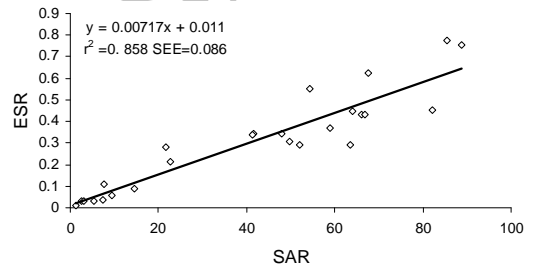
(Alperovitch, 1984; Guerrero-Alves et al., 2002).

به طوری که در شکل ۱ دیده می‌شود پراکندگی نقاط در SARهای بزرگتر از  $(\text{mmol L}^{-1})^{-1/5}$   $100$  ( $ESR > 0.8$ ) افزایش می‌یابد.

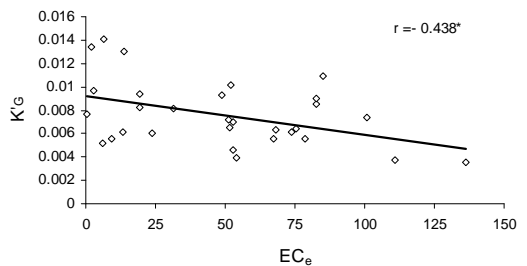


شکل ۱- رابطه‌ی ESR و SAR در ۲۹ خاک مورد مطالعه.

با کنار گذاشتن خاکهای مزبور رابطه‌ی ESR و SAR برای ۲۵ نمونه خاک به صورت زیر در می‌آید (شکل ۲):  $ESR = 0.11 + 0.00717 SAR$  ( $r^2 = 0.858$  و  $SEE = 0.086$ )



شکل ۲- رابطه‌ی ESR و SAR در ۲۵ خاک با  $(\text{mmol L}^{-1})^{-1/5} SAR < 100$ .

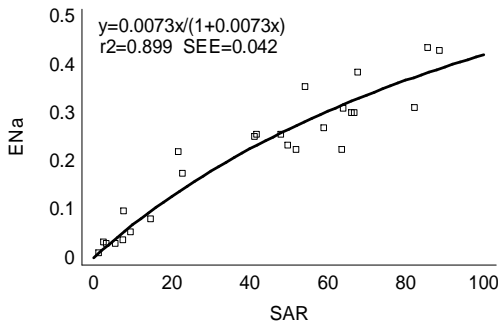


شکل ۳- رابطه‌ی  $K'_G$  با  $EC_e$  در ۳۰ خاک مورد مطالعه.

همان طور که ملاحظه می‌شود کنار گذاشتن خاکهای با SAR بزرگتر از  $(\text{mmol L}^{-1})^{-1/5}$   $100$  سبب افزایش ضریب تعیین از  $0.692$  به  $0.858$  و افزایش  $K'_G$  از  $0.0458$  به  $0.0618$  می‌گردد.

نتایج نشان می‌دهد که  $K'_G$  با افزایش شوری خاک کاهش می‌یابد (شکل ۳) که توسط برخی محققان نیز گزارش شده است (Bazargan and Towfighi, 1990; Frenkel and Alprovitich, 1984; Jurinak et al., 1984; Doering and Willis, 1980). محاسبات Babcook (۱۹۶۳) بر مبنای نظریه لایه دوگانه پخشیده نیز آن را تأیید می‌کند. به عبارت دیگر، فشردگی لایه دوگانه که نتیجه افزایش غلظت است، می‌تواند به

طوری که ملاحظه می‌شود مقدار عددی  $K'_G$  برابر  $(\text{mmol L}^{-1})^{-0.5}$  به دست آمده است. با ترسیم  $E_{Na}$  تصحیح شده در مقابل SAR، پس از تصحیح اثر دفع آنیونی، مقدار عددی  $K'_G$  به  $(\text{mmol L}^{-1})^{-0.5}$  افزایش یافت. به طوری که ملاحظه می‌شود با برازش معادله Sposito and Mattigod (۱۹۷۷) به داده‌ها خطای معیار تخمین به طور قابل قدری (حدود ۴ درصد) افزایش می‌یابد.



شکل ۵- ترسیم  $E_{Na}$  در مقابل SAR در ۲۵ خاک با  $(\text{mmol L}^{-1})^{-0.5}$  SAR < ۱۰۰.

