

تأثیر نسبت‌های مختلف Na/K محلول خاک بر مقاومت کششی و تردی خاکدانه‌ها

الهام فراهانی¹، حجت امامی^{2*}، امیر فتوت²، رضا خراسانی²، کاظم اسماعیلی³

تاریخ دریافت: 94/02/29 تاریخ پذیرش: 95/03/16

1- دانشجوی دکتری گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

2- دانشیاران گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

3- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

* مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: hemami@um.ac.ir

چکیده

این پژوهش با هدف بررسی اثر نسبت‌های مختلف Na/K محلول خاک با استفاده از شاخص نسبت کاتیونی پایداری ساختمانی خاک (CROSS) روی رس قابل پراکنش، مقاومت کششی خاکدانه و تردی خاک انجام شد. برای اعمال غلظت‌های مختلف پتاسیم به خاک، شش تیمار با شوری یکسان³ دسی‌زیمنس بر متر به ترتیب از تیمار 1 تا 6 شامل پتاسیم با غلظت صفر تا 27/2 میلی‌اکی‌والان بر لیتر و شش تیمار دیگر نیز با شوری یکسان⁶ دسی‌زیمنس بر متر شامل پتاسیم با غلظت صفر تا 54/4 میلی‌اکی‌والان بر لیتر تهیه و به خاک اضافه شدند. تردی خاک به دو روش ضریب تغییرات (F_1) و رتبه‌بندی (F_2) محاسبه و مقایسه گردید. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت پتاسیم نسبت به سدیم در تیمارها افزایش در پراکنش رس‌ها رخ داد. نتایج آزمون مقاومت کششی خاکدانه‌ها نشان داد که در تیمارهای با شوری³، با افزایش غلظت پتاسیم، مقاومت کاهش یافته اما با افزایش SAR، مقدار مقاومت افزایش یافت. بیشترین مقدار آن (142 کیلوپاسکال) مربوط به تیمار 1 با $CROSS = 25/7$ و $SAR = 22/9$ و کمترین مقدار (87 کیلوپاسکال) در تیمار 5 با $CROSS = 14/8$ و $SAR = 0/99$ بود. اما در تیمارهای با شوری⁶، چنین روندی مشاهده نشد و مقادیر مقاومت کششی تقریباً در همه تیمارها مشابه بودند. نتایج نشان داد در تیمارهای با شوری³، تردی خاک با افزایش رس قابل پراکنش، افزایش یافت (F_1 و F_2). مقایسه نتایج مقادیر مقاومت کششی و تردی خاک مشخص نمود که F_1 پارامتر مناسبی برای بیان تردی خاک نبوده و در مقابل، F_2 توانست هماهنگی بین نتایج مقاومت و تردی (در تیمارهای با شوری³) را به خوبی نشان دهد. در تیمارهای با شوری⁶ احتمالاً به دلیل غلیظتر شدن محلول خاک، اثر رس پراکنش یافته بر مقادیر مقاومت کششی و تردی به وضوح نمایان نشد.

واژه‌های کلیدی: تردی خاک، رس قابل پراکنش، مقاومت کششی خاکدانه، CROSS

The Effect of Different Na/K Ratios in Soil Solution on Aggregate Tensile Strength and Friability

E Farahani¹, H Emami^{2*}, A Fotovat², R Khorassani², K Esmaeeli³

Received: 19 May 2015 Accepted: 5 June 2016

1- Ph.D. Student of Soil Science Dept., Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

2- Assoc. Prof. of Soil Science Dept., Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

3- Assoc. Prof. of Water Engineering Dept., Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

* Corresponding Author, Email: hemami@um.ac.ir

Abstract

This research was carried out to study the effect of different ratio of Na/K in soil solution on dispersible clay, aggregate tensile strength and soil friability using the cation ratio of soil structural stability (CROSS) index. In order to apply different potassium concentrations, 6 treatments with the same EC (3 dS m^{-1}) including 0 to $27.2 \text{ meqL}^{-1} \text{ K}^+$ and another six treatments with $\text{EC}=6 \text{ dS m}^{-1}$ including 0 to $54.4 \text{ meqL}^{-1} \text{ K}^+$ were prepared and added to soil. Soil friability was calculated and compared through two methods i.e. the coefficient of variation (F_1) and ranking order (F_2). The results showed that increasing the K^+ concentration in treatments relative to Na^+ could increase the water dispersible clay. Also, the results of aggregates tensile strength test showed that in treatments with $\text{EC}=3 \text{ dS m}^{-1}$ by increasing the K^+ value, the soil strength decreased but with increasing the SAR value, soil strength increased. Maximum amount of tensile strength (142 kPa) was observed in treatment 1 with $\text{CROSS} = 25.7$ and $\text{SAR}=22.9$ and the minimum amount (87 kPa) was in treatment 5 with $\text{CROSS}=14.8$ and $\text{SAR}=0.99$. This trend was not observed in treatments with $\text{EC}=6 \text{ dS m}^{-1}$ and the aggregate tensile strengths were almost similar in all treatments. The results demonstrated that soil friability (F_1 & F_2) increased with increasing the dispersible clay at $\text{EC}=3$. Comparison of the results of tensile strength and friability revealed that F_1 was inappropriate parameter for expression of soil friability while F_2 showed the good agreement with the strength and friability amounts (in treatments with $\text{EC}=3$). In treatments with $\text{EC}=6$, the effect of dispersible clay on tensile strength and friability was not observed, probably due to the higher concentration of the soil solution.

Keywords: Aggregate tensile strength, CROSS, Dispersible clay, Soil friability

مقدمه

منافذ پر از هوا، درز و ترک‌های کوچک و پیوندهای بین ذرات درون یا بین درز و ترک دارد. مقاومت کششی خاک‌ها به مقدار آب و فرآیندهای تغییر توزیع منافذ یا پیوند بین خاکدانه‌ها بستگی دارد (کی و دکستر 1992). مقاومت کششی به مقدار کاتیون‌ها، رس قابل پراکنش، نوع و اندازه رس، پایداری خاکدانه، غلظت و ترکیب

مقاومت کششی¹ یک شاخص حساس از شرایط فیزیکی و یک ویژگی پویا در خاک است. دکستر و کروسبرگن (1985) عنوان کردند که احتمالاً مقاومت کششی مفیدترین معیار از مقاومت خاکدانه‌های یک خاک است. مقاومت مناطق گسیختگی² در هر زمان بستگی به

² Failure zones

¹Tensile strength

فرمول اثرات ساختمانی مقادیر نسبی کاتیون‌های یک ظرفیتی و دو ظرفیتی را در محلول خاک به صورت پارامتری بیان کرده و مؤثرتر از روش‌های قبلی است. ضریب مربوط به پتاسیم بر اساس نسبت قدرت پراکنشی سدیم و پتاسیم است و ضریب مربوط به منیزیم بر اساس نسبت قدرت هم‌آوری کلسیم و منیزیم می‌باشد.

