تأثير محتوى الجبس في منحنى الوصف الرطوبي والايصالية المائية غير المشبعة في التربة

نمير طه مهدي

قسم علوم التربة والمياه — كلية الزراعة — جامعة بغداد

المستخلص

أجريت تجربة في المختبر لدراسة بعض الخصائص المائية، كمنحنى الوصف الرطوبي والسعة المائية النوعية للتربة والايصالية المائيـة، لتربـة ذات محتوى جبسي مختلف بلغ مداه من 5 إلى 502 غم جبس. كغم$^{-1}$ تربة، تحت ظروف غير مشبعة، ولمدى رطوبي واسع مده الأدنى المحتوى الرطـوبي الحجمي المتبقي θ_r عند جهد ماء التربة 1500 كيلوباسكال وصولاً إلى أعلى محتوى رطوبي θ_s عند حالة الإشباع . قدر منحنى الوصف الرطـوبي للتربـة. واستعملت معادلة van Genuchten (32) لوصف البيانات التجريبية للمنحنى رياضياً، واستخرجت معـايير المعادلـة α و n و m . ومـن ثـم حـسبت الايصالية المائية غير المشبعة من قيم الجهود المائية المسلطة وقيم معايير المعادلة بتطبيق معادلة التكامل المغلق المقترحة مـن قبـل van Genuchten (32). أظهرت النتائج أن المحتوى الرطوبي الحجمي للتربة قد اختلف باختلاف محتوى التربة من الجبس عند كل جهد مائي مسلط عليها، فعنـد جهـد مـاء التربة 0.1 كيلوباسكال، ازداد المحتوى الرطوبي الحجمي المشبع من 0.442 إلى 0.501 سم^3.سم$^{-3}$ عند زيادة محتوى الجبس في التربة من 32 إلـى 502 غم جبس.كغم$^{-1}$ تربة. أما في حالة جهد ماء التربة 1500 كيلوباسكال فقد انخفض المحتوى الرطوبي الحجمي المتبقي من 0.255 إلى 0.089 سـم^3.سـم$^{-3}$ عند زيادة محتوى الجبس في التربة من 64 إلى 502 غم جبس.كغم$^{-1}$ تربة. إن تأثير هذه المتغايرات انعكس على حساب الايصالية المائية غير المشبعة، إذ ازدادت قيم الايصالية المائية غير المشبعة من 1.29×10^{-4} إلى 2.29×10^{-2} سم.دقيقة$^{-1}$ عند زيادة المحتوى الجبسي من 5 إلى 502 غـم جـبس.كغـم$^{-1}$ تربة، عند مستويات المحتوى الرطوبي العالي، في حين انخفضت قيم الايصالية المائية غير المشبعة من 4.94×10^{-8} إلى 6.36×10^{-11} سـم.دقيقـة$^{-1}$ عنـد زيادة المحتوى الجبسي من 64 إلى 502 غم جبس.كغم$^{-1}$ تربة عند مستويات المحتوى الرطوبي المتبقي .

The Iraqi Journal of Agricultural Science 39 (3) : 10-23 (2008) Mahdi

EFFECT OF GYPSUM CONTENT ON SOIL – WATER CHARACTERISTIC CURVE AND UNSATURATED HYDRAULIC CONDUCTIVITY IN SOIL

N. T. Mahdi

Dept. of Soil and Water Sciences – College of Agriculture – University of Baghdad

ABSTRACT

A laboratory experiment was conducted to study some hydraulic properties such as soil-water characteristic curve, specific water capacity and hydraulic conductivity, for a soil contenting 5 to 502 g gypsum.kg^{-1} soil, for wide range of water content from residual water content θ_r at soil-water potential 1500 kPa to the saturated conditions θ_s. The soil-water characteristic curve was estimated, and the equation of van Genuchten (32) was used to determine the best-fit parameters α, n and m for experimental data of soil-water characteristic curve. Unsaturated hydraulic conductivity was calculated from the values of soil-water potential and the values of α, n, and m, by using a closed-form integral equation which it is suggested by van Genuchten (32). The results showed that volumetric water content were changed with gypsum content changing under each different water potential. At soil-water potential 0.1 kPa the saturated water content was increased from 0.442 to the 0.501 cm^3.cm^{-3} when gypsum content was increased from 32 to the 502 g gypsum.kg^{-1} soil. But at soil-water potential 1500 kPa the residual water content was decreased from 0.255 to the 0.089 cm^3.cm^{-3} with increasing gypsum content from 64 to the 502 g gypsum.kg^{-1} soil. The effect of these variations reflected on the calculated values of unsaturated hydraulic conductivity. The values of unsaturated hydraulic conductivity were increased from 1.29×10^{-4} to the 2.29×10^{-2} cm.min^{-1} with increasing gypsum content from 5 to the 502 g gypsum.kg^{-1} soil, at high water content. But at residual water content ($\theta=\theta_r$) the values of unsaturated hydraulic conductivity were decreased from 4.94×10^{-8} to the 6.36×10^{-11} cm.min^{-1} with increasing gypsum content from 64 to the 502 g gypsum.kg^{-1} soil.

المقدمة

عرفت العلاقة بين المحتوى الرطوبي للتربة وجهد الماء ψ، بمنحنى الوصف الرطوبي. ويقصد بالمحتوى الرطوبي هو كمية الماء الموجودة في الحيز المسامي للتربة. ويفضل من الناحية التطبيقية أن يعبر عن المحتوى الرطوبي، كمحتوى رطوبي حجمي θ (18 و 33). يعد منحنى الوصف الرطوبي احد أهم العلاقات المائية للتربة ، فمن خلاله يمكن تقدير خصائص مختلفة مهمة للعلاقة بين الماء والتربة، منها وهي الأهم وصف سلوك التربة تحت ظروف مائية غير مشبعة والتي تمثل الظروف الطبيعية لنمو اغلب النباتات في التربة (20 و 35). كثيراً ما تستعمل العلاقة بين θ و ψ لتقدير معايير فيزيائية ورياضية بهدف وصف كل من جريان الماء غير المشبع، والايصالية المائية غير المشبعة، والتوزيع ألحجمي لمسامات التربة التي تفقد الماء أو تحتفظ به على حد سواء عند جهود مائية مختلفة، وكمية الماء الجاهزة للاستهلاك المائي من قبل النبات، فضلاً عن درجة الإشباع والكثافة الظاهرية للتربة والمسامية الكلية وغيرها من الخصائص المهمة في علم التربة (19 و35). إن تقدير منحنى الوصف الرطوبي في المختبر يعد من القياسات المهمة والذي يتطلب امكانات وجهد ووقت. اقترح العديد من الباحثين وصف المنحنى رياضياً باستعمال معادلات غير خطية Nonlinear ذات معايير تجريبية empirical ، واستعملت الحواسيب والبرامجيات لتمثيل المنحنى بأقل فرق معنوي وبأفضل تطابق best fit بين بيانات المنحنى التجريبية والبيانات المحسوبة من هذه المعادلات (22 و 30).

وضع van Genuchten (32) معادلة رياضية بسيطة لوصف بيانات منحنى الوصف الرطوبي ذات الصيغة الآتية:

$$\Theta = \left[\frac{1}{1+(\alpha\psi)^n}\right]^m \qquad [1]$$

يمثل Θ المحتوى الرطوبي النسبي والذي يساوي:

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \qquad [2]$$

إذ أن: θ_r = المحتوى الرطوبي ألحجمي المتبقي (سم^3.سم$^{-3}$). وθ_s = المحتوى الرطوبي ألحجمي عند الإشباع (سم^3.سم$^{-3}$). و ψ = جهد الماء (كيلوباسكال). و θ = المحتوى الرطوبي ألحجمي عند أي قيمة من قيم جهد الماء (سم^3.سم$^{-3}$). و α و n و m = ثوابت تجريبية. أظهرت هذه المعادلة مرونة عالية في تمثيل بيانات منحنى الوصف الرطوبي وأعطت مطابقة جيدة بين البيانات التجريبية والبيانات المحسوبة.