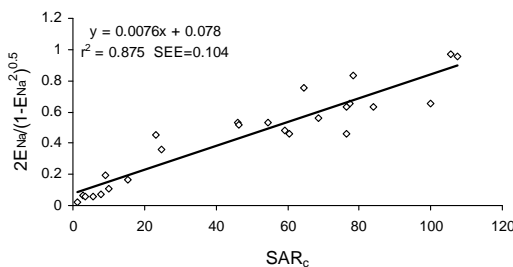
بنا بر اظهار Oster and Sposito (۱۹۸۰) نمی‌توان نسبت فعالیت کاتیون‌ها در فاز تبادلی را معادل با نسبت اکی‌والانی آنها در نظر گرفت. لذا، به دست آوردن  $K'_G$  از رابطه‌ی ارائه شده توسط آزمایشگاه شوری ایالات متحده همراه با خطاست. این محققان رابطه‌ی زیر را برای محاسبه‌ی  $K'_G$  پیشنهاد کرده‌اند:

$$K'_G = \text{SAR}_c \frac{\sqrt{1 - E_{Na}^2}}{2E_{Na}}$$

که در آن  $\text{SAR}_c$  نسبت جذب سدیم بر مبنای غلظت آزاد یونهاست. واحد  $K'_G$  در معادله‌ی فوق  $(\text{mmol L}^{-1})^{-0.5}$  است. شکل ۶ رابطه‌ی مزبور را برای ۲۵ نمونه خاک مورد بررسی نشان می‌دهد:

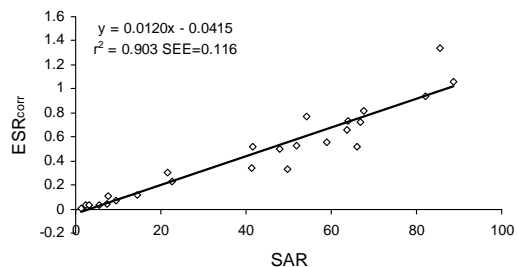
$$2E_{Na} / \sqrt{1 - E_{Na}^2} = 0.078 + 0.0076 \text{SAR}_c$$

$$(r^2 = 0.875 \text{ و } \text{SEE} = 0.104)$$



شکل ۶- رابطه‌ی  $2E_{Na} / \sqrt{1 - E_{Na}^2}$  و  $\text{SAR}_c$  در ۲۵ خاک با  $(\text{mmol L}^{-1})^{-0.5}$  SAR < ۱۰۰.

افزایش در تحقیقات Bazargan and Towfighi (۱۹۹۰) از  $(\text{mmol L}^{-1})^{-0.5}$  به  $(\text{mmol L}^{-1})^{-0.5}$  بوده است. البته باید توجه داشت که SAR خاکهای مورد مطالعه توسط محققان مزبور کمتر از  $(\text{mmol L}^{-1})^{-0.5}$  بوده است. Amrhein and Suarez (۱۹۹۰) نیز افزایش  $K'_G$  با تصحیح اثر دفع آنیونی را گزارش کرده‌اند. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان چنین استنباط کرد که تصحیح اثر دفع آنیونی سبب افزایش قابل ملاحظه در مقدار عددی  $K'_G$  می‌گردد. با این حال،  $K'_G$  نمونه خاکهای مورد بررسی  $(\text{mmol L}^{-1})^{-0.5}$  هنوز کوچکتر از مقدار پیشنهاد شده  $(\text{mmol L}^{-1})^{-0.5}$  توسط آزمایشگاه شوری ایالات متحده که با توجه به شوری زیاد خاک‌های مورد مطالعه در این تحقیق می‌تواند به دلیل تاثیر فشردگی لایه دو گانه و یا تشکیل کواسی کریستالها باشد.

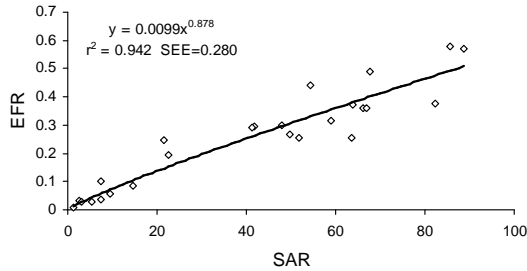


شکل ۴- رابطه‌ی  $E_{SAR\_corr}$  و SAR در ۲۵ خاک با  $(\text{mmol L}^{-1})^{-0.5}$  SAR < ۱۰۰. با منظور کردن غلظت آزاد یون‌ها در عبارت SAR،  $K'_G$  از  $(\text{mmol L}^{-1})^{-0.5}$  به  $(\text{mmol L}^{-1})^{-0.5}$  کاهش یافت. علت این است که فراوانی تشکیل زوج‌های یونی در مورد یونهای دو ظرفیتی کلسیم و منیزیم بیشتر از یونهای یک ظرفیتی سدیم است، لذا پس از اعمال غلظت آزاد یونها در عبارت SAR مخرج کسر بیش از صورت آن کاهش یافته و بنابراین افزایش SAR سبب کاهش  $K'_G$  می‌گردد. با این حال، افزایش ضریب تعیین و کاهش خطای معیار تخمین قابل ملاحظه نیست.

