مقدمة الطبعة الثالثة

الحمد لله وحده والصلاة والسلام على من لا نبي بعده ، وبعد..

لقد نفدت الطبعة الثانية (١٤١٨هـ) من هذا الكتاب"العلاقات المائية في النبات"، وها هي الطبعة الثالثة بعد أن تمت مراجعة وتصحيح بعض الأخطاء المطبعية. وقد تم إضافة صفحة وشكل كانا موجودين في الطبعة الأولى ولكنها أسقطت في الطبعة الثانية كما تم تلافي بعض النواقص مثل إضافة أو تعديل شكل أو مرجع. ويود المؤلف التنويه أيضا بأنه لم يغير نمط التبويب والعرض والإخراج عن الطبعة الثانية .

أرجو من الله العلي القدير أن أكون قد وفقت في تحقيق الهدف المتواضع لخدمة الدارسين والباحثين من أبنائنا الطلاب، وأن يسد هذا الكتاب ثغرة بسيطة في مجال فسيولوجيا النبات .

والله من وراء القصد.

المؤلـــــف

الرياض جماد الأولى ١٤٣١هـ

obeikandl.com

مقدمة الطبعة الثانية

الحمد لله رب العالمين، جلَّ وعلا، والصلاة والسلام على خاتم الأنبياء، وبعد:

لقد نفدت الطبعة الأولى (١٤٠٤هـ) من هذا الكتاب، وهاهي الطبعة الثانية بعد أن تمت مراجعتها وإضافة ما استجد في مجال العلاقات المائية، خاصة ما يتعلق بهذه المنطقة من العالم وما شابهها وأيضاً حسب الإمكانات المتاحة في هذا المجال.

كما هو معروف فإن بحوث العلاقات المائية للنباتات، خاصة النباتات البرية قليلة جداً. لقد حاولت بادئ ذي بدء تصحيح بعض الأخطاء البسيطة وإضافة ما قد سقط سهواً أثناء الإعداد و الطبع. تلى ذلك إضافة ما أمكن الحصول والإطلاع عليه من بحوث في هذا المجال خاصة النباتات الصحراوية، نظراً لأن الجفاف سائد في هذه المنطقة، وتم التركيز على معدلات النتح بها والتنظيم الأسموزي لهذه النباتات نتيجة لتعرضها للإجهاد المائي، وهذا أمر يهتم به علماء المنطقة في الوطن العربي أكثر من اهتمام الباحثين في المناطق الأخرى.لقد تعمدت إضافة بعض المراجع عن النباتات الصحراوية في الوطن العربي رغم أن معظمها قد مضى على نشره وقت غير قصير، وهذه لم تظهر لي عند إعداد الكتاب وقد يكون ذلك عائد لتوزيع مثل هذه المطبوعات أو ملخصاتها. أيضاً تم إدراج بعض التغيرات الأيضية في النبات نتيجة للإجهاد المائي مثل الحموض الأمينية والنووية.

obeikandi.com

أود في هذا المقام أن أهدي هذه الطبعة من الكتاب إلى أستاذي المرحوم الأستاذ الدكتور/أحمد محمد مجاهد نظراً لما قام به من أعمال في مجال علم النبات، وما عُرف عنه من التحمل والصبر والمثابرة على العمل، ناهيك عن حسن توجيهه لأبنائه الطلاب مما جعله قدوة يحتذى بها. كذلك أود التقدم بالشكر والعرفان لأساتذتي الأفاضل وزملائي الأعزاء في داخل القسم وخارجه لما قاموا به من نصح ونقد بنّاء في سبيل تحسين وتسهيل المعلومات الواردة في الكتاب.

أرجو أن أكون قد وفقت في هدفي المتواضع لخدمة الدارسين والباحثين من أبنائنا الطلاب، وأن يسد هذا الكتاب ثغرة بسيطة في مجال فسيولوجيا النبات.

والله من وراء القصد.

المؤلـــــف

obeikandl.com

مقدمة الطبعة الأولى

تبدو دراسة العلاقات المائية للنباتات من المواضيع المباشرة لكنها في الغالب قد تكون من أكثر المواضيع في علم وظائف أعضاء النبات صعوبة في الفهم، وقد يعود سبب ذلك إما لعدم تغطية الموضوع أثناء الدراسة الجامعية تغطية كاملة أو لعدم وجود خلفيات أساسية لدى الطالب تكفي لاستيعاب هذا الفرع، لذا فقد جرى اختيار هذا الموضوع كمحاولة ثانية للكتابة في أحد فروع علم وظائف أعضاء النبات حيث كانت الأولى عن التنفس. وعليه فإن هذا الكتاب ما هو إلا محاولة لتزويد المكتبة العربية بكتاب جديد في موضوعه أولاً ولتبسيط دراسة العلاقات المائية للنبات للدارسين والمهتمين بها ثانياً بحيث يغطي معظم النواحي المهمة في علاقة النبات بالماء، وقد جرى تقسيم الموضوع إلى عدة فصول من المعتقد أنها تكفي كمدخل أو قاعدة عامة لعنوان ذلك الفصل، ويجب التنويه أنه قد تكررت بعض النقاط حيث لا مناص من ذلك وكذلك لم تذكر جميع المراجع لكثير من الحقائق العلمية لأنه لم يكن القصد أساساً رصد جميع الأعمال والبحوث في هذا المجال، إلا أنه من اليسير جدا للمهتم بذلك أن يرجع إلى المراجع الرئيسية المشار إليها في النص بين آونة وأخرى وكذلك المراجع لجميع الرسومات البيانية والجداول المستشهد بها. وكما هو الحال في معظم المراجع والدراسات الحديثة في هذا الموضوع فقد جرى التركيز على النواحي الكمية أكثر من

النواحي الوصفية وكذلك المصطلحات الحديثة في العلاقات المائية والتي بُدِأَ في تطبيقها منذ العشرين عاما الماضية تقريباً إلا أنه في الوقت نفسه ذكرت بعض المصطلحات القديمة للمقارنة ليس إلا ، وبذا فإنه من المؤمل أن يكون لهذا الكتاب فائدته لا بالنسبة للطال الجامعي فحسب ولكن لطلاب الدراسات العليا والمهتمين بموضوع العلاقات المائية للنبات.

وأخيراً أود التعبير عن تقديري وامتناني لكل من ساهم في إخراج هذا الكتاب إلى حيز الوجود.

والله من وراء القصد.

المؤلـــــف

obeikandl.com

الفصل الأول

الماء والنبـات

• المقدمة • دورة الماء • أهمية الماء للنبات • المحتوى المائي للنبـات

(١-١) المقدمة

يعد الماء عصب الحياة كما يعرفه العالم والرجل العادي، وإن اختلفت النظرة حيث لا يمكن تصور وجود حياة بالشكل المتعارف عليه دون ماء. ولا غرو إذاً في كون الأقدمين قد اعتبروا الماء عنصرا قائما بذاته حتى وقت ليس بالبعيد، وهو منتصف القرن الثامن عشر الميلادي عندما اكتشفت العناصر المكونة له. وترى أكثر النظريات رواجاً عن بداية الحياة على الأرض أن الكائنات الحية الأولى البسيطة كانت تنمو في وسط مائي مثلها في ذلك مثل ما يعرف من كائنات مائية في الوقت الحاضر، إلا أن بعض الكائنات أثناء تطورها انفردت بطريقة وسط في الحياة مثل البرمائيات ونباتات المستنقعات بينما البعض الآخر ابتعد في الظاهر ولكن ما زال يعتمد على الماء في حياته مثل بقية الكائنات الحية.

تنمو معظم النباتات الراقية مثل الكائنات الحية الأخرى حيث يوجد الماء، ومع ذلك فزيادة الماء أو قِلّتِه يحدان من نموها، وأقرب مثل لذلك ما يشاهد في الصحاري

أثناء مواسم الربيع عند توافر الماء حيث تنمو فيها أنواع وكميات كبيرة من النباتات تكفي لازدهار الحياة الاقتصادية لمن يقطن بها، ثم لا تلبث أن تقفر وبصورة سريعة عندما يشح الماء. وبالمثل، تندثر النباتات من رقعة الأرض عندما تزداد كمية الماء كما يحدث في البحيرات المتكونة بعد إنشاء السدود ليحل محلها أنواع مائية أخرى. من هنا، فإن الحالة المثلى للنباتات الراقية هي وجود حالة اتزان بين كمية الماء والغطاء النباتي. يتحكم في توزيع الغطاء النباتي على الكرة الأرضية سهولة الحصول على الماء (بالإضافة إلى الحرارة) أكثر من بقية العوامل البيئية الأخرى. فالمناطق التي أمطارها غزيرة ومنتظمة في فصول النمو تكثر فيها النباتات مثل غابات الجبال دائمة الأمطار والغابات الاستوائية، أما إذا قل الماء نسبيا فتحل النباتات العشبية محل الغابات، حيث الجفاف واضح في فصل الصيف، أما إذا قلت كمية المطر عن ذلك، فإن الأرض تتحول إلى مناطق شبه قاحلة التي يميزها وجود الشجيرات المتناثرة، وأخيرا المناطق القاحلة وتشمل الصحاري حيث تيارات الهواء الدافئة النازلة التي تتسبب في قلة الأمطار. ويمكن تصور الوضع بالانطلاق من خط الاستواء والاتجاه إلى القطب غير أن تداخل تأثير الحرارة بعد مناطق الصحاري يبدأ في الوضوح كلما قلت المسافة نحو القطب.

من ناحية أخرى، نجد أنه من الشائع تقسيم النباتات عموما حسب احتياجاتها المائية وبيئات نموها إلى أقسام هي:

١ – النباتات المائية Hydrophytes

ويمثل مجموعة النباتات المائية عدداً من النباتات التي تنمو مطمورة أو شبه مطمورة في الماء، ولذا ظهرت بها بعض الصفات التحورية لملاءمة مثل هذه البيئات. من هذه التحورات رِقَّة الأدمة لتسمح بانتشار الأكسجين لأن أكثر ما تعاني منه

النباتات المائية هو قِلّة الأكسجين لأن ذوبانه في الماء قليل بالنسبة لهذه النباتات. من هنا فقد تحورت بدورها بعض الأنسجة لتكوين فراغات هوائية تسمح بتهوية النبات. ومن التحورات، أيضا، انعدام الثغور أو عدم فعاليتها وكذلك قلة الأنسجة التوصيلية والدعامية والجذور. تساعد الفراغات الهوائية أعضاء النبات على الطفو والبقاء في المكان المناسب للتعرض إلى أكبر كمية من الضوء للقيام بوظيفة البناء الضوئي. من أمثلة هذه النباتات نبات الأقحوان المائي (رجل الغراب) (*Ranunculus aquatilis*) والألوديا (*Elodea canadensis*).

٢- النباتات الرطوبية Hygrophytes

وهي النباتات التي تنمو في الأماكن الرطبة مثل العديد من الحزازيات والسراخس والأشن حيث الرطوبة النسبية العالية غالبا والتربة المشبعة بالماء، وإذا كان المكان ظليلا فالأوراق ذات المساحات الكبيرة تكون أكثر فعالية في عملية البناء الضوئي. من مميزات النباتات الرطوبية أنها تتحمل الجفاف المؤقت لتعاود النمو مرة أخرى عند توافر الماء.

٣- النباتات المتوسطة Mesophytes

لقد سميت بالنباتات المتوسطة لأنها تحتاج إلى كميات من الماء أقل من المجموعتين السابقتين وأكثر من المجموعة اللاحقة. تنمو نباتات هذه المجموعة وتزدهر في بيئات ذات تربة جيدة التهوية وأوراق هذه النباتات عرضة لهواء متوسط الرطوبة النسبية. يميز نباتات هذه المجموعة، أيضا، وجود آلية تتحكم في كمية الماء المفقود منها عن طريق التحكم في حجم فتحات الثغور، ومن الأمثلة على نباتات هذه المجموعة معظم نباتات المحاصيل.

obeikandl.com

٤– النباتات الجفافية Xerophytes

وتشمل النباتات التي تتحمل الظروف الجافة، لأنها قد تحورت بشكل يكفل احتفاظها بالتوازن المائي بين أنسجتها وبيئتها الجافة. ومن هذه التحورات اختزال المجموع الخضري وكبر المجموع الجذري وهناك تحورات أخرى مثل سمك الأدمة ووجود الشعيرات أو أن تكون الثغور غائرة، إلى غير ذلك من الصفات التي تضمن الإقلال من فقد الماء. تقسم مجموعة النباتات الجفافية إلى أقسام سيرد الحديث عنها في موضوع الإجهادات المائية ويمثل هذه المجموعة معظم النباتات الصحراوية غير الحولية.

يلاحظ بالمثل أيضا أن هناك ما يعرف بالنباتات الحلوة (السكرية) (Glycophytes) والنباتات الملحية (Halophytes) حسب حساسية النبات للأملاح ، أما الكائنات الملحية الأخرى غير النباتية فيطلق عليها محبة للأملاح (Halophiles) .

(١–٢) دورة الماء

إن العناصر وبعض المركبات على هذه الأرض في حركة مستمرة وتغير دائم ولا تبقى على حالة ثابتة إلى الأبد، فقد يتحول العنصر إلى أكسيده باتحاد ذلك العنصر مع عنصر الأكسجين وبالمثل فقد تتحول المركبات إلى مركبات أقل أو أكثر تعقيدا. وتساهم الأحياء (كالنباتات والحيوانات والبكتيريا والفطريات) والتربة مساهمة أساسية في تغير وضع كثير من العناصر والمركبات الموجودة في الطبيعة ومن حالة إلى أخرى فيما يعرف بدورة ذلك العنصر (دورة الكربون أو دورة النيتروجين مثلا) أو دورة المركب (دورة الماء مثلا). والدورة حلقة من التغيرات تبدأ وتنتهي من حيث بدأت لتعيد الكرَّة مرات ومرات.لقد تم تعريف هذه الدورات للعديد من العناصر والمركبات وتحديدها بأشكالها

obeikandl.com

المعروفة للتمييز والتحليل ولكن هذه الدورات جميعا مرتبطة مع بعضها البعض في إطار متكامل ومستمر حسب نواميس هذا الكون. تشتمل الدورة، أيضا، على تغيرات طبيعية كما يحدث للماء حين يتحول من الحالة السائلة إلى الحالة الغازية (بخار) أو العكس فيما يعرف بعمليتي التبخر أو النتح وعملية التكثيف على التوالي، وبالمثل، هناك تغيرات كيميائية في الدورة كما يحدث للماء في الأحياء، ودخوله في بعض العمليات الحيوية مثل البناء الضوئي وكلا النوعين من التغيرات يشتمل على استهلاك للطاقة أو إنتاج لها. ويبين الشكل التالي (الشكل رقم ١-١) تخطيطا مختصرا لاتجاه حركة الماء في دورته الطبيعية من الأرض إلى الغلاف الخارجي ورجوعه مرة أخرى. يستنتج من الشكل السابق أن كمية الماء على هذه الأرض ثابتة ولكن توزيعها على الكرة الأرضية غير متساوٍ، والماء من أكثر المواد شيوعا وقد قدرت كميته بنحو ١,٢٥ X ٢٤١٠ جراما، وهذه الكمية كافية لتكوين طبقة من الماء حول الكرة الأرضية بعمق ٢,٥ كيلومتر لو كان سطح الكرة الأرضية مستويا. والمجال هنا لا يسمح بذكر كيفية توزيع الماء على الكرة الأرضية لأن ذلك من اختصاص بعض فروع العلم الأخرى. ولكن يمكن باختصار شديد توزيع المياه كالتالي:

١) مياه المحيطات والبحيرات والأنهار وتكون أكثر من ٩٨٪ من كمية الماء.

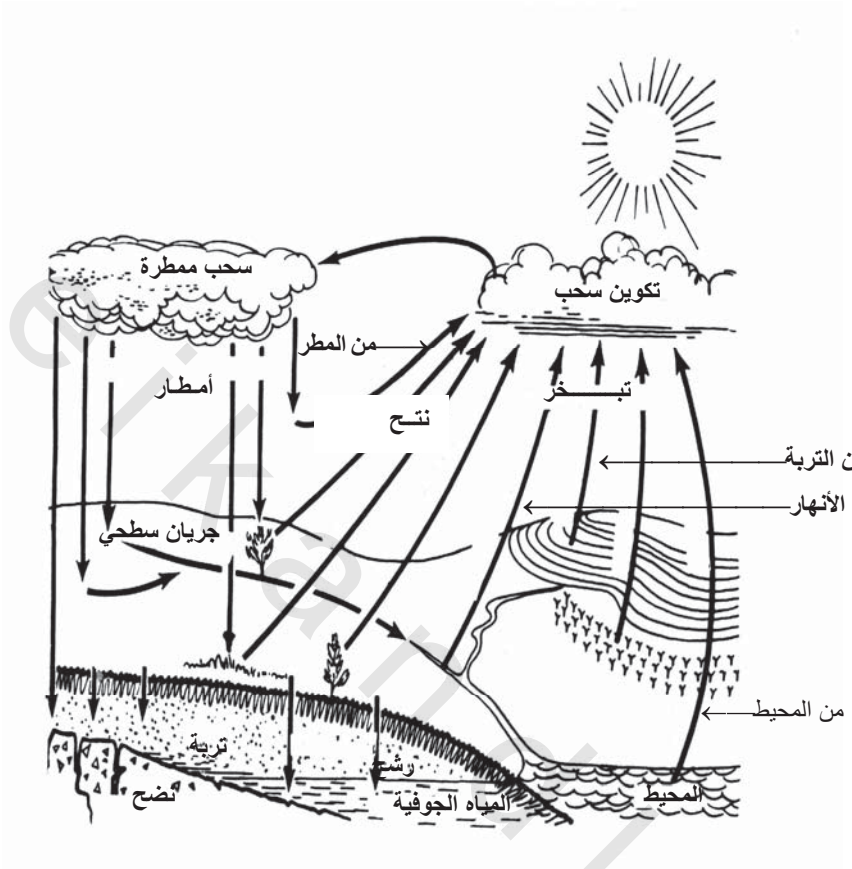
٢) المياه المتجمدة في القطبين وبعض قمم الجبال.

٣) المياه الموجودة في التربة.

٤) الماء الموجود على هيئة بخار في الغلاف الجوي للأرض.

٥) الماء الموجود في الكائنات الحية.

obeikandl.com



الشكل رقم (١-١). رسم تخطيطي مبسط لدورة الماء من الأرض إلى الغلاف الجوي ورجوعه.

هذا ويتتبع دورة الماء كما هي موضحة في الشكل نجد أن مصدر الماء الموجود في الجو على هيئة بخار هو المسطحات المائية والتربة والكائنات الحية حيث تعمل الطاقة الشمسية على تبخير كميات هائلة من الماء يوميا إلى الجو، وفي الوقت نفسه تعمل الطاقة الشمسية على تكوين الرياح التي بدورها تؤدي دورا مهما في حركة وتوزيع بخار الماء في الغلاف الجوي للكرة الأرضية حيث تيارات الهواء المارة بالمسطحات المائية

تحمل جزءاً من بخار الماء وتنقله إلى أماكن أخرى حيث ينزل على هيئة أمطار أو ثلوج. إن نزول الأمطار على معظم الأصقاع يعمل على استمرار الكائنات الحية ولكن وكما في الشكل أيضا فإن هذا الماء لا يبقى في تلك الرقعة من الأرض بل بعضه يتبخر والبعض الآخر إما أن ينجرف على سطح الكرة مكونا أنهارا أو وديان أو بحيرات وإما أن يرشح إلى باطن الأرض حيث تقوم النباتات بامتصاص جزء يسير منه بواسطة جذورها وهذا الجزء من الماء وما يحدث له داخل النبات إلى أن ينتهي على هيئة بخار ماء في الجو هو مدار هذا الكتاب. وتمثل دراسة هذا الطور من أطوار دورة الماء وعلاقته بالنبات جزءا بسيطا من دورة الماء حيث إن الشكل أعلاه عبارة عن رسم تخطيطي مبسط لتلك الدورة ويوضح الشكل العام فقط والمجال لا يتسع لشرح الدورة بالتفصيل ولو أن الدورة تشتمل على نقاط مهمة من الناحية البشرية كتعرية التربة وتوليد الطاقة من المياه الجارية وعلاقة الدورة بموارد الغذاء والفيضانات وما إلى ذلك، وعلى العموم فالسبب الرئيسي لذكر الدورة هنا ما هو إلا لتبيان مدى تداخل هذه الدورة ونسب الموضوع إلى فرعه الأصلي من العلم.

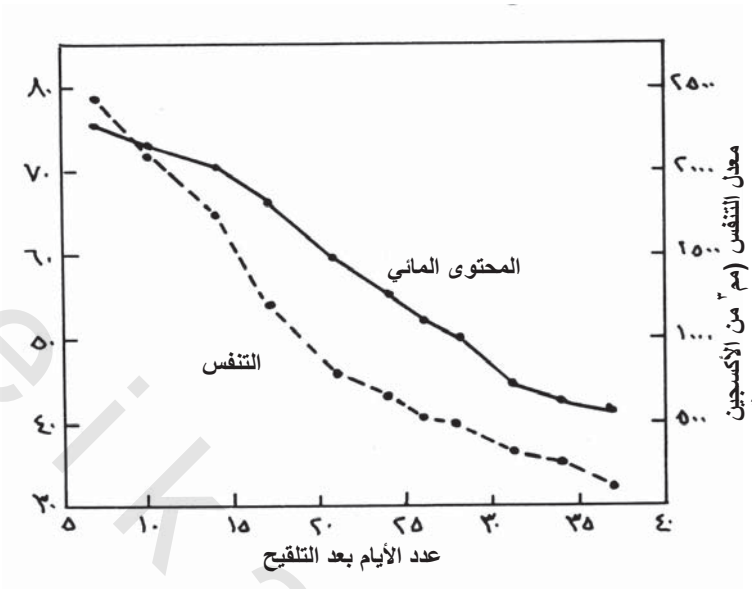
(١–٣) أهمية الماء للنبات

تعود أهمية الماء كعامل بيئي في توزيع النباتات وأماكن تواجدها (بالإضافة إلى الحرارة) إلى دور الماء في حياة النبات وأهميته الفسيولوجية حيث إن غالبية العمليات الفسيولوجية داخل النبات تتأثر بطريقة مباشرة أو غير مباشرة بوجود الماء كما سيلحق، ويمكن تلخيص أهمية الماء للنباتات كمثل للكائنات الحية بذكر أهم وظائف الماء في النباتات:

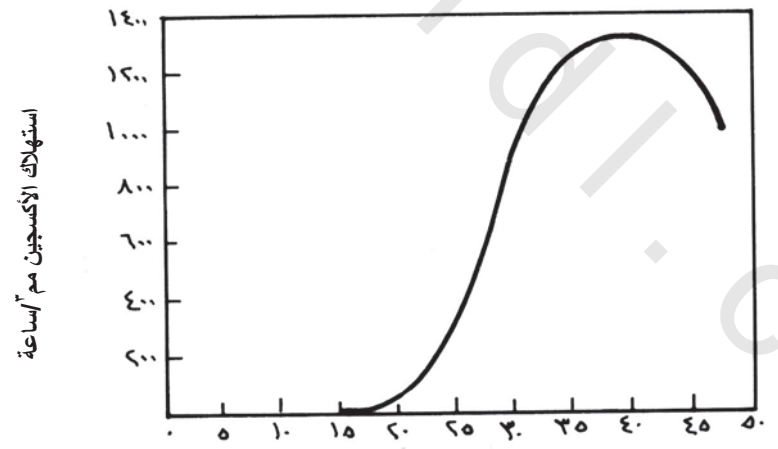
١- الماء والمادة الحية

يدخل الماء في تركيب المادة الحية (البروتوبلازم) حيث يكون أكثر من ٥٠٪ من الوزن الرطب للنباتات الخشبية وما بين ٨٥- ٩٥٪ من الوزن الرطب لكثير من النباتات العشبية حسب نوع النبات أو الجزء المستخدم كما سيرد عند ذكر المحتوى المائي للنباتات. ويرتبط نشاط البروتوبلازم بكمية الماء الموجودة فيه حيث كمية الماء تحدد وجود البروتوبلازم كمائع أو متصلب نوعا ما "جل" (Gel) ولذا فكمية الماء تحدد مرونة وتلاصق مكوناته، وعلى أية حال فنشاط البروتوبلازم ينقص بنقصان كمية الماء حتى تصل إلى حد معين بعده تموت الخلية وذلك لأن المواد السكرية والبروتينات والأحماض النووية تتطلب وجود الماء في حالتها الطبيعية، ونقصان الماء يغير من الخواص الطبيعية لتلك المواد مؤديا إلى الإخلال بالتوازن في تركيب البروتوبلازم وبالتالي موت الخلية ومع أن هذه القاعدة تسري في معظم الحالات بالنسبة للخلايا والأنسجة إلا أن هناك بعض أنواع من النباتات أو بعض أجزاء من النباتات تشذ عن ذلك بحيث يمكن أن تصل إلى درجة جفاف الجو أو حتى بالمعاملة بدرجات الحرارة العالية نوعا ما لتجفيفها دون أن تفقد حيويتها نتيجة لوجود آلية خاصة لم يكشف النقاب عنها، والأمثلة لذلك بعض الأشن وبذور بعض النباتات وبعض الأبواغ. على العموم يمكن القول بأن قلة المحتوى المائي تؤدي إلى إقلال ملحوظ في النشاط الفسيولوجي كما في الشكل رقم (١-٢) حيث تتضح العلاقة بين معدل التنفس والمحتوى المائي لبذور نبات الشيلم (rye) أثناء اكتمال نموها.

ويلاحظ أن هذه العلاقة عامة في غالبية الأنسجة النباتية. وبالنظر إلى العملية من زاوية أخرى نجد أن معدل التنفس يزداد بازدياد المحتوى المائي لبذور نبات الشوفان كما في الشكل رقم (١-٣).في الشكل السابق يلاحظ أن الزيادة الكبيرة في معدل التنفس



الشكل رقم (١–٢). العلاقة بين معدل التنفس والمحتوى المائي لبذور نبات الجاودار أثناء اكتمال نموها (عن شيرك ١٩٤٢) Shirk, 1942.



الشكل رقم (١–٣). العلاقة بين المحتوى المائي ومعدل التنفس لبذور الشوفان. (عن باكي ونويكر ١٩٣٣) Bakke and Noecker, 1933.

مع الزيادة في المحتوى المائي بعد نحو ١٦٪ يدل على أن الماء المرتبط لا يدخل في العمليات الفسيولوجية. من الناحية التطبيقية تعد هذه الظاهرة ذات أهمية كبرى عند تخزين الحبوب حيث يجب المحافظة على مستوى الرطوبة النسبية وإبقائه منخفضا لأن زيادة المحتوى المائي للبذور يعمل على زيادة معدل التنفس وبالتالي تلف البذور. وبالمثل في العمليات الفسيولوجية الأخرى نجد أن نقص الماء يخفض من معدل البناء الضوئي وغيره كثير من عمليات الأيض الأساسية للخلية.

٢- الماء كمادة تفاعل

يشارك الماء في كثير من التفاعلات الكيميائية التي تحدث داخل الخلية مثل تفاعلات التحلل المائي (Hydrolysis) للنشا إلى سكر أو التكثيف وذلك بإضافة أو نزع جزيء من الماء على التوالي. وهذه الأنواع من التفاعلات مهمة في عمليات الأيض. وهناك مثل آخر لمشاركة الماء في التفاعلات وهو أن الماء يعد مصدرا لذرات الهيدروجين المهمة في عملية اختزال ثاني أكسيد الكربون في عملية البناء الضوئي ولا يقل أهمية عن ثاني أكسيد الكربون في هذه العملية خاصة في النباتات الراقية. ويعد الماء في هذه العملية أيضا مصدر التعادل والاتزان الجوي لتركيز الأكسجين والمحافظة على نسبته في الجو حيث في التنفس يستغل الأكسجين وفي البناء الضوئي يتحرر، وكما سبق فمصدر الأكسجين هو الماء.

٣- الماء كمذيب

يعمل الماء كمذيب لمعظم المواد التي تدخل في تفاعلات الخلية مثل السكاكر والأحماض وكمذيب أيضا للغازات والمعادن التي تدخل إلى خلايا النبات أو تنتقل ما بينها كما سيرد لاحقا عند الحديث عن خواص الماء. ومما يساعد في ذلك كون جدر

وأغشية الخلايا منفذة للماء بسهولة وينتج عن ذلك استمرارية في الطور السائل في كل أرجاء النبات حيث تحدث عمليات النقل، وبذا فإن خلايا النبات متصلة ببعضها البعض وكأنها تسبح في وسط مائي.

٤- الماء وضغط الامتلاء

تحوي الفجوات الموجودة عادة في الخلية النباتية كميات كبيرة من الماء للمساعدة في بقاء الخلية ممتلئة (Turgid) نظرا لخاصية الماء في كونه لا ينضغط عند الضغط الجوي العادي. لذا فإن وجوده بهذه الكمية يؤدي إلى الاحتفاظ بشكل الخلايا وبالتالي العضو الذي تكونه تلك الخلايا، فمثلا خلايا أوراق النباتات العشبية ترتخي وتتهدل عندما تفقد تلك الخلايا جزءا كبيرا من مائها ولذا يقال عنها ذابلة أو خاوية (الشكل رقم ١-٤). وامتلاء الخلية (أي تكوين ضغط الامتلاء) ضروري لكبر الخلايا ونموها وبالتالي نمو النبات ككل ومن الصعب تصور عملية النمو دون الأخذ بالحسبان امتصاص الخلايا التي في طور الاستطالة للماء. وما عملية انفتاح الثغور في النبات عندما يتوافر الماء وانغلاقها عندما يقل إلا ظاهرة من ظواهر ضغط الامتلاء. وهناك أيضا حركة الأوراق في بعض النباتات نتيجة لامتلاء خلايا متخصصة تعرف بالخلايا الحركية (Bulliform cells). وكذلك حركة انفتاح وانغلاق بعض الزهور وغير ذلك كثير من التراكيب النباتية المتخصصة.

٥- وظائف أخرى

يقوم الماء بعدة وظائف أخرى في النباتات ككونه الوسط الذي تنتقل فيه الأمشاج في غالبية النباتات الأولية وبعضا من النباتات الزهرية والأبواغ وبعض البذور وأحيانا الثمار كوسيلة للانتشار. وبالنسبة للنباتات المطمورة وشبه المطمورة فالماء

يساعد في تدعيم المجموع الخضري لمثل هذه النباتات وبقائه في الوضع الأمثل بالنسبة لنمو النبات.

(أ) حالة الإرتواءة (ب) حالة الذبول

الشكل رقم (١–٤). نبات سالفيا *Salvia divinorum* في حالة الإرتواء والذبول.

المصدر: sageseeds.info/tutorials/tips.php

(١–٤) المحتوى المائي للنباتات

ذكر سابقاً أن الماء يشكل أكثر من ٥٠٪ للنباتات الخشبية وقد يصل إلى ٩٠٪ في النباتات العشبية، وذكر، أيضا، أن الماء يشكل طورا سائلا في جميع أجزاء النبات وتأثر حيوية البروتوبلازم بنقص الماء. يلاحظ أيضا أن معظم عمليات النمو في النبات تتوقف عند تغير المحتوى المائي بنسبة ٢٠- ٢٥٪ من المحتوى المائي للعضو النباتي عندما يكون في حالة امتلاء تام. والطريقة الشائعة لتقدير المحتوى المائي للنبات أو أحد أجزائه

هي طريقة الوزن والتجفيف في الفرن عند درجة حرارة ٨٠° م إلى ١٠٥° م حتى يتوصل إلى وزن ثابت ومن ثم نسبة الفرق إلى الوزن الرطب الأصلي. والجدول رقم (١-١) يوضح المحتوى المائي لأجزاء نباتات مختلفة.

الجدول رقم (١-١). المحتوى المائي لأجزاء نباتات مختلفة كنسبة مئوية من الوزن الرطب. (*).

النبات		العضو	الجزء المستخدم	المحتوى المائي
الشعير	*Hordium vulgare*	الجذر	القمة النامية	٩٣,٠
الصنوبر	*Pinus taeda*	الجذر	القمة النامية	٩٠,٢
الصنوبر	*Pinus taeda*	الجذر	المنطقة المعرضة للفطريات	٧٤,٨
تباع الشمس	*Helianthus annuus*	الجذر	متوسط المجموع الجذري	٧١,٠
الهليون	*Asparagus officinalis*	الساق	قمة الساق	٨٨,٣
تباع الشمس	*Helianthus annuus*	الساق	متوسط الساق لنبات عمره ٧ أسابيع	٨٧,٥
الصنوبر	*Pinus banksiana*	الساق	-	٤٨- ٦١
الصنوبر	*Pinus echinata*	الساق	اللحاء	٦٦
الصنوبر	*Pinus echinata*	الساق	الخشب	٥٠- ٦٠
الصنوبر	*Pinus taeda*	الساق	الأغصان	٥٥- ٥٧
تباع الشمس	*Helianthus annuus*	الأوراق	متوسط كل الأوراق لنبات عمره ٧ أسابيع	٨١,٠
القرنبيط	*Brassica oleracea*	الأوراق	مكتملة النمو	٨٦,٠
الذرة	*Zea mays*	الأوراق	مكتملة النمو	٧٧,٠

obeikandl.com

تابع الجدول رقم (١-١). (*).

النبات		العضو	الجزء المستخدم	المحتوى المائي
الطماطم	*Lycopersicon esculentum*	الثمرة	-	٩٤,١
البطيخ	*Citrullus vulgaris*	الثمرة	-	٩٢,١
التفاح	*Malus malus*	الثمرة	-	٨٤,٠
الذرة الحلوة	*Zea mays*	البذرة	رطبة	٨٤,٨
ذرة الحقل	*Zea mays*	البذرة	جافة	١١,٠

(❖) المصدر: (Gathered by Kramer, 1969).

يلاحظ في الجدول السابق أن أقل محتوى مائي موجود في البذور الجافة ويعود ذلك إلى عدم الحاجة للماء نظرا لتوقف معظم نشاطات الخلايا أو انخفاضها إلى الحد الأدنى والتركيز على كمية المادة المخزونة لاستغلالها عند الحاجة لنمو البادرات. وتختلف الصورة في معظم الحالات عندما ينسب المحتوى المائي لذلك العضو إلى الوزن الجاف كما يتبين من الجدول رقم (١ - ٢).

تفضل نسبة المحتوى المائي إلى الوزن الجاف وخاصة عندما يكون المحتوى المائي كبيرا ولو أن النسبة إلى الوزن الرطب هي الأكثر شيوعا إلا أن نسبة المحتوى المائي إلى الوزن الجاف قد تكون غير دقيقة وخاصة إذا كان الوزن الجاف غير ثابت كنتيجة لاستهلاك أو زيادة المواد التخزينية، ومهما يكن فإنه يجب الأخذ في الاعتبار دائما أن المحتوى المائي لأي عضو في النبات كمية متغيرة وتتأثر بسرعة بالتقلبات السريعة لمحتوى التربة المائي وحتى الرطوبة النسبية في الجو المحيط بالنبات.

obeikandi.com

الجدول رقم (١-٢) المحتوى المائي لأجزاء نباتات مختلفة كنسبة مئوية للورنين الرطب والجاف(*).

النبات		الجزء المستخدم	المحتوى المائي كنسبة مئوية	
			للوزن الرطب	للوزن الجاف
الخس	*Lactuca sativa*	الأوراق الصغيرة	٩٤,٣	١٦٥٤
الجزر	*Daucus carota*	الجذور التخزينية	٩٠,٣	٩٣١
الفراولة	*Fagaria chiloensis*	الثمار الناضجة	٨٩,١	٨١٧
الأشنة	*Peltigera canina*	كامل النبات	٧٧,٢	٣٣٩
الفاصوليا	*Phaseolus coccineus*	البذور	٢٠,٣	٢٥,٥
الشعير	*Hordeum vulgare*	الحبوب	١٠,٢	١١,٤
الفول السوداني	*Arachis hypogaea*	البذور	٥,٢	٥,٥

(❖) المصدر : (Sutcliffe, 1968).

أما على مستوى الخلية فأغلب الماء يوجد في الفجوات كما سبق ذكره ولكن التوزيع النسبي للماء في مكونات الخلية يختلف باختلاف المواد الموجودة بها وهذا بالطبع يعتمد على موقع الخلية ووظيفتها إلى غير ذلك من العوامل. ومن الأمثلة على ذلك ما قدره العالمان بريستون و واردروب ١٩٤٩م (Preston and Wardrop,1949) بأن الماء يكون أكثر من ٥٥٪ حجما لحجم الجدار الخلوي للغمد الورقي لنبات الشوفان عندما تكون الخلية في حالة امتلاء (يقصد بحجم لحجم : حجم الماء سم٣ إلى حجم الجدار الخلوي سم٣). أما بالنسبة لسيتوبلازم الخلية فغير ثابت المقدار وقد ذكر محتوى البروتوبلازم سابقا، بينما المحتوى المائي للبلاستيدات الخضراء فهو أقل من ٥٥٪ من

الوزن الرطب نظرا لزيادة تركيز المواد الدهنية في أغشيتها حيث تشكل المواد الدهنية من ٢٠- ٤٥٪ من وزن البلاستيدات الجاف، أما الميتوكوندريا فلا يوجد تقدير لمحتواها المائي ولكن من المتوقع أن يتشابه مع المحتوى المائي للبلاستيدات نظرا للتشابه في طبيعة الأغشية التركيبية. وبصورة عامة فالماء داخل النبات في حركة دائمة حيث يمتص بكميات كبيرة ويفقد كذلك من معظم النباتات على هيئة بخار كما سيلحق عند الحديث عن فقد الماء من النبات، والماء بخواصه الفريدة والمميزة يساعد على ثبات درجة حرارة النبات.

obeikandl.com

الفصل الثاني

خواص الماء التركيبية والفيزيائية

• المقدمـــــة • تركيـــب الماء

• نظائر الماء • خـــواص الماء

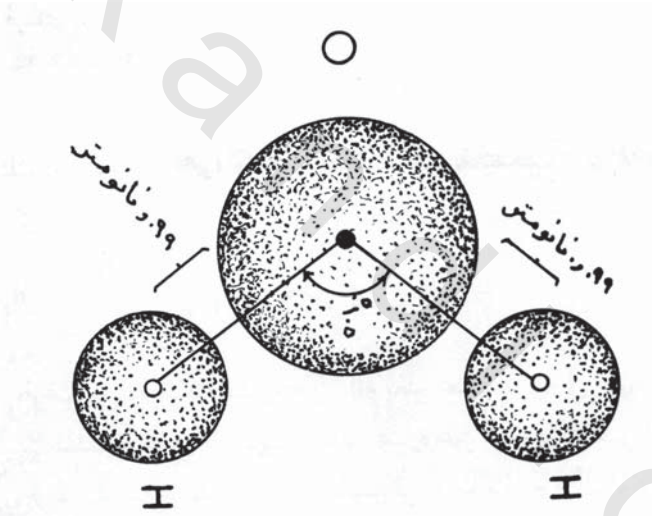
(٢-١) المقدمة

على الرغم من وفرة الماء وشيوعه إلا أنه يعد مادة غريبة في خواصها وتشذ عن جميع المركبات المشابهة لها في التركيب، فالماء هيدريد عنصر غير معدني وهو الأكسجين، وبمقارنته بهيدريدات العناصر غير المعدنية نجد أن الماء في حالة صلبة عند درجات الحرارة ما تحت الصفر المئوي وفي حالة سائلة ما بين الصفر والمائة درجة أما ما فوق ذلك فهو في حالة غازية بينما غيره من الهيدريدات مثل كبريتيد الهيدروجين (H_2S) والأمونيا (NH_3) فهي في حالة غازية عند درجات الحرارة التي يكون فيها الماء سائلاً وتحتاج إلى درجات حرارة منخفضة تحت الصفر أو ضغط عال لتحويلها إلى سوائل. إن هذه الظاهرة وغيرها من الخواص الفيزيائية والتي سيرد ذكرها فيما بعد تعتمد على تركيب الماء الجزيئي.

obeikandl.com

(٢-٢) تركيب الماء

يتكون الماء من ذرة أكسجين واحدة وذرتي هيدروجين، وكل ذرة هيدروجين ترتبط مع الأكسجين برابطة تساهمية قوية ويحتاج إلى طاقة لتفكيك مثل هذه الرابطة مقدارها ١١٠ كيلو سعرا/ جزيء. وارتباط هذه الذرات الثلاث في جزيء الماء ليس على شكل مستقيم بل وكما يتبين من الشكل رقم (٢-١) فإن ذرتي الهيدروجين تحصران فيما بينهما زاوية مقدارها ١٠٥°، وطول الرابطة التساهمية نحو ٠,٠٩٩ نانومتر.

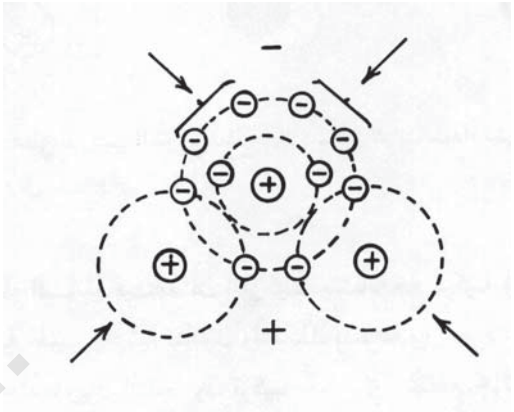


الشكل رقم (٢-١). رسم تخطيطي يصور جزيء الماء وأبعاد الروابط والزاوية بين الذرات.

والرابطة التساهمية تتم بمساهمة كل ذرة بإلكترون واحد. فذرة الهيدروجين بها إلكترون واحد وتحتاج إلى إلكترون آخر لتشبع الغلاف الخارجي لذا فإن ذرة الأكسجين تساهم بإلكترونين لذرتي الهيدروجين وبالمثل ذرة الأكسجين بها ستة إلكترونات

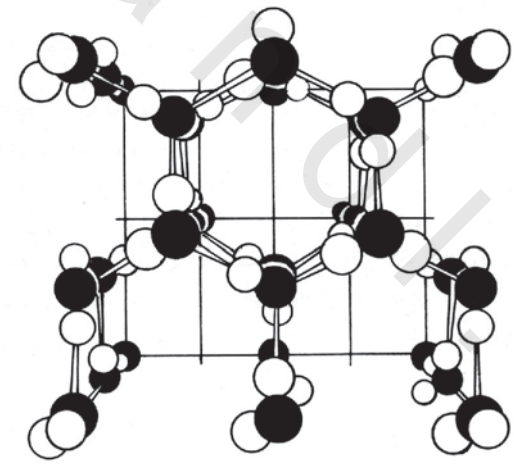
وتحتاج إلى إلكترونين لإشباع الغلاف الخارجي. لذا فذرتا الهيدروجين تشاركان ذرة الأكسجين إلكترونيها. والنتيجة تشبع الغلاف الخارجي لكل من الأكسجين والهيدروجين وبقاء أربعة إلكترونات في الغلاف الخارجي لذرة الأكسجين غير مساهمة لذا فهي تكون زوجان حران (انظر الشكل رقم ٢-٢). من هنا جاءت ظاهرة أن الشحنة الكهربائية لجزيء الماء ككل غير موزعة بالتساوي، فكل ذرة هيدروجين تحمل شحنة جزئية موجبة نظرا لوجود الإلكترونات في الغلاف الخارجي بقرب ذرة الأكسجين. هذا من ناحية، ومن ناحية أخرى فذرة الأكسجين تحمل شحنة جزئية سالبة وذلك نتيجة لوجود زوجي الإلكترونات الحرة (أي غير المساهمة) في غلافها الخارجي. إن هذا التوزيع الوضعي يجعل جزيء الماء يتصف بخواص المغناطيس الصغير، فجهة من الجزيء سالبة جزئيا وجهتان موجبتان جزئيا (ولو أن الجزيء ككل متعادل كهربائيا) لذا يوصف جزيء الماء بأنه قطبي. لهذا السبب نجد أن جزيئات الماء في الحالة الغازية تكون فيما بينها ما يعرف بالروابط الهيدروجينية حيث تتجاذب المناطق المتعاكسة من كل جزيء بشكل غير اعتيادي في جزيئات المواد الأخرى التي تكون فيما بينها رابطة أضعف تعرف بروابط أو قوى تجاذب فان درفال حيث الطاقة اللازمة لتفكك الرابطة الهيدروجينية أقل من تلك اللازمة لتفكك الرابطة التساهمية وأكبر من تلك اللازمة لتفكك قوى فان درفال حيث تقارب ٤,٥ كيلو سعرا/ جزيء.

أما بالنسبة للماء النقي في الحالة الصلبة (الثلج) فإن وجود الزاوية (١٠٥°) بين ذرتي الهيدروجين وذرة الأكسجين يتطلب تكوين شكل ذي ثلاثة أبعاد يقارب الشكل السداسي ولكنه ليس في مستوى واحد نظرا لصغر الزاوية هذه عن زاوية الشكل السداسي وهي ١٢٠° لذا فإن الشكل الخماسي قد يحدث، والتركيب هذا نتيجة لتكون الرابطة الهيدروجينية بين الجزيئات بشكل منتظم. فكل جزيء من الماء به ذرتا



الشكل رقم (٢–٢). تكوين الروابط التساهمية وأزواج الإلكترونات الحرة، ومكان الروابط الهيدروجينية (الأسهم) في جزيء الماء.

المصدر: (Sutcliffe, 1968).



الشكل رقم (٢–٣). رسم تخطيطي للتركيب البلوري للثلج، الكرات السوداء ذرات أكسجين بينما البيضاء تمثل الهيدروجين.

المصدر: (buswell and Rodebush, 1956a).

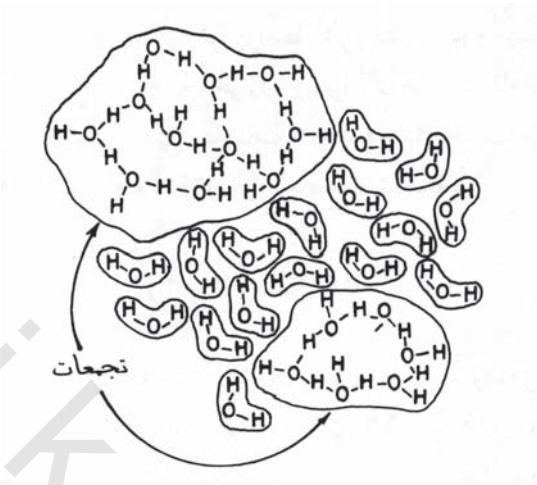
obeikandl.com

هيدروجين كل واحدة تكون رابطة هيدروجينية مع إحدى الأزواج الحرة على ذرة الأكسجين في الجزيء الآخر (الشكل رقم ٢-٢) لذا فإن أي جزيء من الماء يكون محاطا بأربعة جزيئات أخرى في التركيب البلوري للثلج (الشكل رقم ٢-٣) وهذا التركيب ينعكس على انخفاض كثافة الماء في الحالة الصلبة (الثلج) عنها في الحالة السائلة مما يجعل الثلج يطفو في الماء السائل.

أما حالة الماء السائلة فيعتقد أن التركيب يتشابه مع تركيبه في الحالة الصلبة نوعا ما عدا أن الرابطة الهيدروجينية تتكون وتتفكك بسرعة بين جزيئات الماء حسب درجة الحرارة، لذا فإنه عند ذوبان الثلج فإن تركيبه البلوري يتقطع جزئيا والفراغات المكونة للبلورة تمتلئ بجزيئات الماء الأخرى المتفككة ولذا تزداد كثافة الماء في الحالة السائلة وقد قدر أن مثل هذا الفراغ البلوري في الحالة الصلبة يشغل نحو ١٦٪ من عدد الجزيئات الكلية عند درجة الصفر المئوي. ومن أقدم النظريات عن تركيب جزيئات الماء في الحالة السائلة نظرية التجمعات المتقطعة (Flickering clusters) حيث هناك مجموعة من الجزيئات مرتبطة مع بعضها البعض بروابط هيدروجينية وتسبح في وسط الجزيئات غير المرتبطة نوعا ما وتتفكك هذه التجمعات ويعاد ترتيبها عشوائيا و بسرعة حسب التغيرات الحرارية في السائل (الشكل رقم ٢-٤).

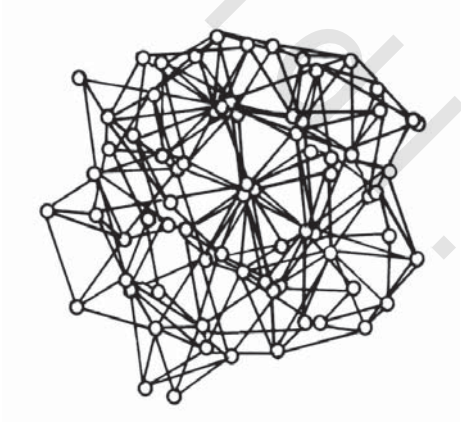
على أية حال فالزاوية بين ذرتي الهيدروجين والأكسجين مرنة نوعا ما ولكن المتوسط هو ١٠٥°، لذا فإن جزيئات الماء في الحالة السائلة تترتب بصورة أقل انتظاما عنها في الحالة الصلبة وقد قام العالم برنال ١٩٦٥م (Bernal, 1965) بوضع نموذج لتركيب الماء في الحالة السائلة كما في الشكل رقم (٢-٥).

ومهما يكن فإنه كلما زادت درجة الحرارة كلما قلت الروابط الهيدروجينية سواء في الحالة السائلة أو الغازية. مما تقدم يمكن القول بأن التركيب الكيميائي للمـــاء



الشكل رقم (٢–٤). رسم تخطيطي لنموذج التجمعات عن طرق تكوين الروابط الهيدروجينية بين بعـــض جزيئات الماء.

المصدر : (Nèmethy and Scheraga, 1962).



الشكل رقم (٢–٥). نموذج لتركيب الماء في الحالة السائلة مبني على تحاليل بالحاسب الآلي.

المصدر: (Bernal, 1965).

obeikandl.com

والذي يعبر عنه عادة بالرمز $(H_2O)_1$ هو على وجه الدقة $(H_2O)_n$ حيث الرمز (n) يدل على عدد جزيئات الماء المرتبطة مع بعضها البعض بواسطة الروابط الهيدروجينية والقيمة العددية للرمز (n) تقل مع الارتفاع في درجة الحرارة. ونظرا لأن جزيء الماء قطبي فإن الروابط الهيدروجينية لا يقتصر تكوينها على جزيئات الماء فيما بينها فحسب بل تتكون الروابط الهيدروجينية بين جزيئات الماء والدقائق أو الأسطح المشحونة.

(٢-٣) نظائر الماء

جرى النقاش حتى الآن بافتراض أن جزيء الماء يتكون من الهيدروجين ذي الوزن الذري واحد والأكسجين ذي الوزن الذري ١٦ وبذا فالوزن الجزيئي للماء هو ١٨ ، ولكن الحقيقة إن المياه الطبيعية تضم نظائر عنصري الهيدروجين والأكسجين، فالهيدروجين له نظيران آخران هما الديتريوم (^2H Deutrium) ووزنه الذري ٢ والتريتيوم (^3H Tritium) ووزنه الذري ٣، بينما الأكسجين له أيضا نظيران آخران هما (^{17}O) و(^{18}O) وأوزانهما الذرية ١٧ و١٨ على التوالي. وهذه النظائر يمكن أن يتكون منها ولو نظريا ثمانية عشر مركبا من الماء ذات أوزان جزيئية مختلفة، ولكن وجود هذه النظائر في الطبيعية غير متساو، فالتريتيوم والأكسجين ١٧ نادرة جداً، والديتريوم يمثل نحو ٢٠٠ جزء لكل مليون جزء من الهيدروجين العادي ذي الوزن الذري واحد، أما نظير الأكسجين ١٨ فيوجد بتركيز يقارب ١٠٠٠ جزء في المليون من الأكسجين العادي ذي الوزن الذري ٠١٦ المياه الطبيعية في الحقيقة تضم مزيجا من الجزيئات كالتالي:

$(H_2{}^{16}O, H_2{}^{17}O, H_2{}^{18}O, HD{}^{16}O, HD{}^{17}O, HD{}^{18}O, D_2{}^{16}O, D_2{}^{17}O, \text{and } D_2{}^{18}O)$

أما النظير الثالث التريتيوم فيتكون أثناء التفكك الذري، وقد عرف الماء المتكون كيميائيا من ($D_2{}^{16}O$, $D_2{}^{17}O$, and $D_2{}^{18}O$) بالماء الثقيل ويمكن الحصول عليه بطريقة

التحليل الكهربائي للماء الطبيعي نظرا لسرعة فقد الشحنة من الماء العادي بعكس الماء الثقيل. وقد استعمل الماء الثقيل في الثلاثينيات من القرن العشرين الميلادي في كثير من الدراسات الكيموحيوية ونفاذية الأغشية الخلوية، ولكن في الآونة الأخيرة استعمل الماء المحتوي على النظير الآخر للهيدروجين وهو التريتيوم لأنه مادة مشعة ومن السهل تتبعها بطرق أسهل من استعمال جهاز طيف الكتلة الذي يكشف عن وجود الديتريوم. أما نظير الأكسجين ١٨ فقد جرى استخدامه مثلا لإثبات أن الأكسجين المتصاعد أثناء عملية البناء الضوئي كان مصدره الماء وليس ثاني أكسيد الكربون.

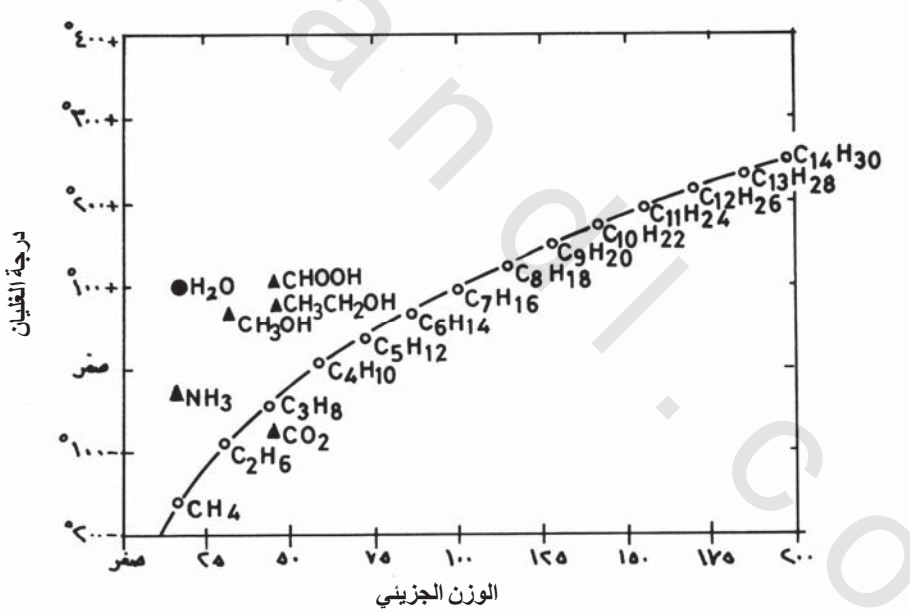
(٢-٤) خواص الماء

إن التركيب الكيميائي لجزيء الماء يعكس خواص الماء الفيزيائية الفريدة في حالته السائلة والتي ميزت الماء عن غيره من السوائل كوسط للأنظمة الإحيائية. وهذه الخواص يمكن إيجازها مع التركيز على أهميتها للحياة كما يلي:

١- حالة السيولة وتميؤ الجزيئات الكبيرة

حسب ما لاحظه الكيميائيون من أنه كلما كان الوزن الجزيئي لعنصر أو مركب كبيرا كلما كان احتمال وجوده في الحالة الصلبة أو السائلة أكبر عند درجات الحرارة العادية، وكلما كان الوزن الجزيئي صغيرا كلما كان احتمال وجوده في الحالة السائلة أو الغازية عند درجات الحرارة العادية كبيرا. فمثلا المركبات الهيدروكربونية (المتكونة من هيدروجين وكربون) ذات الأوزان الجزيئية الصغيرة عبارة عن غازات بينما الأكبر وزنا منها في حالة سائلة ومن ثم الأكبر في الوزن الجزيئي في حالة صلبة. يبين الشكل رقم (٢-٦) العلاقة بين الوزن الجزيئي ودرجة الغليان لتلك المركبات. وعند مقارنة الماء مع، المركبات الأخرى مثل الأمونيا(NH_3) (وزن جزيئي ١٧) أو الميثان (CH_4) (وزن

جزيئي ١٦) أو حتى ثاني أكسيد الكربون(CO_2) (وزن جزيئي ٤٤) نجد أن الماء فقط هو الذي يوجد في حالة سائلة عند درجات الحـــرارة العادية (من صفـــر إلى ١٠٠° م)، بينما البقية في حالة غازية فلماذا شذ الماء عن هذه القاعدة شذوذا كبيرا؟ الجواب يكمن في وجود الروابط الهيدروجينية التي تعمل على تجميع جزيئات الماء مع بعضها البعض لدرجة غير مألوفة حتى في الهيدريدات الأخرى. وهنا يجب التنويه على أن الرابطة الهيدروجينية ليست وقفا على الماء بل تتكون في مركبات أخرى مثل الكحول الميثيلي(Methanol, CH_3OH) وحمض الفورميك (Formic acid, CHOOH) وحمض الخليك (Acetic acid, CH_3COOH) وغيرها من المركبات التي يوجد بها ذرات هيدروجين وأكسجين أو ذرات لها خواص السالبية الكهربية كالفلور.