توصل van Genuchten (32) من اشتقاق المعادلة 1 وبالاستناد إلى أسس النموذج الرياضي المقدم من قبل Mualem (29) إلى معادلة تكامل مغلق لحساب الايصالية المائية غير المشبعة للتربة، وبذلك استفاد الباحث من بيانات منحنى الوصف الرطوبي في حساب الايصالية المائية للتربة كدالة لجهد الماء K(ψ). إذ قام بحساب الايصالية المائية النسبية Kr(ψ) بتطبيق المعادلة الآتية:

$$K_r(\psi) = \frac{\left\{1-(\alpha\psi)^{n-1}\left[1+(\alpha\psi)^n\right]^{-m}\right\}^2}{\left[1+(\alpha\psi)^n\right]^{m/2}} \qquad [3]$$

اذ ان العلاقة بين الثابتين n و m وفق الآتي:

$$m = 1 - \frac{1}{n} \qquad [4]$$

احتسبت قيم الايصالية المائية غير المشبعة كدالة للجهد المائي $K(\psi)$ من قيم الايصالية المائية النسبية غير المشبعة $K_r(\psi)$ [5]

جرت محاولات عديدة لتطبيق هذه المفاهيم في حساب الايصالية المائية غير المشبعة لترب ذات محتوى مختلف من الجبس. فقد اعتمد سليمان وآخرون (7) في تقدير الايصالية المائية غير المشبعة قيم ميل منحنى الوصف الرطوبي وقيم انتشارية ماء التربة المقدرة بطريقة Arya وآخرون (14). وقام شهاب (8) بحساب الايصالية المائية غير المشبعة من بيانات منحنى الوصف الرطوبي بتطبيق معادلة Jackson (25). بينما احتسب الخطيب (3) الايصالية المائية غير المشبعة من قيم ميل منحنى الوصف الرطوبي وقيم انتشارية الماء المقدرة بطريقة Bruce و Klute (17)، بعد أن درس جريان الماء أفقياً في أعمدة تربة ذات محتوى جبسي مختلف. أما في هذه الدراسة فقد اعتمدت طريقة معادلة التكامل المغلق لحساب الايصالية المائية غير المشبعة للتربة (معادلة 3) بالاستناد إلى بيانات منحنى الوصف الرطوبي ومعايير معادلة van Genuchten (32)، (معادلة 1)، لعينات تربة ذات مدى واسع من المحتوى ألجبسي. لقد أكد كل من حسن (6) و القرني (4) أن هذه الطريقة سريعة ودقيقة وتكون نتائجها مقاربة من نتائج الطرق السابقة الذكر لحساب الايصالية المائية غير المشبعة.

وقيم الايصالية المائية المشبعة K_s، بتطبيق المعادلة التي وردت في van Genuchten (32) الآتية :

$$K(\psi)=K_r(\psi)\times K_s$$

إن هدف هذا البحث هو دراسة بعض الخصائص المائية للتربة تحت ظروف غير مشبعة ومن ثم تقويم هذه الخصائص تحت تأثير محتوى مختلف من الجبس ، وتأثير جهد مائي مختلف ، ولمدى رطوبي واسع، من المحتوى الرطوبي المتبقي عند جهد ماء التربة 1500 كيلوباسكال إلى المحتوى الرطوبي عند الإشباع .

المواد وطرائق العمل

استعملت في التجربة عينات تربة جبسية جلبت من الحقل المخصص لمركز بحوث الترب الجبسية في قضاء الدور. جمعت عينات التربة من الأفق Ap السطحي غير ألجبسي (0–20 سم)، والأفق C_1 ألجبسي (20–40 سم). جففت التربة هوائياً، ومزجت عينات كل أفق بشكل منفرد ثم طحنت ومررت من منخل قطر فتحاته 2 ملم. تم تعيين نسجة التربة بطريقة الماصة (21) بعد إزالة الجبس بالغسل. كما حددت بعض الصفات الكيميائية لمادة التربة بضوء الطرائق المقترحة من قبل مختبر الملوحة الأمريكي (31) ويبين جدول 1 نتائج التحليل لعينات التربة المستعملة في الدراسة.

جدول 1. بعض الخصائص الفيزيائية والكيميائية للتربة الجبسية المستعملة في الدراسة.

خصائص التربة	الأفق السطحي Ap	الأفق ألجبسي C_1
الجبس (غم.كغم$^{-1}$)	5	502
الرمل (غم.كغم$^{-1}$)	321	679
الغرين (غم.كغم$^{-1}$)	395	260
الطين (غم.كغم$^{-1}$)	284	61
صنف نسجة التربة	Clay loam	Sandy loam
الكثافة الظاهرية للتربة (ميكاغرام. م$^{-3}$)	1.45	1.22
كثافة التربة الحقيقية (ميكاغرام. م$^{-3}$)	2.65	2.39
كاربونات الكالسيوم (غم.كغم$^{-1}$)	264.0	190.0
الايصالية الكهربائية (EC)، ديسيسمنز.متر$^{-1}$	2.47	2.83
الأس الهيدروجيني pH	7.53	7.69

السعة التبادلية للأيونات الموجب(سنتمول+.كغم$^{-1}$)	23.3	15.6
المادة العضوية (غم.كغم$^{-1}$)	6.3	0.7

حضرت عينات مختلفة بمحتواها من الجبس عن طريق خلط تربة الأفقين أعلاه للحصول على عينات تحتوي على نسب بلغت 5 و 32 و 64 و 125 و 255 و 502 غم جبس.كغم$^{-1}$ تربة. ويبين جدول 2 بعض الخصائص الفيزيائية والكيميائية لعينات الترب التي تم تحضيرها.

جدول 2. بعض الخصائص الفيزيائية والكيميائية لعينات الترب التي تم تحضيرها.

خصائص التربة	ترب ذات محتوى جبسي مختلف			
الجبس (غم.كغم$^{-1}$)	32	64	125	255
الرمل (غم.كغم$^{-1}$)	401	443	522	588
الغرين (غم.كغم$^{-1}$)	394	375	335	307
الطين (غم.كغم$^{-1}$)	205	182	143	105
صنف نسجة التربة	Loam	Loam	Loam	Sandy loam
الكثافة الظاهرية للتربة (ميكاغرام. م$^{-3}$)	1.49	1.44	1.39	1.32
كثافة التربة الحقيقية (ميكاغرام. م$^{-3}$)	2.63	2.60	2.59	2.54
كاربونات الكالسيوم (غم.كغم$^{-1}$)	247	221	203	197
الايصالية الكهربائية (EC)، ديسيسمنز.متر$^{-1}$	2.49	2.54	2.61	2.74
الأس الهيدروجيني pH	7.56	7.59	7.63	7.66
السعة التبادلية للأيونات الموجب(سنتمول+.كغم$^{-1}$)	23.0	22.6	20.7	17.3
المادة العضوية (غم.كغم$^{-1}$)	6.1	6.0	2.3	1.7

اخذ كغم واحد من كل عينة ووضع في إناء مصنوع من مادة البولي اثيلين، وأضيف ماء مقطر إلى العينات بنسبة 2 : 1 ماء–تربة. مزج الخليط بقضيب زجاجي مرتين يومياً ولمدة ست أيام، بعد ذلك جففت التربة بالفرن في درجة حرارة 45 °م ولمدة 48 ساعة (13). قيست الكثافة الظاهرية لعينات الترب هذه بطريقة الاسطوانة المعدنية (15)، باستعمال اسطوانات معدنية بقطر 5 سم وطول 5 سم وبثلاثة مكررات. قدرت الكثافة الحقيقية لعينات الترب بطريقة البكنوميتر الموصوفة في (16). كما قيست الايصالية المائية المشبعة لهذه الترب بطريقة عمود الماء الثابت (26)، باخذ عينات تربة بواسطة اسطوانات معدنية أخرى لها نفس أبعاد الاسطوانات السابقة الذكر. رطبت عينات التربة الموجودة داخل الاسطوانات بالخاصية الشعرية باستعمال ماء مقطر حتى الإشباع، ثم سلط عمود ماء ثابت مقداره 1 سم وقيست الايصالية المائية المشبعة. حسبت الايصالية المائية المشبعة بتطبيق قانون دارسي Darcy وكما في المعادلة الآتية:

$$K_s = \left(\frac{VL}{At\,\Delta h} \right) \qquad [6]$$

إذ أن K_s الايصالية المائية المشبعة $\left(\frac{L}{T}\right)$ ، و V حجم الماء المتدفق (L^3) ، و A مساحة المقطع العرضي للتربة (L^2) ، و t الزمن (T) ، و L طول عمود التربة (L) ، و Δh فرق العمود الهيدروليكي بين نقطة دخول الماء ونقطة خروجه (L) .

