

## التنبؤ بتصلب التربة من منحنى الوصف الرطوبي وعلاقته بدرجة رص التربة الجبسية

عبد الوهاب عبد الرزاق سعيد القيسي

رويده خالد صابر\*

قسم علوم التربة والموارد المائية/ كلية الزراعة/ جامعة تكريت - العراق

قسم المكائن والآلات الزراعية/ كلية الزراعة/ جامعة تكريت - العراق

قسم علوم التربة والموارد المائية/ كلية الزراعة/ جامعة تكريت - العراق

\*المراسلة الى: رويده خالد صابر، قسم علوم التربة والموارد المائية، كلية الزراعة، جامعة تكريت، العراق.

البريد الإلكتروني: [mrowyda89@gmail.com](mailto:mrowyda89@gmail.com)

### Article info

Received: 2021-10-20

Accepted: 2021-12-01

Published: 2021-12-31

DOI-Crossref:

10.32649/ajas.2021.175872

Cite as:

Saber, R. K., and A. A. Al-Kayssi. (2021). Prediction of soil hard-setting using soil moisture retention data and its relation with degree of gypsiferous soil compactness. Anbar Journal of Agricultural Sciences, 19(2): 182-194.

©Authors, 2021, College of Agriculture, University of Anbar. This is an open-access article under the CC BY 4.0 license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



### الخلاصة

نفذت تجارب مختبرية للتنبؤ بدليل تصلب التربة (H-index) اعتماداً على منحنى الوصف الرطوبي للتربة وعلاقته بدرجة رص التربة (Degree of Soil %DC) Compactness, التي تمثل النسبة بين الكثافة الظاهرية الطبيعية ( $BD_{natural}$ ) والكثافة الظاهرية الحرجة (reference bulk density ( $BD_{ref.}$ )) لسبع نماذج من التربة ذات محتوى مختلف من الجبس من 62-443 غم كغم<sup>-1</sup>. حضرت نماذج تربة ذات محتوى جبسي (G2) و 106 و (G3) و 153 و (G4) و 202 و (G5) و 245 و (G6) و 337 غم كغم<sup>-1</sup> عن طريق الخلط بين نموذج تربة سطحية ذو محتوى جبسي (G1) و 62 غم كغم<sup>-1</sup> ونموذج تربة تحت نو محتوى جبسي (G7) و 443 غم كغم<sup>-1</sup>. قدر منحنى الوصف الرطوبي لكل نموذج من نماذج التربة عند الشدود 0 و 5 و 15 و 33 و 100 و 500 و 700 و 1000 و 1500 كيلوباسكال بعد رص نماذج التربة الجبسية الى الكثافات 1.2 و 1.4 و 1.6 و 1.8 ميكأغرام م<sup>-3</sup> حسب دليل تصلب التربة (H-index) باستعمال معادلة van Genuchten-Mualem وبتطبيق برنامج RETC. بينت النتائج ارتباط دليل تصلب التربة (H-index) مع محتوى التربة من الجبس بعلاقة لوغاريتمية سالبة إذ أدت زيادة نسبة الجبس في التربة الى خفض قيم دليل تصلب التربة، وارتبطت الكثافة الظاهرية بعلاقة موجبة متعددة الحدود مع دليل تصلب التربة (H-index) إذ ازدادت قيم دليل تصلب التربة بزيادة الكثافة الظاهرية وارتبطت درجة الرص (%DC) بعلاقة خطية موجبة مع دليل تصلب التربة (H-index) لكل نموذج من نماذج التربة الجبسية.

## PREDICTION OF SOIL HARD-SETTING USING SOIL MOISTURE RETENTION DATA AND ITS RELATION WITH DEGREE OF GYPSIFEROUS SOIL COMPACTNESS

R. K. Saber\*

Soil Science and Water Resources  
Department, College of Agriculture,  
Tikrit University, Iraq

A. A. Al-Kayssi

Agricultural Machinery and Equipments  
Department, College of Agriculture, Tikrit  
University, Iraq

\*Correspondence to: Rowaida Khaled Saber, Department of Soil Sciences and Water Resources, College of Agriculture, Tikrit University, Iraq.

Email: [mrowyda89@gmail.com](mailto:mrowyda89@gmail.com)

### Abstract

A laboratory experiment was carried out to predict soil hard-setting index (H-index) depending on soil moisture retention curve and its relationship soil degree of soil compactness (%DC) for seven soil samples with different gypsum content (62-443 g kg<sup>-1</sup>). Soil samples with (G2) 106, (G3) 153, (G4) 202, (G5) 245 and (G6) 337 g kg<sup>-1</sup> gypsum content were prepared by mixing of surface soil layer soil with low gypsum content (G1) 62 g kg<sup>-1</sup> with sub-surface with high gypsum content (G7) 443 g kg<sup>-1</sup>. The soil moisture retention curve of the soil samples were measured at tensions 0,5, 15, 33, 100, 500, 700, 1000 and 1500 kPa and at the soil bulk densities 1.2, 1.4, 1.6 and 1.8 Mg m<sup>-3</sup>. Soil hard setting (H-index), was determined according to van Genuchten-Mualem equation. The results indicate that soil hard setting index (H-index) was negatively correlated with soil gypsum content. It decreases with increasing soil gypsum content. The soil bulk density was positively correlated with H-index, and Degree of soil compaction (%DC) was positively correlated with H-index for all gypsiferous soil samples.