Sposito and Mattigod (۱۹۷۷) استفاده از معادله زیر را به منظور برآورد ضریب گزینشگری گاپون توصیه کرده‌اند. این محققان معادله مزبور را با استفاده از ترمودینامیک تبادل کاتیونی اثبات کردند. Evangelou and Phillips (۱۹۸۷) نیز استفاده از این معادله را مورد تاکید قرار داده‌اند:

$$E_{Na} = K'_G \text{SAR} / (1 + K'_G \text{SAR})$$

که در آن  $E_{Na}$  کسری از مکانهای تبادلی است که توسط سدیم اشغال شده است ( $E_{Na} = \frac{Na_{ex}}{CEC}$ ). بنابراین، از ترسیم  $E_{Na}$  در مقابل SAR یک تابع خط منحنی حاصل می‌شود که وقتی  $\text{SAR} \rightarrow \infty$ ،  $E_{Na} \rightarrow 1$  و وقتی  $\text{SAR} \rightarrow 0$ ، شیب آن برابر  $K'_G$  خواهد بود. چنین ترسیمی برای خاکهای با SAR کوچکتر از  $(\text{mmol L}^{-1})^{-0.5}$  در شکل ۵ نشان داده شده است. به

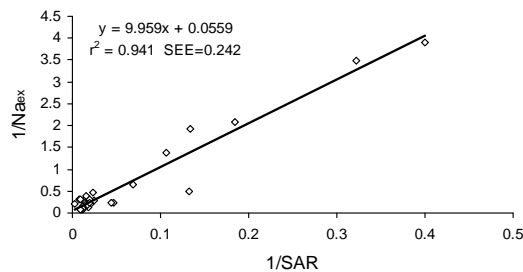


شکل ۸- رابطه ی توانی SAR و EFR در ۲۵ خاک با  $(\text{mmol L}^{-1})^{-0.5}$  SAR < 100

معادله گاپون را می توان به یکی از شکلهای خطی معادله لنگمویر تبدیل کرد (Evangelou and Coale, 1988). در این صورت معادله زیر حاصل می شود:

$$(\text{Na}_{\text{ex}})^{-1} = (\text{CEC})^{-1} K'_G (\text{SAR})^{-1} + (\text{CEC})^{-1}$$

بنابراین چنانچه ترسیمی از  $1/\text{Na}_{\text{ex}}$  در مقابل  $1/\text{SAR}$  در اختیار باشد، شیب خط  $K'_G (\text{CEC})^{-1}$  و عرض از مبدا آن  $(\text{CEC})^{-1}$  خواهد بود. برای خاکهای مورد بررسی مطابقت نسبتاً خوبی بین CEC برآورد شده از معادله فوق  $(17/9 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1})$  و متوسط CEC اندازه گیری شده برای ۲۹ خاک مورد بررسی  $(16/4 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1})$  وجود داشت.



شکل ۹- ترسیم مقادیر  $1/\text{Na}_{\text{ex}}$  در مقابل  $1/\text{SAR}$  برای ۲۹ خاک مورد مطالعه.

با این حال، چنانچه به جای SAR بر مبنای غلظت کل یونها از SAR بر مبنای غلظت آزاد یونها استفاده شود، CEC برآورد شده از معادله فوق  $16/2 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  به دست خواهد آمد.  $K'_G$  محاسبه شده از هر دوروش نیز تقریباً  $(\text{mmol L}^{-1})^{-0.5}$   $0/056$  است که قدری کوچکتر از  $K'_G$  به دست آمده از رابطه ESR و SAR  $(\text{mmol L}^{-1})^{-0.5}$   $0/0618$  می باشد.

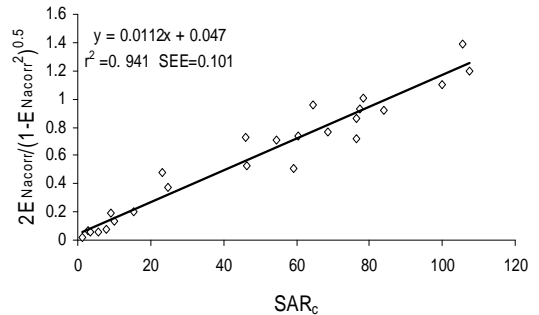
Bower (۱۹۵۹) معتقد است که در مخرج عبارت ESR باید به جای  $\text{CEC} - [\text{Na}_{\text{ex}}]$  از  $[\text{Ca}_{\text{ex}} + \text{Mg}_{\text{ex}}]$  استفاده شود، زیرا در این صورت معادله حاصله واقعی تر بوده و به عبارت دیگر به معادله اصلی گاپون نزدیکتر است. اندازه گیری مقادیر کلسیم و منیزیم تبدالی به روش استات سدیم یک مولار (pH=۸/۲) در خاکهای مورد مطالعه در این تحقیق نشان داد که انحلال گچ موجود در این خاکها سبب می شود که مقادیر کلسیم و منیزیم تبدالی بیشتر از مقادیر واقعی (تقریباً ۱/۲ برابر) برآورد گردد.

