جامعة حماة

كلية الزراعية

المحاضرة النظرية العاشرة في مقرر أساسيات علوم التربة وتصنيفها

لطلاب السنة الثانية

الدكتور عصام شكري الخوري

طرائق تعيين المحتوى الرطوبي في التربة والجهد المائي
Measurement of soil wetness & Soil moisture potential

يتم تعيين رطوبة التربة لأغراض عديدة، فلا يتم أي قياس فيزيائي، أو هيدروفيزيائي، أو كيميائي، أو ميكانيكي، دون الحاجة إلى تعيين المحتوى المائي للتربة حقلياً أو مخبرياً، ويعبر عن رطوبة التربة بعدة طرائق فهي إمَّا تدخل في عمليات الحساب نفسها، أو تجرى الحسابات المختلفة على أساسها.... كأن يعبر عن وزن التربة الجاف تماماً أو الجاف هوائياً أو الرطب...إلخ، وذلك حسب الغرض من القياس وطبيعته وحالة التربة الرطوبية في الحقل أو في المختبر..

انطلاقاً من كون التربة مكونة من ثلاثة أطوار (صلب وسائل وغازي)، فإنَّه يمكن حساب وتعيين الرطوبة في التربة حسب ما يلي:

6-1- طرائق التعبير عن المحتوى الرطوبي للتربة:

يمكن التعبير عن المحتوى الرطوبي للتربة بالطرائق التالية:

6-1-1- المحتوى الرطوبي الحالي (Θa) على أساس الوزن الرطب للتربة (الوزن المبتل)

يعبر عن رطوبة التربة الحالية التي يمكن للتربة أن تحتويها في العينة منسوبة إلى وزن التربة الرطب ويؤخذ على أنه عدد غرامات الماء الموجودة في 100 غرام تربة رطبة..

$$\underline{\Theta a} = Mw / Mt = Mw / (Mw + Ms)$$

Mt – كتلة التربة الكلية الرطبة.

Mw- كتلة الماء في العينة المدروسة.

Ms – كتلة التربة الجافة تماماً على درجة حرارة 105 درجة مئوية.

نظراً لعدم ثبات المحتوى الرطوبي (Mw) للتربة فإن حسابه على أساس الوزن الرطب للتربة (Mt- الكتلة الكلية للتربة بما فيها الأطوار الثلاثة)، يعد قياساً غير ثابت هو الآخر ولذلك يندر استخدامه في الدراسات الفيزيائية والكيميائية والهيدروفيزيائية.

6-1-2- المحتوى الرطوبي الوزني على أساس الوزن الجاف للتربة (Θm) Mass wetness

يعبَّر عن رطوبة التربة الحالية التي يمكن للتربة أن تحتويها العينة الترابية (التي جفّفت على درجة حرارة 105 درجة مئوية حتى ثبات الوزن)، منسوبة إلى وزن التربة الجاف. يتميز هذا المحتوى بالثبات بالنسبة لمجمل الخواص والثوابت المائية للتربة، كما يعد الأساس في معظم القياسات الفيزيائية والهيدروفيزيائية للتربة ويحسب حسب العلاقة التالية:

$$\Theta m = Mw / Ms$$

يشيع استخدام المحتوى الرطوبي على أساس الوزن الرطب للتربة (الوزن المبتل Θa) لدى الكيميائيين والجيوكيميائيين، أمَّا المحتوى الرطوبي الوزني Θm الذي يعكس الظواهر التي ترتبط بوجود الماء في التربة هو الذي يعتمد كقياس، خاصة لدى الفيزيائيين، لذلك يمكن إظهار العلاقة بين كل من Θa وΘm بتقسيم بسط ومقام الكسر الذي يعطي Θa على أساس وزن الطور الصلب للتربة Ms فنجد:

$$\Theta a = \frac{Mw/Ms}{Mw/Ms + Ms/Ms} = \frac{\Theta m}{\Theta m + 1}$$

و بالطريقة نفسها نجد أنَّ:

$$\Theta m = \frac{\Theta a}{(1 - \Theta a)}$$

كما نجد انطلاقاً من علاقتي (Θa) و (Θm) ما يلي:

$$Mw = \Theta m.\ Ms = \Theta a.\ (Mw + Ms)$$

تتراوح قيمة كل من Θa أو ΘA بين (0 – 1) وكنسبة مئوية بين (0 و100) في حين يتراوح المحتوى الرطوبي الوزني (على أساس الوزن الجاف) Θm (بين 0 وأكثر من 1) في ظروف الحقل الطبيعية ويمكن أن يتراوح بين (0 و∞) عندما يتعلَّق الأمر بمعلَّق ترابي تشكّل فيه التربة الطور المبعثر Dispersed phase.

مثال: تم أخذ 100 غ تربة جافة تماماً (على درجة حرارة 105 درجة مئوية)، وأضيف لها 30 غ ماء، لأصبح الوزن المبتل للتربة Θa=130 غ فتكون النسبة المئوية للرطوبة عند ذلك:

أ- على أساس الوزن المبتل= 130/30 * 100= 23.08 %

أي أنَّ كل 100غ تربة رطبة تحوي 23.08 غ ماء إضافة الى 76.92 غ تربة جافة.

ب- أمَّا على أساس الوزن الجاف فهي = 100/30 * 100= 30 %

أي أنَّ كل 130غ تربة رطبة تحوي 30 غ ماء إضافة الى 100غ تربة جافة.

6-1-3- المحتوى الرطوبي الحجمي (Θv) Volume wetness: وهو قياس لحجم الماء الموجود في حجم ظاهري (Vb أو Vt) من التربة و يساوي:

$$\Theta v = \frac{Vw}{Vt} = \frac{Vw}{Vs + Vw + Va} = \frac{Vw}{Vb}$$

ويساوي أيضاً: $\Theta v = Vw / (Vs + Vf)$

يرتبط المحتوى الرطوبي الحجمي بالكثافة الظاهرية ρb والمحتوى الرطوبي الوزني (Θm) والمساميَّة الكليَّة (f كجزء من واحد) بالعلاقة التالية:

$$\Theta v = \Theta m . \frac{\rho b}{\rho w} = \Theta m . \rho s . (1 - f)$$

على اعتبار أنَّ قيمة الكثافة الظاهرية يمكن أن تعطى بالعلاقة: $\rho b = \rho s . (1 - f)$

6-1-4- ارتفاع عمود الماء أو عمق الماء في المقطع الأرضي (dw):

يمثّل ارتفاع الطور السائل إذا استعيض عن Vw بوحدات الطول z حيث كثيراً ما يعبَّر عن مخزون التربة الرطوبي كارتفاع طبقة مائية مقدراً بالـ مم (dw) في المقطع الأرضي بالعلاقة التالية:

$$\mathbf{dw = \Theta v \, . \, Z}$$

dw: مخزون التربة المائي و هو يساوي هنا dw وأنَّ- z- عمق التربة يكون مقاساً بالديسميتر.

Θv: المحتوى الرطوبي الحجمي ويُحسب من العلاقة التالية: $\Theta v = Vw / Vt$ ، كما يمكن حساب المحتوى الرطوبي كنسبة حجمية من خلال العلاقة التالية:

$$\Theta v = \Theta m * \rho b$$

كما يمكن التعبير عن مخزون التربة الرطوبي كحجم مقاساً بالمتر المكعب (dw) في المقطع الأرضي بالعلاقة التالية:

$$dw = \Theta v \, . \, Z \, . s$$

Z: العمق المعتبر من المقطع الأرضي و يساوي (z) مقدراً بالمتر ، والرمز s- يشير إلى المساحة مقدراً بالمتر المربع، Θv: الرطوبة الحجمية كجزء من واحد.

لذلك يمكن أن نكتب أيضاً:

مثال:

فلو كان المحتوى الرطوبي الحجمي Θv = 30 % لعمق z = 80 cm فذلك يعني أنَّ مخزون التربة المائي dw حتى ذلك العمق وفي واحدة المساحة (s = متر مربع واحد) سيكون مساوياً:

$$dw = \Theta v \, . \, Z \, . s$$

$$dw = 0.3 * 0.8m * 1m^2 = 0.24\ m^3 = 240L/1m^2$$

وللتحويل من متر مكعب إلى واحدة الحجم (لتر L) نضرب بالعدد 1000

فنجد في دونم واحد (1000 متر مربع) 240 متر مكعب من الماء، وفي هكتار واحد 2400 متر مكعب من الماء في طبقة التربة المشار إليها...

لسهولة المقارنة بين المخزون الرطوبي للترب المختلفة أيَّاً كانت المساحة المعنية فقد استخدم تعبير عمق الماء (أو ارتفاع عموده) في العمق المأخوذ للمقارنة من المقطع الأرضي لتلك الترب ويكون ذلك بتقسيم حجم المحتوى المائي في العمق المذكور على السطح أي:

$$L^3 / L^2 = L \quad \text{أو} \quad Cm^3 / cm^2 = cm$$

نجد في المثال السابق أنَّ $L = 0.24$ متر أي 24 سم وهكذا يكافئ طبقة من الماء بارتفاع 24 سم فوق سطح التربة كما يقابل هطولاً مطرياً مقداره 240 مم، وما المثال السابق إلاَّ لبيان أهمية طريقة التعبير عن المحتوى الرطوبي للتربة وسهولة عقد المقارنة بين الخواص المائية للترب المختلفة....

لذلك من أجل التعبير عن رطوبة التربة كعمق طبقة مائية مقدراً بالـ مم، يمكن تقسيم حجم المياه بالأمتار المكعبة في الهكتار على العدد 10، فينتج لدينا مم عمق الماء/هكتار.