قدرت العلاقة بين المحتوى الرطوبي ألحجمي والجهد المائي لعينات الترب ذات المحتوى ألجبسي المختلف وهي بنفس الكثافة الظاهرية التي تم قياسها مسبقا. إذ حضرت أعمدة بلاستيكية مكونة من حلقات بقطر 5 سم وارتفاع 1 سم وبسمك 0.2 سم، ربطت الحلقات بعضها ببعض بشريط لاصق شفاف وجمعت كل 20 حلقة في عمود واحد. تم تحضير ست أعمدة يتكون كل عمود من 20 حلقة وبطول إجمالي 20 سم. أغلقت إحدى نهايتي العمود بورق ترشيح ومشبك سلكي واحكم الربط جيداً. عبئت الأعمدة بعينات التربة المجففة بعد أن طحنت ونخلت بمنخل 2 ملم. تم تحديد كتلة التربة اللازمة لملئ الحجم المحدد من العمود بحيث تم الحصول على كثافة ظاهرية مساوية للكثافة الظاهرية التي تم تحديدها مسبقاً. رطبت أعمدة التربة بالخاصية الشعرية باستعمال ماء مقطر مغلي ومبرد. قطعت الأعمدة بواسطة الة حادة وأخذت الحلقات وسلطت عليها جهود مختلفة بين 0.1 و 1500 كيلوباسكال بعد أن شبعت التربة بالماء لمدة 24 ساعة. استعمل جهاز Sintered – Glass Funnels للجهود 0.1 و 2.5 و5 كيلوباسكال، وجهاز أقراص الضغط للجهود 10 و 20 و 33 و 50 و 100 و 1000 و 1500 كيلوباسكال.

اجري تطابق fitting معادلة van Genuchten (32) لبيانات منحنيات الوصف الرطوبي ووصفت العلاقة بين θ و ψ باستعمال الآتية :

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r)\left[1 + (\alpha\psi)^n\right]^{-m} \qquad [7]$$

استخرجت قيم الثوابت α و n و m بعد أن تم حل معادلة 7 باستعمال برنامج Statistica (non-linear regression fitting) ، المشار له في (4 و 10).

قدرت الايصالية المائية غير المشبعة من بيانات العلاقة بين المحتوى الرطوبي ألحجمي θ والجهد المائي ψ. إذ استعملت قيم الجهد المائي ψ وقيم الثوابت α و n و m المستخرجة من مطابقة معادلة 7 لحساب الايصالية المائية النسبية غير المشبعة $K_r(\psi)$ ، بتطبيق المعادلة 3 . ثم استعملت قيم $K_r(\psi)$ وقيم الايصالية المائية المشبعة K_s في حساب الايصالية المائية غير المشبعة كدالة للجهد المائي $K(\psi)$ بتطبيق المعادلة 5 .

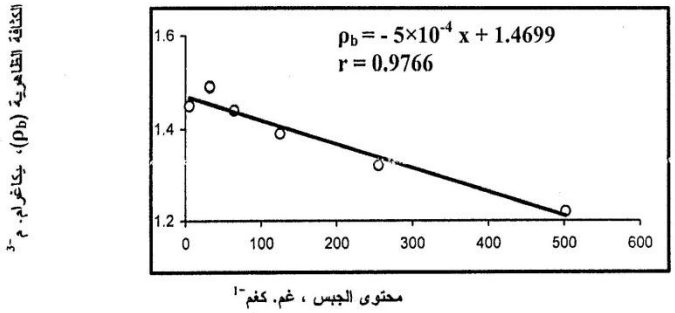
النتائج والمناقشة

يبين شكل 1 العلاقة بين محتوى الجبس في التربة وقيم الكثافة الظاهرية (ρ_b). اظهر الشكل أن قيم الكثافة الظاهرية قد انخفضت مع زيادة محتوى الجبس، إذ أدت زيادة محتوى الجبس من 32 إلى 502 غم جبس.كغم$^{-1}$ تربة إلى انخفاض في قيم الكثافة الظاهرية من 1.49 إلى 1.22 ميكاغرام.م$^{-3}$ ، أي انخفضت كثافة التربة الظاهرية بنسبة 18.12%، واظهر تحليل الانحدار أن العلاقة بينهما علاقة انحدار خط مستقيم من الدرجة الأولى وبمعامل ارتباط (r) 0.9766.

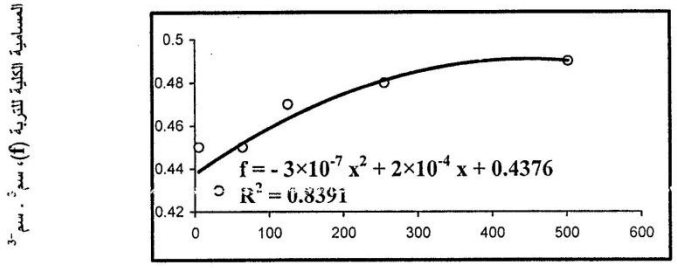
يبين شكل 2 العلاقة بين محتوى الجبس والمسامية الكلية للتربة (f)، إذ أن المسامية الكلية للتربة ازدادت مع زيادة محتوى الجبس فيها، فقد ازدادت المسامية من 0.43 إلى 0.49 سم^3. سم$^{-3}$ عند زيادة محتوى الجبس من 32 إلى 502 غم جبس.كغم$^{-1}$ تربة، أي حصلت زيادة في مسامية التربة بنسبة مقدارها 13.95% واتبعت علاقة طردية ايجابية ذات معادلة متعددة الحدود من الدرجة الثانية وبمعامل تحديد (R^2) 0.8391. لقد جاءت هذه النتائج متوافقة مع شهاب (8) ، لكنها اختلفت مع كل من الجبوري (1) والخطيب (3) إذ حصل الباحث الأول على اختلاف في قيم الكثافة الظاهرية مع المحتوى ألجبسي، أما الباحث الثاني فقد انخفضت قيم الكثافة الظاهرية مع زيادة محتوى الجبس وبشكل متوافق.

أظهرت عينة التربة ذات المحتوى ألجبسي الأقل (5 غم جبس.كغم$^{-1}$ تربة) قيمة منخفضة في كثافتها الظاهرية (شكل 1)، وقيمة مرتفعة في مساميتها الكلية (شكل 2)، مقارنة مع نموذجي التربة ذات المحتوى المنخفض من الجبس (32 و 64 غم جبس.كغم$^{-1}$ تربة)، إن السبب في ذلك قد

يعزى إلى زيادة محتوى هذا النموذج من الطين والغرين (جدول 1 و 2) مقارنة مع العينات الأخرى الأمر الذي أدى، أن يكون التوزيع ألحجمي لمفصولات التربة، للدقائق ذات الحجم اقل من 50 مايكرومتر أكثر وبنسبة تصل إلى 70% من محتواها طين زائداً غرين، مما اثر على طبيعة تجمع دقائق التربة أثناء مرحلة تجفيف العينات عند التحضير فانخفضت كثافتها الظاهرية (24 و 28).