شکل ۷ نیز همین رابطه را بعد از تصحیح اثر آنیونی نشان می دهد:

$$2E_{\text{Na}} / \sqrt{1 - E_{\text{Na}}^2} = 0/47 + 0/112 \text{ SAR}_c$$

( $r^2 = 0/941$  و  $\text{SEE} = 0/101$ )

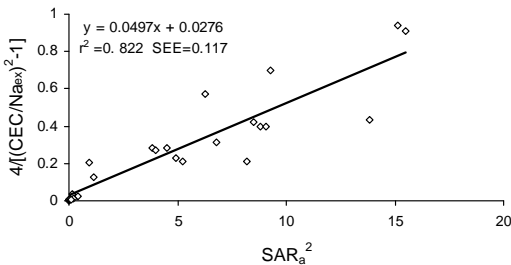
به طوری که ملاحظه می شود هم ضریب تعیین و هم  $K'_G$  بعد از تصحیح اثر آنیونی افزایش یافته اند. با این حال، علیرغم برابری تقریبی ضرایب تعیین، خطای معیار تخمین برازش این معادله بیشتر از معادله قبلی است.



شکل ۷- رابطه ی  $2E_{\text{Na}} / \sqrt{1 - E_{\text{Na}}^2}$  و SAR بعد از تصحیح اثر دفع آنیونی در ۲۵ خاک با  $(\text{mmol L}^{-1})^{-0.5}$  SAR < 100

Rao et al. (۱۹۶۸) پیشنهاد کردند که به جای پارامتر ESR به شکل  $E_{\text{Na}} / (1 - E_{\text{Na}})$  از نسبت کسر تبدالی (EFR) که عبارت است از  $E_{\text{Na}} / (1 - E_{\text{Na}})^{0.5}$  استفاده شود. ترسیم رابطه خطی این پارامتر در مقابل SAR حاکی از عدم تغییر قابل ملاحظه ضریب تعیین بود که توسط Rieu et al. (۱۹۸۰) و al. (۱۹۹۱) نیز گزارش شده است. با این حال، رابطه توانی این دو پارامتر افزایش قابل ملاحظه ای را در ضریب تعیین نشان داد که در شکل ۸ نشان داده شده است. با این حال، خطای معیار تخمین برای چنین برازشی به طور قابل ملاحظه ای بیشتر از سایر برازشهاست.

Evangelou and Coale (۱۹۸۸) پیشنهاد می کنند که در ESR های بزرگتر از ۰/۲ که مقادیر  $K'_G$  معمولاً ثابت نیست بهتر است از ترسیمهای ESR/1 در مقابل SAR/1 و به ویژه  $\text{Na}_{\text{ex}} / \text{SAR}$  (میزان سدیم تبدالی) در مقابل  $\text{Na}_{\text{ex}} / \text{SAR}$  و SAR/1 در مقابل SAR استفاده شود. از ترسیمات مزبور در خاکهای مورد مطالعه (۲۹ نمونه خاک با کنار گذاشتن یک خاک با  $\text{EC}_e$  و SAR بسیار کوچک) صرفاً ترسیم  $1/\text{Na}_{\text{ex}}$  در مقابل  $1/\text{SAR}$  دارای ضریب تعیین بزرگی (۰/۹۴۱)  $r^2 =$  بود. با این حال به دلیل بزرگی مقادیر  $\text{Na}_{\text{ex}}$  و SAR تجمع اکثر نقاط در نزدیکی مبدا مختصات صورت گرفته و خطای معیار تخمین نیز به طور قابل ملاحظه ای بالا بود (شکل

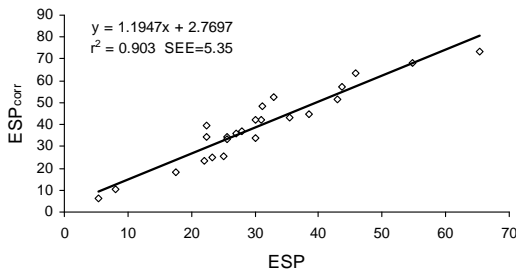


شکل ۱۱- برازش معادله‌ی وانسلو در ۲۵ خاک با  $SAR_a < 10$  ( $\text{mmol L}^{-1}$ )<sup>۰.۵</sup>

برخی محققان گزارش کرده‌اند که به عنوان شاخصی از پایداری ساختمان خاک، میزان سدیم تبادلی (Exchangeable sodium content) مناسبتر از ESP می‌باشد (Cook et al., 1997). با این حال، همبستگی خطی این پارامتر با SAR در خاک‌های مورد بررسی ( $r = 0.7^{***}$ ) بمراتب ضعیفتر از همبستگی غیر خطی ESP با SAR ( $r = 0.97^{***}$ ) بود. ESP ۳۰ نمونه خاک مورد بررسی با پارامترهای  $SAR_{ec}$  و SP همبستگی معنی‌داری دارد:

$$866/0 = 2r) SP + 4486/0 + SAR + 1177/0 + , P < 0.001$$

$$EC_e = 1181/0 + 0145/9 = ESP$$



شکل ۱۲- رابطه‌ی ESP تصحیح شده (ESP<sub>corr</sub>) و ESP تصحیح نشده در ۲۴ خاک با  $dSm \ 10EC_e^{-1} < 10$ .