**Keywords:** Soil hard-setting, Degree of compaction, Gypsiferous soils.

### المقدمة

تعتبر الخصائص الميكانيكية للتربة مهمة جدا لتحقيق انتاج زراعي متميز. لذا فان الخصوبة الفيزيائية تتقدم على الخصوبة الغذائية لأن انبات البذور وبزوغ البادرات هي المرحلة الاولى من حياة النبات وترتبط مباشرة بصلاية التربة التي تحدد الانبات من عدمه. ويحتل هذا الموضوع اهمية خاصة في الترب الجبسية التي تتصف بصلابتها العالية وتتصلب التربة عند جفافها ويصعب اجراء العمليات الزراعية فيها وتسهيل نمو وتغلغل الجذور مالم يتم إعادة ترطيبها. يختلف مفهوم تصلب التربة الذي ينشأ في التربة بدون وجود مؤثرات خارجية عن مفهوم رص التربة الذي يحصل كنتيجة لمؤثرات خارجية. فالقوة الميكانيكية التي تبديها التربة عند تصلبها تسبب إعاقة لبزوغ البادرات من جهة ونمو

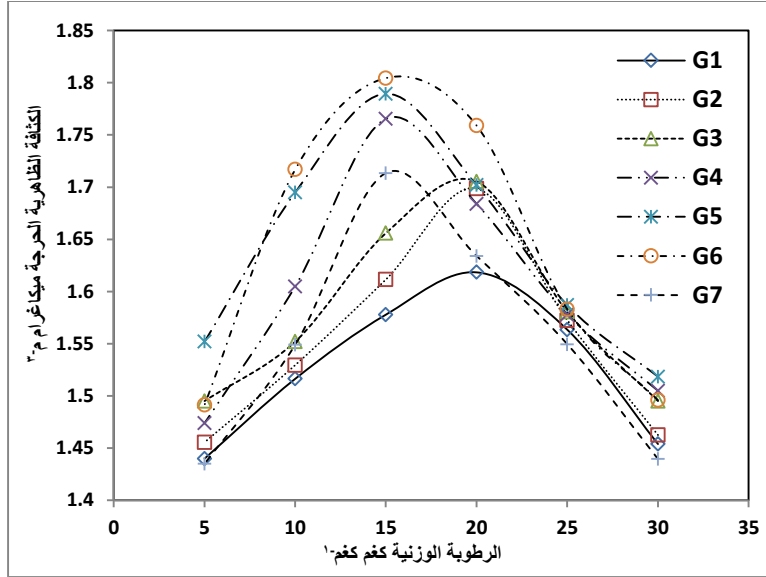
وتغلغل الجذور من جهة أخرى وبالتالي تدهور الإنتاج الزراعي في مثل هذه الترب. الرص الطبيعي للتربة الذي يقاس بواسطة المعالم المايكرومورفولوجية وقوة الشد وقياس مقاومة التربة للاختراق والكثافة الظاهرية هو العامل الرئيسي الذي يؤثر بشكل مباشر أو غير مباشر في الخصائص الفيزيائية والمايكرومورفولوجية التي يتم تحليلها وهو المسؤول عن الفرق الملحوظ بين أفاق التربة المتصلبة وغير المتصلبة (10). تم تحديد تصلب وانضغاط التربة على أنها الاهتمام الرئيسي في أنظمة الإنتاج الزراعي الحديثة في الترب الجبسية وتميزت بزيادة الكثافة الظاهرية، مما أدى إلى انخفاض في المسامية الكلية وتسرب المياه (2). الترب المتصلبة أو التي تظهر سلوك التصلب هي الترب التي لها افاق وعندما تجف تتصلب بشكل كبير، وتتشكل كتلة عديمة البناء (structureless) وتظهر الترب المتصلبة قوة ميكانيكية عالية عندما تجف وتفقد جزءاً كبيراً من هذه القوة عند ترطيبها (11). تعدّ الترب الجبسية من الترب المتصلبة والمستقرة عندما تكون في حالتها الطبيعية (الجافة) ويصعب أو يستحيل زراعة هذه التربة ما لم يتم إعادة ترطيبها (1)، والمعروف أن هذه التربة تسبب الكثير من المشاكل عند تعرضها للماء أو إلى عملية الغسل (Leaching)، إذ يذوب الجبس بالماء تاركاً فراغات وتكهفات فضلاً عن حصول زيادة في رص (انضغاطية) التربة وهذا يؤدي إلى زيادة تصلب التربة، لذا فإن هذا البحث يهدف إلى التنبؤ بدليل تصلب (Hard-setting, H-index) نماذج ترب مختلفة بمحتواها من الجبس من منحنى الوصف الرطوبي وتقييم دور محتوى التربة من الجبس في العلاقة بين قيم دليل تصلب التربة (H-index) ودرجة رص التربة (%DC).

#### المواد وطرائق العمل

أخذت عينات تربة من مقد تربة جبسية في محطة أبحاث كلية الزراعة / جامعة تكريت الواقعة عند خط طول 23° 38' 43° شرقاً وخط عرض 48° 40' 34° شمالاً وارتفاع 250م عن مستوى سطح البحر أخذت عينات التربة من الأفق السطحي للعمق (0-0.1) م والذي بلغت فيه نسبة الجبس فيه 62 غم كغم<sup>-1</sup> (G1) والأفق الجبسي للعمق 0.6-1 م والذي بلغت فيه نسبة الجبس 443 غم كغم<sup>-1</sup> (G7) تم تحضير نماذج مختلفة بنسبة الجبس (G2) 106 و (G3) 153 و (G4) 202 و (G5) 245 و (G6) 337 غم كغم<sup>-1</sup> حضرت نماذج التربة المختلفة بمحتواها من الجبس عن طريق الخلط بين نموذج التربة السطحية (G1) والأفق (G7) لمقد التربة رطبت نماذج الترب المحضرة عن طريق الرش إلى حدود ثلثي السعة الحقلية ثم حضنت في أكياس بلاستيكية محكمة الإغلاق مع التقليب المستمر يوميا لمدة شهرين لغرض التجانس. بعد انتهاء مدة التحضين جففت نماذج التربة هوائيا ومررت من منخل قطر فتحاته 2 مم ثم خزنت في اوعية بلاستيكية لغرض اجراء التجارب أخذ 200 غم تربة لكل نموذج من نماذج الترب الجبسية (G1-G7) ثم رطبت إلى مستويات الرطوبة الوزنية 5 و 10 و 15 و 20 و 25 و 30%، ثم خلطت جيداً وحفظت في اكراس بلاستيكية مناسبة لغرض تجانس توزيع الرطوبة في كل نموذج من نماذج التربة. أجريت عملية الرص لكل نموذج من نماذج التربة (G1-G7) عند المحتويات الرطوبة أنفة الذكر بواسطة جهاز بروكتر Procter density (reference) في حلقات معدنية قطرها 61 مم وارتفاعها 20 مم. تمت عملية الرص بطرق التربة بواقع