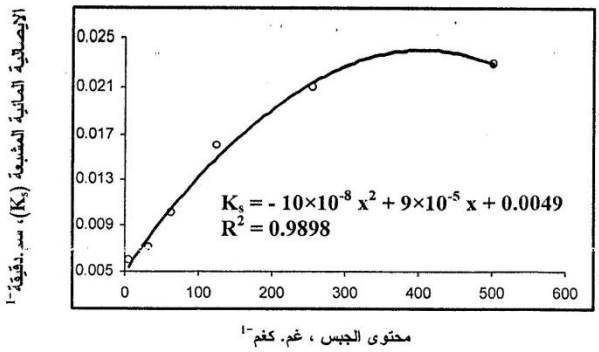
شكل 1. العلاقة بين محتوى الجبس في التربة والكثافة الظاهرية (ρ_b)



شكل 2. العلاقة بين محتوى الجبس في التربة والمسامية الكلية (f)

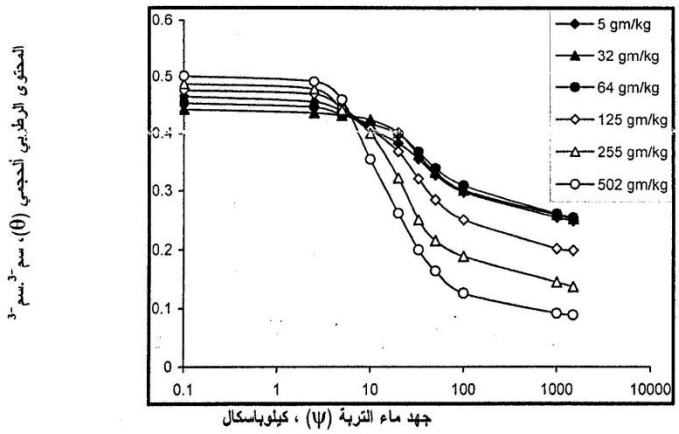
يبين شكل 3 اثر محتوى الجبس في الايصالية المائية المشبعة K_s للتربة. إذ زادت الايصالية المائية بزيادة محتوى الجبس في التربة، فقد ازدادت الايصالية المائية من 0.006 إلى 0.023 سم.دقيقة$^{-1}$ نتيجة زيادة محتوى الجبس من 5 إلى 502 غم جبس.كغم$^{-1}$ تربة ، أي أن التربة ذات المحتوى ألجبسي 502 غم جبس.كغم$^{-1}$ تربة لها القدرة على توصيل الماء أكثر من تربة محتواها من الجبس 5 غم جبس.كغم$^{-1}$ تربة بمقدار أربع مرات تقريباً. إن السبب في زيادة الايصالية المائية مع زيادة محتوى الجبس قد تعزى إلى جملة من الأسباب منها. التغير الحاصل في التوزيع ألحجمي لمفصولات التربة نتيجة تغير محتوى الجبس، إذ حصلت زيادة في نسبة الدقائق ذات حجم اكبر من 50 مايكرومتر، وانخفاض حاد في محتوى الطين مع زيادة محتوى الجبس في التربة (جدول 1 و 2)، فضلاً عن أن أحجام بلورات الجبس ودرجة تبلورها التي تختلف باختلاف محتوى الجبس في التربة (2)، والتي بدورها ستؤثر في التوزيع ألحجمي لمسامات التربة بحيث تزداد نسبة المسامات الكبيرة الحجم مع زيادة نسبة الجبس (5 و 9 و 11)، وبالتالي حصول زيادة في

مساحة المقطع الناقل للماء الذي يـؤدي إلـى زيـادة فـي الايصالية المائية للتربة (23).



شكل 3. العلاقة بين محتوى الجبس والايصالية المائية المشبعة (K_s) للتربة

يبين شكل 4 منحنيات الوصف الرطوبي ، كعلاقة بين جهـد ماء التربة ψ والمحتوى الرطوبي ألحجمـي θ لتـرب ذات محتوى جبسي مختلف . تم تمثيل بيانات العلاقة (ψ ضد θ) بتطبيق معادلة vanGenuchten (32) (معادلة 7) لإيجـاد أفضل تطابق بين القيم المقاسة والقيم المحسوبة من المعادلة. فضلا عن إيجاد ثوابـت المعادلـة، α و n و m وθ_0 و θ_s (جدول 3). تبين النقاط في الشكل البيانات التجريبية المقاسة، أما الخط البياني فيمثل بيانات أفضل تطابق واعتبرت علـى إنها بيانات محسوبة. اظهر التحليل الإحصائي توافقاً جيداً بين القيم المقاسة والقيم المحسوبة، إذ كانت قيم معامل التحديد R^2 قيماً عالية المعنوية في حين أعطت قـيم معـدل المربعـات المتبقـي Residual mean square of θ {RMSθ} قيمـا صغيرة ولجميع نماذج الترب الخاضعة للاختبار (جدول 3).



شكل 4. العلاقة بين جهد ماء التربة (ψ) والمحتوى الرطوبي الحجمي (θ) لتربة ذات محتوى مختلف من الجبس.

جدول 3. قيم معايير معادلة van Genuchten (α و n و m) لمنحنيات الوصف الرطوبي وقيم المحتوى الرطوبي الحجمي المتبقي θ_r وعند الإشباع θ_s وقيم معايير أفضل تطابق ($RMS\theta$ وR^2) وقيم ميل منحنيات الوصف الرطوبي ($-\frac{d\theta}{d\psi}$) عند الجهد المائي 10 كيلوباسكال

محتوى التربة من الجبس (غم. كغم$^{-1}$)	θ_r	θ_s	α	n	$m=1-\frac{1}{n}$	RMSθ ($cm^3.cm^{-3}$)^2	R^2	$-\frac{d\theta}{d\psi}$
5	0.249	0.465	0.0032	1.0197	0.0193	1.25×10^{-5}	0.9986**	4.10×10^{-4}
32	0.252	0.442	0.0038	1.7372	0.4244	1.70×10^{-5}	0.9976**	2.75×10^{-4}
64	0.255	0.453	0.0018	1.0746	0.0694	1.43×10^{-5}	0.9980**	3.01×10^{-4}
125	0.199	0.476	0.0045	1.2888	0.2241	1.94×10^{-5}	0.9988**	6.09×10^{-4}
255	0.137	0.487	0.0076	1.6616	0.3982	5.19×10^{-5}	0.9979**	1.02×10^{-3}
502	0.089	0.501	0.0135	2.4162	0.5861	2.56×10^{-5}	0.9992**	1.63×10^{-3}

** معنوية عند مستوى 0.01 .

اظهر الشكل تباين في منحنيات الوصف الرطوبي نتيجة اختلاف محتوى التربة من الجبس، وان المحتوى الرطوبي الحجمي θ انخفض مع زيادة جهد الماء ψ ولجميع التربة. عند الجهد المائي 0.1 كيلوباسكال إذ أن المحتوى الرطوبي الحجمي يمثل حالة الإشباع θ_s . اختلفت قيم θ_s باختلاف المحتوى الجبسي، إذ زادت قيم θ_s مع زيادة المحتوى الجبسي للترب، فقد تراوحت قيم θ_s بين 0.442 سم^3.سم$^{-3}$ للمعاملة 32 غم جبس.كغم$^{-1}$ تربة و0.501 سم^3.سم$^{-3}$ للمعاملة 502 غم جبس.كغم$^{-1}$ تربة. إن السبب الذي أدى إلى زيادة θ_s بزيادة المحتوى الجبسي يعزى إلى اختلاف الكثافة الظاهرية لعينات الترب التي خضعت للاختبار (24)، إذ يلاحظ إن الكثافة الظاهرية للترب قد انخفضت مع زيادة محتوى الترب

من الجبس (شكل1) والذي أدى إلى زيادة في المسامية الكلية للتربة (شكل2) مما انعكس ذلك على الحالة الرطوبية للتـرب عند الإشباع. وعليه أعطت التربة ذات المحتـوى ألجبـسي 502 غم جبس.كغم$^{-1}$ تربة أعلى محتوى رطوبي حجمي ثـم أتت من بعد ذلك التربة ذات المحتـوى ألجبـسي 255 غـم جبس.كغم$^{-1}$ تربة ، ومن بعدها التربة 125 غم جبس.كغـم$^{-1}$ تربة. أما الترب ذات المحنوى المنخفض من الجـبس (5 و 32 و 64 غم جبس.كغم$^{-1}$ تربة) فقد أظهرت تفاوت نسبي في قيم θ_s (جدول3).