با کنار گذاشتن یک خاک سدیمی قلیا، مقادیر  $K'_G$  ۲۳ نمونه خاک قبل از تصحیح اثر دفع آنیونی همبستگی معنی‌داری را با مقادیر  $EC_e$  و ESP نشان می‌دهد:

$$K'_G (\text{mol L}^{-1})^{-0.5} = 0.1974 - 0.023 EC_e + 0.059 ESP$$

$$(r^2 = 0.731, P < 0.001)$$

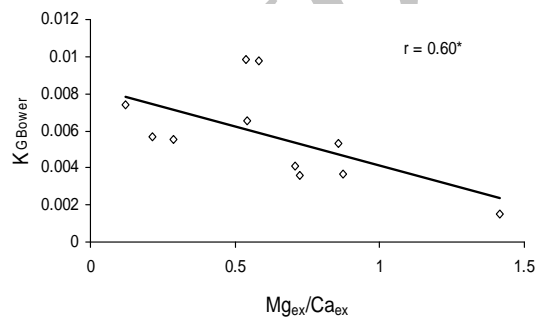
در حالی که بعد از تصحیح اثر دفع آنیونی  $K'_G$  صرفاً با ESP همبستگی مثبت و معنی‌داری را نشان می‌دهد:

$$K'_G (\text{mol L}^{-1})^{-0.5} = 0.1595 + 0.063 ESP$$

$$(r^2 = 0.490, P < 0.001)$$

همبستگی فوق با یافته‌های محاسباتی Babcock (۱۹۶۳) بر مبنای نظریه لایه دوگانه پخشیده مطابقت دارد. بنابراین محاسبات، شیب رابطه مزبور در شوری‌های کم بیشتر از شوری‌های زیاد است. با این حال، استنباط Shainberg (۱۹۸۰)

$K_G$  باور همبستگی منفی معنی‌داری ( $r = -0.6^*$ ) را با نسبت  $Mg_{ex}/Ca_{ex}$  (نسبت میزان منیزیم تبادلی به میزان کلسیم تبادلی) نشان می‌دهد (شکل ۱۰) که با نتایج گزارش شده توسط Emerson and Chi (۱۹۷۷) مغایرت دارد. گرچه به نظر می‌رسد که به دلیل ترجیح بیشتر کلسیم به جذب در مقایسه با منیزیم باید رابطه فوق مثبت باشد، ولی وجود یک رابطه منفی می‌تواند نشانه حضور کانی ورمیکولایت باشد که نسبت به منیزیم جذب ترجیحی از خود نشان می‌دهد. بنابراین به نظر می‌رسد که منیزیم در غلظتهای زیاد (شرایط خاک‌های مورد بررسی) نسبت به کلسیم ترجیح داده شده است. نتایج فوق با یافته‌های Rahman and Rowell (۱۹۷۹) مطابقت دارد.



شکل ۱۰- رابطه‌ی  $K_G$  باور با  $Mg_{ex}/Ca_{ex}$  در ۱۱ خاک غیر گچی.

### برازش معادله وانسلو

شکل ۱۱ برازش معادله وانسلو را به داده‌های ۲۵ نمونه خاک را نشان می‌دهد. این معادله به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$4/[(CEC/Na_{ex})^2 - 1] = K'_v SAR_a^2$$

که در آن  $SAR_a$  نسبت جذب سدیم بر مبنای فعالیت یون‌های آزاد بوده و واحد  $L \text{ mol}^{-1} K'_v$  است. پس از تصحیح اثر دفع آنیونی از  $0.497$  به  $0.997$  (دو برابر) افزایش می‌یابد. همان طور که Guth and Brown (۱۹۸۵) گزارش کرده‌اند نتایج این تحقیق نیز نشان می‌دهد که معادله وانسلو مزیتی بر معادله ساده و مقبول گاپون ندارد.