طرائق تعيين المحتوى الرطوبي للتربة:

استخدمت طرائق كثيرة لتعيين المحتوى الرطوبي للتربة فمنها المباشرة وأخرى غير مباشرة ويجرى بعضها مخبرياً والبعض الآخر حقلياً ولكل منها ميزات خاصة بها في ظروف القياس المثالية كما لها عيوب تحول دون استخدامها في الظروف الأخرى غير المناسبة...

ومن تلك الطرائق نذكر:

أولاً- الطرائق المباشرة لقياس المحتوى الرطوبي للتربة:

1- طريقة التجفيف: Thermo – gravimetric method

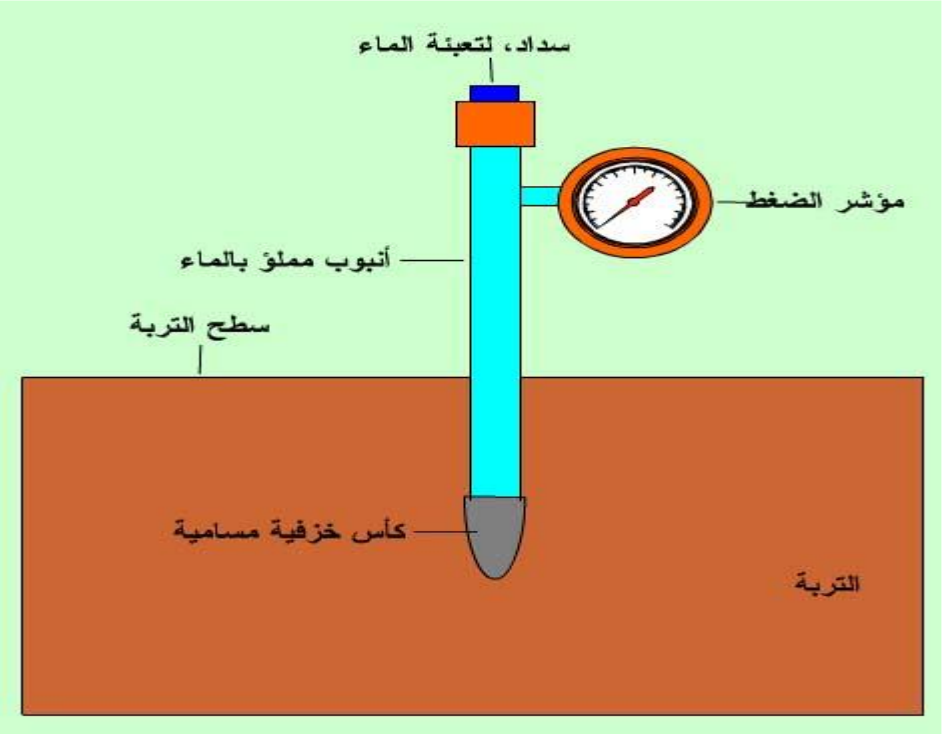
تعدّ من أفضل الطرائق المباشرة لقياس محتوى التربة الرطوبي وأدقّها ويمكن إجراء عملية التجفيف لعينات التربة غير المضطربة بوضعها في الحقل أو لعينات التربة الجافة هوائياً في درجة حرارة 105 – 110 درجة مئوية ولفترة زمنية تتراوح بين 16- 24 ساعة حتى ثبات الوزن... ومن الملاحظ حاجة عينات الترب الطينية الرطبة لفترات تجفيف تزيد عن ذلك قد تصل إلى 48 ساعة كما قد تنخفض في حالة التقدير الروتيني للعينات غير الطينية إلى 4 – 6 ساعات حسب وزن العينة وطريقة أخذها وشكل آنية التجفيف، ثمَّ يتم حساب نسبة الرطوبة وزناً.

ثانياً- الطرائق الحقلية لقياس رطوبة التربة والتوتّر الرطوبي:

تتضمّن الطرائق التي تعتمد على قياس التوتّر الرطوبي (الشدّ) باستخدام أجهزة قياس التوتر الرطوبي (التنشيومترات Tensiometers) أو قياس المقاومة الكهربائية (أو التوصيل الكهربائي) أو باستعمال قوالب الجص (أو الجبس)، وطريقة تشتت النترونات Neutron scattering أو طريقة انخماد أشعة غاما γ – ray attenuation أو طريقة طنجرة الضغط وغيرها...

1- طريقة قياس التوتّر الرطوبي بواسطة التنشيوميتر: Tensiometric method

يتكون التنشيوميتر من وعاء مسامي porous cup من السيراميك (يسمح بمرور الماء من مسامه الدقيقة حتى فرق ضغط مقداره 0.85 ضغط جوى أو 85 كيلو باسكال وبعد هذا الشدّ يصبح منفذا للهواء). يتصل الوعاء المسامي بأنبوبة من البلاستيك الشفاف المقاوم للحرارة وأشعة الشمس يختلف طولها حسب العمق المراد القياس عنده (30،60،90،120)سم. يركب في أعلى الأنبوب البلاستيك عدَّاد vacuum gauge لقياس الشد الرطوبى المتولد في الجهاز كما في الشكل (6-1). والأنواع الحديثة منها تستخدم عدَّادات الكترونية خاصة electronic transducer يكون أكثر حساسية. بعض أنواع التنشيوميترات القديمة تستخدم مانوميتر زئبقي لقياس الشدّ mercury manometer كما في الشكل (6-2).



الشكل (6-1): يبين نموذج التنسيومتر ذو مقياس الضغط أو التفريغ (المانوميتر)

تقيس هذه الطريقة التوتر (الشد) الذي بموجبه يجذب (أو يحتجز) الماء من قبل حبيبات التربة ويكون ذلك باستعمال إناء (كأس) مسامي من الخزف (السيراميك) Porous ceramic cup حيث يدفن هذا الأخير في التربة إلى العمق المطلوب بعد أن، يكون قد ملء مسبقاً بالماء هو والأنبوب المرتبط به والجهاز الحساس الذي يشير إلى الضغط أو قوى الشدّ حسب نوع التنسيومتر ويخرج الماء من خلال مسامات الكأس المسامي، خارج التنسيومتر نتيجة فرق الجهد بين قوى شدّ حبيبات التربة والضغط الحاصل داخل الكأس المسامي، حتى يحصل توازن بين الضغطين المذكورين، (ماء الإناء الخزفي المسامي مع الماء الأرضي) الأمر الذي ينشأ عنه توتّر أو شدّ في الإناء الخزفي وذلك حتى يصبح ماء الإناء نفسه في حالة توازن هيدروليكي مع ماء التربة وعند ذلك فإنَّ أي انخفاض في المحتوى الرطوبي للتربة نتيجة التبخر أو الامتصاص النباتي أو

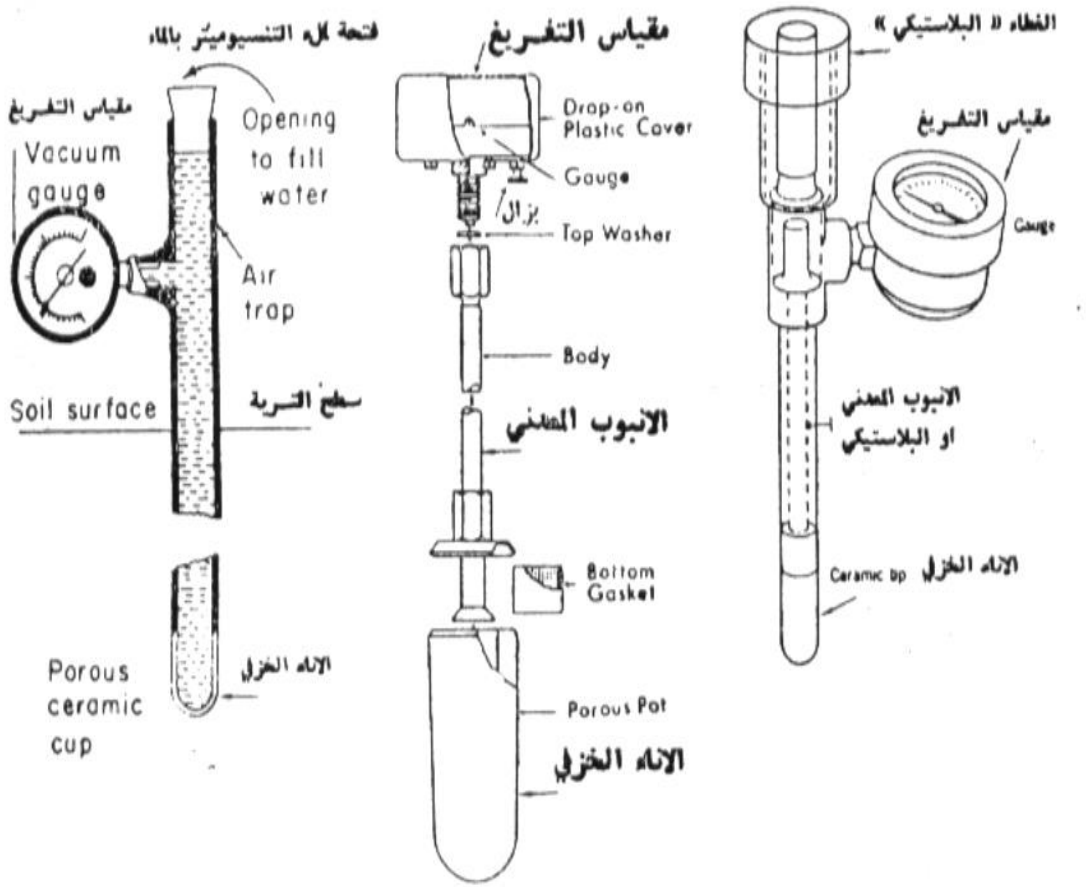
الصرف سيقود إلى تغيرات في قراءة التنسيومتر التي تعكس بدورها تغيرات التوتر الرطوبي في التربة والجهد الشعري فيها..