25 طرقة باستخدام ثقل وزنه 2 كغم لمسافة 500 مم (5) تم الحصول على كثافة بروكتر (الحرجة) وهي أعلى كثافة ظاهرية عند محتوى رطوبي معين بموجب العلاقة التالية:

$$\text{reference bulk density}(BD_{\text{ref.}}) = \frac{\text{dry wight of compacted soil}}{\text{dry volume of compacted soil}} \dots\dots\dots 1$$



شكل 1. تأثير محتوى التربة من الجبس في منحنى الرص.

حسبت الكثافة الظاهرية (الطبيعية) من العلاقة التالية:

$$BD = \frac{M_s}{V_b} \dots\dots\dots 2$$

إذ إن:

$BD =$  الكثافة الظاهرية (ميكاجرام م<sup>-3</sup>).

$M_s =$  كتلة التربة الجافة (ميكاجرام).

$V_b =$  الحجم الظاهري للتربة (م<sup>3</sup>).

وحسبت الكثافة الظاهرية النسبية (Relative bulk Density) من العلاقة التالية:

$$\dots\dots\dots 3RBD = \frac{BD_{\text{natural}}}{BD_{\text{ref.}}}$$

أذ إن:

$BD_{\text{natural}}$ : الكثافة الظاهرية الطبيعية (ميكاجرام م<sup>-3</sup>).

$BD_{ref}$ : الكثافة الظاهرية المرجعية (ميكاجرام م<sup>-3</sup>).

تم حساب درجة رص التربة (Degree of soil compactness, DC%)

$$4Dc = \frac{BD_{natural}}{BD_{ref}} \times 100\%$$

قدر المحتوى الرطوبي لكل نموذج من نماذج الترب الجبسية بعد رصها الى الكثافات الظاهرية 1.2 و 1.4 و 1.6 و 1.8 ميكاجرام م<sup>-3</sup> إذ رطبت كمية مناسبة من التربة إلى محتوى رطوبي يكافئ 100 كيلو باسكال وتترك الترب لمدة يومين بعد الترطيب في اكياس نايلون مغلقة بإحكام لغرض تجانس وتوزيع الرطوبة في الكيس تمت عملية رص نماذج كل الترب الى الكثافات الظاهرية أعلاه من خلال معرفة وزن النموذج (نموذج التربة) اللازم لملء الحلقة المعدنية التي ابعادها 61 مم قطراً و 20 مم ارتفاعاً معادلة 5 رطبت العينات عن طريق الخاصية الشعرية لمدة تراوحت من 2 الى 8 أيام اعتماداً على الكثافة الظاهرية للتربة لإيصال الترب المرصوة إلى حد الإشباع.

$$5 \text{Soil mass (dry)} = \text{bulk density} \times \text{volume} \left[ \left( \frac{\text{diameter}}{2} \right)^2 \pi \times \text{height} \right]$$

تم اختيار المحتوى الرطوبي المكافئ للشد الرطوبي 100 كيلوباسكال لترطيب التربة على أساس دراسة سابقة (1)، إذ إن المحتوى الرطوبي عند هذا الشد يجعل التربة غير جافة لأغراض الرص ولا مبتلة كي لا يُسبب تحطم تجمعات التربة قبل عملية الرص. قدر المحتوى الرطوبي للترب المرصوة عند الشدود الرطوبة 15 و 33 و 100 و 500 و 700 و 1000 و 1500 كيلوباسكال حسب الطريقة المقترحة من قبل (12) اما المحتوى الرطوبي لنماذج الترب الجبسية عند شد 0 و 5 كيلوباسكال تم تقديره من خلال تسليط شد عمود مائي باستعمال اقمار زجاجية ذات أقراص مسامية (Centerated glass funnels) قطر فتحاتها 20 مايكرومتر ورسم منحنى الوصف الرطوبي لنماذج الترب الجبسية المرصوة الذي يربط العلاقة بين المحتوى الرطوبي الوزني والشد الرطوبي شكل (2).

حسب المحتوى الرطوبي باستخدام معادلة Van Genuchten, 1980 (21) و Mualem (15) من خلال تطبيق برنامج RETC (17) ومعادلة Van Genuchten, 1980 (22) والتي تنص على:

$$6 w(h) = w_r + (w_s - w_r) [1 + (\alpha h)^n]^{1/n-1}$$

$w(h)$ : الشد (1500\_0.1) كيلو باسكال (9).