الشكل رقم (٢-٦). علاقة الوزن الجزيئي للمركب بدرجة حرارة غليانه، (الدوائر الـــصغيرة المفتوحـــة للمركبات الهيدروكربونية والمثلثات والدائرة المصمتة للمركبات الأخرى.

المصدر: (Salisbury and Ross, 1978).

يكون الماء روابط هيدروجينية مع غيره من الجزيئات الكبيرة الموجودة في خلايا الكائنات الحية مثل البروتينات والمواد الكربوهيدراتية والأحماض النووية. ويرجع السبب في تكوين الروابط إلى وجود مجاميع على تلك الجزيئات مثل المجموعة الكربونيلية (Carbonyl C=O) والمجموعة الهيدروكسيلية (Hydroxyl, -OH) والمجموعة الأمينية (Amino, -NH) حيث تحيط جزيئات الماء بتلك الجزيئات الكبيرة مكونة ما يعرف بالماء المرتبط، وقد قدر العالم برنال ١٩٦٥م (Bernal, 1965) أن الماء المرتبط على أسطح بعض البروتينات قد يكون ٣٠٪ من الوزن الجزيئي للبروتين بينما أدرج العالم تانفورد ١٩٦٣م (Tanford, 1963) بعض الأدلة على أن الثبات النسبي للفيروسات وحمض DNA وبعض البروتينات يتم بمقدار ثبات الماء المرتبط بهما.

٢- حرارة التبخر الكامنة

وتعرف هذه الحرارة بعدد السعرات المطلوبة لتحويل واحد جرام من المادة من الحالة السائلة إلى الحالة الغازية، وبالنسبة للماء فإنه يتطلب حوالي ٥٣٩ سعرا لعملية التحويل عند درجة حرارة١٠٠° م، وكلما قلت درجة الحرارة كلما زادت السعرات المطلوبة. وقد سميت بحرارة التبخر الكامنة نظرا لأن عملية تزويد السائل بالحرارة (مثل الماء) وهو يغلي لا يرفع درجة حرارته أكثر من درجة حرارة الغليان، أي أن الحرارة الداخلة للسائل لا يرى أثرها على صورة ارتفاع في درجة الحرارة كما يحدث للسائل قبل الغليان. وتعتبر حرارة التبخر الكامنة للماء عالية جدا، حيث إن حرارة التبخر المتوقعة للماء حسب قاعدة تروتن (Trouton`s rule) هي ٢١٠ سعرا/ جم عند درجة حرارة١٠٠° م، ويعزى هذا الارتفاع إلى وجود الروابط الهيدروجينية وضرورة تكسير معظمها لحدوث التبخر.

من الناحية التطبيقية تعد خاصية حرارة التبخر العالية ذات أهمية كبرى في

عملية تبريد النبات والكائنات الحية الأخرى في عمليتي النتح والعرق على التوالي. تفقد الكائنات الحية ككل جزءا كبيرا من الحرارة التي تمتصها من بيئتها عن طريق الإشعاع عندما تفقد جزءا من محتواها المائي على هيئة بخار في العمليتين السابقتين. ويمكن ملاحظة أثر ذلك عند لمس ورقة نبات وحجر صغير معرضين للشمس وقت الظهيرة حيث تكون درجة حرارة الورقة مقاربة لدرجة حرارة الجو بسبب استهلاك جزء كبير من الحرارة الممتصة من البيئة لتبخير الماء في عملية النتح (نحو ٦٠٠ كالوري/جم ماء) بينما درجة حرارة الحجر الصغيرة تكون أعلى من درجة حرارة الجو لاقتصار فقد الحرارة الممتصة بواسطة الحجر من البيئة على عملية الفقد عن طريق الإشعاع فقط.

٣- حرارة الانصهار والتمدد

عند تسخين كمية من الثلج فإنه يبدأ في الذوبان ويتكون مزيج من الثلج والماء عند درجة الصفر ولا ترتفع درجة حرارة المزيج حتى يذوب الثلج بأكمله، أي أن الحرارة المكتسبة لا تظهر على صورة ارتفاع في درجة الحرارة، وهذه الحرارة أطلق عليها حرارة الانصهار ويلزم لإذابة جرام واحد من الثلج عند درجة الصفر المئوي إلى سائل عند الدرجة نفسها نحو ٨٠ سعرا، وهذه الحرارة كافية لرفع درجة حرارة جرام واحد من الماء السائل من صفر إلى ٨٠° م، وبالمثل تعتبر حرارة انصهار الماء هذه عالية وتعزى أيضا إلى وجود الروابط الهيدروجينية وضرورة بذل طاقة لتكسيرها.

إن عدد الروابط الهيدروجينية منسوبا إلى الوحدة في حالة الثلج أقل منها في السائل نظرا لأن الروابط الهيدروجينية في حالة الثلج تكون متناسقة ومنتظمة أكثر منها في حالة السائل ولكن عند ذوبان الثلج فإن هذا التناسق يفقد فتتجمع جزيئات الماء وتتراص أكثر، أي تشغل جزيئات الماء حيزا أقل لذا فكثافة الماء السائل أكبر من كثافة

الماء الصلب حتى تصل درجة الحرارة ٤° م عندها يبدأ تأثير درجة الحرارة في تمدد السائل كما هو الحال في المواد الأخرى حيث تقل الكثافة مع الزيادة في درجة الحرارة. وكثافة الماء أكبر من كثافة السوائل الأخرى المعروفة عدا المعادن في الحالة السائلة مثل الزئبق وأكبر كثافة للماء هي عند درجة ٤° م. عند عكس العملية السابقة (أي تحويل السائل إلى ثلج) يحدث العكس أي أن الماء يتمدد ويشغل حيزا أكبر مما يقلل من كثافته فيطفو الثلج، وهذا ما يحدث عند تجمد البحيرات والأنهار والمحيطات القطبية، وهذه خاصية غير عادية للماء وذات ميزة كبرى للكائنات الحية التي تعيش في تلك الأصقاع حيث تبقى حية في المناطق السفلى غير المتجمدة طوال فترة الشتاء.

ومن ناحية أخرى فإن عملية تمدد الماء عند تحوله إلى الحالة الصلبة ذات تأثير مدمر في الخلايا النباتية فيما لو حدث التجمد داخل الخلايا ولذا يلاحظ أن الخضر والفواكه تبرد فقط للمحافظة على طعمها وشكلها لأطول مدة ممكنة. إن حرارة الانصهار العالية للماء تجعل حدوث التجمد أقل مما هويا حالة السوائل الأخرى لذا فإن نباتات المحاصيل ترش أحيانا بالماء لمنع حدوث التجمد داخل الخلايا، وبالطبع هذه العملية لا تصلح إذا كانت درجة حرارة الجو أقل بكثير من الصفر المئوي.

٤- الحرارة النوعية

تعرف الحرارة النوعية بأنها كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة جرام واحد من المادة درجة حرارية واحدة. وبالنسبة للماء فإنه يتطلب نحو سعر واحد لرفع درجة حرارة جرام واحد درجة واحدة، وهذه أكبر حرارة نوعية في السوائل ما عدا الأمونيا. وارتفاع الحرارة النوعية للماء عائد لترتيب الجزيئات في الحالة السائلة حيث إن ذرات الهيدروجين والأكسجين تكون في مستويات تسمح لها بالتذبذب بحرية كما لو كانت أيونات حرة وبالتالي فبإمكانها (أي الذرات) امتصاص كميات من الطاقة الحرارية دون

حدوث ارتفاع سريع في درجة حرارة السائل، وبمعنى آخر يسخن ويبرد الماء ببطء ولذا فإن وجود الماء في الكائنات الحية يجعل استقرار درجات حرارتها ممكنا إلى حد ما، وبالتالي تميل معدلات الأيض إلى الاستقرار.

٥- تأين الماء

تتأين بعض الجزيئات في الماء بدرجة بسيطة مكونة أيون الهيدروجين (Hydrogen ion) وأيون الهيدروكسيل (Hydroxyl ion) ولكن أيون الهيدروجين (H^+) يتحد مع جزيء ماء آخر مكونا أيون الهيدرونيوم (Hydronium ion) كالتالي:

$$2H_2O \longleftrightarrow H_3O^+ + OH^-$$

وقد جرت العادة لغرض التبسيط أن تكتب المعادلة كما يلي:

$$H_2O \longleftrightarrow H^+ + OH^-$$

وحسب قانون الكتلة يمكن التعبير عن ذلك رياضيا عند الاتزان بأن التراكيز الجزيئية الناتجة تساوي ثابت يعرف بثابت الاتزان:

$$[H^+][OH^-] = K$$

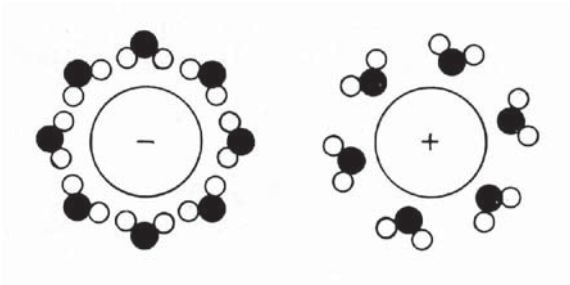
وقيمة ثابت الاتزان (K) تساوي $١٠^{-١٤}$ جرام من الأيونات في اللتر الواحد من الماء النقي (أي أنه يوجد واحد جرام من الأيونات في كل $١٠^{١٤}$ لتر من الماء!) وهذا يعني أن تركيز أيون الهيدروجين- $١٠^{-٧}$ وكذلك تركيز أيون الهيدروكسيل- $١٠^{-٧}$، أي أن الرقم الهيدروجيني للماء النقي- ٧ حيث إن تعريف الرقم الهيدروجيني هو اللوغاريتم السالب لتركيز أيون الهيدروجين $pH = -\log [H^+]$. وتجدر الإشارة هنا أنه من الصعوبة بمكان الحصول على الماء نقيا وبالتالي الحصول على

التوزيع المتساوي بين أيونات الهيدروجين وأيونات الهيدروكسيل وذلك لأن ثاني أكسيد الكربون الموجود في الجو بوفرة يذوب في الماء وبالتالي يمكن أن يغير الرقم الهيدروجيني لقيمة قد تقارب ٤.

٦- الماء والإذابة

لعل من أبرز وأهم خواص الماء بالنسبة للحياة، هي مقدرته على إذابة الكثير من المواد القطبية أكثر من أي سائل آخر، وهذه المقدرة تعود إلى خاصية أخرى للماء وهي أن ثابت التعادل الكهربائي للماء عالي. وثابت التعادل الكهربائي لمادة ما هو مقياس لمقدرة تلك المادة على معادلة التجاذب بين الشحنات الكهربائية الموجودة على ذرات المركب وبالتالي فصل تلك الذرات عن بعضها البعض ويقال عنها في هذه الحالة أيونات والمادة ذائبة. والماء بتركيبه الخاص يعد مذيبا ممتازا للمواد الإلكتروليتية حيث إن الجانب الموجب جزئيا لجزيء الماء (ذرات الهيدروجين) تنجذب إلى الأيون السالب من المادة المذابة، بينما الجانب السالب جزئيا من جزيء الماء (زوجي الإلكترونات الحرة على ذرة الأكسجين) تنجذب نحو الأيون الموجب من المادة المذابة (الشكل رقم ٢-٧)، وبذا تحيط جزيئات الماء بأيونات المادة المذابة معيقة اتحادها مرة أخرى عن طريق معادلة قوى التجاذب بين ذرات المركب وتكوين غشاء يحيط بالأيون من جميع الجهات. وفي نموذج فرانك و وين ١٩٥٧م (Frank and Wen, 1957) اقتراح بوجود ثلاث مناطق من الماء حسب شدة ارتباطها بالأيون ولكن يبدو أن هذا النموذج ينطبق على المحاليل الإلكتروليتية المخففة.

أما بالنسبة للمواد غير القطبية فمقدرة الماء على إذابتها قليلة ويتفق هذا مع متطلبات تكوين الروابط الهيدروجينية وظاهرة معادلة الشحنات لعدم وجودها في المواد غير القطبية، ولكن تركيب الماء ككل يمكن أن يكون نوعين من الشبكات البلورية



الشكل رقم (٢–٧). رسم تخطيطي يوضح عملية إبقاء جزيئات المادة المذابة في الماء متباعدة.
المصدر: (Buswell and Rodebush, 1956b).

(إحداها يتكون من ٤٦ جزيئا والأخرى من ١٣٦ جزيئا) تاركة فيما بينها ما يشبه الفراغات أو الثقوب ذات الأحجام والأشكال المختلفة بحيث بعضها يتناسب مع أبعاد جزيئات المادة غير القطبية مؤدية بالتالي إلى إذابتها، وهذا يفسر كون بعض المواد غير المحبة للماء (hydrophobic) تذوب فيه، وعلى أية حال إن صح هذا التفسير النظري فقد يكون ذا أهمية كبرى في معرفة تركيب ووجود مثل هذه المواد في بروتوبلازم الخلايا الحية.

٧– امتصاص الماء للضوء

الماء مادة عديمة اللون والرائحة والطعم وشفافة ولكن الامتصاص الطفيف للضوء الأحمر يجعل مياه البحار والبحيرات الكبيرة تبدو خضراء مزرقة. والرابطة الهيدروجينية تمتص الضوء عند أطوال الموجات في منطقة الضوء الأحمر البعيد وخاصة. عند طول موجة ٣٠٠٠ نانومتر لدرجة أن الامتصاص عند طول هذه الموجة يدل دلالة قوية على وجود الرابطة الهيدروجينية وفوق ذلك فالماء يمتص فيما بين ١٠٠٠٠ و. ٣٠٠٠٠ نانومتر حيث الإشعاعات الحرارية ولهذا الامتصاص أهمية كبيرة في استقرار درجة الحرارة على هذا الكون وبالتالي استمرار الحياة. حيث إن طبقة بخار الماء الموجودة في الغلاف الجوي تمتص بعض الحرارة من أشعة الشمس الساقطة على الأرض فتخفف من كمية الحرارة وعند غياب الشمس وبداية برودة طبقات الجو العليا فإن الأرض تشع بعض الحرارة التي امتصتها أثناء

النهار فتقوم هذه الطبقة بامتصاص معظم الحرارة وبالتالي تمنع برودة الأرض بسرعة وبذا فإن هذه الطبقة تعمل كغطاء أثناء الليل وكمصفى أثناء النهار مما يمنع تسخين الأرض بسرعة إلى درجات حرارة عالية أثناء النهار وبرودتها أثناء الليل كما يحدث في بعض الكواكب الشمسية الأخرى. هذا من جهة، ومن جهة أخرى فإن الماء بحرارته النوعية العالية وكمياته الكبيرة في المحيطات يعتبر عاملا آخر في استقرار درجات الحرارة. ويمكن أيضا النظر في هذه الخواص على مستويات الأفراد وكمية الماء الموجودة بها بالفكرة نفسها.

٨- خواص الماء الأخرى

هناك خواص طبيعية أخرى للماء مثل اللزوجة (Viscosity) والتوتر السطحي (Surface tension) والتماسك (Cohesion) والتلاصق (Adhesion) تعزى لطبيعة التركيب الجزيئي للماء أيضا، فلزوجة الماء وتوتره السطحي عاليان ويعود ذلك إلى أن الروابط الهيدروجينية بين جزيئات الماء نفسها قوية نوعا ما وتقاوم إعادة ترتيبها مرة أخرى بنسب غير النسب المعتادة عند ثبوت درجة الحرارة، وهذا مما يجعل للماء قوة شد عالية كما سيرد عند مناقشة النتح في النبات. وتجاذب جزيئات الماء فيما بينها يعرف بالتماسك، بينما ظاهرة تبلل المواد الأخرى كالزجاج وحبيبات التربة والمواد المكونة من السليلوز كالقطن بالماء يعرف بظاهرة التلاصق. ويلاحظ أن المواد التي تبتل بالماء يدخل في تركيبها الأكسجين ويكون معرضا على سطح المادة حيث يكون مع الماء روابط هيدروجينية، بعكس المواد التي لا تبتل بالماء مثل البرافين والهيدروكربونات لأن جزيئات الماء لا تنجذب إلى الذرات الموجودة على أسطحها، ولكن وكما سبق قد يكون هناك فراغات بين تجمعات جزيئات الماء تناسب حجم جزيئات تلك المواد فيذوب جزء ولو قليل منها في الماء، والجداول في الملحق رقم (١) تبين بعض الثوابت لخواص الماء.

الفصل الثالث

الماء والتربة

• المقدمة • خصائص التربة • ماء التربة • حركة الماء في التربة • طرق قياس ماء التربة

(٣-١) المقدمة

تعد التربة مصدر التغذية المعدنية التي تتميز بها النباتات الراقية وهي، أيضاً، المكان المناسب لنمو جذور تلك النباتات حيث تتثبت النباتات. تعتبر التربة أيضاً مرتعاً خصباً لنمو كثير من الكائنات الدقيقة وبعض الكائنات الأكبر حجما مثل دودة الأرض وبعض الحشرات وغيرها حيث تعمل هذه الكائنات على تحسين خواص التربة الطبيعية والكيميائية والعكس قد يصح أحيانا. إن هذا التأثير لتلك الكائنات في التربة له دور مهم في نمو النباتات وترعرعها ومهما يكن فإن أهمية التربة تظهر واضحة في كونها مستودع كبير للماء حيث تذوب فيه العناصر المعدنية مكونة ما يعرف بمحلول التربة الذي تمتص منه جذور النباتات حاجتها من العناصر والماء، إلا أن كمية الماء الموجودة في التربة تتحدد بعدة عوامل من أهمها خصائص ونوع تلك التربة.

obeikandi.com

(٣-٢) خصائص التربة

غالباً ما تقسم أية تربة من حيث التكوين إلى أربعة أجزاء، الجزء الأول هو ما يعرف بالمواد المعدنية أو الحبيبات الصخرية والجزء الثاني عبارة عن المواد العضوية الميتة وهذان الجزءان يكونان المادة الصلبة من التربة، أما الجزء الثالث فهو الماء وما به من مواد ذائبة أو على وجه الدقة ما يعرف بمحلول التربة، والهواء وما به من بخار ماء يكون الجزء الرابع. ويشغل الجزءان الأخيران الفراغات الموجودة في المادة الصلبة حيث تعرف هذه الفراغات باسم الفراغات المسامية للتربة، ويعتمد وجود هذه الفراغات المسامية على أهم خواص المادة الصلبة في كونها حبيبية الشكل، لذا فإن هذه الفراغات تكون متصلة ببعضها البعض بغض النظر عن حجمها الذي يتراوح في العادة ما بين ٣٠- ٦٠٪ من حجم التربة وذلك حسب نوع التربة.

في معظم أنواع الأراضي تعد المواد المعدنية أو الحبيبات الصخرية أكثر أجزاء التربة ثباتا وحجما بينما الأجزاء الثلاثة الأخرى تختلف من تربة لأخرى. إن خصائص أية تربة تعتمد على حجم حبيباتها وتوزيعها وتركيبها الكيميائي والطريقة التي تترتب بها ونوع المعادن الموجودة ومقدار ونوع الأيونات التي يمكن تبادلها وأخيرا كمية المواد العضوية المختلطة بها. ونظرا لأهمية الجزء المعدني من التربة فقد لقي اهتماما كبيرا من علماء التربة وأصبح معروفا أن أصل كل الأراضي ناتج عن عمليات التفتيت المختلفة للصخور بفعل عوامل التعرية مما ينتج عنه تكوين قطع ذات أحجام مختلفة صنفتها الجمعية العالمية لعلم التربة إلى أربع مجاميع حسب الجدول رقم (٣-١).

الجدول رقم (٣–١). مجاميع التربة وصفاتها ونسبها في بعض الأنواع.

الجزء المعدني	القطر (مليمتر)	قطر الفراغات المسامية التقريبي (ميكرومتر)	التربة الرملية (٪)	التربة الطفالية (٪)	التربة الطينية الثقيلة (٪)
الرمل الخشن	٢– ٠,٢	متغير	٦٦,٦	٢٧,١	٠,٩
الرمل الناعم	٠,٠٢-٠,٢	٣٠ أو أكثر	١٧,٨	٣٠,٣	٧,١
الغرين	٠,٠٠٢-٠,٠٢	٣٠ –٠,٢	٥,٦	٢٠,٢	٢١,٤
الطين	أقل من ٠,٠٠٢	أقل من ٠,٢	٨,٦	١٩,٣	٦٥,٨

ويتبين من الجدول نسب مكونات بعض أنواع من التربة إلا أنه تجدر الإشارة إلى أن هناك أمثلة كثيرة جدا من أنواع الأراضي تختلف في نسبة الأجزاء وليسر هناك مجال لذكرها بل يكفي ذكر أن هناك تصنيف عام لها. لا يختلف هذا التصنيف كثيرا في النمط عن التصنيف المتبع في التعرف على الكائنات الحية حيث هناك رتب والأخيرة تضم مجاميع كبيرة تدخل تحت كل مجموعة مجاميع أصغر حيث كل مجموعة تشتمل على فصائل، والفصائل بدورها تضم أنواع الأراضي وعلى سبيل المثال فقد صنفت أنواع الأراضي في الولايات المتحدة الأمريكية فتبين أن هناك ما يقارب تسعة آلاف نوع منها.

وقد تبين من الدراسات الكثيرة أن الجزء الطيني المعدني من التربة (الدقائق) يتميز بتراكيب قرصية الشكل مفلطحة تتراص فوق بعضها البعض حيث تتشكل جزيئات الماء فيما بينها. لذا فإن قلة الماء تؤثر في حجم دقائق الطين ومن هنا كان تأثير

نسبة الجزء الطيني المعدني من أية تربة حيث إنه يحدد خواص التربة كاللدونة والتماسك وكمية الماء وغيرها. على العموم يتكون جزء التربة المعدني كيميائيا من السليكات التي قد تكون من البساطة كأكسيد السليكون (الكوارتز أومن التعقيد كسليكات الألومنيوم المائية كما في الطين الذي له خاصية النظم الغروية. إن درجة اقتران الماء بدقائق الطين المعدنية تعتمد على مقدار الشحنات السطحية على تلك الدقائق والتي (أي الشحنات) تتحدد بعدد المواقع التي يمكن أن يحصل عليها تبادل بين الأيونات أو امتزاز لبعض العناصر. فعلى سبيل المثال تتكون الشحنات السطحية السالبة على الدقائق عند تبادل أيون السليكون رباعي التكافؤ (Si^{+4}) بأيون الألومنيوم ثلاثي التكافؤ (Al^{+3}) أو الألومنيوم بإحدى الأيونين ثنائيي التكافؤ المغنيسيوم (Mg^{+2}) والحديد (Fe^{+2}).

(٣-٣) ماء التربة

تحتفظ التربة بمعظم مائها في الفراغات المسامية على هيئة سائل أو غاز (بخار ماء) والحالة الأخيرة ذات أهمية قليلة بالنسبة للكائنات الحية لذا فماء التربة في الحالة السائلة جدير بالاهتمام. يعرف ماء التربة عادة بأنه كمية الماء التي يمكن فقدها عند تجفيف عينة من التربة عند درجة حرارة ١٠٥° م معبرا عنها سواء بوزن الماء منسوبا إلى وزن العينة أو حجم الماء منسوبا إلى حجم العينة. ومع ذلك فهذا التعبير لمحتوى التربة من الماء غير مجد من الناحية النباتية ومدى الاستفادة منه لأنه وحسب ما ذكر عن خواص التربة نجد عند مقارنة محتوى تربة رملية بمحتوى تربة طينية أن ما يشبع الأولى يعد في رتبة الجفاف بالنسبة للثانية وتفسير ذلك يعود لطريقة احتفاظ التربة بالماء لذا فهناك مصطلحات للدلالة على محتوى التربة المائي- سترد فيما بعد- قد تعطي صورة

أفضل بالنسبة لاستفادة النبات من ماء التربة.

وفي الحقيقة لا يوجد الماء نقيا في التربة بل يوجد ما يعرف بمحلول التربة كما ذكر آنفا حيث إن الماء الذي يتخلل التربة بعد المطر أو الري الصناعي يذيب كميات مختلفة من عدة مركبات من دقائق الصخر أو المواد العضوية (السماد) ومن ذلك فإن ماء التربة يقصد به حقيقة محلولها. ومن أشهر الطرق لتفسير كيفية احتفاظ التربة بمائها أنه عند ري التربة فإن الجزء المتبقي من الماء بعد تخلل جزء كبير منه إلى الباطن بفعل الجاذبية يبقى عالقا بالتربة حسب خواصها ومكوناتها فإذا كانت التربة لا تتقلص (أي لا يقل حجمها عند الجفاف) فإن الهواء يدخل إلى مسام التربة وتعمل خاصية التوتر السطحي على الاحتفاظ بأغشية مائية حول الحبيبات، أما إذا كانت التربة تتقلص فالهواء لا يدخل إلى تلك المسام ولكن كلما قربت حبيبات التربة من بعضها البعض فقوى التنافر بين الحبيبات تمنع تقاربها كثيرا (أي لحد التلاصق) وبالتالي يبقى حيز يحتفظ ببعض الماء فيما بين تلك الحبيبات. إن حبيبات التربة ذات طبيعة كهربائية سالبة لذا فهي تتنافر من بعضها البعض. وهناك عوامل أخرى تساعد التربة على الاحتفاظ ببعض الماء ومنها ذوبان المركبات الكيميائية من مكونات التربة وتكوين محاليل ذات أسموزية مختلفة تعمل على التقليل من سرعة فقد التربة للماء كما سيرد لاحقا عند بحث هذا الموضوع.

سبق تعريف كمية الماء التي تحويها أية تربة وذكر أن هذا التعريف ذو دلالة غير واضحة بالنسبة لما هو متاح من هذه الكمية للنبات، وقد جرت العادة باستعمال مصطلحات أخرى في محاولة لإبراز أهمية ما تحويه التربة من الماء بالنسبة للنباتات ومن هذه المصطلحات ما يلي:

١- السعة الحقلية Field capacity

تمثل السعة الحقلية (Field capacity) المحتوى المائي للتربة بعد صرف الفائض من

الماء بواسطة الجاذبية الأرضية ويحدث هذا عادة بعد يوم إلى ثلاثة أيام من نزول الأمطار أو الري، وهذا بالطبع ليس تعادلا حقيقيا ولا يدوم فترة طويلة بل هي حالة تكون فيها حركة الماء في التربة بتأثير الجاذبية بطيئة ولا تتغير القراءات المتتالية كثيرا. إن الوصول إلى مثل هذه القراءات يعتمد على عدة عوامل منها نوعية التربة وتجانسها وكذلك بعد مستوى الماء الأرضي عن سطح التربة ولكن السعة الحقلية تدل على أكبر مقدار من الماء يمكن أن تحتفظ به التربة التي تحت الدراسة بقوة الخاصية الشعرية للفراغات المسامية في التربة ضد قوة الجاذبية الأرضية ولذا يطلق عليه أحياناً بالماء الشعري (Capillary water) وهذا الماء من الأهمية بمكان بالنسبة للنبات كما سيرد لاحقا. يمكن الوصول إلى قيم متشابهة إلى حد ما لمقدار السعة الحقلية إذا ما اتبعت طرق معينة واتخذت بعض الاحتياطات كما سيرد عند ذكر طرق قياس ماء التربة ولكن كثرة المتغيرات مثل تغير المحتوى المائي للتربة مع الزمن، وأن الطبقة العليا من التربة تختلف عن الطبقة التي تليها حيث اتجاه سريان الماء من أعلى إلى أسفل بفعل الجاذبية وكذلك الاختلاف في المحتوى المائي الأصلي قبل الري وعدم تجانس التربة وما إلى ذلك يجعل الوصول إلى قيمة ثابتة لكل أنواع الأراضي صعبا إذا ما أريد الاستدلال من هذه الكمية على ما تختزنه التربة من الماء على وجه الدقة، هذا بالإضافة إلى طول الفترة الزمنية اللازمة للوصول إلى السعة الحقلية لأية تربة. كل هذا وغيره جعل العلماء يتبعون طريقة معملية تعطي قيما مقاربة لقيم السعة الحقلية وفي زمن أقل وذلك بأخذ عينة رطبة من التربة ووضعها في جهاز الطرد المركزي وتعريضها لقوة طرد مركزي تبلغ ١٠٠٠ مرة قدر قوة الجاذبية الأرضية ولمدة ٣٥ دقيقة، هذه القوة تستخلص الماء الذي لا يرتبط بدقائق التربة ارتباطاً وثيقاً وفي هذه الحالة يطلق على الماء المستخلص بالمكافئ الرطوبي للتربة. إن هذه الكمية من الماء عبارة عن قيمة متعارف عليها ولكنها في كثير

من أنواع الأراضي تقارب السعة الحقلية ما عدا الأراضي الرملية أو الطينية الثقيلة.

٢- النسبة المئوية للذبول الدائم The permanent wilting percentage

عند امتصاص ماء التربة بواسطة جذور النباتات يزداد الشد على الماء المتبقي في التربة على هيئة أغشية رقيقة تحيط بحبيبات التربة، وهذه الزيادة تستمر حتى تصل إلى نقطة لا يمكن للنبات معها امتصاص كميات كبيرة من الماء نظرا لتعادل القوى- قوة الامتصاص بواسطة الجذور من ناحية وقوى التماسك بين أغشية الماء المغلفة لحبيبات التربة من ناحية أخرى- لذا يبدأ النبات بالذبول أي أن النبات يفقد كميات من الماء عن طريق النتح أكبر مما يمتصه من التربة، وعادة يوصف النبات النامي بأنه في حالة ذبول دائم إذا ظهرت أعراض الذبول وهي تهدل الأوراق والأفرع ولم تستعد هذه الأجزاء من النبات حالتها الامتلائية السابقة حتى بعد وضعها ليلة كاملة في جو مشبع (درجة رطوبته النسبية ١٠٠٪). والنسبة المئوية للذبول الدائم (The permanent wilting percentage) تعرف بعدة أسماء أخرى منها معامل الذبول، ونقطة الذبول، والنسبة المئوية للذبول وهي أيضا تعتبر من القياسات الفسيولوجية بعكس المصطلح السابق وهو السعة الحقلية الذي يعتبر من القياسات الفيزيائية للتربة، ولكن المصطلحين يدلان على كمية الماء الموجودة في التربة، فالسعة الحقلية تدل على أعلى حد لمحتوى التربة المائي الذي تستفيد منه النباتات بينما النسبة المئوية للذبول الدائم تدل على أدنى حد من المحتوى المائي المتاح للنبات. والنسبة المئوية للذبول الدائم يعبر عنها دائما كنسبة مئوية من الوزن الجاف للتربة وقد بين العالمان بريجز و شانتز ١٩١٢م (Briggs and Shantz, 1912) من تجاربهما العديدة بأن عددا كبيرا من النباتات المختلفة تستنفد المحتوى المائي من تربة معينة إلى أن يبلغ نفس القيمة تقريبا (الجدول رقم ٣-٢) قبل أن تصل إلى حالة الذبول الدائم، ولكن القيمة تختلف باختلاف الأراضي.

obeikandi.com

الجدول رقم (٣–٢). النسبة المئوية للذبول الدائم معدله على أساس نسبي لأنواع مختلفة من النباتات (عن بريجز وشانتز ١٩١٢م (Briggs and Shantz, 1912) .

النوع	النسبة المئوية للذبول الدائم*	النوع	النسبة المئوية للذبول الدائم*
الذرة	١,٠٣	البطاطس	١,٠٦
القمح	٠,٩٩٥	كوليوس	٠,٩٩
الشوفان	٠,٩٩٥	البنجر الأحمر	١,٠٦
الطماطم	١,٠٦	الكتان	٠,٩٩
القطن	١,٠٥	النباتات المائية (عدة أنواع)	١,١٠

❖ القيم المدونة في الجدول معدلة على أساس المتوسط النسبي لعدد من التقديرات الخاصة بكل نوع.

إن هذين المصطلحين (السعة الحقلية والنسبة المئوية للذبول الدائم) استعملا كثيرا في الماضي ولا زالا يذكران في كثير من الكتب ولكن في الآونة الأخيرة بدأ العلماء باستعمال مصطلح جهد ماء التربة كما سيرد نظرا لأنه أعم وأدق ومبني على قواعد أساسية مرتبطة بعدة فروع من العلوم.

٣– ماء التربة المتاح Readily available soil water

عند ري أية تربة جافة يمكن تقسيم الماء بها حسب تأثر حركته منها ببعض العوامل الفيزيائية كالتالي:

أ) ماء الجاذبية الأرضية Gravitational water

عندما تمتلئ جميع الفراغات المسامية في التربة بالماء فإن جزءا منه يكون عالقا في

هـذه الفراغـات بقـوى ضـعيفة تتغلـب عليهـا قـوة الجاذبيـة الأرضـية وبـذلك ترشـح إلى أسفل وهذه الكمية من الماء هي ما يعرف بماء الجاذبية الأرضية (Gravitational water)، وقبل رشح ذلك الجزء فالتربة تعرف بالتربة المشبعة، وفي الغالب لا تتعدى هذه القوة ٠,٠٣٣ ميجاباسكال.

ب) الماء الشعري Capillary water

عندما يرشح ماء الجاذبية فالتربة تحوى كمية من الماء عالقة بفعل قوى التوتر السطحي وجزء الماء الذي يمكن إزالته بقوة طرد مركزي تعادل ١٠٠٠ مرة قدر قوة الجاذبية الأرضية لمدة ٣٠ دقيقة كما سبق ذكره يعرف بالماء الشعري (Capillary water) أو السعة الحقلية.

ب) الماء المقيد Hygroscopic water

بعد إزالة الماء الشعري من التربة تبقى كمية من الماء في التربة موزعة على أسطح حبيبات التربة ذات الشحنات الكهربائية سابقة الذكر وكمية الماء هذه مرتبطة بهذه الأسطح عن طريق قوى التميؤ وهذا ما يعرف بالماء المقيد (Hygroscopic water) والذي يمكن إزالته من التربة بتعريضها لدرجة حرارة ١٠٦° م.

د) ماء التبلور Crystalline water

بعد التخلص من الماء المقيد في التربة يبقى جزء قليل من الماء في الشبكة البلورية لمعادن التربة وهو ماء التبلور (Crystalline water) والذي يمكن التخلص منه بتعريض التربة لدرجات حرارة عالية قد تصل إلى ٦٠٠° م وبذا تخلو التربة من الماء.

من هذه الأجزاء لماء التربة يتاح للنباتات الماء الشعري وحسب المصطلحات السابقة هو كمية الماء التي تحويها التربة ما بين السعة الحقلية والنسبة المئوية للذبول

الدائم، وبالطبع تختلف كمية هذا الماء ومداه حسب نوع التربة التي ينمو عليها النبات، ففي التربة الرملية يضيق هذا المدى ويبلغ أقصى اتساعه في الأراضي الطينية شريطة أن يكون تركيز الذائبات قليلا إلى حد ما (في حدود بضعة ضغوط جوية) أما إذا كان تركيز الذائبات كبيرا (قد يصل في بعض الأراضي القلوية والملحية إلى ١٠٠ من الضغوط الجوية) فهذا يقلل من الماء المتاح للنبات ومن هنا كان التعبيران (السعة الحقلية والنسبة المئوية للذبول الدائم) غير كافيين ويشوبهما بعض النقص لذا وفي محاولة لتفادي ذلك ظهرت بعض المصطلحات الأخرى مثل نقص الضغط الانتشاري لمحلول التربة والجهد الكيميائي لمحلول التربة. وسيجري الحديث عن الأخير لتفادي الالتباس لدى القارئ ولأن لجنة الجمعية العالمية لعلوم التربة قد أقرته عام ١٩٦٣م نظرا لما له من مميزات كتوحيد للمصطلحات بين فروع العلم ووضعها على أساس متين ومناسب للاستعمالات الحقلية والوصول إلى تفاهم تام ومعرفة عامة مبنية على قوانين الديناميكا الحرارية، إلا أن المصطلح القديم سيذكر في التعاريف للمقارنة.

٤- الجهد الكيميائي لماء التربة The chemical potential of soil water

دأب علماء فيزياء التربة في مطلع القرن العشرين الميلادي على استعمال قوانين الديناميكا الحرارية والمصطلحات المستخدمة فيها وفي الكيمياء الفيزيائية في دراساتهم الأساسية لماء التربة. ومن ثم بدأ الاتجاه باستعمالها مع مرور الزمن بواسطة الكثيرين [لمزيد من المعلومات عن الناحية التاريخية لتطور هذا الاستخدام انظر المراجع في كتابي سلاتير ١٩٦٧م (Slatyer, 1976) و كريمر ١٩٦٩م (Kramer, 1969)]. ويعد استخدام هذه المصطلحات بالنسبة لعلماء فسيولوجيا النبات ذا أهمية كبيرة نظرا لأنها توحد المفهوم بين فروع العلوم وبالتالي تؤدي إلى مفهوم أفضل بالنسبة لحركة موارد النباتات المائية وتيسرها لكي يؤدي النبات وظيفته، وبذا يكون هناك تطبيق مشترك في المجالين الإحيائي والفيزيائي.

إن مـصطلح جهـد المـاء ذو مفهـوم قياسـي بالنـسبة لفـروع العلـوم ويطبـق هـذا المـصطلح علـى المـاء الموجـود في التربـة وكـذلك الموجـود في النبـات بحيـث يـضم جميـع المكونات والعوامل التي تـؤثر في حركـة المـاء. ويرجـع اسـتخدام هـذا المـصطلح لأول مـرة بالنـسبة لمـاء التربـة إلى العـالم بكنجهـام ١٩٠٧م (Buckingham, 1907) عنـدما اسـتعمل مصطلح الجهد الشعري (Capillary Potential) وتلاه العـالم ادلفـسن ١٩١٤م (Edlefsen, 1914) واقـترح اسـتخدام الطاقـة الحـرة الكامنـة (Specific free energy) للدلالـة علـى مـا يعرف الآن بجهد ماء التربة. إن الطاقة الحرة أو ما يعرف بطاقة جبز الحـرة لأي نظـام، مـا هي إلا تعبير عن مقدرة هذا النظام أو أحد مكوناتـه لأداء شـغل، حيـث إن الطاقـة الحـرة لأية مادة تعتمد على متوسط الطاقة الحرة لجزيئات ذلك النظام أي الكسر الجزيئي للمادة. فبالنسبة للماء في أية نظام، طاقته الحرة يعبر عنها بجهـد المـاء الكيميـائي الـذي يعـادل في الوقت نفسه طاقة جبز الحرة الجزئية لمجموع جزيئات المـاء في ذلـك النظـام، وكلمـة الجهـد مبنية في الأساس على الطاقة لكل جزيء في الديناميكا الحرارية واستعمالها في هذا المجـال تُبقى على مفهوم الطاقة ولكن جهد الماء قد يكون له أبعاد الضغط.

يعادل الجهد الكلي للماء في أية نظام الجهد الكيميائي للمـاء النقـي معـدلا لتلـك القوى التي تغير من جهد الماء في ذلك النظام. والقـوى المؤثرة في جهـد المـاء هـي وجـود الذائبات أو وجود مواد يمتز عليها الماء أو يرتبط بها أو وجـود قـوة شـد (ضـغط سـالب) أو انخفاض في درجة الحرارة حيث يقـل جهـد المـاء بأحـدها أوبهـا جميعـا، بينمـا يـزداد جهــد المــاء بزيــادة درجــة الحــرارة أو وجــود الــضغط الموجــب ســواء الجــوي أو الهيدروستاتيكي (كما في خلايا النبات والضغط الجداري بها).

إن قياس الجهد المطلق غير ممكـن ولكـن كمـا في حالـة الطاقـة الحـرة يمكـن قيـاس فرق الجهد لنظام معين عندما يتغير (أي فرق الجهد بين وضعين) والوحدات المستخدمة

هي وحدات طاقة (أرج/ جزئي) مع أنه قد جرت العادة بالنسبة للخلايا أن تستعمل وحدات الضغط ومن السهل تحويل وحدات الطاقة إلى وحدات ضغط (الداين/ سم ^{٢}) ويمكن التعبير عن الوحدة الأخيرة بالوحدات الدولية الميجاباسكال أو الوحدات الأكثر شيوعا وهي البار أو الضغوط الجوية (٠,١ ميجاباسكال =١ بار =٠,٩٨٧ ضغط جوي= ١٠ $^{-٦}$ داين/ سم ^{٢}) (انظر الجدول رقم ١ من الملحق رقم ٤).

إن الجهد الكلي لمحلول التربة والذي يرمز له بالرمز (Ψ) هو جهد الماء النقي معدلا بحيث يحتسب تأثير العوامل الأخرى وهي الجهد الأسموزي (Ψ_s) نتيجة لوجود الذائبات وجهد الجاذبية (Ψ_z) والجهد الشعري أو الجهد الذي تسببه قوى التجاذب بين جزيئات الماء والمواد الصلبة في التربة (الدقائق) (Ψ_m) وجهد الضغط (Ψ_p) الناتج عن ضغط الغازات الخارجية. والمعادلة المعبرة عن ذلك هي المجموع الجبري لكل هذه العوامل.

$$\Psi = \Psi_s + \Psi_z + \Psi_m + \Psi_p$$

وقد اعتاد بعض الباحثين على إطلاق مصطلح الإجهاد الكلي لماء التربة (Total soil-moisture stress) وهذا المصطلح صنو لمصطلح آخر عند آخرين وهو قوة المص الكلية للتربة (Total suction) ولكن هذان المصطلحان يمثلان فقط الجهد الأسموزي والجهد الشعري لماء التربة.

في الفقرات السابقة ذكر العديد من المصطلحات الجديدة المتعلقة بالجهد الكيميائي لماء التربة ولعله من المفيد إيراد ما تعنيه تلك المصطلحات حسب تعريف لجنة علوم التربة الدولية (أسلينج ١٩٦٣ م ؛ Asling, 1963) كما يلي :

١) المحتوى المائي Water content

هذا المصطلح يستعمل للتعبير عن كتلة (أو حجم) الماء في وحدة الكتلة (أو

الحجم) للتربة الجافة. ويعنى بالتربة الجافة عادة أن التربة قد جففت في فرن عند فى رجة حرارة ١٠٥°م حتى وصلت إلى وزن ثابت. ويعبر عن المحتوى المائي (Water content) عادة كنسبة مئوية. يعبر عن محتوى التربة المائي الحجمي بالسم^{3} من الماء لكل سم^{3} من التربة. ورمز المحتوى المائي (θ).

ب) الجهد الكلي لماء التربة Total potential of soil water

ماء التربة عرضة لعديد من حقول القوى وهذه القوى ناشئة عن وجود المواد الصلبة والمواد الذائبة وضغط الغازات وحقل الجاذبية الأرضية كما سبق ذكره ويمكن التعبير عن هذه التأثيرات كميا طبقا لقوانين ومصطلحات الديناميكا الحرارية ويتم ذلك بتعيين جهود لكل مؤثر ومجموعها الجبري يعتبر الجهد الكلي لماء التربة، ويمكن التعرف على مثل هذه الجهود عن طريق طاقة جبز الحرة لجزيئات الماء في كل جهد منسوبا إلى الماء النقي الحر عند درجة الحرارة نفسها، وعندئذ فهذا يمثل مقدرة ماء التربة لأداء شغل منسوبا لمقدرة الماء النقي عند درجة الحرارة نفسها لأداء الشغل، أي هي مقدار الشغل اللازم بذله لكل وحدة كمية من الماء لنقل كمية من الماء متناهية الصغر من مستودع ماء نقي عند ارتفاع معين إلى ماء التربة عند نقطة أخرى وبكون النقل عكسيا وعند درجة حرارة ثابتة. في العادة، يعبر عن ذلك بوحدات الطاقة لكل وحدة كتلة أو وحدة حجم أو جزيء، والرمز المقترح للجهد الكلي لماء التربة هو (Φ).

جـــ) جهد الماء Water potential

إن هذا المصطلح هو المصطلح السابق نفسه ولكن عند ارتفاع ثابت أي أنه لا يشتمل على مصطلح جهد الجاذبية، لذا فإن تعريف جهد الماء بالمقارنة مع تعريف الجهد الكلي لماء التربة يمثل مقدار الشغل اللازم لنقل كمية الوحدة من الماء من مستودع

الماء النقي الحر إلى نقطة في نظام ماء التربة عند الارتفاع نفسه. وفي العادة يرمز لجهد الماء بالرمز (Ψ).

د) الجهد الأسموزي (الذائبات) Osmotic (solute) potential

يعرف الجهد الأسموزي [Osmotic (solute)potential] بمقدار الشغل اللازم بذله لكل وحدة من الماء النقي وذلك لنقل كمية من الماء متناهية الصغر من مستودع الماء النقي عند ارتفاع وضغط جوي معينين إلى مستودع به محلول مماثل لمحلول ماء التربة عند نقطة أخرى ولكن هذه النقطة مشابهة تماما لمستوح الماء النقي، والنقل عكسي وعند درجة حرارة ثابتة. والجهد الأسموزي يساوي ما يعرف بالضغط الأسموزي للمحاليل مع اختلاف الإشارة (أي سالب القيمة) حيث لكل منهما الوحدات نفسها ويرمز للجهد الأسموزي بالرمز (Ψ_s).

هـ) جهد الجاذبية Gravitational potential

وجهد الجاذبية (Gravitational potential) هو مقدار الشغل اللازم بذله لكل وحدة من الماء النقي وذلك لنقل كمية من الماء متناهية الصغر من مستودع به محلول مشابه في التركيب لمحلول التربة عند ارتفاع معين وضغط جوي ثابت لتلك النقطة إلى نقطة مشابهة عند الضغط نفسه ولكن الارتفاع مختلف، والنقل هذا عكسي وعند درجة حرارة ثابتة. والرمز المقترح هو (Ψ_z).

و) جهد المادة (الشعري) Matric (capillary) potential

وهو مقدار الشغل اللازم بذله لكل وحدة من الماء النقي وذلك لنقل كمية من الماء متناهية الصغر من مستودع به محلول مشابه في التركيب لمحلول التربة عند ارتفاع وضغط غازي خارجي إلى ماء التربة الذي يقع عند ارتفاع وضغط غازي خارجي

obeikandl.com

والنقل عكسي وعند درجة حرارة ثابتة. إن هذا الجهد يعادل مصطلح ضغط المادة مع اختلاف الإشارة حيث لكل منهما الوحدات نفسها، والرمز المقترح (Ψ_m).

ز) جهد الضغط Pressure potential

ويقصد به الجهد الناجم عن تغيرات الضغط الخارجي ورمزه (Ψ_p)، ويعرف بمقدار الشغل اللازم بذله لكل وحدة من الماء النقي وذلك لنقل كمية من الماء متناهية الصغر من مستودع ماء نقي على ارتفاع معين وعند الضغط الجوي إلى مستودع ماء مشابه تماما لماء التربة ما عدا أنه تحت الضغط الجوي الخارجي، والنقل هنا عكسي وعند درجة حرارة ثابتة. إن جهد الضغط هذا يعادل مصطلح الضغط الكلى حيث الوحدات متشابهة.

ح) قوة الامتصاص أو المص الكلي Total suction

وبقصد بها الضغط السالب منسوبا لضغط الغاز الخارجي على ماء التربة الذي يتعرض له مستودع ماء نقي لكي يحدث تعادل ما بين الاثنين حيث هما مفصولان بغشاء شبه منفذ. وبذا فإن المص الكلي يعادل قوة الشد الناتجة عن وجود دقائق التربة وقوة الشد الناتجة عن وجود الذائبات. وبالإمكان اشتقاق قوة الامتصاص الكلي عن طريق قياس الضغط الجزئي لبخار ماء التربة الذي في حالة تعادل مع ماء التربة. على أن هناك طريقة لتعريف هذا المصطلح عن طريق جهد الماء السالب المعرف سابقا عند إهمال جهد الضغط لضآلة اختلاف الضغط الجوي، على أن وحدات قوة الامتصاص أو المص الكلي هي وحدات الضغط مثل داين/ سم^2 أو البار أو الضغوط الجوية والأفضل بالوحدات الدولية الميجاباسكال وهذا المصطلح مشابه تماما لمصطلح الإجهاد الكلي لماء التربة السابق ذكره.

obeikandl.com

(٣-٤)حركة الماء في التربة

يعد معدل نفاذ الماء داخل التربة من الأهمية بمكان عند نزول الأمطار أو الري، ومع اختلاف الأراضي وعدم تجانسها فإنه عند ري تربة متجانسة فالماء ينتقل من أعلى إلى أسفل ويمكن تمييز خمس مناطق متتالية من أعلى إلى أسفل كالتالي:

١- منطقة التشبع والتي تمثل نحو ١,٥ سم من التربة.

٢- منطقة انتقالية وتمثل نحو ٤,٥ سم من التربة.

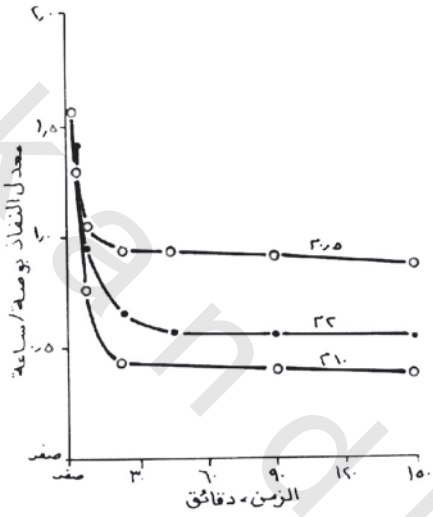
٣- منطقة نفاذ الماء الرئيسية حيث تغير المحتوى المائي بها قليل وانتقال الماء ناتج عن تأثير الجاذبية.

٤- منطقة الابتلال حيث تغير المحتوى المائي بها سريع.

٥- منطقة مقدمة الماء حيث ممال المحتوى المائي بها كبير ويمثل الحدود المرئية لنفاذ الماء في تلك التربة واعتمادا على كمية الماء يتحدد عمق منطقة نفاذ الماء الرئيسية حيث تمثل هذه المنطقة جزء التربة غير المشبع والذي به المحتوى المائي وجهد ماء التربة متجانس أما جهد المادة (الشعري) فيكون عاليا وأكبر من-٠,٠٠٢٥ ميجاباسكال ودرجة تشبع الفراغات المسامية قد تصل إلى ٨٠٪. إن معدل نفاذ الماء لهذه المناطق يعتمد على كمية الماء ويقل مع الزمن ولذا يمكن الوصول إلى قيمة ذات حد أدنى في مثل هذه التجارب وللأغراض التجريبية فمعدل النفاذ يقاس بوحدات (سم/ الساعة) مع أنها حقيقة تمثل كمية الماء الكلية النافذة لتلك التربة في زمن معين.

هناك عدة عوامل تؤثر في معدل نفاذ الماء في التربة ومنها محتوى التربة المائي الابتدائي (أي قبل نزول المطر أو الري) ونفاذية سطح التربة وخواص التربة الداخلية (كحجم المسافات المسامية) ودرجة تمدد التربة ومقدار المواد العضوية وتعاقب الري أو المطر وأخيرا درجة حرارة التربة. إن دراسة هذه العوامل كل على حده مهم من الناحية

التطبيقية في مجال الزراعة وإدارة المراعي والمحافظة على التربة من التأثير المدمر للجريان السطحي، وكمثال لتأثير العوامل يتضح من الشكل التالي (الشكل رقم ٣-١) تأثير المواد العضوية في التربة ونشاط الجذور لنبات منعزل على معدل نفاذ الماء في التربة. لذا نجد أنه تستخدم بعض بقايا النباتات بإضافتها للتربة لتحسين نفاذية التربة السطحية.



الشكل رقم (٣–١). معدل نفاذية الماء لتربة طينية على أبعاد متباينة من شجرة سلم معزولة حيث تأثير وجود الجذور ظاهر في سرعة معدل النفاذية بالقرب من تلك الشجرة.

المصدر: (Slatyer, 1962).