ويتراوح مدى التوتّر الرطوبي الذي يمكن قياسه بهذه الطريقة بين صفر ضغط جوي عند درجة التشبع الرطوبي و0.9 ضغط جوي(أي 68.4 سم زئبقي) ويصل أقصى توتر رطوبي يمكن تسجيله عملياً حوالي 60 سم زئبقي ويتوقف ذلك أساساً على طول العمود الذي يعلو الإناء الخزفي للجهاز وهناك نوعان من أجهزة قياس التوتر الرطوبي (التنسيومترات)..

- تنسيومتر ذو مقياس التفريغ Tensiometer with vacuum gauge
- تنسيومتر ذو مقياس الضغط الزئبقي Tensiometer with mercury manometer

A- جهاز قياس التوتر الرطوبي ذو مقياس التفريغ Vacuum gauge tensiometer

يرتبط الإناء الخزفي في هذا النوع بمقياس تفريغ (مقياس لقوة الشد أو التوتر) بوساطة أنبوب معدني (أو من البلاستيك المتين) ذي فراغ طولي وبقطر صغير جداً من أجل رفع حساسية الجهاز ويرتبط الأنبوب المعدني من ناحية الوعاء الخزفي بوصلة مطاطية مرنة، كما يتصل من جهة مقياس التفريغ بوصلة مزودة بحلقة مطاطية رقيقة لإحكام الاتصال ويغلف مقياس التفريغ بغطاء بلاستيكي متحرك كما في الشكلين (6-1) و(6-2)...



الشكل(6-2): يبين نماذج مختلف من التنسيومترات ذات مقياس الضغط أو التفريغ(المانوميتر)

يمكن حساب التوتر الرطوبي على النحو التالي:

يقيس جهاز التنسيومتر ذو مقياس التفريغ الضغط السالب داخل الأنبوب، الناجم عن تسرب الماء من الإناء الخزفي وانتقاله عبره إلى التربة، الأمر الذي يؤدي إلى حصول تفريغ يقاس بعدد سنتمترات الزئبق التي يشير إليها المقياس وعند بلوغ التوازن في الضغط بين التربة والتنسيومتر يمكن أن نكتب ما يلي:

$$S.M.T = (L - L0).(\frac{\rho m - \rho w}{\rho w})$$

S.M.T : توتر التربة الرطوبي الذي يعبر عنه بارتفاع عمود من الماء (سم ماء)

L0: قراءة التنسيومتر (سم زئبق) إذا لم يضبط على الصفر منذ البداية و يمكن اعتبارها صفراً إذا عوير (ضبط) التنسيومتر بوساطة البزال (اللولب) الموجود أسفل مقياس الجهاز.

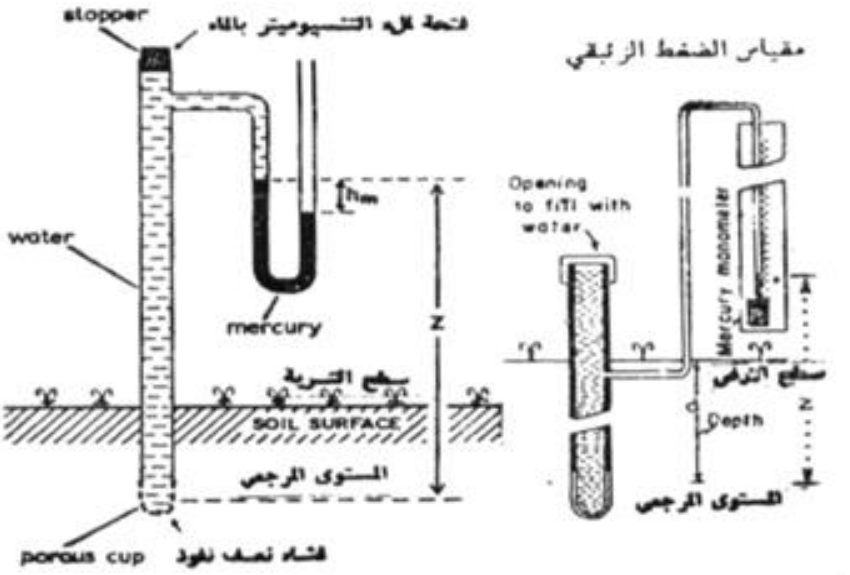
L: قراءة مقياس التنسيومتر (سم زئبق) وهي مساوية لتوتر ماء التربة.

ρm وρw: على الترتيب كثافة الزئبق وكثافة الماء عند درجة حرارة القياس ويمكن اعتبارهما 13.6 و1 غ/سم^3 على التوالي (أي أنَّ 1 سم زئبق يعادل ارتفاع عمود ماء قدره 13.6 سم)..

هذا ويمكن التعبير عن التوتر الرطوبي بوحدات أخرى مثل البار أو أجزائه (ميلي بار) أو الـ pF الذي يساوي اللوغريتم العشري لارتفاع عمود الماء مقاساً بالسم...

B- جهاز قياس التوتر الرطوبي ذو مقياس الضغط الزئبقي_ Mercury manometer

يقيس هذا التنسيومتر التوتر المائي في التربة مباشرة عن طريق الاتصال المباشر بين الماء في أنبوب الجهاز والمستودع الزئبقي الذي يعمل كمانومتر ذي مقياس مدرج بدلاً من مقياس التفريغ في التنسيومتر السابق فعندما يتحرك الماء من الإناء الخزفي للجهاز باتجاه التربة لا يلبث أن يرتفع الزئبق في الأنبوب المتصل بالجهاز الذي يقابله مقياس مدرج يشير إلى مقدار ارتفاع الزئبق بالسم..(الشكل، 6-3).



الشكل (6-3): يبين نماذج مختلف من التنسيومترات ذات مقياس الضغط الزئبقي

ويتميز هذا التنسيومتر بأنَّه أرخص ثمناً وأبسط استعمالاً من سابقه وأسهل صيانة وأيسر في إصلاح أعطاله الحقلية بإضافة الماء إليه والتخلص من فقاعات الهواء التي قد تتخلل بعض أجزائه وذلك باستخدام حقنة خاصة لهذا الغرض كما يكون الإناء الخزفي لهذا التنسيومتر أصغر حجماً من إناء التنسيومتر ذي مقياس التفريغ مما يسهل دفنه وتثبيته في التربة وبخاصة الترب المحجرة أو الترب الحصوية...

ويعطى التوتر الرطوبي بالعلاقة التالية:

$$S.M.T = (\frac{\rho m - \rho w}{\rho w}.M) - (\rho m.R) - H$$

S.M.T : التوتر الرطوبي للتربة (سم ماء)

M : مستوى (ارتفاع) الزئبق في المانومتر (مقياس الضغط) سم زئبق

R : مستوى (ارتفاع) الزئبق في المستودع الزئبقي بالسم

H : العمق أو الارتفاع الذي يقع بين صفر تدريج المقياس الزئبقي وأعلى نقطة من الإناء الخزفي المدفون بالتربة بالسم

ρm و ρw : كثافة الزئبق و الماء على الترتيب في درجة حرارة القياس.

مزايا التنسيومترات

- تتميز التنسيومترات بإعطائها قراءات عديدة للموقع الواحد من المقطع الأرضي وبربط رطوبة التربة المقاسة بقيم توتر رطوبي تشير إلى مستوى الماء المتاح (الميسر Available) للنباتات.
- وتستخدم التنسيومترات بنجاح عند قوى التوتر المنخفضة (أقل من 1 جو) أي في حدود السعة الحقلية.
- كما توجد بأطوال متفاوتة تناسب أعماق انتشار جذور المحاصيل والزراعات المختلفة.
- تقدير احتياجات الري عندما يحافظ على رطوبة التربة في مستوى السعة الحقلية حيث يكون التعبير عن المحتوى المائي للتربة بالجهد الهيدروليكي فيها (جهد المادة تحديداً) واللذين يقاسان بالتوتر الرطوبي الذي يكافئهما.
- يكون أكثر ملائمة لتحديد موعد الري في الحقل أو في الزراعات المحمية وتكون أفضل طريقة لتحقيق ذلك بوضع مجموعة من التنسيومترات عند أعماق مختلفة تمثل مناطق الانتشار الجذري ثم الري عندما تشير التنسيومترات إلى قيم توتر معينة.
- كما يمكن وضع هذه الأجهزة لحساب الممال الهيدروليكي Hydraulic gradient في مقطع التربة...
- أخيراً تعرض النتائج بشكل تربط فيه قيم التوتر الرطوبي Moisture tension بمحتوى التربة المائي عند كل قياس.

مساوئ التنسيومترات: يؤخذ على هذه الأجهزة:

- عدم التمكن من استعمالها في أيام الصقيع.
- صعوبة تثبيتها في الترب المحجرة والحصوية.
- تعرضها للتسرب في بعض أجزائها مما يتطلب إعادة ملئها بالماء والتخلص من الفقاعات الهوائية وبخاصة في حالة التنسيومتر ذي مقياس التفريغ الذي يجب نزعه من الحقل ونقله للمختبر لإصلاحه.
- يضاف لذلك محدودية قراءاته بـ 65 سم زئبق أي بحدود pF = 2.94 فقط.