$w_r$  و  $w_s$ : المحتوى الرطوبي المشبع والمتبقي على التوالي (كغم كغم<sup>-1</sup>)

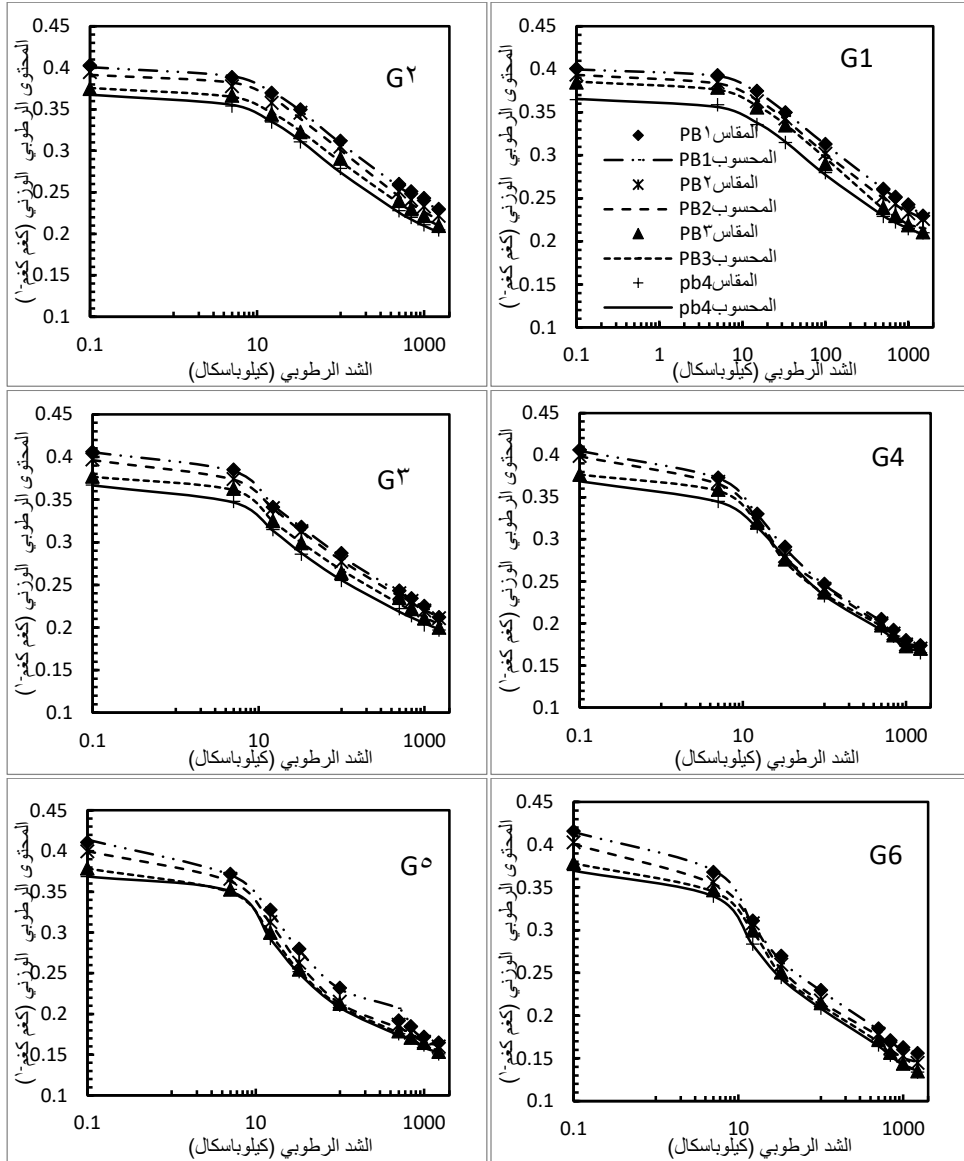
$\alpha$ : عامل الشكل

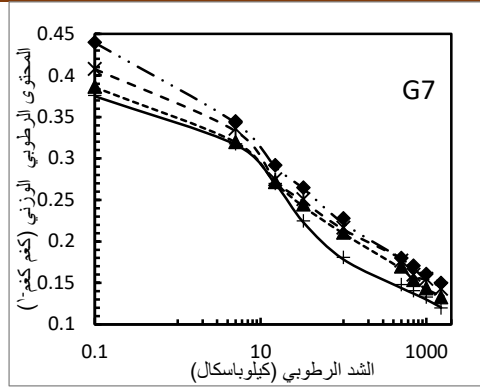
$n$ : معلمة تتحكم في شكل منحنى الوصف الرطوبي المناسب.

استخدمت المعلمات المناسبة للنموذج لحساب إحداثيات نقطة انقلاب منحني الوصف الرطوبي (7) من المعادلات التالية:

$$7w_i = w_r + (w_s - w_r) \left( \frac{2n-1}{n-1} \right)^{\left[ \frac{1}{n}-1 \right]}$$

$$h_i = \frac{1}{\alpha} \left[ \frac{n}{n-1} \right]^{\frac{1}{n}} \dots\dots\dots 8$$





شكل 2. منحنيات الوصف الرطوبي المقاسة والمقدرة بمعادلة van Genuchten, 1980 لنماذج التربة G1 و G2 و G3 و G4 و G5 و G6 و G7.

حيث إن  $h_i$  و  $w_i$  هما لوغارتيم الشد الهيكلية (كيلو باسكال) والمحتوى الرطوبي الوزني (كغم كغم<sup>-1</sup>) عند نقطة انقلاب منحني الوصف الرطوبي على التوالي.

تم حساب دليل تصلب التربة  $H_{index}$  من معادلة 9 باستخدام برنامج RETC (17) و Dexter (7 و 8) والتي تنص على:

$$H_{index} = \left[ \frac{d\sigma}{dw} \right]_i = \left[ \frac{h_i}{w_s} \right] \left[ 1 + \frac{w_i}{s} \right] \dots\dots\dots 9$$

إذ إن:  $\sigma$  الضغط الفعّال الناتج عن الجهد الهيكلية.

S : انحدار منحني الوصف الرطوبي عند نقطة الانقلاب يرسم w مقابل ln h (كيلو باسكال).

$H_{index}$  مؤشر او دليل تم تحديده بناءً على معدل تغير  $\sigma$  للتربة غير المشبعة مع تغير وحدة W عند نقطة الانقلاب.