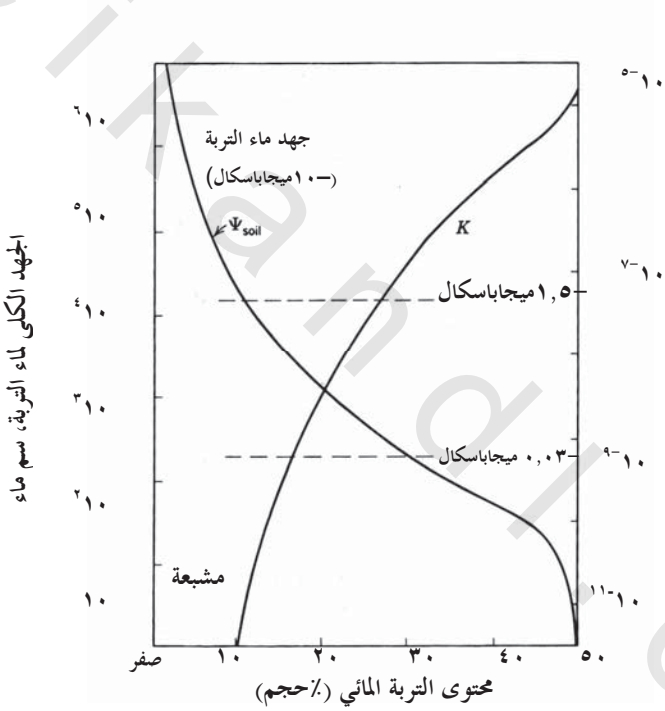
أما حركة الماء داخل التربة فلا تتحكم فقط في معدل نفاذ الماء بل وفي مقدار الماء المتاح لجذور النباتات، وبالصيغة التقليدية يتدفق ماء التربة السائل في الفراغات المسامية تحت تأثير الجاذبية أو عبر الأغشية المحيطة بدقائق التربة تحت تأثير قوي التوتر السطحي ولكن الماء ينتقل كبخار ماء في الفراغات المسامية تحت تأثير فروق الجهد، وبذا ففي

جميع الحالات فالماء ينتقل في التربة عبر ممالات جهد الماء ولو أن هذه الممالات في الجهد ناتجة عن مكونات مختلفة للجهد الكلي لماء التربة ، من الناحية النظرية يستخدم قانون دارسي (Darcy`s law) لوصف حركة الماء السائل في التربة والذي ينص على أن كمية الماء المارة عبر مقطع من التربة يمثل الوحدة يتناسب عكسياً مع الفرق في الجهد الكلي لماء التربة. ورياضياً :

$$V = -K \frac{\Delta \Phi}{\Delta Z}$$

حيث (V) تمثل سرعة التدفق بالسنتيمتر/ الثانية و(ΔZ) هي سمك القطاع (عمق التربة) و(Φ) هي الجهد الكلي لماء التربة و (K) التوصيلية الهيدروليكية (توصيلية السائل المتحرك) (Hydraulic conductivity) ويعبر عنها بالسنتيمتر/ الثانية. وتختلف قيم هذا المعامل كثيرا حيث تتراوح بين أقل من ٠,٠٠٢٥ سم/ الساعة في التربة ذات النفاذية البطيئة إلى أكثر من ٢٥ سم/ الساعة في التربة ذات النفاذية السريعة وذلك بسبب اختلاف الجهود المكونة للجهد الكلي لماء التربة. وهذا المعامل مؤشر جيد لمقدرة التربة على الاحتفاظ بماء يكفي لنمو النباتات إذا لم يكن هناك مركبات ذائبة بشكل غير عادي ، فالتربة ذات التوصيلية الأكبر من ٢٥ سم/ الساعة لا تستطيع الاحتفاظ بماء يكفي لنمو المحاصيل عليها. والعلاقة بين هذا المعامل والجهد الكلي لماء التربة ومحتوى التربة المائي مبينة في الشكل رقم (٣-٢) كمثال لتغير قيم التوصيلية الهيدروليكية مع الجهد الكلي لماء التربة حيث تتناقص التوصيلية مع تناقص الجهد ولذا فحركة الماء في الأراضي الجافة تتوقف تقريبا عندما يكون الجهد في حدود- ١,٥ ميجاباسكال حيث تبدأ عملية انتقال الماء على هيئة بخار. والمجال لا يتسع لشرح جميع العوامل المؤثرة في حركة الماء في التربة ولكن من المهم ذكره أنه عند وجود فروق في درجة الحرارة بين سطح التربة والمناطق العميقة منها والتي بها ماء فإن كمية من الماء تنتقل من أسفل

التربة إلى السطح أو العكس حسب الفروق في درجة الحرارة المرتبطة بالفصول السنوية، والانتقال هنا غالبا يكون على هيئة بخار ماء سواء أكانت التربة جافة أو أن بها مناطق صغيرة تحوي كمية بسيطة من الماء السائل حيث في الحالة الأخيرة يتكاثف بخار الماء على أحد الأسطح ويتبخر من السطح الآخر لتلك القطرة. ويحدد منسوب الماء الأرضي حركة الماء إلى أعلى في التربة فإن كان على عمق متر تقريبا فإن حركة الماء من ذلك المنسوب إلى أعلى تكفي لزراعة محصول عليه.



الشكل رقم (٣–٢). تناقص قيم التوصيلية الهيدروليكية (K) وجهد ماء التربة (ϕ) مع تناقص محتوى التربة(نسبة مئوية لحجم التربة) لتربة بولو الغريانية الخفيفة.

المصدر: (Philip, 1957).

(٣–٥) طرق قياس ماء التربة

في حجم هذا الكتاب لا يمكن بأية حال من الأحوال تغطية كل الطرق المتبعة لقياس ماء التربة ولكن يمكن إعطاء مقدمة لأشهر الطرق مع التركيز على القواعد الأساسية لبعض الطرق ومجال استعمالاتها وبعض مساوئها دون إعطاء شرح مفصل كامل والقارئ يمكن أن يستنير بالعديد من المراجع في بعض الكتب المتخصصة في طرق قياس ماء التربة مثل تيلور وآخرون ١٩٦١م (Taylor *et. al*., 1961) والمراجع المذكورة في ذلك الكتاب و كريمر ١٩٦٩م (Kramer, 1969) وغيرهم.

١– قياس محتوى التربة المائي

لا شك أن طريقة تعيين محتوى التربة المائي مباشرة لعينات من التربة هي الطريقة الأكثر شيوعا إلا أن المحتوى المائي للتربة متغير في الأراضي، لعدم تجانسها ويفضل كثير من العلماء وخاصة العاملون في الحقل طرق قياس غير مباشرة تسمح لهم بتكرار القياسات دون تغيير لتركيب التربة الأصلي وذلك نظرا للجهد الكبير المطلوب لجمع عينات كثيرة أو أن تكون التربة صخرية أو غير ذلك. ويعتمد اختيار الطريقة على الهدف أو الغاية من تلك التجارب على أية حال فإن من أهم الطرق ما يلي:

١) طريقة الوزن (أو الحجم)

تتطلب هذه الطريقة جمع عدة عينات في أوعية خاصة ذات حجم معلوم أوفي أنابيب العينات ومن ثم إزالة الماء من تلك العينات عن طريق تجفيفها في الفرن عند درجة حرارة ١٠٥°م حتى تصل العينة إلى وزن ثابت تقريبا. إلا أن هذه الطريقة تتطلب وقتا طويلا، لذا فهناك عدة وسائل للإقلال من الفترة الزمنية كإضافة الكحول الميثيلي إلى العينة ومن ثم قياس التغير في الكثافة النوعية للكحول بواسطة مقياس الماء

(Hydrometer) وهناك طريقة أخرى وهي إضافة كربيد الكالسيوم الذي يتفاعل مع ماء التربة مكونا غاز الاستيلين ومن ثم حساب محتوى التربة عن طريقة نقص وزن العينة مضافا لها وزن كربيد الكالسيوم. وعلى أية حال حتى الآن لم تكن إحدى هذه الطرق شائعة على المستوى العلمي المطلوب مثل التجفيف في الأفران ويعبر عن محتوى التربة المائي كوزن للماء بالجرام/ جرام من التربة المجففة أو كوزن للماء بالجرام/ سم^{3} من التربة المجففة. ومثل هذا التعبير ليست له دلالة فسيولوجية بالنسبة للنبات إلا إذا قرنت النتيجة بجهد ماء التربة أو السعة الحقلية والنسبة المئوية للذبول الدائم كما سبق ذكره.

ب) الطرق غير المباشرة لقياس محتوى التربة المائي

وفي هذه الطرق يجب أن يكون هناك منحنى قياسي للرجوع إليه بعد القياسومن أشهر هذه الطرق:

١- طريقة تشتيت النيوترونات

وتعتمد هذه الطريقة على خاصية ذرات الهيدروجين في إبطاء وتشتيت النيوترونات السريعة ولذا فقياس مقدار النيوترونات المبطئة بالقرب من نقطة انطلاقها يدل على كمية ذرات الهيدروجين في تلك النقطة وحيث إن أكبر مصدر في التربة لذرات الهيدروجين هو الماء، لذا فإن هذه الطريقة تقدر كمية الماء الموجودة في تلك التربة. وفي الأراضي التي تكثر فيها جذور وبقايا النباتات فإن الهيدروجين الداخل في تركيب تلك المواد العضوية قد يؤثر في التقدير ولكنه من الضآلة بمكان بحيث يمكن إهماله نظرا لما لهذه الطريقة من محاسن مقارنة بالطرق الأخرى ككبر حجم العينة الممسوحة بهذه الطريقة (دائرة قطرها نحو ٢٠ سم) على أن هذه الطريقة لها بعض المساوئ كعدم المقدرة على تقدير ماء التربة الذي بالطبقة العلوية (أي لا بد وأن يكون

المسح على عمق ٢٠ سم من سطح التربة تقريبا) إلا باتخاذ احتياطات خاصة مما يزيد نسبة الخطأ ومن ناحية أخرى هناك بعض العناصر مثل الكلورين والحديد والبورون تتداخل في التأثير مع الهيدروجين في إبطاء النيوترونات المعجلة.

٢- طريقة امتصاص أشعة جاما

تتغير كمية الأشعة المارة بعينة من التربة مع تغير المحتوى المائي لتلك العينة إذا كانت هذه العينة من النوع الذي لا يتقلص أو يتمدد بدرجة ملحوظة وتعتبر هذه الطريقة مناسبة لقياس محتوى التربة المائي المار في عمود من عينة التربة ولا يمكن الاعتماد عليها إلا إذا كانت كثافة التربة لا تتغير كثيرا مع تغير المحتوى المائي.

٣- طريقة السعة الكهربائية

تستغل هذه الطريقة إحدى خواص الماء وهي ثابت العزل الكهربائي العالي حيث هو أكبر من ذلك للتربة الجافة ولذا فأي تغير في محتوى التربة المائي ينعكس على سعتها الكهربائية وفي الأساس تستغل هذه الطريقة في تقدير كمية الماء في الحبوب والدقيق والأطعمة المجففة وكثير من المنتجات الصناعية وقد حاول علماء التربة في تطبيقها لتقدير كمية الماء في التربة حيث إنها من الناحية النظرية ذات مجال واسع ولكن حتى الآن لم ينتشر استعمالها عمليا نظرا لكثرة الأخطاء الممكنة وخاصة تأثير ملامسة الإلكترود للتربة وعدم الحصول على قيم يعتد بها نظرا لصعوبة الحصول على قراءات ثابتة.

٤- طريقة التوصيلية الحرارية

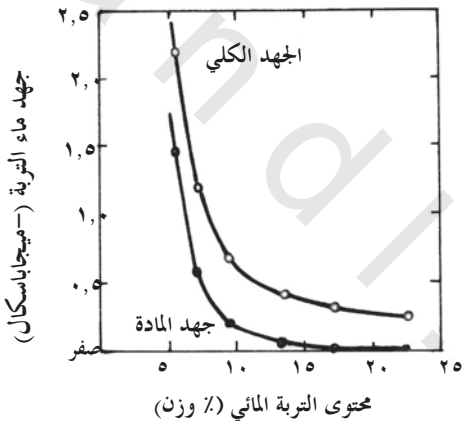
من الحقائق الشائعة إن توصيل التربة الحراري يقل مع قلة محتواها المائي لذا فقد أمكن تصميم مصدر حرارة يغمر في التربة ومن ثم يسخن بالتيار الكهربائي بعده يقاس

معدل تبدد الحرارة من ذلك المصدر حيث يختلف ذلك باختلاف المحتوى المائي وهذه الطريقة لا تتأثر بتركيز الأملاح في التربة وأحسن ما تفيد هذه الطريقة في التربة الرطبة وكذلك التربة الرملية التي لا تتقلص مع الجفاف.

مما تقدم يتضح أن كل طريقة لها ظروف أنسب من غيرها أحيانا لذا فاختيار الطريقة تحدده ظروف التجربة العامة.

٢- قياس جهد ماء التربة

من الممكن تقدير جهد ماء التربة من الطرق السابقة وهي طرق قياس المحتوى المائي للتربة وذلك عند وجود رسم للعلاقة بين الاثنين أو بين المحتوى المائي للتربة وجهد المادة كما في الشكل رقم (٣- ٣).



الشكل رقم (٣-٣). العلاقة بين جهد الماء الكلي وجهد المادة لتربة تتكون من خليط من الرمل والطفل والمواد العضوية (Peat)، والمادة العضوية تؤثر بالطبع على مكون الجهد الكلي وهو الجهد الأسموزي.

المصدر: (Newman, 1966).

معظم الطرق المستخدمة لقياس جهد ماء التربة تتناسب في الحقيقة مع الاختبارات المعملية أوفي البيوت الزجاجية ولكن هناك طريقة نشرها العالم ريتشاردز ١٩٦٥م ب (Richrds, 1965b) من الممكن أن تؤدي إلى طريقة حقلية لقياس جهد ماء التربة. وتتلخص هذه الطريقة في استعمال سطحين مساميين متشابهين ومسخنين لدرجة حرارة معينة إلا أن أحدهما به ماء فحرارة كل من الاثنين سترتفع إلى حد معين ولكن ستكون درجة حرارة السطح الجاف أعلى أما السطح الرطب فستثبت درجة حرارته حتى يتبخر كل الماء الذي به ثم ترتفع إلى درجة الحرارة التي تبدو على السطح الجاف، وبرسم فروق درجة الحرارة مع الزمن نحصل على منحنى ذي ارتفاع معين، وباستعمال درجة رطوبة معينة وجهد مائها معروف يمكن الحصول على سلسلة من المنحنيات يمكن تقدير جهد ماء التربة المجهول بجعل ماء التربة يتزن مع السطح المسامي الرطب وقراءة الجهد من هذه المنحنيات. ومع أن هذه الطريقة لم تختبر بدقة ومن جميع الجوانب إلا أنها تبدو ملائمة واحتمالات نجاحها كبيرة.

أضف إلى ذلك أن الطريقة المعملية (كما سيرد) قد استغلت لقياسات جهد الماء في الحقل بتعديل في تصميم السيكروميتر لتلافي تأثير درجة الحرارة (Brown and Van Haveren, 1972).

أما في المعمل فتستعمل عدة طرق لقياس جهد ماء التربة ومنها:

أ) طريقة الاتزان البخاري Vapor equilibration

من أولى المحاولات لقياس جهد ماء التربة ما قام به العالم شل ١٩١٦م (Shull, 1916) عندما استعمل بذور نبات (*Xanthium pennsylvanicum*) بعد أن قدر كمية الماء التي تمتصها هذه البذور من محاليل مختلفة الضغط الأسموزي وذلك لتقدير القوة التي تمسك بالماء في التربة وذلك بوضع البذور في عدة عينات ذات محتوى مائي مختلف،

وبعد ذلك قام بعض العلماء الأوروبيون بقياس جهد ماء التربة بواسطة شرائط ورقية مشبعة بمحاليل مختلفة التركيز ومن ثم وزن الشرائط بعد تعريضها للتربة والتي لا يتغير وزنها تعد ممثلة لجهد ماء التربة ، وهذه الطريقة يمكن استعمالها في الحقل ولكن التغيرات في درجة الحرارة تجعل نتائجها تقديرية فقط. على أية حال فقياس جهد الماء في معظم المختبرات مبني على قياس الضغط البخاري النسبي أو الانخفاض في درجة حرارة التجمد كما في الطريقتين التاليتين.

ب) الطريقة السيكروميترية Psychrometric method

من أنجح الطرق لقياس جهد ماء التربة هذه الطريقة والتي تعتمد على قياس ضغط البخار النسبي بواسطة سيكروميتر ذي مزدوج حراري (مصرد أو مرطاب). وهذه الطريقة في القياس تعتمد على العلاقة بين جهد الماء الكيميائي والنقص في الضغط البخاري حسب المعادلة التالية :

$$\Psi_w = - \frac{RT \ln e/e^\circ}{V_w}$$

حيث (Ψ_w) جهد الماء الكيميائي

(R) ثابت الغازات

(T) درجة الحرارة المطلقة

(e/e°) ضغط البخار النسبي

(V) حجم الماء الجزئي.

وهناك نوعان من السيكروميترات المستعملة بكثرة في قياس جهد ماء التربة وكذلك جهد ماء النسيج ، وقياس ضغط البخار النسبي الذي يكون في حالة اتزان مع

obeikandl.com

العينة المراد قياس جهد الماء بها بحيث توضع تلك العينة في وعاء صغير موضوع في حمام مائي للمحافظة على درجة حرارته لكي يكون التغير في درجة الحرارة في حدود ٠,٠٠١°م. والنوع الأول يستغل ظاهرة بلتيه (Peltier effect) لتكثيف الماء على المزدوج الحراري فعندما تغلق الدائرة الكهربائية يبدأ الماء المكثف في التبخر مسببا برودة لوصلة المزدوج الحراري، والتيار يقاس بواسطة جلفانوميتر. أما النوع الثاني فتوضع قطرة الماء على وصلة المزدوج الحراري ويقاس التيار عندما يكون هناك تبخر ثابت منها، وفي كلا النوعين لابد من الرجوع إلى منحنى قياسي مرسوم به نتائج قراءات لمحاليل معروف ضغطها البخاري.

وقد تطورت هذه الطريقة في القياس بتطور هذه الأجهزة بحيث أمكن تطبيق طريقة السيكروميترات في كثير من القياسات المهمة كجهد ماء التربة وجهد الماء في النبات كما سيرد وقد اُستخدِم سيكروميتر المزدوج الحراري وبتصميم خاص لتلافي تأثير درجة الحرارة على القياس (Hsieh, *et. al.*,.1972) لقياس مجال جهد ماء التربة الكلي (بالنسبة للعمق) في موضع صحراوي ذي تربة رملية طفالية متجانسة والجدول رقم (٣-٣) يبين نتيجة ما توصلوا إليه.

جـ) الطريقة الكريوسكوبية (طريقة الاستصراد) Cryscopic method

تعتمد الطريقة الكريوسكوبية (Cryscopic method) على العلاقة بين الجهد الكيميائي لماء التربة وانخفاض درجة التجمد لمحلول ماء التربة ولكن هذه الطريقة عرضة للأخطاء نظرا لقلة الماء في بعض عينات التربة بحيث من الصعوبة تركيز كمية كافية من الماء لبداية تكوين البلورات ونوعية قوى الامتزاز لحبيبات التربة، لذا وكما سيلحق تستعمل هذه الطريقة للعينات النباتية.

الجدول رقم (٣-٣). ممال جهد الماء مع التغير في عمق التربة (Hsieh, *et. al.*,.1972).

عمق التربة (سم)	ممال جهد الماء ميجاباسكال/سم	عمق التربة (سم)	ممال جهد الماء ميجاباسكال/سم
٧,٥	لا يمكن قياسه لجفافه	١٥٢,٥	٠,٠٠٣
١٥,٠	لا يمكن قياسه لجفافه	٢٢٩,٥	٠,٠٠٠٥
٣٠,٥	٠,١٥	٣٠٥,٠	٠,٠٠٠
٦١,٠	٠,٠٢١	٣٨١,٠	٠,٠٠٠٢
٩١,٥	٠,٠٠٨٨	٤٤٠,٠	٠,٠٠٠١-

٣- قياس جهد المادة (الشعري)

كثير من الطرق المتبعة لقياس المحتوى المائي للتربة تصلح لقياس جهد المادة في الحقل سواء بطريقة مباشرة أو غير مباشرة، ومن أشهر الطرق:

أ) طريقة قوالب المقاومة الكهربائية

في هذه الطريقة تستعمل إلكترودات متصلة بقنطرة المقاومة والإلكترودات توضع في قوالب من الجبس المطعم بمواد راتنجية لإطالة مدة استعمالها والتخفيف من عملية التفتيت لهذه المادة وخاصة في التربة الرطبة جدا. حيث تترك القوالب تتعادل مع ماء التربة ومن ثم تقاس المقاومة بين الإلكترودين، ولكن هذه الطريقة فعالة في مدى جهد المادة من- ٠,٠٥ إلى- ١,٥ ميجاباسكال وقد استعملت مواد أخرى لتغليف الإلكترودات مثل النيلون والألياف الزجاجية لكن مثل هذه المواد تتأثر بالأملاح والأسمدة حيث القراءات غير منتظمة في وجود مثل هذه المواد.

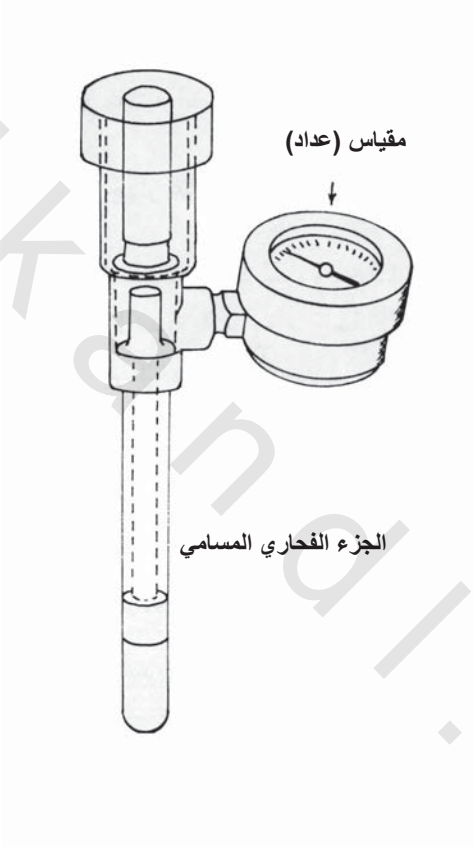
في بعض الأحيان تعاير قوالب المقاومة بجهاز غشاء الضغط وقياس المقاومة تحت ضغوط مختلفة حيث عندها يمكن قراءة جهد المادة مباشرة من المؤشر ولكن أحيانا تعاير بمحتوى التربة المائي حيث تؤخذ عينات من التربة بالقرب من القوالب وتقدر قيم محتواها المائي بالطريقة الوزنية.

ب) طريقة مقياس التوتر السطحي Tensiometer

يمكن قياس جهد المادة (الشعري) مباشرة في هذه الطريقة فقط ويمكن بهذا النوع من الأجهزة المبسطة تقدير محتوى التربة المائي في الأراضي قليلة الملوحة فقط، أما في الأراضي التي تحوي كمية من الأملاح أو كمية من المواد العضوية (سماد) فإن القياس بهذه الطريقة ليس كاف لتقدير محتوى التربة المائي نظرا لأن وجود هذه المواد (الأملاح أو السماد) كاف لإعطاء قياسات للجهد الأسموزي تقلل من قيمة التقدير (انظر الشكل رقم (٣-٣) للعلاقة بين المحتوى المائي وجهد ماء التربة). والشكل رقم (٣-٤) عبارة عن رسم تخطيطي لأحد الأنواع التجارية.

ويتألف الجهاز في شكله العام في الغالب من جزء فخاري على هيئة فنجان مسامي حيث يملأ بالماء ويغرز في التربة بواسطة أنبوبة متصلة به من جهة ومن جهة أخرى متصلة بمانوميتر أو عداد ذي مؤشر لقياس شدة التفريغ عند انتقال الماء من الفخار إلى التربة، وإذا ثبتت قراءة المؤشر فهي تدل على حالة الاتزان في حركة الماء من الفنجان الفخاري إلى التربة وبالتالي الجهد، وهذا الجهاز ذو فعالية كبيرة في تعيين جهد المادة للتربة الرطبة ولكن عندما تقل قيمة هذا الجهد عن- ٠,٠٨ ميجاباسكال فإن الهواء قد يدخل إلى الفنجان الفخاري ويصبح عديم الفائدة، ومع أن فائدة هذا الجهاز عظيمة في تقدير ماء التربة وخاصة أنه حساس في المدى الذي تستفيد منه النباتات إلا أن الجهود العالية ذات أهمية أكبر في الزراعة

والدراسات البيئية. وبالإضافة إلى هذه النقيصة في هذا الجهاز هناك أشياء ثانوية قد تؤثر في قراءات الجهاز ولمزيد من المعلومات لهذا الموضوع راجع ما كتبه العالم ريتشاردز ١٩٤٩م (Richrds, 1949).



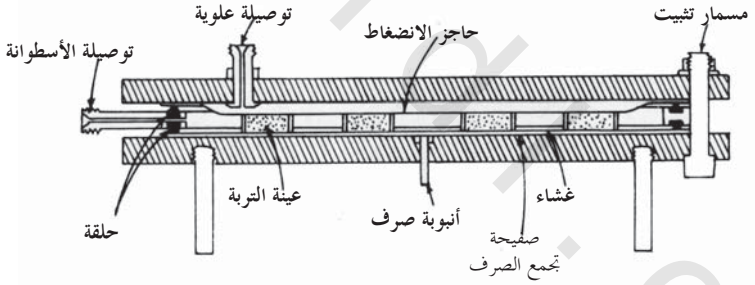
الشكل رقم (٣–٤). رسم تخطيطي لمقياس التوتر السطحي من الأنواع التجارية والمكـــون مـــن جـــزء بلاستيكي موصل به الجزء الفخاري المسامي ومقياس يسجل القراءات، والغطاء في قمته يقفل الفتحة التي يملا عن طريقها الجهاز بالماء.

المصدر: (Kramer, 1969).

obeikandl.com

جـــ)الطريقة المعملية (جهاز غشاء الضغط)

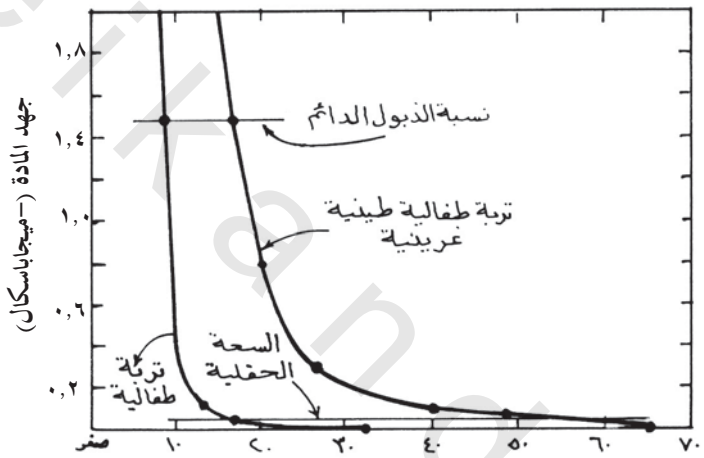
ويتكون هذا الجهاز من غشاء منفذ للماء والمحاليل يوضع في وعاء يحوي عينة التربة ثم تعرض العينة لضغط سواء بالتفريغ من أسفل أو بالهواء المضغوط من أعلى وبذا فماء التربة ينساب عبر الغشاء حتى يحدث التعادل (عند توقف الماء عن الانسياب) وذلك بين جهد المادة والضغط المحدث على عينة التربة. عندها تؤخذ عينة التربة ويحسب محتواها المائي بطريقة الوزن والتجفيف ويبين الشكل رقم (٣-٥) رسماً تخطيطياً لقطاع في هذا الجهاز لتوضيح مكوناته. وقد جرى استخدام أغشية سليلوزية مدعمة بصفائح حديدية لتحمل الضغوط العالية ولكن في الآونة الأخيرة تستخدم صفائح فخارية تتحمل ضغوط قد تصل إلى ١,٥ ميجاباسكال. ويلاحظ كما في الشكل أنه يمكن قياس جهد المادة لأكثر من عينة لصغر العينات حيث تستعمل صفائح ضغط ذات قطر يقارب ٥ سم وسمك ١,٥ سم. إن معاملة التربة بأية طريقة كالنخل قد تسبب بعض الأخطاء.



الشكل رقم (٣–٥). رسم لمقطع في جهاز غشاء الضغط لقياس محتوى التربة المائي حيث توضع عينات التربة في أسطوانات معدنية صغيرة (بقطر يقارب ٥سم وسمك ١,٢سم) ومن ثم توضع الأسطوانات على الغـــشاء حيث الهواء المضغوط يوصل عبر توصيلة الأسطوانة. أما التوصيلة العلوية فيدخل منها هواء يقع تحت ضغط أعلى قليلاً من ذلك الواصل عبر توصيلة الأسطوانة مما يجعل حـــاجز الانـــضغاط يضغط على عينات التربة باتجاه الغشاء مسبباً انسياب الماء من عينة التربة. ويلاحظ أنـــه أحيانـــا تستعمل صفيحة فخارية مسامية بدلا من الغشاء.

المصدر: (Kramer, 1969).

وكما تقدم فإن كثيراً من طرق قياس المحتوى المائي للتربة تصلح لقياس جهد المادة في الحقل نظرا للعلاقة بينهما، إلا أنه قد سبقت الإشارة في موضوع ماء التربة (٣-٣) إلى الماء المتاح للنبات وأنه يقرر عادة بكمية الماء بين السعة الحقلية والنسبة المئوية للذبول الدائم ونظرا لأن هذه القياسات تختلف باختلاف التربة لذا فالشكل رقم (٣-٦) يوضح العلاقة بينهما وجهد المادة لنوعين من التربة مقرونة بالمحتوى المائي.



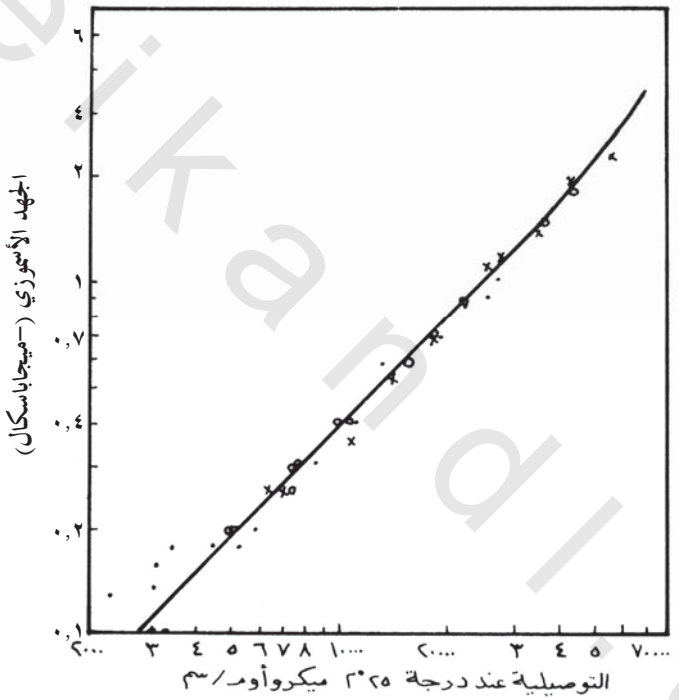
الشكل رقم (٣-٦). العلاقة بين جهد المادة والمحتوى المائي لنوعين من أنواع التربة، ومن الرسم تتبين نسبة الذبول الدائم والسعة الحقلية.

المصدر (Kramer, 1969)، **بناء على بيانات آخرين.**

٤- قياس الجهد الأسموزي لمحلول التربة

من الواضح أن هذه الطريقة تتضمن قياس الجهد الأسموزي لمحلول التربة بعد استخلاصه من العينة، والاستخلاص يتم عادة بإضافة كمية من الماء ثم ترشيح الماء

وما به من محاليل ذائبة ومن ثم تقدير الجهد الأسموزي بإحدى الطرق المذكورة سابقاً وهي الطريقة الكريوسكوبية أو الطريقة السيكروميترية. في العادة، يجري قياس التوصيلية الكهربية لمحلول التربة حيث هناك علاقة بينهما وبين الجهد الأسموزي كما في الشكل رقم (٣-٧) لتفادي الزيادة أو النقص في التقدير.



الشكل رقم (٣–٧). العلاقة بين الجهد الأسموزي لمحلول التربة والتوصيلية الكهربائية، وتشمل على قراءات من مستخلص التربة ومن محاليل تغذية.

المصدر: [عن رسم (Kramer, 1969) **بناء على بيانات ريتشارد ١٩٥٤م].**

obeikandl.com

وبالطبع تعدل القيم الناتجة (وهي قراءات الجهد الأسموزي لمحلول التربة) إلى القيم الأصلية كما في محلول التربة قبل إضافة الماء بطريقة التناسب. إن هذه الطريقة تعطي قيما تقريبية نظرا لأن درجة التفكك والمعاملات الأسموزية لكثير من الأملاح الموجودة في التربة تختلف باختلاف تركيزها وتركيز الأملاح الأخرى في المحلول وكذلك تختلف باختلاف درجة الحرارة.

في العرض المبسط السابق لطرق قياس ماء التربة يلاحظ أنه لم يكن المقصود هو إجراء مسح شامل بحيث تغطى جميع الطرق ولكن المقصود هو إعطاء فكرة مبسطة عن أكثر الطرق شيوعاً في هذا الفرع كما ذكر في البداية وبالطبع ليست على أية حال أدقها.

obeikandl.com

الفصل الرابع

العلاقات المائية للخلية

• المقدمة • تركيب الخلية النباتية
• مصطلحات العلاقات المائية للخلية
• البلزمة • نفاذية الخلية • حركة الماء بين الخلايا • طرق قياس جهد الماء
• أمثلة لمدى جهد الماء في النبات

(٤-١) المقدمة

إن معظم الماء الموجود في النباتات، عموماً، يوجد داخل الخلايا - وعلى وجه التحديد يوجد في الفجوات التي تكون في غالبية الخلايا النباتية متميزة وكبيرة، لذا فإن فهم العلاقات المائية للنبات يتطلب معرفة بتركيب الخلايا وعلاقاتها المائية. إن تركيب الخلية النباتية ليس من البساطة بحيث يغطى بالتفصيل في مثل هذه العجالة نظرا لاختلاف الخلايا في الحجم والشكل والوظيفة والمحتوى المائي والنفاذية وغير ذلك من الصفات المميزة والتي يمكن الإلمام بها من الكتب التي تتناولها بالتفصيل ولكن إعطاء لمحة عن تركيب الخلية ومكوناتها وخاصة نوع الخلايا الذي له دور كبير في تخزين الماء قد يساعد في فهم العلاقات المائية.

obeikandl.com

(٤-٢) تركيب الخلية النباتية

تكون الفجوات الخلوية- وبالتالي المحتوى المائي- جزءاً كبيراً من أحد أنواع الخلايا النباتية وهي الخلايا البرنشيمية، بعكس الخلايا المتخصصة كالخلايا الموجودة في المناطق الإنشائية (أي الخلايا التي لازالت في طور التميز حيث الفجوات الصغيرة والسيتوبلازم وما به من عضيات ونواة والجدار الخلوي المحيط بكل خلية نباتية تقريبا. إذا فالخلية البرنشيمية تتكون من جدار خلوي رقيق نوعا ما وطبقة من السيتوبلازم وبه النواة، وطبقة السيتوبلازم هذه تغلف فجوة مركزية كبيرة، وقد أدى استخدام المجهر الإلكتروني إلى إظهار كثير من الصفات والتراكيب الدقيقة للخلية ككل، والشكل التالي (الشكل رقم ٤-١) يمثل رسما تخطيطيا مبسطاً لقطاع في خلية نباتية مثالية وبالطبع ليس هناك خلية مثالية تضم كل هذه المكونات ولكن الرسم وضع كمرشد ليضم مكونات الخلية بصفة عامة. تتميز الخلايا النباتية، عموما، بوجود جدار صلب، نوعا ما، يحد من تمدد الخلية إلى ما لا نهاية وبذا فهو يحول دون انفجار الخلية عندما تدخل كميات كبيرة من الماء بحيث يسبب هذا الجدار ضغطا على مكونات الخلية. يتكون الجدار الخلوي الابتدائي من ترسبات مواد كربوهيدراتية كالسليلوز وأشباه السليلوز والمواد البكتينية وبعض البروتينات، وكل هذه المواد يكونها سيتوبلازم الخلية. ويكون الماء أكثر من نصف حجم الجدار الخلوي الابتدائي في الخلايا الصغيرة وغالبية الماء موجودة في فراغات شعرية دقيقة في الجدار الخلوي قطرها يتراوح ما بين واحد وخمسة نانومترات، والماء في الجدار الخلوي تربطه قوى التشرب أو قوة امتصاص المادة حيث يرتبط إلى أسطح الليفات السليلوزية بواسطة الروابط

الشكل رقم (٤–١). رسم تخطيطي لقطاع في خلية نباتية "مثالية" لتوضيح العضيات التي توجد، غالبا، في الخلايا النباتية المختلفة.

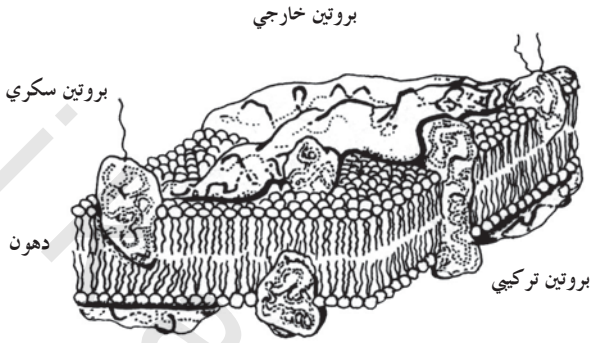
المصدر: (Milburn, 1979) **بتصرف**.

الهيدروجينية أو القوي الشعرية في الفراغات الدقيقة الأكبر بينها والتي يتراوح قطرها ما بين ١٠ إلى ١٠٠ نانومتر بحيث قد يصل حجم الماء إلى ما يقارب النصف من حجم الجدار الخلوي الابتدائي. ومع أن الجدار الخلوي صلب نوعا ما إلا أنه مرن ولذا فإن ضغط الامتلاء (وهو الضغط الناشئ من الداخل على مكونات الخلية من الجدار الخلوي نتيجة لامتلاء الخلية بالماء) يتسبب في كبر الخلايا الصغيرة. بعد تميز الخلايا تقوم الخلية بترسيب مواد إضافية من السليلوز يتخللها مادة اللجنين على الجانب الداخلي للجدار الخلوي الابتدائي كطبقة أو طبقات أخرى مكونة ما يعرف بالجدار الخلوي الثانوي. هنا تتوقف الخلية عن الكبر في الحجم نظراً لفقد الجدار الخلوي بعض مرونته ولذا تتخذ الخلية شكلها

النهائي تقريباً. مع ذلك لا تفقد الخلية مرونتها كلية ولذا فحجم الخلية يتغير بتغير ضغط الامتلاء. والجدار الخلوي منفذ للماء والمحاليل إلا في حالة ترسب بعض المواد الدهنية كما في الخلايا الفلينية وأجزاء من جدار الخلية في البشرة الداخلية في الجذر. إن الجدر الخلوية بصفة عامة ليست مصمتة بل يوجد بها ثقوب صغيرة فيما بين الخلايا، يتخلل هذه الثقوب جزء من السيتوبلازم بقطر يقارب ٠,٢ ميكرومتر ويطلق على مثل هذا التركيب الوصلات البلازمية "البلازموديزماتا" (Plasmodesmata) ووظيفتها ربط سيتوبلازم الخلايا المتجاورة مع بعضها البعض بحيث يمكن انتقال المواد الذائبة من خلية إلى أخرى.

يفصل الجدار الخلوي عن السيتوبلازم الغشاء الخلوي وكذلك يفصل السيتوبلازم عن الفجوة غشاء مشابه يطلق عليه غشاء الفجوة Tonoplast. وبالمثل توجد فواصل من هذا النوع بين السيتوبلازم ومعظم مكونات الخلية. وقد دلت الدراسات الأولية على أن جميع المواد الهيدروكربونية التي تذوب في الدهون تنفذ خلال الأغشية الخلوية بسهولة، وكذلك عند معاملة الخلايا بالمواد المذيبة للدهون فإن الغشاء الخلوي يفقد حيويته وبالتالي تفقد الخلية جزءا من محتوياتها الداخلية والتي لا تفقدها في الظروف الطبيعية مما يدل على أن الدهون تدخل في تركيب الغشاء الخلوي، وقد أثبتت الدراسات الحديثة ذلك بل حددت الدهون الفوسفاتية وأن الغشاء الخلوي يضم أيضا ستيرولات وتشترك البروتينات في تكوين طبقات ذلك الغشاء. ومن دراسات المجهر الإلكتروني يظهر الغشاء الخلوي كخطين متوازيين، وسمك الغشاء يتراوح من ٦ إلى ٨ نانومتر. أما كيفية التركيب فلم يتوصل إلى ذلك أحد ولكن هناك بعض النماذج المقترحة والتي تتدرج في القدم والتعقيد ومن أحدثها وأكثرها

شمولاً بحيث يغطى معظم الحقائق العلمية المعروفة عن الأغشية الخلوية ما هو موضح بالرسم التخطيطي في الشكل رقم (٤-٢). ولمزيد من المعلومات عن هذا الموضوع راجع كوتيك وجاناسيك ١٩٧٧م (Kotyk and Janáček, 1977).



الشكل رقم (٤-٢). نموذج يصور تركيب الغشاء الخلوي بناء على معظم المعلومات الحديثة من دراسة الأغشية الخلوية، ويوضح طبقتا الدهون الأساسية والبروتينات التركيبية المختلفة، ويلاحظ أن نسبة الأولى تقارب عشرة أضعاف نسبة البروتينات.

المصدر: (Kotyk and Janvacek, 1977).

من أهم الصفات المميزة للأغشية الخلوية أنها ذات نفاذية اختيارية بحيث تتحكم في دخول وخروج المحاليل.

تدل معظم الدراسات الحديثة على سيتوبلازم الخلايا بأنه أكثر تعقيدا مما كان يظن في السابق ؛ فباستعمال المجهر الإلكتروني تبين أن السيتوبلازم لا يضم النواة والبلاستيدات والميتوكوندريا، فقط، ولكن يضم عددا من العضيات الأخرى مثل جهاز جولجي والشبكة الاندوبلازمية والريبوزومات بجانب جسيمات أخرى وأن معظم هذه العضيات يحاط بغشاء أو غشاءين وهذه العضيات تسبح في السيتوبلازم الذي يختلف في درجة سيولته ولزوجته

نظـراً لمـا يحويـه مـن مـواد تـتراوح في البـساطة مـن الأيونـات والمـاء إلى المـواد البروتينيـة (كـبعض الإنزيمـات). ويوجـد المـاء في الـسيتوبلازم في الفراغـات الموجـودة بـين خيـوط البروتينـات أو مكونـا روابـط هيدروجينيـة مـع الـروابط الببتيديـة. مـع أن معظـم عـضيات الخليـة الأخـرى الموجـودة في الـسيتوبلازم تكـون وحـدات منفـصلة عـن الـسيتوبلازم بواسـطة أغـشية ولهـا علاقاتهـا المائيـة إلا أن كمية الماء الموجودة بها من الضآلة بحيث يمكن إهمالها عدا الفجوة الخلوية.

يحـيط الـسيتوبلازم بـالفجوة (أو الفجـوات الخلويـة) حيـث يفـصلهما غـشاء مـشابه للغـشاء الخلـوي مـع بعـض الاختلافـات البـسيطة مثـل زيـادة نـسبة الـدهون والمجـال هنـا لـيس مناقـشة التركيـب. تـتراوح الفجـوات الخلويـة، عمومـا، في الحجـم مـن فجـوات كرويـة الـشكل صـغيرة في الخلايـا الإنـشائية إلى فجـوة مركزيـة كـبيرة واحـدة في الخلايـا البرنـشيمية حيـث تحتـل أكثـر مـن ٥٠٪ مـن حجـم الخليـة. وبـالطبع تنـشأ الفجـوة الخلويـة الكـبيرة أثنـاء التميـز مـن تلاحـم الفجـوات الخلويـة الـصغيرة. والفجـوة تحـوي طـورا سـائلا مـن المـواد الـسكرية والأمـلاح حيـث وجـود هـذه المـواد هـو الـسبب الرئيـسي للجهـد الأسمـوزي لهـذا الـسائل والـذي يعـرف باسـم العـصير الخلـوي. إلى جانـب هـذه المـواد تـضم الفجـوات مـواد أخـرى كـثيرة ومختلفـة مثـل الأحمـاض الأمينيـة والأميـدات والبروتينـات والـدهون والأصـماغ والمـواد التنينيـة وكـثير مـن الـصبغات مثـل الأنثوسـيانين والأحمـاض العـضوية والبلـورات المعدنيـة ومـا إلى ذلـك. إن بعـض هـذه المـواد قـد يـساهم في زيـادة الجهـد الأسمـوزي للعـصير الخلـوي إذا كـان ذائبـا أو ذائبـا جزئيـا. هـذه التـشكيلة مـن المـواد تتجمـع في الفجـوات عـن طريـق النقـل النـشط مـن الـسيتوبلازم. لـذا فعودتهـا للـسيتوبلازم بطيئـة أو معدومـة إلا في حـالات خاصـة. و تـضم الفجـوات الجـزء

الأكبر من ماء الخلية النباتية. تعتمد العلاقات المائية للخلية على جهد ومقدار الماء الموجود في تلك الفجوات نظرا لسرعة نفاذية الماء من الفجوة وإليها. وفي الغالب يتراوح الجهد الأسموزي للعصير الخلوي من-٥ إلى- ٣٠ ضغطا جويا. والعصير الخلوي في الغالب حمضي ورقمه الهيدروجيني ما بين ٤-٦ ولو أن المدى على الجانبين قد يكون أكبر حيث هناك بعض أنواع من الخلايا عصيرها الخلوي ذو رقم هيدروجيني قلوي جدا والبعض الآخر ذو رقم هيدروجيني حمضي جدا ولكن ذلك نادر جدا، فعلى سبيل المثال هناك أحد أنواع من الطحالب تقوم بتركيز حمض الكبريتيك في الفجوة بحيث قد يصل تركيز الحمض إلى ١ عياري.

(٤-٣) مصطلحات العلاقات المائية للخلية

إن عدم وجود مصطلحات قياسية في مجال العلاقات المائية يعد عقبة في سبيل الاتصال العلمي بين فروع العلم المهتمة بمثل هذا الموضوع وانعزال فرع كفسيولوجيا النبات عن فروع العلم الأخرى مثل علم التربة والعلوم الفيزيائية باستعمال مصطلحات خاصة وبأسماء متعددة يؤدي إلى إعاقة تقدمه وبالتالي عدم الاستفادة من تجارب الآخرين والتي قد تضفي باستعمالها في مثل هذا المجال ترابطاً أكثر وفهما لآليات الخلايا في نموها والذي بدوره يؤدي إلى الاستفادة من هذا الفرع في المجالين البحت والتطبيقي على حد سواء لصالح البشرية ومعارفها.

ولقد شاع في النصف الأول من القرن العشرين الميلادي بين علماء النبات مصطلحات عدة لتعريف مقدرة النبات على امتصاص الماء وبالتالي

حالة الطاقة الحرة للماء في الخلية، ومن هذه المصطلحات قوة المص (Suction force) وقوة امتصاص الماء (Water absorbing power) وحالة الماء في الخلية (Hydrature) ونقص الضغط الانتشاري (Diffusion pressure deficit). والمثل الأخير كان من أكثر هذه المصطلحات شيوعا. ويمكن استعمال نقص الضغط الانتشاري كمقياس للضغط الذي يمكن أن ينتشر به الماء النقي إلى الخلية عندما توضع فيه. وكما سبق في فصل العلاقات المائية للتربة من استعمال المصطلحات الحديثة للعلاقات المائية في التربة باستخدام مصطلح جهد الماء (Water potential) فقد جرى بالمثل في الفترة الأخيرة (بداية النصف الثاني من القرن العشرين الميلادي) استخدام هذا المصطلح في العلاقات المائية للخلية حيث إن جهد الماء يدل على الخاصية نفسها التي يدل عليها مصطلح نقص الضغط الانتشاري ولكنه ذو دلالة أكبر ومستخدم من قبل عديد من العلماء في فروع مختلفة وبذا يتحقق وجود المصطلحات القياسية. واستخدام جهد الماء، أيضا، يساعد في تحليل مكوناته في أجزاء كثيرة من النظام الذي يوجد به ماء سواء أكانت هذه المكونات لجهد الماء ناتجة عن وجود محاليل أو وجود ضغط أو تلاصق إلى غير ذلك من المؤثرات في جهد الماء كما سيرد بعد قليل.

وللتبسيط والشمولية في فهم هذا المصطلح يستحسن البدء بالمبدأ العام وهو الطاقة الحرة للمادة. وتعرف الطاقة الحرة لأية مادة بكمية الطاقة الممكنة لأداء شغل يتطلب بذل طاقة، والماء كغيره من المواد لا ينتقل ضد مال الطاقة ولذا فانتقال الماء يكون مع مال الطاقة فاقدا جزءا من طاقته الحرة عند تلك الحركة، ويحدث التعادل عندما يعدم ذلك الممال. وهذا معناه أن الماء دائما ينتقل إلى المناطق التي تكون طاقته فيها أقل ما يمكن، والجهد الكيميائي لأية

مادة تحت أية ظروف (سواء أكانت تلك المادة نقية أو ذائبة أو كجزء من نظام معقد) هو الطاقة الحرة لكل جزيء جرامي من تلك المادة. من هنا يتبين أن الجهد الكيميائي ما هو إلا مقياس للطاقة التي بواسطتها يمكن أن تتفاعل أو تتحرك تلك المادة.

يساوي جهد الماء (μ_w) في أية نظام الجهد الكيميائي للماء النقي الحر μ°_w معدلا لتلك القوى التي تؤثر في جهده الكيميائي في ذلك النظام، فإذا عبر عن تأثير هذه القوى في ضغط الماء البخاري فإن الجهد الكيميائي للماء في ذلك النظام يساوي المجموع الجبري لهذه المكونات (أو القوى) كما في المعادلة:

$$\mu_w = \mu^\circ_w + RT \ln e/e^\circ$$

حيث أن R ثابت الغازات (أرج/ جزيء/ درجة حرارة)

و T درجة الحرارة المطلقة (كالفن)

و e الضغط البخاري للماء في النظام عند T

و e° الضغط البخاري للماء النقي عند T

وبما أن القيم المطلقة للجهد الكيميائي ليس من السهل قياسها لذا يقاس الفرق بين الحالتين، وتصبح المعادلة السابقة:

$$\mu_w - \mu^\circ_w = RT \ln e/e^\circ$$

وعندما يصبح الضغط البخاري للماء في أية نظام يساوي الضغط البخاري للماء النقي الحر فإن (e/e°) تساوي واحد، واللوغاريتم الطبيعي لواحد يساوي الصفر أي أن ($\ln e/e^\circ$) يساوي صفر، وبالتالي ففرق الجهد في

المعادلة أعلاه يساوي الصفر. وهذا معناه أن جهد الماء النقي (كما في المعادلة الأولى) يساوي الصفر. أما في حالة اختلاف الضغط البخاري في الحالتين فإن النسبة (e/e°) أقل من الواحد واللوغاريتم الطبيعي للعدد الأقل من الصفر ذو قيمة سالبة، ولذا فإن جهد الماء في أية نظام عدا الماء النقي الحر أقل من الصفر وهو ذو قيمة سالبة بطبيعة الحال.

ونظرا لأن العوامل السائدة في الخلايا هي الضغط الأسموزي وضغط الامتلاء لذا فمن الممكن تحويل وحدات الطاقة في المعادلة السابقة (وهي أرج/ جزيء) إلى وحدات ضغط عن طريق القسمة على الحجم الجزيئي الجرامي الجزئي (V) للماء كالتالي:

$$\frac{\mu_w - \mu^\circ_w}{V} = \frac{RT\ln e/e^\circ}{V}$$

والوحدات هي أرج/ سم^3 وتساوي داين/ سم^2. والوحدة الأخيرة يمكن تحويلها للوحدات الدولية أو وحدات الضغط الأخرى وهي البار أو الضغوط الجوية حسب العلاقة التالية:

٠,١ ميجاباسكال =١ بار = ٠,٩٨٧ ضغط جوي =١٠^6 داين/ سم^2.

إن المعادلة السابقة تعبر عن جهد الماء الذي اصطلح على إعطائه الرمز (Ψ_w) ولذا فإن:

$$\Psi_w = \frac{\mu_w - \mu^\circ_w}{V} = \frac{RT\ln e/e^\circ}{V}$$

وهذا معناه أن جهد الماء (Ψ_w) يساوي فرق الطاقة الحرة لكل وحدة حجم جزيء جرامي للماء في ذلك النظام والماء النقي الحر مقرونا للضغط البخاري في الحالتين وعند درجة الحرارة نفسها.

obeikandl.com

يتأثر جهد الماء بعدة عوامل تعمل على تغيير الطاقة الحرة للماء أو تغيير الفعالية الكيميائية لجزيئات الماء وبالتالي تؤثر في الضغط البخاري النسبي للماء. من هذه العوامل وجود المواد الذائبة وقوى التجاذب بين المواد وجزيئات الماء (أي التلاصق) وانخفاض درجات الحرارة في النظام وأخيرا وجود الضغط السالب (كالشد في أوعية الخشب) كل هذه العوامل تعمل على انخفاض جهد الماء وهناك عوامل أخرى تعمل على زيادة جهد الماء وهي الارتفاع في درجة حرارة النظام والضغط الجداري للخلايا الممتلئة جزئياً أو كلياً.

بعد هذه المقدمة عن اشتقاق جهد الماء من الممكن تطبيق جهد الماء على العلاقات المائية للخلية تحت ظروف درجات الحرارة الثابتة. ولفهم فيزياء الماء في النبات فمن الضروري شطر جهد الماء إلى ما يعتقد أنها مكوناته، حيث تتلخص المعادلة لجهد الماء في الخلية بعد الأخذ في الاعتبار كل العوامل المؤثرة في الجهد كالتالي:

$$\Psi_{cell} = \Psi_s + \Psi_p + \Psi_m$$

حيث: (Ψ_{cell}) هو جهد الماء في الخلية

و(Ψ_s) الجهد الأسموزي

(Ψ_p) جهد الضغط

(Ψ_m) جهد المادة (أي الجهد الناتج عن تجاذب جزيئات الماء والمواد الموجودة في الخلية كالمواد الغروانية والجزيئات العضوية).

والمكونات (Ψ_s) و (Ψ_m) يمثلان تأثير المواد الذائبة والمواد الغروية في الجهد الكلي وقيمهما دائما سالبة بينما (Ψ_p) تمثل تأثير جهد الضغط في الجهد

الكلي والقيمة دائما موجبة إلا في حالة وجود ضغط سالب (أي قوة شد على السائل) كما في أوعية الخشب في حالة النتح المستمر، أما في حالة الضغط الجذري فجهد الضغط موجب القيمة. إن المجموع الجبري لمكونات جهد الماء في الخلية ذو قيمة سالبة إلا في حالة الامتلاء التام للخلايا فتصل قيمة الجهد إلى الصفر حيث تتعادل قيم (Ψ_s) و (Ψ_m) السالبة مع قيمة ((Ψ_p) الموجبة.

في معظم الخلايا البرنشيمية تكون قيمة (Ψ_m) من الصغر بحث يمكن إهمال قيمتها إلا في حالة الخلايا الإنشائية والأنسجة الجافة، فبالنسبة للخلايا ذات الفجوات الكبيرة يصبح جهد الماء في تلك الخلايا كالتالي:

$$\Psi_{cell} = \Psi_s + \Psi_p$$

وحسب تعريف ماير عام ١٩٤٥ (Meyer, 1945) لمصطلح نقص الضغط الانتشاري [Diffusion pressure deficit (DPD)] نجد أن:

$$DPD = OP + TP$$

حيث أن: (OP) هو الضغط الأسموزي (Osmotic pressure)

و (TP) هو ضغط الامتلاء أو الضغط الهيدروستاتيكي (Turgor pressure)

وبمقارنة المعادلتين السابقتين فإن:

$$\Psi_s = OP$$

و

$$\Psi_p = TP$$

لذا فإن:

$$\Psi_{cell} = -DPD$$

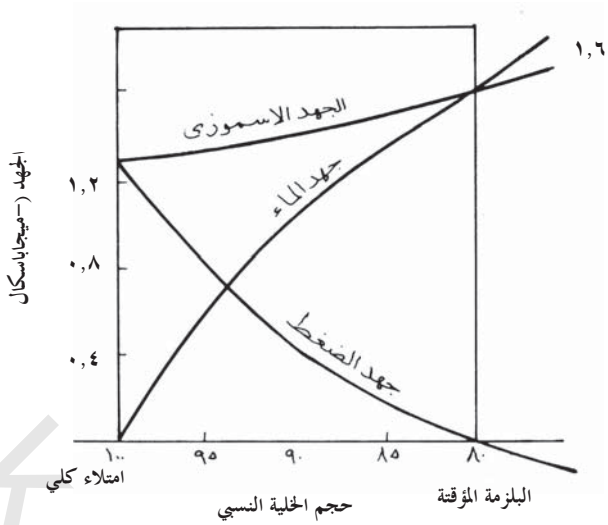
وعلى العموم فإن جهد الماء للخلية أقل من جهد الماء النقي (والأخير كما سبق يساوي الصفر) أي سالب القيمة بينما نقص الضغط الانتشاري موجب القيمة لتعريفه بأنه نقص، ومن هنا فإن جهد الماء يقل في الخلايا

obeikandl.com

بازدياد الإجهاد المائي. إن جهد الماء يعد مقياسا للقوة المحركة للماء في أية نظام كالخلايا أو التربة أو حتى من منطقة إلى أخرى في أية نظام.