2- تعيين رطوبة التربة بطريقة تشتت النترونات: Neutron scattering

يطلق أيضاً على هذه الطريقة إبطاء النترونات السريعة Fast neutrons وذلك بتحويلها إلى نترونات بطيئة Slow neutrons (أو حرارية Thermal neutrons) وتسمَّى هذه العملية Neutron thermalization وقد استخدمت من أجل تعيين رطوبة التربة لأول مرة في عام 1950 ويقوم مبدأ هذه الطريقة على ما يلي:

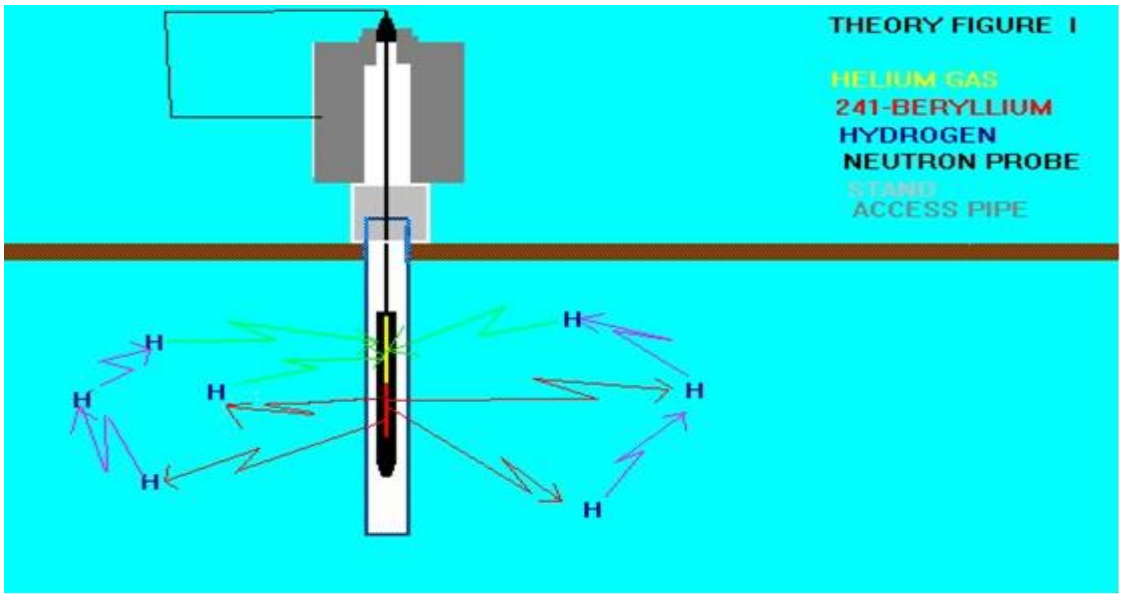
A- مبدأ الطريقة: تتميَّز نوى الهيدروجين (البروتونات) بخاصية بعثرة أو تشتت Scattering النترونات وإبطائها وقد وجد أنَّ معدَّل بعثرة النترونات في الترب الرطبة يكون تابعاً لمحتوى التربة المائي الذي يعدّ المصدر الأساس للبروتونات فيها..

ويعتمد في الحصول على مصدر للنترونات السريعة على مبدأ خلط عنصر مشع يطلق جسيمات (دقائق) ألفا Alpha particles (وهي نوى ذرات الهيليوم He) كالراديوم $^{226}_{88}Ra$ أو الأميرسيوم $^{241}_{95}Am$ أو البلوتونيوم $^{239}_{94}Pu$ مع عنصر البيريليوم $^{9}_{4}Be$ إلا أن أكثر العناصر المشعة استخداماً في الحصول على النترونات السريعة هو الأميرسيوم (ذو نصف عمر محدد هو ½ t = 470 سنة) والراديوم (½ t = 1620 سنة).

ويتم ذلك على النحو التالي:

$$^{9}_{4}Be+^{4}_{2}He\rightarrow^{12}_{6}C+^{1}_{0}n+y$$

يستخدم لهذا الغرض حوالي 2-5 ميلي كوري mGi من الراديوم المخلوط جيداً مع البيريليوم و المضغوطين على شكل أقراص صغيرة و هذا ما يكفي لإصدار حوالي 16000 نترون في الثانية لكل 1 ميلي كوري mGi من الراديوم المستخدم و تتراوح طاقة النترونات السريعة المنبعثة من 1 – 15 (MeV) وبمعدَّل طاقي يتراوح بين 2 و 4 (MeV) وبمعدَّل سرعة 1600 كم/ثا ولذلك تدعى النترونات السريعة Fast neutrons .. كما في الشكل (6-4).



شكل رقم (6-4): يوضح وضع الجهاز في التربة عند القياس

والجدير بالذكر أنَّ كلاً من الراديوم والإميرسيوم المستخدمين يصدران أيضاً أشعة ألفا γ بطاقة تساوي MeV 0.187 و(0.06 – 0.027) MeV على الترتيب إلا أنَّه نظراً لطول زمن نصف العمر (t 1/2) لكل من هذين العنصرين المشعين فإنَّ معدَّل تغيّر تفككهما (تدفقهما) n الإشعاعي يكون ضئيلاً جداً مقارنة مع عمر استخدام جهاز قياس الرطوبة النتروني....

وإذا ما أرسلت النترونات السريعة في التربة فإنَّها تصطدم بذرات العناصر المختلفة التي تتكون منها التربة نفسها، ونتيجة للتصادم المتكرر للنترونات السريعة فإنَّها تغيّر من اتجاهها في كل مرة وتتبعثر Scattered وتفقد تبعاً لذلك جزءاً من طاقتها الحركية Kinetic energy إثر كل اصطدام يتم. ويترافق ذلك بتناقص تدريجي في سرعتها وذلك إلى الحدّ الذي تغدو عنده طاقتها حوالي MeV 0.03 وسرعتها 2.7 كم/ثا ويطلق على مثل هذه النترونات اسم النترونات البطيئة Slow neutrons أو الحرارية ويطلق على العملية التي تقود إلى مثل ذلك عملية تشتّت النترونات Neutron scattering أو Neutron thermalization وتتفاوت ذرات العناصر الموجودة في التربة إلى حدّ كبير في مقدرتها على بعثرة النترونات السريعة وإبطائها إلا أنَّ معدَّل انخفاض طاقة النترونات نتيجة التصادم يكون أعظمياً عندما تكون كتلة الذرة التي تصطدم بها النترونات أقرب ما يمكن من كتلتها وهذا يعني أنَّ أكثر الذرات مصادفة في التربة وأكثر اقتراباً في كتلتها من كتلة النترونات هي ذرات الهيدروجين (البروتون) التي تكون جزيء الماء وتكون بذلك الذرات أكثر عناصر التربة فعَّالية في إبطاء وبعثرة النترونات...

وهكذا نجد مثلاً أنَّ عدد مرات التصادم اللازمة من أجل انخفاض طاقة ابتدائية لنترون سريع مساوية 2 MeV إلى طاقة النترون الحراري أو البطيء (التي تساوي MeV 0.03) مع كل من ذرات الهيدروجين والكربون والأكسيجين هي على الترتيب مساوية 18 و114 و150 تصادم...أخيراً إنَّ عدد النترونات البطيئة

سيتناسب مع تركيز ذرات الهيدروجين في التربة وبالتالي فهو سيتناسب مع حجم الماء الموجود فيها وهذا ما يقيسه جهاز قياس الرطوبة النتروني Neutron moisture meter وهكذا نجد:

$$Nw = m.\ \Theta v + b$$

وأيضاً $$Nw/Ns = y.\ \Theta v$$

Nw : معدَّل العد للنترونات البطيئة في التربة الرطبة..

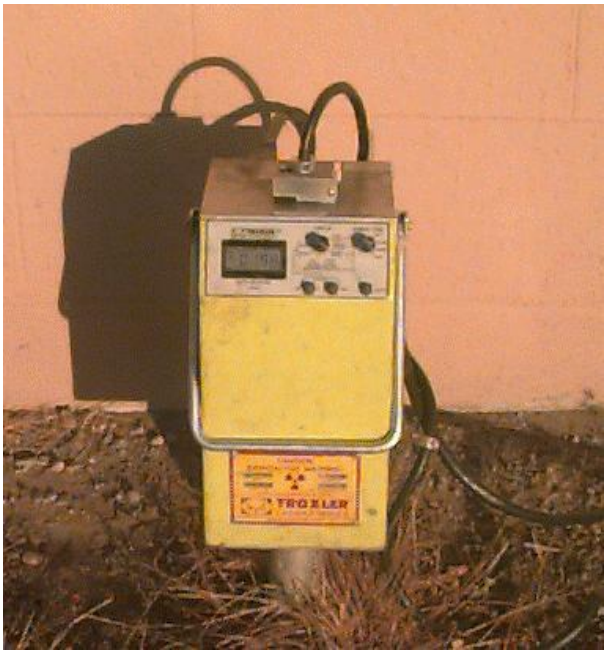
Ns : معدَّل العدّ للنترونات البطيئة في الماء أو أي مادة قياسية أخرى كصفيحة معدنية رقيقة من الألمنيوم أو الفضة...

Θv : المحتوى الرطوبي الحجمي و يساوي $\Theta v = Vw / Vt$

M و b : على الترتيب ميل (Slope) و قاطع (Intercept) المنحنى الرابط بين Nw و Θv

B- جهاز قياس الرطوبة النتروني: يسمى أيضاً المسبار النتروني Neutron probe كما في الشكل (4) ويتألف من جزأين رئيسيين الأول المسبار Probe (P) ويتكوَّن من مصدر إرسال النترونات السريعة (S) Source of fast neutrons ومكشاف(مستقبل) للنترونات البطيئة Detector of slow neutrons (D) يحتوي على غاز فلور البورون BF_3 ويدلى المسبار في أنبوب معدني T من الألمنيوم يسمح بالنفاذ شبه التام للتدفق النتروني و يثبت الأنبوب في التربة بشكل عمودي عند العمق المطلوب في حفرة تتسع له ويكون الأنبوب مغلقاً من أسفل منعاً لتسرب الماء إلى داخله...