تقدير بعض الخصائص الفيزيائية والكيميائية لنماذج الترب: جففت عينات التربة هوائياً ثم طحنت ومررت من منخل قطر فتحاته 2 مم. وقدرت بعض الخصائص الفيزيائية والكيميائية لموقع الدراسة كما هو مبين في جدول 1:

جدول 1. بعض الخصائص الفيزيائية والكيميائية لنماذج الترب.

| G <sub>7</sub> | G <sub>6</sub> | G <sub>5</sub>  | G <sub>4</sub>  | G <sub>3</sub>  | G <sub>2</sub> | G <sub>1</sub> | الصفة   |
|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|---|
| *              | *              | رملية<br>مزيجية | رملية<br>مزيجية | رملية<br>مزيجية | مزيجية         | مزيجية         | النسجة  |
| *              | *              | 625             | 549             | 352             | 491            | 440            | الرمل (غم كغم <sup>-1</sup> )                 |
| *              | *              | 263             | 280             | 286             | 307            | 335            | الغرين (غم كغم <sup>-1</sup> )                |
| *              | *              | 112             | 171             | 192             | 201            | 225            | الطين (غم كغم <sup>-1</sup> )                 |
| 1.133          | 1.176          | 1.217           | 1.268           | 1.311           | 1.37           | 1.416          | الكثافة الظاهرية (ميكا غرام م <sup>-3</sup> ) |

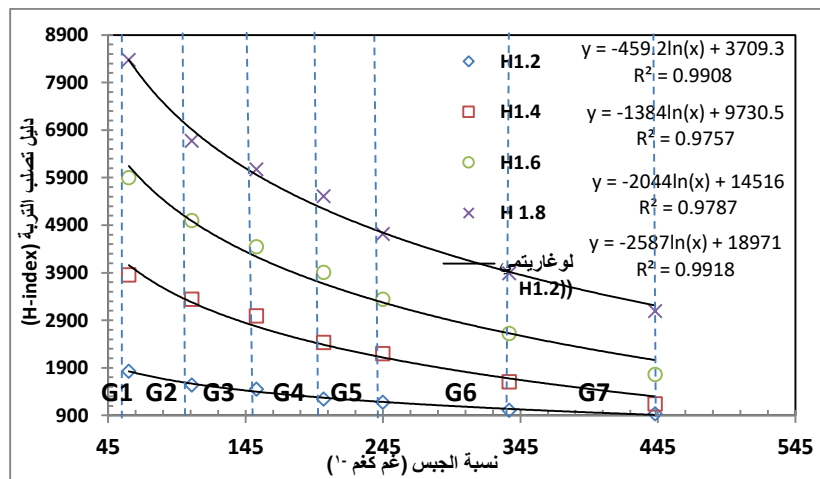
|      |      |       |       |       |       |       |  |
|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|--|
| 7.96 | 7.92 | 7.87  | 7.85  | 7.55  | 7.47  | 7.31  | pH 1;1 الرقم الهيدروجيني                                   |
| 2.85 | 3.18 | 3.22  | 3.50  | 3.72  | 3.83  | 3.95  | التوصيل الكهربائي (ديسي سيمنز م <sup>-1</sup> ) EC 1;1     |
| 3.1  | 5.0  | 7.3   | 9.5   | 10.8  | 12.5  | 14.7  | المادة العضوية (غم كغم-1)                                  |
| 1.48 | 3.80 | 5.60  | 7.15  | 10.54 | 10.98 | 12.30 | السعة التبادلية لأيون الموجب (سنتي مول كغم <sup>-1</sup> ) |
| 443  | 337  | 245   | 202   | 153   | 106   | 60.2  | محتوى الجبس (غم كغم-1)                                     |
| 65.5 | 93.2 | 122.2 | 160.1 | 181.7 | 205.9 | 227.2 | كربونات الكالسيوم (غم كغم-1)                               |

\* لم يكن بالإمكان تقدير النسجة لنماذج التربة G6 و G7 بسبب حصول التخثر نتيجة لارتفاع نسبة الجبس.

قدرت النسجة حسب الطريقة المطورة للتربة الجبسية من قبل (16). قدرت الكثافة الظاهرية بطريقة الأسطوانة المعدنية (Core method) وحسب الطريقة المقترحة من قبل (6). قياس الرقم الهيدروجيني (pH) في مستخلص تربة: ماء (1:1) باستعمال جهاز pH-meter (20). قياس التوصيل الكهربائي (EC) في مستخلص تربة: ماء (1:1) باستعمال جهاز التوصيل الكهربائي Ec-meter (19). قدرت المادة العضوية بطريقة walky and Black الواردة في (19). قدرت السعة التبادلية الكاتيونية الموجبة بالتنشيع مع الصوديوم وإزاحته بواسطة خلاص الامونيوم 1.0 عياري (18). قدر محتوى الجبس في عينات التربة بواسطة الطريقة الموصوفة من قبل (13) والمعدلة من قبل (4). قدرت كربونات الكالسيوم عن طريق حساب الفقد في وزن CO<sub>2</sub> بعد معاملة التربة بحامض HCl 3 عياري (19).

### النتائج والمناقشة

يبين شكل 3 العلاقة بين محتوى التربة من الجبس ودليل تصلب التربة (H-index) عند رص التربة لكثافات ظاهرية مختلفة، إذ يتضح ان العلاقة لوغارتمية سالبة بينهما وبمُعامل تحديد عالي بلغت قيمته (R<sup>2</sup>) 0.9906 و0.9728 و0.9784 و0.9916 للكثافات الظاهرية 1.2 و1.4 و1.6 و1.8 و1.6 و1.8 و1.4 و1.6 و1.8 و1.2 ميكاجرام م<sup>-3</sup>.



شكل 3. العلاقة بين نسبة الجبس ودليل تصلب التربة (H-index).