در شرایط بهینه خاکدانه‌های کوچکتر (که در اصل، جزئی از خاکدانه‌های بزرگتر بوده‌اند)، نسبت به خاکدانه‌های بزرگتر، مقاومت بیشتری دارند. در غیراین صورت، توده خاک ممکن است به ذرات معدنی منفرد یا غبار تبدیل شود. از این رو علاوه بر ویژگی‌های رایج در مکانیک خاک، ویژگی دیگری نیز می‌تواند به عنوان تردی⁴ خاک در نظر گرفته شود. با در نظر گرفتن چنین هدفی برای خاک‌ورزی، اوتومو و دکستر (الف 1981) تعریف دقیقی از تردی خاک را ارائه نمودند: "تردی خاک عبارت است از تمایل یک توده محصورنشده خاک به خرد شدن تحت تنش‌های وارده و شکستن آن به قطعات کوچکتر". این تعریف که متناسب با اهداف خاک‌ورزی است، منجر به ارائه معیاری کمی به نام تردی خاک می‌شود که شاخصی از توانایی کلوخه‌های بزرگ برای خرد شدن به خاکدانه‌های کوچکتر در دامنه اندازه مشخص، محسوب می‌گردد. برای اندازه‌گیری و محاسبه کمیّت تردی خاک از مقاومت کششی خاکدانه‌ها، استفاده می‌شود.

وضعیت تعادل و ارتباط فاز محلول و تبدیلی کاتیون‌ها بر ضخامت لایه دو گانه پخشیده مؤثر است، ضخامت لایه دو گانه پخشیده نیز به نوبه خود بر پایداری خاک‌ها و فرآیندهایی همچون پراکنش و هم‌آوری رس‌ها مؤثر می‌باشد. بنابراین به نظر می‌رسد می‌توان تأثیر توزیع‌های مختلف کاتیونی را بر رفتار شیمیایی و برخی پارامترهای فیزیکی و مکانیکی خاک، بررسی نمود. انتظار می‌رود نحوه توزیع کاتیون‌ها بر خاکدانه سازی، مقاومت کششی خاکدانه‌ها و نیز بر تردی خاک مؤثر باشد. تردی خاک، عامل مهمی در مورد پاسخ خاک به خاک‌ورزی

محلول خاک، ماده آلی خاک و چرخه‌های مرطوب و خشک شدن بستگی دارد (برزگر و همکاران 1994، 1995). مقاومت کششی خاک به عنوان ظرفیت تحمل نیروهای به کار رفته قبل از تخریب شدن، تعریف شده است. از دیدگاه کمی، مقاومت کششی معادل بیشینه تنش است که می‌توان بر روی یک خاک به کار برد بدون اینکه هیچ تخریبی رخ دهد (هیلل 1980). برزگر و همکاران (1995) پیشنهاد کردند که مقادیر رس پراکنش یافته و CEC رس با مقاومت خاک، ارتباط زیادی دارد. دکستر و چان (1991) بیان کردند که کاتیون‌هایی مانند سدیم که پراکنش رس بیشتری ایجاد می‌کنند، می‌توانند مقادیر بیشتری مقاومت در خاک خشک ایجاد کنند. پتاسیم تبدیلی می‌تواند باعث اثرات مشابه با سدیم شود اما بیشتر اوقات نادیده گرفته می‌شود، چون مقدار آن نسبت به سایر کاتیون‌ها در خاک‌های متأثر از نمک کمتر است. پتاسیم به عنوان یک کاتیون یک ظرفیتی می‌تواند سبب تورم و پراکنش رس‌ها شود (رنگاسمی و مارچوک 2011). رنگاسمی و سامنر (1998) با مطالعه نیروی هم‌آوری و پراکنشی کاتیون‌ها، دریافتند که پتاسیم در ایجاد پراکنش رس در خاک‌ها، معادل با سدیم نمی‌باشد. مقدار بیشتر کاتیون‌های یک ظرفیتی (سدیم و پتاسیم) در برابر کاتیون‌های دو ظرفیتی (کلسیم و منیزیم) در خاک‌های متأثر از نمک، بر ساختمان خاک اثر گذاشته و سبب محدودیت‌های شدید برای رشد محصول می‌شود (رنگاسمی 2010). بر اساس اثرات پراکنشی متفاوت سدیم و پتاسیم و توان هم‌آوری متفاوت کلسیم و منیزیم، مفهوم CROSS³ که شبیه به SAR (هر دو با واحد یکسان برابر با جذر میلی‌اکی‌والان بر لیتر) می‌باشد، توسط رنگاسمی و مارچوک (2011) پیشنهاد شده است:

$$CROSS = \frac{(Na+0.56K)}{\sqrt{\frac{(Ca+0.6Mg)}{2}}} \quad [1]$$

در معادله بالا غلظت کاتیون‌ها بر حسب میلی‌اکی‌والان بر لیتر می‌باشد. غلظت کل این کاتیون‌ها در این

⁴ Friability

³Cation ratio of soil structural stability

روش توسط دکستر و کروسبرگن (1985) ارائه شده است. اساس این روش، اندازه‌گیری نیروی فشاری لازم برای خردکردن یک خاکدانه در میان دو صفحه بارگذاری صاف و موازی (با استفاده از دستگاه تک‌محوری)⁶ است. برای اندازه‌گیری مقاومت کششی، خاکدانه‌ها به ابعاد 4-8 میلی‌متر به وسیله الک جدا شدند. 30 عدد خاکدانه از خاک هر یک از تکرارهای هر تیمار به‌طور جداگانه وزن شده، در رطوبت هواخشک، بین دو صفحه بارگذاری دستگاه تک‌محوری برقی (مدل رینگ نیرو شرکت آزمون ساز مینا) با سرعت بارگذاری 1/2 میلی‌متر بر دقیقه، شکسته شده و نیروی بیشینه شکست اندازه‌گیری شد * Total cation concentration

برای این منظور تعداد 1170 اندازه‌گیری انجام شد.