عند تغير جهد الماء من 0.1 كيلوباسـكال إلـى 8 كيلوباسكال حصل انخفاض نسبي بسيط في قـيم θ ولجميـع المعاملات، ثم تقاطعت المنحنيات وبشكل متقارب تقريباً عند الجهد 8 كيلوباسكال، إذ المحتوى الرطوبي ألحجمي يـساوي 0.417 سم^3.سم$^{-3}$. من بعد نقطة التقاطع وبزيـادة الجهـد المسلط اخذ المحتوى الرطوبي ألحجمي للترب بالانخفـاض وكان الانخفاض للترب ذات المحتوى العـالي مـن الجـبس (125 و 255 و 502 غم جبس.كغم$^{-1}$ تربة) أكثر انحـداراً من الترب ذات المحتوى المنخفض من الجـبس (5 و 32 و 64 غم جبس.كغم$^{-1}$ تربة)، إذ بلـغ ميـل انحـدار منحنـى الوصف الرطوبي ($-\frac{d\theta}{d\psi}$) عند الجهد المائي 10 كيلوباسكال للتربة التي محتواها 502 غم جبس.كغم$^{-1}$ تربة 1.63×10^{-3} ، بينما كان الميل عند نفس الجهد المائي للتربة التي محتواها 255 غم جبس.كغم$^{-1}$ تربة 1.02×10^{-3} والميل للتربة التـي محتواها 125 غم جـبس.كغـم$^{-1}$ تربـة 6.09×10^{-4}. أمـا المعاملات (5 و 32 و 64 غم جبس.كغم$^{-1}$ تربة) فقد كـان الميل منخفض مقارنة مع المعاملات الأخرى وبلغ تقريباً بين 2.75×10^{-4}و 4.10×10^{-4} (جدول3). يتضح مما سـبق أن الترب ذات المحتوى ألجبسي العالي تفقد كميات مائية أكثـر من الترب ذات المحتوى ألجبسي المنخفض عند زيادة الجهد المائي المسلط على الترب(اكبر من 10 كيلوباسكال). ولـيكن معلوماً أن ميل منحنى الوصف الرطوبي يتغيـر مـع تغيـر الجهود المائية المسلطة والى حين الوصول إلى أعلى جهـد مسلط (1500 كيلوباسكال) إذ يقترب ميـل المنحنيـات مـن الصفر (6).

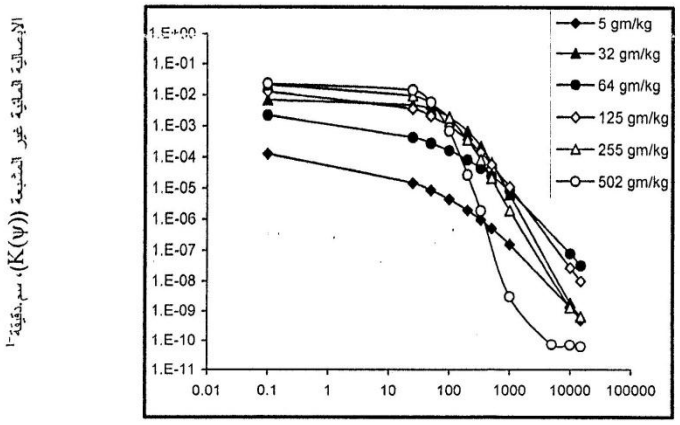
فقدت الترب كميات مختلفة من الماء، عند تغير جهد ماء التربة من 0,1 إلـى 33 كيلوباسـكال، وان المحتـوى الرطوبي ألحجمي θ الذي احتفظت به الترب عند الجهد 33 كيلوباسكال قد اختلف من معاملة إلى أخرى تبعـاً لمحتـوى الترب من الجبس، والذي حصل أن قيم θ قد انخفضت بزيادة محتوى الجبس، فقد كانت كمية الماء المحتفظ بها عنـد هـذا الجهد للمعاملات 5 و 32 و 64 غم جبس.كغم$^{-1}$ تربة ، قـد تراوحت بين 0.368 و 0.355 سم^3.سم$^{-3}$، أمـا المعـاملات ذات المحتوى ألجبسي 125 و 255 و 502 غم جبس.كغم$^{-1}$ تربة فقد كانت قيم θ 0.321 و 0.251 و 0.200 سم^3.سم$^{-3}$ على التتابع . إذ أن زيادة المحتوى ألجبسي في الترب من 64 إلى 125 غم جبس.كغم$^{-1}$ تربة أدت إلى انخفاض المحتـوى الرطوبي بنسبة 13%، وعند زيادة محتوى الجبس إلى 255 غم جبس.كغم$^{-1}$ تربة انخفض المحتوى الرطوبي بنسبة 22% ، ومع استمرار زيـادة محتـوى الجـبس إلـى 502 غـم جبس.كغم$^{-1}$ تربة انخفض المحتوى الرطوبي بنـسبة 20%. إن المحتوى الرطوبي المحتفظ به في التربة عند الجهد المائي 33 كيلوباسكال يعتمد على التوزيع ألحجمي للمسامات (19 و 24 و 30)، وان الترب ذات مسامات كبيـرة macropores تفقد كمية من الماء أكثر من الترب ذات مسـامات متوسـطة الحجم mesopores ومسامات صغيرة الحجم micropores، (12 و 34)، وهنا يلاحظ أن كمية الماء المحتفظ بها عند هذا الجهد المائي قد انخفضت مع زيادة محتوى الترب من الجبس وهذا قد يعزى إلى أن التوزيع ألحجمي لدقائق التربـة الـذي يميل نحو التوزيع الخشن مع زيادة محتوى الترب من الجبس (جدول2)، فضلاً عن انه بزيادة محتوى الجبس تزداد أحجام بلورات الجبس، إذ أشارت الأبحاث أن حجم بلورات الجـبس تزداد مع زيادة محتوى الترب من الجـبس (2)، وهـذا قـد انعكس على التوزيع ألحجمي لمسامات التربة بحيـث تـزداد نسبة المسامات الكبيرة الحجم مع زيادة محتوى الجبس (3 و 5 و 9 و 12).