أمَّا الجزء الثاني فهو عبارة عن جهاز تسجيل أو عدَّاد Scaler (C) يسمح بتسجيل معدل العد لتدفق النترونات البطيئة المتشتتة من قبل التربة ويغذّى عادة ببطارية أعد شحنها مسبقاً.....



شكل (6-5): يوضح صور المجس وجهاز تقدير رطوبة التربة بطريقة تشتت النيترونات

C- آلية القياس: تثبت أنابيب الألمنيوم في الحقل عند الأعماق المطلوبة التي يمكن أن تتراوح بين 50 سم و150 سم وتسد فوهتا الأنبوب من أعلى وأسفل لمنع تسرّب الماء إليه وللإبقاء عليه جافاً من الداخل ويجرى التأكد من شحن البطاريات من المؤشّر الخاص بذلك في الجهاز نفسه ثم يدلى المسبار النتروني داخل أنبوب الألمنيوم إلى العمق المراد قياس رطوبة التربة عنده (الشكل 5-6، 5-) ويشغّل جهاز العدّ وعندها يرتبط عدد النترونات البطيئة إثر تصادمها المتكرر وارتدادها بشكل عشوائي بعلاقة خطية تقريبية مع المحتوى الرطوبي الأرضي حيث تستقبل النترونات البطيئة المرتدة من قبل المكشاف Detector الذي يكون مليئاً بغاز فلور الكربون BF3 وعند اصطدام النترونات البطيئة المرتدة بذرات البورون ${}^{10}_{5}B$ فإنَّه يتم امتصاصها من قبل هذه الأخيرة وتنطلق نتيجة ذلك جسيمات (دقائق) أو أشعة ألفا Particles α على النحو التالي:

$$ {}^{10}_{5}B + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{7}_{3}Li + {}^{4}_{2}a $$

أو يمكن أن يكون الهيليوم (He) بدلا من أشعة ألفا (α)...

وتتولد عن انطلاق جسيمات ألفا ومضات (نبضات كهربائية) ينقلها سلك (كابل) ناقل إلى جهاز التسجيل الذي يقوم بإحصاء الومضات الكهربائية خلال زمن القياس...

D- معايرة الجهاز والمنحنى البياني: يتطلب القياس بموجب هذه الطريقة معايرة Calibration الجهاز عند كثافة حجمية (ظاهرية) ثابتة للتربة و محتويات رطوبية مختلفة وما يقابل كل منها من معدلات العد Count rates وهذا ما يمكن الوصول إليه بواسطة منحنى بياني للمعايرة Calibeation curve يربط بين النسبة المئوية للمحتوى الرطوبي الحجمي (Θv %) في التربة وبين معدلات العد للجهاز النتروني و نتمكن بذلك من معرفة المحتوى الرطوبي عند أي عمق من التربة بدلالة معدل العد عند ذلك العمق ....

ويراعى عمل منحنى بياني خاص بكل نوع من الترب ولمرة واحدة ذلك أن تشتت النترونات السريعة وإبطائها لا يعزى لمحتوى التربة المائي فحسب بل وتسهم في ذلك التشتت ذرات الهيدروجين الداخلة في تركيب المادة العضوية وفلزات الطين إضافة إلى تداخل بعض العناصر الموجودة في التربة عند تجاوزها تراكيز معينة فالمعروف أن وجود البورون B بتركيز يتجاوز 10 جزء بالمليون (p.p.m) والكلور بتركيز 1000 (p.p.m) يمكن أن يؤثر في دقة وصلاحية منحنى المعايرة المعد مسبقاً...

ولإعداد هذا المنحنى البياني يدلى المسبار النتروني في أنبوب الألمنيوم إلى العمق الأول المراد قياس رطوبته و يسجل العد عنده ثم ينزل بعد ذلك إلى عمق آخر و يسجل العد أيضاً و هكذا حتى نصل إلى نهاية العمق المراد قياس رطوبته في القطاع الأرضي و يراعى الحصول على أكبر عدد ممكن من نقاط القياس و بشكل لا تقل فيه عن خمسة قياسات ثم يحسب معدل العد النسبي (K) لكل عمق على النحو التالي:

K = عد الجهاز عند عمق معين / العد القياسي للجهاز (في الماء مثلاً)

تؤخذ بعد ذلك عينة ترابية عند كل من أعماق القياس المنفذة و يعين المحتوى الرطوبي الحجمي Θv بالتجفيف كما تعين الكثافة الحجمية للتربة (Qb) عند كل من الأعماق السابقة ثم يوقع المنحنى البياني الذي

يربط بين معدَّل العدّ النسبي K أو (Nw) للأعماق المختلفة و المحتوى المائي الحجمي للتربة (Θv %) أما من أجل حساب المحتوى المائي الوزني (Θm) :

$$\Theta m\% = \frac{\Theta v.\rho w}{\rho b}.100$$

كما يمكن تعيين قيمة التوتر (الشد) الرطوبي عند عمق القياس ذي المحتوى المائي الوزني Θm من المنحنى البياني المعد مسبقاً والذي يربط بين (Θm) وقيم الـ pF للتربة نفسها:

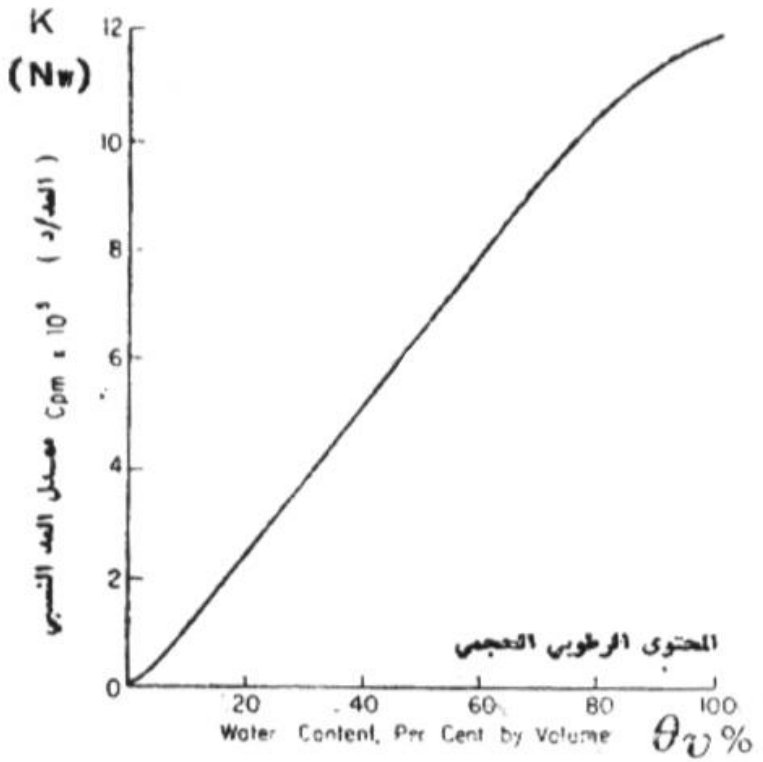
$$\Theta m = f(\ pF\ )$$

E- ميزات هذه الطريقة ومحاذيرها: من ميزات هذه الطريقة ما يلي:

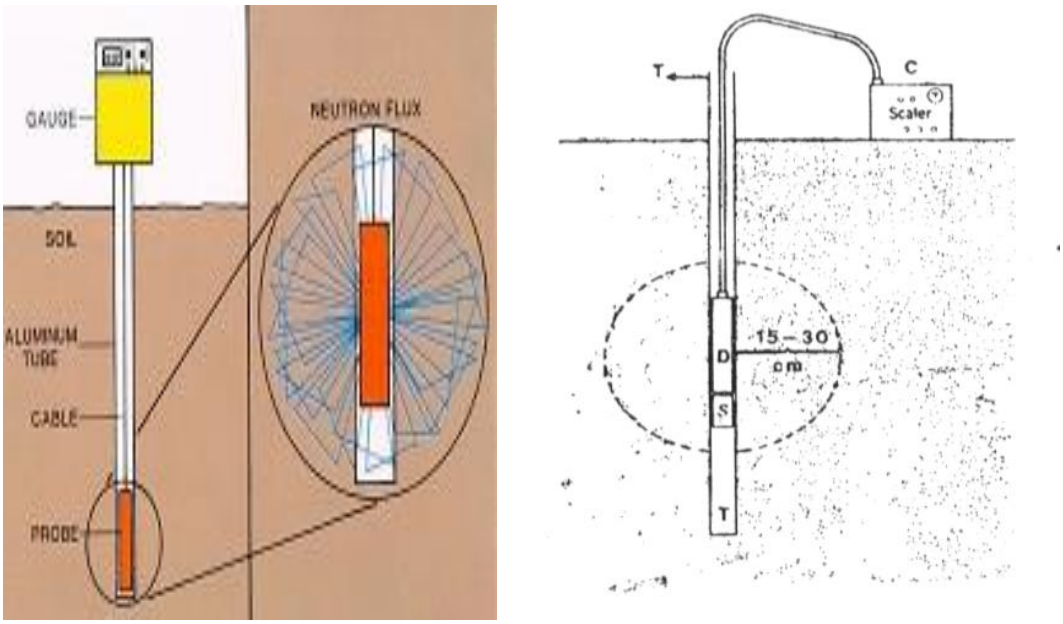
1. سرعة القياس وضآلة المجهود المبذول مقارنة مع طريقة التجفيف.
2. إمكانية تكرار قياس رطوبة التربة في الموقع والعمق نفسهما وبشكل دوري.
3. تعيين ما يعرف بالمقطع المائي للتربة Soil hydraulic profile عن طريق قياس رطوبة التربة عند أعماق مختلفة من المقطع الأرضي.
4. لا تحدث أي تغيير في بناء التربة كما لا تتأثر قراءات الجهاز كثيراً بنسبة الأملاح فيها.
5. لا تتأثر الطريقة عملياً بالضغط الجوي ودرجة الحرارة..