تیتراسیون با EDTA اندازه‌گیری شد. مقدار یون سدیم (Na⁺) و پتاسیم (K⁺) نیز به‌روش فلیم‌فتمتری تعیین گردیدند. سپس CROSS بر اساس رابطه 1 (رنگاسمی و مارچوک 2011) و SAR از رابطه 2 (ریچاردز 1954) محاسبه گردیدند:

$$SAR = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca+Mg}{2}}} \quad [2]$$

که در این رابطه غلظت کاتیون‌ها بر حسب میلی-اکی‌والان بر لیتر (meq L⁻¹) می‌باشند. به‌منظور شروع مراحل تیمار کردن خاک مورد نظر، نمونه‌برداری از لایه سطحی (0-30 سانتی‌متری) و به آهستگی بدون به‌هم خوردن ساختمان خاک انجام شد. نمونه خاک بدون کوبیدن و الک شدن، با کمترین دست-خوردگی از مزرعه به گلخانه منتقل شده و درون گلدان-های پلاستیکی ریخته شدند. به‌منظور اعمال نمودن غلظت‌های مختلف پتاسیم به خاک مورد نظر، محلول‌هایی با شش غلظت معین از پتاسیم و سدیم (از تیمار 1 تا 6 با نسبت‌های مختلف از K و کاهش Na) با ثابت در نظر گرفتن غلظت‌های کلسیم و منیزیم و در قالب یک ترکیب

می‌باشد، به‌گونه‌ای که در خاک ترد، با یک بار خاک‌ورزی زمین، خاکدانه‌های کوچک و در عین حال پایدار که خود فراهم‌کننده شرایط مناسب بستر بذر و رشد گیاه است فراهم می‌شود. در حالی که خاک‌ورزی خاک غیرترد، نیازمند صرف انرژی زیادی می‌باشد. از طرف دیگر بستر بذر نامناسبی که دارای کلوخه‌ها و خاکدانه‌های بزرگ است، ایجاد می‌شود (مولینز و پانایوتوپولوس 1984). هدف از این پژوهش بررسی اثر کاربرد ترکیب-های مختلف کاتیونی با استفاده از شاخص CROSS و شامل غلظت‌های مختلف پتاسیم بر روی رس قابل پراکنش⁵ و به دنبال آن بر برخی ویژگی‌های مکانیکی خاک از جمله مقاومت کششی خاکدانه و تردی خاک بود.

مواد و روش‌ها

این پژوهش بر روی یک خاک زراعی واقع در دانشگاه فردوسی مشهد (عرض جغرافیایی 36° 18' 29/73" N طول جغرافیایی 59° 31' 51/72" E و ارتفاع 1030 متر از سطح دریا) انجام گرفت. درصد ذرات اولیه و بافت خاک به‌روش پیت اندازه‌گیری شد (گی و باوور 1986). مقدار ماده آلی خاک به‌روش اکسیداسیون تر تعیین شد (اسپارکس و همکاران 1992). کربنات کلسیم خاک به‌روش تیتراسیون برگشتی با استفاده از اسید کلریدریک اندازه‌گیری گردید (اسپارکس و همکاران 1992). شوری خاک (EC) در عصاره گل اشباع و pH در گل اشباع خاک اندازه‌گیری شد (ریچاردز 1954). نسبت جذب سدیم (SAR) و CROSS ابتدا برای خاک اولیه یعنی پیش از شروع آزمایش (با استفاده از عصاره گل اشباع) و سپس برای خاک‌های تیمار شده (با استفاده از سوسپانسیون خاک به آب به نسبت 1:2) اندازه‌گیری شدند. به‌منظور تعیین SAR و CROSS باید ابتدا مقادیر کاتیون‌های مورد نظر در خاک اندازه‌گیری شود. مقادیر یون‌های کلسیم (Ca²⁺) و منیزیم (Mg²⁺) به‌روش اندازه‌گیری مقاومت کششی خاکدانه‌ها، به‌روش غیرمستقیم یا برزیلی انجام شد. این

⁶ Uniaxial compression test

⁵ Dispersible clay

تشخیص داده شد) برای به تعادل رسیدن خاک با محلول‌ها در نظر گرفته شد. پس از گذشت زمان تعادل، از خاک‌های تیمار شده با دقت و بدون خردشدگی خاکدانه‌ها، نمونه‌برداری انجام شد و پس از انتقال به آزمایشگاه خاک‌ها هواخشک شده و برای انجام اندازه‌گیری‌ها در ظروف مناسب نگهداری شدند.

کاتیونی (CROSS) با مقادیر شوری مشخص (3 و 6 دسی-زیمنس بر متر) تهیه شد (جدول 1). محلول‌های تهیه شده به حجم معادل رطوبت ظرفیت زراعی خاک مورد نظر به دو روش هم‌زمان صعود موئینگی و نفوذ عمودی از سطح خاک، به خاک گلدان‌ها هر یک با سه تکرار، افزوده گردید و زمان کافی (حدود یک ماه بر اساس پیش‌آزمایش انجام شده به‌عنوان زمان تعادل مناسب

جدول 1- ترکیب‌های کاتیونی و غلظت کل کاتیون‌ها در محلول‌های تیمار.

SAR _{tr}	CROSS _{tr}	*TCC (meq L ⁻¹)	K/Na	K		Na	تیمار
				meq L ⁻¹			
22/9	25/7	30	0	0	27/2	1	
11/5	20/0	30	1	13/6	13/6	2	
4/6	16/6	30	4	21/7	5/4	3	
2/0	15/4	30	10	24/7	2/5	4	
0/99	14/8	30	22	26/0	1/2	5	
0	14/4	30	-	27/2	0	6	
32/5	36/3	60	0	0	54/4	1	
16/2	28/3	60	1	27/2	27/2	2	
6/5	23/5	60	4	43/5	10/8	3	
2/9	21/8	60	10	49/4	4/9	4	
1/4	21/0	60	22	52/0	2/3	5	
0	20/3	60	-	54/4	0	6	

$$d_{\text{eff}} = d_0 \left(\frac{M_a}{M_0} \right)^{0.33} \quad [4]$$

که در این رابطه d_0 ، قطر متوسط خاکدانه‌ها، M_0 ، میانگین جرم خاکدانه‌های به‌کار رفته و M_a ، جرم خاکدانه مورد نظر می‌باشند.