### همبستگی مقادیر ESP و $K'_G$ و دفع آنیونی با ویژگی‌های خاک

#### ESP

مقادیر  $ESP_{30}$  نمونه خاک مورد مطالعه از ۰/۹۳ درصد تا ۶۵/۴ درصد (به طور متوسط ۲۵/۳ درصد) تغییر می‌کند. با تصحیح اثر دفع آنیونی برای ۲۴ نمونه خاک ( $EC_e > 10 \text{ dSm}^{-1}$ ) خاک‌ها به طور معنی‌داری ( $P < 0.001$ ) افزایش یافت. مقادیر ESP ۲۴ نمونه قبل از تصحیح از ۵/۳ تا ۶۵/۴ درصد (به طور متوسط ۳۰/۶ درصد) و بعد از تصحیح از ۶/۵ تا ۷۳/۳ درصد (به طور متوسط ۳۹/۳ درصد) تغییر می‌کند. شکل ۱۲ رابطه‌ی ESP تصحیح شده (ESP<sub>corr</sub>) و ESP تصحیح نشده را نشان می‌دهد.

مساحت سطح، ظرفیت تبادل کاتیونی و مقدار مواد آلی در ارتباط است، نیز وابسته می باشد و با افزایش هر دو افزایش می یابد.

### نتیجه گیری کلی

گرچه این تحقیق اطلاعاتی را در رابطه با تاثیر EC و ESP بر مقدار عددی  $K'_G$  خاکهای مورد مطالعه در اختیار قرار می دهد، ولی به منظور آگاهی هرچه بیشتر در رابطه با نقش EC و ESP، تاثیر این عوامل باید به طور مستقل مورد مطالعه قرار گیرد.

### نمادها و علائم

CEC: ظرفیت تبادل کاتیونی

Ea: مقدار دفع آنیونی

EC<sub>e</sub>: قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع

ESR<sub>corr</sub>: نسبت سدیم تبادلی تصحیح شده

E<sub>Na</sub>: کسر سدیم تبادلی

K'<sub>G</sub>: ضریب گزینشگری تغییر یافته گاپون

K<sub>v</sub>: ضریب گزینشگری وانسلو

Na<sub>ex</sub>: مقدار سدیم تبادلی

SAR<sub>a</sub>: نسبت جذب سدیم (بر مبنای فعالیت)

SAR<sub>c</sub>: نسبت جذب سدیم (بر مبنای غلظت)

SP: درصد اشباع

از یافته های تجربی آن است که  $K'_G$  با افزایش ESP کاهش می یابد. Evangelou and Marsi (۲۰۰۳) مشاهده کردند که جهت تغییرات  $K'_G$  با ESP وابسته به میزان شوری است. Bower (۱۹۵۹) و Pratt et al. (۱۹۶۲) همبستگی مثبت  $K'_G$  و ESP را گزارش کرده، ولی همبستگی معنی داری بین  $K'_G$  و غلظت محلول مشاهده نکردند. Van-Bladel et al. (۱۹۷۲) و Ponia et al. (۱۹۸۴) نیز نشان دادند که  $K'_G$  با افزایش ESP افزایش می یابد. با این حال، Doering and Willis (۱۹۸۰) همبستگی منفی بین  $K'_G$  و غلظت محلول را گزارش کرده ولی همبستگی معنی داری را بین  $K'_G$  و میزان سدیم تبادلی مشاهده نکردند. Poonia and Talbudeen (۱۹۷۷) نیز ثابت  $K'_G$  را تا  $ESP = 7.95$  گزارش کرده اند.

Kapoor et al. (۱۹۸۹) رابطه خطی معنی داری را بین

$K'_G$  و SAR گزارش کرده اند. با این حال، رابطه ی مزبور در خاکهای مورد بررسی معنی دار نبود.

### دفع آنیونی

همبستگی معنی داری بین دفع آنیونی ( $E_a$ ) و مقادیر EC<sub>e</sub> و SP ۲۴ نمونه خاک با EC<sub>e</sub> بزرگتر از  $10 \text{ dSm}^{-1}$  ملاحظه می شود:

$$E_a (\text{cmol.kg}^{-1}) = -2.26 + 0.546 SP + 0.216 EC_e$$

$$(r^2 = 0.633, P < 0.01)$$

رابطه فوق نشان می دهد که میزان دفع آنیونی علاوه بر غلظت محلول خاک به SP که با عواملی نظیر مقدار و نوع رس،

### REFERENCES

- Bazargan, K., and Towfighi, H. (1990). Estimation of modified Gapon selectivity coefficient and effective factors in salt-affected soils of Iran. In: Proceeding of 6<sup>th</sup> Iranian Congress of Soil Science, 28-31 Aug., University of Ferdosi, Mashhad, Iran. pp. 211-212.
- Abrol, I. P., Yadav, J. S. P., and Massoud, F. I. (1988). *Salt-affected Soils and Their Management*. FAO, Rome.
- Agca, N., and Dogan, K. (1998). The relationships between the exchangeable sodium ratio (ESR) and sodium adsorption ratio (SAR) in some soils of the Amik plain. Mustafa Kemal University, Faculty of Agriculture, Department of Soil Science TR 31040 Antalya – Turkey.
- Amrhein, C., and Suarez, D. L. (1991). Sodium - calcium exchange with anion exclusion and weathering corrections. *Soil Sci. Soc. Am.* 55, 698-706.
- Babcock, K. L. (1963). Theory of the chemical properties of soil colloidal systems at equilibrium. *Hilgardia*. 34, 417-542.
- Bajwa, M. S., and Kalkat, J. S. (1990). Determination of exchangeable sodium status of salt-affected soils and its reactions with growth of plants. *Agrochemical Agr. Sci.* 34(1/2), 69-79.
- Bethke, C. M. (1996). *Geochemical Reaction Modeling*,

*Concepts and Applications*. Oxford University Press, New York.