أما في حالة تغير جهد مـاء التربـة إلـى 1500 كيلوباسكال، فان المحتوى الرطوبي ألحجمي المتبقي θ_r كـان مختلفاً أيضا بين المعاملات وحصل انخفاض في قيم θ_r عنـد زيادة محتوى الترب من الجبس. يبين شكل 4 أن الترب ذات

محتوى الجبس 5 و 32 و 64 غم جبس.كغم$^{-1}$ تربة أعطت قيم متقاربة من θ_r إذ تراوحت بين 0.249 و 0.255 سم^3.سم$^{-3}$ ، ولكن مع زيادة المحتوى ألجبسي بدأت قيم θ_r تقل وبشكل معنوي (جدول 3). إذ أن زيادة محتوى الجبس من 64 إلى 125 غم جبس.كغم$^{-1}$ تربة ومن ثم إلى 255 غم جبس.كغم$^{-1}$ تربة وصولاً إلى 502 غم جبس.كغم$^{-1}$ تربة أدت إلى انخفاض θ_r بنسبة 22% و 31% و 35% على التتابع. إن كمية الماء الموجودة في التربة عند هذا الجهد تعتمد على التوزيع ألحجمي لدقائق التربة وعلى المساحة السطحية النوعية، إذ أن قيم θ_r تزداد مع زيادة نعومة التوزيع ألحجمي للدقائق وان هذه الزيادة مرتبطة بزيادة المساحة السطحية النوعية لمفصولات التربة، كما أن طبيعة مسك الماء من قبل التربة تحت هذه الظروف تعتمد على خاصية الامدصاص وعليه فان كمية الماء الممسوكة تزداد مع زيادة المساحة النوعية (19 و 24 و 30). تحت هذه الظروف الرطوبية ازدادت قيم θ_r بانخفاض محتوى الترب من الجبس بسبب زيادة نعومة نسجة التربة إذ ازدادت نسبة الطين في التربة (جدول 2) وبالتالي ازدادت المساحة السطحية مما أدى إلى زيادة في قيم θ_r .

من مدلولات منحنى الوصف الرطوبي معرفة قابلية التربة على الاحتفاظ بالماء (θ_{33Kpa} - $\theta_{1500Kpa}$) وهو ما يسمى بالماء الجاهز. يتضح من شكل 4 أن قابلية الترب ذات المحتوى ألجبسي المختلف على الاحتفاظ بالماء قد ازدادت مع زيادة محتوى الترب من الجبس ولحين الوصول إلى المعاملة 125 غم جبس.كغم$^{-1}$ تربة التي أعطت أعلى كمية ماء جاهز (0.122 سم^3.سم$^{-3}$)، ومن ثم أخذت كمية الماء الجاهز بالانخفاض مع زيادة محتوى الترب من الجبس . لقد جاءت هذه النتائج مختلفة مع كل من شهاب (8) و الخطيب (3). إذ حصل الأول على أعلى كمية ماء جاهز (0.156 سم^3.سم$^{-3}$) لتربة ذات نسبة جبس 25%. أما الباحث الثاني فقد حصل على زيادة في كمية الماء الجاهز مع انخفاض محتوى الترب من الجبس فقد كانت كمية الماء الممسوكة اكبر في التربة ذات المحتوى ألجبسي الأقل (18.3 غم جبس.كغم$^{-1}$ تربة)، وارتبط المحتوى ألجبسي مع كمية الماء الجاهز بعلاقة ارتباط خطية سالبة المعنوية. إن الاختلاف بين نتائج شهاب (8) و الخطيب (3) ونتائج هذه الدراسة قد يعزى إلى اختلاف مصدر الجبس المستعمل في الدراستين، أو بسبب اختلاف التراكيز المستعملة من الجبس في التحاليل المختبرية، أو بسبب اختلاف الطرائق المختبرية المتبعة في الدراستين.

يبين شكل 5 العلاقة بين جهد ماء التربة والايصالية المائية غير المشبعة كدالة فريدة للجهد $K(\psi)$، لترب ذات محتوى جبسي مختلف. يتضح من الشكل أن أعلى قيم $K(\psi)$ كانت عند اقل جهد مائي مسلط (0.1 كيلوباسكال)، ثم انخفضت قيم $K(\psi)$ أسياً مع زياد جهد ماء التربة ولجميع المعاملات المدروسة. أظهرت المعاملات اختلافاً في قيم $K(\psi)$ وعند كل جهد مائي باختلاف محتوى الترب من الجبس، فعند جهد ماء 0.1 كيلوباسكال أعطت المعاملات 32 و 125 و 255 و 502 غم جبس.كغم$^{-1}$ تربة أعلى قيم $K(\psi)$ إذ تراوحت بين $10^{-3}\times$ 6.96 و $10^{-2}\times$ 2.29 سم.دقيقة$^{-1}$ ، ثم أتت من بعد ذلك المعاملة 64 غم جبس.كغم$^{-1}$ تربة إذ كانت قيمة $K(\psi)$ $10^{-3}\times$ 2.25 سم.دقيقة$^{-1}$ ، وأعطت المعاملة 5 غم جبس.كغم$^{-1}$ تربة اقل قيمة لـ $K(\psi)$ آذ بلغت $10^{-4}\times$ 1.29 سم.دقيقة$^{-1}$. باستمرار زيادة جهد ماء التربة انخفضت قيم $K(\psi)$ للمعاملات 32 و 125 و 255 و 502 غم جبس.كغم$^{-1}$ تربة بشدة في حين انخفضت قيم $K(\psi)$ بصورة انسيابية للمعاملتين 5 و 64 غم جبس.كغم$^{-1}$ تربة وصولاً إلى أعلى جهد مائي (1500 كيلوباسكال). عند هذا الجهد اختلفت قيم $K(\psi)$ أيضا باختلاف المحتوى ألجبسي في التربة، وقد كانت قيم $K(\psi)$ عند أدنى تقدير لها ولجميع المعاملات. إذ كانت قيم $K(\psi)$ للمعاملتين 64 و 125 غم جبس.كغم$^{-1}$ تربة ، $10^{-8}\times$3.21 و $10^{-9}\times$ 9.88 سم.دقيقة$^{-1}$ على التتابع. ثم أتت من بعد ذلك المعاملات 5 و 32 و 255 غم جبس.كغم$^{-1}$ تربة لتعطي قيماً متقاربة من $K(\psi)$ إذ تراوحت بين $10^{-10}\times$ 4.94 و $10^{-10}\times$ 6.69 سم.دقيقة$^{-1}$. أما المعاملة 502 غم جبس.كغم$^{-1}$ تربة فقد أعطت اقل قيمة لـ $K(\psi)$ عند الجهد 1500 كيلوباسكال إذ كانت $10^{-11}\times$ 6.36 سم.دقيقة$^{-1}$.

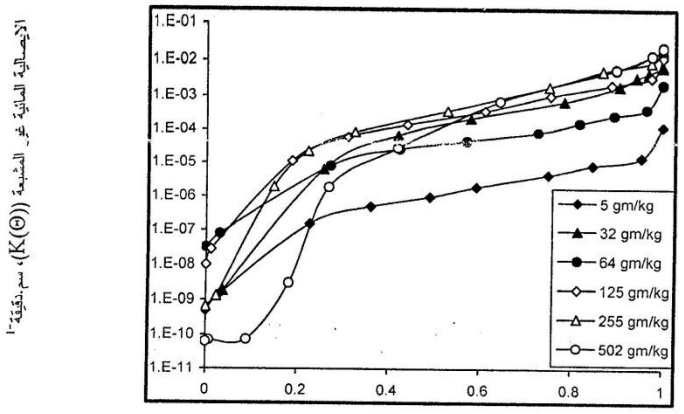


شكل 5. العلاقة بين جهد ماء التربة (ψ) والايصالية المائية غير المشبعة (K(ψ)) في تربة ذات محتوى مختلف من الجبس.

لزيادة توضيح سلوك الايصالية المائية غير المشبعة في تربة ذات محتوى مختلف من الجبس، رسمت قيم الايصالية المائية غير المشبعة مع المحتوى الرطوبي النسبي Θ، (معادلة 2). يبين الشكل 6 العلاقة بين المحتوى الرطوبي النسبي والايصالية المائية غير المشبعة كدالة فريدة للمحتوى الرطوبي النسبي K(Θ) . يتضح من الشكل أن اقل قيم K(Θ) كانت عند اقل قيم Θ ، ثم ازدادت قيم K(Θ) أسياً مع زيادة المحتوى الرطوبي للتربة وتم الحصول على أعلى قيم K(Θ) عند أعلى قيم Θ. أظهرت المعاملات اختلافاً في قيم K(Θ) عند كل قيمة من قيم Θ باختلاف محتوى التربة من الجبس، فعند أدنى محتوى رطوبي (Θ=0) أعطت المعاملة 502 غم جبس.كغم$^{-1}$ تربة اقل قيمة لـ K(Θ) ، في حين أعطت المعاملتان 64 و 125 غم جبس.كغم$^{-1}$ تربة أعلى قيمة لـ K(Θ) .