در این پژوهش تردی خاک از دو روش محاسبه شد. یکی روش ضریب تغییرات⁷ (واتز و دکستر 1998) که در این روش، تردی خاک (F_i) برابر انحراف معیار

مقاومت کششی خاکدانه از رابطه زیر محاسبه گردید (دکستر و کروسبرگن 1985):

$$Y = 0.576 \frac{F}{d_{\text{eff}}^2} \quad [3]$$

که در این رابطه F نیروی فشاری بیشینه مورد نیاز برای شکستن خاکدانه با قطر مؤثر d_{eff} و Y مقاومت کششی خاکدانه می‌باشد. قطر مؤثر هر خاکدانه با استفاده از معادله زیر محاسبه شد (دکستر و کروسبرگن 1985):

⁷ Coefficient of variation method

همزن با خاک به آهستگی به مدت کوتاهی به هم زده شد. سپس به مدت 2 ساعت بی حرکت کنار گذاشته شد و پس از آن، از عمق 10 سانتی متری سوسپانسیون، 10 میلی-لیتر با پیپت برداشته و در ظرف مناسب در دمای حدوداً 80 درجه سلسیوس در آون خشک و وزن شد. در نهایت درصد رس قابل پراکنش بر حسب مقدار کل رس به روش پیپت (گی و باوادر 1986) تعیین گردید.

این پژوهش در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار و مقایسه میانگین‌ها (آزمون LSD) با استفاده از نرم افزار MINITAB 16 انجام شد.

نتایج و بحث

برخی ویژگی‌های ذاتی خاک مورد بررسی در جدول 2 آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد افزایش درصد رس قابل پراکنش در آب، با افزایش غلظت پتاسیم در کلیه تیمارها (شوری 3 و 6 دسی‌زیمنس بر متر) به صورت معنی‌داری (جدول 3) رخ داده است (شکل 1) که با نتایج پژوهش‌های رنگاسمی و مارچوک (2011)، مارچوک و رنگاسمی (2012) و مارچوک و همکاران (2013) هماهنگ است. آنها در پژوهش‌های خود روی برخی از خاک‌های استرالیا دریافتند که با افزودن پتاسیم به عنوان یک کاتیون تک‌ظرفیتی به صورت محلول به خاک، کدورت و مقدار رس قابل پراکنش خاک افزایش یافته است. همچنین آنها کاهش هدایت هیدرولیکی خاک و افزایش پتانسیل زتا را با افزایش پراکنش رس مشاهده نمودند. در پژوهش حاضر، نتایج به دست آمده از آزمون مقاومت کششی خاکدانه‌ها نشان می‌دهد که در تیمارهای با شوری 3 دسی‌زیمنس بر متر، در تمامی تیمارهای شامل پتاسیم (تیمارهای 2 تا 6، از 13/6 تا 27/2 میلی-اکی‌والان بر لیتر پتاسیم) با افزایش غلظت پتاسیم مقدار مقاومت کششی خاکدانه‌ها نسبت به نمونه شاهد کاهش معنی‌دار داشت (جدول 4) و کمترین مقادیر مقاومت کششی مربوط به تیمارهای با بیشترین مقدار پتاسیم (تیمارهای 5 و 6 دارای 26 و 27/2 میلی‌اکی‌والان بر لیتر

نسبی مقاومت کششی یک دامنه اندازه مشخص خاکدانه است که با استفاده از رابطه زیر محاسبه گردید:

$$F_1 = \frac{\sigma_Y}{\bar{Y}} \pm \frac{\sigma_Y}{\bar{Y}\sqrt{2n}} \quad [5]$$

در این معادله F_1 شاخص تردی خاک، σ انحراف معیار، \bar{Y} میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده مقاومت کششی و n تعداد تکرارها می‌باشند. عبارت دوم این معادله خطای استاندارد ضریب تغییرات می‌باشد.

روش دیگری که برای ارزیابی تردی خاک استفاده شد، روش رتبه‌بندی⁸ (واتز و دکستر 1998) بود. در این روش ضریب F_2 به عنوان شاخص تردی خاک از معادله زیر محاسبه شد:

$$F_2 = \frac{1}{\alpha} \quad [6]$$

که در آن $1/\alpha$ متناسب با پراکندگی مقادیر مقاومت کششی خاکدانه‌ها است. برای تعیین α ، ابتدا مقادیر مقاومت کششی برای تکرارهای هر تیمار از 1 تا 30 (تعداد خاکدانه‌ها) رتبه‌بندی شدند. براساس روابطی که توسط واتز و دکستر (1998) ارائه شده است لگاریتم طبیعی مقادیر مقاومت کششی به عنوان محور x نمودار رتبه‌بندی در نظر گرفته شد و مقادیر محور y بر اساس رابطه 7 (واتز و دکستر، 1998) به دست آمد.

$$y = \ln \left[-\ln \left(1 - \left(\frac{k}{n+1} \right) \right) \right] \quad [7]$$

که در رابطه 7، k رتبه هر خاکدانه و n تعداد کل خاکدانه‌ها است. پارامتر α بر اساس شیب نمودار رتبه-بندی خاکدانه‌ها (y) در برابر لگاریتم طبیعی مقاومت کششی (x) به دست می‌آید.

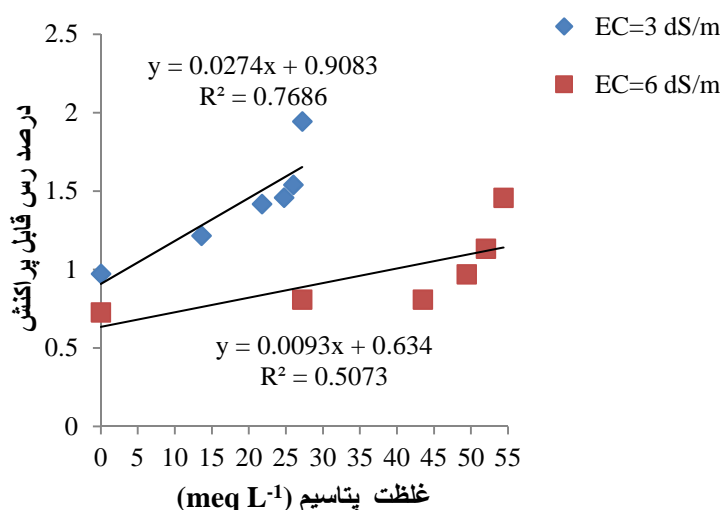
برای اندازه‌گیری رس قابل پراکنش در آب از روش مارچوک و همکاران (2013) استفاده شد. مقدار 20 گرم خاک خشک عبور داده شده از الک 2 میلی‌متر از هر یک از تکرارهای خاک‌های تیمار شده، وزن گردید. خاک وزن شده به درون سیلندر 250 میلی‌لیتری انتقال داده شد، مقدار 200 میلی‌لیتر آب مقطر به آرامی و از کناره ظرف به طوری که آب به خاک مستقیماً ضربه وارد نکند، ریخته شد. ظرف یک شب کنار گذاشته شد و بعد از آن که لایه رویی سوسپانسیون نشست کرد، بدون تماس

⁸ Ranking order method

پتاسیم) بود (کمترین مقدار برابر 87 کیلوپاسکال و مربوط به تیمار 5 با CROSS برابر 14/8 و SAR برابر 0/99 بود) (شکل 2، a).