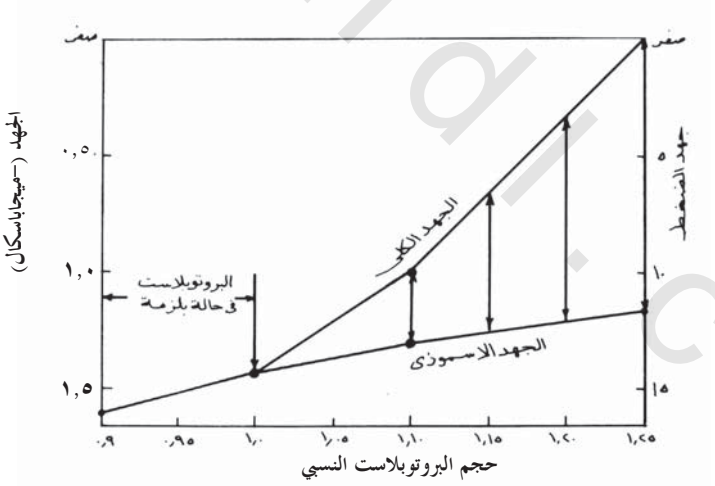
يستمر دخول الماء من الوسط الخارجي إلى الخلية طالما أن جهد الماء داخل الخلية أقل (أكثر سالبية) من جهد الماء في الوسط الخارجي المحيط بالخلية أي أن هناك فرق جهد للماء الداخل إلى الخلية يجعل قيمة (Ψ_s) تزداد (أي تصبح أقل سالبية) وفي الوقت نفسه تزداد قيمة (Ψ_p) ويزداد حجم الخلية للحد الذي تسمح به مرونة الجدار الخلوي وبذا فقيمة جهد الماء في الخلية تزداد حتى تصل إلى قيمة جهد الماء في الوسط الخارجي حيث عندها يحدث التعادل، فإذا كان الوسط الخارجي هو الماء النقي (وجهده يساوي الصفر) فإن جهد ماء الخلية عند التعادل (أي إذا كانت الخلية ممتلئة) يساوي الصفر، ولو كان الوسط الخارجي محلول فإن التعادل يحدث قبل الوصول إلى حالة الامتلاء أي قبل أن تصل الخلية إلى أكبر حجم ممكن تسمح به مرونة الجدار الخلوي. من هنا يتبين أن هناك عاملا آخر في العلاقات المائية، ألا وهو تغير حجم الخلية بتغير جهد الامتلاء، وهذا التأثير يتضح من العلاقة المرسومة في الشكل رقم (٤-٣) حيث يتبين من الشكل أنه عندما تتساوى قيم (Ψ_s) و (Ψ_p) يكون جهد الماء صفرا وتكون الخلية ممتلئة تماما وكذلك عندما يكون جهد الضغط (Ψ_p) يساوي صفرا (فيما يعرف بالبلزمة الابتدائية) تكون الخلية مترهلة والجهد الأسموزي (Ψ_s) يساوي جهد الماء.

ومن الأمثلة على ذلك ما قام به العالم كلارك ١٩٥٦م (Clark, 1956) عند دراسته لأعناق أوراق نبات تباع الشمس كما هو موضح في الشكل التالي رقم (٤-٤).



الشكل رقم (٤–٣). العلاقة بين حجم الخلية والجهد الأسموزي وجهد الضغط والجهد الكلي. يلاحظ التغير الكبير في العلاقات المائية مع التغير الضئيل في حجم الخلية.

المصدر: (Kramer, 1969) **بتصرف.**



الشكل رقم (٤–٤). تغير الجهد الأسموزي والجهد الكلي وجهد الضغط مع تغير حجم البروتوبلاست النسبي لأعناق أوراق نبات تباع الشمس.

المصدر: (Redrawn from Levitt, 1969, After Clark, 1956).

obeikandi.com

يلاحظ في الشكل السابق أن الكميتين الجهد الكلي والجهد الأسموزي تزداد قيمهما معا بازدياد حجم البروتوبلاست النسبي ولذا فعند أية نقطة فإنه يمكن تطبيق المعادلة :

$$\Psi = \Psi_s + \Psi_p$$

وكمثل لذلك يبين الجدول التالي (الجدول رقم ٤-١) تلك العلاقة.

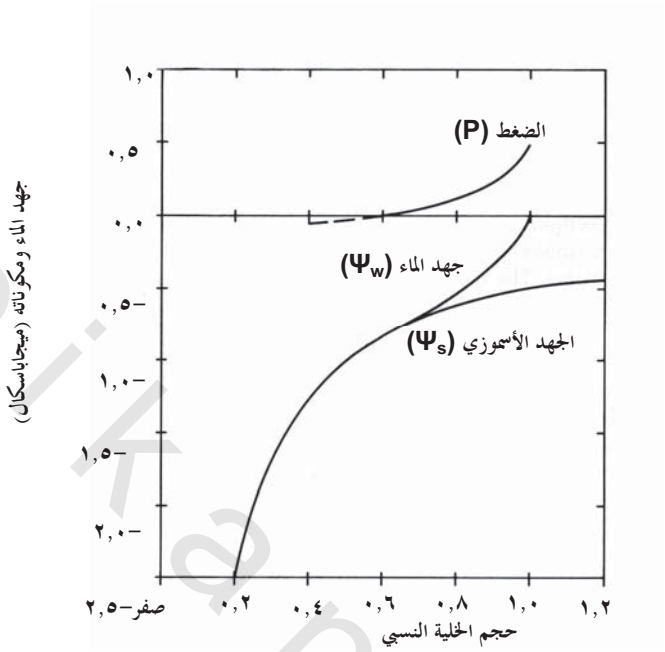
الجدول رقم (٤-١). العلاقة بين حجم البر وتوبلاست النسبي مع معاملات العلاقات المائية لأعناق أوراق نبات عباد الشمس.

حجم البروتوبلاست النسبي	الجهد الكلي (-ميجاباسكال)	الجهد الأسموزي (-ميجاباسكال)	جهد الضغط (ميجاباسكال)
٠,٩	١,٦	١,٦	صفر
١,١	١,٠	١,٣	٠,٣
١,١٥	٠,٦٧	١,٢٧	٠,٦
١,٢٥	صفر	١,١٧	١,١٧

هناك بعض الانتقادات على الشكلين السابقين (الشكل رقم ٤-٣ والشكل رقم ٤-٤) بأنه قد جرى تمثيل القيم السالبة (الجهد الكلي والجهد الأسموزي) على المنحنى نفسه للقيم الموجبة (جهد الضغط) وكذلك إهمال عامل التخفيف عند دخول الماء إلي الخلية ، لذا قام العالم النمساوي هوفلر بوضع منحنى (الشكل رقم ٤-٥) يصف التغيرات في الجهد الكلي والأسموزي والضغط مع تغير الحجم النسبي للخلية بافتراض امتصاص الماء فقط ، وهذا يعطي صورة أفضل للعلاقات المائية للخلية غير الإنشائية وكذلك أساسا للمعادلة :

$$\Psi_w = \Psi_s + \Psi_p$$

obeikandi.com



الشكل رقم (٤-٥). رسم هوفلر، يوضح مكونات جهد الماء مع حجم الخلية النسبي. حسب منحنى الجهد الأسموزي كمنحنى تخفيف، أما منحنى الضغط فهو عشوائي لكنه يوضح الحقيقة في ازدياد الضغط داخل الخلية عند دخول الماء، أما الجهد الكلي فحسب من المجموع الجبري لمكونيه.

المصدر: (Salisbury and Ross, 1992).

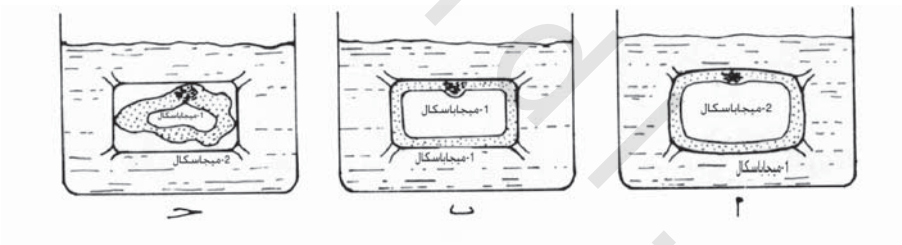
تجدر الإشارة أخيراً إلى أن عملية شطر جهد الماء في النبات ككل أظهرت بعض الشكوك عند الباحثين في هذا المجال حيث إن جهد الماء وشطره إلى مكوناته ينطبق في الحقيقة على طور واحد كالجدار الخلوي أو البروتوبلازم أو الفجوة أو التربة وليس على نسيج متكامل إلا في حالة التعادل التام. أما في

غير ذلك فمن السهولة بمكان الوقوع في خطأ فادح عند تقدير قيم أحد مكونات جهد الماء ولمزيد من المناقشة عن وجهة النظر هذه راجع دانتي ١٩٧٦م (Dainty, 1976).

(٤-٤) البلزمة

تعد ظاهرة البلزمة للخلايا النباتية من أكثر الظواهر استغلالا في دراسة العلاقات المائية والنفاذية. تتكون الخلية من نظام يحوي محلولا مائيا (العصير الخلوي) ومحدودا بغشاء منفذ للماء لذا فإنه إذا غمرت تلك الخلية في محلول مائي وتحت الظروف الطبيعية فهناك ثلاثة احتمالات، إما أن يدخل الماء إلى الخلية وإما أن يخرج منها وإما أن يكون في حالة تعادل (أي أن محصلة دخول وخروج الماء تساوي الصفر). ويحدد إحدى هذه الحالات، المحلول الخارجي الذي يمكن التحكم فيه، أي أنه عند استعمال محلول جهده الأسموزي (Ψ_s) يساوي الجهد الأسموزي للعصير الخلوي فإن الخلية ستبدو طبيعية، وفي هذه الحالة يوصف المحلول الخارجي بالنسبة للخلية بأنه محلول متعادل الأسموزية (Isotonic solution)، بينما الخلية قد تكون مترهلة (Flaccid). والحالة الثانية هي عندما تغمر الخلية في محلول جهده الأسموزي أعلى (-١ ميجاباسكال على سبيل المثال) من الجهد الأسموزي للعصير الخلوي (-٢ ميجاباسكال على سبيل المثال) فالماء سينتقل من المحلول إلى الخلية حتى يحدث التعادل وفي هذه الحالة يوصف المحلول الخارجي بالنسبة للخلية بأنه محلول منخفض الأسموزية (Hypotonic solution) بينما الخلية تكون في حالة امتلاء تام (Turgid). والحالة الأخيرة هي عند غمر الخلية في محلول جهده الأسموزي أقل (-٥ ميجاباسكال على سبيل المثال) من الجهد

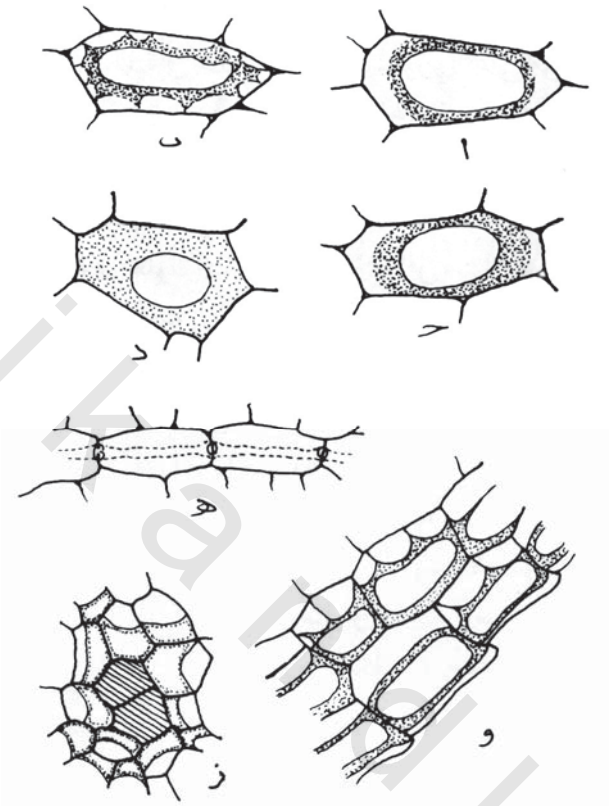
الأسموزي للعصير الخلوي (-١ ميجاباسكال على سبيل المثال) فالماء سينتقل من الخلية إلى المحلول الخارجي وفي هذه الحالة يوصف المحلول الخارجي بالنسبة للخلية بأنه محلول عالي الأسموزية (Hypertonic solution) بينما الخلية ستصبح مبلزمة (Plasmolysed). من المستحسن التنويه بأن المصطلحات المذكورة والتي تصف المحلول الخارجي بأنها من المصطلحات القديمة وقد تسبب بعض الالتباس بمدلولها اللغوي عند مقارنتها بالمصطلحات الحديثة لذا يجب التفكير بأن المصطلحات الحديثة تقترن بالمذيب (الماء) وليس المذاب فعند ذكر محلول جهده الأسموزي عالي فالمقصود به أنه محلول مخفف من مادة الماء ولذا فجهده عالي والماء ينتقل من الجهد العالي إلى الجهد المنخفض. ولتوضيح الحالات الثلاث انظر الشكل رقم (٤-٦).



الشكل رقم (٤-٦). رسم تخطيطي لمنظر الخلية في المحاليل المختلفة. أ- الخلية في محلول منخفض الأسموزية (أي أن الجهد الأسموزي داخل الخلية أقل من الجهد الأسموزي للمحلول) فالماء ينتقل إلى الخلية حتى تمتلئ. ب- الخلية في محلول متساو الأسموزية (أي الجهد الأسموزي داخل الخلية يساوي الجهد الأسموزي للمحلول) فمحصلة حركة الماء تساوي الصفر. جـ-الخلية في محلول عالي الأسموزية (الجهد الأسموزي داخل الخلية أكبر من الجهد الأسموزي للمحلول) فالماء ينتقل من الخلية إلى المحلول مما يسبب البلزمة للحلية.

obeikandl.com

من المعروف أن البلزمة قلما تحدث في الطبيعة ولكن عندما تتبلزم الخلية تحت الظروف المعملية فإن محتويات الخلية تنكمش وتبدأ في الانحسار عن الجدار الخلوي حيث ينتج عن ذلك تكسير للروابط (الوصلات) البلازمية بين الخلايا المتجاورة والمعروفة باسم (Plasmodesmata) وفي النهاية تظهر أشكال متعددة من أنواع البلزمة كما في الشكل رقم (٤-٧). ومن الملاحظات المبدئية قبل ظهور هذه الأشكال أنه عند غمر الخلية في محلول جهده المائي منخفض فإن الماء يبدأ في الخروج من الخلية وقد يسبب تقعرا بسيطا للجدار الخلوي بسبب وجود الوصلات البلازمية أي يبدأ تكون ضغط امتلاء سالب حتى تتغلب صلابة الجدار الخلوي على ذلك الضغط وعندها يبدأ البروتوبلازم بالانفصال عن الجدار وهذا ما يعرف بالبلزمة المؤقتة (Incipient plasmolysis). بعد ذلك يزداد تقلص الفجوة نتيجة لفقدها لمزيد من الماء حتى يتعادل جهد الماء في الداخل مع ذلك في الخارج، أي أن الجهد الأسموزي للعصير الخلوي يتساوى مع الجهد الأسموزي للمحلول الخارجي أو يقارب، والفرق بين الاثنين هو أن الجهد الأسموزي للعصير الخلوي بعد التعادل أقل نظرا لوجود السيتوبلازم وما يسببه من ضغط على محتويات الفجوة، وهذا الضغط يعرف باسم ضغط السيتوبلازم والذي لم تقدر قيمته حتى الآن في النبات كما قدر ضغط السيتوبلازم في خلايا الدم الحمراء بنحو ٢ مم من الماء (٠,٠٠٠٣ ميجاباسكال). من هنا يتضح عدم صحة الافتراض الأساسي في استعمال ظاهرة البلزمة من أن الضغط لا يختلف خارج وداخل الخلية في الفجوة، أي الافتراض بأن جهد الضغط يساوي الصفر.



الشكل رقم (٤–٧). أشكال البلزمة المختلفة: أ–بلزمة محدبة. ب–بلزمة مقعرة. جـ–بلزمة قلنسوية (تختلف عن المحدبة في كون السيتوبلازم أكبر عند الأطراف). د– تقلص الفجوة، وهو نوعان، تقلص فجوي عندما يكون التكوين بين الفجوة والجدار الخلوي حيا، وإن كان ميتا، فالبلزمة لغشاء الفجوة. هـ–بلزمة خلايا البشرة الداخلية حيث يوجد شريط كاسبار. و– بلزمة خلايا من ورقة إحدى الحزازيات حيث يتبين تقلص السيتوبلازم من جهة العرق الوسطي. ز– بلزمة خلايا محيطة ببقعة مبرقشة (المنطقة المظللة).

المصدر: (Bennet-Clark, 1959).

obeikandl.com

تشابه البلزمة الذبول في كونهما عمليتا فقد للماء إلا أنه في حالة البلزمة فإن المحلول الخارجي يملأ الحيز بين الجدار الخلوي والبروتوبلازم المنكمش ولكن في حالة الذبول لا يستطيع الهواء الدخول لظاهرة التوتر السطحي في فراغات الجدار الخلوي. من هنا تظهر أهمية اختيار نوع الذائب في المحلول الخارجي لإظهار البلزمة، حيث لو استخدم مذاب ينفذ عبر الغشاء الخلوي وغشاء الفجوة بالمعدل نفسه الذي ينفذ به الماء أو يقاربه فإن البلزمة لا تحدث. فمثلا باستخدام الكحول (ميثانول أو ايثانول) فإنه ينفذ بسرعة ويخثر المواد البروتينية في السيتوبلازم، أما عند استخدام مادة اليوريا الميثيلية (Methylurea) فإن البلزمة تحدث وتعود الخلية إلى حالتها الطبيعية بسرعة لأن معدل نفاذيتها عال جدا. في العادة يستعمل السكروز نظرا لأن معدل نفاذيته بطيء بالمقارنة بالماء ولكن هضم السكروز بواسطة الخلية جعل سكر المانيتول (Mannitol) أكثر استخداما، وعلى العموم فإنه عند اختيار المذاب يفضل مراعاة القاعدة العامة من أنه كلما كانت الكتلة الجزيئية لذلك المذاب صغيرة كلما كان معدل نفاذها كبيرا لأن الكتلة تدل على أبعاد ذلك الجزيء الذي سينفذ عبر الغشاء الخلوي حيث كلما صغر الجزيء كلما كان معدل نفاذه أكبر، هذا بالإضافة إلى ضرورة مراعاة ذوبان المذاب في الدهون نظرا لاشتمال الغشاء الخلوي على دهون.

من المعتقد أن الطريقة التي يتقلص بها بروتوبلازم الخلية أثناء البلزمة تدل على لزوجة سيتوبلازم الخلية، فالبلزمة المحدبة (Convex plasmolysis) تدل على انخفاض في لزوجة السيتوبلازم وهذا النوع من البلزمة يتكون عادة عند استخدام ثيوسيانات البوتاسيوم (KSCN) أو نترات البوتاسيوم كمحاليل

للبلزمة. والبلزمة المقعرة تدل على ارتفاع في لزوجة سيتوبلازم الخلية، وغالبا هذا النوع من البلزمة يتكون باستعمال أملاح كاتيونات ثنائية مثل كلوريد الكالسيوم كمحلول للبلزمة. أما استعمال محاليل أملاح كاتيونات ثلاثية التكافؤ فقلما تحدث البلزمة بل الخلية بكاملها تتقلص بما في ذلك الجدار الخلوي ويحدث ما يعرف بظاهرة (Cytorrhysis) وقد لوحظ مثل ذلك في الأوراق الذابلة حيث لا تتبلزم الخلايا بل يحدث اختلال في انتظام السيتوبلازم وتنهار قوة شد الجدار الخلوي. وثمة عامل آخر في عملية بقاء البروتوبلازم ملتصقا بالجدار الخلوي وهو كون جزء من الجدار الخلوي غير منفذ للماء كما في حالة البشرة الداخلية ووجود شريط كاسبار أو عندما يحدث جرح أو تبرقش لبعض الخلايا يلاحظ في كلا الحالتين بقاء البروتوبلازم ملتصقا بالجدار الخلوي المجاور للتبرقش. وتفسير ذلك المحتمل هو عدم نفاذية الجدار الخلوي. هناك نوع من البلزمة والمسمى تقلص الفجوة المعلومات عنه في عالم النبات قليلة لكنه معروف في عالم الحيوان والاعتقاد العام هو أن التشابه بين العالمين وارد (Benenet-Clark, 1959).

إن أشكال البلزمة المذكورة في الشكل السابق ليست هي الوحيدة بل هناك أنواع من البلزمة غير العادية والتي يسببها وجود بعض المواد مكونة ما يعرف بالبلزمة الكاذبة ولكن آليتها غير معروفة حتى الآن.

تبقى الخلايا المبلزمة حية لفترة طويلة ويفقد شكل البلزمة إذا بقيت الخلايا في المحلول فترة طويلة، أي أن البلزمة حالة مؤقتة نظرا لدخول المواد الذائبة إلى الداخل مؤدية إلى انعدام مال جهد الماء، أما إذا غمرت الخلية المبلزمة في محلول ذي جهد أسموزي عالي (منخفض الأسموزية) فإن الخلية

تعـود إلى حالتهـا الطبيعيـة بـبطء دون حـدوث أضـرار بالغـة ولكـن درجـة الامـتلاء التي تصل إليها تكون أقل بطبيعة الحال كما سبق ذكره.

ومـما يجـدر ذكـره مـرة أخـرى أن البلزمـة قلمـا تحـدث في الطبيعـة وحتـى النباتـات الـتي تنمـو في بيئـات محاليـل تربتهـا يتوقـع أن تحـدث بلزمـة حيـث تلـك المحاليـل منخفـضة جـدا في الجهـد الأسمـوزي مثـل مـاء البحـر، فـإن البلزمـة لا تحـدث في خلايـا جـذور تلـك النباتـات لأن مثـل هـذه الجـذور وعلـى وجـه الدقـة خلاياهـا ذات عـصير خلـوي مركزكمـا هـو معـروف في نبـات(*Atriplex sp.*) النـامي علـى شـاطئ بحـيرة مالحـة حيـث وصـل الجهـد الأسمـوزي للعـصير الخلـوي لقيمة- ٢٠,٢ ميجاباسكال.

(٤-٥) نفاذية الخلية

في موضـوع سـابق ذكـر تركيـب الغـشاء الخلـوي بـصفة عامـة ومـن المعـروف أن أهـم خاصـية للخلايـا الحيـة هـي مقـدرتها علـى الاحتفـاظ بعـدد كـبير وتراكيـز عاليـة مـن المـواد الذائبـة رغـم أنهـا تنمـو في بيئـات تركيـز تلـك المـواد فيهـا قليـل، فمـثلا قـد يـصل تركيـز بعـض الأيونـات في الخلايـا النباتيـة إلى عـشرة أمثـال أو أكثـر مـن تركيزهـا في الأرض الـتي تثبـت فيهـا جـذورها، وهـذا مـا عـرف بظـاهرة التراكـم، وهـذه الظـاهرة تتطلـب وجـود حـاجز غـير منفـذ نـسبيا لخـروج تلـك المـواد مـن منطقـة تراكيزهـا العاليـة- الخليـة- ويتطلـب أيـضا آليـة نـشطة للعمـل علـى نقـل تلـك المـادة مـن منطقـة تركيزهـا المـنخفض إلى منطقـة تركيزهـا العـالي حيـث إن الانتقـال في هـذه الحالـة ضـد ممـال الطاقـة، أي لابـد مـن بـذل طاقـة للتغلـب علـى هـذا الممـال. والحـاجز المعـني هنـا هـو الأغـشية الخلويـة والطاقـة المـستخدمة

إحيائية، أي الطاقة الناتجة عن التنفس. وتجدر الإشارة إلى أن الأغشية الخلوية تعمل على الإقلال من دخول المواد غير المرغوب فيها وتسمح للمواد المهمة للخلية بالنفاذ عبرها آي أن الأغشية ذات نفاذية اختيارية.

والنفاذية خاصية مميزة للأغشية الخلوية وليس للمواد المارة عبرها، وتعرف النفاذية بأنها مقلوب المقاومة أي معدل الحركة عبر الغشاء تحت تأثير قوة محركة معينة. وهذا يعني أن أي تقييم كمي لنفاذية الغشاء الخلوي لأية مادة يتطلب معرفة تامة بالقوة المحركة لهذا الانتقال وحجم المادة المنتقلة في وحدة الزمن أي كمية المادة المنتقلة عبر وحدة المساحة من مقطع الغشاء في وحدة الزمن، وبالنسبة للانتشار غير النشط فيعبر عنه قانون الانتشار أو قانون فيك (Fick`s law) والذي ستجري مناقشته لاحقا ومثل هذا يتطلب معرفة التركيز على جانبي الغشاء ومساحة سطح الغشاء والتغير في الزمن، إلا أن الوضع يختلف بالنسبة للخلايا الحية للتعليل السابق. وعلى أية حال، فالمواد تختلف في نفاذيتها عبر الأغشية و، أيضا، فإن الأغشية كالغشاء الخلوي والأغشية المحيطة بالعضيات والفجوة كلها ذات نفاذية اختيارية. على أية حال فإنه طبقا لنظرية الديناميكا الحرارية غير العكسية فقد اشتقت المعادلات الخاصة التي تبين حركة الماء بين أي نظامين [راجع دانتي ١٩٦٣م (Dainty, 1963)، وسلاتير ١٩٦٧م (Slatyer, 1967) لمزيد من المعلومات) والمعادلة العامة كالتالي:

$$J_V = -L_p \Delta \Psi$$

حيث (J_V) تدل على حجم الماء المتدفق (سم^3 سم$^{-2}$ ثانية$^{-1}$) أي عدد السنتيمترات المكعبة المتدفقة عبر واحد سم^2 من سطح الغشاء في الثانية.

و (L_p) ثابت يعبر عن النفاذية أو المعامل الهيدروليكي أو التوصيلية الهيدروليكية (غير التوصيل الهيدروليكي للتربة السابق ذكره) والوحدة (سم. ثانية$^{-1}$. ضغط جوي$^{-1}$). وفي الحقيقة عند دراسة الخلية أو النسيج فإن القيمة تمثل كل الحواجز التي قد تعمل على إعاقة حركة الماء مثل الجدار الخلوي والغشاء الخلوي والسيتوبلازم وغشاء الفجوة على التوالي.

و ($\Delta\Psi$) فرق جهد الماء على طرفي الغشاء (ميجاباسكال).

تنطبق المعادلة السابقة فيما لو كان تدفق الماء لوحده وتحت تأثير فرق الجهد ولكن الحقيقة إن الماء يعبر الغشاء في الوقت نفسه الذي تعبره غيره من المحاليل، لذا فهناك عوامل أخرى تؤثر على القوة (أي فرق جهد الماء) يجب أخذها في الحسبان ومنها معامل الإرجاع (σ) أو الانعكاس (Reflection coefficient) وأحيانا يسمى معامل الاختيارية (Selectivity coefficient) ومعامل آخر هو معامل مرونة الجدار الخلوي (ε).

ينطبق معامل الإرجاع على جزء المواد الذائبة الداخلة عبر الغشاء لذا يمكن اعتبار الجهد الأسموزي مكونا من شقين، جزء ينفذ عبر الغشاء ($\Psi_{s\ p}$) وجزء لا ينفذ ($\Psi_{s\ imp}$) لذا فعند التعويض عن فرق جهد الماء في المعادلة السابقة وإدخال هذا المعامل نحصل على المعادلة التالية:

$$J_V = -L_p (\Delta\Psi_p + \Delta\Psi_{s\,p} + \Delta\Psi_{s\,imp} + \Delta\Psi_m)$$

حيث: ($\Delta\Psi_p$) فرق جهد الضغط

و ($\Delta\Psi_{s\,imp}$) فرق الجهد الأسموزي للمواد غير النافذة عبر الغشاء

و ($\Delta\Psi_{s\,p}$) فرق الجهد الأسموزي للمواد النافذة عبر الغشاء

obeikandl.com

و ($\Delta\Psi_m$) فرق جهد المادة.

وبقية الرموز كما سبق.

إن معامل الإرجاع (أو الاختيارية) يختلف من مادة لأخرى والجدول رقم (٤-٢) يعطي مثلا لذلك.

أما النباتات الراقية فالقيم يعتقد أنها متشابهة في التدرج فقط ولكن تختلف في المقدار (Steudle and Zimmermann, 1974).

الجدول رقم (٤-٢). معامل الإرجاع (الاختيارية) لبعض المحاليل غير المتأينة للخلايا الطحلبية (Steudle and Zimmermann, 1974).

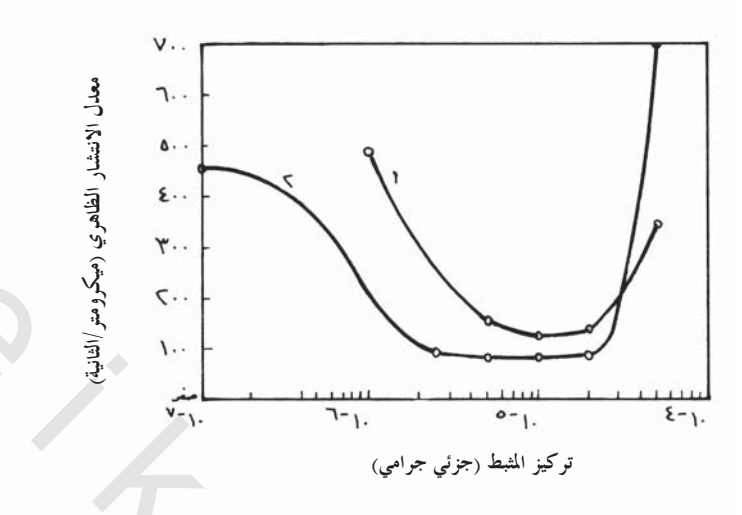
المادة	Nitella flexilis	*Valonia utricularis*	*Nitella translucens*	*Chara cordallina*
السكروز	٠,٩٧	١	——	——
الجلوكوز	٠,٩٦	١,٩٥	——	——
الجلسيرول	٠,٨٠	٠,٨١	——	——
أستأميد	٠,٩١	٠,٧٩	——	——
يوريا	٠,٩١	٠,٧٦	١	١
فورماميد	٠,٧٩	——	١	١
إيثيلين جليكول	٠,٩٤	——	١	١
أيزوبروبانول	٠,٣٥	——	٠,٢٧	——
ن-بروبانول	٠,١٧	——	٠,١٦	٠,٢٢
إيثانول	٠,٣٤	——	٠,٢٩	٠,٢٧
ميثانول	٠,٣١	——	٠,٢٥	٠,٣٠

والمعامل الآخر وهو معامل مرونة الجدار الخلوي (ε) والذي يتصف بوحدات الضغط حيث يتحكم في مدى تغير جهد الماء مع حجم الخلية، ومن

هنا فإن هذا المعامل يعتمد على ضغط الامتلاء حيث قيمة هذا المعامل منخفضة عند ضغط امتلاء من صفر إلى ٢ ، بينما تتراوح قيمة هذا المعامل من ٥٠ إلى عدة مئات من الضغوط الجوية عندما تكون الخلايا ممتلئة تماما وذلك حسب نوع النبات أو الخلايا المدروسة.

هناك عدة عوامل تؤثر في النفاذية ، ونفاذية الماء إلى داخل الخلية لا تحدده فقط نفاذية الغشاء الخلوي ولو أنه في أغلب الحالات يكون الجزء الأكبر من المقاومة الكلية لتدفق الماء. ومن الأمور الواضحة أن الخلايا التي تكون لها جدر خلوية ثانوية بما فيها من مواد لجنينية ومواد شمعية فالجدر في هذه الحالة هي المعيقة لتدفق الماء ، على العموم تتأثر نفاذية الأغشية الخلوية بالعديد من المواد والمعاملات المختلفة التي تؤثر بطريقة مباشرة عن طريق التأثير في تركيب الغشاء أو تؤثر بطريقة غير مباشرة في أيض الخلية. ومن الأمثلة على ذلك أن التراكيز المختلفة لكثير من المواد السامة والتي قد تسبب تأثيرا غير عكسي في البروتوبلازم تقلل من نفاذية الخلية أو الأنسجة للماء كما في الشكل رقم (٤-٨).

والجدير بالذكر أن العالمين جلينكا وراينهولد ١٩٦٤م (Glinka and Reinhold, 1964) قد لاحظا ما يشابه ذلك باستعمال مادة الكلوروفورم (Chloroform) عند تركيز ٢ X ١٠ $^{-٢}$ جزيئي بالمقارنة بتركيز ٥ X ١٠ $^{-٢}$ جزيئي والتفسير المحتمل أنه عند التركيز المنخفض فإن الكلوروفورم يقلل من النشاط الأيضي ولكن غير ذلك قد يؤثر في تركيب الغشاء بحيث تزداد نفاذيته ، وفي هذا الصدد فإن المواد المذيبة لدهون الغشاء الخلوي مثل بخار البنزين والأيثر والكلوروفورم تعمل على زيادة نفاذية الغشاء الخلوي للماء

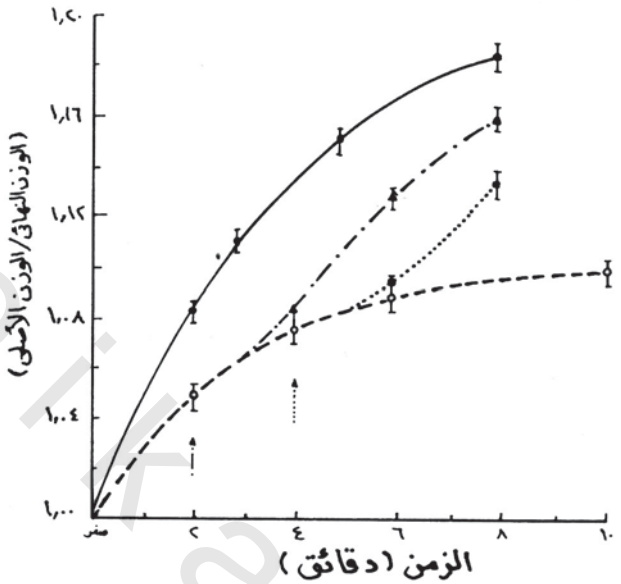


الشكل رقم (٤-٨). تأثير التراكيز المختلفة لخلات فينيل الزئبق (Phenylmercuric acetate) رقم (١) و (Carbonylcyanide m-chlorophenyl hydrazone) رقم (٢) في نفاذية الماء المشع عبر جذر نبات الذرة، حيث تقل النفاذية مع زيادة التركيز إلا أنه بعد تركيز معين تزداد النفاذية نتيجة لإصابة الغشاء.

المصدر: (Woolley, 1965).

عند استعمالها بتراكيز مناسبة. أما مثبطات التنفس ونقص الأكسجين ودرجات الحرارة المنخفضة غالبا ذات تأثير ملحوظ في تخفيض النفاذية وبصفة عكسية وكمثل لذلك الشكل رقم (٤-٩) حيث يتبين تأثير ثاني أكسيد الكربون في كمية الماء الممتصة بواسطة قطع من السويقة الجنينية العليا لبادرة تباع الشمس.

من المعروف أن التراكيز المخففة لكثير من الأيونات تؤثر في نفاذية الغشاء الخلوي، ومن المحتمل أن ذلك يعتمد بالدرجة الأولى على كيفية تأثير هذه الأيونات في تميؤ الجزء البروتيني للغشاء. ويأتي في الدرجة الأولى أيون

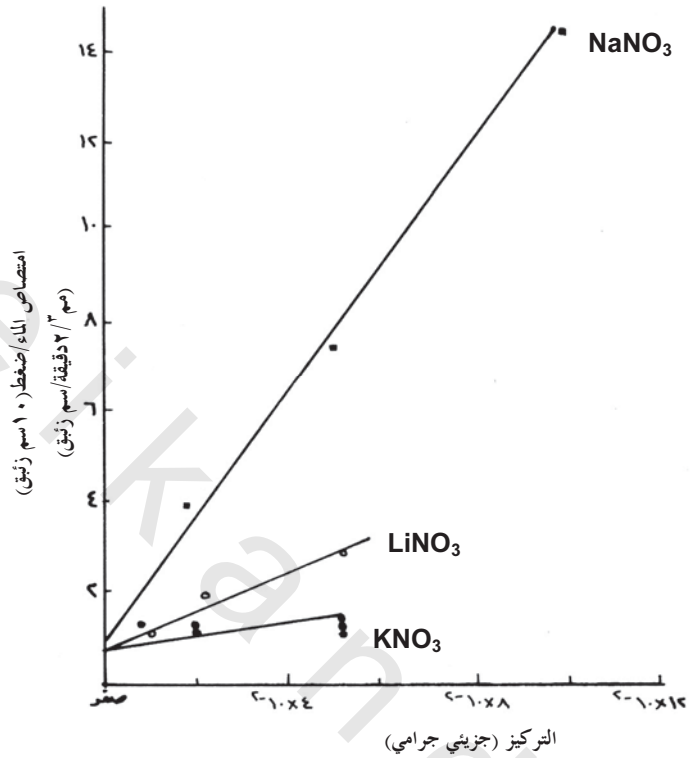


الشكل رقم (٤-٩). تأثير ثاني أكسيد الكربون في امتصاص الماء بواسطة قطع من السويقة الجنينية السفلى لنبات تباع الشمس، والتأثير عكسي كما يتضح من الرسم. الدوائر المصمتة (●) في غياب ثاني أكسيد الكربون والمفتوحة (O) في وجوده.

المصدر: (Glinka and Reinhold, 1964).

الكالسيوم الذي يعتبر مهما لبقاء تركيب الغشاء الخلوي وفعاليته من حيث عملية امتصاص الأيونات ولو أن أيون الكالسيوم يخفض عملية امتصاص الماء بينما أيونا الصوديوم والبوتاسيوم يزيدان من ذلك. وكمثال لتأثير بعض الأيونات فالشكل رقم (٤-١٠) يوضح تأثير بعض الأيونات الأحادية طبقا لرقم تميؤ الأيونات مما قد يدل على أنها ذات تأثير في تشكل البروتينات في الغشاء.

openkandil.com



الشكل رقم (٤–١٠). تأثير الأيونات الأحادية (الصوديوم والليثيوم والبوتاسيوم) في نسبة امتصاص الماء بواسطة جذور نبات الفاصوليا لكل وحدة (١٠سم من ضغط الزئبق) زيادة في الضغط على مقطع الساق.

المصدر: (Kuiper, 1963).

والإجهاد المائي عامل مهم سيجري الحديث عنه في فصل آخر. أما تأثير الضوء في حد ذاته في نفاذية الغشاء الخلوي فلم تتضح بعد مع أن هناك بعض البحوث التي تشير إلى تأثيره بطريقة غير مباشرة عن طريق تأثير الضوء في بعض العمليات الأخرى والمرتبطة بامتصاص الأيونات.

obeikandl.com

تقدير النفاذية

معظم الطرق المستعملة لتقدير نفاذية الماء (L_p) للخلية تعتمد على العلاقة التالية:

$$J_V = -L_p\Delta\Psi = -L_p\,(\Delta\Psi_s = \Delta\Psi_p)$$

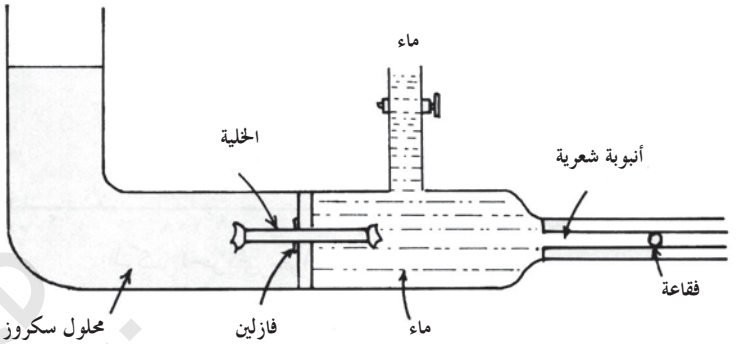
ومن هذه الطرق:

١) طريقة البلزمة: وهي من أكثراطرق شيوعا حيث توضع الخلايا أو النسيج في محلول حتى يحدث التعادل ثم تنقل إلى محلول آخر مختلف التركيز حتى يحدث التعادل، بعدها يحسب الفرق في حجم الخلايا أو النسيج وتطبق المعادلة السابقة حيث (J_V) و ($\Delta\Psi_p$) تعتبران صفرا. ومن عيوب هذه الطريقة اختلاف الغشاء الخلوي بين الخلايا المبلزمة والخلايا العادية الممتلئة وكذلك صعوبة قياس التغير في الحجم دون أخطاء.

٢) طريقة الأسموزية عبر الخلية (Transcellular osmosis) حيث يتم قياس نفاذية الغشاء الخلوي للخلايا الكبيرة لبعض الطحالب وتتمثل في وضع الخلية بين حيزين أحدهما به أنبوبة شعرية والآخر به محلول (سكري مثلا) كما في الرسم (الشكل رقم ٤-١١).

والأنبوبة الشعرية بها فقاعة هوائية بحيث عند تحركها يمكن قياس أي تغير في الحجم، ومن الأمور التي يجب مراعاتها أن المحلول يجب أن يكون مخففا بحيث لا يسبب بلزمة وأن تكون درجة الحرارة ثابتة (يغمر الجهاز في حمام مائي) وبذا فإن الخلية تقوم مقام الغشاء شبه المنفذ (ينفذ الماء ولا ينفذ المذاب). وبحساب مساحة الخلية يمكن تطبيق المعادلة التالية لقياس (L_p).

$$J_V = -L_p \frac{A_1\,A_2}{A_1 + A_2}\,\Delta\Psi_s$$



الشكل رقم (٤–١١). رسم تخطيطي لمقطع في جهاز قياس النفاذية أو التوصيلية الهيدروليكية لخلية طحلب (*Nitella* sp.) بواسطة الأسموزية عبر الخلية. يمكن تغيير معدل النفاذية للماء عن طريق تغيير تركيز السكروز في الحيز الذي على اليسار.

المصدر (Dainty and Ginzburg, 1964).

حيث (J_V) معدل تدفق الماء كما يقاس من الأنبوبة الشعرية

(A_1) مساحة الخلية في إحدى حجيرات الجهاز

(A_2) مساحة الخلية في الحجيرة الثانية

($\Delta\Psi_s$) فرق الجهد الأسموزي

٣) طريقة تدفق الماء المشع : وتعتمد على قياس النفاذية الانتشارية [Diffusional permeability, (P)] عندما تكون الخلية في حالة تعادل مع البيئة الخارجية ومن ثم إضافة ماء يحوي النظير الهيدروجيني المشع(Tritium) ومن ثم متابعة معدل انتقال الماء المشع إلى داخل الخلية ، من الناحية العملية من الأسهل وضع الخلية في الماء المشع ومن ثم نقلها إلى الماء العادي على فترات حيث تحلل كمية الماء المشع بها. ومن ثم حساب(P_d) من العلاقة التالية :

$$P_d = L_p\, RT/V_w$$

حيث (P_d) النفاذية الانتشارية

(L_p) نفاذية الخلية للماء

R ثابت الغازات

T درجة الحرارة المطلقة

Vw الحجم الجزيئي للماء معبرا عنه بالجزيئي الجرامي

٤) طريقة التمدد والإنكماش: تستغل هذه الطريقة ظاهرة التمدد والانكماش في الخلايا لقياس النفاذية للخلايا وحيدة الخلية عن طريق قياس نصف الفترة الزمنية اللازمة لتمدد أو انكماش الخلية عندما تنقل فجأة إلى محلول ذي جهد مختلف الأسموزية وتطبيق المعادلة التالية:

$$T_{½} = \frac{\ln 2V}{A - L_p (\varepsilon+\pi)}$$

حيث ($T_{½}$) نصف الزمن الذي يستغرقه انكماش أو انتفاخ الخلية

و (V) حجم الخلية

و (A) مساحة غشاء الخلية

و (π) الضغط الاسموزي الداخلي [يساوي ($-\Psi_s$)] (انظر التدفق الأسموزي)

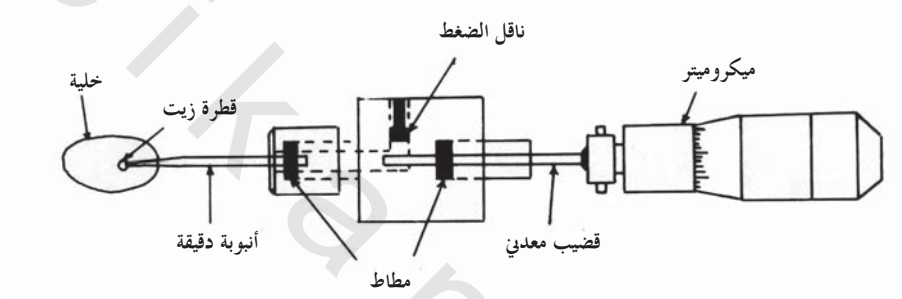
و (ε) معامل مرونة الجدار الخلوي

وتعد هذه الطريقة مفيدة في حالة معرفة [(π) و (ε)] ولا تنطبق هذه الطريقة إلا على الخلية المفردة في محلول مائي كبير نسبيا لتلافي الاشتقاقات الرياضية اللازمة عند وجود خلايا متجاورة وتأثيرها في حركة الماء.

openkanal.com

٥) طريقة مسبر الضغط

من هنا برزت أهمية القياسات الدقيقة لمعامل مرونة الجدار الخلوي للحصول على أرقام دقيقة لقيمة معامل النفاذية (L_p) ولذا فاختراع كل من زيمرمان وآخرين ١٩٦٩م (Zimmermann *et. al.*, 1969) لطريقة جديدة لقياس ضغط الامتلاء في الخلايا وحيدة الخلية يعتبر حلا مناسباً، والشكل رقم (٤-١٢)

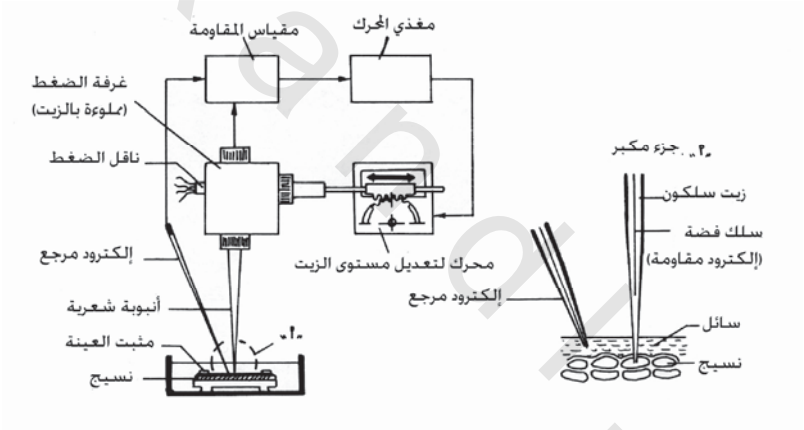


الشكل رقم (٤-١٢). رسم تخطيطي لجهاز مسبر الضغط المستخدم لقياس النفاذية ومعامل مرونة الجدار وضغط الامتلاء.

المصدر: (Zimmermann and Steudle, 1974).

يوضح رسماً تخطيطياً للجهاز المستعمل حيث يتكون من أنبوبة شعرية دقيقة مملوءة بزيت (زيت السليكون) تغرز في الخلية حيث يتكون ضغط على الزيت في الأنبوبة مساو لضغط امتلاء الخلية، والزيت بدوره ينقل هذا الضغط إلى ناقل الضغط (Pressure transducer) الذي بدوره يعطي إشارة كهربائية يمكن تسجيلها. يمكن تغيير حجم الخلية في مثل هذا الوضع بإزاحة الزيت داخل الأنبوبة الشعرية في الاتجاهين بواسطة ميكروميتر وهذا معناه تغيير الجهد الكلي للخلية وبالتالي فالماء قد يخرج من الخلية أو يدخل إليها حسب اتجاه حركة الزيت في الأنبوبة الشعرية وهنا فالتغير في حجم

الخلية تدل عليه قراءة الميكروميتر والتغير في الضغط يسجل عن طريق ناقل الضغط. ولذا فإنه يمكن حساب معامل النفاذية (L_p) وكذلك معامل مرونة الجدار الخلوي (ε) بسهولة. وقد أطلق على هذه الطريقة طريقة مسبر الضغط (Pressure probe)، وفي محاولة أخرى قام هسكن وآخرون ١٩٧٨م (Hüsken, *et. al.*, 1978) بتطوير جهاز مصغر لمسبر الضغط للقيام بتلك القياسات على خلية صغيرة كخلية النباتات الراقية (ذات الحجم١٠ $^{-٢}$ - ١٠ نانولتر) وسمي مسبر الضغط ٢ (Pressure probe II) كما في الشكل رقم (٤-١٣).



الشكل الرقم (٤-١٣). رسم تخطيطي لمسبر الضغط ٢ لقياس ضغط الامتلاء (P) وتفق الماء (J_v) والنفاذية (L_p) ومعامل مرونة الجدار الخلوي (ε) في خلايا النباتات الراقية. بتغيير موقع نقطة التقاء الزيت مع العصير الخلوي في الأنبوبة الشعرية (الإلكترود) (انظر الجزء المكبر "أ") يمكن تغيير حجم الخلية وضغط الامتلاء وذلك لتقدير النفاذية ومعامل المرونة للجدار الخلوي.

المصدر: (Zimmermann and Steudle, 1980).

ولا يختلف هذا المسبر عن سابقه إلا في إضافة حجيرة للضغط مرتبطة بآلية نظام مغذي للتحكم في تغير حجم الحجيرة. وأيضا استعمال إلكترودات دقيقة الأطراف بداخلها سلك فضي (قطره واحد ميكرومتر) لغرزها في الخلية وإلكترود آخر كمرجع للدائرة الكهربائية التي تشتمل على إلكتروميتر. ويتحكم في إزاحة الزيت محرك صغير به تعشيق ناقل للحركة واستجابته سريعة جدا (نحو ٠,١ ثانية) والإلكترودات تقوم بقياس المقاومة عند مرور تيار من ٢٠ إلى ٥٠ مليفلت وبالطبع تحدث للتيار مقاومة حسب موقع العصير الخلوي والزيت من طرف الإلكترود والاختلاف في المقاومة يقوم بنقله نظام التغذية على هيئة إشارات كهربائية لتحريك المحرك. بهذه الطريقة (حقيقة هي طريقة معادلة) أمكن قياس معامل مرونة الجدار (ε) والنفاذية للماء (L_p) وضغط الامتلاء أو الضغط الهيدروستاتيكي للخلية (P). من مزايا هذه الطريقة أن كلا من (ε) و (P) يمكن قياسهما مباشرة. أما نفاذية الماء (L_p) فيمكن قياسها بطريقة غير مباشرة عن طريق قياس تزايد الضغط في النسيج باستخدام أكثر من مسبر في خلايا مختلفة أو عن طريق تعيين علاقة الاتزان في تدفق الماء مع موضع الخلية في قطعة النسيج، حيث يحسب الزمن اللازم لتدفق الماء من وإلى الخلية ما بين انتفاخ الخلية وتقلصها.

٦) طريقة قوة الضغط الخارجي

في عام ١٩٧٧ قدم كل من العالمين فيريرودانتي طريقة جديدة لقياس معامل مرونة الجدار الخلوي (ε) ونفاذية الماء (L_p) لخلايا النباتات الراقية تعتمد على تغيرات المرونة لطبقة من الخلايا نتيجة لتأثير خارجي عليها بفرض أن التمدد المرن في الاتجاهات الثلاثة متساو لكل خلية في تلك الطبقة، وقد تم

التوصل إلى وجود علاقة مستقيمة بين سمك طبقة الخلايا والقوة المؤثرة الخارجية. وبافتراض تبادل الماء بين تلك الطبقة وبيئتها تم التوصل إلى قيمة معينة لنفاذية الماء. وقد أطلق على هذه الطريقة طريقة قوة الضغط الخارجي.

مما تقدم يتضح أن جميع قياسات نفاذية الماء تتم بطرق تؤدي إلى تقدير القيمة وليس هناك قيم مطلقة لنفاذية الماء في خلية النبات الراقية والجدول (٤-٣) يبين قيم النفاذية (L_p) لبعض خلايا النباتات الراقية.

الجدول رقم (٤-٣). قيمة نفاذية الماء (L_p) لبعض النباتات الراقية (عن زيمرمان وستودل ١٩٧٨م (Zimmermann and Steudle, 1978). راجع المقال المذكور لمراجع الباحثين لكل نبات.

النبات	جزء النبات	الطريقة	نفاذية الماء (سم/ثانية/بار)
البصل (*Allium cepa*)	خلية بشرة	البلزمة	٢- ٣ X ١٠ $^{-٧}$
البصل (*Allium cepa*)	خلية بشرة	تدفق الماء المشع	١,١- ١,٩ X ١٠ $^{-٧}$ عند ضغط خارجي صفر
البصل (*Allium cepa*)	خلية بشرة	تدفق الماء المشع	١,٣ X ١٠ $^{-٧}$ عند ضغط خارجي ١٢ بار
البصل (*Allium cepa*)	خلية بشرة	قوة الضغط الخارجي	٢- ٥ X ١٠ $^{-٦}$
الغاسول (*Mesembryanthemum crystallium*)	خلية غدية	مسبر الضغط ١	٢ X ١٠ $^{-٦}$

تابع –الجدول رقم (٤–٣).

النبات	جزء النبات	الطريقة	نفاذية الماء (سم/ثانية/بار)
فلفل (*Capsicum annum*)	خلية ثمرة	مسبر الضغط ٢	≅٥ X ١٠ $^{-٧}$
قطن (*Gossypium hirsutum*)	نسيج من الساق	التمدد والانكماش	≅١ X ١٠ $^{-٥}$
ذرة (*Zea mays*)	نسيج من الجذر	تدفق الماء المشع	٤ X ١٠ $^{-٦}$ -٣
ذرة (*Zea mays*)	نسيج من الجذر	تدفق الماء المشع	≅١ X ١٠ $^{-٨}$
ذرة (*Zea mays*)	نسيج من الجذر	تدفق الماء المشع	٣ X ١٠ $^{-٩}$
الجزر (*Daucus carota*)	نسيج من الجذر	تدفق الماء المشع	١ X ١٠ $^{-٩}$

والجدول المذكور يوضح مدى التفاوت في القيم لنفاذية الماء ويرجع ذلك إلى عجز متأصل في بعض الطرق بالإضافة إلى أن حساب النفاذية بطريقة غير مباشرة يعتمد على نماذج نقل الماء في النسيج حيث هناك نموذجان أحدهما (نموذج الخلية المعزولة) يفترض أن خلايا النسيج تتبادل الماء مع بيئتها الخارجية كل واحدة على حده دون تأثير للخلايا الأخرى في النسيج نفسه وأن نفاذية الماء (L_p) والغشاء الخلوي ومعامل مرونة الجدار (ε) ومعامل النفاذية هي العوامل التي يجب أخذها بالحسبان، أما النموذج الآخر (نموذج من خلية لأخرى) يفترض أن الخلية تتبادل الماء مع خلية أخرى وبذا فالنقل خارج الخلايا (Apoplast) معدوم، يلاحظ أنه في

هـذين النمـوذجين تتمثـل الحـالات النـادرة والـتي قلمـا توجـد في الأنظمـة الإحيائيـة وهـذا هـو أحـد الأسـباب في وجـود مثـل هـذا التفـاوت في قـيم نفاذيـة المـاء في الجـدول السابق. مـن هنـا ظهـرت بعـض التعـديلات لمثـل هـذه النمـاذج ولكنهـا لا زالـت مبدئيـة ومـع ذلـك يطـول شـرحها وكمثـل لـذلك راجـع زيمرمـان وسـتودل ١٩٧٨م (Zimmermann and Steudle, 1978).