عند مدى المحتوى الرطوبي النسبي (0.3<Θ<0.6) والذي يناظر جهد مائي 33 كيلوباسكال، ازدادت قيم K(Θ) بزيادة محتوى التربة من الجبس، إذ بلغت قيم K(Θ) 9.71 $\times 10^{-7}$ سم.دقيقة$^{-1}$ (5 غم جبس.كغم$^{-1}$ تربة، Θ =0.491) و 2.23 $\times 10^{-4}$ سم.دقيقة$^{-1}$ (32 غم جبس.كغم$^{-1}$ تربة، Θ =0.578) و 4.53×10^{-5} سم.دقيقة$^{-1}$ (64 غم جبس.كغم$^{-1}$ تربة، Θ =0.571) و 1.44×10^{-4} سم.دقيقة$^{-1}$ (125 غم جبس.كغم$^{-1}$ تربة، Θ =0.440) و 8.44×10^{-5} سم.دقيقة$^{-1}$ (255 غم جبس.كغم$^{-1}$ تربة، Θ =0.326) و 1.89×10^{-6} سم.دقيقة$^{-1}$ (502 غم جبس.كغم$^{-1}$ تربة، Θ =0.269) . مما يعني أن الايصالية المائية غير المشبعة ازدادت بزيادة محتوى التربة من الجبس ضمن المدى الرطوبي (0.3<Θ<0.6) عدا المعاملتين 64 و 502 غم جبس.كغم$^{-1}$ تربة إذ كانت قيم K(Θ) لهما تقعان بين قيم K(Θ) الخاصة بالمعاملتين 5 و 32 غم جبس.كغم$^{-1}$ تربة.

عند أعلى محتوى رطوبي (Θ=1) أعطت المعاملات 502 و 255 و 125 و 32 غم جبس.كغم$^{-1}$ تربة أعلى قيم K(Θ) على التتابع. من بعد ذلك جاءت المعاملة 64 غم جبس.كغم$^{-1}$ تربة. أما المعاملة 5 غم جبس.كغم$^{-1}$ تربة فقد أعطت اقل قيمة لـ K(Θ) .



شكل 6. العلاقة بين المحتوى الرطوبي النسبي (Θ) والايصالية المائية غير المشبعة ($K(\Theta)$) في تربة ذات محتوى مختلف من الجبس.

إن زيادة قدرة التربة على توصيل الماء عند مستويات المحتوى الرطوبي العالي (Θ=1)، إذ أن جهد ماء التربة عند أدنى قيمة له (0.1 كيلوباسكال)، يمكن أن تعزى إلى أن جميع مساحة مقطع جريان الماء يساهم في نقل الماء وان التربة التي تمتلك توزيع حجمي للمسامات من النوع الكبير فإنها تنقل كمية ماء اكبر وأسرع عبر مجموعة مسامات التربة الكبيرة ، وبما أن معاملات التربة التي يكون فيها التوزيع ألحجمي للدقائق من النوع الخشن هي في نفس الوقت محتواها من الجبس عالي (جدول 2)، فان من المتوقع أن تمتلك هذه المعاملات توزيع حجمي للمسامات من النوع الكبير، لذلك ازدادت قابلية هذه المعاملات على نقل الماء تحت ظروف الإشباع بزيادة محتوى الترب من الجبس (3 و 12 و 23 و 34).

عند انخفاض المحتوى الرطوبي للتربة بزيادة الجهد المائي المسلط عليها، انخفضت قدرة التربة على نقل الماء ولجميع المعاملات وكان أكثر وضوحاً في المعاملات 32 و 255 و 502 غم جبس.كغم$^{-1}$ تربة. إن أسباب ذلك قد تعزى إلى تفرغ بعض مسامات التربة من محتواها المائي ، وبما أن المسامات كبيرة الحجم هي التي تتفرغ أولاً فان ذلك يؤدي إلى اختزال واضح في مساحة مقطع جريان الماء وتبقى مجاميع المسامات متوسطة الحجم والصغيرة هي الموصلة للماء وهذا ما قد تتميز به هذه المعاملات. أما المعاملات 5 و 64 و 125 غم جبس.كغم$^{-1}$ تربة فقد أظهرت انخفاض نسبي في قيم $K(\Theta)$، وهذا قد يعزى إلى أن التوزيع ألحجمي للمسامات هو توزيع متجانس نوعاً ما وان المسامات الكبيرة التي فقد منها الماء قليلة وغير مؤثرة في قيم $K(\Theta)$ عند المدى الرطوبي ($1>\Theta>0$)، (3 و 8 و 12 و 23 و 27).

تحت ظروف المحتوى الرطوبي المتبقي، إذ أن التربة قد تعرضت إلى أعلى جهد مائي (1500 كيلوباسكال) حصل انخفاض شديد في قدرة التربة على نقل الماء. إذ فقدت المعاملات اغلب الماء الذي كان موجود فيها وان مجموعة مسامات التربة الكبيرة والوسط تفرغت من محتواها المائي وبقيت مسامات التربة الصغيرة هي التي تعمل على نقل الماء، فضلاً عن كمية الماء الممدصة على سطوح دقائق التربة التي تتحرك أيضا وتنتقل بطريقة الانتشار، وان انتشار الماء يزداد بزيادة المحتوى الرطوبي للتربة وهذا مرتبط بالمساحة السطحية النوعية لدقائق التربة، لذلك أظهرت المعاملات ذات التوزيع ألحجمي للدقائق من النوع الخشن

قدرة اقل على توصيل الماء، وهي المعاملات ذات محتوى عالي من الجبس إذ انخفضت فيها نسبة الدقائق ذات الحجم اقل من 50 مايكرون (جدول 2)، (3 و 12).

لقد جاءت هذه النتائج متوافقة مع كل من سليمان وآخرون (7) و شهاب (8) و الخطيب (3) ، إذ حصلوا على زيادة في الايصالية المائية غير المشبعة مع زيادة المحتوى الرطوبي للتربة ومع زيادة محتوى التربة من الجبس، على الرغم من أن الطريقة المتبعة في حساب $K(\psi)$ و $K(\theta)$ في هذه الدراسة قد اختلفت عن الطريقة المتبعة من قبل الباحثين أعلاه، إذ قاموا بحساب الايصالية المائية غير المشبعة من قيم انتشارية ماء التربة وميل منحنى الوصف الرطوبي. وقد أكد الباحثون أن دقة حساب قيم $K(\psi)$ و $K(\theta)$ تعتمد على دقة قياس ميل منحنى الوصف الرطوبي عند كل جهد مائي مسلط على التربة. أما في هذه الدراسة فان دقة حساب قيم $K(\psi)$ و $K(\theta)$ تعتمد على دقة عمل منحنى الوصف الرطوبي، ودقة اجراء المطابقة عند استعمال معادلة van Genuchten (32) لوصف المنحنى بيانياً، ومن ثم دقة معايير المعادلة (α و n و m) المستحصل عليها ولكل معاملة من معاملات التجربة، وهذا ما أكده كل من حسن (6) و مهدي وآخرون (12).