جدول 2- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد بررسی.

SAR	CROSS	pH	EC dS m ⁻¹	کربن ات 1/87 5	ماده آلی 1/14	شن %	سیلت %	رس %	رده‌بندی خاک (USDA)
									Haplo Cambid
1/58	1/78	7/8	1/2			32/16	47/28	20/56	



شکل 1: تغییر درصد رس قابل پراکنش با افزایش غلظت پتاسیم در تیمارهای با شوری 3 و 6 دسی‌زیمنس بر متر.

جدول 3- نتایج تجزیه واریانس درصد رس قابل پراکنش در آب در شوری 3 و 6 دسی‌زیمنس بر متر.

P	F	میانگین مربعات	درجه آزادی	منبع تغییرات	شوری
0/000	457/83	3/87	6	تیمار	3m ⁻¹ dS =
		0/02	14	خطا	
		3/89	20	کل	
0/000	46/37	1/76	6	تیمار	6m ⁻¹ dS =
		0/09	14	خطا	
		1/85	20	کل	

SAR برابر 22/9 و کمترین مقدار رس پراکنش در آب در بین تیمارها، بیشترین مقدار مقاومت کششی خاکدانه برابر 142 کیلوپاسکال را نشان داد. اما در تیمارهای با شوری 6 دسی‌زیمنس بر متر روند متفاوتی دیده شد (شکل 2، b) و تمامی تیمارها مقاومت کمتری نسبت به

در این پژوهش علی‌رغم اینکه با افزایش غلظت پتاسیم در تیمارها، مقدار رس پراکنش در آب افزایش نشان داد (شکل 1)، ولی تیمارهای شامل بیشترین پتاسیم کمترین مقادیر مقاومت کششی خاکدانه را داشتند. تیمار 1 با بیشترین غلظت سدیم دارای CROSS برابر 25/7 و

همان‌گونه که در مورد داده‌های مربوط به مقاومت کششی خاکدانه‌ها نیز اشاره شد، در تیمارهای با شوری 6، تفاوت معنی‌داری بین مقادیر تردی خاک (F_1 و F_2) مشاهده نشد (جدول 5 و 6)، که این نتیجه نیز با نتایج بیان شده در شکل 2 قسمت b هماهنگی دارد. با وجود معنی‌دار نبودن تفاوت بین اعداد تردی، از اعداد جدول 6 (تیمارهای با شوری 6 و مقادیر F_2) می‌توان دریافت که نمونه شاهد که دارای بیشترین مقاومت کششی خاکدانه بوده است دارای کمترین F_2 نیز می‌باشد. البته لازم به ذکر است که مقدار تردی مستقل از مقاومت خاک بوده و یک خاک با هر مقدار مقاومت، می‌تواند مقادیر متفاوتی از تردی داشته باشد (اوتومو و دکستر ب 1981). مقدار تردی نشان‌دهنده مقاومت کششی خاکدانه‌ها نبوده و تنها بیان‌گر تغییر مقاومت کششی با اندازه خاکدانه‌ها است. در دامنه‌ای از اندازه خاکدانه‌ها، خاک ممکن است با وجود داشتن تردی زیاد، مقاومت کششی بسیار زیادی نیز داشته باشد. از این رو تردی زیاد خاک لزوماً نشان‌دهنده سهولت خاک‌ورزی نیست. مقاومت کششی به‌طور ویژه به ساختمان خاک حساس می‌باشد زیرا مقدار آن متأثر از ترک‌های ریز خاکدانه‌ها یا ترک‌های خاک است. به‌علت تشدید تنش‌های وارده در نوک ترک‌ها، مقاومت کششی به ساختمان ریز خاک حساسیت ویژه دارد. چنین وضعیتی در صورت وجود ترک منجر به وقوع شکست تحت تنش‌های اندک می‌گردد (هالت و همکاران 1995).

نمونه شاهد نشان دادند. تفاوت مقادیر مقاومت کششی تیمارها با یکدیگر چندان معنی‌دار نبود (جدول 4) و این نشان می‌دهد در این مقدار از شوری، تغییر ترکیب کاتیونی افزوده شده به خاک نتوانسته است بر مقاومت آن اثرگذار باشد. مقادیر رس پراکنش در آب نیز این مطلب را تایید می‌کند که با افزایش شوری از 3 به 6 دسی‌زیمنس بر متر، درصد پراکنش رس کاهش داشته است. بر اساس نتایج به‌دست آمده در این پژوهش، در شوری 6 احتمالاً غلظت پتاسیم افزوده شده به خاک نزدیک به مقدار غلظت آستانه همآوری کاتیونی (CCC)⁹ آن در خاک مورد نظر بوده است که بیشتر منجر به همآوری در خاک شده است. CCC غلظت آستانه برای کاتیون است که در آن، همآوری رخ می‌دهد.

نتایج به‌دست آمده از محاسبه تردی خاک به دو روش ضریب تغییرات و رتبه‌بندی در جدول 6 ارائه شده است. مقایسه میانگین‌ها در هر مقدار شوری به‌صورت جداگانه با نمونه شاهد انجام شده است (جدول 6). از اعداد جدول 7 می‌توان دریافت که نتایج مقاومت کششی خاکدانه‌ها در تیمارهای با شوری 3 (شکل 2a) با نتایج حاصل از تردی کاملاً هماهنگ بوده است. همچنین مقادیر تردی محاسبه شده به‌روش رتبه‌بندی (F_2) در تیمارهای دارای کمترین مقاومت کششی (تیمارهای 3 تا 6)، بیشترین مقدار را داشته‌اند و در مقابل تیمارهای با بیشترین مقدار مقاومت دارای کمترین تردی بوده‌اند (جدول 6). آنچه از مشاهدات می‌توان نتیجه گرفت این است که محاسبه تردی به‌روش ضریب تغییرات (F_1)، نتوانسته به‌خوبی تفاوت میان تیمارهای مختلف را نشان دهد.