(٤-٦) حركة الماء بين الخلايا

إن حركـة المـاء وانتقالـه قـد تفـسر تبعـا لـبعض القـوانين الفيزيائيـة ولكـن الخلايـا الحيـة علـى درجـة كـبيرة مـن التعقيـد ولـذا فـإن الـشرح التـالي لـبعض الآليـات الأساسـية مـع ذكـر بعـض العلاقـات الكميـة المهمـة في حركـة المـاء قـد تساعد في فهم آلية الانتقال في الخلية الحية أو النبات ككل.

١- تدفق الكتلة Mass flow

مـن أبـسط الطـرق لتحريـك المـاء الـسائل أو المحلـول أن يوضـع تحـت ضـغط، ومـن هنـا فحركـة جزيئـات المـاء في هـذه الحالـة تكـون عـن طريـق تـساوق الموجـات وبـالطبع يحـدث انتـشار للجزيئـات داخـل المجـرى ولـذا فـسرعة بعـض الجزيئـات أكـبر مـن المعـدل والـبعض الأخـر أقـل مـن المعـدل، إلا أنـه في هـذا النـوع مـن التـدفق تكـون حركـة كـل الجزيئـات في اتجـاه واحـد ويمكـن إيـضاح تـدفق الكتلـة (Mass flow) كما في الشكل التالي رقم (٤-١٤).

في الرسـم التخطيطـي الموضـح تـدفق الكتلـة يـضغط المكـبس علـى المـاء مكونـا موجـات متـضاغطة تـسير بـسرعة الـصوت في المـاء (١٤٩٨ مـتر/ الثانيـة عنـد درجـة ٢٥°م) ويمكـن أن تعمـل الجاذبيـة عمـل المكـبس. وتـدفق المـاء عـبر الأنبوبـة في الـشكل

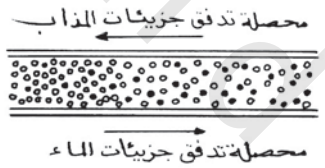
يتأثر بعامل الاحتكاك في جدار الأنبوبة ولو كان مقطع الأنبوبة يساوي نصف ذلك المقطع فإن معدل الحركة عند الضغط نفسه يتضاعف ولكن الضغط على جدار الأنبوبة لا يزداد كما هو متوقع بل يقل وهذا ما يعرف بظاهرة برنويلي (Bernouili)، وهذه الظاهرة ذات أهمية في عملية النقل في الخشب. بما أن عملية تدفق الكتلة عبارة عن حركة من المناطق المنضغطة إلى المناطق الأخف ضغطا فمن الممكن اعتبار التدفق حركة من منطقة التركيز العالي إلى منطقة التركيز المنخفض ومن هذه الناحية يمكن مقارنة تدفق الكتلة بتدفق الانتشار (كما سيرد)، والماء والمحاليل تنتقل في الخشب عن طريق تدفق الكتلة وذلك لوجود ممال لجهد الضغط بين الجذور والمجموع الخضري، ويمكن اعتبار الدوران السيتوبلازمي ظاهرة تدفق كتلة (Kramer, 1969).

الشكل رقم (٤-١٤). رسم تخطيطي مبسط لإيضاح تدفق الكتلة حيث تساوق الموجات المضغوطة بسرعة الصوت في الماء وهي ١٤٩٨ متر ثانية$^{-1}$ عند درجة ٢٥°م.

٢- تدفق الانتشار Diffusional flow

من المعروف أن جزيئات الماء في حالة حركة دائمة نتيجة للاهتزاز الجزيئي مما يسبب وجود مناطق مختلفة من الضغط في الماء السائل. وهذه الحركة تعمل على خلط الجزيئات عشوائيا حيث يطلق على هذه الظاهرة الانتشار، إذا فالانتشار هو الحركة العشوائية لجزيئات المادة ويمكن التعميم بأن

الأمثلة على الانتشار تتضمن التبخر والأسموزية والتشرب، ويختلف الانتشار عن تدفق الكتلة في كون حركة الجزيئات عشوائية، وفي الماء النقي ليس هناك اندفاع للجزيئات لأي اتجاه معين ولكن عندما يوجد مذاب (كقطرة من صبغة) فإن القطرة تبدو وكأنها تكبر تدريجيا حتى تختفي وهذا مرده إلى وجود اندفاع (تدفق) لجزيئات الماء إلى تلك القطرة بسبب وجود ممال للضغط بين خارج وداخل القطرة لأن الماء الداخل يكون روابط هيدروجينية مع جزيئاتها، وهذا النوع من الاندفاع هو ما يعرف بتدفق الانتشار. والتدفق هنا للماء من منطقة تركيزه العالي إلى منطقة تركيزه المنخفض، وما ينطبق على جزيئات الماء ينطبق أيضا على حركة جزيئات المذاب في النظام، والشكل رقم (٤-١٥) رسم تخطيطي لمثل هذا التدفق.



الشكل رقم (٤-١٥). رسم تخطيطي مبسط لظاهرة الانتشار، ويمثل جزيئات المذيب (الماء) الدوائر المصمتة (●) وجزيئات المذاب بالدوائر المفتوحة (o).

الجدير بالذكر أن ظاهرة الانتشار هذه تستغل في الحصول على نسبة معينة من الرطوبة النسبية في حيز معين وذلك عن طريق وضع محاليل لمواد في جزء من ذلك الحيز حيث ينتشر الماء من الهواء في ذلك الحيز إلى المحلول ومن أمثلة المواد محلول كلوريد الصوديوم وحمض الكبريتيك وكمثل لذلك

فالجدول رقم (٤-٤) يوضح الرطوبة النسبية للهواء المحيط بتركيز معين من تلك المواد بعد التعادل.

وينتقل الماء من الهواء إلى المحلول حسب فرق جهد الماء، أي من منطقة تركيز الماء العالية إلى منطقة تركيزه المنخفضة (والهواء هنا يعمل كغشاء شبه منفذ كما سيرد في النوع الخاص من الانتشار وهو الأسموزية).

الجدول رقم (٤-٤). الرطوبة النسبية للهواء الذي في حالة تعادل مع تراكيز مختلفة من كلوريد الصوديوم وحمض الكبريتيك عند درجة ٢٠°م (Sutcliffe, 1968).

كلوريد الصوديوم		حمض الكبريتيك	
التركيز (جزيئي جرامي)	الرطوبة النسبية	الكثافة النسبية	الرطوبة النسبية
٠,١	٩٩,٧	١,١٢٥	٩٠
٠,٢	٩٩,٤	١,١٩٠	٨٠
٠,٤	٩٨,٨	١,٢٥٠	٧٠
٠,٦	٩٨,١	١,٢٩٣	٦٠
٠,٨	٩٧,٨	١,٣٣٠	٥٠
١,٠	٩٦,٨	١,٣٨٠	٤٠
٢,٠	٩٣,٠	١,٤١٠	٣٠
٣,٠	٨٨,٣	١,٤٨٦	٢٠
٤,٠	٨٣,٠	١,٥٨٠	١٠
٥,٠	٧٨,٤	—	—

obeikandl.com

إن معدل الانتشار للمادة سواء كغاز أو كمحلول يمكن حسابها من قانون فيك التالي :

$$\frac{\delta c}{\delta x} = -DA \frac{\delta m}{\delta t}$$

حيث : (δm) تمثل كمية المادة المنقولة

و (δt) الزمن

و D معامل الانتشار والإشارة السالبة تدل على أن الانتشار يتم من التركيز العالي إلى التركيز المنخفض وهي القوة المسببة للانتشار.

و (A) المساحة التي تنتقل عبرها المادة.

و (δc) الفرق في التركيز على جانبي المساحة (A)

و (δx) المسافة بين النقطتين التي يحدث بينهما الانتشار.

والمعادلة على أية حال تدل على أن الانتشار لمادة معينة ومساحة معينة يتناسب مع الفرق في التركيز ويتناسب عكسيا مع المسافة.

إن عملية الانتشار بطيئة جدا إذا كانت المسافة (δx) طويلة ، وللإيضاح فقد حسب العالم دي فريز (De Vries) بأن انتشار واحد مليجرام من ملح الطعام من محلول ١٠٪ مسافة متر واحد عبر أنبوبة مقطعها يساوي واحد سم^{٢} يستغرق ٣١٩ يوما و ٩٤٠ يوما لنقل واحد مليجرام من السكروز تحت الظروف نفسها ، أما إذا كانت المسافة قصيرة فعملية تدفق الانتشار سريعة حيث تساوي ١٠$^{-٨}$ من المرات إذا كانت المسافة واحد ميكرومتر بدلا من واحد سم. من هنا تتبين أهمية هذا النوع من التدفق وخاصة في تدفق الماء والمحاليل إلى جذور النباتات ومن خلية لأخرى. وظاهرة الانتشار هذه بطبيعة الحال لا تفسر عمليات انتقال الماء للمسافات المحسوبة بالأمتار في النباتات.

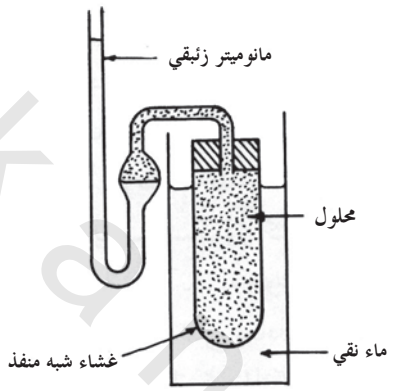
٣- التدفق الأسموزي Osmotic flow

عند وجود حاجز منفذ للماء وغير منفذ لجزيئات المذاب في النظام السابق (حيث التدفق الانتشاري) تتكون ظاهرة خاصة تعرف بالأسموزية، وهي أن الماء ينتقل من منطقة تركيزه العالي (الماء النقي) إلى منطقة تركيزه المنخفض (المحلول) وبذا فمحصله الحركة تكون في اتجاه واحد، ويوصف الحاجز بأنه غشاء شبه منفذ (Semi-permeable membrane)، كما في الرسم التخطيطي التالي (الشكل رقم ٤-١٦).

الشكل الرقم (٤-١٦). رسم تخطيطي لظاهرة التدفق الأسموزي عبر غشاء شبه منفذ ممثلا هنا في الوسط وبه ثقب واحد تمر عبره جزيئات المذيب (الماء) ولا تعبره جزيئات المذاب.

وبالطبع فحركة جزيئات الماء عبر ثقوب الغشاء عبارة عن تدفق كتلة ولكن بعد مرور الجزيئات إلى الناحية الأخرى من الغشاء فالحركة عبارة عن تدفق انتشاري. وتوصف حركة الماء من خلية لأخرى بأنها ظاهرة أسموزية ويعتقد البعض أن الأسموزية تشتمل على تدفق كتلة للماء بين الخلايا عبر الثقوب الموجودة في الأغشية الخلوية ولكن يجب أن يؤخذ في الاعتبار أن وجود الثقوب المملوءة بالماء في الغشاء الخلوي لم يثبت بدليل قاطع حتى الآن. لذا فكل ما يهم في هذا المجال هو أن الأسموزية من ناحية أخرى تشتمل- في أحد مراحلها في الأقل- على ظاهرة الانتشار حيث إنه من المحتمل أن الانتشار هو

العامل المحدد لحركة الماء بين الخلايا. إن النظام الذي تحدث فيه ظاهرة التدفق الأسموزي يطلق عليه الأسمومیتر (Osmometer)، ويمكن إبراز هذه الظاهرة معمليا بربط غشاء شبه منفذ مناسب في طرف أنبوبة زجاجية وملئها بمحلول ومن ثم طمر الجزء الذي به الغشاء في الماء النقي الشكل رقم (٤-١٧).



الشكل (٤-١٧). رسم تخطيطي لأسموميتر بسيط.

المصدر : (Sutcliffe, 1968).

وقد بين العالم الألماني فيفر (Pfeffer) أنه بازدياد تركيز المحلول تزداد كمية الماء المارة عبر الغشاء شبه المنفذ ولذا فإن:

$$\Psi_p = -\Psi_s = \pi = \frac{1}{KV}$$

حيث: (Ψ_p) جهدالضغط

و (Ψ_s) الجهد الأسموزي

و (π) الضغط الأسموزي

و (K) ثابت

و (V) حجم المحلول

ونظرا للتشابه بين هذه المعادلة وقوانين الغازات لراؤ ولت ((Ra`oult)) وفانت هوف (Van`t Hoff) فقد ربطت ظاهرة الأسموزية بقوانين الغازات ولذا فيستعمل ثابت الغازات (R) في معادلة قياس الجهد الأسموزي كالتالي :

$$-\Psi_s = \pi = RTm$$

حيث (R) ثابت الغازات

و (T) درجة الحرارة المطلقة

و (m) التركيز الجزيئي الوزني أو بصورة أدق ثابت نشاط المادة المذابة.

ورغم ذلك فآلية الأسموزية تختلف عن الغازات في كون المذيب هو المسبب وللتوضيح فعند وضع سكروز مطحون في داخل الأسمو ميتر الذي ربط بعداد يبين الضغط فإن القراءة على العداد ستكون صفرا ولكن لو غمر الأسمو ميتر في الماء النقي فإن الماء يبدأ في التدفق عبر الغشاء شبه المنفذ ويكون روابط هيدروجينية مع جزيئات السكروز، ويستمر التدفق لأن جزيئات الماء الداخلة للأسمو ميتر لديها المقدرة على تكوين روابط هيدروجينية مع جزيئات السكروز أكثر من جزيئات الماء النقي ولذا تتولد قوة امتصاص (أو جذب) على جانبي الغشاء، وعند تثبيت حجم الأسمو ميتر يتولد ضغط هيدروستاتيكي يبدأ في الزيادة حتى يعادل قوة الامتصاص ويحدث التعادل. وتجدر الإشارة أن الضغط الهيدروستاتيكي المتكون في هذا النظام أطلق عليه

obeikandl.com

اسم الضغط الأسموزي. من هذا التفسير يتضح أن الأسموزية ما هي إلا ظاهرة تستحث تكوين فرق جهد للماء بين المنطقتين تظهر بشكل تدفق للماء أو تكوين ضغط هيدروستاتيكي في الأسموميتر.

في كثير من المراجع تستعمل قيم الضغط الأسموزي لوصف المحاليل والمقصود بذلك أنه لو وضع المحلول في أسموميتر فإن مثل هذا المحلول يمكن أن يكون ضغطا هيدروستاتيكيا يساوي تلك القيمة للضغط الأسموزي، والأفضل من ذلك استخدام مصطلح الجهد الأسموزي (Ψ_s) الذي يساوي عدديا للضغط الأسموزي ولكن مخالف في الإشارة حيث هذا يدل على مقدار النقص في جهد المذيب (الماء) نتيجة لوجود المذاب، وهكذا فإن واحد جزيء وزني لمحلول السكروز ذو جهد أسموزي (Ψ_s) يساوي-٢,٦٣ ميجاباسكال وهذا يعني أن جهد الماء في ذلك المحلول يساوي-٢,٦٣ ميجاباسكال ولو وضع في أسموميتر فإن هذا المحلول يكون ضغطا هيدروستاتيكيا يساوي ٢,٦٣ ميجاباسكال. أما الدقائق المعلقة في الماء فليس لها جهدا أسموزيا يذكر، أما المواد الغروانية (كالبروتين) فتعد وسطا بين الدقائق والمواد الذائبة والتي تكون محلولا حقيقيا وذلك في إحداث الجهود الأسموزية. إن التراكيز المتساوية من المحاليل الحقيقية (كالسكر) تكون جهودا أسموزية متساوية على وجه التقريب وتقارب قيمته - ٢,٢٤ ميجاباسكال عند درجة حرارة ٢٠°م لكل واحد جزيئي وزني وذلك يعود لعدم تأين تلك الجزيئات، أما إذا كانت المواد متأينة (كالمحاليل الألكتروليتية مثل ملح الطعام) فإن عدد الأيونات التي تكون روابط هيدروجينية مع الماء يتضاعف ولذا فإن واحد جزيئي وزني من تلك المواد له جهد أسموزي يقارب - ٤,٤٥ ميجاباسكال عند درجة حرارة ٢٠°م. وهذا

معناه أن الجهد الأسموزي يتناسب مع عدد الجزيئات أو الأيونات للمادة المذابة بغض النظر عن نوع المادة ما دامت تكون محلولا. وفي الحقيقة يعد المذاب (أي المادة المكونة للجهد الأسموزي Osmoticum) مثالياً إذا كان ينطبق عليه قانون الغازات ولذا فواحد جزيئي وزني من محلول مثالي يكون جهدا أسموزيا يساوي – ٢,٢٧ ميجاباسكال وهذا ما يعرف بالأسمول (Osmole) ولكن المحاليل نادرا ما ينطبق عليها قانون الغازات لذا فإنه يضاف للمعادلة السابقة والمشابهة لقانون الغازات ثابت كالتالي :

$$\Psi_p = -\Psi_s = \pi = \frac{ZRTm\Phi}{V}$$

حيث : (Z) التكافؤ

و (m) الوزن الجزيئي للمذاب

و (Φ) معامل الأسموزية

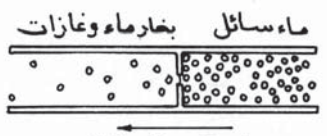
أما بقية الرموز فكالسابق

إن معامل الأسموزية للمواد الألكتروليتية أقل من الوحدة بقليل لأن هناك تجاذب بسيط بين الأيونات نفسها، أما البروتينات فمعامل الأسموزية قد يصل إلى ٢,٤٥ وذلك لأن هناك بعضا من جزيئات الماء تكون مرتبطة داخليا في الجزيئي ولذا فلا يمكن اعتبارها مادة إذابة. يبين الملحق رقم (٤) الجدول رقم (١) بعض المعاملات الأسموزية للسكروز وبعض المواد الألكتروليتية مع التغير في الوزن الجزيئي الوزني.

obeikandi.com

٤- التدفق من السائل إلى البخار Liquid to vapour transport

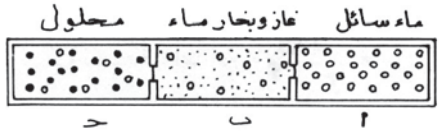
تفقد النباتات جزءا كبيرا من مائها عن طريق النتح والذي هو عبارة عن نقل الماء من الطور السائل إلى الطور البخاري (الشكل رقم ٤-١٨).



الشكل رقم (٤-١٨). رسم تخطيطي مبسط لظاهرة تحرر جزيئات الماء على هيئة بخار عبر غشاء (ممثلا بثقب واحد) بدلاً من التوتر السطحي، والحركة انتشارية في منطقة بخار الماء والغاز.

يشابه النتح في كثير من النواحي عملية التدفق الأسموزي، فعندما تتبخر جزيئات الماء فإنها تصبح متباعدة لتكسر كثير من الروابط الهيدروجينية لذا فجهد الماء كبخار أقل بكثير منه كسائل نظرا لأنه كلما كانت المسافة بين جزيئات الماء كبيرة كلما قل جهد الماء. وبالطبع لو زاد تركيز البخار عن حد معين (التشبع) فإن جزيئات الماء تتكاثف وبذا يعود تكوين الروابط الهيدروجينية بينها.

ذكر في الأنواع السابقة من التدفق كل نظام على حده، ومن الممكن وضع نموذج يشمل العلاقة بين الجهد الأسموزي وجهد الضغط في الطورين البخاري والسائل حيث إن تلك العلاقة تؤثر في جميع النباتات كما هو موضح في الشكل رقم (٤-١٩).



الشكل رقم (٤-١٩). رسم تخطيطي يوضح النظام المغلق غير القابل للتمدد ويتكون من ثلاث حجيرات في حالة اتزان، ففي (أ) يتكون جهد ضغط سالب وفي (ب) غاز وفي (جـ) محلول، وكل الحجيرات متعادلة رغم اختلاف تركيز الماء.

وتظهر الأهمية في الشكل رقم (٤-١٩) في كون الغاز في الحجيرة الوسطى (ب) عند التعادل يعمل كغشاء شبه منفذ مثالي بشرط أن الثقب في الحاجز الذي بين (أ) و (ب) من الصغر بحيث قوى التوتر السطحي للماء تسمح بتكوين ضغط سالب في الحجيرة (أ). الماء في الحجيرة (أ) ماء نقي وجهده يساوي الصفر والمحلول في (جـ) جهده يساوي فرضا - ٠,٥ ميجاباسكال فعند التعادل أي أن الجهد الكلي لكل من الحجيرات الثلاث متساو، لذا فلابد وأن يتكون ضغط سالب في الحجيرة (أ) يعادل الجهد الأسموزي في الحجيرة (جـ) ويساوي ٠,٥ ميجاباسكال. أما الحجيرة ب فالجهد الكلي هو - ٠,٥ ميجاباسكال نظرا لنقص في تركيز جزيئات الماء (على هيئة غاز غير مشبع حيث الرطوبة النسبية تساوي ٩٩,٧٪). في مثل هذا النظام يجب أن تكون درجة الحرارة ثابتة نظرا لأن أي تغير في درجة الحرارة بين الحجيرات الثلاث يغير من التعادل (إن فرق درجة حرارة واحدة يعادل فرق جهد يساوي ٨,١٦ ميجاباسكال، أي أن فرق٠,٠١٢°م يعادل فرق ٠,١ ميجاباسكال).

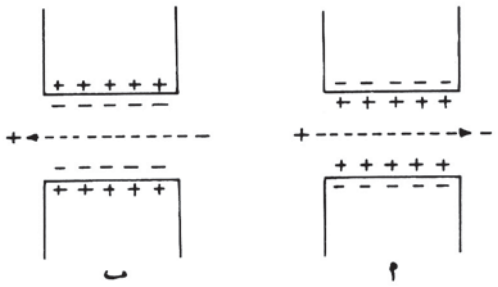
٥- التدفق الكهربائي Electrical flow

من المعروف أن تركيز أيونات الهيدروجين (الرقم الهيدروجيني) ذو تأثير واضح في العمليات الإحيائية وفعالية كثير من الجزيئات المعقدة كالإنزيمات والبروتينات، ومنذ وقت قريب عرف أن الأغشية الخلوية تتحكم في وجود ممال جهد كهربائي عن طريق ضخ البروتونات (أيونات الهيدروجين) وحيث إن حركة أي أيون تتأثر بممال التركيز وممال الجهد الكهربائي فإن هذا الموضوع ذو أهمية كبرى في فهم عملية الانتقال. والذي يهم في هذا المقام هو الماء وكما سبق فجزيء الماء قطبي فعند تحرك جزيئات الماء فإنها تعيق تيار الإلكترونات المعاكس وهذا ما حدا بالبعض لدراسة هذه الظاهرة لقياس تدفق السائل. بالإضافة إلى ذلك فإن تدفق جزيئات الماء على أي سطح يستحث تكوين ممال جهد كهربائي، ولذا فعكس هذه العملية أي شحن بعض الأسطح يؤدي إلى مرور تيار الماء وهذا ما يعرف بالأسموزية الكهربائية (Electro-osmosis) والتي يعتقد البعض بوجودها كآلية للنقل في بعض أجزاء النبات (الشكل رقم ٤-٢٠).

ولقد اقترح منذ زمن طويل أن التدفق الكهربائي يؤدي دورا مهما في أنظمة النقل للمسافات الكبيرة في النبات (كاللحاء) ولكن ليس من دليل مقنع لهذا الاعتقاد حتى الآن. أما على المستوى الخلوي أو دونه فإن ظاهرة التدفق الكهربي قد تكون من الأهمية بمكان حيث إن وجود الممالات الكهربائية يؤدي إلى فروق في الضغط كبيرة طبقا للعلاقة التالية:

$$E = 1mV = 3.2\ MPas = -\Delta\Psi_p$$

openkanal.com



الشكل رقم (٤–٢٠). الأسموزية الكهربائية حيث تشير الأسهم إلى اتجاه تدفق الماء عندما تختلف الشحنات على سطح الثقب أو القناة في الغشاء.

المصدر: (Sutcliffe, 1968) **بتصرف.**

من هنا فإن التدفق الأسموزي قد يكون له دور فعال فيما دون مستوى الخلية (كالجدار الخلوي) خاصة وأنه قد سجلت فروق جهد للخلايا ما بين– ٧٠ إلى– ١٥٠ مليفلت.

بعد هذه المقدمة عن الآليات التي يمكن أن تصف انتقال الماء من منطقة جهده العالي إلى منطقة جهده المنخفض لذا فمن المفيد ذكر بعض الأمثلة لحساب جهد الماء في مختلف الأنظمة وذلك لمعرفة اتجاه معدل حركة الماء حسب ما أوردها برايس ١٩٧٠ (Price, 1970) مع بعض التصرف.

المثال الأول

ما هو جهد الماء لمحلول واحد جزيئي حجمي من السكروز عند درجة حرارة ٢٥°م وضغط جوي واحد؟

الحل

يفرض أن محلول واحد جزيئي حجمي من السكروز يمثل محلولا مثالياً لذا فإن :

$$\Psi = \Psi_s + \Psi_p + \Psi_m$$

من التعريف (Ψ_p) و (Ψ_m) كل منهما يساوي الصفر، لذا فبالتعويض في المعادلة التالية لقيمة الجهد الأسموزي نحصل على التالي :

$$\Psi_s = - \frac{RT}{\overline{V}} \ln \frac{1}{Nw}$$

حيث : R ثابت الغازات ويساوي ٨٢,٠٦ سم^3 ضغط جوي/ درجة/ جزيء جرامي

و (T) درجة الحرارة وتساوي ٢٧٣+ ٢٥- ٢٩٨ درجة مطلقة (كالفن)

و (V) حجم الماء الجزيئي معبرا عنه بالوزن الجزيئي الحجمي ويساوي ١٨,٠٧ سم^3

و (Nw) الكسر الجزئي للماء ويساوي ٥٥,٥ ÷ ٥٦,٥ [ويساوي عدد الأوزان الجزيئية الجرامية (Moles) للماء في المحلول مقسوماً على عدد الأوزان الجزيئية الجرامية الكلية (Moles).في المحلول].

فينتج عن ذلك أن :

الجهد الأسموزي=- (٨٢,٠٦×٢٩٨) لوغاريتم (٥٥,٥ ÷ ٥٦,٥) =- ٢٤,٥ ضغط جوي أو ٢,٤٥ ميجاباسكال.

أي أن الجهد الكلي= الجهد الأسموزي =- ٢٤,٥ ضغط جوي أو ٢,٤٥ ميجاباسكال.

obeikandl.com

المثال الثاني

ما مقدار الضغط الهيدروستاتيكي المطلوب على محلول واحد جزيئي حجمي من السكروز لمعادلة جهد الماء النقي عند درجة حرارة ٢٥ م وضغط جوي واحد؟

الحل

في المثال الأول حصلنا على جهد أسموزي يعادل =- ٢٤,٥ ضغط جوي أو - ٢,٤٥ ميجاباسكال، فبالتعويض في المعادلة:

$$\Psi = \Psi_s + \Psi_p + \Psi_m$$

وبما أن (Ψ) للماء النقي تساوي الصفر وكذلك (Ψ_m)

فالناتج بعد التعويض: صفر=- ٢٤,٥+ جهد الضغط+ صفر

إذاً:

جهد الضغط = ٢٤,٥ ضغط جوي أو ٢,٤٥ ميجاباسكال

أي أنه يتطلب ٢٤,٥ ضغط جوي أو ٢,٤٥ ميجاباسكال لحصول التعادل بين ذلك المحلول والماء النقي.

المثال الثالث

عند قياس حجم خلية ما ومن ثم وضعها في الماء عند درجة حرارة ٢٥° م فإن الماء ينتقل إلى داخل الخلية مكونا زيادة في حجمها فبأخذ تلك الخلية ووضعها في محاليل من سكر المانيتول متدرجة في التركيز مثل ٠,٢ جزيئي فيلاحظ أن حجم الخلية نقص إلى الحجم الابتدائي ولكن عند تركيز ٠,٥ جزيء فإنه يلاحظ تبلزم الخلية جزئيا بينما في محلول ٠,٦ تحدث بلزمة قوية، فإذا كان حجم الخلية عند وضعها في محلول ٠,٥ جزيئي أقل من

حجمها الأصلي بـ ٥٪ فاحسب التالي :

ا- الضغط الأسموزي للخلية عند ضغط امتلاء صفر.

ب- الضغط الأسموزي للخلية عند الحجم الابتدائي.

ب- جهد الضغط للخلية (Ψ_p) عند الحجم الابتدائي.

د- جهد الخلية (جهد الماء داخل الخلية) عند الحجم الابتدائي.

الحل

عند وضع الخلية في محاليل المانيتول المتدرجة في التركيز فإن الخلية تبدأ في فقد بعض من محتواها المائي حتى تصل إلى حالة تعادل وبذا تفقد الخلية حالة امتلائها ويكون جهدها الأسموزي في حالة التعادل مساويا الجهد الأسموزي للمحلول الخارجي وتكون عند ضغط امتلاء يساوي الصفر (أي الخلية مترهلة ، Flaccid) حيث محتويات الخلية تكون على وشك الابتعاد عن الجدار الخلوي وهذا ما يعرف بالبلزمة المؤقتة (Incipient plasmolysis) ولذا فلحساب المطلوب :

ا- تحدث البلزمة المؤقتة عند تركيز٠,٥ جزيء مانيتول لذا فحسب معادلة فانت هوف (Van`t Hoff) التالية :

$$-\Psi_s = RTm$$

وعند التعويض والضرب في إشارة (-) ينتج :

الجهد الأسموزي= - التركيز × ثابت الغازات (للتر) × درجة الحرارة المطلقة

=- ٠,٥ × ٠,٠٨٢٠٦ × ٢٩٨ =- ١٢,٢ ضغط جوي

أي أن الجهد الأسموزي للخلية عند البلزمة المؤقتة يساوي- ١٢,٢

ضغوط جوية.أو- ١,٢٢ ميجاباسكال

ب- الجهد الأسموزي للخلية عند الحجم الابتدائي:

حيث أن حجم الخلية عند تركيز ٠,٥ جزيئي مانيتول يساوي ٩٥٪ من حجمها الأصلي لذا فإن الجهد الأسموزي عند الحجم الابتدائي كالتالي:

الجهد الأسموزي =- ٠,٩٥ × ٠,٥ × ٠,٠٨٢٠٦ × ٢٩٨

=-١١,٦ ضغط جوي

أي أن الجهد الأسموزي للخلية عند الحجم الابتدائي يساوي- ١١,٦ ضغوطا جوية.أو- ١,١٦ ميجاباسكال

جـ- جهد الضغط عند الحجم الابتدائي:

إن تأثير ٠,٢ جزيئي من المانيتول يعادل الضغط الهيدروستاتيكي الابتدائي ولذا فإن:

جهد الضغط= ٠,٢ × ٠,٠٨٢٠٦ × ٢٩٨

= ٤,٩ ضغط جوي أو ٠,٤٩ ميجاباسكال

د- جهد الخلية عند الحجم الابتدائي:

حيث إن:

$$\Psi = \Psi_s + \Psi_p$$

∴ فجهد الخلية=- ١١,٦ + ٤,٩ = - ٦,٧ ضغط جوي أو - ٠,٦٧ ميجاباسكال

المثال الرابع

ما هو جهد الماء في الهواء عندما تكون درجة الحرارة ٢٥ م والرطوبة النسبية تساوي ٩٠٪؟

obeikandi.com

الحل

بما أن:

$$\Psi = \Psi_s + \Psi_p + \Psi_m$$

وحيث أن ، (Ψ_p) و (Ψ_m) تساوي الصفر.

إذاً:

الجهد الأسموزي في مثل هذه الحالة يساوي الجهد الكلي، والجهد الأسموزي باستخدام الضغط الجزئي كما في المعادلة يساوي:

$$\Psi_s = - \frac{RT}{V} \ln \frac{\rho^\circ}{\rho}$$

حيث (ρ°) هو الضغط الجزئي الذي في حالة تعادل مع الماء النقي (ويساوي ١٠٠) بينما (ρ) هو الضغط الجزئي المذكور في المثال (أي ٩٠)، أما بقية الرموز فكما سبق، وبالتعويض:

الجهد الأسموزي =- {(٨٢,٠٦ × ٢٩٨) ÷ ١٨,٠٧} لوغاريتم (١٠٠ ÷ ٩٠)

=- ١٤١ ضغطا جويا

=- ١٤,١ ميجاباسكال

فإذا الجهد الأسموزي = الجهد الكلي للماء في الهواء

= - ١٤١ ضغوطا جوية

=- ١٤,١ ميجاباسكال

المثال الخامس

لو كان هناك خليتان "أ" و "ب". الخلية "ا" لها جهد ضغط يساوي ٠,٥ ميجاباسكال والجهد الأسموزي للعصير الخلوي يساوي – ١,٢

ميجاباسكال، بينما الخلية الثانية "ب" جهد ضغطها يساوي ٠,٣ ميجاباسكال والجهد الأسموزي لعصيرها يساوي – ٠,٦ ميجاباسكال، فإذا وضعت الخليتان بجانب بعض ففي أي اتجاه سينتقل الماء وبأية قوة؟

الحل

جهد الخلية "أ" الكلي = جهد الضغط+ الجهد الأسموزي

= ٠,٥+ (– ١,٢)=- ٠,٧ ميجاباسكال

جهد الخلية "ب " الكلي = جهد الضغط + الجهد الأسموزي

= ٠,٣+ (–٠,٦)=- ٠,٣ ميجاباسكال

فرق الجهد بين الخليتين أ– ب=- ٠,٧ – (–٠,٣)=–٠,٤ ميجاباسكال

إذاً:

فالماء سينتقل من الخلية "ب" إلى الخلية "أ" بقوة –٠,٤ ميجاباسكال (حيث انتقال الماء يكون من منطقة جهده العالي إلى منطقة جهده المنخفض) أي من الخلية "ب" ذات الجهد–٠,٣ إلى الخلية "أ" ذات الجهد–٠,٧ أي الأكثر سالبية.

(٤–٧) طرق قياس جهد الماء ومكوناته في النبات

من المواضيع السابقة يمكن اعتبار الجهد الكلي للماء في معظم الحالات المجموع الجبري لجهد الضغط والجهد الأسموزي أي:

$$\Psi = \Psi_s + \Psi_p$$

وفي غالبية النباتات يكون جهد الماء ذا قيمة سالبة إلا أن القيمة قد تكون موجبة (أثناء الإدماع مثلا). ومن الممكن قياس الجهد الكلي أو أحد

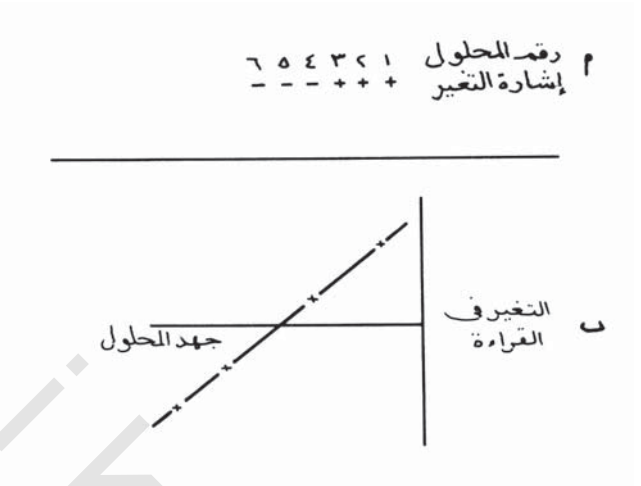
مكوناتـه بعـدة طـرق كمـا سـيرد، وسـوف يكتفـى بـذكر بعـض الطـرق والأسـاس النظـري المبنيـة عليهـا مـع بعـض الإشـارة إلى بعـض المحاسـن والعيـوب المهمـة نظـرا لأن المجـال لا يتـسع لـشرح التفاصـيل والآراء ولمزيـد مـن التفـصيل يرجـع إلى بـارز ١٩٦٨ م (Barrs, 1968).

١- طرق قياس الجهد الكلي للماء

مـن الطـرق المعروفـة لقيـاس جهـد المـاء سـواء لمحلـول التربـة أو العـصير الخلـوي أو العينـة النباتيـة مـا يعتمـد علـى الاتـزان في الحالـة الـسائلة أو الاتـزان في الحالـة البخاريـة أو الاتـزان مـع ضـغط معـين تبعـا للعينـة المـستخدمة لـذا فـيمكن تقسيم الطرق طبقا لذلك كما في الفقرات التالية:

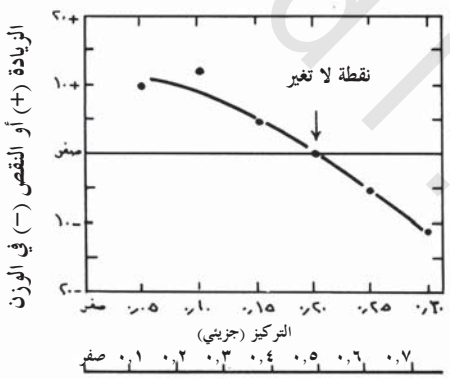
أ) طرق الاتزان مع السوائل

قبـل البـدء في سـرد الطـرق المختلفـة يفـضل ذكـر قاعـدة الاتـزان بـين الخلايـا أو النـسيج مـن جهـة والوسـط الخـارجي مـن جهـة أخـرى، فعنـد اسـتخدام محاليـل متدرجـة في التركيـز مـع مـادة لا تنفـذ عـبر الغـشاء الخلـوي ووضـع عينـات متجانـسة في كـل منهمـا، فـإن بعـض العينـات تمـتص المـاء والـبعض الآخـر يفقـد جـزءا مـن مائـة وعينـة لا تـتغير وذلـك تبعـا لفـروق جهـد المـاء بـين الخلايـا أو الأنـسجة مـن جهـة والوسـط الخـارجي مـن جهـة أخـرى، مـن هنـا يمكـن تحديـد المحلـول الـذي جهـده يعـادل الجهـد في العينـة وهـو مـا يطلـق عليـه بـالمحلول المتعـادل (Isopiestic or isobaric solution). وعمليـا مـن النـادر جـدا أن يكـون هـذا المحلـول ضـمن سلـسلة المحاليـل المتدرجـة في التركيـز، لـذا فيـستعان بالتقـدير بـأن ذلـك المحلـول يقـع تركيـزه بـين تركيـزين معينـين ويؤخـذ متوسـطهما كقيمـة تقديريـة أو يـستعان برسـم العلاقـة إذا كانت القراءات كمية وتقدر القيمة كما في الشكل رقم (٤-٢١).



الشكل رقم (٤–٢١). استخدام طريقة التعادل عن طريق الرسم أو عدمه حسب النتائج لتقدير الجهد الكلي. (أ) يؤخذ متوسط الجهد بين الإشارتين المتتابعتين ومختلفتي الإشارة للتقدير.
(ب) رسم العلاقة ونقطة التقاطع مع الإحداث الأفقي تمثل الجهد الكلي.

في الرسم السابق تتبين العلاقة على هيئة خط مستقيم وهذا الرسم مثالي وفي التجربة تكون العلاقة على هيئة منحنى (الشكل رقم ٤–٢٢).



الشكل رقم (٤–٢٢). العلاقة بين الجهد الأسموزي للمحلول والزيادة أو النقص في وزن النسيج بعد وضعه في المحلول لتقدير جهده الأسموزي.

المصدر: (Salisbury and Ross, 1978).

يفضل نسب القيمة لكل نقطة كنسبة مئوية من القيمة الأولى لتظهر العلاقة على هيئة مستقيم لكي تزاد الدقة في التقدير، وتعد هذه المعاملة مناسبة عندما تكون العينات متساوية وأحجام المحاليل متساوية.

أ–١) الطرق المبنية على تغير خواص العينة.

من أقدم هذه الطرق طريقة الخلية (Cell method) حيث تغمر الخلية أو الخلايا في سائل البرافين ثم يعين حجمها عن طريق رسمها بآلة لوسيدا (Camera Lucida) بعدها تنقل العينة إلى المحلول وبعد فترة تعاد للبرافين وترسم ويقارن هذا الرسم مع الرسم الأصلي، وباستمرار العملية لكل المحاليل بالتدريج يمكن الوصول إلى حجم للخلية يساوي الحجم الأصلي وهنا يكون المحلول ذا جهد كلي يساوي الجهد الكلي للخلية. وغني عن التعريف ما تتطلبه هذه الطريقة من وقت وجهد علاوة على أن الطريقة كيفية مثلها في ذلك مثل بعض الطرق المحورة منها، هذا بالإضافة إلى بعض الأخطاء التي تجعلها غير دقيقة.

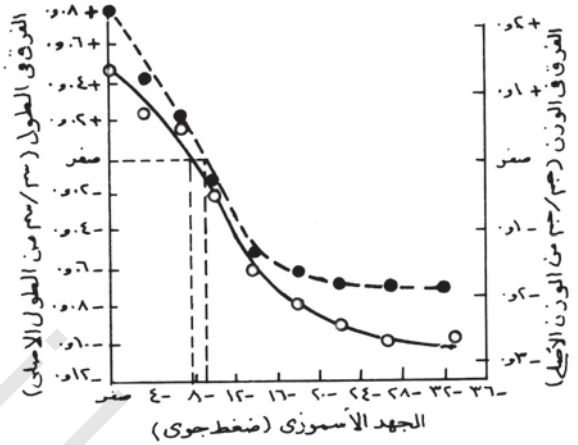
هناك طريقة أخرى وهي التغير في طول قطعة النسيج حيث تستعمل عادة أنسجة تخزينية مثل البطاطس بحيث يمكن الحصول منها على عينات متساوية في السمك والطول بواسطة الثاقب الفليني ومن ثم تغمر العينات في محاليل متدرجة في التركيز لتعيين المحلول المتعادل الذي لا يتغير طول النسيج فيه، ومن ثم الحصول على جهد الماء في خلايا النسيج.

والطريقة الثالثة الطريقة الوزنية وأول من استحدمها العالمان ماير ووالاس ١٩٤١ (Meyer and Wallace, 1941) حيث يعين المحلول المتعادل عن طريق عدم تغير وزن قطعة النسيج وفي هاتين الطريقتين يمكن رسم النتائج والاستدلال على

جهد الماء في الخلايا والطريقتان موضحتان في الرسم (الشكل رقم ٤-٢٣) ولكن يجب التحذير من اختلاف طريقة التجفيف في الوزن أو عدم دقة القياس في التغير في الطول. ومن نتائج مثل هذه التجارب ما أورده العالم ستكليف ١٩٦٨ (Sutcliffe, 1968) والموضحة في الشكل رقم (٤- ٢٤).

الشكل رقم (٤-٢٣). الطريقة الوزنية والطولية لقياس جهد الماء الكلي لنسيج متجانس.

هناك طريقة أخرى وهي طريقة مقدار الانحناء في قطع النسيج وهي محدودة الاستعمال على حلقات من نسيج البشرة أو اللحاء في المجموع الخضري لشجرة التفاح والكمثرى أو ما شابههما أو استعمال قطاعات طولية من ساق النبات ولكن هذه الطريقة غير شائعة.



الشكل رقم (٤–٢٤). تعيين جهد الماء لنسيج من البطاطس بطريقة الحجم (o—o) وطريقة الوزن (●—●) حيث نقطة التقاء المستقيم المتقطع الساقط على الإحداث الأفقي تمثل الجهد.

المصدر: (Sutcliffe, 1968).

في الطرق السابقة هناك مصادر كثيرة للأخطاء في تقدير الجهد الكلي لماء الخلية أو النسيج، ومنها على سبيل المثال لا الحصر، اختلاف المسافات البينية في الأنسجة ومقدار ما يتدفق إليها من المحاليل، والافتراض الأساسي أن المذاب لا يخترق الأغشية الخلوية وكذلك تأثير القطع في النسيج واختلاف العينات وما إلى ذلك من مصادر الأخطاء في التقدير.

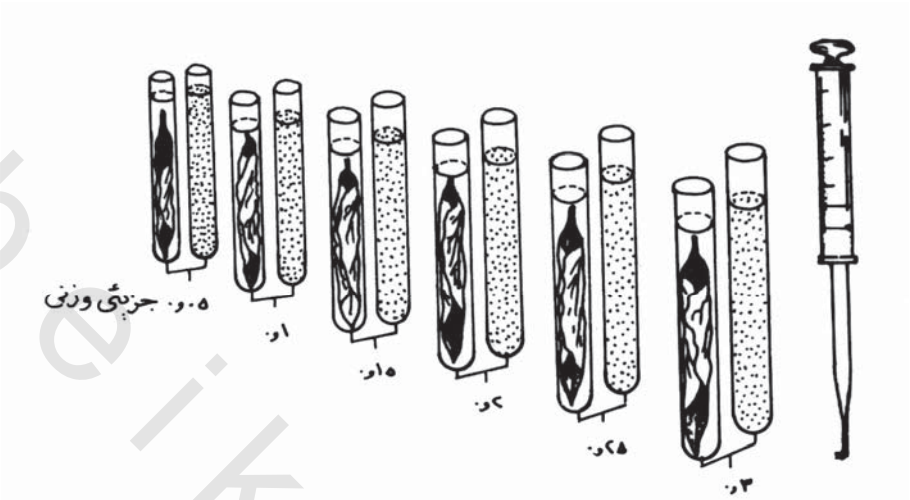
أ–٢) الطرق المبنية على تغير خواص المحلول

إن طريقة التغير في كثافة المحلول بعد وضع العينة فيه تعد من أكثر الطرق شيوعا وهذه الطريقة تنسب إلى العالم الروسي شارداكوف (Chardakov) وهي من البساطة بحيث إنها تصلح للاستعمال في الحقل

للحصول على قيم تقديرية. وفي هذه الطريقة تحضر محاليل متدرجة في التركيز ويقسم كل محلول إلى قسمين وتوضع في أنابيب اختبار حيث تكون مجموعتين ويوضع في كل أنبوب من مجموعة واحدة بقطرة من أزرق المثيلين لتلوينه ويوضع في المجموعة الأخرى العينات وبعد فترة من الزمن (٥-١٥ دقيقة) تستخرج العينات ثم تؤخذ قطرة من المحلول المقابل الملون بواسطة قطارة أو أنبوبة شعرية مسحوبة وتوضع في وسط السائل المقابل فإن طفت القطرة دل ذلك على أن المحلول أصبح ذا كثافة أكبر أي أن النسيج امتص جزءا من مائه وإن غطست القطرة إلى القاع دل ذلك على أن المحلول أصبح ذا كثافة أقل أي أن النسيج فقد جزءا من مائة وإن بقيت القطرة في مكانها منتشرة انتشارا متساويا دل ذلك على أن الكثافة لم تتغير وأن جهد الماء في النسيج يساوي جهد الماء في المحلول الذي بأنبوبة الاختبار. وبالمثل وكما ذكر سابقا فإن الحصول على محلول متعادل نادر (أي الوصول إلى تعلق القطرة وانتشارها وفي غالبية التجارب إما أن تطفوا القطرة وإما أن تغطس لذا يؤخذ متوسط المحلولين المتدرجين في التركيز واللذين في أحدهما تطفو القطرة وفي الآخر تغطس والشكل رقم (٤-٢٥) يبين هذه ا لطريقة.

وكما في الشكل يلاحظ أنه من الأفضل جعل طرف الأنبوبة الشعرية التي تستعمل كقطارة منحني بزاوية قدرها نحو ٩٠°م لكي لا يحدث تأثير أفقي لحركة القطرة عند خروجها إلى المحلول.

هناك طريقة أخرى تعتمد على التغير في معامل الانعكاس بدلا من الكثافة ولا تختلف في طريقة التحضير عن السابقة ويمكن الحصول على المحلول المتعادل مع النسيج عندما لا يتغير معامل انعكاسه. حيث يقاس معامل الانعكاس



الشكل رقم (٤–٢٥). بعض أدوات طريقة شارداكوف لتقدير الجهد الكلي للماء (في الورقة). تتمثل في مجموعة من أنابيب اختبار توضع بها العينات ومجموعة أخرى ملونة (المنقطة)، وعلى اليمين تحوير بسيط للقطارة التي يؤخذ بها قطرة من المحلول الملون وطرفه محني بزاوية ٩٠° لتسهيل التحكم في إدخال القطرة في الأنبوب المقابل في التركيز الأصلي والذي كانت به العينة.

للمحلول قبل وبعد وضع النسيج، وهذه طريقة كمية يمكن تفادي بعض الأخطاء الناتجة عن مقدار التغير في معامل الانعكاس في مختلف المحاليل بأخذ الفروق في التغير ونسبها إلى الوزن الجزيئي ومن ثم رسم العلاقة بينها وبين الجهد الأسموزي للمحاليل. والطريقة الثالثة هي أن تستخدم جذور حية بحيث يقاس معدل امتصاصها للماء ومن محاليل مختلفة التركيز ومن ثم مد المنحنى إلى نقطة الصفر من معدل الامتصاص وهي في هذه الحالة يفترض أن تمثل المحلول الذي جهده المائي يساوي الجهد المائي في النسيج.

للطرق السابقة (طرق الاتزان مع السوائل) بعض الأخطاء التي تحد من

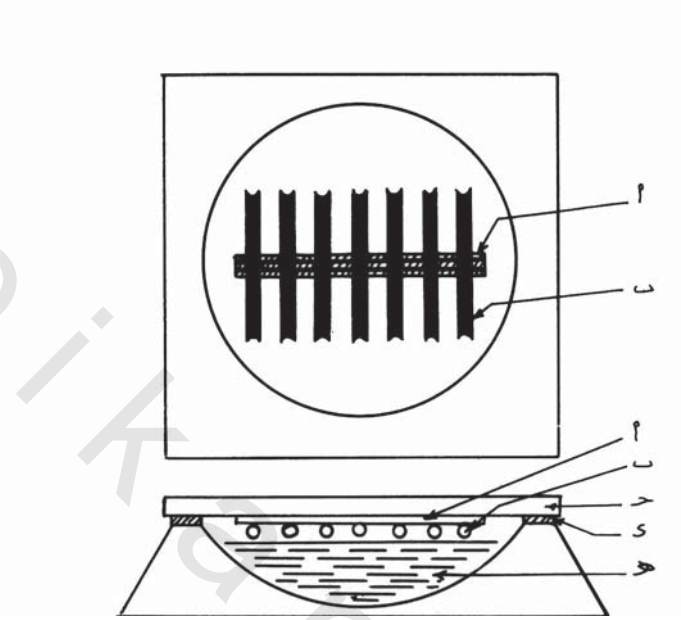
الاعتماد عليها كلية وهي كما سبق الافتراض بأن المذاب لا ينفذ إلى داخل الخلايا وتأثير القطع على النسيج ودخول المحلول إلى المسافات البينية في النسيج علاوة على ما لكل طريقة معينة من أخطاء أثناء العمل فمثلا طريقة التجفيف قبل الوزن في الطريقة الوزنية تختلف من شخص لآخر ومن تجربة لأخرى. وتجدر الإشارة إلى أن استعمال السكروز كمحلول في هذه الطرق قد ظهرت له بعض الدلائل من أنه يدخل إلى داخل النسيج ولذا يستعمل الآن المانيتول أو مادة أفضل منه مثل كاربوواكس (Carbowax).

ب) طرق الاتزان البخاري

يتطلب كثير من الطرق التي تعتمد على الاتزان البخاري معرفة دقيقة لبعض القياسات الكهربائية ولذا فقد بقيت هذه الطرق غريبة عن الكثير من علماء فسيولوجيا النبات رغم أن هذه الطرق قد عرفت في فروع أخرى كالطب وقياس الجهد الأسموزي في العقد الثالث من القرن العشرين الميلادي. وهنا قد يعزى سبب ذلك أيضا إلى عدم وجود مصطلحات قياسية كما سبق التنويه عنه. على أية حال يستحسن استعراض الطرق المختلفة بصورة موجزة ومن ثم إيضاح بعض الاحتياطات اللازم اتخاذها لتلافي حدوث أخطاء في القياس.

ب- ١) طرق التعادل البسيطة

من أبسط الطرق طريقة اقترحت في البداية لقياس الجهد الأسموزي للعصير الخلوي أو الجهد الكلي للماء في عينة التربة والشكل رقم (٤-٢٦) يوضح مكونات الطريقة حيث يلاحظ أنها تتكون من عدة أنابيب شعرية (قطرها نحو٠,٣ مم وبطول ٦ مم) ملتصقة على غطاء شريحة الذي يوضع



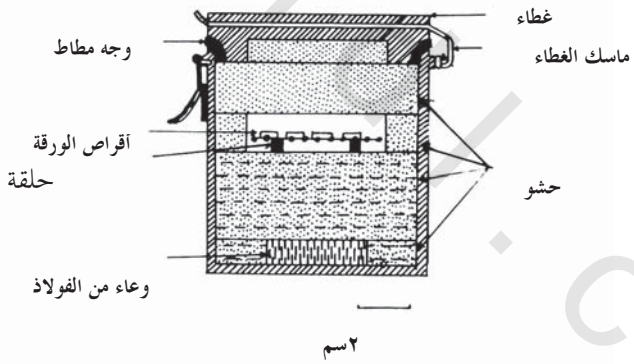
الشكل رقم (٤-٢٦). رسم تخطيطي لطريقة تعيين الجهد الكلي بالتغير في حجم المحلول حيث (أ) مادة لاصقة و (ب) أنبوبة شعرية بها المحلول المعروف جهده الأسموزي و (جـ) غطاء الشريحة الزجاجي و (د) مادة فازلين لإحكام الغطاء و (هـ) العينة أو في هذه الحالة العصير الخلوي أو محلول التربة وهو في تجويف صغير في الشريحة الزجاجية.

المصدر: (Crafts et. al., 1949).

بدوره فوق المحلول أو العينة كقطعة ورقة المراد قياس جهد مائه أو جهد مائها ويكون بينهما كما هو واضح من الشكل مسافة بحيث لا يحدث تلامس، وغالبا تستعمل شريحة مقعرة لوضع المحلول أو العينة. وباستعمال مادة الفازلين يحكم الغطاء حيث يمكن استعمال عدسة عينية لمراقبة تغير حجم المحلول بعد فترة من الزمن والمحلول الذي لا يتغير حجمه يعادل جهده الجهد الكلي للعينة. ولتفادي

تـأثير الـتغير في درجـة الحـرارة يفـضل وضـع الـشريحة ومـا بهـا في حمـام مـائي، ونظـرا لدقة الأدوات والزمن المطلوب فقد تمت قياسات قليلة بهذه الطريقة.

والطريقــة الثانيــة هــي طريقــة قيــاس الــتغير في وزن العينــة وهــي تحــوير بــسيط للطريقــة الوزنيــة في الطــور الــسائل وتتفــادى عمليــة التجفيــف وتــدفق المحلــول في المـسافات البينيـة في تلـك الطريقـة ولكـن هـذه الطريقـة تتطلـب تحكمـاً كـبيراً في تقلبـات درجـة الحـرارة لـذا فقـد اسـتعملت مجففـات صـغيرة كـان آخـر تطـوير لهـا مـا هـو موضـح في الــشــــكل رقــم (٤-٢٧). حيــث يتــبين الــشكل العــام لهــا، وهــذه المجففــــات توضـع في حمـام مـائي لا تزيـد تغـيرات درجـة حرارتـه عـن± ٠,٠٠١° م. ومـن عيـوب هـذه الطريقـة أنهـا تتطلـب وقتـا طـويلا قـد يـصل إلى ٤٨ سـاعة وهـذا في حـد ذاتـه قـد يـسبب زيـادة في الخطـأ نتيجـة لأيـض الخلايـا وتغـير ظروفهـا الطبيعيـة بعـد هـذه الفـترة الزمنية.



الشكل رقم (٤-٢٧). رسم تخطيطي لمقطع في غرفة الاتزان للطريقة الوزنية في الطور البخاري لتقــدير جهد الماء.

المصدر: (Barrs, 1968).