يستنتج من هذه الدراسة أن كمية الماء المفقودة وكمية الماء المحتفظ بها في التربة قد اختلفت باختلاف الجهد المائي المسلط وباختلاف محتوى التربة من الجبس. مما انعكس لاحقاً في حساب الايصالية المائية غير المشبعة، إذ ازدادت قابلية التربة على نقل الماء بزيادة المحتوى الجبسي عند مستويات المحتوى الرطوبي العالي، في حين انخفضت قابلية التربة على نقل الماء بزيادة المحتوى الجبسي عند مستويات المحتوى الرطوبي المنخفض.

المصادر

1- الجبوري، محمد حسين سلمان. 1997. تأثير محتوى الجبس في الرص وفي بعض الصفات الفيزيائية للتربة. رسالة ماجستير. قسم التربة. كلية الزراعة-جامعة بغداد. ع ص 78.

2- الجنابي، علاء صالح ومعتصم داود اغا وهشام محمود حسن. 1989. الخصائص الفيزيائية لبعض الترب الجبسية في العراق. وقائع بحوث المؤتمر العلمي الخامس لمجلس البحث العلمي. علوم التربة-القسم الأول/7-11 تشرين الأول-1989 - بغداد- العراق. ص 13-24 .

3- الخطيب، بسام الدين الخطيب هشام. 2007. تأثير المحتوى الجبسي ونوعية المياه في دوال نقل الماء. أطروحة دكتوراه – قسم علوم التربة والمياه – كلية الزراعة – جامعة الانبار. ع ص 156.

4- القرني، عباس حميد ذياب. 2005. التحليل التجريبي لمعايير معادلة Green and Ampt لغيض الماء في ترب مختلفة النسجة. رسالة ماجستير. قسم علوم التربة والمياه. كلية الزراعة-جامعة بغداد. ع ص 103.

5- بهيه، محمد حسن صبري. 1998. تأثير زيت الوقود في بعض الصفات الفيزيائية وعلاقته بشكل التبلور ونعومة دقائق الجبس في الترب الجبسية. رسالة ماجستير. قسم التربة. كلية الزراعة-جامعة بغداد. ع ص 61.

6- حسن، قتيبة محمد. 1989. اختبار نماذج رياضية للتنبؤ عن بعض الصفات المائية للترب العراقية. 3. ايصالية ماء التربة في الحالة غير المشبعة. مجلة العلوم الزراعية العراقية. 20(1): 580-590.

7- سليمان، معتصم داود و علاء صالح الجنابي و هشام محمود حسن. 1990. دراسة الخواص المائية لبعض الترب الجبسية في العراق. مجلة زراعة الرافدين. 22(1): 147-161.

8- شهاب، رمزي محمد. 1997. أثر إضافة زيت الوقود والبنتونايت في بعض الخصائص الفيزيائية وانتقال الماء والمذاب في تربة جبسية. أطروحة دكتوراه. قسم التربة. كلية الزراعة-جامعة بغداد. ع ص 117.

9- غيبة، عبد الرحمن. 1990. الخواص الفيزيائية للأراضي الجبسية. مداولات الدورة التدريبية في استصلاح وإدارة الأراضي الجبسية. أكساد. ع ص 171

10- مهدي، نمير طه . 2002. تقويم دوال نقل الماء في تربة معاملة بزيت الوقود. أطروحة دكتوراه – قسم التربة – كلية الزراعة – جامعة بغداد. ع ص 141.

11- مهدي، نمير طه . 2005. تأثير محتوى الجبس في دوال نقل الماء في التربة خلال الغيض الأفقي. مجلة العلوم الزراعية العراقية. 36(5): 1-10.

12- مهدي، نمير طه و مهدي إبراهيم عـودة و عبـاس حميد ذياب. 2006. حساب الايصالية المائية غير المـشبعة من منحنى الترطيب للارتفاع الشعري في ثلاث ترب مختلفة النسجة . المجلة العراقية لعلوم التربة . 6(1): 1-10.

13- Al Ani, A. N. and M. Dudas. 1988. Influence of calcium carbonate on mean weight diameter of soils. Soil and Tillage Research. 11: 19-26.

14- Arya, L. M., D. A. Ferrell, and G. R. Blake. 1975. A field study of soil water depletion patterns in presence of growing soybean roots: 1. Determination of hydraulic properties of soil. Soil Sci. Am. Proc. 39: 424-430.

15- Blake, B. R. and K. H. Hartge. 1986a. Bulk density. In A. Klute (ed.). Methods of Soil Analysis, Part 1, 2nd edn. Apron. Monogr. No. 9. ASA and SSSA. Madison, WI . p. 363-375.

16- Blake, B. R. and K. H. Hartge. 1986b. Particle density. In A. Klute (ed.). Methods of Soil Analysis, Part 1, 2nd edn. Agron. Monogr. No. 9. ASA and SSSA. Madison, WI . p. 377-382.

17- Bruce, R.R., and A. Klute, 1956. The measurement of soil moisture diffusivity. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 20: 458-462.

18- Chan, T. P. and R. S. Govindaraju.2004. Estimating soil water retention curve from particle-size distribution data based on polydisperse sphere systems. Vadose Zone J. 3: 1443-1454.

19- Chan, T. P. 2005. Modeling of coarse textured soils and their hydraulic properties. Ph.D. Thesis. Purdue University. pp. 177.

20- Dane, J. H. and G. C. Topp. (ed.). 2002. Methods of soil analysis: Part 4. SSSA Book Ser. 5. SSSA. Madison. WI. p. 675-720.

21- Day, P.R. 1965. Particle fractionation and particle size analysis. In C.A. Black (ed.). Methods of Soil Analysis Part 1, Agron. Ser. No. 9, Am. Soc. Agron: Madison, WI. p. 545-567.

22- Fredlund, D. G. and A. Xing. 1994. Equations for the soil-water characteristic curve. Canadian Geotechnical Journal. 31(3): 521-532.

23- Henderson, J. J., J. R. Crum., T. F. Wolff. and J. N. Rogers. 2005. Effects of particle size distribution and water content at compaction on saturated hydraulic conductivity and strength of high sand content root zone materials. Soil Sci. 170: 315-324.

24- Hillel, D. 1980. Fundamentals of Soil Physics. Academic Press. New York. pp. 385.

25- Jackson, R. D. 1972. On the calculation of hydraulic conductivity. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 36: 380-383.

26- Klute, A. and C. Dirksen. 1986. Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods. In A. Klute (ed.). Methods of Soil Analysis, Part 1, 2nd edn. Agron. Monogr. No. 9. ASA and SSSA. Madison, WI . p. 687-734.

27- Meek, B. D., E. R. Rechel, L. M. Carter, W. R. Detar, and A. L. Urie. 1992. Infiltration rate of a sandy loam soil: Effects of traffic. tillage and plant roots. Soil Sci. Soc. Am. J. 56: 908-913.

28- Lu, D., M. Shao., R. Horton. And C. Liu. 2004. Effect of changing bulk density during water desorption measurement on soil hydraulic properties. Soil Sci. 169: 319-329.

29- Mualem, Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resour. Res. 12: 513-522.

30- Startsev, A. D. and D. H. McNabb. 2001. Skidder traffic effects on water retention, pore-size distribution, and van Genuchten parameters of boreal forest soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 65: 224-231.

31- U. S. Salinity laboratory staff. 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. USDA. Handbook No, 60, Washington, D. C. pp. 160.

32- van Genuchten, M. Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 44: 892-898.

33- Wang, X. and C. H. Benson. 2004. Leak-free pressure plate extractor for measuring the soil water characteristic curve. Geotechnical Testing. J. 27: 1-10.

34- Wilson, G. V., P. M. Jardine, and J. P. Gwo. 1992. Modeling the hydraulic properties of a multiregion soil. Soil Sci. Soc. Am. J. 56: 1731-1737.

35- Zhuang, J., Y. Jin, and T. Miyazaki. 2001. Estimating water retention characteristic from soil particle-size distribution using a non-similar media concept. Soil Sci. 166: 308-321.