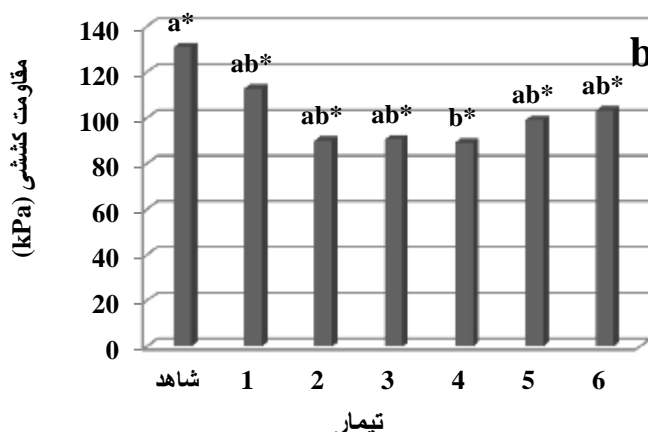
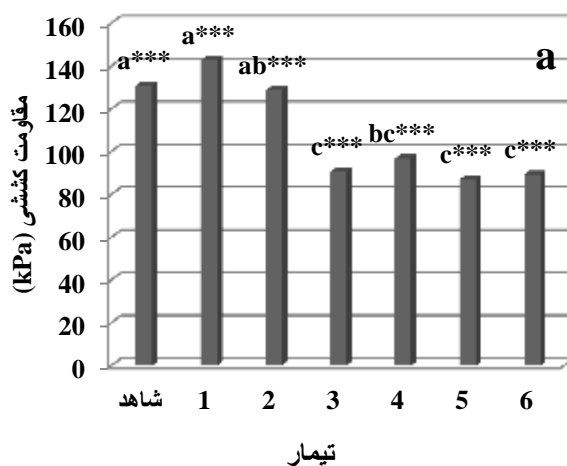
جدول 4- تجزیه واریانس مقاومت کششی خاکدانه‌ها در تیمارهای مختلف در شوری 3 و 6 دسی‌زیمنس بر متر.

P	F	میانگین مربعات	درجه آزادی	منبع تغییرات	
.000	14/24	10088/7	6	تیمار	$dS = 3 \text{ m}^{-1}$
		1653/2	14	خطا	
		11742	20	کل	
.018	3/82	4215	6	تیمار	$dS = 6 \text{ m}^{-1}$
		2577	14	خطا	

⁹ Coagulation cation concentration

به تیمارهای با شوری کمتر، رابطه مثبت بین تردی و رس پراکنش در آب نیز کم‌رنگ‌تر شده است. نتایج مشاهده شده (شکل 3) با مشاهدات دکستر و واتز (2000) متفاوت است. آنها گزارش کرده‌اند که با افزایش مقدار رس قابل‌پراکنش در آب، تردی خاک خشک کاهش می‌یابد. این اثر به ممانعت رس قابل‌پراکنش از تشکیل ساختمان پایدار و ایجاد درز و ترک‌های ریز در خاک برمی‌گردد.

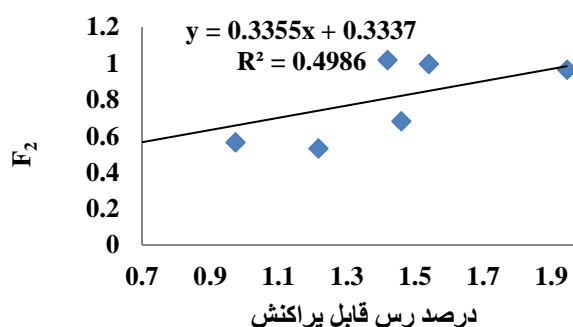
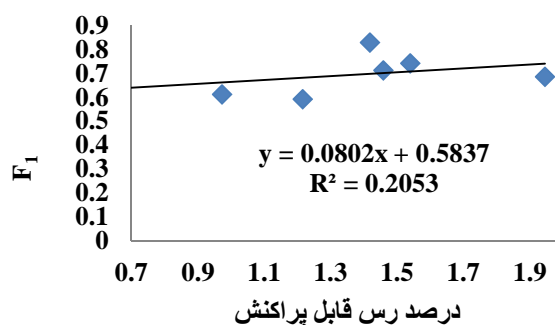
در این پژوهش اثر متقابل درصد رس پراکنش یافته با مقادیر تردی بررسی شد و در تیمارهای با شوری 3 دسی‌زیمنس بر متر، رابطه مثبت بین رس قابل پراکنش و F_1 و F_2 مشاهده گردید (شکل 3). اما در تیمارهای با شوری 6 دسی‌زیمنس بر متر، بین تردی خاک و رس قابل پراکنش در آب رابطه بسیار ضعیف با ضریب تبیین بسیار کم وجود داشت، که نشان می‌دهد در خاک مورد مطالعه با غلیظ‌تر شدن محلول خاک و به دنبال آن کاهش مقدار رس قابل پراکنش در آب نسبت



شکل 2- مقاومت کششی خاکدانه در 7 تیمار مختلف Na/K در دو سطح شوری (شکل a مربوط به تیمارهای با شوری 3 و شکل b مربوط به تیمارهای با شوری 6) * معنی‌دار در سطح 5 درصد، *** معنی‌دار در سطح 0/1 درصد.

تردی خاک شوند. با توجه با روند تغییرات مقاومت کششی و تردی با تغییر ترکیب کاتیونی افزوده شده به خاک، می‌توان دریافت که در خاک مورد مطالعه، F_2 نسبت به F_1 تفاوت بین تیمارها و نسبت‌های مختلف کاتیونی به‌کار رفته را بهتر نشان می‌دهد. تأثیر مقدار SAR محلول تیمار اضافه شده به خاکها بر مقادیر مقاومت کششی خاکدانه‌ها در شکل 4 ارائه شده است.

همچنین نتایج پژوهش بهمن زاده و همکاران (1387) نیز نشان داد که با افزایش رس قابل پراکنش در آب، مقادیر تردی (F_2 و F_1) کاهش یافته است که با مشاهدات پژوهش حاضر هماهنگ نمی‌باشد. نتایج نشان می‌دهد با افزایش غلظت پتاسیم، با وجود افزایش رس قابل پراکنش در خاک، ذرات رس پراکنش یافته نتوانسته‌اند منجر به افزایش مقاومت خاکدانه‌ها و کاهش



شکل 3- همبستگی مقادیر F_1 و F_2 با رس قابل پراکنش در آب در تیمارهای با شوری 3 دسی‌زیمنس بر متر.

جدول 5- تجزیه واریانس مقادیر F_1 و F_2 در تیمارهای مختلف در شوری 3 و 6 دسی‌زیمنس بر متر.