أمـا الطريقـة الأخـيرة في هـذه المجموعـة فهـي قيـاس الـتغير في وزن الـسائل وهــي طريقــة أيــضا تحتــاج إلى فــترة طويلــة للتعــادل وهــي كالطريقــة الــسابقة

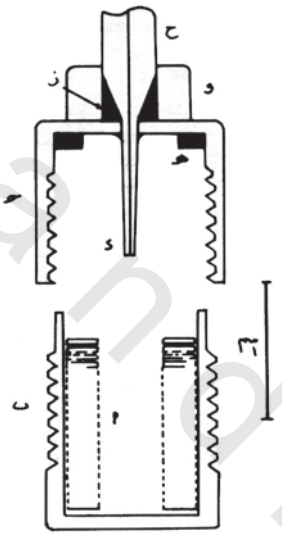
استخدم فيها عينات من أوراق النبات لقياس جهد مائها الكلي وتعتمد الطريقة على قياس معدل اختلاف وزن محاليل متدرجة في التركيز حيث توضع في أواني صغيرة ملتصقة بالعينة مع التغير في الرطوبة النسبية للنظام ومن ثم رسم العلاقة بينهما، من العلاقة يتبين المحلول الذي في حالة اتزان مع الورقة حيث يمثل جهده الجهد الكلي للماء في الورقة، وقد كانت هذه الطريقة بدائية في أول الأمر إلا أنها حظيت بشيء من التطوير حيث توضع العينة في حيز شفاف ومن ثم يقاس مقدار ثاني أكسيد الكربون اللازم إدخاله في ذلك الحيز وكذلك كمية بخار الماء التي يجب سحبها من ذلك الحيز للحصول على ضغط جوي ثابت داخل ذلك الحيز وهنا يجب أن تكون الإضاءة ثابتة.

ب-٢) قياس ضغط البخار أو الرطوبة النسبية في الطور البخاري

تستعمل في هذه الطرق حجيرات صغيرة محكمة الإغلاق لوضع العينة بها وبعد التعادل تقاس الرطوبة النسبية أو ضغط البخار.

والطريقة الأولى تستخدم فيها قطرة معلقة في حجيرة التعادل (الشكل رقم ٤-٢٨) والعينة عبارة عن حلقات من نسيج الورقة، وتعمل هذه الحلقات بأخذ أقراص من الورقة بالثاقب الفليني بنصف قطر يقارب ٠,٩٥ سم ومن ثم استخدام ثاقب فليني (٠,٥ سم) لإزالة جزء من النسيج في مركز القرص، وتوضع هذه الحلقات في الحجيرة وتغطى بإحكام ومن ثم توضع في حمام مائي درجة حرارته ثابتة، وبعد ساعتين تقريبا تستخدم الماصة في دفع قطرة الماء التي بداخل الماصة المدرجة إلى داخل الحجيرة بحيث تبقى معلقة عند الطرف ولمدة خمس دقائق ومن ثم تسحب إلى داخل الماصة ويسجل ارتفاع الماء داخل الماصة ثم تدفع مرة أخرى لكي تبقى معلقة لمدة عشر دقائق ويعاد

سحبها ويسجل الحجم ثانية وبتكرار العملية مع الزمن يحسب مقدار ما يتبخر منها في زمن قدره عشر دقائق ويحسب معدل التبخر ويقارن بمعدل تبخر مثل هذه القطرة تحت الظروف نفسها مع محلول معروف جهده الكلي ويستعاض عن العينة بحلقات من أوراق الترشيح مبللة بمحاليل مختلفة من كلوريد الصوديوم (انظر الملحق رقم ٣ الجدول رقم ١).



الشكل رقم (٤-٢٨). رسم تخطيطي لمقطع في حجيرة قياس جهد ماء الورقة، حيث (أ) موقع أعناق الورقة و (ب) قاعدة الحجيرة و (جـ) غطاء الحجيرة و (د) طرف الماصة و (هـ) حلقة مطاطية و (ز) مادة إبوكسي و ح) الماصة.

المصدر: (Macklon and Weatherley, 1965).

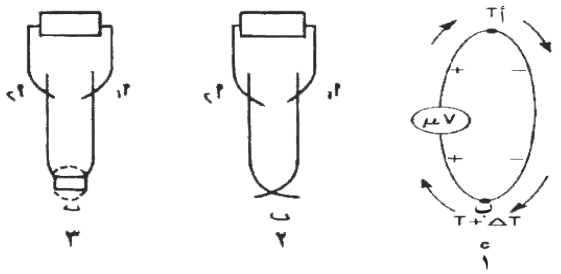
أما الطريقة الثانية فيستخدم فيها سيكروميتر لقياس الضغط البخاري النسبي للهواء المحيط بالعينة بعد الاتزان نظرا للعلاقة الموجودة بين الضغط

البخاري النسبي والجهد الكلي للماء كما ذكر في معادلة سابقة وهي :

$$\Psi_w = \frac{RTln\ e/e^\circ}{V}$$

وهناك نوعان من السيكروميترات المستخدمة في هذا المجال أحدهما يستخدم المزدوجات الحرارية (Thermocouples) والآخر يستخدم ثرمستور (Thermoster). ولو أن النوع الأول هو الأكثر شيوعاً.

إن طريقة القياس باستعمال المزدوجات الحرارية بدأ باستعمالها من قبل علماء الطب الإحيائي في العقد الثالث من القرن العشرين الميلادي وتستغل ظاهرة سيبك (Seebeck effect) وهي أنه عند توصيل طرفي سلكين معدنيين مختلفين ووضعهما في حيز ذي درجة حرارة معينة ومن ثم ربط الطرفين الآخرين ووضعهما في حيز مختلف في درجة الحرارة فإن تيارا كهربائيا يسري في الأسلاك (الشكل رقم ٤-٢٩-١) لكي يعادل الفرق في درجة الحرارة. من ناحية أخرى فإنه عند تثبيت درجة حرارة الوصلتين وتمرير تيار كهربائي فإن إحدى الوصلتين تبرد والأخرى تسخن واتجاه التيار يحدد ذلك وهذه هي ظاهرة بلتيه المذكورة سابقا في موضوع قياس جهد ماء التربة. من المزدوجات الحرارية والمستخدمة في قياسات جهد الماء مزدوج سبانر الحراري وأساسه موضح في الشكل رقم (٤-٢٩-٢) والمزدوج الحراري الذي طوره العالمان ريتشاردز و أوقاتا ١٩٥٨ (Richards and Ogata, 1958) وأساسه موضح في الشكل رقم (٤-٢٩-٣) حيث يختلف في إضافة بسيطة وهي حلقة من معدن الفضة ، أما الأسلاك فأحدها سبيكة



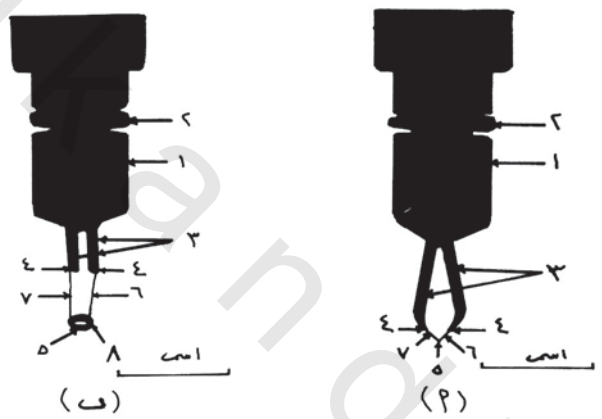
الشكل رقم (٤-٢٩). ظاهرة الازدواج الحراري. ١- ظاهرة سيبك حيث يسري التيار نتيجة لفرق درجة الحرارة بين الوصلتين أ و ب. دائرة سيكروميتر سبانر. ٣-دائرة سيكروميتر ريتشاردز وأوقاتا.

المصدر: (Richards, 1965a) **بتصرف**.

(Constantan) والآخر سبيكة من (Chromel-p) بينما استخدم سبانر لمزدوجه الحراري معدن البزموث والسلك الآخر سبيكة معدن البزموث مع ٥٪ قصدير. وقد حدثت عدة تعديلات وبحوث لزيادة كفاءة القراءات بمثل هذه المزدوجات الحرارية. تتم القراءة في النوع الأول (مزدوج سبانر الحراري) بتمرير تيار كهربائي لتبريد الوصلة داخل الحجيرة التي بها العينة فيتكاثف جزء من بخار الماء على الوصلة، وبعد قطع التيار فإن الماء المتكاثف على الوصلة يبدأ في التبخر ثانية، عندها يقاس التيار الناتج عن تبريد الوصلة أيضا، ويتم القياس بواسطة جلفانوميتر. أما النوع الثاني من المزدوجات الحرارية (ريتشاردز وأوقاتا) فإن القياس يتم بوضع قطرة ماء على حلقة معدن الفضة وعندما تثبت عملية التبخر منها تؤخذ القراءة (ثبات مؤشر الجلفانوميتر يدل على ثبات عملية التبخر). وفي كلا النوعين تعاير القراءات بواسطة محاليل متدرجة في التركيز وأحيانا تستعمل قطع من أوراق الترشيح وتبلل بتلك المحاليل والتي ضغطها البخاري معروف.

إن هذا النوع من القياسات يستخدم لقياس جهد الماء في الأوراق

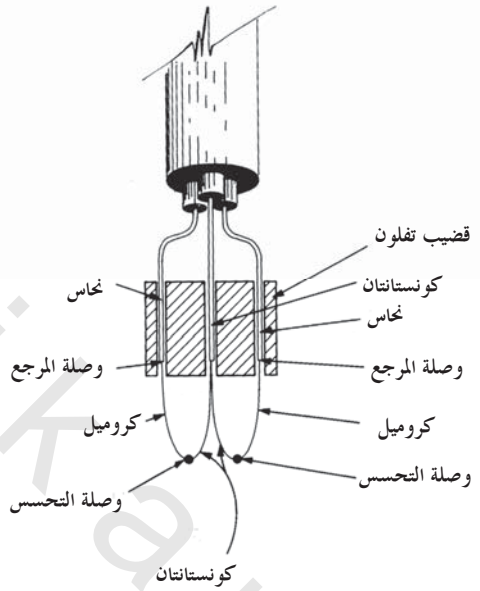
وعينات محلول التربة مع أن هناك محاولات لاستعمال مثل هذه الأجهزة في الحقل. ومن الأمور التي يجب مراعاتها كما ذكر سابقا هي التحكم في تغيرات درجات الحرارة. والشكل رقم (٤-٣٠) صورة ظلِّية لأهم أجزاء تلك المزدوجات الحرارية. أما الشكل رقم (٤-٣١) فيوضح تفاصيل سيكروميتر المزدوج الحراري ثنائي الوصلة المعادِلة للحرارة.



الشكل رقم (٤-٣٠). صورة ظلِّية لكل من سيكروميترات (أ) سبانر و (ب) رتشاردز وأوقاتا، والأرقام تدل على ١- قاعدة من نحاس أصفر و ٢- حلقة مطاطية و ٣-عمود مزدوج و ٤-مكان توصيل أسلاك المزدوج و ٥-ملتقى السلكين (العقدة) و ٦- سلك سبيكة كرومل ب (قطرها نحو ٠,٠٢٥٤مم) و٧- سلك سبيكة الكونستانتان القطر في ٦ نفسه) و ٨- حلقة الفضة.

المصدر: (Barrs, 1965a).

obeikandl.com



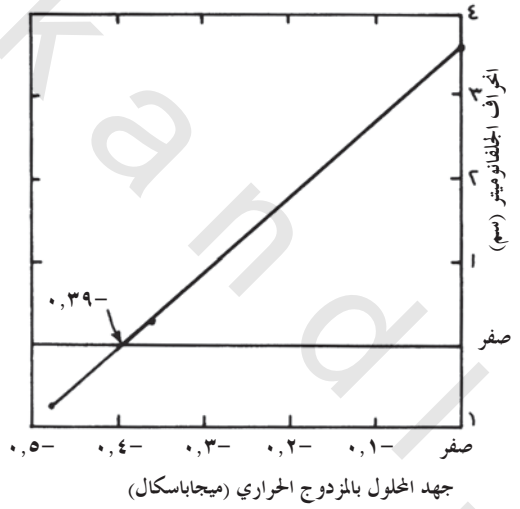
الشكل رقم (٤–٣١) رسم تخطيطي لتفاصيل سيكروميتر المزدوج الحراري ثنائي الوصلة المعادِلة للحرارة.
المصدر: (Brown and Van Haveren, 1972).

على أية حال نتيجة لتحسين تصميم مثل هذه السيكروميترات وتقدم الأجهزة الإلكترونية المساعدة في أداء هذه السيكروميترات جعلت الاستعمال لا يقتصر على المعمل كما تدل على ذلك البحوث التي قدمت في المؤتمر الذي عقد عن السيكروميترات في ربيع ١٩٧١ [راجع براون وفان هيفرين ١٩٧٢م (Brown and van Haveren, 1972)].

ومن التعديلات التي تستحق الذكر هي إمكانية قياس الجهد الكلي لماء العينة تقريبا من الماء النقي إلى الماء المتبقي بعد التجفيف في الفرن عند درجة حرارة ١٠٠°م في بذور القمح وذلك بتحوير في طريقة قراءة الهيجروميتر

التجاري (يتبع طريقة مزدوج سبانر الحراري) بحيث تتم القراءة في خطوتين على التوالي كما ذكرها العالم ويب ١٩٨١م (Wiebe, 1981).

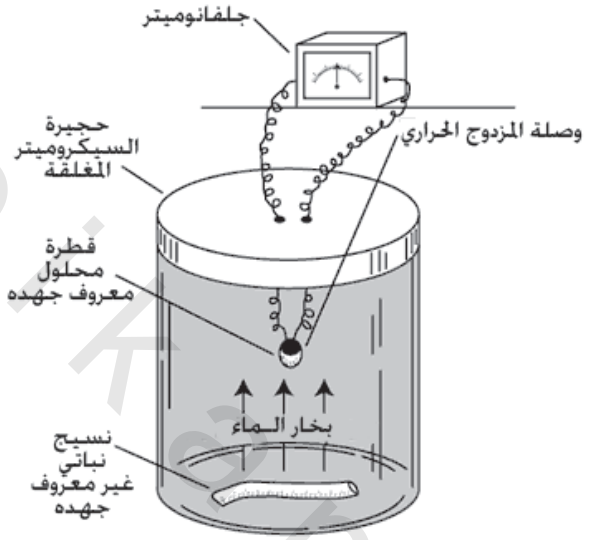
بالنسبة لمعايرة هذه الأجهزة للحصول على منحنى قياس يفضل استخدام ثلاثة محاليل في الأقل بحيث تكون إحدى القراءات قريبة من نقطة تقاطع المنحنى مع الأحداث الأفقي كما في الشكل رقم (٤-٣٢) ولو أن البعض استخدم محلولين فقط.



الشكل رقم (٤-٣٢). العلاقة بين جهد المحلول قياسا بالمزدوج الحراري وانحراف الجلفانوميتر (الانحراف =١سم/٠,١ ميجاباسكال لمحلول عادي ذي جهد أسموزي يساوي -٠,٣٩ ميجاباسكال). المصدر (Boyer and Knipling, 1965).

من تقنيات السيكروميترات طريقة سيكروميترية لتحديد نقطة التعادل isopiestic point الموضح تخطيطا لها في الشكل رقم (٤-٣٣) وتصلح لقياس

الجهد الكلي للنسيج، وطريقة المعايرة والنواحي النظرية كما أوردها بوير ونبلينج ١٩٦٥ (Boyer and Knipling 1965).



الشكل رقم (٤-٣٣) . رسم تخطيطي لاستخدام الطريقة السيكرومترية لتحديد نقطة التعادل لقياس جهد الماء الكلي للنسيج.

المصدر: بتصرف مقتبسة من (Taiz and Zeige. 2006).

أما النوع الثاني من السيكروميترات فهو ما يعرف باسم الثرمستور (Thermistor) وهو محاولة لتفادي أحد العوائق الرئيسية في استعمال المزدوجات الحرارية وهي ضآلة التيار الكهربائي وتطلب أجهزة دقيقة لقياس ذلك (يجب أن تكون حساسية الجهاز المستخدم في القياس لدرجة قياس جهد كهربائي في حدود ٠,٠١ ميكروفلت). والقاعدة الأساسية التي يعمل بها الثرمستور هي ما هو معروف من أن كثيراً من المعادن لها معامل حراري موجب بينما القليل ذو قيمة تقارب الصفر ومن ناحية أخرى فإن بعض

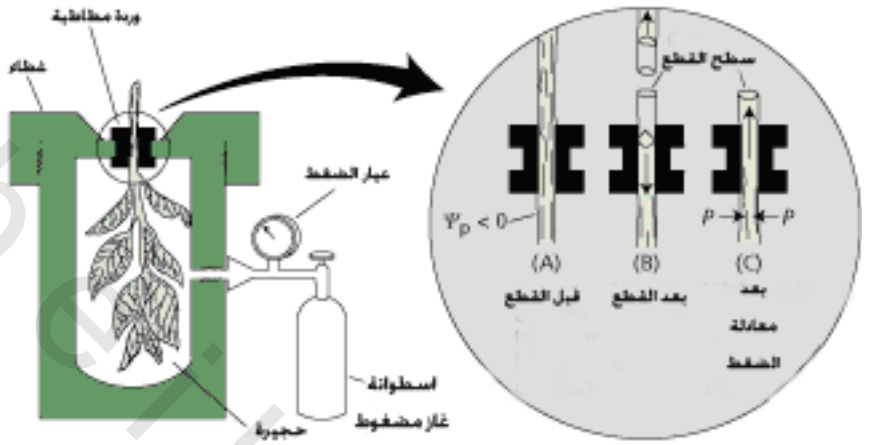
الأنواع من المواد شبه الموصلة ذات معامل حراري سالب مما يجعل للظاهرة الأخيرة تطبيقات كثيرة في قياس درجات الحرارة وبدقة فائقة تصل إلى ٠,٠٠٢°م. وقد اشتق اسم الثرمستور من الدلالة على مقاومات التغير الحراري (Thermo-variable resister) وأعلى درجة حرارة يمكن قياسها بهذا النوع هي ٣٠٠°م، أما من حيث التركيب فالبعض من هذه السيكروميترات عبارة عن سبيكة من أكاسيد عناصر النيكل والمنجنيز والكوبالت بحيث تشكل كأقراص أو شرائح أو كريات صغيرة تربط بموصل جيد حسب الحاجة. في إحدى التجارب بمثل هذا النوع قام العالم كريب ١٩٦٥م (Kreeb, 1965) وفي محاولة للتغلب على الصعوبة في تسجيل قراءات المزدوجات الحرارية، باستعمال دائرة كهربائية على هيئة قنطرة أحد ذراعيها عبارة عن طرف ثرمستور في الهواء الجاف يقيس درجة حرارة الحجيرة وبعد القراءة يمكن إنزال غلاف نحاسي بحيث يحيط بطرف الثرمستور ويمنع التبخر من الحيز المحيط بالطرف بواسطة هذا الغلاف لذا فالقراءة تمثل قراءة درجة الحرارة الرطبة في الحجيرة، والفرق بين القراءتين يدل على الرطوبة المطلوبة في المعادلة وقد استعمل جهاز تسجيل ورقي لتسجيل إشارة عدم الاتزان المعروفة في القنطرة بعد تكبيرها. أما العالم ريتشاردز ١٩٦٥ م (Richards, 1965a) فقد قام بقياس الجهد الكلي لمحلول التربة بطريقة مشابهة نوعا ما ولكن بتحوير بسيط، هو استعمال اثنين من الثرمستورات أحدهما طرفه جاف والآخر طرفه مبلل في ذراعي قنطرة هويتستون (Wheatstone bridge) وقد كانت تدل على انحراف بسيط ولكنه ثابت مع الزمن نتيجة لتغير حجم الطرف الرطب، لذا فمنحنى المعايرة يمد إلى نقطة الصفر.

بعد هذا الشرح المختصر لبعض طرق قياس الجهد الكلي للماء بطرق الاتزان البخاري يتضح أن هذه الطرق ما هي إلا محاولة لتفادي بعض الأخطاء الموجودة في طرق الاتزان مع السوائل مثل ملامسة المحلول للعينة ودخول ذلك المحلول إلى المسافات البينية وغير ذلك كما ذكر سابقا، وهي أيضا محاولة للحصول على قيم أدق ومع ذلك فيجب الإدراك أن هذه الطرق في القياس (طرق الاتزان البخاري) لا تخلو من الأخطاء التي قد تكون كبيرة، ومن أهم هذه الأخطاء تلك المتصلة بوجود ممالات مستمرة (Persistent gradient) في درجات الحرارة والضغط في حالة الاتزان بين العينة والبخار المحيط بها في حجيرة الاتزان، وكذلك احتمال الخطأ في طرق الاتزان مع السوائل لا يزال هنا قائما فمثلا عند فصل العينة من النبات فإن ما تتعرض له هذه العينة من اتزان مع الشد السالب في الخشب قبل الفصل يختل وبالتالي قد يؤثر هذا الاختلال في الجهد الكلي (للورقة مثلا). هذا بالإضافة إلى أن هذه الطرق في بعض الحالات تتطلب فترة زمنية طويلة للاتزان (بعكس المتوقع) وقد يكون سبب ذلك تلوث الأنسجة إما من الأملاح والأتربة المتراكمة على تلك العينة وإما من تلوث الحجيرة نفسها. في بعض العينات هناك مصدر للخطأ آخر وهو أن العينة نفسها تستمر في النمو أثناء التجربة (مثل ورقة نبات الخروع) مما ينتج عنه انخفاض في أحد مكونات الجهد وهو جهد الضغط. أما المدى الذي قد تصل إليه مثل هذه المصادر في الخطأ فإن الحرارة الناجمة عن تنفس طبقة واحدة من قطعة من ورقة نبات قد تسبب خطأ في القراءة للجهد قد تصل إلى أكثر من ١٥٪.

جـ) طرق الاتزان مع الضغط

في العقد السادس من القرن العشرين الميلادي بدأ استعمال أجهزة الضغط لقياس الجهد الكلي للنسيج حيث تبدو طريقة القياس أكثر دقة من طرق الاتزان مع السائل سابقة الذكر، ويعود ذلك الاستعمال إلى ابتكار العالم شولاندر وزملائه ١٩٦٥م (Scholander, *et al*., 1965) لشكل جديد من أجهزة الضغط التي حاول العالم ديكسون في بداية ذلك القرن استعمالها للغرض نفسه ولكن بعض المصاعب التقنية حالت دون إتمام الهدف وقد أطلق ديكسون على جهازه اسم (خزانة الضغط الهوائي Air pressure chamber) أما شولاندر وزملاؤه فقد أطلقوا عليه اسم (وعاء الضغط Pressure bomb). لمزيد من المعلومات التاريخية عن هذا الموضوع يراجع تايري وهامل ١٩٧٢م (Tyree and Hammel, 1972). ويوضح الشكل رقم (٤-٣٤) يوضح مقطعا في ذلك الوعاء وبعض الوصلات الضرورية.

ويستعمل وعاء الضغط لقياس عدد من العلاقات المائية كما سيرد لاحقا، ولقياس الجهد الكلي في أوعية الخشب يؤخذ فرع ورقي مناسب ويزال جزء من القلف واللحاء عند الطرف ثم يوضع في الوعاء بحيث يبرز جزء صغير من الساق للخارج بعدها يرفع الضغط داخل الوعاء عن طريق فتح مفتاح غاز النيتروجين ويراقب المقطع بواسطة عدسة عينية حتى يعود السائل الموجود في الخشب إلى سطح المقطع، عندها تسجل قراءة عداد الضغط وهي تساوي قيمة الجهد الكلي تقريبا لهذا الفرع قبل قطعه والإشارة سالبة.

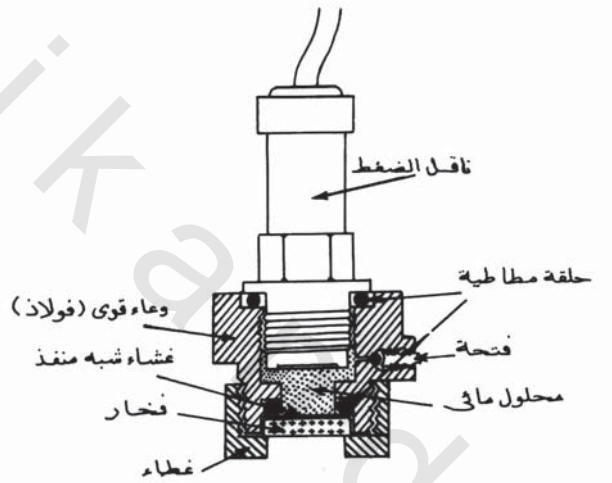


الشكل رقم (٤-٣٤). رسم تخطيطي لإيضاح مكونات وعاء الضغط ووصلاته الأساسية مثل خزان النيتروجين ومقياس الضغط، والرسم إلى اليسار يمثل قطاعا طوليا في الوعاء الذي لا يقل سمكه عن ٧مم وعادة يستخدم الفولاذ رقم ٣٠٣ والغطاء من رقم ٣٢١ وكلها غير قابلة للصدأ. يوضح الرسم على اليمين تمثيلا لعمود الماء داخل الخشب قبل قطع العية (A) ومستوى العمود بعد القطع (B) ومستوى عمود الماء بعد ضغطه بالغاز ليصل إلى مستوى القطع حيث قيمة الضغط تؤخذ لتمثل جهد الماء قبل القطع والإشارة سالبة.

المصدر: مقتبس من (Taiz and Zeige. 2006).

هناك طريقة استخدمها العالمان بيك ورابيج ١٩٦٦م (Peck and Rabbidge, 1966) لقياس الجهد الكلي لمحلول التربة أو جهد المادة بواسطة جهاز يعمل كعمل الأسموميتر. يوضح الشكل رقم (٤-٣٥) مقطعاً في ذلك الجهاز حيث المحلول المستخدم كسائل يتزن مع العينة المراد قياس جهدها الكلي والسائل عبارة عن مادة (كربوواكس رقم ٢٠٠٠٠) وهي مادة جهدها الأسموزي أقل من جهد العينة. عند بدء القياس يكون جهد ضغط السائل يساوي الصفر ثم بعد وضع العينة يبدأ الضغط في الارتفاع حيث ينتقل الماء

مـن العينـة إلى الـسائل حتـى يحـدث الاتـزان لأن حيـز الـسائل محـدود. ينقـل جهـد الـضغط النـاتج ناقـل الـضغط (Pressure transducer) لتـسجيله وبإضـافة قيمـة الجهـد الأسمـوزي للـسائل (كربـوواكس) ينـتج الجهـد الكلـي للعينـة. هـذه الطريقـة يمكن استخدامها لقياس الجهد الكلي في عينات نباتية.



الشكل رقم (٤-٣٥). رسم تخطيطي يوضح أجزاء جهاز ناقل الضغط المستخدم لتقدير جهد الماء الكلي.
المصدر: (Peck and Rabbidge, 1966).

هنـاك بعـض الاحتياطـات الواجـب اتخاذهـا عنـد اسـتعمال وعـاء الـضغط وهـي المحافظـة علـى الفـرع لكـي لا يفقـد جـزء مـن محتـواه المـائي بـين القطـع وأخـذ القـراءة وكـذلك عـدم غلـق الثغـور في الأوراق نظـرا لأن الـضغط النـاتج داخـل الوعـاء قـد يـسحق خلايـا الورقـة (الأوراق) ويمكـن تثقيـب الورقـة أحيانـاً إذا تطلبـت ظـروف التجربـة ذلـك للـسماح للغـاز بالـدخول بـين نـسيج الورقـة. أمـا الطريقة الثانية فليس هناك ما يدل على استخدامها لعينات نباتية.

obeikandl.com

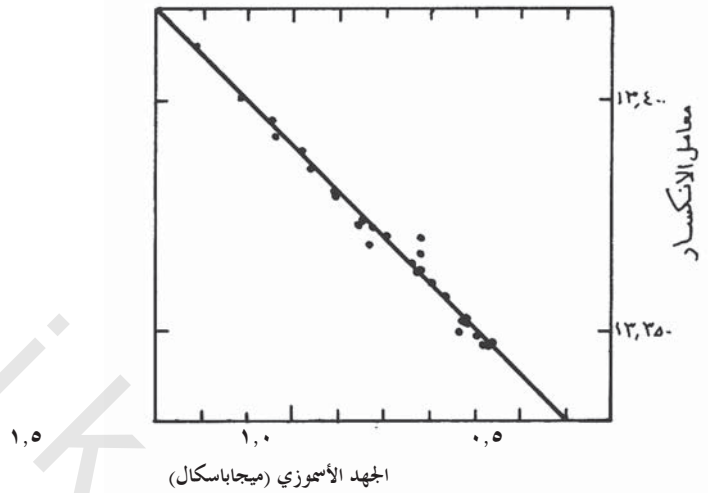
٢- طرق قياس الجهد الأسموزي

معظم الطرق المستخدمة لقياس الجهد الأسموزي طرق غير مباشرة حيث تقيس الجهد الأسموزي للعصير الخلوي بعد استخلاصه من النبات أو تقيس الجهد الأسموزي التقريبي تحت ظروف مختلفة لقطع من النسيج أو أجزاء من النبات كما يلي:

أ) طرق قياس الجهد الأسموزي للعصير الخلوي

من أبسط الطرق وأسرعها ولكن ليس أدقها طريقة قياس معامل الانكسار (Refractive index) حيث يستخلص العصير الخلوي ويكفي منه كمية بسيطة (حوالي٠,٠٢ مل) توضع على مؤشر جهاز معامل الانكسار ومن ثم تسجيل القراءة التي يمكن تحويلها إلى جهد أسموزي عن طريق مراجعة بعض الجداول التي تبين علاقة معامل الانكسار مع الجهد الأسموزي عند درجة ٢٠°م. وهذه الطريقة في الغالب تعطي قيما أقل للجهد الأسموزي لذا يلجأ أحيانا إلى وضع منحنيات للعلاقة بين الجهد الأسموزي لنبات ما ومعامل الانكسار حيث يقاس الجهد الأسموزي أولا بطريقة الانخفاض في درجة تجمد المحلول (كما سيرد)، ويبين الشكل رقم (٤-٣٦) تلك العلاقة، وللعلماء الروس في العقد السادس من القرن العشرين الميلادي تجارب كثيرة على هذه الطريقة وتمحيصها ووضع طرق محددة لجمع العينات لكي تكون طريقة حقلية لقياس الجهد الأسموزي ولكن القيم التقريبية (أي الدقة) التي تنتج في هذه الطريقة لا تستحق الجهد المبذول لإتمامها.

أما الطريقة التي شاعت ولا زالت وتعد من أكثر الطرق استعمالاً فهي طريقة قياس نقطة التجمد للمحلول (العصير الخلوي) والتي تعرف غالباً



الشكل رقم (٤–٣٦). العلاقة بين معامل الانكسار والجهد الأسموزي لعصير نبات *Nicotiana sandersae*)

المصدر: (Slavik, 1963).

بالطريقة الكريوسكوبية (Cryoscopic method) ولا يخلو، تقريباً، أي كتاب عام في الفسيولوجيا من وصفها. وقد يرجع سبب استعمالها لأنها تبدو سهلة ودقيقة النتائج لحد ما وخاصة عندما تعدل قيم الجهد الأسموزي إلى درجة حرارة النبات المأخوذة منه العينة. وهذه الطريقة تعتمد على القاعدة المعروفة من أن المواد الذائبة تخفض قيمة الضغط البخاري للمذيب، لذا فوجود مادة ذائبة في الماء تخفض من ضغط بخار الماء مما يتسبب في عدم تكوين الثلج عند درجة تجمد الماء وهذا في حد ذاته اتزان في الضغط البخاري بين الماء السائل والصلب عند نقطة تجمد المحلول ككل. إن انخفاض الضغط البخاري يتناسب مع الكسر الجزيئي للمذاب حسب قانون راؤولت، ومن ناحية أخرى

فإن علاقة الضغط البخاري مع درجة الحرارة للمادة المذابة توازي التغير في الضغط البخاري مع درجة الحرارة للماء النقي. من الناحية النظرية فالجهد الأسموزي لواحد جزيئي وزني من محلول غير متأين عند درجة الصفر تساوي -٢,٢٧ ميجاباسكال ودرجة تجمده تساوي -١,٨٦°م كما ذكر سابقاً، لذا فالجهد الأسموزي لمحلول مخفف يمكن تقديره من درجة تجمده كالتالي:

$$\frac{\Psi_s}{\Delta f} = \frac{-2.27}{-1.8}$$

أي أن:

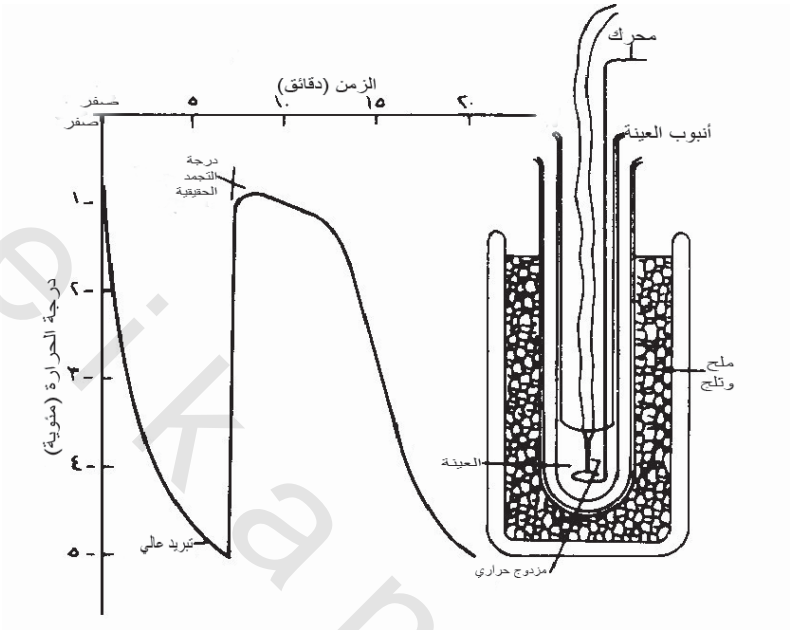
$$\Psi_s = 1.22\ \Delta f\ \text{(MPas)}$$

حيث: (Δf) هي درجة تجمد المحلول (أي مقدار الانخفاض عن الصفر المئوي).

والطريقة التقليدية هي استخدام ثرموميتر حساس (ثرموميتر بكمان) حيث يوضع طرفه في العينة (العصير الخلوي) وقد جرت عدة تحسينات على هذه الطريقة لزيادة كفاءتها كاستعمال الثرمستور بدلا من الثرموميتر أو استبدال الأخير بمزدوج حراري كما في الشكل رقم (٤-٣٧).

ويلاحظ من الشكل أن الوعاء ما هو إلا للعزل الحراري عن الوسط. أما الرسم البياني بجانب الشكل فهو تسجيل لقراءة المزدوج الحراري التي تقارن بقراءة المذيب (في هذه الحالة الماء النقي). للحصول على الفرق (Δf) للتعويض في المعادلة. ومهما يكن من استعمال أو تقنية في هذه الطريقة فهناك أجهزة تصنع تجاريا ليس هذا مجال ذكرها أو المفاضلة بينها بل هناك كتيبات تهتم بتجميعها مثل ويب وآخرين ١٩٧١م (Wiebe *et. al*., 1971).

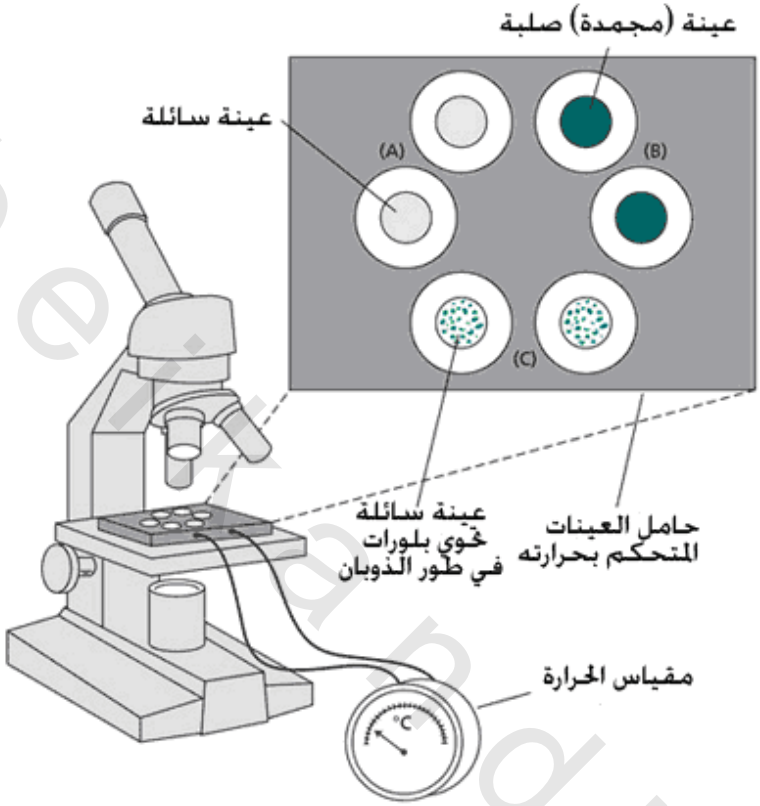
obeikandl.com



الشكل رقم (٤-٣٧). رسم تخطيطي يوضح طريقة تقدير الانخفاض في درجة تجمد السائل.

المصدر : (Salisbury and Ross, 1978).

من التطوير لهذه الطريقة لقياس انخفاض درجة التجمد استخدام ما يعرف بأسموميتر الانخفاض في درجة التجمد cryoscopic osmometer الموضح في الشكل رقم ٤- ٣٦ب) حيث يقاس الانخفاض لحجم صغير لعصير خلية واحدة (١٠$^{-٩}$ لتر) (Malone and Tomos, 1992). كما هو موضح في والشكل رقم (٤-٣٨) يوضح تخطيطا لمكونات الأسموميتر.



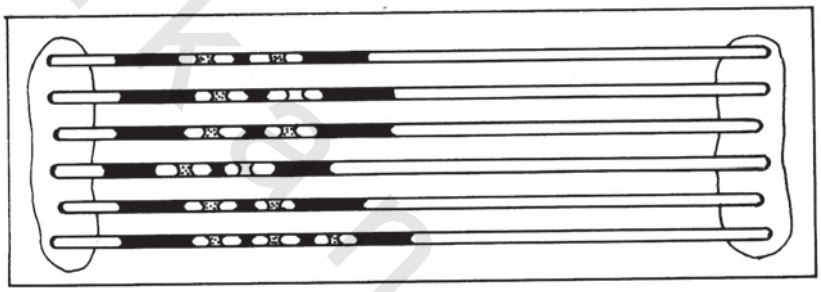
الشكل رقم (٤-٣٨). أسموميتر الإنخفاض في درجة التجمد (A) عينات سائبة صغيرة الحجم توضع في موقعها على منصة المجهر، (B) بخفض الحرارة تبدأ العينات في الوصول إلى درجات تجمد عالية ثم تتجمد، (C) تسخين المنصة التدريجي يسبب ذوبان العينات. ودرجة الحرارة التي تذوب عندها آخر بلورة تعد قياس لدرجة ذوبان العينات.

المصدر: مقتبسة من (Taiz and Zeige. 2006).

هناك طرق أخرى لقياس الجهد الأسموزي للعصير الخلوي سبقت الإشارة لها عند ذكر طرق قياس الجهد الكلي عن طريق الاتزان مع الطور البخاري، وتجدر الإشارة أن الأساس النظري واحد مثل طريقة ضغط

البخـار، والأفـضل في هـذه الطريقـة أن يقـاس الجهـد الكلـي للعينـة النباتيـة ثـم تجمـد عنـد درجـة- ٣٠°م أو تغمـس مباشـرة في النـيتروجين الـسائل ثـم تعـاد لحجـيرة الـضغط وبعـد انـصهار العينـة فـإن جهـد الـضغط يـساوي الـصفر لـذا فالقياس يمثل الجهد الأسموزي بعد الاتزان مع الضغط البخاري في الحجيرة.

مـن الطـرق المـستخدمة سـابقاً طريقـة أسمـوميتر بـارجر- هالكـت (Barger-Halket osmometer) الموضحة في الرسم التخطيطي أدناه الشكل رقم (٤-٣٩).

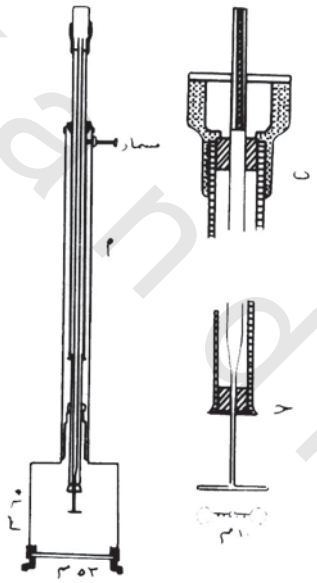


الشكل رقم (٤-٣٩). طريقة بارجر-هالكت في تقدير الجهد الأسموزي للعصير الخلـوي. يلاحـظ أن الأنابيب تحوي محاليل سكروز (لون أسود) بينما العصير الخلوي يمثله الأجـزاء المنقطة وبينهما الفقاعات الهوائية (بيضاء). كل أنبوبة بها تركيز من الـسكروز واحد.

المصدر: (Levitt, 1964).

وكمـا قـد يـستدل مـن الـشكل فـإن هـذه الطريقـة تعتمـد علـى إيجـاد المحلـول المتعـادل مـع العـصير الخلـوي حيـث يقـاس طـول قطـرة العـصير الخلـوي الموجـودة في الأنبوبـة الـشعرية فـإن ازداد طولهـا دل ذلـك علـى امتـصاص كميـة مـن بخـار المـاء الموجـود في الفقاعـة الهوائيـة والـتي تتـزن مـع الـسائل بجانبهـا، وإن قـصر طـول

القطـرة دل ذلـك علـى فقـدها المـاء أمـا القطـرة الـتي لا يـتغير طولهـا فـإن جهـدها الأسمـوزي يعـد مـساويا للجهـد الأسمـوزي للمحلـول المفـصول عنهـا بالفقاعـة. ويتطلـب عـادة نحـو ٢٤ سـاعة لحـصول الاتـزان ويقـاس الـتغير في طـول القطـرة بواسـطة مجهـر وميكـروميتر حيـث الأنابيـب مثبتـة علـى شـريحة زجاجيـة. وللتقليـل مـن تـأثير تقلبـات درجـة الحـرارة أثنـاء فـترة الاتـزان يستحـسن وضـع الـشريحة في طبـق بـتري أو حمـام مـائي ثابـت درجـة الحـرارة. وهـذه الطريقـة تـصلح لقيـاس الجهد الكلي أيضاً.



الشكل رقم (٤–٤٠). أسموميتر فان أندل. أ–مقطع في الأسموميتر يبين الغرفة الرطبة بأبعادهـا والغطـاء السفلي حيث تدل إليها العينة والمسمار المثبت لرفع وتخفيض المزدوج الحراري في الغرفة. ب–مقطع مكبر من قمة الأسموميتر. جـ– مقطع مكبر في منطقـة المزدوج الحراري والخط المتقطع يمثل سلك الكونـستانتين والمتـصل سـلك المنجنيز.

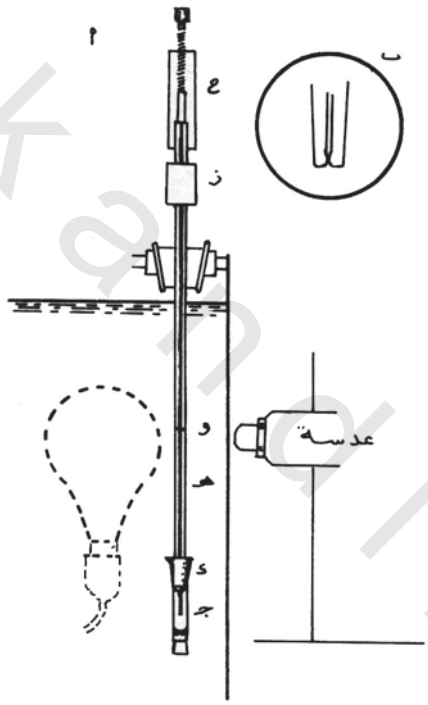
المصدر: (Van Andel, 1952).

obeikandl.com

يعد أسموميتر فان اندل (Van Andel osmometer) أول نوع من السيكروميترات الرطبة التفاضلية لقياس الجهد الأسموزي للعصير الخلوي حيث يتكون وكما في الشكل رقم (٤-٤٠) من مزدوج حراري ذي عقدتين في حجيرة رطبة مبطنة بطبقة من ورق الترشيح المبلل بمحلول معروف جهده الأسموزي وتوضع قطرة من المحلول المراد قياس جهده الأسموزي على إحدى العقد بينما توضع على العقدة الأخرى نقطة من المحلول المعروف جهده الأسموزي والذي بللت به ورقة الترشيح، وحسب طبيعة كل محلول على هاتين العقدتين فإن الماء سيتبخر أو يتكاثف من المحلول المجهول حسب فرق الجهد بينه وبين المحلول المعروف جهده الأسموزي الذي يبلل ورقة الترشيح، وهذه الظاهرة تتسبب في برودة أو تسخين العقدة التي عليها المحلول المراد قياس جهده الأسموزي، أما العقدة الأخرى فتبقى ثابتة درجة الحرارة لأنه لا يحصل عليها تكثيف ولا يحدث منها تبخر بالنسبة إلى سطح ورقة الترشيح، والفرق في درجة حرارة العقدتين يعتمد على الفرق في الجهد بين المحلولين. تتم القراءة للفرق بواسطة جلفانوميتر عاكس أما معايرة الجهاز فيستعمل حمض البوريك، وعادة، يوضع الجهاز في حمام مائي لا يتعدى التغير فيه لدرجة الحرارة عن ٠,٠٢°م. إن هذا الجهاز كغيره من الأجهزة في الغالب أدخل عليه بعض التعديل كاستخدام الثرمستور بدلا من المزدوجات الحرارية وهناك أنواع تجارية مشابهة تستخدم الأساس النظري نفسه.

من أنواع السيكروميترات المستخدمة في هذا المضمار "السيكروميترات الرطبة البسيطة" حيث سبقت الإشارة لها عند ذكر طرق قياس الجهد الكلي مثل سيكروميتر سبانر وسيكروميتر ريتشاردز وأوقاتا ويدخل ضمنها أيضاً

سيكروميتر الثرمستور والطريقة لا تختلف في قياس الجهد الأسموزي عن قياس الجهد الكلي سوى أن الحجيرة التي توضع فيها العينة تغلف بلفافة الألومنيوم وتجمد بواسطة ثلج جاف (ثاني أكسيد الكربون) أو إضافة كحول أو أسيتون مع الثلج الجاف للوصول إلى درجة تجمد تقارب. - ٤٠°م وبعد ذوبان العينة يتم القياس.



الشكل رقم (٤-٤١). أسموميتر ويثرلي. أ-الأسموميتر في الوضع الرأسي في الحمام المائي. ب-طرف الماصة مكبر. جـ-الأنبوبة وبها السائل. د- منطقة التحام الماصة بالأنبوبة. و- نقطة متحركة للقياس. ز- مطاط. ح-جهاز تغيير الضغط.

المصدر: (Weatherley, 1960).

هنـاك طـرق للقيـاس تـتم باسـتخدام الأسمـوميتر وقـد سـبق ذكرأسمـوميتر ويثرلـي الـدقيق لقيـاس الجهـد الكلـي ويمكـن اسـتخدامه أيـضا لقيـاس الجهـد الأسمـوزي بتحـوير بـسيط في طريقـة المعـايرة والعمـل. ويـبين الـشكل رقـم (٤-٤١) رسماً تخطيطياً لمقطع في ذلك الأسموميتر.

هنـاك أسمـوميتر آخـر عـرف باسـم أسمـوميتر فـان ديـن هـونرت (Van Den Honert) لا يختلـف كـثيرا مـن الناحيـة النظريـة عـن أسمـوميتر ويثرلـي مـا عـدا أن الـسائل المـستخدم هـو كلوريـد الكالـسيوم وكـذلك تحـوير بـسيط لجعـل الاتـزان بـين الـسائل المـستخدم والعينـة في الحيـز الـصغير دائـم ويتحاشـى عمليـة سـحب نقطـة الـسائل وإعـادة تعليقهـا كمـا في أسمـوميتر ويثرلـي ومـع ذلـك فهـذا الأسمـوميتر نـادر الاسـتعمال. لقـد اسـتغلت هـذه الظـواهر أو إحـداهما في إنتـاج أسمـوميترات الـضغط البخـاري التجاريـة والـتي أورد مثـال لهـا ويـب وآخـرون ١٩٧١م (Wiebe *et. al.*, 1971).

ب) طرق قياس الجهد الأسموزي للنسيج

تعـد طريقـة البلزمـة الحديـة (Limiting plasmolysis) مـن أقـدم الطـرق المـستخدمة لقيـاس الجهـد الأسمـوزي للنـسيج حيـث قـد اسـتعملها العـالم فيفـر وغـيره في القـرن التاسـع عـشر الميلادي الماضـي، وقـد كثـر اسـتعمالها بعـد ذلـك حتـى وقـت قريـب حيـث قـل اسـتعمالها. وتعتمـد هـذه الطريقـة أساسـاً علـى تعـيين النقطـة الـتي عنـدها يبـدأ سـيتوبلازم الخليـة في الابتعـاد عـن الجـدار الخلـوي وهـو مـا يعـرف بالبلزمـة المؤقتـة (Incipient plasmolysis) وتظهـر البلزمـة علـى خلايـا النـسيج عنـد وضـعها في محاليـل ذات جهـد أسمـوزي أقـل مـن الجهـد الأسمـوزي في الخلايـا، وعمليـا تـستخدم محاليـل متدرجـة في التركيـز، والافـتراض الأساسـي

هنا هو أن الجهد الأسموزي للنسيج عند البلزمة المؤقتة يساوي الجهد الأسموزي للمحلول الخارجي، أي أن ضغط الامتلاء يساوي الصفر. من الناحية التطبيقية تستخدم مجموعة من قطع النسيج المتجانس (لا يزيد سمك القطعة عن أربع خلايا) مثل الأعضاء التخزينية (كجذور الجزر أو درنات البطاطس) أو حتى سلخات من البشرة لورقة البصل حيث توضع في محلول معروف جهده الأسموزي لمدة ٣٠ دقيقة ويمكن إقلال تلك المدة (مدة التعادل) بتعريض النسيج والمحلول إلى ضغط سالب بواسطة مضخة لتعجيل عملية دخول المحلول إلى النسيج، بعد التعادل يتم فحص النسيج بالمجهر الضوئي وتحسب نسبة الخلايا المبلزمة وبتكرار العملية لعدة محاليل متدرجة في التركيز يمكن الحصول على قراءات ترسم بيانيا ومن الرسم تؤخذ القيمة المقابلة لنسبة ٥٠٪ من الخلايا المبلزمة كقيمة للجهد الأسموزي لخلايا ذلك النسيج عند البلزمة المؤقتة كما في الشكل رقم (٤-٤٢).

أما الجهد الأسموزي لخلايا النسيج عندما تكون ممتلئة فيجب تعديل القيمة المذكورة لحساب تأثير تغير حجم الخلية مع ضغط الامتلاء. وكحساب تقريبي لإدخال ذلك المعامل تطبق المعادلة التالية:

$$\Psi_{s(t)} = \Psi_{s(ip)} (V_{(ip)}/V_{(t)})$$

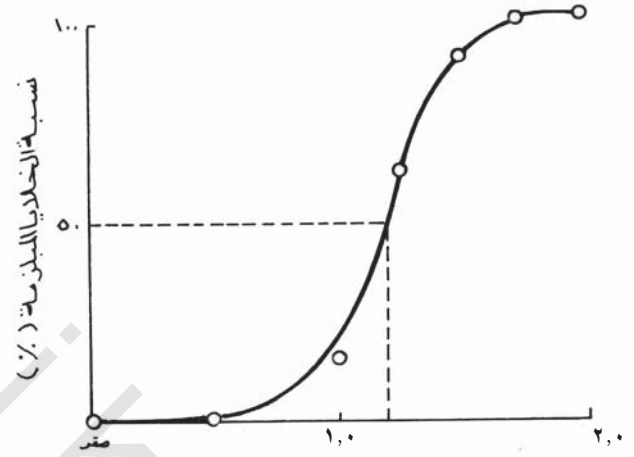
حيث: ($\Psi_{s(t)}$) الجهد الأسموزي عند ضغط الامتلاء.

و ($\Psi_{s(ip)}$) الجهد الأسموزي عند البلزمة المؤقتة.

و ($V_{(ip)}$) حجم الخلية عند البلزمة المؤقتة.

و ($V_{(t)}$) حجم الخلية عند ضغط الامتلاء.

obeikandi.com



الشكل رقم (٤-٤٢). تقدير متوسط الجهد الأسموزي للعصير الخلوي بطريقة البلزمة المؤقتة، وهو في هذه الحالة الجهد الذي يبلزم ٥٠% من الخلايا كما يدل على ذلك الخط المتقطع في الرسم.

المصدر: (Sutcliffe, 1968).

ويمكن حساب جزء المعادلة ($V_{(ip)}/V_{(t)}$) عن طريق تقدير حجم النسيج أو وزنه في المحلول المسبب لبلزمة ٥٠٪ من الخلايا) مع حجم النسيج أو وزنه في الماء النقي. وقد أورد ستكليف ١٩٦٨م (Sutcliffe, 1968) تلك النسبة لخلايا جذور البنجر الأحمر بأنها تقارب ٩٥٪.

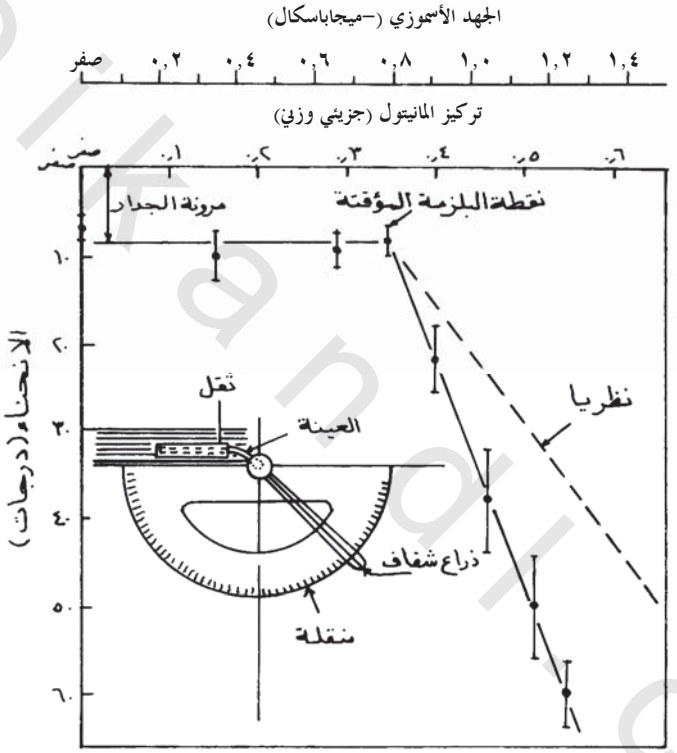
أما طريقة البلزمة فقط لتحديد الجهد الأسموزي فهي تشبه الطريقة السابقة من حيث الأساس النظري ولكنها لا تصلح إلا على خلايا أسطوانية الشكل ولذا فإن استخدامها على أنسجة خلاياها غير تلك تعطي قيما تقريبية لا تصل إلى دقة الطريقة الأولى لعدم انتظام الخلايا الأمر الذي يخالف الشرط الأساسي لهذه الطريقة.

obeikandl.com

هناك طرق تستغل خاصية النسيج الميكانيكية المتعلقة بضغط الامتلاء، فمثلا ضغط الامتلاء يتغير بتغير الجهد الأسموزي للمحلول الخارجي المحيط بالنسيج وبالتالي فإن مرونة جدر الخلايا تتغير بتغير الضغط، لذا فقياس هذه المرونة كانحناء قطعة من الساق الذي ليس به تغلظ ثانوي نتيجة لوجود وزن معين وتغيير التركيز في المحلول الخارجي المحيط بالنسيج يوصل إلى معرفة قيمة الصفر لضغط الامتلاء وهي نقطة البلزمة المؤقتة. وبالتالي فالجهد الأسموزي للمحلول الخارجي عند هذه النقطة يساوي الجهد الأسموزي لخلايا ذلك النسيج. من هذه الطرق طريقة دي فريز عندما أخذ قطعا من ساق نبات البازلاء وقسمها طوليا ووضعها في محاليل متدرجة في التركيز لمشاهدة مقدار الانحناء نتيجة للشد الناتج من النسيج طبقا لدخول أو خروج الماء فيه على بشرة ذلك النسيج. أما تازاوا ١٩٥٧م (Tazawa, 1957) فقد استعمل ما يشبه الميزان وأسماه ميزان الضغط لمعرفة متى تكون قيمة ضغط الامتلاء صفرا، بعد ذلك قام لوكهارت ١٩٥٩م (Lockhart, 1959) بقياس زاوية الانحناء باستعمال منقلة ووزن ثابت على طرف النسيج (قطعة الساق) وطرف النسيج الآخر مرتبط بذراع شفاف لقياس الزاوية كما في الرسم التخطيطي الشكل رقم (٤-٤٣). ويلاحظ في الشكل، أيضاً، رسم بياني للعلاقة بين الجهد الأسموزي للمحلول الخارجي وزاوية الانحناء ومنه تظهر نقطة البلزمة المؤقتة.