أمَّا من محاذير هذه الطريقة:

1. التكلفة الأولية المرتفعة للجهاز.
2. صعوبة قياس رطوبة التربة السطحية وبخاصة العشرين سنتمتر الأولى.
3. خطورة التعرض للإشعاع (أشعة γ) والنترونات السريعة على الرغم من تزويد الأجهزة الحديثة بوسائل حماية كافية كالدروع الواقية التي تصفح مصدر النترونات السريعة (المصدر المشع نفسه) بالرصاص وبعض المواد الهيدروكربونية كالبارافين والبولي إيتيلين لمنع تسرب النترونات السريعة وحماية القائم بالقياس من أشعة γ المرافقة.



الشكل (6-6): يبين منحنى بياني يربط العلاقة بين المحتوى الرطوبي الحجمي و معدَّل العدّ النسبي (Nw)K Θ v %.



الشكل (6-7): يوضح رسم تخطيطي للمسبار النتروني وأجزائه الرئيسة Neutron probe

3- تعيين رطوبة التربة بطريقة انخماد أشعة غاما: Gamma ray attenuation

إنّ مبدأ قياس رطوبة التربة بهذه الطريقة هو نفسه الذي يعتمد عليه قياس كثافة التربة الحجمية (Qb) الذي ورد آنفاً مع فارق الإبقاء هنا على كثافة التربة الحجمية ثابتة وبذلك تكون نفاذية أو انتقال Transmission أو تشتّت (بعثرة) Scattering أشعة γ تابعين لمحتوى التربة الرطوبي.

فعندما توضع التربة بكثافة حجمية ثابتة بين مصدر للإشعاع والمكشاف Detector فإنَّ شدَّة الأشعة الصادرة عنها ستتغيَّر فقط مع تغيرات محتوى التربة الرطوبي ويتبع ذلك للعلاقة الأساسية التالية:

$$Nw / Nd = \exp(-\Theta m \cdot \mu w \cdot x)$$

حيث أن:

Nw / Nd: نسبة تدفق الأشعة الصادرة (المنتقلة) عبر التربة الرطبة (Nw) إلى تلك الصادرة عبر التربة الجافة (Nd).

μw معامل الامتصاص الكتلوي للماء Mass absorpation coefficient أو ما يعرف بمعامل الانخماد الكتلوي Mass attenuation coefficient سم^2/غ .

X: سماكة عمود التربة المحصور بين مصدر الإشعاع والمكشاف بالسم.

Θm : وزن الماء في وحدة الحجم الظاهري من التربة غ/سم^3 .

وعليه فإن محتوى التربة الرطوبي (غ/ سم^3):

$$\Theta m = \frac{\ln(\frac{Nw}{Nd})}{-\mu w.x} = \frac{\log(\frac{Nw}{Nd})}{-0.4343\mu w.x}$$

وفي هذه المعادلة:

Ln (Nw/Nd): اللوغاريتم الطبيعي لنسبة العد في التربة الرطبة Wet soil إلى العدّ في التربة الجافة Dry soil...

وتفترض العلاقة السابقة أنَّ انخماد الأشعة (أو امتصاصها) العائد لهواء العينة الترابية أو عمود التربة في الحقل يكون مهملاً نظراً لكثافة الهواء المنخفضة جداً وكذلك الأمر بالنسبة للانخماد الخاص بالجدران الرقيقة التي تفصل التربة عن كل من مصدر الإشعاع وجهاز القياس (المكشاف)...

وتتعلَّق العلاقة السابقة بنفاذية (انتقال) حزمة الإشعاعات الأولية الصادرة عن مصدر الإشعاع فقط في الوقت الذي تستبعد فيه كل الإشعاعات الثانوية الناجمة عن التفاعل بين الإشعاعات الأولية ومكونات التربة ويكون ذلك عن طريق جهاز فصل (تمييز) Discriminator خاص أو جهاز تحليل مستوى (ذروة) الومضات الكهربائية Pulse height analyzer الذي يرتبط بجهاز العدّ Scaler.

وتسمح هذه الطريقة بإجراء القياس على التربة في المختبر إذ يكفي أن تعرّض التربة لحزمة من أشعة γ عبر ثقب صغير في التصفيح (الدرع) الرصاصي لمصدر الإشعاع وبهذا الشكل تكون التربة محصورة بين مصدر الإشعاع والمكشاف المصفح هو الآخر من الجهة الخارجية وبشكل يسمح معه بمرور حزمة ضيقة

من أشعة γ التي تنفذ عبر عمود التربة حيث يتوقَّف عنده انخماد (أو امتصاص) الأشعة على الكتلة الكلية للتربة الواقعة بين المصدر الإشعاعي والمكشاف..

ميزات هذه الطريقة:

1. إمكانية إجراء القياسات حقلياً ومخبرياً..
2. السماح بقياس رطوبة السنتمترات الأولى من سطح التربة (حتى عمق 1 سم)..
3. إمكانية تعيين المقطع الرطوبي بدقة أكبر عند أعماق متدرجة لا تتجاوز 2 سم في حين لا يقل هذا المدى في طريقة المسبار النتروني عن 16 سم مما يؤدّي إلى مزيد من التداخل بين الآفاق غير المتجانسة رطوبياً..

ويؤخذ على هذه الطريقة جملة أمور أهمها:

1. لا يعزى امتصاص أو انخماد أشعة غاما إلى اصطدامها بذرات الهيدروجين فحسب بل إنَّها تفقد جزءاً من طاقتها عند كل مرة تصطدم فيها بمادة أخرى ولهذا فإنَّ هذه الطريقة تناسب بخاصة قياس تغيّرات محتوى التربة الرطوبي أكثر من القياس نفسه...
2. ضرورة عمل منحنى معايرة لكل نوع من الترب..
3. صعوبة جعل الأنبوبين المعدنيين لكل من مصدر الإشعاع والمكشاف في وضع عمودي ومتواز تماماً في الحقل....
4. خطورة تعرّض القائم بالقياس للإشعاعات مثل طريقة القياس بالمسبار النتروني..

4- طريقة المقاومة الكهربائية: Electrical resistance method أو قالب الجبس

A- مبدأ الطريقة: عندما يمر تيار كهربائي من الكترود (مسرى) إلى آخر عبر مادة مسامية كقالب جص (جبس) مثلاً فإنَّ مقاومة توصيل التيار عبر هذه المادة ستتناسب عكساً مع محتواها المائي أي أنَّ:

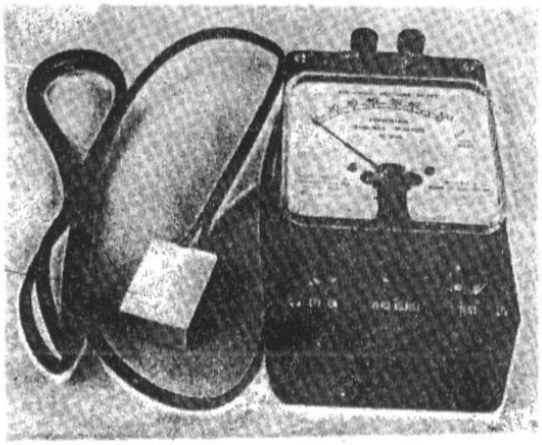
$$R\omega\frac{\mathrm{I}}{Ww}$$

R: المقاومة الكهربائية بالأوم Ohm و تساوي $R=\frac{I}{C}$

حيث أن C هي الناقلية الكهربائية (التوصيل) بالمو mho و I شدة التيار بالأمبير..

Ww: المحتوى المائي في الجسم المسامي الفاصل بين مسريي الكهرباء...

وهكذا فكلما انخفض محتوى قالب الجص من الماء زادت مقاومته لمرور التيار الكهربائي وقلَّ توصيله الكهربائي فإذا وضع مسريان (الكترودان) عزلا عن بعضهما مسافة 0.2 سم ضمن قالب من الجص ثم دفن في التربة وتُرك حتى بلوغه حالة الاتزان بين توتر (شد) الماء في التربة والقالب معاً بطريقة الإناء الخزفي للتنسيومتر المذكورة آنفاً فإنَّه يمكن قياس المقاومة الكهربائية بين الكترودين...



الشكل رقم (6–8): أنواع من أجهزة قياس الرطوبة باستخدام قالب الجبس من نموذج Bouyoucos المزود بمقياس الرطوبة

الشكل (6–9): يوضح أنواع من أجهزة قياس الرطوبة باستخدام قالب الجبس من نموذج Bouyoucos المزود بمقياس الرطوبة

يمكن معايرة القالب بوزنه وهو جاف ثمَّ وزنه في درجات مختلفة من الرطوبة ومن ثمَّ رسم العلاقة البيانية التي تربط بين المحتويات الرطوبية المختلفة وقراءات المقاومة للجهاز.
كما يمكن إجراء معايرة قراءات المقاومة الكهربائية مقابل تعيين رطوبة التربة الوزنية (بالتجفيف) المقابلة لتلك القراءات وكان أول من استخدم هذه الطريقة بويوكس Bouyoucos الذي تعرف القوالب المستخدمة باسمه.

يستخدم حالياً بالإضافة لقوالب الجبس Resistance gypsum blocks قوالب من الجبس المشبع بالنايلون بغية إطالة فترة استخدام الجهاز وخفض معدَّل ذوبان الجبس نفسه كما تستخدم الألياف الزجاجية Fiberglass في قوالب أخرى بدلاً من النايلون ويتصل الالكترودان بسلك توصيل معدني يصل القالب بجهاز المقاومة الكهربائية الذي يعمل على بطارية (في الحقل) ويعطي مقياس المقاومة كلاً من المقاومة بالأوم Ohm والنسبة المئوية للرطوبة الوزنية في آنٍ واحد...