P	F	میانگین مربعات	درجه آزادی	منبع تغییرات		
.066	2/60	0/120	6	تیمار	F_1	شوری = 3 dS m ⁻¹
		0/11	14	خطا		
		0/23	20	کل		
.000	9/16	0/87	6	تیمار	F_2	شوری = 3 dS m ⁻¹
		0/22	14	خطا		
		1/10	20	کل		
.390	1/14	0/16	6	تیمار	F_1	شوری = 6 dS m ⁻¹
		0/32	14	خطا		
		0/48	20	کل		

0/182	1/75	0/88	6	تیمار	F ₂
		1/18	14	خطا	
		2/06	20	کل	

جدول 6- مقایسه مقادیر تردی به‌روش ضریب تغییرات (F₁) و رتبه‌بندی (F₂) در رطوبت هوا خشک.

Na/K	F ₁	F ₂	تیمار
-	0/64 ^A	0/589 ^{BC}	شاهد
-	0/612 ^A	0/569 ^C	1
1	0/592 ^A	0/535 ^C	2
0/25	0/828 ^A	1/02 ^A	3
0/1	0/712 ^A	0/685 ^{ABC}	4
0/045	0/742 ^A	1/00 ^A	5
0	0/685 ^A	0/969 ^{AB}	6
-	0/64 ^A	0/589 ^A	شاهد
-	0/628 ^A	0/788 ^A	1
1	0/883 ^A	1/26 ^A	2
0/25	0/636 ^A	0/780 ^A	3
0/1	0/719 ^A	1/07 ^A	4
0/045	0/755 ^A	0/788 ^A	5
0	0/647 ^A	0/877 ^A	6

در آزمون مقایسه میانگین‌ها، تیمارهای با شوری 3، F₁ در سطح 6%، F₂ در سطح 0/1% و تیمارهای با شوری 6، F₁، در سطح 39% و F₂ در سطح 18% معنی‌دار بودند.

جدول 7- ماتریس همبستگی مقادیر مقاومت کششی، F₁ و F₂ در شوری 3 و 6 دسی‌زیمنس بر متر.

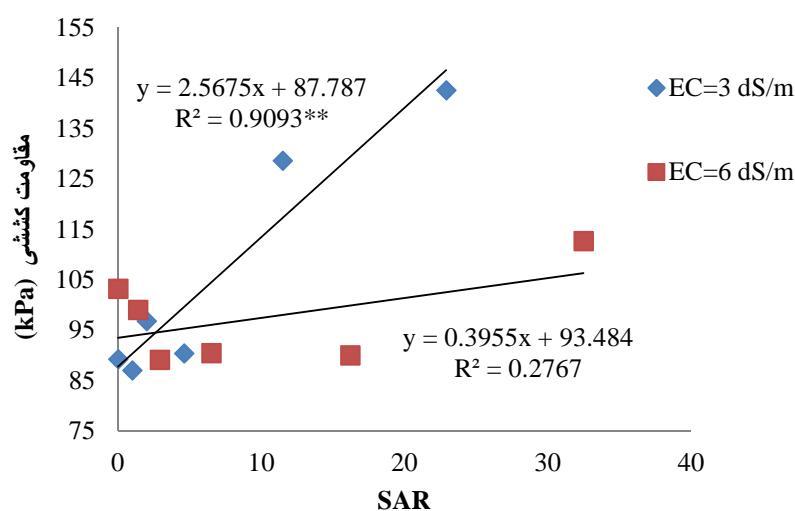
F ₂	F ₁	مقاومت کششی		
-	-	-	مقاومت کششی	شوری = 3m ⁻¹ dS
-	-	-0/556**	F ₁	
-	0/579**	-0/761***	F ₂	
-	-	-	مقاومت کششی	شوری = 6m ⁻¹ dS
-	-	-0/523*	F ₁	
-	0/636**	-0/693***	F ₂	

بسیار قوی بوده ولی در تیمارهای با شوری 6 نسبتاً ضعیف بود. برزگر و همکاران (1994) بیان کرده‌اند که پراکنش رس با افزایش SAR، افزایش یافته است و

با توجه به شکل 4، با افزایش مقدار نسبت جذب سدیم، مقاومت کششی نیز زیاد شده است که این رابطه مثبت در تیمارهای با شوری 3 دسی‌زیمنس بر متر

می‌شود. نتایج پژوهش حاضر با پژوهش تاجیک و همکاران (1381) و رحیمی و همکاران (2000) متضاد بود. این پژوهش‌گران دریافتند که با افزایش SAR در یک مقدار شوری مشخص، کاهش مقاومت کششی خاکدانه‌ها دیده شده است. آنها همچنین مشاهده نمودند که در یک مقدار مشابه SAR، تیمار با شوری بیشتر مقاومت بیشتر داشته است که مشاهده‌ی چنین نتیجه‌ای را می‌توان به رخ دادن همآوری بیشتر در شوری‌های بالاتر نسبت داد. در یک مقدار ثابت نسبت جذب سدیم، هر چه مقدار شوری بیشتر باشد، غلیظتر شدن سیستم خاک می‌تواند اثر یون سدیم را در افزایش ضخامت لایه دوگانه، بیشتر خنثی نماید همانند آنچه در خاک‌های شور-سدیمی دیده می‌شود.

افزایش ناحیه سطحی خاک به دلیل پراکنش رس‌ها سبب مقادیر بالاتر مقاومت کششی خاکدانه‌های خاک خشک می‌شود. یافته این پژوهش‌گران در مورد افزایش مقاومت کششی با افزایش SAR، با نتایج به دست آمده از پژوهش حاضر هماهنگی دارد. اما با این تفاوت که همان‌گونه که پیش‌تر نیز اشاره شد، در پژوهش حاضر با افزایش غلظت پتاسیم به عنوان یک کاتیون یک‌ظرفیتی پراکنش رس‌ها افزایش یافته است و یون سدیم با وجود اینکه نسبت به پتاسیم پراکنش کمتری در خاک ایجاد کرده است، توانسته خاک را مقاوم‌تر نماید. دلیل این مشاهده را احتمالاً می‌توان به بزرگ‌تر بودن شعاع هیدراته یون سدیم نسبت به پتاسیم نسبت داد که در غلظت‌های زیاد سدیم به ناپایداری بیشتر خاک منجر



شکل 4- رابطه بین مقدار نسبت جذب سدیم در محلول‌های تیمار و مقاومت کششی خاکدانه‌ها در دو سطح شوری 3 و 6 دسی-زیمنس بر متر.