في طريقة لقياس ضغط الامتلاء ويمكن استخدامها لتقدير الضغط الأسموزي قام العالم فيرجن ١٩٥٥م (Virgin, 1955) بإيجاد العلاقة بين تذبذب الطنين (Resonance frequency) وضغط الامتلاء لقطعة من نسيج نباتي ووجد أن التذبذب ثابت بعد نقطة البلزمة المؤقتة كما في الشكل رقم (٤-٤٤). والشكل

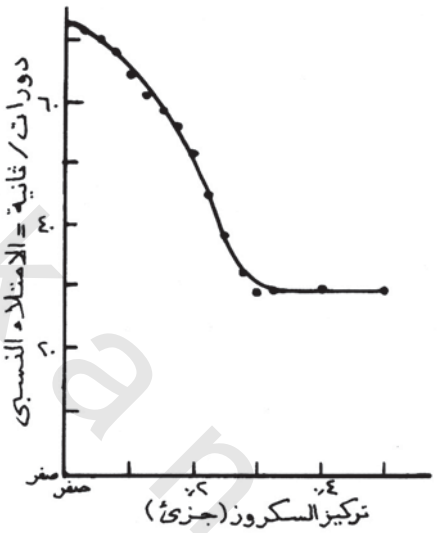
المذكور يمثل العلاقة بين تذبذب الطنين وتركيز المحلول المحيط بجذور نبات القمح، ويلاحظ أنه قد وجد نتائج مماثلة لتقدير البلزمة المؤقتة في نسيج درنة البطاطس وأوراق نبات اللبلاب (Ivy). من هنا يمكن تقدير الجهد الأسموزي للنسيج ولكن هذه الطريقة تتطلب أجهزة متقدمة مما يجعلها غير ملائمة للاستعمالات العادية.



الشكل رقم (٤–٤٣). رسم تخطيطي ومنحنى بياني يوضح طريقة لوكهارت لتحديد نقطة البلزمة المؤقتة.
المصدر: (Lockhart, 1959).

يكون حجم النسيج عند البلزمة المؤقتة أقل ما يمكن، لذا فقد استغلت هذه الظاهرة أيضاً في قياس الجهد الأسموزي وغالبا ما تستخدم طريقة الوزن

أو قياس الطول بدلا من الحجم ولكن من الصعب جدا تحديد أقل حجم نظرا لأن استجابة النسيج ليست سريعة ولذا فالقيم الناتجة عن هذه الطريقة تقريبية جدا (كأن تكون القيمة بين ٠,٤ و ٠,٦ جزيئي وزني من المانيتول).



الشكل رقم (٤–٤٤). تقدير الجهد الأسموزي للنسيج بطرقة تذبذب الطنين.

المصدر: (Virgin, 1955).

إن الطرق السابقة ليست هي المحاولات الوحيدة لإيجاد طريقة سهلة ودقيقة لقياس الجهد الأسموزي، بل هناك محاولات أخرى بعضها محدود الاستعمال على نسيج معين والآخر لم ينتج عنه زيادة في الدقة أو سهولة في الاستعمال نظرا لما تنطوي عليه هذه الطرق من صعوبة في الاستخدام أو كثرة في الافتراضات ومن هذه الطرق مثلا طريقة قياس التغير في حجم المسافات البينية أو طريقة استخدام وعاء الضغط أو طريقة تحديد الجهد الأسموزي لشعيرات الورقة أو طريقة مراقبة نقطة الانصهار بعد التجمد وغيرها. من هنا

يتضح أن أكثر الطرق استخداما رغم قدمها هي طريقة البلزمة المؤقتة وكذلك طريقة تعيين الانخفاض في درجة التجمد.

إن طرق قياس الجهد الأسموزي سواء باستعمال عصير خلوي أو باستعمال النسيج نفسه ليست متفقة في قيمها ولذا فإن الطريقة المناسبة تعتمد إلى حد ما على الإمكانات ونوع العينة وطبيعة التجربة، وقد ظهرت بعض الاتجاهات في تفضيل طريقة البلزمة أو طريقة الانخفاض في درجة تجمد المحلول أو غيرها يطول شرحها ولكن المعروف أن هناك مصادر للخطأ في كل الطرق. فمثلا بالنسبة لتجارب القياس مثل البلزمة وما شابهها فإن البلزمة حالة غير طبيعية ونادرا ما تحدث في الطبيعة كما سبق ذكره لذا فإن وضع النسيج في مثل هذه المحاليل يجعل قيم الجهد لا تمثل الحقيقة خاصة لو تبين أن البلزمة في حد ذاتها تسبب أضرارا للخلية أو الخلايا كانفصام الروابط البلازمية بينها أو تغيير شكلها قبل حدوث البلزمة، أو أن المحلول المستخدم للبلزمة ذو تأثير في نفاذية الغشاء الخلوي بأي شكل. هذا بالإضافة إلى أن الافتراض الأساسي في مثل هذه الطرق هو أن الغشاء الخلوي يعمل كغشاء شبه منفذ وهو افتراض مشكوك فيه خاصة إذا كانت فترة تعريض النسيج لمثل ذلك المحلول طويلة حيث قد ينفذ من المادة المذابة جزء ولو قليل إلى داخل الخلية أوقد يسبب أضرارا مؤقتة للغشاء الخلوي أو معامل مرونة الجدار الخلوي. أما طريقة الانخفاض في درجة تجمد العصير الخلوي فالعقبة الرئيسية هي الحصول على عصير خلوي نقي غير مشوب لأن تلوث العصير عند الاستخلاص قد يعطي قيما للجهد الأسموزي مختلفة كما سيتبين من الأمثلة لاحقا. أضف إلى ذلك أن العصير الخلوي قد يحدث له بعض التغير بمجرد استخلاصه وبالتالي تتغير

قيمة الجهد الأسموزي. وعلى أية حال هناك شعور عام بأن مصدر الخطأ في تقدير قيم الجهد الأسموزي للعصير الخلوي مرجعه التلوث بمواد الجدر الخلوية التي لا تساهم في الجهد الأسموزي الحقيقي للخلية أو مواد السيتوبلازم إذا كانت الدراسة محدودة على الفجوة فقط.

٣- طرق قياس ضغط الامتلاء

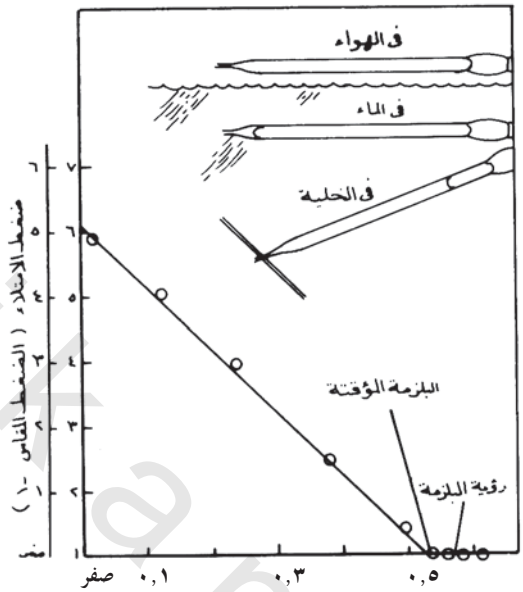
يعد قياس ضغط الامتلاء للخلية في النباتات الراقية من أحد الأمور الحاسمة لدراسة العلاقات المائية للنبات وبالتالي تقييم المقترحات الخاصة بانتقال الماء في النبات، ولكن هذا المعامل المهم يعتبر إلى حد قريب من أصعب المعاملات قياسا في العلاقات المائية. ومن الناحية النظرية يمكن قياس ضغط الامتلاء بطريقة مباشرة على أنه ضغط هيدروستاتيكي حقيقي عن طريق استعمال مقياس للضغط يتناسب وحجم النباتات، ولكن من الناحية التطبيقية القصور في التقنية- كما يعزى- حال دون ذلك في النصف الأول من القرن العشرين الميلادي.

وكانت الطريقة الشائعة هي استخدام العلاقة بين الجهد الكلي والجهد الأسموزي وجهد الضغط حيث عند قياس المعاملين الأولين يمكن استنتاج الأخير، ولكن هذا النهج يكون صحيحا لو كانت القياسات دقيقة وغير تقريبية للمعاملين الأولين كما سبق عند ذكر بعض مصادر الأخطاء في طرق قياس الجهد الكلي والجهد الأسموزي. على أية حال فإن هذا النهج أدى إلى حصول بعض الباحثين على قيم سالبة لضغط الامتلاء وبالطبع تمثل القيم السالبة حالة ذبول وليست حالة امتلاء، ومن القيم التي نشرت ما يستدل منه على أن الخلية لا يمكن أن تتحمل مثل هذه الضغوط [مثل ما نشره تيورين ١٩٥٧م (Tyurine, 1957) عن

وجـود ضـغط امـتلاء في نبـات (*Artemsia* sp.) يـتراوح مـا بـين- ١٠ إلى- ١٥ ميجاباسكال]، ولـذا فـإن هـذا الـنهج يجـب أن لا يتبـع خاصـة عنـد الحـصول علـى قـيم سـالبة. وقـد توصـل العـالم تـايري ١٩٧٦م (Tyree, 1976) مـن تحليلـه لنتـائج تجاربـه باسـتخدام وعـاء الـضغط بأنـه لـيس هنـاك مـن دليـل علـى وجـود ضـغط امـتلاء سـالب في الخلايـا النباتيـة وأن مـا يبـدو مـن قـيم سـالبة مـا هـو إلا نتيجـة لأخطـاء في التجـارب، أما أوعية الخشب فقد يتكون فيها ضغط سالب.

مـن المحـاولات الـتي تمـت لتقـدير ضـغط الامـتلاء محاولـة قيـاس حجـم الخليـة وتغـيره، ومـن علاقـة الحجـم بالـضغط تقـدر قيمـة ضـغط الامـتلاء ولكـن القـيم الـتي تـوافرت تعتـبر تقريبيـة نظـرا للـصعوبة في قيـاس حجـم الخليـة حيـث يـنعكس ذلـك علـى قلـة البحـوث في هـذا المـضمار. هنـاك محاولـة جـادة وجديـدة في معالجتهـا للمـشكلة وهـي مـا قـام بـه العـالم فيرجـن ١٩٥٥م (Virgin, 1955) باسـتعمال تذبـذب الطـنين والـتي سـبقت الإشـارة إليهـا في طـرق قيـاس الجهـد الأسمـوزي، ولكـن تـبين أن العلاقـة بـين تذبـذب الطـنين وضـغط الامـتلاء غـير تناسبية لذا فإن التقدير لضغط الامتلاء بهذه الطريقة تقريبي، أيضاً.

بـدأت محاولـة قيـاس جهـد الامـتلاء مباشـرة علـى خلايـا كـبيرة كطحلـب نـايتلا (*Nitella*) بواسـطة العـالمين جـرين و سـتانتون ١٩٦٧م (Green and Stanton, 1967) باسـتخدام أنبوبـة شـعرية دقيقـة (قطرهـا نحـو ٤٥ ميكـرومتر) وهـذه الأنبوبـة مغلقـة مـن طـرف ومفتوحـة مـن الطـرف الآخـر الـذي يكـون مـستدقا وبـذا فهـذه الأنبوبـة تعمـل عمـل المـانوميتر الـذي يراقـب بواسـطة مجهـر ضـوئي، وعنـد غمـر الأنبوبـة في المـاء تـدخل كميـة قليلـة مـن المـاء نتيجـة للتـوتر الـسطحي مـع الطـرف المـستدق الـذي عنـد غـرزه في الخليـة يعمـل ضـغط الامـتلاء علـى إزاحـة هـذه



الشكل رقم (٤-٤٥). طريقة جرين وستانتون لقياس ضغط الامتلاء في خلايا الطحلب نايتلا، ويساوي في هذه الحالة – ٠,٥١ ميجاباسكال. يمثل الرسم البياني العلاقة بين ضغط الامتلاء والجهد الأسموزي للمحلول الخارجي حيث البلزمة المؤقتة عند – ٠,٥٣ بينما رؤية البلزمة بالمجهر عند – ٠,٥٧ ميجاباسكال.

المصدر: (Green and Stanton, 1967

الكمية داخل الأنبوبة حيث ضغط على الهواء الداخلي في الأنبوبة ويقاس الحجم النهائي ومن ثم ينسب هذا الحجم إلى الحجم الأصلي للاستدلال على مقدار ضغط الامتلاء ويبين الشكل رقم (٤-٤٥) رسماً تخطيطياً لهذه الطريقة النتائج مبينة على رسم بياني كنسبة إلى جهد الضغط. إن نقطة الضعف في مثل هذه الطريقة هي أنه بازدياد الضغط على فقاعة الهواء في المانوميتر فإن جزءا

من الغاز المضغوط يذوب في السائل وبالتالي يزيد من نسبة الخطأ علاوة على أن هذه الطريقة لا تنطبق على خلايا النباتات الراقية نظرا لصغر حجمها (القطر نحو ٢٠- ٢٥ ميكرومتر).

من هنا فإن مسبر الضغط لخلايا الطحالب الكبير، الذي سبق ذكره في قياس النفاذية يعتبر خطوة في الطريق الصحيح للوصول إلى طريقة مباشرة لقياس ضغط الامتلاء. وفعلا عمل مسبر الضغط ٢ (Hüsken, et al., 1978). يمكن قياس الضغط الهيدروستاتيكي لخلايا النباتات الراقية مباشرة بهذه الطريقة ويمكن تتبع أثر التغير في الضغط آليا (بتعديل موقع الزيت في الأنبوبة الشعرية الدقيقة كما سبق شرحه) وتأثير هذا التغيير في بعض العوامل الأخرى مثل مرونة الجدار والنفاذية ومعدل تدفق الماء. ارجع للشكل رقم (٤-١٣) حيث تتبين أجزاء هذا المسبر في الرسم التخطيطي. يلاحظ أنه من الممكن متابعة أو تسجيل الضغط لفترات طويلة (٥ ساعات) بدقة تتراوح ما بين ٣×١٠$^{-٣}$ إلى ٥×١٠$^{-٣}$ ميجاباسكال. لقد انتشر استعمال هذا الجهاز في كثير من الدراسات (انظر الفقرة ٤-٧ حول بعض الأمثلة لجهد الماء ومكوناته) في فترة وجيزة مما يدل على أن المحاولة تستحق الاهتمام وأن هذا العامل مهم في مجال العلاقات المائية.

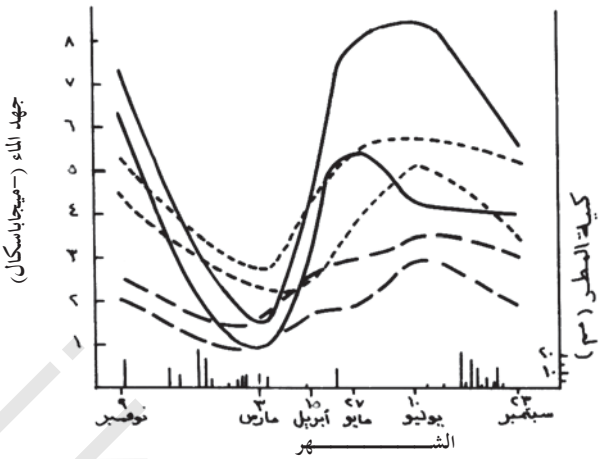
هناك اقتراح أخير نشره أخيرا زيمرمان، في هسكن وآخرين ١٩٧٨م (Hüsken, et al., 1978) لقياس جهد الضغط أو ضغط الامتلاء بواسطة قياس التغير في حجم فقاعة هوائية يتم إدخالها إلى الخلية النباتية ولكن الطريقة لازالت في طور الاقتراح والصعوبات التقنية تبدو كبيرة ويتطلب تداولها واستعمالها دقة فنية كبيرة كما ذكر صاحب الاقتراح.

(٤-٨) أمثلة لمدى جهد الماء في النبات

في الجزء السابق من هذا الفصل ذكرت بعض طرق قياس جهد الماء ومكوناته وكذلك بعض المعاملات ذات العلاقة بالجهد أو أحد مكوناته دون إعطاء أمثلة للمدى الذي قد تصل إليه هذه القيم إلا نادرا، وفي هذا الجزء محاولة لذكر بعض القيم إلا أنه تجدر الإشارة إلى أن القيم المنشورة ليست متفاوتة والفروق بالطبع أساسية بين الأنواع النباتية إلا أنه في الوقت نفسه تعتبر هذه الفروق انعكاسا للظروف البيئية والتي يجب تحديدها تحديدا دقيقا ما أمكن ذلك وخاصة عند مقارنة الأنواع النباتية أو أي عامل آخر.

بما أن جهد الماء في النبات يعد مقياسا للحالة الانتقالية للماء في النبات في طريقه من التربة إلى الهواء لذا فإن جهد الماء غير ثابت بل هو في حالة مستمرة من التغير نتيجة لتأثير بعض العوامل والتي من أبرزها العوامل البيئية. فمثلا في يوم صاف يتغير جهد الماء من أكبر قيمة له قبل شروق الشمس إلى أصغر قيمة له بعد الظهر ثم يعود إلى قيمته العالية أثناء الليل وهذا بالطبع يتظاهر مع المسار الزمني للنتح. ويتأثر الجهد الكلي بعوامل أخرى كالإجهاد المائي ودرجة الحرارة ومحتوى التربة من الماء والتغيرات الداخلية للجهد الأسموزي وموقع أخذ العينة من النبات إلى غير ذلك. ومع ذلك فيمكن التعميم بأن التغيرات الدورية لفتح الثغور وغلقها تحت ظروف بيئية ثابتة تنطبق أيضا على تغير جهد الماء ولذا فإن أي عامل قد يؤثر في دورة فتح الثغور وغلقها قد يكون له تأثير مشابه في جهد الماء. لقد أورد العالمان هالفورسن وباتُن ١٩٧٤م (Halvorson and Patton, 1974) تغيرات موسمية لجهد الماء لبعض النباتات الصحراوية كما قيست بوعاء الضغط (الشكل رقم ٤-٤٦).

openkandi.com



الشكل رقم (٤–٤٦). منحنيات أدنى وأعلى قيمة سنوية (١٩٦٨–١٩٦٩م) لجهد الماء الكلي لبعض الشجيرات الصحراوية في أريزونا مقارنة بكمية المطر الساقطة (الخطوط الراسية على الإحداث الأفقي). و (*Larrea*.....) و(_____ *Franseria*) و(------- *Cercidium*).

المصدر: (Halvorson and Patton, 1974)

إن جهد الماء الكلي لأي نبات يختلف في قيمته، فقد يتراوح من أعلى قيمة له– وقد تقارب الصفر ولكن المحتمل أن لا تكون صفرا حتى في حالة الإدماع– إلى أدنى قيمة له وقد تكون أقل من– ١٠ ميجاباسكال والنباتات الصحراوية في الغالب هي السائدة في كون أدنى قيمة لجهد الماء توجد بها. تتميز الصحراء، عموما، بكثرة النباتات الحولية ولكنها لم تدرس كثيراً، إلا أن العالم إهليرنجروآخرين ١٩٧٩م (Ehleringer *et. al.*, 19798) أوردوا أن جهد الماء للنبات الحولي (*Camissonia* calviformis) يساوي– ١ ميجاباسكال.

وكأمثلة لقيم الجهد الكلي فالجدول التالي (الجدول رقم ٤–٥) يبين

أدنى قيمة سجلت لجهد الماء في بعض النباتات الصحراوية إما بطريقة وعاء الضغط وإما بسيكروميتر المزدوج الحراري ما لم يذكر خلاف ذلك.

الجدول رقم (٤– ٥). أدنى قيمة لجهد الماء في بعض النباتات الصحراوية.

اسم النبات العلمي	الموقع	جهد الماء (–ميجاباسكال)
Artemisia herba-alba	صحراء النقب (فلسطين)	١٦,٣
Ceratoides (Eurotia) lantana	صحراء الحوض الكبير (واشنطن)	١٢,٠
Atriplex confertifolia	صحراء الحوض الكبير (واشنطن)	١١,٤
Reaumura negerensis	صحراء النقب (فلسطين)	١٠,٨
Atriplex corrugata	صحراء الحوض الكبير (واشنطن)	١٠,٧
Atriplex nuttallii	صحراء الحوض الكبير (واشنطن)	١٠,٣
Zygophyllum dumosum	صحراء النقب (فلسطين)	٨,٨
Franseria deltoidea	صحراء سونورا	٨,٥
Chrysothamnus greenei	صحراء الحوض الكبير (واشنطن)	٨,٤
Larrea divaricata	كاليفورنيا	٨,٢
Hammada scoparia	صحراء النقب (فلسطين)	٨,٠
Atriplex (Grayia) spinosa	صحراء الحوض الكبير (واشنطن)	٧,٩
Suaeda depressa	صحراء الحوض الكبير (واشنطن)	٧,٨
Eriogonum fasciculatum	صحراء سونورا	٧,٦

obeikandi.com

تابع – الجدول رقم (٤– ٥).

اسم النبات العلمي	الموقع	جهد الماء (–ميجاباسكال)
Krameria grayi	صحراء سونورا	٧,٤
Sarcobatus vericulatus	صحراء الحوض الكبير (واشنطن)	٦,٣
Simmondsia chinensis	صحراء سونورا	٦,٢
Artemisia tridentata	صحراء الحوض الكبير (واشنطن)	٦,٠ إلى ٧,٠
Juniperus californica	كاليفورنيا	٥,٩
Atriplex polycarpa	كاليفورنيا	٥,٥
Suaeda fruticosa	صحراء الحوض الكبير (واشنطن)	٥,٣
Larrea tridentata	صحراء موهيف (كاليفورنيا)	٥,١ إلى ٦,٥
Ambrosia dumosa	صحراء موهيف	٥,٠
Tetradymia spinosa	صحراء الحوض الكبير (واشنطن)	٥,٠
Acacia greggii	صحراء سونورا	٤,٨
Krameria parvifolia	صحراء موهيف (كاليفورنيا)	٤,٨ إلى ٧,٢
Viguiera tomentosa	صحراء باها (كاليفورنيا)	٤,٦
Distichlis spicata	صحراء الحوض الكبير (واشنطن)	٤,٦
Prosopis juliflora	صحراء كولورادو❖❖	٤,٥
Lycium pallidum	صحراء موهيف (كاليفورنيا)	٤,٤ إلى ٥,١
Sarcobatus vermiculatus	صحراء الحوض الكبير (واشنطن)	٤,٤

obeikandl.com

تابع الجدول رقم (٤– ٥).

اسم النبات العلمي	الموقع	جهد الماء (–ميجاباسكال)
Atriplex hymenelytra	صحراء موهيف (كاليفورنيا)	٤,٢
Lycium andersonii	صحراء موهيف (كاليفورنيا)	٤,١ إلى ٥,٢
Cercedium microphyllum	صحراء سونورا	٣,٦
Tidestromia oblongifolia	صحراء موهيف (كاليفورنيا)	٢,٥
Fouquieria splendens	كاليفورنيا	١,٩
Opuntia basilaris	صحراء كولورادو	١,٨

* **لمزيد من المعلومات عن ظروف التجارب يرجع للمراجع الأصلية في ريتشتر ١٩٧٦م** (Ritchter, 1976) **ومكماهون وشيميف ١٩٨١م** (MacMahon and Schimpf, 1981).

** **تم القياس بطريقة تبادل السائل (نقطة الاتزان مع السائل).**

من الملاحظ أن القيم المذكورة في الجدول أعلاه وخاصة المنخفضة جدا قد لا تكون في المدى الذي يمكن الاعتماد عليه باستعمال المزدوجات الحرارية أو وعاء الضغط أي أن الدقة في القياس بهذه الأجهزة في هذا المدى قد لا تكون كافية.

أما أدنى قيمة سجلت لجهد الماء في نباتات تتعرض لفترات جفاف ملحوظة فيبين مثلا لها الجدول التالي (الجدول رقم ٤-٦).

obeikandl.com

الجدول رقم (٤–٦) أدنى قيمة لجهد الماء في النباتات التي تتعرض لفترات جفاف ملحوظة (*).

الاسم العلمي للنبات	الطريقة	الموقع	جهد الماء (–ميجاباسكال)
Juniperus phoenicea	وعاء الضغط	فرنسا	٧,٠
Acacia harpophylla	وعاء الضغط	أستراليا	٦,٠
Hippocrepis comosa	وعاء الضغط (في المعمل)	ألمانيا	٥,٦
Amelanchier ovalis	وعاء الضغط	فرنسا	٥,٥
Cornus mas	وعاء الضغط	فرنسا	٥,٢
Rosmarinus officinalis	وعاء الضغط	فرنسا	٤,٨
Astrebla lappacea	وعاء الضغط (في المعمل)	كوينزلاند	٤,٨
Pyrus amygdaliformis	وعاء الضغط	فرنسا	٤,٥
Juniperus ozycedrus	وعاء الضغط	فرنسا	٤,٤
Quercus coccifera	وعاء الضغط	فرنسا	٤,٤
Acer monspessulanum	وعاء الضغط	فرنسا	٤,١
Quercus douglasii	وعاء الضغط (قبل شروق الشمس)	كاليفورنيا	٤,١
Quercus agrifolia	وعاء الضغط (قبل شروق الشمس)	كاليفورنيا	٣,٧
Lavandula latifolia	وعاء الضغط	فرنسا	٣,٧
Buxus sempervirens	وعاء الضغط	فرنسا	٣,٤
Prosopis glandulosa	وعاء الضغط	تكساس	٣,٢

* كما في الجدول رقم (٤–٥).

obeikandl.com

يوضح الجدولان السابقان الفروق في أدنى قيمة لجهد الماء في نباتات مختلفة طبقا لمكان نموها حيث تتعرض النباتات لانخفاض في جهد الماء في التربة. وبالمثل فالنباتات التي تنمو على شواطئ البحار فيما يعرف بنباتات مقابر الإنسان مثل نبات الشورى (أو نبات ابن سيناء) تتعرض جذورها لجهود منخفضة (جهد ماء البحر يتراوح ما بين-٢,٤ إلى-٢,٦ ميجاباسكال) وقد درس العالم شولاندر ١٩٦٨م (Scholander, 1968) قيم جهد الضغط في الخشب ونشر النتائج المدونة في الجدول رقم (٤-٧) حيث تدل على الجهد الكلي للماء.

الجدول رقم (٤-٧). أدنى قيمة لجهد ضغط الخشب (= الجهد الكلي) في نباتات مقابر الإنسان والتي تنمو على شواطئ البحار مقيسة بوعاء الضغط (Scholander, 1968).

اسم النبات العلمي	الجهد (- ميجاباسكال)
Sonneratia alba	٥,٧
Avicennia marina	٥,٤
Aegialitis annulata	٥,٢
Aegiceras corniculatum	٥,٢
Ceriops tagal	٥,٠
Osbornia octodonta	.٥,٠
Lumnizera littorea	٤,٨
Excoecaria agallocha	٣,٧

وبالمثل حظيت الأشجار والأعشاب في البيئات الرطبة بدراسة جهدها المائي. والجدول رقم (٤- ٨) يبين أدنى قيم لجهد الماء في بعض الأشجار مع إيضاح لموقع أخذ العينة.

الجدول رقم (٤-٨). أدنى قيمة لجهد الماء الكلي في النباتات الخشبية التي تنمو في مناطق رطبة بطريقة وعاء الضغط ما عدا النوع الأخير فبطريقة تبادل السائل*.

الاسم العلمي للنبات	ارتفاع نقطة أخذ العينة	الموقع	جهد الماء (-ميجاباسكال)
Malus domestica	؟٥	إنجلترا	٢,٦
Sequoiadendron giganteum	٢٥	النمسا	٢,٥
Picea abies	١٩	النمسا	٢,٢
Pyrus communis	؟٤	أستراليا	٢,١
Taxus baccata	٣	النمسا	٢,٠
Prunus serotina	؟٦	فرجينيا الغربية	٢,٠
Pseudotsuga menziesii	٢٥	أوريجون	٢,٠
Pinus resinosa	٧	مينيسوتا	١,٩
Pinus contorta	؟٦	كولورادو	١,٩
Betula pendula	١٢	النمسا	١,٩
Vitis vinifera	؟٢	أستراليا	١,٩
Quercus prinus	؟٦	فرجينيا الغربية	١,٨
Picea sitchensis	٦	سكوتلاندا	١,٨
Pinus sylvestris	١,٥	السويد	١,٧
Quercus rubra	؟٦	فرجينيا الغربية	١,٦

obeikandl.com

الجدول رقم (٤–٨).

الاسم العلمي للنبات	ارتفاع نقطة أخذ العينة	الموقع	جهد الماء (–ميجاباسكال)
Tsuga canadensis	٠,٧	كونيتيكوت	١,٦
Camellia sinensis	؟٢	كينيا	١,٥
Phoenix sylvestris	٦	الهند	١,٥

❖ كما في الجدول رقم (٤–٥).

؟ إشارة الاستفهام تدل على أن القيمة تقريبية.

أما الأعشاب فقيم الجهد الكلي مبينة في الجدول رقم (٤–٩) حيث يوضح الجدول، أيضا، البيئة والموقع التي نمت عليها تلك النباتات.

الجدول رقم (٤–٩). أدنى قيم للجهد الكلي لبعض النباتات العشبية*.

الاسم العلمي للنبات	الموقع أو البيئة	الطريقة	الجهد الكلي (–ميجاباسكال)
Phragmites communis	ماء بحيرة	وعاء الضغط	٤,٣
Triticum aestivum	تربة جافة	المزدوج الحراري	٣,١
Hordeum vulgare	محلول (– ٢ميجاباسكال)	المزدوج الحراري	٢,٩
Ambrosia trifida	تربة جافة	المزدوج الحراري	٢,٧
Phaseolus vulgaris	محلول (– ٠,٤ ميجاباسكال)	المزدوج الحراري	٢,٦
Triticum durum	محلول مغذي (– ٠,٠٠٢ ميجاباسكال)	وعاء الضغط	٢,٥
Zea mays	تربة شبه جافة	وعاء الضغط	٢,٢

obeikandl.com

تابع الجدول رقم (٤-٩) *.

الجهد الكلي (-ميجاباسكال)	الطريقة	الموقع أو البيئة	الاسم العلمي للنبات
٢,١	وعاء الضغط	تربة شبه جافة	*Sorghum bicolor*
٢,٠	المزدوج الحراري	تربة شبه جافة	*Solanum tuberosum*
٢,٠	وعاء الضغط	تربة جافة	*Nicotiana tabacum*
١,٩	وعاء الضغط	تربة جافة	*Lolium perenne*
١,٦	وعاء الضغط	تربة جافة	*Vicia faba*
١,٥	وعاء الضغط	تربة مروية	*Cardaria draba*
١,٤	المزدوج الحراري	تربة جافة	*Beta vulgaris*

❖ كما في الجدول رقم (٤-٥).

الجداول السابقة تغطي معظم النباتات في بيئات مختلفة ويلاحظ أن أقل جهد للماء في النباتات الصحراوية أو النباتات التي تنمو على تربة تتعرض لفترات جفاف. أما النباتات التي لها آليات خاصة للحصول على الماء كوسيلة لتفادي الجفاف مثل تعمق الجذور أو سقوط الأوراق أو تكوين أنسجة عصيرية فإنها تتميز بقيم جهد عالية نسبياً، أما النباتات التي ليس لها مثل هذه الآلية فإن قيم الجهد تقارب قيم جهد الماء للنباتات الصحراوية. من هنا فإن أدنى قيم لجهد الماء في هذه الجداول تعكس ظروف نمو تلك النباتات أما الفروق بين جهود الماء للنباتات التي تنمو في مكان واحد فهي فروق تعكس العوامل الداخلية للنباتات التي تؤثر في الجهد كالارتفاع مثلاً.

أما الجهد الأسموزي فليس هناك طريقة مثالية لقياسه داخل النبات وفي الغالب كثير من المحاولات تؤدي إلى تغير الجهد الأسموزي عن قيمته الأصلية.

ويتراوح الجهد الأسموزي عند قياسه بالطرق السابقة الذكر ما بين- ٠,١ ميجاباسكال في النباتات المائية إلى نحو- ٢٠,٠ ميجاباسكال في النباتات الملحية ولو أن القيم التي تتميز بكونها ذات سالبية عالية مشكوك في أمرها لأنه قد يتلوث العصير المستخلص بالبلورات الملحية على الأوراق كما سبق التنويه عند ذكر الجهد الكلي. من هنا يمكن القول بأن الجهد الأسموزي للنباتات الملحية يتراوح ما بين- ٥,٠ ميجاباسكال إلى- ٨,٠ ميجاباسكال أما العصير الخلوي للنباتات الأخرى فيتراوح جهده الأسموزي ما بين-٠,٤ ميجاباسكال إلى- ٢,٠ ميجاباسكال وبالطبع فالقيمة تعتمد على العوامل المؤثرة فيه، ومنها بجانب ما ذكر من عوامل تؤثر في الجهد الكلي كون النبات في حالة نمو أو سكون والأوراق الصغيرة غالبا أكثر سالبية في قيمة الجهد الأسموزي وكذلك الجذور يتغير جهد خلاياها الأسموزي بتغير محتوى التربة في الماء. على أية حال فإن الجدول رقم (٤-١٥) يوضح أدنى قيمة للجهد الأسموزي لبعض النباتات الصحراوية.

الجدول رقم (٤-١٠). أدنى قيمة للجهد الأسموزي في بعض النباتات الصحراوية *.

الاسم العلمي للنبات	الجهد الأسموزي (-ميجاباسكال)
Artemisia herba-alba	٩,٢
Zygophyllum dumosum	٧,٣
Larrea divaricata	٥,٥
Franseria deltoidea	٥,٣
Atriplex polycarpa	٥,٣
Simmondsia chinensis	٤,٩

obeikandl.com

تابع – الجدول رقم (٤–١٠).

الاسم العلمي للنبات	الجهد الأسموزي (–ميجاباسكال)
Prosopis juliflora	٤,١
Cercidium microphyllum	٣,٧
Fouquieria splendens	٢,١
Opuntia spp.	١,٦ إلى ٠,٩

❖ كما في الجدول رقم (٤–٥).

أما النباتات الأخرى، فهناك الكثير من القياسات المتباينة تبعا لطريقة القياس والمجال لا يسمح بذكرها جميعا فللمزيد عن هذه البيانات انظر والتر ١٩٦٠م (Walter, 1960)، والجدول التالي (الجدول رقم ٤–١١) يعطي مثالا لبعض النباتات المختلفة.

الجدول رقم (٤–١١). بعض قيم الجهد الأسموزي في نباتات مختلفة(*).

الاسم العلمي للنبات	الجهد الأسموزي (–ميجاباسكال)
Allenrolfea occidentalis	٨,٩
Picea pungens	٥,٢
Citrus reticulata	٤,٨
Salix babylonica	٣,٦
Populus deltoides	٢,١
Quercus alba	٢,٠
Helianthus annuus	١,٩

obeikandl.com

تابع الجدول رقم (٤-١١).

الاسم العلمي للنبات	الجهد الأسموزي (-ميجاباسكال)
Acer rubrum	١,٧
Nymphaea odorata	١,٥
Poa pratensis	١,٤
Taraxacum officinale	١,٤
Stellaria media	٠,٧٤
Zebrina pendula	٠,٤٩

❖ يرجع لسالسبوري ورس ١٩٧٨م (Salisbury and Ross, 1978) للحصول على مزيد من البيانات والمراجع.

أما جهد الضغط (ضغط الامتلاء) فذو قيمة عالية نسبيا وقد تقارب ٠,٥ ميجاباسكال في الخلايا البرنشيمية و ١,٢ ميجاباسكال في خلايا النسيج التمثيلي و ١,٥ ميجاباسكال في الأنبوبة الغربالية في اللحاء ولكن القيمة بالطبع غير ثابتة وتعتمد على علاقات الخلية المائية إجمالا. وللمقارنة بين هذه القيم والضغوط المختلفة لكثير من النظم راجع الجدول رقم (٢) من الملحق رقم (٤). إلا أنه تجدر الإشارة أن من المشكوك فيه استنتاج قيمة ضغط الامتلاء من معادلة الجهد الكلي وخاصة إذا كان هناك مصدر خطأ في تقدير الجهد الأسموزي، لذا فإن أفضل طريقة هي قياس ضغط الامتلاء مباشرة.

إن تغير ضغط الامتلاء في الخلية يقترن عادة بمعاملات نقل الماء إلى الخلية وهذه المعاملات تشتمل على التوصيلية الهيدروليكية (النفاذية) للغشاء الخلوي (L_p) ومعامل مرونة الجدار الخلوي (ε) ومعامل الإرجاع (الاختيارية) لكل خلية

(σ) وكـذلك التوصـيلية الهيدروليكيـة للمـسافات خـارج المـادة الحيـة (Apoplast). وتـتراوح قيمـة (L_p) مـا بـين ١٠$^{-٦}$ إلى ١٠$^{-١٠}$ سـم/ ثانيـة/ ميجاباسـكال طبقـا للطريقـة المـستعملة والنمـوذج المفـترض للنقـل عنـد حـساب القيمـة، أمـا قيمـة معامـل مرونـة الجـدار فالجـدول رقـم (٤– ١٢) يـبين قيمتـه طبقـا للطريقـة المـستخدمة سـواء أكـان معامـل المرونـة للخليـة (ε) أو متوسـط معامـل مرونـة خلايـا النـسيج (ε̄). ولمزيـد مـن النقـاش عـن هـذا المعامـل وكـثير مـن ظـروف التجـارب ومراجـع أخـرى يرجـع إلى زيمرمان وستود ل ١٩٧٨م (Zimmermann and Steudle, 1978).

الجدول رقم (٤– ١٢). معامل مرونة الجدار عند مختلف الضغوط للنباتات الراقية (Zimmermann and Steudle, 1978)*.

الطريقة	النسيج	الضغط (ميجاباسكال)	معامل المرونة (ميجاباسكال)	الاسم العلمي للنبات
مسبر الضغط ١	خلية غدية	صفر ٠,٣–٠,٤	٠,٥ ٥–١١	*Mesembryanthemum crystallinum*
قوة الضغط الخارجي	خلية بشرة	كل القيم	٠,٢	*Allium cepa*
الطريقة السيكروميترية	نسيج ورقة	٠,٢> ٠,٢<	١,٥ ٦,٠	*Gossypium hirsutum*
الطريقة السيكروميترية	نسيج ورقة	٠,٢> ٠,٢<	٠,٦٣ ٦,٠	*Lotus corniculatus*
الطريقة السيكروميترية	نسيج ورقة	٠,٢> ٠,٢<	٠,٤٤ ٧,١	*Capsicum fruitescence*
الطريقة السيكروميترية	نسيج ورقة	٠,٣٤> ٠,٣٤<	١,٤ ٤,٧ ٠,٧٣	*Helianthus annuus*

تابع الجدول رقم (٤– ١٢) .

الطريقة	النسيج	الضغط (ميجاباسكال)	معامل المرونة (ميجاباسكال)	الاسم العلمي للنبات
الطريقة السيكروميترية	نسيج ورقة		٠,٩٥	*Brassica napus*
الطريقة السيكروميترية	نسيج ورقة		١,٥٨	*Zea mays*
الطريقة السيكروميترية	نسيج ورقة		٢,١٥	*Lycopersicon esculentum*
الطريقة السيكروميترية	نسيج ورقة		٢,٩٦	*Gossypium barbadense*
الطريقة السيكروميترية	نسيج ورقة		٢,٦٦	*Ligustrum lucidum*
الطريقة السيكروميترية	نسيج ورقة		٣,٣٤	*Pennisetum typhoides*
الطريقة السيكروميترية	نسيج ورقة		٨,٤٣	*Acacia aneura*
الاتزان البخاري	نسيج ورقة	منخفض القيمة عالي القيمة	٤,٥–٣,٤ ١٣,٠–١٢,٠	*Ceratonia siliqua*
الاتزان البخاري	نسيج ورقة	منخفض القيمة عالي القيمة	٣,٠–٢,٢ ١٠,٥–١٠,٠	*Platanus orientalis*
الاتزان البخاري	نسيج ورقة	منخفض القيمة عالي القيمة	١,٦ ٥,٠	*Atriplex halinus*
وعاء الضغط	غصن	نحو الصفر ١,٥–٠,٨	٢,٠–٠,٨ ١٢,٠–١٠,٠	*Pigerodendron uvifera*
وعاء الضغط	مجموع خضري	نحو الصفر ١,٠	صفر ١٢,٥	*Podocarpus nudigenus*

obeikandl.com

تابع الجدول رقم (٤– ١٢) .

الطريقة	النسيج	الضغط (ميجاباسكال)	معامل المرونة (ميجاباسكال)	الاسم العلمي للنبات
وعاء الضغط	مجموع خضري	نحو الصفر ١,٥–٠,٨	١,٠–٠ ٨,٠	*Nothofagus betuloides*
وعاء الضغط	مجموع خضري	نحو الصفر ٢,٣	١,٠ ٣٠,٠	*Pernettya macronata*
وعاء الضغط	مجموع خضري	نحو الصفر ١,٨	٠,٨ ١٠,٠	*Weinmannia trichosperma*
وعاء الضغط	مجموع خضري	نحو الصفر ١,٠–٠,٦	٣,٥ ٢٠,٠	*Abies concolor*
وعاء الضغط	مجموع خضري	نحو الصفر ٧,٥	٠,٢ ٧,٥	*Picea glauca*
وعاء الضغط	مجموع خضري	نحو الصفر ١,٥–٠,٨	٠,٥ ١٥,٠–٦,٠	*Acer saccharum*
وعاء الضغط	مجموع خضري	نحو الصفر ١,٥–١,٠	١,٢ ١٤,٠	*Populus balsamifera*
وعاء الضغط	مجموع خضري	أعلى قيمة	١٧,٠	*Fraxinus pennsylvanica*
وعاء الضغط	مجموع خضري	أعلى قيمة	٢٦,٠	*Ginkgo biloba*
وعاء الضغط	مجموع خضري	صفر ٢,٠	صفر ٢٩,٠	*Picea sitchensis*

❖ أعيد حساب بعض القيم مرة أخرى وليست القيم التي نشرها الباحث الأصلي التي يمكن الرجوع إليها حسب القائمة في المرجع العام.

obeikandl.com

من الجدول السابق يتضح أن معامل المرونة يعتمد اعتمادا كبيرا على ضغط الامتلاء ففي المدى من صفر إلى ٠,٢ ميجاباسكال فالمعامل ذو قيمة صغيرة ولكن عند ضغط الامتلاء الكلي فإن معامل المرونة ذو قيمة تتراوح من ٥٠ إلى عدة مئات. إن هذه العلاقة بين معامل المرونة وضغط الامتلاء تستوجب الحذر في تفسير القيم المحسوبة بهذه الطرق لذا فإن القيم التي أوردها زيمرمان وستودل ١٩٨٠م (Zimmermann and Steudle, 1980) والتي يقاس فيها معامل المرونة مباشرة تبدو أقرب إلى الدقة من الطرق السابقة وهذه القيم مبينة ومقرونة بمعاملات نقل الماء إلى الخلية في الجدول التالي (الجدول رقم ٤-١٣) وقد أدرج العالمان المذكوران بعض القيم المستنتجة من هذه القياسات لكل من خلايا نباتات راقية وخلايا بعض الطحالب لغرض المقارنة.

الجدول رقم (٤-١٣) معاملات نقل الماء إلى الخلية في بعض النباتات الراقية وبعض الطحالب . (Zimmermann and Steudle, 1980)

نوع الخلية	حجم الخلية (نانولتر)	ضغط الامتلاء (ثانية)	نصف الزمن لتبادل الماء (ثانية)	معامل مرونة الجدار (بار)	التوصيلية الهيدروليكية سم/ثانية/بار	الاسم العلمي للنبات
خلية غدية	٣٠٠- ٢٠٠	صفر ٣- ٤	٢٠٠- ٢٠٠٠٠	٥ ٥٠- ١١٠	٢×١٠$^{-٦}$	*Mesembryanthemum crystallinum*
خلية تمثيلية من الثمرة	٢- ١٥	٠,٥ ٣,٥	١٥٠- ٢٥٠	٢- ٥ ٥- ٢٥	٤- ٦×١٠$^{-٧}$	*Capsicum annuum*

تابع الجدول رقم (٤–١٣) .

نوع الخلية	حجم الخلية (نانولتر)	ضغط الامتلاء (ثانية)	نصف الزمن لتبادل الماء (ثانية)	معامل مرونة الجدار (بار)	التوصيلية الهيدروليكية سم/ثانية/بار	الاسم العلمي للنبات
خلية بشرة خلية مساعدة خلية تمثيلية	٠,٥٣ -٠,١٧ ٠,١٨ -٠,٠٥ ٠,٠٨ -٠,٠٥	٥ -٤ ٤,٥ -٤ ٣ -٢	٣٥٠ -٤٠ ٣٥٠ -٤٠ ٨٠ -٣٠	١٠٠ -٤٠ ٨٠ -٥٠ ١٤ -٩	٠,٥ -١٠×٤ $^{-٧}$ ٠,٢ - ١٠×٢,٥ $^{-٧}$ ٤- ١٠×٨٦ $^{-٧}$	*Tradescantia virginiana*
خلايا مزروعة من نسيج تمثيلي	٠,٧ -٠,٠٨	٤ -٢	٢٥ -١٥	٢٠ -٩	١- ١٠×٢ $^{-٦}$	*Chenopodium rubrum*
خلايا ورقة	٠,٦ -٠,٤	٣٠ -١٥	١٠ -٢	٥٠ -١٠	..×١٠ $^{-٦}$	*Kalanchoe daigremantiana*
طحلب بحري	١- ٢٥×١٠ $^{-٤}$	صفر ٤	-٢٠٠ ٦٠٠	٣٠ ١٢٠- ٦٠٠	٣- ٨×١٠ $^{-٦}$	*Valonia utricularis*
طحلب ماء عذب	٢- ١٠×١٠ ^{٣}	صفر ٤,٨	٤ -٢	١٠٠ -٥٠ ٣٠٠ -١٠٠	٥×١٠ $^{-٥}$	*Nitella flexilis*
الطور الجاميتي	٣- ٤×١٠ ^{٤}	٠,١ ٠,٩	-٢٥٠ ٣٥٠	١ -٢ ٥ -١٥	١- ٣×١٠ $^{-٦}$	*Halicystis parvula*

obeikandl.com

تجدر الإشارة بالنسبة لجدول رقم (٤-١٣) أن التوصيلية الهيدروليكية (النفاذية) قد تم حسابها من ثابت معدل تبادل الماء (نصف الزمن لتبادل الماء) بافتراض أن خلايا النسيج تسلك مسلك الخلية المنفردة (أي أنه لا تأثير للخلايا المجاورة).

وفي محاولة لمعرفة تأثير بعض الظروف المعملية في العوامل المذكورة في الجدول السابق وفي خلايا بشرة من نباتي (*Tradescantia virginiana*) و (*T. andersoniana*) قام توموز وآخرون ١٩٨١م (Tomos, et. al.,1981) بقياس التوصيلية الهيدروليكية ومعامل مرونة الجدار بمسبر الضغط لأعمار مختلفة وللورقة المفصولة عن النبات أو المتصلة به والمحتوى المائي حيث تبين عدم تغير هذه العوامل عن مداها تغيرا كبيرا أما درجة الحرارة فإن التوصيلية الهيدروليكية تزداد بمقدار ٢ إلى ٤ عند رفع درجة الحرارة ١٠ درجات مئوية. أما مثبط التنفس (KCN) فليس له تأثير يذكر عند تركيز ٠,١ مليجزيئي حجمي.

الفصل الخامس

انتقال الماء إلى النبات

- المقدمة • تركيب الجذر
- حركة الماء إلى الخشب
- العوامل المؤثرة في الامتصاص
- صعود العصارة في الخشب

(٥-١) المقدمة

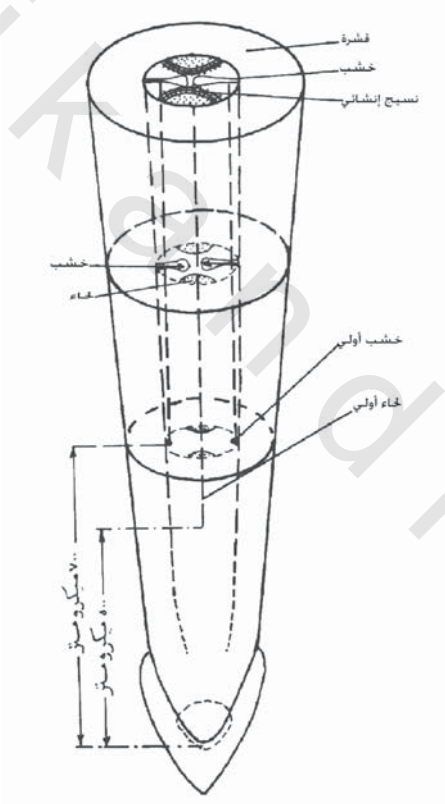
تحت الظروف الطبيعية المعتادة تقوم غالبية النباتات الراقية التي تنمو على اليابسة بامتصاص الماء من التربة بواسطة جذورها ومن ثم ينتقل ذلك الماء إلى أوعية الخشب ومنها إلى أجزاء النبات الأخرى. وتجدر الإشارة إلى أن امتصاص الماء ليست الوظيفة الوحيدة للجذور عموما بل تقوم الجذور بتدعيم النبات وتثبيته في التربة وكذلك امتصاص ما يحتاجه النبات من أملاح معدنية، وفي بعض الحالات تتكافل الجذور مع بعض الكائنات الحية الأخرى. إن التعدد في الوظيفة يزيد من أهمية معرفة التركيب العام لهذا العضو المهم في النبات، ومع أن الشرح يطول في مثل هذه الحالة لذا فإن نبذة مختصرة عن التركيب وخاصة ما يتصل بالموضوع

obeikandl.com

الأساسي قد يسهل شرح مسار الماء عبر الجذر حتى يصل إلى جزء النسيج التوصيلي الذي يسير عبره الماء، ألا وهو الخشب.

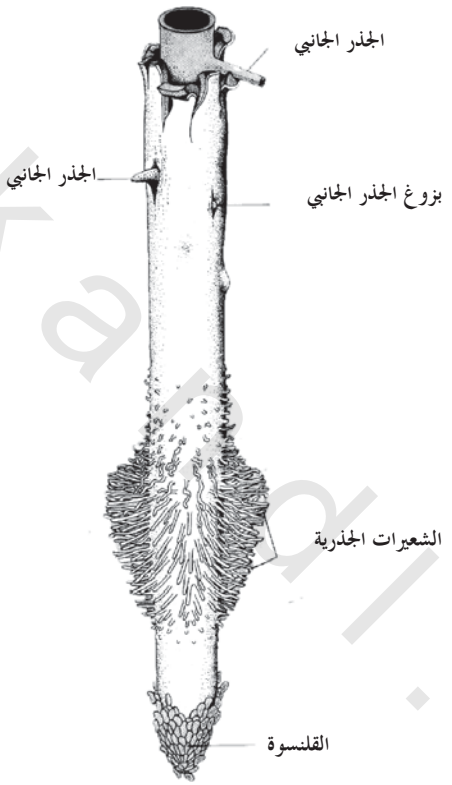
(٥-٢) تركيب الجذر

إن غالبية جذور النباتات أسطوانية الشكل وتنتهي بقلنسوة يليها منطقة الشعيرات الجذرية ثم منطقة الجذور الجانبية كما يتضح من الشكل رقم (٥-١). ومن



الشكل رقم (٥-١). رسم تخطيطي مجسم للجذر لتوضيح مناطق تميز النسيج التوصيلي على وجه التقريب وبعد تلك المناطق عن القمة.

السهل والمفيد تصور شكل الجذر بالنظر إلى قطاعات طولية وعرضية أو إلى رسوم تخطيطية لتلك القطاعات والتي يمكن رسمها في شكل ذي ثلاثة أبعاد كما في الشكل التالي (الشكل رقم ٥-٢).



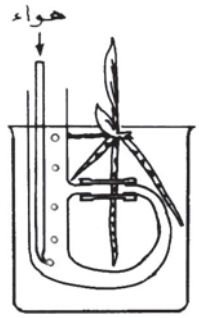
الشكل رقم (٥-٢). جزء من طرف الجذر يوضح العلاقة الموضعية بين القمة النامية (مغطاة بالقلنسوة) ومنطقة الامتصاص (الشعيرات الجذرية) ومواقع خروج الجذور الجانبية.

المصدر: (Raven et. Al., 1999).

obeikandl.com

يتبين من الرسم المذكور أن الجذر يتكون من عدة أنواع من الأنسجة، ومن ناحية أخرى يتكون من عدة مناطق بدءاً من القمة حيث القلنسوة والتي هي عبارة عن خلايا غير متميزة تماما وذات جدر ابتدائية قوامها لزج نوعاً ما، مما يتناسب مع وظيفتها حيث تتفكك هذه الخلايا عند تقدم الجذر في التربة مما يساعد على التقليل من الاحتكاك مع حبيبات التربة ولذا فهي أيضاً تحمي المنطقة الثانية والتي تليها وهي المنطقة الإنشائية القمية حيث الانقسام الخلوي السريع. والانقسام هنا ليس عشوائيا بل منظم بحيث ينتج في النهاية التنظيم الطبوغرافي لطبقات الجذر وأنسجته المختلفة. وتلي المنطقة الإنشائية هذه منطقة الاستطالة حيث تستطيل الخلايا في اتجاه محور الجذر مما يؤدي إلى دفع قمة الجذر إلى داخل التربة. ويعتمد طول هذه المنطقة على نوع النبات وحالته الفسيولوجية. أما المنطقة التي تلي منطقة الاستطالة فهي منطقة التميز حيث الشعيرات الجذرية، والخلايا في هذه المنطقة تبدأ طبقيا في اتخاذ الشكل المتخصص والمميز للنسج التي ستتكون فيما بعد، ويلاحظ توقف استطالة الخلايا، هنا فقط يمكن التمييز بين أنواع الخلايا الجذرية. وهذه المنطقة من الجذر هي المنطقة التي تمتص معظم الماء اللازم للنبات كما يستدل على ذلك من الدراسات التي أجريت باستخدام أنواع مختلفة من البوتوميترات على مسافات مختلفة من قمة الجذر، وكمثال لهذه البوتوميترات فالشكل رقم (٥-٣) يوضح رسما تخطيطياً لبوتوميتر استخدمه كل من ويب وكريمر ١٩٥٤م (Wiebe and Kramer, 1954)، لقياس معدل الامتصاص على مسافات مختلفة من قمة الجذر وذلك باستخدام محاليل بها مواد مشعة، ويلاحظ أن الهواء المستخدم يقوم أيضا بتحريك السائل حول الجذر بتكوين تيار مستمر.