B- قراءة الجهاز وتفسير النتائج: تتعلق قراءة المقاومة بمحتوى التربة الرطوبي إلا أنَّ هذه القراءة تتأثَّر بكل من درجة الحرارة والناقلية الكهربائية الناجمة عن وجود الأملاح الذائبة أو الأيونات في الماء الموجود بين الكترودي القالب...

ولهذا فمن الصعب تفسير نتائج القياسات دون أن تؤخذ هذه النقاط بعين الاعتبار فمحتوى القالب الرطوبي سيكون والحالة هذه تابعاً لممال الجهد الأسموزي Osmotic potential gradient في التربة المحيطة بالقالب وذلك الموجود بين القالب والتربة مباشرة وهكذا فإن قياس رطوبة التربة بهذه الطريقة يتضمن عاملاً جديداً هو تأثير الجهد الأسموزي الناجم عن وجود الأملاح الذائبة في التربة والذي كان مهملاً في طرق القياس السابقة..

وقد وجد تجريبياً أن الناقلية الكهربائية ترتبط بتركيز الأملاح في المحلول الأرضي بالعلاقة التجريبية التالية:

$$m \cdot e / L = K \cdot (EC)$$

حيث أنَّ:

m. e / L : ميلي مكافئ / ليتر من محلول التربة....

EC: الناقلية الكهربائية لمحلول التربة بالميلي مو / سم (m.mho/cm) ...

K: ثابت تتراوح قيمته بين 8 و 20 و يؤخذ على أنه يساوي K = 12.5 في المتوسط....

مزايا ومساوئ هذه الطريقة:

- تؤثّر درجة الحرارة في نتيجة القياس لأنَّ ارتفاعها يؤدّي لزيادة حركة الأيونات في محلول القالب مما يجعل قراءات المقاومة تختلف باختلاف لزوجة الماء التي تكون منخفضة عند درجات الحرارة المرتفعة مما يؤدّي إلى نتائج مرتفعة في محتوى التربة الرطوبي ولذا فمن الضروري إجراء تصحيح قراءات الجهاز عند درجة حرارة 20 مئوية...

- يتراوح مدى حساسية القياس لقالب بويوكس الجبسي عند قوى التوتر الرطوبي الواقعة بين 0.3 و15 ضغط جوي في حين يتراوح هذا المدى بالنسبة للتنسيومترات بين 0.001 و0.9 ضغط جوي كما تبدأ قراءة المقاومة انطلاقاً من 500 أوم التي تعادل 25 سم زئبق (أي تزيد قليلاً عن مستوى رطوبة السعة الحقلية) وحتى 5000 أوم التي تقابل نصف تدريج المقياس.

- يفضل إجراء معايرة قوالب بويوكس الجبسية مقابل قوى توتر رطوبية مختلفة للربط بين قراءات المحتوى الرطوبي أو المقاومة الكهربائية التي يشير إليها المقياس ودرجة التوتر الرطوبي الحقيقية في التربة...

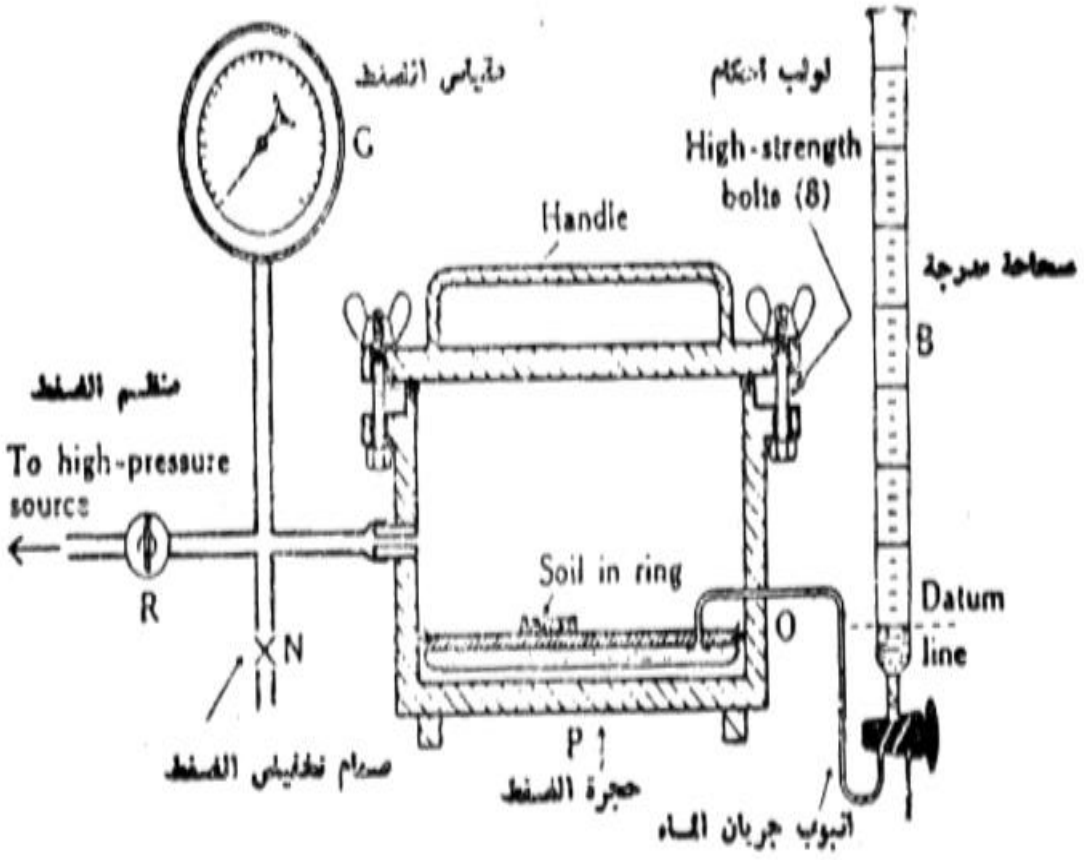
- نظراً لصناعة القوالب من الجص فإنَّ المحلول المحصور بين الكترودي القالب يكون مساوياً في تركيزه لمحلول مشبع من كبريتات الكالسيوم المائية وهذا ما يعمل كمحلول منظم Buffer يكبح التأثير الناجم عن التغيرات الطفيفة التي قد تعتري تركيز المحلول الأرضي نتيجة عمليات التسميد أو وجود مستوى منخفض من الأملاح...

- تزداد عملية تآكل قوالب الجص نتيجة الإذابة المستمرة لمادة القالب نفسه مما يجعل العلاقة بين المقاومة الكهربائية والتوتر الرطوبي في التربة تختلف ليس فقط من قالب لآخر بل وبالنسبة لقالب بعينه مع مرور زمن استخدامه حيث تزداد مسامية القالب وتتسع أبعاد فراغاته..
- ينصح بعدم استخدام هذه الطريقة في الترب ذات المحتوى المرتفع من فلزات الطين القابلة للانتفاخ (مجموعة السميكتيت) لأنَّ مثل تلك الفلزات يؤدّي إلى تشقق التربة عند انكماشها مما يقلل من التماس المباشر بين القالب والتربة ويفضي إلى قراءات خاطئة عند المستويات الرطوبية المنخفضة....

5- غشاء الضغط وطاولة التوتر: Pressure membrane and table tension

تستخدم في هذه الطريقة ضغوط موجبة تتراوح بين صفر و20 بار (الشكل، 6–10) وقد تصل في بعض التجهيزات الثقيلة إلى 100 بار ولهذا فإنه يمكن قياس طاقة ارتباط الماء بالتربة في حدود كبيرة جداً تصل إلى مستوى معامل الذبول الدائم (عند15 بار)..

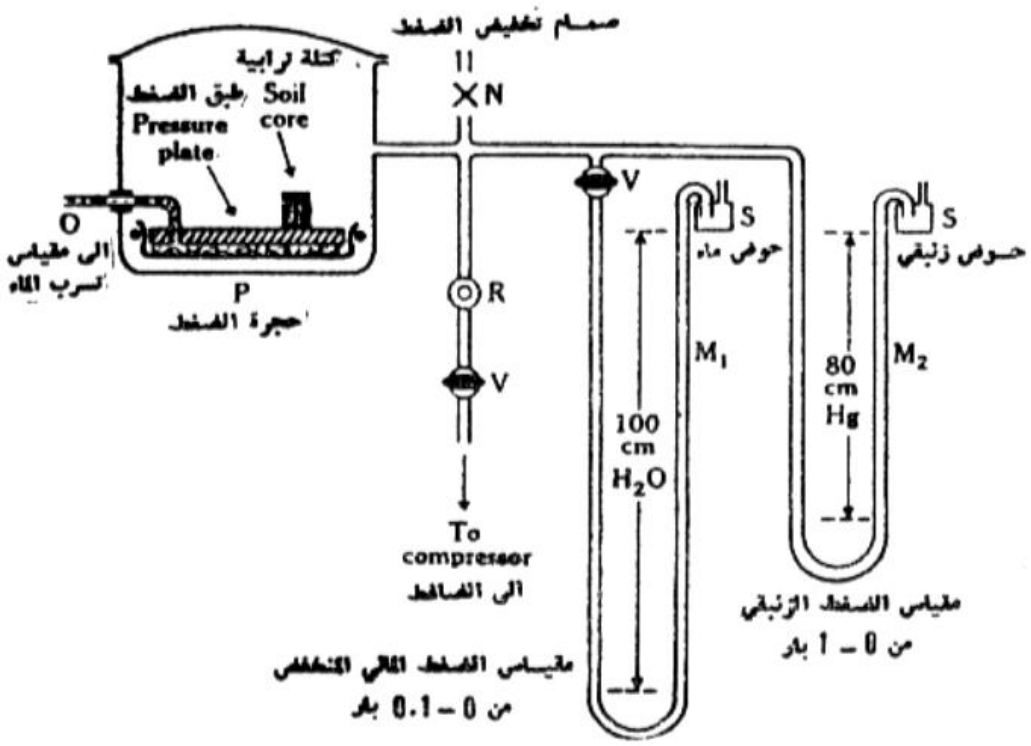
وهكذا توضع التربة فوق صفيحة الضغط Pressure plate النفوذة للماء ضمن حجرة مغلقة وتعرض للضغط المطلوب ثم توزن لمعرفة محتواها الرطوبي عند نقطة التوازن مع الضغط المطبق عليها..ويتألف الجهاز من حجرة الضغط المعدنية التي تغلق بإحكام ويمكنها تحمّل الضغوط العالية وصفيحة نفوذة مصنوعة من الخزف (السيراميك) والنيوبرين Neoprene التي توضع عليها العينات الترابية المراد تعيين رطوبتها والتي يمكن أن تكوّن كتلة ترابية بوضعها الطبيعي في الحقل أو مضطربة توضع في أسطوانة معدنية مفتوحة من طرفيها.....