بیشترین غلظت پتاسیم و با کمترین مقادیر CROSS در هر دو مقدار شوری رخ داد. افزایش غلظت یون پتاسیم با اینکه باعث افزایش درصد رس پراکنش در آب شد، ولی لزوماً منجر به افزایش مقاومت کششی خاک نگردید. رابطه مثبت بین مقادیر تردی خاک با درصد رس قابل پراکنش تنها در تیمارهای با شوری کمتر مشاهده شد که

نتیجه‌گیری کلی

یافته‌های این پژوهش به‌طور کلی بیان‌کننده این نکته می‌باشد که با افزایش غلظت پتاسیم در خاک در هر دو مقدار شوری به‌کار رفته، درصد رس قابل پراکنش در آب به‌طور معنی‌داری نسبت به نمونه شاهد افزایش یافت. بیشترین درصد رس قابل پراکنش در تیمارهای دارای

کاهش و درصد رس قابل پراکنش افزایش نشان داد. به نظر می‌رسد برای بررسی بیشتر کارآیی شاخص CROSS در مورد بیان پایداری ساختمان‌های خاکها، لازم است پژوهش‌های بیشتری بر روی انواع مختلفی از خاک‌ها انجام شود.

سیاس‌گذاری: به این وسیله از دانشگاه فردوسی مشهد برای تأمین هزینه‌های انجام این پژوهش تشکر و قدردانی می‌گردد.

این رابطه در مقادیر تردی به دست آمده به روش رتبه بندی قوی تر بود. در مقایسه دو روش استفاده شده برای محاسبه تردی خاک، نتایج بیان می‌کند که روش رتبه بندی مقادیر معنی دارتر و هماهنگ‌تری با مقادیر مقاومت کششی خاکدانه‌ها در خاک مورد بررسی نشان داد. همچنین با افزایش مقدار نسبت جذب سدیم در هر دو مقدار شوری، افزایش در مقادیر مقاومت کششی خاکدانه‌ها مشاهده شد که این رابطه در تیمارهای با شوری کمتر معنی دارتر بود که نشان می‌دهد. با افزایش پتاسیم و کاهش سدیم (به‌طور هم‌زمان) مقدار CROSS

منابع مورد استفاده

- بهمن زاده ه، 1387. ارزیابی تردی خاک در برخی از خاک‌های همدان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا.
- تاجیک ف، رحیمی ح و پذیرا الف، 1381. اثر مواد آلی خاک، هدایت الکتریکی و نسبت جذب سدیم بر مقاومت کششی خاکدانه‌ها. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. جلد 6، شماره 3. صفحه‌های 151 تا 160.
- Barzegar AR, Oades JM, Rengasamy P and Giles L, 1994. Effect of sodicity and salinity on disaggregation and tensile strength of an Alfisol under different cropping systems. *Soil and Tillage Research* 32: 329-345.
- Barzegar AR, Oades JM, Rengasamy P and Murray RS, 1995. Tensile strength of dry, remoulded soils as affected by properties of the clay function. *Geoderma* 65: 93-108.
- Dexter AR and Chan KY, 1991. Soil mechanical properties as influenced by exchangeable cations. *Journal of Soil Science* 42: 219-226.
- Dexter AR and Kroesbergen B, 1985. Methodology for determination of tensile strength of soil aggregates. *Journal of Agriculture Engineering Research* 31: 139-147.
- Dexter AR and Watts CW, 2000. Tensile strength and friability. Pp. 405-433. In: Smith, KA and Mullins, CE (Eds.) "Soil and Environmental Analysis: Physical Methods". 2nd Edition. Marcel Dekker, Inc.
- Gee, G.W., and Bauder, J.W. 1986. Particle-size analysis. Pp. 383-411. In: Klute, A (Ed.) "Methods of Soil Analysis. Part 1- Physical and mineralogical methods" 2nd edition. Agronomy No.9. America Society of Agronomy, Inc. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin. USA.
- Hallett PD, Dexter AR and Seville JPK, 1995a. Identification of pre-existing cracks on soil fracture surfaces using dye. *Soil and Tillage Research* 33: 163-184.
- Hallett PD, Bird NRA, Dexter AR and Seville JPK, 1995. The application of fracture mechanics to crack propagation in dry soil. *European Journal of Soil Science* 49: 591- 599.
- Hillel D, 1980. *Application of Soil Physics*. London, Academic Press Inc. 771 p.
- Kay BD and Dexter AR, 1992. The influence of dispersible clay and wetting/drying cycles on the tensile strength of a red-brown earth. *Australian Journal of Soil Research* 30: 297-310.
- Marchuk A and Rengasamy P, 2012. Threshold electrolyte concentration and dispersive potential in relation to CROSS in dispersive soils. *Soil Research* 50: 473-481.
- Marchuk A, Rengasamy P and McNeill A, 2013. Influence of organic matter, clay mineralogy and pH on the effects of CROSS on soil structure is related to the zeta potential of the dispersed clay. *Soil Research* 51: 34-40.

- Mullins CE and Panayiotopoulos KP, 1984. The strength of unsaturated mixtures of sand and kaolin and the concept of effective stress. *Journal of Soil Science* 35: 459–468.
- Rahimi H, Pazira E and Tajik F, 2000. Effect of soil organic matter, electrical conductivity and sodium adsorption ratio on tensile strength of aggregates. *Soil and Tillage Research* 54: 145-153.
- Rengasamy P, 2010. Soil processes affecting crop production in salt-affected soils. *Functional Plant Biology*. 37: 613–620.
- Rengasamy P and Marchuk A, 2011. Cation ratio of soil structural stability (CROSS). *Soil Research* 49: 280–285.
- Rengasamy P and Sumner ME, 1998. Processes involved in sodic behaviour. Pp. 35–50. In: Sumner, ME and Naidu, R (Eds). *Sodic Soils: Distribution, Properties, Management, and Environmental Consequences*. (Oxford University Press: New York)
- Richards LA, 1954. Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. *USDA Hand book*. 60-84.
- Sparks DL, Fendorf SE, Zhang PC and Tang L, 1992. Kinetics and mechanisms of environmentally important reactions on soil colloidal surface, NATO Advanced Study Institute on Migration and Fate of Pollutants in Soils and Subsoils, Maratea, Italy, May 24-June 5.
- Utomo WH and Dexter AR, 1981a. Soil friability. *Journal of Soil Science* 32: 203-213.
- Utomo WH and Dexter AR, 1981b. Tilth mellowing. *Journal of Soil Science* 32: 187-201.
- Watts CW and Dexter AR, 1998. Soil friability: theory, measurement and the effects of management and organic carbon content. *European Journal of Soil Science* 49: 73-84.