- Bower, C. A., Reitemeier, R. F., and Fireman, M. (1952). Exchangeable cation analysis of saline and alkali soils. *Soil Sci.* 73, 251-261.
- Bower, C. A. (1959). Cation exchange equilibria in soils affected by sodium salts. *Soil Sci.* 88: 32-35.
- Bower, C. A., and Hatcher, J. T. (1962). Characterization of salt-affected soils with respect to sodium. *Soil Sci.* 93, 275-280.
- Bouyoccos, G. J. (1962). Hydrometer method improved for making particle size analysis of soil. *Agron. J.* 54, 464-465.
- Bresler, E., Mc Neal, B. L., and Carter, D. L. (1982). *Saline and Sodic Soils*. Springer-Verlag, Berlin, Germany.
- Cook, G., Muller, D., and Warren, L. (1997). Is exchangeable sodium content a better index of soil sodicity than exchangeable sodium percentage?: A reassessment of published data. *Soil Sci.* 162(5), 343-349.
- Davies C. W. (1962). *Ion Association*. Butterworth, London.
- Doering, E. J., and Willis, O. W. (1980). Effect of soil solution concentration on cation exchange relationships. Proc. Inter. Symp. on Salt-affected



- Soils. Karnal, India.
- Emerson W. W., and C. L. Chi.(1977).Exchangeable calcium,magnesium and sodium and the dispersion of illites in water.II .Dispersion of illites in water.*Aus. J. Soil Res.*15,255-262.
- Endo, T., Yamamoto, S., Honna, T. and Eneji, A.E. (2002). Sodium-calcium exchange selectivity as influenced by clay minerals and composition. *Soil Sci.*167(2),117-125.
- Evangelou V. P., and Coale F.J.(1987).Dependence of the Gapon coefficient on exchangeable sodium for mineralogically different soils. *Soil Sci. Soc. Am.*51:68-72.
- Evangelou V. P., and Coale F.J.(1988).An investigation on the dependence of the gapon coefficient on exchangeable sodium by three linear transforms.*Can. J. Soil Sci.*68(4),813-820.
- Evangelou, V.P., and Marsi, M. (2003). Influence of ionic strength on sodium-calcium exchange of two temperate climate soils. *J. Plant Soil.*250(2),307-313.
- Evangelou V. P., and Phillips R. E.(1987). Sensitivity analysis on the comparison between the Gapon and Vanselow exchange coefficients. *Soil Sci. Soc. Am.*J. 51,1473-1479.
- Frenkel, M., and Alperovitch, N. (1984). The effect of mineral weathering and soil solution concentration on ESR-SAR relationships on arid and semi-arid zone soils from Israel. *Soil Sci.* 35, 367-372.
- Gapon, E.N. (1933). On the theory of exchange adsorption in soils. *J. Gen. Chem. USSR.* 3, 144-152.
- Guth, D.L., and Brown, K.W. (1985). A comparison of the SAR and Vanselow equations in three soils. *Soil Sci.* 14(5), 356 - 361.
- Guerrero-Alves, J., Pla-Sentis, I., and Camacho, R. (2002). A model to explain high values of pH in an alkali sodic soil. *Braz. Sci. Agric.* 59(4), 763-770.
- Helgeson, H. C. (1969). Thermodynamics of hydrothermal systems at elevated temperatures and pressures. *Am.J.Sci.*276,729-804.
- Jackson M. L. (1960).*Soil Chemical Analysis*.Prentice-Hall,Inc.
- Jurinak, J. J., Amrhein, C., and Wagenet, R.J. (1984). Sodic hazard: The effect of SAR and salinity in soils and overburden materials. *Soil Sci.* 137, 152 - 158.
- Jurinak, J. J., and Suarez, D.L. (1990). The chemistry of salt -affected soils and water. In K.K. Tanji(Ed.) *Agricultural Salinity Assessment and Management*, ASCE Manuals Prac.No.71,(pp.42-63).Am. Soc. Civ. Eng., New York.
- Kapoor, A., Pal, R., and Poonia, S.R. (1989). Prediction of exchangeable sodium percentage in soils by mechanistic and layer models. *Aust. J. Soil Res.*27(2),325-332.
- Kerrisk,J.F.(1981).*Chemical equilibrium calculations for aqueous geothermal barines*.Los Alams Scientific Laboratory. University of California.
- Kopittke, P. M., So, H. B., and Menzies, N. W.(2006).Effect of ionic strength and clay mineralogy on Na–Ca exchange and the SAR–ESP relationship.*European J. Soil Sci.* 57(5),626-633.