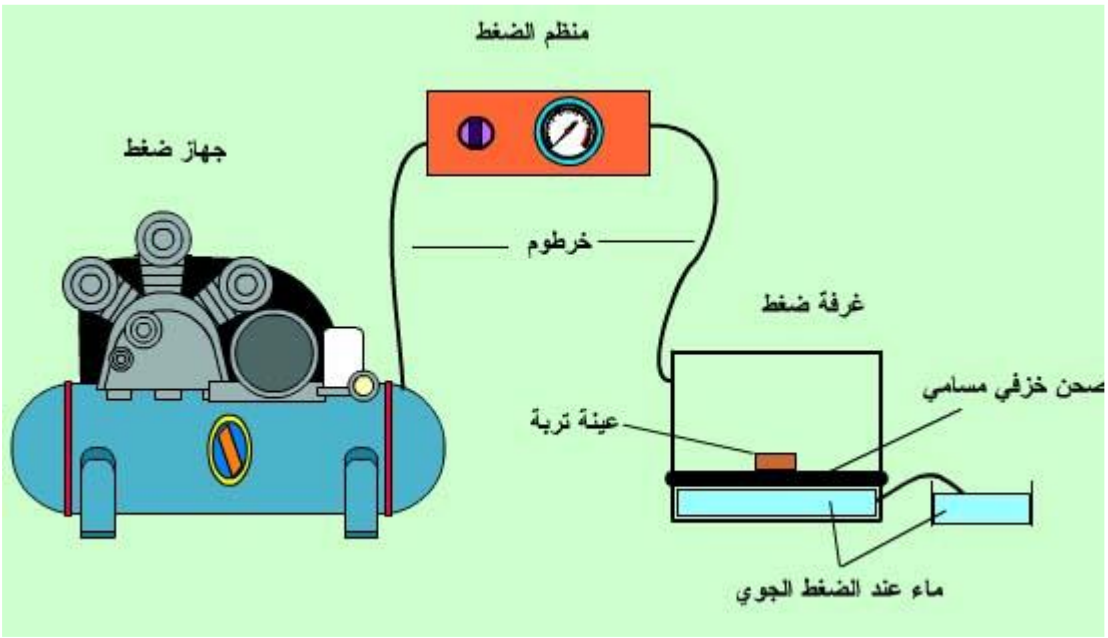
الشكل(6–10): يبين طنجرة الضغط ذات الصفيحة للضغوط العالية (من 0-15 بار وأكثر)

يمكن التحكّم بواسطة هذا الجهاز (الشكل، 6– 10) بمقدار الضغط المطبق على العينات الترابية وهكذا فمن أجل الضغوط المنخفضة يمكن تعريض عينات التربة الموضوعة على الصفيحة النفوذة إمَّا لضغط يتراوح بين (0 و0.1) بار (M1) أي ما يعادل ارتفاع عمود من الماء قدره 100 سم أو لضغط يتراوح بين 0 وأكثر من 1بار بقليل (M2) أي ما يعادل 80 سم زئبق أو 1088 سم ماء...

تكون التربة الموضوعة على الصفيحة النفوذة معرضة لضغط يعادل ارتفاع عمود الماء في M1 أو ارتفاع عمود الزئبق في M_2... وبذلك يمثل محتوى التربة الرطوبي عند التوازن مع هذه الضغوط الماء المكافئ لهذه المستويات من الضغوط أو التوترات.



الشكل (6-11): يبين طنجرة الضغط ذات الصفيحة للضغوط المنخفضة
(بين 0-0.1 بار ومن 0-1 بار)



الشكل رقم (6-12): يبين جهاز طبق الضغط لقياس الجهد الماتري للتربة، في المعمل، إلى قيم، تصل إلى −15 بار

مكونات طبق الضغط:

- **Air Compressor** جهاز لضغط الهواء، إلى **15** بارًا

– **Manifold**.مفتاح منظم للتحكم في مقدار الضغط

– **Pressure Cell**غرفة الضغط مكونة من :

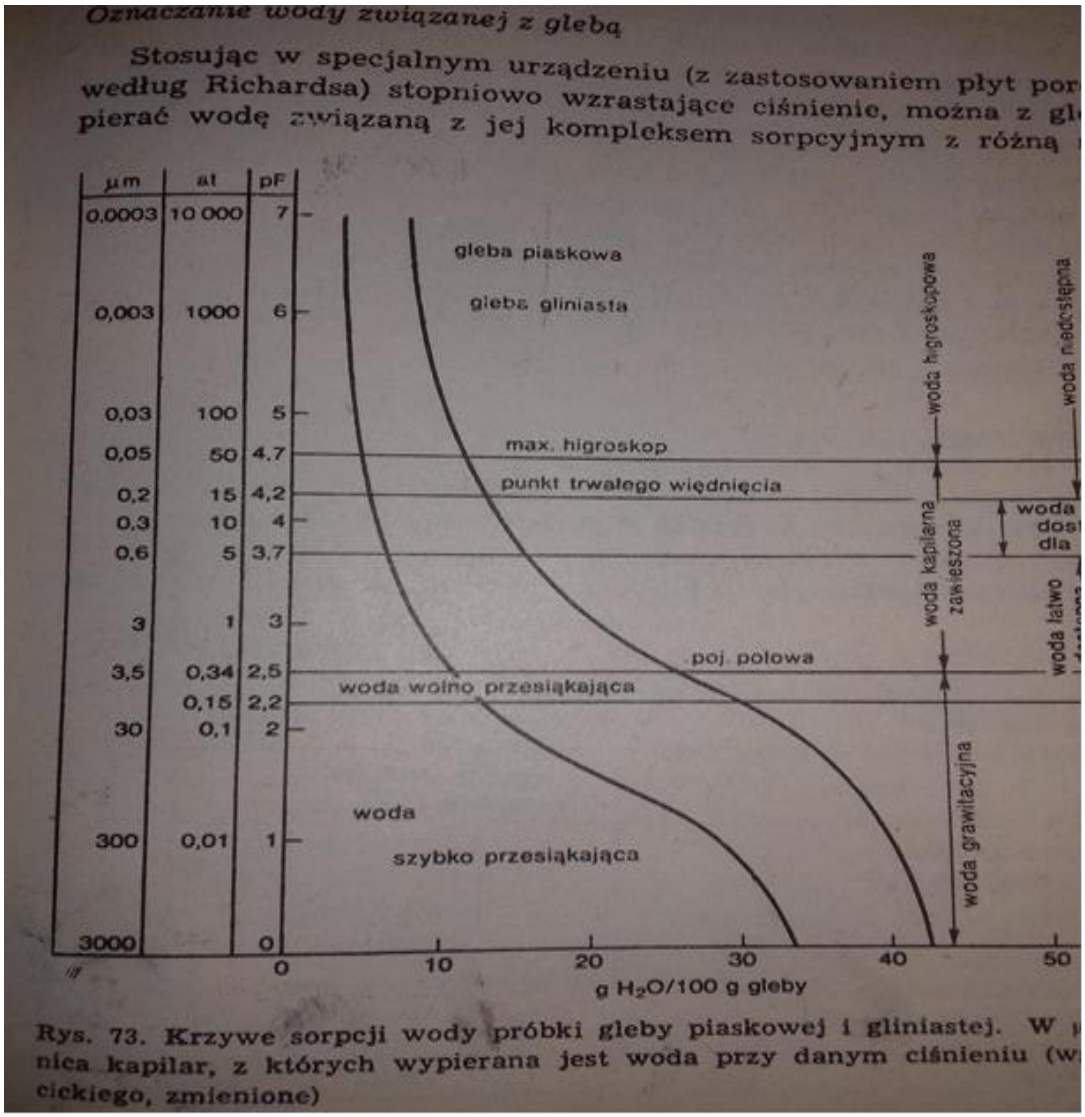
* خلية ضغط

*غرفة تتحمل الضغط إلى أكثر من 15 باراً.

*طبق أو صحن ضغط خزفي مسامي توضع فوقه عينات التربة الرطبة.

* انبوب شعري يصل بين طبق الضغط داخل حجرة الضغط والوسط الخارجي إلى حوض لتجميع الماء المستخلص من عينة التربة.

شكل (6-13): جهاز القرص المسامي لتقدير منحنى الشد الرطوبي



الشكل رقم (6-14): يوضح منحني خصائص الرطوبة المميز

----------نهاية المحاضرة العاشرة----------