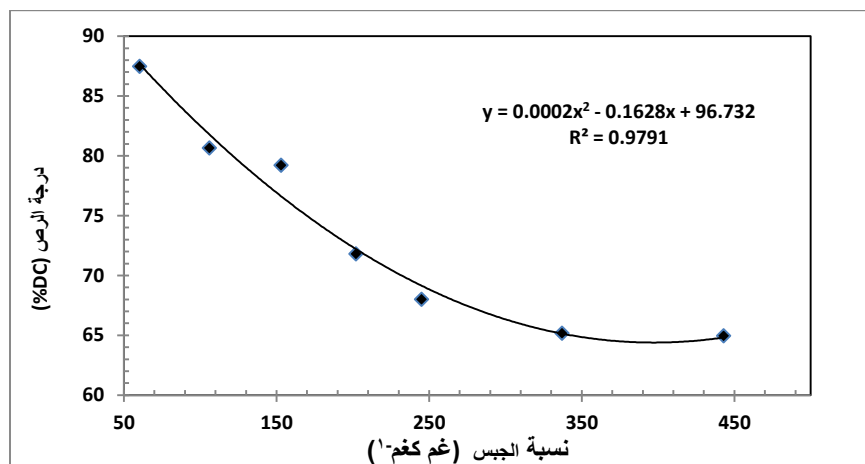
يلاحظ إن ارتفاع محتوى التربة من الجبس أدى إلى خفض قيم التصلب ولجميع نماذج التربة (G1-G7). إن نموذج التربة ذو محتوى جبسي واطئ (G1) ومحتوى عالي من كربونات الكالسيوم (جدول 1)، أعطى أعلى قيم للتصلب بلغت 1828 و 3857 و 5901 و 8381 للكثافات الظاهرية 1.2 و 1.4 و 1.6 و 1.8 ميكارام م<sup>-3</sup>، بينما بلغت قيم دليل التصلب لنموذج ذو محتوى جبسي عالي (G7) ومحتوى واطئ من كربونات الكالسيوم 933 و 1142 و 1768 و 3099 للكثافات الظاهرية 1.2 و 1.4 و 1.6 و 1.8 ميكارام م<sup>-3</sup>. ربما يُعزى سبب تصلب نموذج التربة (G1) إلى ارتفاع نسبة كربونات الكالسيوم فيها (جدول 1)، إذ إن كربونات الكالسيوم تُزيد بشكل طفيف من قابلية احتفاظ التربة بالماء وهذا يعني أن الإجهاد الفعال الأكبر يعود جزئيًا إلى زيادة احتفاظ التربة بالماء، هذان السببان يمكن أن يفسرا سبب زيادة دليل التصلب مع زيادة محتوى التربة من كربونات الكالسيوم (14). تُزيد كربونات الكالسيوم من صلابة التربة وحرصها وتعمل كمادة رابطة أو لآحمة (Cementing) وتربط دقائق التربة مع بعضها وتزيد من القوة الميكانيكية للتربة عند التجفيف (11). كما يمكن أن يُعزى سبب انخفاض قيم دليل التصلب بزيادة محتوى التربة من الجبس إلى إن الجبس يُقلل من نقاط الاتصال بين دقائق التربة مع زيادة الشد الهيكلي بسبب قابليته العالية للذوبان في الماء. بالإضافة إلى ذلك، فإن البناء الليفي للباليكورسكايت (المعدن الطيني السائد في التربة الجبسية) يجمع جزيئات الرمل، وبالتالي يزداد التصلب عند التجفيف بانخفاض محتوى التربة من الجبس وزيادة محتواها من كربونات الكالسيوم (1)، إذ كان للجبس تأثير رئيسي في بنية المسام وتأثير ضئيل في مسام النسجة، بينما التأثير المعاكس يكون صحيحًا مع محتوى التربة من كربونات الكالسيوم.

تعتبر كربونات الكالسيوم أكثر استقرارًا من الجبس في نظام التربة، لأن ذوبان كربونات الكالسيوم في الماء أقل من قابلية ذوبان الجبس بحوالي 232%، إذ يبلغ ذوبان كربونات الكالسيوم في الماء 0.000634 سم مول م<sup>-3</sup> أما ذوبان الجبس في الماء يبلغ 0.00147 سم مول م<sup>-3</sup>. إن دور الجبس في ربط دقائق التربة محدودًا للغاية وتتميز بلورات الجبس بعدم استقرارها وتُقلل من القوة الميكانيكية عند التجفيف (3). للتصلب علاقة موجبة مع المحتوى العالي من كربونات الكالسيوم في التربة، وعلاقة سالبة بين التصلب والمحتوى الواطئ لكربونات الكالسيوم في نفس التربة (11).

مما تقدم يتضح ارتفاع قيم دليل التصلب بزيادة الكثافة الظاهرية ولكل نماذج التربة. إذ زاد رص التربة من الكثافة الظاهرية وبالتالي ازدادت قيم دليل تصلب التربة كنتيجة لإزالة هواء التربة، وتغيير في بناء التربة وتقليص الحجم الكلي للمسام وتغيير في توزيع حجم المسام وزيادة صلابة التربة (20).