- Kovda, U.A. (1973). *Irrigation, Drainage and Salinity*. FAO/UNESCO.
- Levy, R., and Hillel, D. (1968). Thermodynamic equilibrium constants of Na/Ca exchange in some Israel soils. *J. Soil Sci.* 106: 393 -398.
- Mesquta, M.E., Goncalves, M.C., Goncalves, A.R., and Neves, M.J. (2005). Effect of electrolyte concentration on sodium adsorption: Application of competitive extended Freundlich isotherms. *Arid Land Research and Management*.19,161-172.
- Nadler, A. and Margaritz, M. (1981).Expected derivations from the ESP-SAR empirical relationships in calcium- and sodium-carbonate-containing arid soils:Field evidence.*Soil Sci.* 131, 220-225.
- Nelson, D.W., and Sommers, L.E.( 1982).Total carbon, organic carbon, and organic matter. In A.L.Page et al.(Eds) *Methods of Soil Analysis*. SSSA. Madison, WI.
- Oster, J.D., and Sposito, G. (1980). The Gapon coefficient and the exchangeable sodium percentage- sodium adsorption ratio relations. *Soil Sci. Soc. Am. J.*44:258-260.
- Paliwal, K.V., and Gandhi, A.P. (1976). Effect of salinity ,SAR, Ca:Mg ratio in irrigation water and soil texture on the predictability of exchangeable sodium percentage. *Soil Sci.* 122, 85-90.
- Paliwal, K.V., and Maliwal, G.L. (1971). Prediction of exchangeable sodium percentage from cation exchangeable equilibria.*Geoderma.* 6 (1),75-78.
- Patruno, A., Cavazza, L., and Cirillo, E.(2002). Experiments on soil sodication .*Ital. J. Agron.*6 (1),3-13.
- Poonia, S.R., Mehta, S.C., and Pal, R. (1984). The effects of electrolyte concentrations on calcium-sodium exchange equilibria in two soil samples of India.*Geoderma.* 32,63-70.
- Poonia, S.R., and Pal, R.( 1979). The effect of organic manuring and water quality on water transmission parameters and sodication of a sandy loam soil. *Agric. Water Mang.*2,163-175.
- Poonia, S.R and Talbudeen, O.(1977). Sodium-calcium exchange equilibria in salt-affected and normal soils. *J. Soil Sci.* 28, 276 - 288.
- Pratt, P. F., Whitting, L. D., and Grover B. L.(1962).Effect of pH on the sodium-calcium exchange equilibria in soils. *Soil Sci .Soc. Am. Proc.* 26,227-230.
- Rahman W.A., and Rowell, D.L.(1979).The influence of magnesium in saline and sodic soils:A specific effect or a problem of cation exchange?*J.Soil Sci.* 30,535-546.
- Rao, T.S., Page, A.L., and Coleman, N.T.(1968). The influence of ionic strength and ion pair formation between alkaline-earth metals and sulfate on Na-divalent cation exchange equilibria. *Soil Sci .Soc. Am. J.* 32:639-643.
- Rhoades,J.D.(1982).Cation exchange capacity.In A.L.Page et al.(Eds) *Methods of Soil Analysis*. SSSA. Madison,WI.
- Richards L. A. (1954). *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*. Agric. Hand book 60, USDA, Washington, DC.

- Rieu, M.(1980). Sodium adsorption ratio and estimation of the alkalization of waters. *Pedol.* 18,123-128.
- Rieu, M., Touma, J., and Gheyi, H. R.(1991). Sodium-calcium exchange on Brazilian soils: Modeling the variation of selectivity coefficients. *Soil Sci. Soc. Am. J.*55,1291-1300.
- Szabolcs, I., and Darab, K. (1966). The effect of the kind of anions on the calcium- sodium ion-exchange in soils. *Agrochemica.*10,344-353.
- Shainberg, I., Oster, J. D. , and Wood J. D.(1980). Na-Ca exchange in montmorillonite and illite illite suspensions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44,960-964.
- Sparks D. L.(1995).*Environmental Soil Chemistry*.CRC Press.
- Sposito, G., and Mattigod, S.V.(1977).On the chemical foundation of the sodium adsorption ratio.*Soil Sci. Soc.Am. J.*41:323-329.
- Van-Bladel, R., Gaviria, G., and Lawdelovt, H. (1972). A comparison of the thermodynamic double layer theory and empirical studies of the Na-Ca exchange equilibria in clay water systems. In *Proceeding of International Clay Conference*,pp. 385 – 395.

Archive of SID