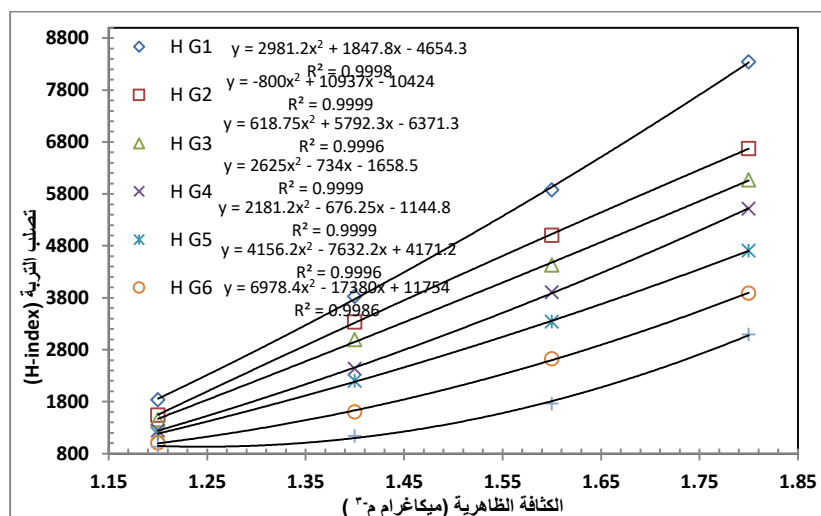
يوضح شكل 4 العلاقة السالبة متعددة الحدود بين محتوى التربة من الجبس ودرجة الرص (DC%)، وبمعامل تحديد ( $R^2$ ) بلغ 0.9791. كانت أعلى قيمة لدرجة الرص عند نموذج التربة G1 وبلغت 87.48%. ويُلاحظ تزداد درجة رص التربة بانخفاض نسبة الجبس في التربة وارتفاع كربونات الكالسيوم فدرجة الرص علاقة موجبة مع كربونات الكالسيوم وسالبة مع نسبة الجبس في التربة (1). كما يُمكن أن يُعزى ازدياد قيم درجة الرص لنموذج التربة (G1) إلى

ارتفاع كثافته الظاهرية الطبيعية ( $BD_{natural}$ ) جدول 1، وانخفاض كثافته الظاهرية الحرجة (كثافة بروكتر)، وبالتالي ارتفاع كثافته النسبية (RBD)، إذ إن درجة الرص متربط بهما معادلة 3 و 4.



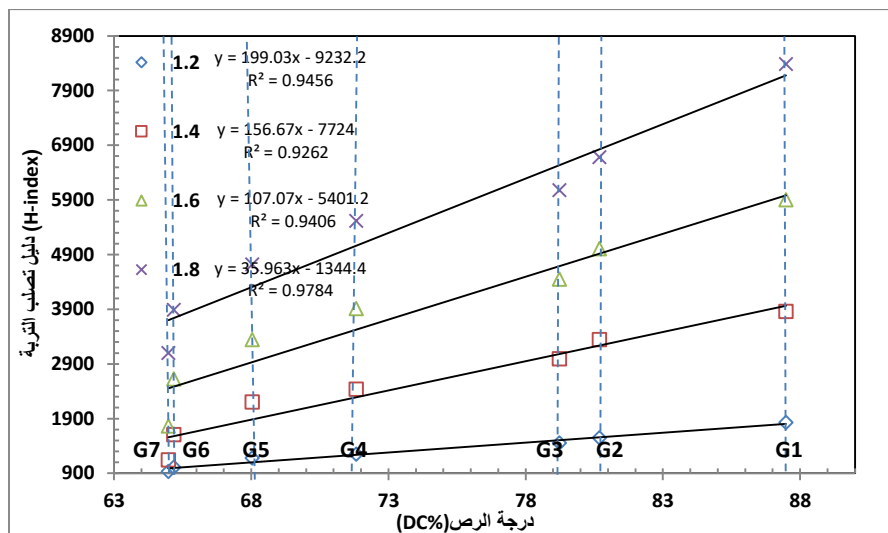
شكل 4. العلاقة بين نسبة الجبس ودرجة رص التربة (%DC).

يبين شكل 5 علاقة الارتباط الموجبة متعددة الحدود بين دليل تصلب التربة (H-index) والكثافة الظاهرية للتربة، ويتضح من هذه العلاقة إن دليل تصلب التربة يزداد بزيادة الكثافة الظاهرية لجميع نماذج التربة الجبسية المدروسة، فعلى سبيل المثال بلغ دليل التصلب لنموذج التربة G7 و 933 و 1143 و 1763 و 3099 للكثافات الظاهرية 1.2 و 1.4 و 1.6 و 1.8 ميكاجرام م<sup>-3</sup> على الترتيب، إذ يُعزى السبب إلى ارتفاع كثافتها الظاهرية، وانخفاض مساميتها الكلية (2).



شكل 5. العلاقة بين الكثافة الظاهرية ودليل تصلب التربة (H-index) لنماذج التربة G1 و G2 و G3 و G4 و G5 و G6 و G7.

يوضح شكل 6 علاقة الارتباط الخطية الموجبة بين دليل التصلب ودرجة الرص، وبمعامل تحديد عالي ( $R^2$ ) بلغ 0.9456 و0.9262 و0.9406 و0.9784 للكثافات الظاهرية 1.2 و1.4 و1.6 و1.8 ميكاغرام م<sup>-3</sup> على الترتيب. يلاحظ انخفاض قيم درجة الرص بانخفاض دليل تصلب التربة ولجميع نماذج التربة، إذ انخفضت قيم درجة الرص بنسب 7.77% و9.43% و17.9% و22.26% و25.50% و25.72% لنماذج الترب الجبسية-G2 وG7 مقارنة بنموذج التربة G1 على الترتيب جدول 2.



شكل 6. علاقة دليل تصلب التربة (H-index) بدرجة الرص (%DC) للكثافات الظاهرية 1.2 و1.4 و1.6 و1.8 ميكاغرام م<sup>-3</sup> لنماذج التربة الجبسية.

يمكن أن يُعزى ذلك إلى تأثير نقاط الاتصال بين دقائق التربة وبالتالي الاحتكاك بين الدقائق (أي القوة الميكانيكية) التي تزداد مع رص التربة (23). ارتبطت هذه الملاحظة بتأثير توزيع حجم المسام من خلال التحكم في التغيرات في الإجهاد الفعال الناشئ عن الضغوط الداخلية، إذ يلاحظ زيادة دليل التصلب بزيادة الكثافة الظاهرية والكثافة الظاهرية النسبية وانخفاض دليل التصلب بزيادة محتوى التربة من الجبس وسبب ذلك أيضاً زيادة درجة الرص الذي جعل التربة أكثر عرضة للتصلب، وعندما يتم تشكيل التربة أو رصها، يتم تحطيم بناء المسام، وسيؤدي ذلك إلى زيادة القوة الميكانيكية للتربة من خلال عمل الضغوط الفعالة الناشئة عن القوى الداخلية، وسيزيد من ميل التربة إلى التصلب (7). انخفضت درجة الرص (%DC) ودليل تصلب التربة بانخفاض محتوى التربة من كاربونات الكالسيوم وازدياد محتوى التربة من الجبس. للتصلب ودرجة الرص علاقة سالبة مع محتوى التربة من الجبس، وعلاقة موجبة بين التصلب ودرجة الرص مع محتوى التربة من كاربونات الكالسيوم (1).

جدول 2. قيم درجة رص التربة (DC) % دليل تصلب التربة (H-index) لنماذج التربة الجبسية G1-G7 وللكثافة الظاهرية 1.2 و 1.4 و 1.6 و 1.8 ميكأغرام م<sup>-3</sup>.

| النماذج | H- index |      |      |      | درجة الرص DC % |  |
|---------|----------|------|------|------|----------------|--|
|         | 1.8      | 1.6  | 1.4  | 1.2  |                |  |
| G1      | 8348     | 5883 | 3827 | 1828 | 87.48          |  |
| G2      | 6677     | 5008 | 3339 | 1542 | 80.68          |  |
| G3      | 6075     | 4434 | 2997 | 1455 | 79.23          |  |
| G4      | 5517     | 3912 | 2434 | 1249 | 71.82          |  |
| G5      | 4711     | 3340 | 2201 | 1179 | 68.03          |  |
| G6      | 3890     | 2628 | 1604 | 1007 | 65.17          |  |
| G7      | 3094     | 1768 | 1142 | 933  | 64.98          |  |

#### المصادر

1. AL-Kayssi, A. W. (2021). Use of water retention data and soil physical quality index S to quantify hard-setting and degree of soil compactness indices of gypsiferous soils. *Soil and Tillage Research*, 206: 104805.
2. Al-Kayssi, A. W., and Mustafa, S. H. (2016). Modeling gypsiferous soil infiltration rate under different sprinkler application rates and successive irrigation events. *Agricultural Water Management*, 163: 66-74.
3. Al-Kayssi, A. W. (2016). Impact of successive wetting and drying cycles on some physical properties of gypsiferous soils. *Journal of Agriculture Food and Development*, 2: 5-15.
4. Al-Zubaidy, A. H., A. F., and Al-Barazanji, A. S. (1981). Evaluation of different methods for determining gypsum content in Iraqi gypsiferous soils. *Iraqi Journal of Agricultural Sciences*. 16: 133-142.
5. ASTM Standard D698. (2007). Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort. ASTM, International, West Conshohocken, PA.
6. Blacke, G. R., and K. H. Hortge. (1986). In *methods of soil Analysis, part1. Physical and Mineralogical Methods\_ Agronomy Monograph no. 9 (2<sup>nd</sup> Edition)*, American Society of Agronomy\_ Soil Science Society of America, 677, south segoe Road, Madison, WI 53711, USA.
7. Dexter, A. R., (2004a). Soil physical quality. Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma* 120: 201–214.
8. Dexter, A. R. (2004b). Soil physical quality. Part II. Friability, tillage, tilth and hard-setting *Geoderma*, 120: 215–225.
9. Dexter, A. R., Czyż, E. A., Richard, G., and Reszkowska, A. (2008). A user-friendly water retention function that takes account of the textural and structural pore spaces in soil. *Geoderma*, 143(3-4), 243-253.
10. Fabiola, N., Giarola, B., da Silva, A. P., Imhoff, S., and Dexter, A. R. (2003). Contribution of natural soil compaction on hardsetting behavior. *Geoderma*, 113(1-2): 95-108.

11. Farahani, E., Mosaddeghi, M. R., Mahboubi, A. A., and Dexter, A. R. (2019). Prediction of soil hard-setting and physical quality using water retention data. *Geoderma*, 338: 343-354.
12. Klute, A. (1986). Water retention: Laboratory method of soil analysis Part 1, Physical and Mineralogical Method, 2<sup>nd</sup> ed. Edited. P.635-660.
13. Lagerwerff, J. V., G. W. Akin, and S. W. Moses. (1965). Detection and determination of gypsum in soils. *Soil Science Society of America Proceedings*, 29(5): 535-540.
14. Mosaddeghi, M. R., and Mahboubi, A. A. (2011). Point pedotransfer functions for prediction of water retention of selected soil series in a semi-arid region of western Iran. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 57(4): 327-342.
15. Mualem, Y. (1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water resources research*, 12(3): 513-522.
16. Pearson, M. J., Monteith, S. E., Ferguson, R. R., Hallmark, C. T., Hudnall, W. H., Monger, H. C., ... and West, L. T. (2015). A method to determine particle size distribution in soils with gypsum. *Geoderma*, 237, 318-324.
17. RETC (RETention Curve), (2008). RETC model. USDA-ARS U.S. Salinity Laboratory. Riverside, CA, USA.
18. Rhoades, J. D. (1982). Cation exchange capacity. *Methods of soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological properties*. 149-157.
19. Richards, L. A. (1954). *Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soil*. U. S. D. A. Handbook No-60. USA.
20. Taylor, H. M. (1971). Effects of soil strength on seedling emergence, root growth and crop yield. *Compaction of agricultural soils*, 292: 312.
21. Van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil science society of America journal*, 44(5): 892-898.
22. Van Genuchten, M. V., Leij, F. J., and Yates, S. R. (1991). The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils.
23. Vepraskas, M. J. (1984). Cone index of loamy sands as influenced by pore size distribution and effective stress. *Soil Science Society of America Journal*, 48(6): 1220-1225.