وقد دلت الدراسات على أن المنطقة الإنشائية القمية لا تمتص إلا قليلاً من الماء نظراً للمقاومة العالية لدخول الماء حيث تحتوي الخلايا على سيتوبلازم كثيف علاوة



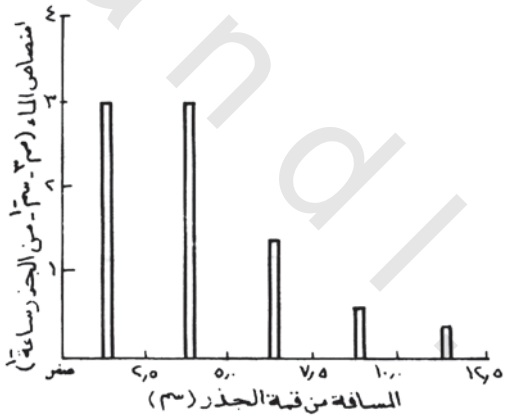
الشكل رقم (٥–٣). أحد أنواع البوتوميترات البسيطة لقياس امتصاص الماء والأملاح في أي منطقة على طول الجذر باستخدام المواد المشعة . يمر الجذر عبر ثقب مناسب في وصلة الأنبوبة المطاطية وتيار الهواء يعمل على تحريك السائل حول الجذر.

المصدر: (Wiebe and Kramer, 1954).

على عدم وجود أنسجة توصيلية في تلك المنطقة لاستقبال الماء، أما المنطقة التي قد تميزت وظهرت بها الأنسجة التوصيلية فيحدث بها أعلى معدل لامتصاص الماء وهي بالطبع منطقة الشعيرات الجذرية. وبالطبع يخضع امتصاص الماء لعدة عوامل ستذكر لاحقا ولكن بالنسبة لتوزيع معدل امتصاص الماء على مناطق الجذر العامة فإنه يختلف طبقا لطول الجذر وعمره ومعدل نموه علاوة على بعض العوامل الداخلية الأخرى. يقترن الاختلاف هنا بالاختلاف في التركيب، فمثلاً عند اقتراب فصل الشتاء فإن منطقة الامتصاص في الجذر قد تعدم نتيجة لتكوين تراكيب غير منفذة للماء في تلك المنطقة كحماية للجذر ومنها تكوين بشرة خارجية بها مادة سوبرين أو تكوين بشرة داخلية قريبة جدا من قمة الجذر.

أما المناطق التي تلي هذه المنطقة وفي اتجاه المجموع الخضري فإن امتصاص الماء

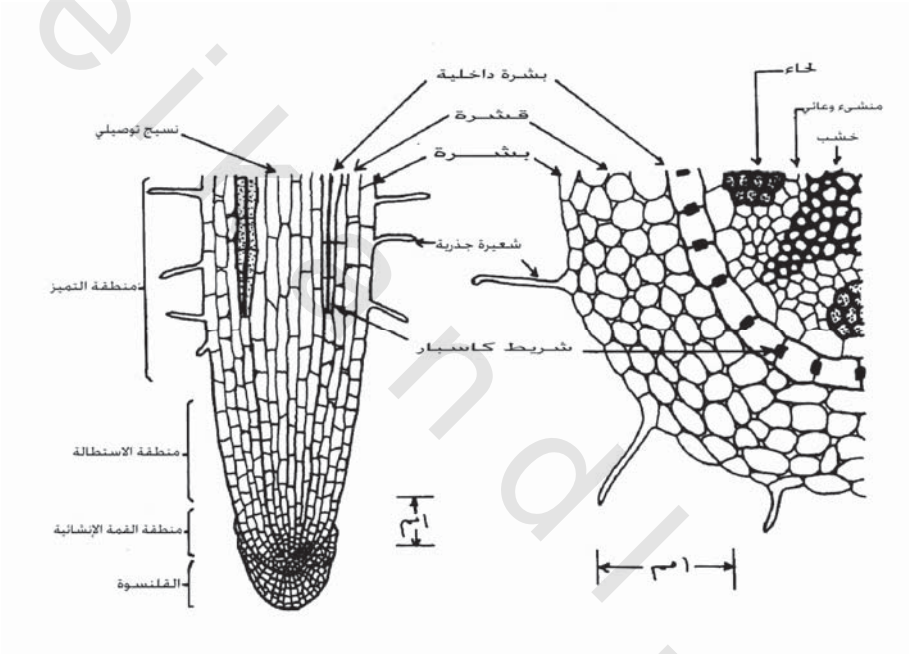
عن طريقها على وجه العموم قليل نظراً للمقاومة العالية لدخول الماء نتيجة لانخفاض نفاذية الماء فيها حيث تختفي الشعيرات الجذرية وتبدأ عملية ترسيب المواد الكيوتينية والسويرين على البشرة وقد يحدث تكوين طبقة بشرة خارجية (Exodermis) أو يحدث تغلظ ثانوي كما في نباتات ذوات الفلقتين أو عاريات البذور أو يحدث تكوين جذور جانبية حسب نمو الجذر ونوع النبات. وهذه المنطقة قد تكون طويلة جداً حيث قد تصل إلى عشرات الأمتار حسب نوع النبات أيضا. من هنا فإن أسرع معدل لامتصاص الماء هو في المنطقة الواقعة خلف المنطقة الإنشائية للجذر الأساسي أو الجانبي وتقارب ١,٥ إلى ٢٠ سم من قمة الجذر حسب نوع النبات ومعدل استطالة الجذر، والشكل رقم (٥-٤) يوضح مقدار امتصاص الماء بواسطة نبات الفاصوليا مع البعد عن قمة الجذر.



الشكل رقم (٥-٤). العلاقة بين معدل امتصاص الماء لمناطق مختلفة من جذر نبات الفاصوليا (كما تحددها المسافة من قمة الجذر) عند تعريضها لضغط ثابت (٠,١٣ ميجاباسكال).

المصدر: (Brouwer, 1954).

مما تقدم يتضح أن أهم منطقة في الجذر بالنسبة لامتصاص الماء هي منطقة الشعيرات الجذرية ولتوضيح أنواع الخلايا وترتيبها فقط في تلك المنطقة فالشكل رقم (٥-٥) عبارة عن رسم تخطيطي لقطع من قطاع عرضي في تلك المنطقة وقطاع طولي علما بأن منطقة القشرة أوسع حقيقة مما تبدو عليه في الرسم التخطيطي.



الشكل رقم (٥-٥). رسم تخطيطي يوضح طبقات الأنسجة التركيبية في الجذر في مقطع طولي وجزء عرضي على بعد واحد سم من قمة الجذر. ليس هناك تناسب لحجم الطبقات.

المصدر: (Cutler, 1978).

يتبين في الشكل المذكور أعلاه بدءا من الخارج إلى الداخل معظم الخلايا الممثلة لأنسجة الجذر التي تمر بها المادة المنقولة من التربة إلى داخل النبات ويمكن تلخيص هذه الأنسجة كالتالي:

١- البشرة

وهي طبقة الخلايا الخارجية التي تحيط بالجذر حيث معظم هذه الخلايا متشابهة في الشكل وذات فجوات كبيرة وتتميز بعض خلايا البشرة (Epidermis) في المنطقة التي يمر بها القطاع في الشكل السابق بتكوين امتدادات للخلية البشرية تخترق حبيبات التربة قد تصل في طولها إلى ما يقارب ١٥٠٠ ميكرومتر وهذه الامتدادات تعرف بالشعيرات الجذرية، والشعيرات الجذرية نادرا ما تكون متشعبة ولكن نواة الخلية تنتقل إليها. يخضع عدد الشعيرات الجذرية في الجذر الواحد لنوع النبات حيث يصل عددها في النباتات العشبية إلى أكثر من ألف مليون شعيرة جذرية وهذا العدد الضخم من الشعيرات الجذرية يبين أهمية زيادة السطح المتصل بالتربة لتسهيل عملية الامتصاص. إن هذه الخلايا تبدأ بالانقراض في المنطقة البعيدة عن القمة تدريجيا حيث يحل محلها خلايا الطبقة التي تليها لتكون البشرة. هذا من ناحية، ومن ناحية أخرى تبدأ هذه الخلايا في التكوين في المنطقة القريبة من القمة أي أن هذه المنطقة في حركة مستمرة وبالمثل أيضا المناطق الأخرى.

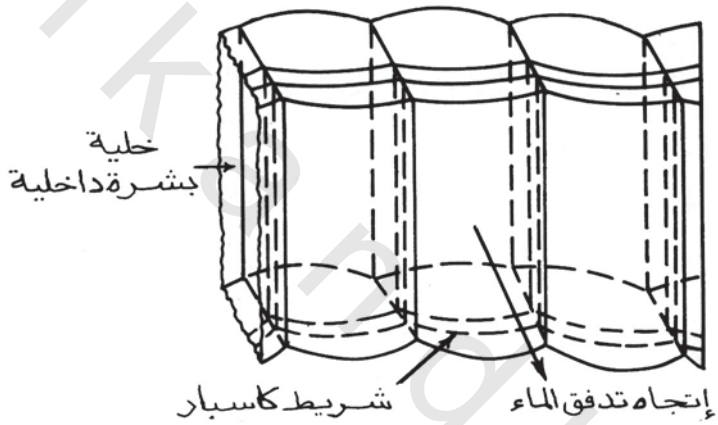
٢- القشرة

وهي عبارة عن الخلايا البرنشيمية كبيرة الحجم نسبيًّا والتي تلي البشرة إلى الداخل والتي أيضا تتعلق بتخزين الغذاء في الجذور. ومن أهم ما يميز القشرة (Cortex) هو وجود مسافات بينية كبيرة. في بعض أنواع الجذور تتحول هذه الخلايا إلى نسيج تخزيني حيث تتراكم فيه بعض المواد كالنشا والسكروز والأنيولين. والقشرة ليست نسيجاً متجانساً دائماً إذ توجد في بعض النباتات بعض الألياف أو الخلايا الكولنشيمية.

obeikandi.com

٣- البشرة الداخلية

وهي عبارة عن طبقة الخلايا الداخلية من القشرة والتي تكون متراصة كغلاف يحيط بالنسيج التوصيلي. وتتميز البشرة الداخلية (Endodermis) بترسبات من مادة السوبرين على أجزاء متصلة من جدار الخلية الذي يظهر في المقطعين العرضي والقطري والتي أطلق عليها شريط كاسبار (Casparian strip) نسبة إلى مكتشفه (الشكل رقم ٥-٦).



الشكل رقم (٥-٦) رسم مجسم لثلاث خلايا من خلايا البشرة الداخلية بالوضع الذي يشير السهم إلى اتجاه تدفق الماء وشريط كاسبار في جزء الجدار الخلوي القطري وليس المماسي الذي ينتقل الماء عبره بحرية بعد مروره بالخلية.

المصدر: (Esau, 1960).

لهذا التركيب في جدار خلية البشرة الداخلية أهميته الخاصة في تحديد نهاية انتقال الماء والأملاح في الأجزاء الميتة من الخلايا وما بينها حيث إن هذه المادة لا تسمح بمرور الماء وما به من مواد ذائبة كما سيرد. لذا فلا بد أن تمر هذه المواد عبر الخلية في البشرة الداخلية أي لا بد وأن تمر هذه المواد عبر الغشاء الخلوي ذي النفاذية الاختيارية.

في غياب النتح في النبات (أثناء الليل)، قد تتكون نتيجة لوجود هذا التركيب ظاهرة الضغط الجذري حيث تندفع المحاليل في أوعية الخشب.

٤- الأنسجة التوصيلية

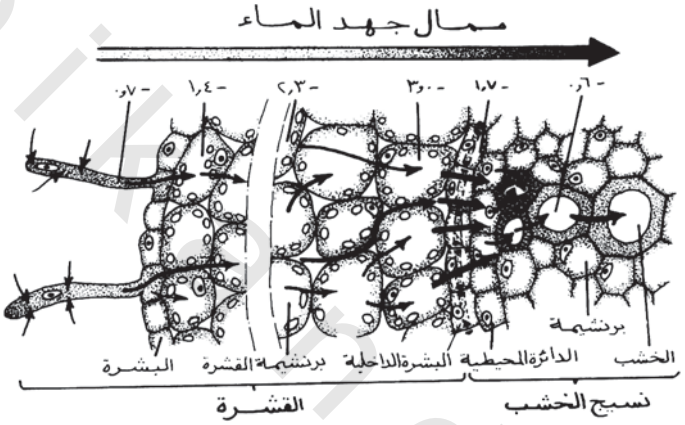
وهي عبارة عن المحور المركزي في الجذر وهي عبارة عن نسيج مركب يضم نسيجي الخشب واللحاء حيث تغلفهما طبقة من الخلايا بعد البشرة الداخلية يطلق عليها الدائرة المحيطية، والأخيرة هي منطقة تكوين الجذور الجانبية. إن نسيج الخشب يقوم بتوصيل الماء والأملاح وغيرها من الجذور إلى المناطق الأخرى عبر تيار النتح بينما نسيج اللحاء يوصل المواد المصنعة في المناطق الأخرى إلى قمة الجذر وغيرها لكي تستغل هذه المواد في نمو القمة النامية للجذر أو تختزن في القشرة. بصفة عامة، يترتب هذان النسيجان في النبات بالتبادل ليكونا ما يعرف بالحزم الوعائية والتي يختلف عددها في الجذور باختلاف النبات.

إن الخشب نسيج مركب حيث يتكون من أوعية وقصيبات وألياف وخلايا برنشيمية سيرد شرح تركيبها لاحقا ولكن الخلايا البرنشيمية قد ينشط بعضها ويتحول إلى منطقة إنشائية عند حدوث التغلظ الثانوي.

(٥-٣) حركة الماء إلى الخشب

إن المقدمة المختصرة السابقة عن تركيب الجذر الابتدائي تعطي أهمية لدور ذلك العضو في عملية انتقال الماء وليست بأية حال تحدد أن دخول الماء للنبات يتم عن طريقها فقط، بل الماء يدخل إلى النبات من طرق أخرى كالجذور التي حدث لها تغلظ ثانوي حيث تحوي مناطق تشبه العديسات وحتى الأنسجة التي ترسبت بها مادة السوبرين وكذلك اللحاء الثانوي لا يمكن أن يكون بها مقاومة لدخول الماء كتلك

المقاومة الموجودة في البشرة الداخلية. هذا من ناحية ومن ناحية أخرى فقد يمتص النبات جزءا من الماء عن طريق الأوراق حسب بيئته التي ينمو بها. أما مسار الماء من التربة إلى الخشب في الجذر الابتدائي وبالذات في منطقة الشعيرات الجذرية فكما يبينه الشكل رقم (٥-٧) الذي هو عبارة عن رسم تخطيطي لجزء من مقطع عرضي في تلك



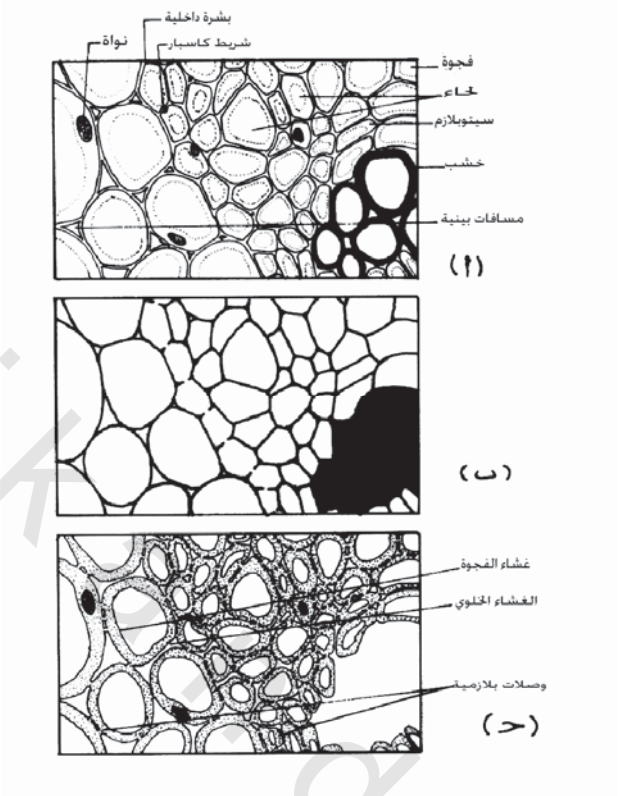
الشكل رقم (٥-٧). رسم تخطيطي لجزء من قطاع عرضي في الجذر، حيث توضح الأسهم الاتجاه العام لحركة الماء القطرية من التربة إلى نسيج الخشب، والقيم تقريبية لجهد الماء (بار).

المصدر: (Cutler, 1978).

المنطقة حيث الأسهم تشير إلى المسارات الممكنة لحركة الماء القطرية من التربة وحتى أوعية الخشب. ويمكن تلخيص ذلك أن الماء يدخل إلى الشعيرة الجذرية ومنها قد ينتقل إلى الخلية المجاورة عبر المادة الحية (الوصلات البلازمية) في القشرة أوقد ينتقل في الجدر الخلوية أو فيما بينها حتى يصل إلى منطقة البشرة الداخلية حيث يوجد

شريط كسبار والذي يمنع مرور الماء عبر المادة الميتة (الجدار الخلوي) وهنا يلتقي المساران إذ لابد من مرور الماء عبر خلية البشرة الداخلية ومن ثم خلايا الدائرة المحيطية ومنها إلى وعاء الخشب. يستدل من هذا الوصف العام وجود مسارين للماء في القشرة، أحدهما من خلية لأخرى عبر المادة الحية والآخر هو انتقال الماء في المسافات البينية والجدر الخلوية الميتة حتى يصل إلى البشرة الداخلية ومن هنا ظهرت فكرة النقل عبر المادة الحية والنقل عبر المادة الميتة فيما يعرف باسم (Apoplast-symplast concept) التي قدمها العالم مونك ١٩٣٠م (Munch, 1930) واقترح فيها تسمية المادة الحية في الجذر باسم (Symplast) بينما المادة الميتة والمسافات البينية باسم (Apoplast) والشكل رقم (٥-٨) عبارة عن ثلاث رسومات تخطيطية لجزء من مقطع عرضي في جذر الشقيق موضح عليه تلك التسميات، وقد ثبت أن هذا التقسيم مفيد في المناقشات العلمية. وبالطبع تختلف كمية الماء المنقول في أي من المسارين المذكورين حسب المقاومة الموجودة لحركة الماء في أي منهما حيث تزداد كمية الماء المنقولة مع المسار الذي به أقل مقاومة، والمادة الحية أكثر إعاقة لحركة الماء وقد يصل ما ينقل عبر هذا المسار إلى ١٠٪ من كمية الماء. إن انتقال الماء من التربة إلى الوعاء يختلف بالطبع عن انتقال الأيونات حيث إن انتقال الماء عبارة عن عملية نقل بسيط أي غير نشط ولا تبذل الخلية أو الخلايا في نقله أية طاقة مباشرة حيث القوة المحركة لانتقال الماء وتدفقه إلى أوعية الخشب ما هي إلا وجود ممال لفرق جهد الماء بين البيئة الخارجية (محلول التربة) والبيئة الداخلية (عصارة الخشب).

قد يكون من السهل على النبات إبقاء مثل هذا الفرق بين البيئتين وأقرب النظريات لتفسير ذلك هي عن طريق ضخ الأيونات إلى أوعية الخشب مما يتسبب في تكوين ضغط هيدروستاتيكي في تلك الأوعية في بعض الظروف وهذا ما عرف بظاهرة



الشكل رقم (٥–٨). أ–رسوم تخطيطية لجزء من قطاع عرضي في جذر نبات الشقيق. ب–الأجزاء الميتة من الخلايا (Apoplast) باللون الأسود، و جـ–الأجزاء الحية من الخلايا (Symplast) الأجزاء المنقطة.

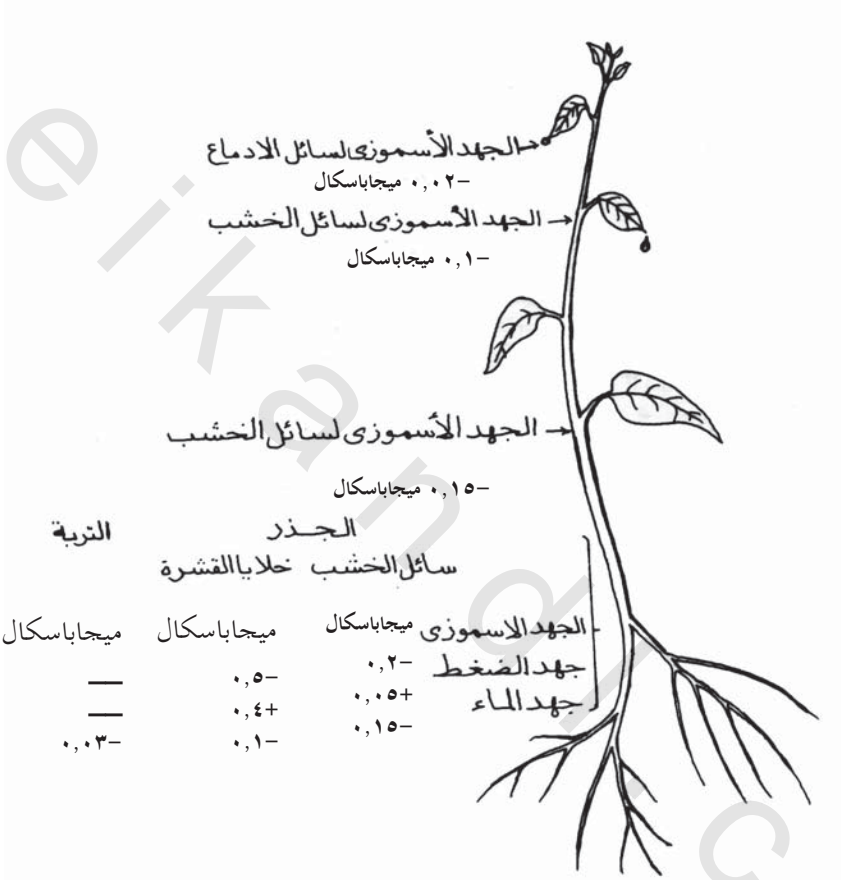
المصدر: (Baron, 1967).

الضغط الجذري. وبذا فإن أوعية الخشب تعمل كجزء من أسموميتر حيث الغشاء شبه المنفذ هو عبارة عن طبقة خلايا البشرة الداخلية كما هو موضح في الشكل السابق (الشكل رقم ٥–٥). وبتتبع ممال الجهد في الشكل المذكور يتضح أيضا أن هناك ممال في الجهد بين البيئة الخارجية (محلول التربة) متدرج حتى البشرة الداخلية ولكن من هناك يبدو أن الممال ينعكس في التدريج حتى أوعية الخشب. وعلى أية حال، فالأرقام

المذكورة هي أرقام توضيحية وعمل مثل هذه القياسات أساسا قد لا يكون له مغزى كبير ما دام أن هناك حالة اتزان بين امتصاص الماء بواسطة الجذور وفقد الماء بواسطة النبات تحت الظروف الطبيعية. وقد يكون هناك تغيير كلي في حالة الاتزان عند قطع النبات لإجراء مثل هذه القياسات، لذا فهذه الأرقام ليست بالتأكيد تمثل ما هي الحالة عليه في النبات القائم. وحالة النبات المتكامل تحت الظروف الطبيعية تسوده قوة النتح لامتصاص الماء من التربة أي أن المجموع الخضري هو الذي يتحكم في معدل دخول الماء إلى الجذور بدلا من تحكم الجذور في معدل تدفق الماء، لكن ظاهرة الضغط الجذري في بعض النباتات عند قطعها قد أبرزت الكثير من المحاولات لتفسيرها على أنها عملية امتصاص للماء نشط، ومن المحاولات العديدة لتفسير ظاهرة الضغط الجذري نظريات تفترض وجود نشاط إفرازي لخلايا الجذور إلى الخشب وهذا الافتراض في حد ذاته يتطلب من الخلايا بذل طاقة للاستمرار في عملية إفراز الماء إلى أوعية الخشب وهذا غير محتمل وليس من دليل عليه مما يقلل من أهمية هذه النظريات. وأكثر من ذلك، فالكثير من الأدلة لا تؤيد ذلك ومن أهمها نفاذية الأغشية الخلوية العالية للماء.

تتخذ النظريات الأخرى والتي تحاول تفسير الضغط الجذري على أنه عملية امتصاص نشط من الأسموزية الكهربية أداة كأن يكون نقل الماء إلى الخشب من خلايا الجذر ناتج عن وجود فرق في الجهد الكهربائي بين الخلايا والخشب وهو تفسير مبنى على ظاهرة أن الماء ينتقل تحت تأثير تيار ثابت بناء على خواص جزيء الماء القطبية كما ذكر سابقا. وقد قيس بالفعل فرق جهد بين المنطقتين يقارب ١٠٠ مليفلت، لكن البعض (Dainty, 1963) يعتقد أن هذه النظريات محدودة في كونها وسيلة فعالة في تدفق الماء إلى الخشب ولكن هذا الرأي لا يعني الاستغناء عن هذه النظريات ويجب أن تؤخذ في الحسبان إذ قد يتبين مستقبلا أن هذه النظريات من الأهمية بمكان ولكن الدليل على ثبوتها في الوقت الحاضر غير كاف لقبولها تماما وذلك لأن التفسير الأكثر قبولا لدى غالبية علماء فسيولوجيا النبات في الوقت الراهن هو أن حركة الماء من التربة إلى أوعية

الخشب ما هو إلا نتيجة لفرق في جهده كما في ظاهرة الأسموزية حيث ينتقل الماء من المحلول المخفف إلى المحلول الأكثر تركيزا أي من منطقة جهد الماء العالي إلى منطقة جهده المنخفض كما يوضح ذلك الشكل التالى رقم (٥-٩).



الشكل رقم (٥-٩). رسم تخطيطي يوضح قيم الجهد الأسموزي في أحد النباتات حيث القيم نظرية ولكن الانخفاض العام واتجاهه مبني على دراسات أخرى (Oertli,, 1966). إن قيم مكونات جهد الماء للجذر توضح كيف يتكون ممال جهد الماء في نبات ينتج ببطء (بحيث يمكن إهماله) ليكون في النهاية ظاهرة الإدماع.

المصدر: (Kramer, 1969).

ومرة أخرى فالقيم المذكورة في الشكل افتراضية ولكن التدرج في القيم مشاهد [انظر أورتلي ١٩٦٦م (Oertli, 1966)]. ويوضح الشكل المذكور أيضاً إمكانية تفسير ظاهرة الإدماع الناتجة عن تكوين الضغط الجذري وهي تحدث في بعض النباتات. هذه الظاهرة عبارة عن خروج السائل بما فيه من أيونات وسكاكر وغيرها من النبات عن طريق تراكيب خاصة في الأوراق. والتشبيه هنا كما ورد أعلاه بأن الجذر يعمل عمل الأسموميتر حيث يحافظ الجذر على الفرق في الجهد الأسموزي عن طريق تراكم الأيونات أو ضخها إلى أوعية الخشب لتقوم بتخفيض جهد الماء هناك مما يؤدي إلى انتقال الماء كما نوه عن ذلك سابقاً، إلا أنه يجب التنويه هنا إلى أنه بقبول هذا التفسير، تظهر مشكلة تفسير كيفية تراكم الأيونات داخل أوعية الخشب أو بمعنى أدق آلية ضخ الأيونات والتي لا تزال غامضة، أضف إلى ذلك تفسير ما وجد من دورية في هذه الظاهرة (أي ارتفاع وانخفاض في قيم الضغط الجذري). وعلى أية حال، فالمهم هنا ليس تفسير آلية الضغط الجذري بقدر ما هو مهم أن يتضح أن الضغط الجذري لا يعتبر عاملا مهما في عملية امتصاص الماء لأن حجم الماء المتدفق بهذه الظاهرة لا يقارن مطلقا بكمية الماء المفقودة عن طريق النتح وهي الحالة الطبيعية التي عليها النباتات. علاوة على ذلك، فإن ظاهرة الضغط الجذري لا توجد في كل النباتات إلا أن كثرة البحوث في هذا المجال والمناقشات التي دارت حولها هي التي أبرزت هذه الفكرة في هذا المقام.

يبقى بعد ذلك ضرورة التأكيد بأن عملية امتصاص الماء ليست عملية مستقلة ولكنها في الطبيعة مقترنة ومعتمدة إلى حد ما على النتح، ولذا فإن عملية انتقال الماء من التربة إلى الهواء تعتبر عدّة عمليات مترابطة مع بعضها البعض والذي يحدد معدل تدفق الماء. في هذه العمليات هو بالطبع أبطئها أي تلك المنطقة التي تتصف بأكبر مقاومة لتدفق الماء. وهذا لا يعني عدم وجود آلية أسموزية معينة وخاصة عندما ينخفض أو

يعدم النتح أو عندما يزال المجموع الخضري من النبات في ظاهرة أخرى استغلت كثيرا في التحليل وبعض الدراسات الفسيولوجية الأخرى وهي ظاهرة تجميع سائل الخشب (Exudate).

وعلى العموم فإن امتصاص الماء بواسطة النبات ما هو إلا ظاهرة امتصاص غير نشط ويحدث نتيجة لانخفاض في جهد الماء في أوعية الخشب بسبب فقد كمية كبيرة من بخار الماء أثناء النتح.

(٥–٤) العوامل المؤثرة في امتصاص الماء

يتداخل كثير من العوامل في التأثير في امتصاص الماء، لذا تلاحظ الصعوبة الكبيرة في وصف ذلك رياضيا وذلك لأن المجموع الجذري- للنباتات سريعة النمو- يحتل مناطق جديدة من التربة باستمرار علاوة على تغير المناطق التي يحدث بها أكبر معدل للامتصاص في الجذور. وعلى أية حال فهناك العديد من العوامل التي تؤثر بطريقة مباشرة أو غير مباشرة في امتصاص الجذور للماء ومن الممكن تقسيم هذه العوامل حسب الأهمية في مصدر التأثير كأن تكون عوامل ناتجة من التربة وعلاقاتها أو من النبات أومن البيئة التي ينمو فيها النبات، والمهم هنا هو المتغير، أي تدفق الماء وكيفية التأثير في القوة المحركة، لذا فإن التقسيم في حد ذاته ما هو إلا وسيلة لتسهيل المناقشة وإيضاح المقصود، وما سيرد ذكره من عوامل في هذا الجزء لا يغطي بالطبع كل التأثيرات بقدر ما يبين العوامل الأكثر أهمية، كفعالية الجذور كأعضاء امتصاص وتيسر ماء التربة والظروف الجوية السائدة وغيرها.

١) فعالية الجذور كأعضاء امتصاص

تتأثر الجذور الابتدائية الصغيرة بالجاذبية الأرضية تأثرا موجبا (أي تنمو في

اتجاه محور الأرض) وبالمثل- ولكن على درجة أقل- تتأثر الجذور الجانبية بهذه الجاذبية طبقا لعددها وطبيعة نمو المجموع الجذري للنبات. والجذر الابتدائي يسيطر على الجذور الجانبية في الأقل لفترة معينة بحيث لو قطعت القمة النامية للجذر الابتدائي فإن أحد الجذور الجانبية يأخذ مكان الجذر الابتدائي في طبيعة النمو والسيطرة كما هو الحال في قمة المجموع الخضري حيث ظاهرة السيادة القمية. إن تأثر الجذور الابتدائية بالجاذبية مرتبط بملاحقة مصدر الماء حيث عند جعل مصدر الماء إلى أعلى فإن الجذر يتغلب على الجاذبية وينمو نحو مصدر الماء فيما يعرف بظاهرة الانتحاء الرطوبي.

وتختلف النباتات في مجموعها الجذري اختلافا كبيرا لا من حيث الشكل فقط بل وفي المقدرة على التعمق في التربة ومما لا شك فيه أن هذا ينعكس على اختلافها في امتصاص الماء. فبعض النباتات مثلا لها جذور تضرب في أعماق الأرض بحثاً عن الماء والمعادن والبعض الآخر يتصف بمجموع جذري ضحل لكنه قد يغطي مساحة كبيرة من الطبقة العلوية لسطح التربة وكلما زادت المساحة التي تغطيها جذور النبات كلما كانت كمية الماء الممتصة أكبر نظرا للزيادة الكبيرة في أسطح الجذور المتصلة بحبيبات التربة وبالطبع يحدد هذه الزيادة عدد القمم النامية. لكنه من الممكن التعميم على أن النباتات في الغالب تكون جذورا أكثر مما هو متطلب لتغطية الاحتياجات المائية للنبات.

تختلف الجذور في سرعة نموها حسب نوع النبات، فالنباتات الحولية تتميز بجذور سريعة النمو لذا فإن النمط السائد هو امتصاص ماء التربة بالقرب من النبات حتى يصل جهد الماء تقريبا إلى النسبة المئوية للذبول الدائم وبتقدم الجذور في التربة يزداد حجم التربة الجاف حول النبات تدريجيا. أما الأشجار والنباتات المعمرة، فإن

نمط امتصاص الماء يختلف لأن مثل هذه النباتات تتميز بجذور عميقة وقد تمتص الماء الموجود على عمق كبير بينما الطبقة العلوية من التربة قد تكون في سعتها الحقلية أو تكون جافة، أي أن الطبقة العلوية من التربة بالنسبة للنباتات عميقة الجذور ليست محددة لنموها ولذا فإن مثل هذه النباتات لا تبدو عليها آثار الجفاف المميتة للنباتات الحولية. من هذا المنطلق نجد أنه في كثير من المحاولات لاستزراع الغابات ببعض الأنواع على تربة غير عميقة تبوء بالفشل وخاصة إذا كان هناك فصل جفاف لأن مثل هذه الشجيرات لا تجد مجالا لنمو جذورها وبذا تكون محدودة في طبقة الأرض الرقيقة التي تجف في فصل الجفاف مؤدية إلى موت الشجيرات. وقد يدخل ضمن هذا المجال ما يشاهد في البيئة المحلية من أن بساتين النخيل التي تسقى دائما تموت لو تعرضت لنقص في الماء كنضوب الآبار لفترة طويلة بينما مزارع النخل التي تنمو على السيول أو فترات من الري الجيد (أي التي تعطش) تقاوم الجفاف أكثر من المجموعة الأولى. إن ما تقدم لا يعني أبدا أن كل الأشجار على هذا النمط بل هناك كثير من الأشجار التي تنمو على تربة متوسطة القوام غالبية جذورها تكون في المترين العلويين من التربة حيث يكون التنافس على أشده في هذه الأنواع.

إن المجموع الجذري لأي نبات هو عدد من الجذور التي تمثل أطوارا متعددة من مراحل التميز حيث القمم النامية حديثة التكوين والجذور مكتملة النمو حيث تغلفها طبقة من الخلايا أو الأنسجة التي تدخل في تركيب جدرها مادة السوبرين (أي جذور متسوبرة) ولذا فإن نفاذية الجذور للماء تختلف اختلافا كبيرا في أي منطقة من مناطق الجذور. يستدل على ذلك من القياسات التي أجريت لحساب معدل تدفق الماء إلى الجذر كما يبين ذلك الجدول التالي (الجدول رقم ٥-١).

الجدول رقم (٥–١). معدل دخول الماء إلى الجذور [جمعها كريمر ١٩٦٩م (Kramer, 1969)].

الجزء المستخدم والظروف	معدل تدفق الماء (مم^{٣}.سم$^{-٢}$.ساعة$^{-١}$)
جذور صغيرة من الذرة في الماء	٢٠
جذور صغيرة من البصل في الماء	٥٠,٤
شعيرات جذرية من الفجل	١٨,٦
جذر (متسوبر) من البرتقال في الماء	٥,٠
جذر (متسوبر) من الصنوبر في الماء	٣,٣٧
المجموع الجذري لنبات القهوة في التربة	٠,٢٥

في الجدول السابق تمت القياسات باستخدام البوتوميتر ما عدا نبات القهوة حيث القيمة حسبت من معدل النتح وتقدير أسطح الجذور لكامل النبات.

على أية حال فالجدول السابق يؤكد بأن دور الجذور مكتملة النمو (المتسوبرة) لا يمكن إغفاله في عملية الامتصاص، وهذا النوع من الجذور يتميز بنفاذية للماء متغيرة حسب الظروف السائدة وحجم الجذر كما يؤيد ذلك ما أورده كريمر ١٩٦٩م (Kramer, 1969) من أن معدل امتصاص الماء بواسطة جذر أحد أنواع الصنوبر يختلف باختلاف حجم الجذر حيث الجذر الذي قطره يساوي ١,٣٣ مم يكون معدل تدفق الماء به ٦,٦ مم^{٣}/ سم^{٢}/ الساعة بينما لو كان القطر ٣ مم فإن المعدل يصل إلى ٣٦,٣ مم^{٣}/ سم^{٢}/ الساعة، هذا بالنسبة للجذور (المتسوبرة) أما الجذور الأخرى فالتدفق يساوي ١٧٨ مم^{٣}/ سم^{٢}/ الساعة.

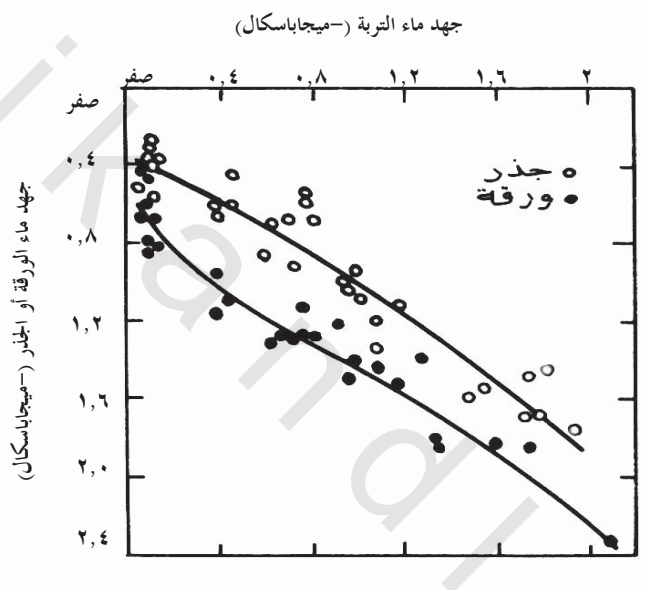
قدرت نفاذية الجذور للماء لقطع من الجذور الصغيرة درست من قبل علماء آخرين وأوردها العالم سلاتير ١٩٦٧م (Slatyer, 1967) حيث قدر معامل النفاذية لجذور الفول بأنه ٠,١ – ٢,٢×١٠$^{-٦}$ سم/ ثانية/ بار ولجذور الشوفان

٠,٢ – ٠,٨×١٠ ^-٧ سم/ ثانية/ ميجاباسكال أما لجذور الذرة فهي ٠,٦×١٠ ^-٧ سم/ ثانية/ ميجاباسكال. وبالطبع هذه القيم ليست مختلفة كثيرا عن القيم التي وردت سابقا بالنسبة للخلية مما يدل بطريقة غير مباشرة على وجود حاجز خلوي في الجذر لابد للماء من المرور به.مما تقدم ومن معرفة طبيعة تركيب الجذر يتضح أن الجذور في كثير من النواحي تعتبر من أفضل وأنسب الأعضاء لأداء وظائفها مثل اختراق التربة ومتابعة مصدر الماء وطبيعة النمو وامتصاص الماء والمعادن.

٢– تيسر ماء التربة

تمتص جذور النباتات الماء من التربة عند توافره بالشكل الممكن امتصاصه، أي أنه لابد وأن يكون هناك ممال في جهد الماء، فإن كان جهد الماء في محلول التربة أكثر انخفاضا من جهد الماء في خلايا الجذر فإن تدفق الماء يتوقف أو ينعكس، وفي الطبيعة تحدث مثل هذه الحالة عند تدني محتوى التربة المائي أو تجمده أو زيادة تركيز المواد الذائبة كالأملاح فيما يعرف بزيادة الملوحة وما إلى ذلك من عوامل متعددة ومتداخلة.
من هنا فإن تيسر ماء التربة خاضع بصفة أساسية لجهد الماء في محلولها والتوصيلية الهيدروليكية لمحلول التربة وهذان المتغيران مقترنان مع بعضهما البعض كما سبق ذكره (انظر الشكل رقم ٣–٢). أما وجود الممال في الجهد بين التربة والجذور فهذا خاضع لمدى جهد الماء في الجذور الذي يعتمد على نوع النبات وجهد الماء في أوعية الخشب. وتحت الظروف الطبيعية، فإن امتصاص الماء يحدث نتيجة لما يحدثه النتح من شد أي زيادة في الضغط الهيدروستاتيكي السالب على عمود الماء في أوعية الخشب مؤديا إلى انخفاض في جهد الماء الكلي حيث يزداد معدل تدفق الماء من التربة. في الظروف العادية وتحت ظروف النتح البسيط (أي الذي يمكن إهماله) يكون تأثير النتح في حدود ٠,١ إلى ٠,٢ ميجاباسكال أما في وقت الظهيرة وفي يوم مشمس قد يصل التأثير إلى ١,٥ أو

٢,٠ ميجاباسكال وهذا بالطبع يعتمد على النبات حيث قد يصل ذلك في النباتات الجفافية في حالة الجفاف الشديد إلى ٥ أو ١٠ ميجاباسكال. والشكل (٥-١٠) يوضح قياسات جهد الماء في الأوراق والجذور لنوع من أشجار الصنوبر مقرونا بقياس جهد ماء التربة.



الشكل رقم (٥-١٠). العلاقة بين جهد ماء التربة وجهد الماء في الجذر أو الورقة في أحد الصنوبريات في منتصف النهار حيث يتبين أن جهد الماء في الورقة أقل من جهد الماء في الجذر ما عدا في التربة الجافة فإن جهد ماء الجذر يقارب جهد ماء التربة مما يدل على عدم مواءمة الظروف لامتصاص الماء.

المصدر: (Kaufman, 1968).

إن تيسر ماء التربة للنبات مقترن بعوامل أخرى كتلك التي تؤثر في حركة الماء في

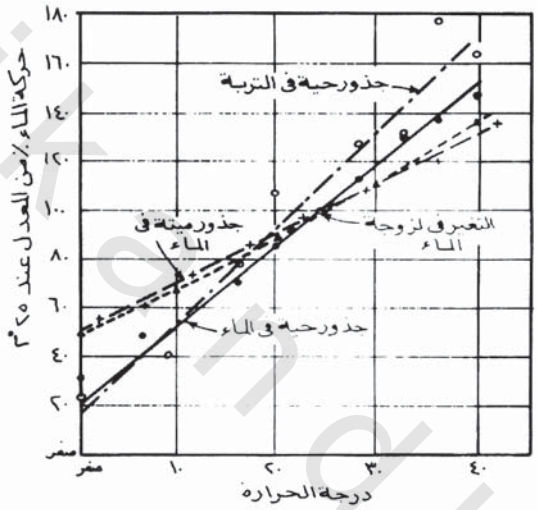
التربة والظروف المناخية وتهوية التربة وما يسببه نقصها من أضرار للجذور تعتمد شدتها على نوع النبات ودرجة الحرارة السائدة وحالة النبات ونوع التربة وطول الفترة ونوع الكائنات الدقيقة في التربة وما إلى ذلك من عوامل قد يطول شرحها.

٣- الظروف المناخية

يتأثر امتصاص الماء بواسطة جذور النباتات من التربة للظروف السائدة مثل الإضاءة ودرجة الحرارة وسرعة الرياح والرطوبة النسبية ولكن التأثير غير مباشر، أي أن هذه العوامل تؤثر في بعض العمليات الأخرى المرتبطة بعملية امتصاص الماء. وكمثال، فالضوء في الظروف الطبيعية هو الأساس في العملية حيث وجود الضوء يؤدي إلى فتح الثغور وبالتالي تبدأ عملية امتصاص الماء من التربة إلى الجذور. أما العامل المناخي الذي له تأثير في سير العملية فهو درجة الحرارة وخاصة الانخفاض في درجة الحرارة، أما الارتفاع فيها فلم يدرس بما فيه الكفاية نظرا للحد الطبيعي للحياة في ارتفاع درجة الحرارة. والنباتات عموما تختلف في تحمل فروق درجات الحرارة، ولذا فإن الحرارة عامل مهم في توزيع أنواع النباتات جغرافيا حيث إن النبات عرضة للجفاف والموت في كلا الحالتين نتيجة لفقد النبات كميات من الماء كبيرة عن طريق النتح وعدم تعويض ذلك من التربة المتجمدة أو الباردة مثلا لأن الجذور لا تستطيع مواكبة النتح في امتصاص الماء، وما ظاهرة الذبول في وقت الظهيرة لبعض نباتات المحاصيل رغم أن التربة قد تكون في سعتها الحقلية إلا مثال لعجز الجذور عن مواكبة النتح.

على العموم فإن النباتات التي تنمو غالبا في بيئات دافئة تتأثر بالانخفاض في درجة الحرارة للتربة أكثر من تلك النباتات التي تنمو في بيئات باردة، وذلك لأن الانخفاض في درجة الحرارة عموما يقلل من امتصاص الماء للتأثير الفيزيائي لدرجة

الحرارة على لزوجة الماء (تتضاعف اللزوجة لانخفاض قدره ٢٥ م تقريبا) وكذلك ازدياد المقاومة لدخول الماء إلى الجذور لتأثير الحرارة على النفاذية هذا علاوة على بعض التأثيرات الجانبية الأخرى ولكنها أقل أهمية مثل نمو الجذور وتقليل النشاط الأيضي لخلايا الجذر. هذا ويبين الشكل رقم (٥-١١) اختلاف حركة الماء في جذور حية وجذور ميتة عند درجات حرارة مختلفة.



الشكل رقم (٥-١١). تأثير درجة الحرارة في معدل حركة الماء في جذور حية وجذور ميتة بعد توصيل تلك الجذور بجهاز تفريغ الهواء عند ضغط يقارب ٦,٤ ميجاباسكال، وقد تركت الجذور الحية لمدة ساعة، وتم استخدام النسبة المئوية للمعدل عند درجة ٢٥°م للمقارنة بين الجذور الحية والميتة. وتقدير اللزوجة على أساس نسبة مقلوب اللزوجة النوعية عند درجة ٢٥°م. يتضح من الشكل أن الجذور الحية أكثر تأثرا من الجذور الميتة لاحتمال تأثير الحرارة على مقاومة حركة الماء عبر المادة الحية.

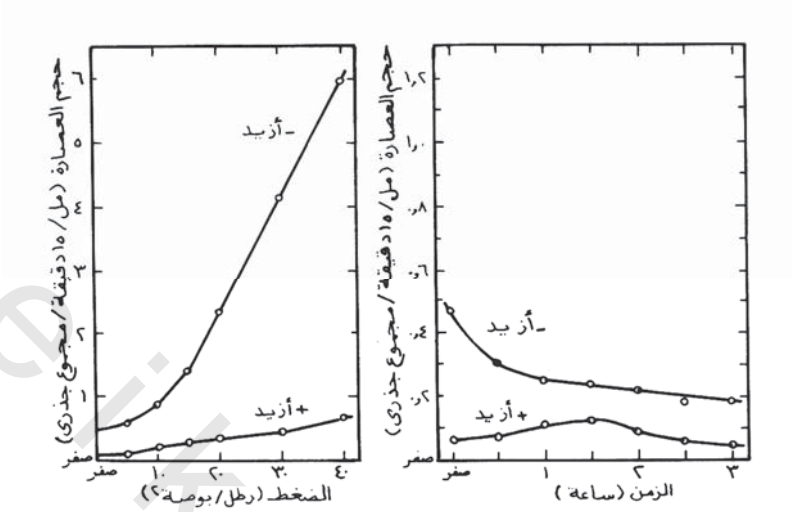
المصدر: (Kramer, 1940).

٤- عوامل أخرى

في خضم البحوث التي أجريت على امتصاص الماء وما تلي ذلك من مناقشات عن وجود امتصاص نشط للماء وتأثير العوامل المختلفة فيه، درس تأثير الهرمونات. وقد دلت الدراسات أن حمض الأبسيسيك (ABA) عندما يرش به المجموع الخضري يعمل على الإقلال من معامل نفاذية الجذور لكثير من النباتات وبالمثل الهرمونات الأخرى عند وضعها في المحلول المحيط بالمجموع الجذري مثل السيتوكينين وأندول حمض الخل (IAA) ولكن الفرق بين هذه الهرمونات هو زمن الاستجابة أي الفترة الزمنية اللازمة لظهور التأثير (Anderson, 1976). أما مثبطات التنفس فليس هناك علاقة مباشرة بين امتصاص الماء وتنفس الجذور وخاصة عندما يكون النبات في الحالة الطبيعية (أي حالة النتح المعتاد)، لأن الماء يمتص بواسطة النبات امتصاصا غير نشط كما سبق ذكره. ومع ذلك فقد دلت البحوث أن مثبطات التنفس مثل الأزيد والسيانيد وثنائي نترات الفينول تثبط امتصاص الماء بصورة واضحة (الشكل رقم ٥-١٢). ويفسر هذا التأثير على أنه ناتج عن التأثير المباشر لهذه المواد على المقاومة لحركة الماء بزيادتها أومن خفض تراكم الأيونات في الخشب حيث العملية الأخيرة نشطة وتعتمد على الطاقة المنبثقة عن التنفس.

(٥-٥) صعود العصارة في الخشب

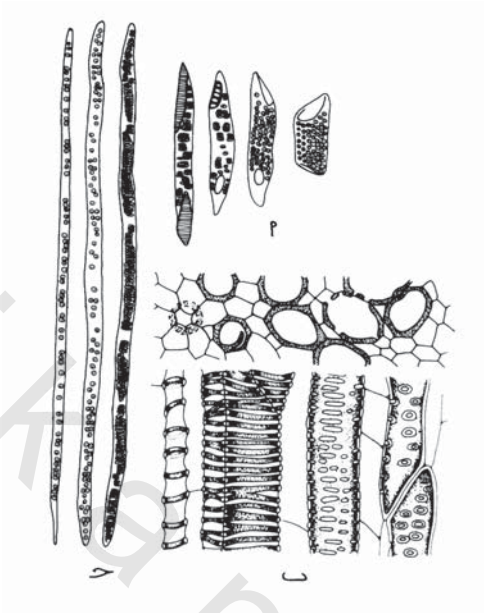
ينتقل الماء في نسيج الخشب من بداية تكونه في الجذر والذي في الغالب يكون على بعد عدة مليمترات من قمة الجذر وحتى نهاية نسيج الخشب في الأوراق مرورا بالساق وقد تصل المسافة إلى ما يقارب ١٠٠ متر أو أكثر في بعض النباتات. ويتم هذا النقل بسبب خصائص نسيج الخشب التركيبية والتي تغطى بالتفصيل في كتب التشريح [مثل إيشاو ١٩٦٠م (Esau, 1960)] أو بصورة مختصرة في كتب المقررات الأولية وليس



الشكل رقم (٥–١٢). تأثير تركيز ١٠–٣ جزيئي حجمي من أزيد الصوديوم في حركة الماء عبر المجموع الجذري لنبات الطماطم. تركت الجذور المعاملة بالأزيد لمدة ساعة قبل أخذ القراءات، والشكل الأيمن يدل على تجميع السائل الناتج عن الضغط الجذري مع الزمن بينما الشكل الأيسر يدل على معدل حركة الماء عند تعريض الجذور لضغط.

المصدر: (Lopushinsky, 1964).

هذا هو المجال لشرحها ولكن الشكل رقم (٥–١٣) يبين أهم مكونات النسيج المذكور. وباختصار ينتقل الماء في النباتات العشبية في حزم وعائية بينما في الأشجار ينتقل الماء فيما يعرف عادة باسم الخشب حيث النمو الثانوي. والخشب في عاريات البذور يتكون من قصيبات بينما يتكون في كاسيات البذور من قصيبات وأوعية. وتختلف هذه المكونات عن بعضها في كون القصيبات ذات نقر وطويلة نسبياً أما الأوعية فقصيرة وواسعة، وتلتصق نهايات الأوعية جانبياً كل وعاء بالآخر مكونة أنبوبة طويلة– ليست بالضرورة على استقامة واحدة– من عدد كبير من الأوعية يفصلها عن بعضها البعض



الشكل رقم (٥–١٣). رسم توضيحي لعناصر الخشب. أ– أشكال الأوعية الخشبية بعد فصلها من النسيج. ب– منظران للأوعية الخشبية في قطاع عرضي والأوعية في وضع رأسي. جـ– القصيبات.

المصدر: (Troughton and Donaldson, 1972).

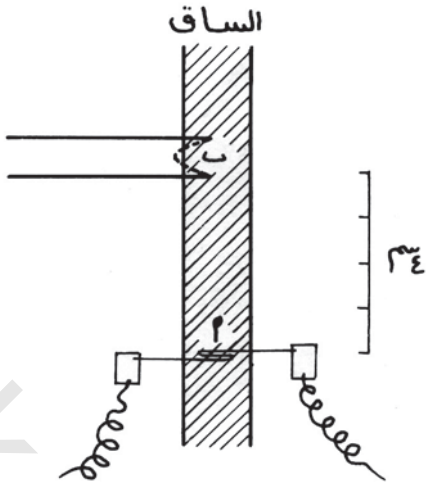
منطقة مثقبة. والنقر الموجودة في القصيبات ذات أهمية خاصة حيث تسمح بمرور الماء وما به من مواد ذائبة وتعمل على ترشيح الدقائق الكبيرة مثل بعض الكائنات الدقيقة والأهم من ذلك أنها لا تسمح بانتشار الهواء عبرها عند حدوث انقطاع لعمود الماء أو جرح أو تجمد. قد يصل، في الغالب، قطر القصيبة إلى أكبر من ٥٠ ميكرومتر بقليل بينما الأوعية متغيرة القطر من ٢٠ إلى ٨٠٠ ميكرومتر ولذا فسرعة التدفق في الأوعية أعلى من تلك في القصيبات. يعد نسيج الخشب نسيج مركب يحوي خلايا برنشيمية تختص بالنقل القطري حيث وجودها في الاتجاه القطري للعضو وتعرف باسم أشعة

الخشب وهذه الخلايا ذات أهمية في استمرار وظيفة الخشب وعدم جفافه. ويحتوي النسيج أيضاً على ألياف هي في الغالب للدعامة، والأوعية والقصيبات بقايا خلايا ميتة ووظيفتها الأساسية هي التوصيل إلى المناطق البعيدة عن الجذور ويدخل في تركيب جدرها مادة اللجنين مما يجعلها ذات قوة تحمل للشد الداخلي لكي لا تنهار حيث يحدث ذلك أثناء النتح. ومن الحقائق العامة أنه يمكن إزالة جزء من الخشب في بعض الأشجار دون أن يؤدي ذلك إلى موت النبات مما يدل على كفاءة عالية لترتيب وتركيب نسيج الخشب.

يتبع الماء في حركته في النبات أقل المسارات مقاومة لحركته لذا فقد يكون هناك نقل للماء خارج نسيج الخشب ولتوضيح ذلك نجد أنه عند مقارنة معامل النفاذية للخشب في المخروطيات مع معامل النفاذية لحركة الماء في النسيج (كما ذكر سابقا بالنسبة للجذر) أن القيمة قد تقارب خمسة أضعاف، أي أن معامل النفاذية للخشب في حدود ١٠$^{-٢}$ إلى ١٠$^{-٣}$ سم/ ثانية/ ميجاباسكال بينما نسيج الجذر في حدود ١٠$^{-٧}$ سم/ ثانية/ ميجاباسكال، من هنا فإن نسبة ما ينقل من الماء خارج الخشب قليلة جدا ويمكن إهمالها.

من الأدلة التجريبية على مسار الماء في الخشب استخدام الماء المشع حيث وجد أن الماء المشع يحل محل ماء الخشب أولا وبسرعة ثم بقية الأنسجة الأخرى مما يدل على آلية تشبه تدفق الكتلة في الأوعية والقصيبات (Biddulph, et. al., 1961).

مع أن تشريح عناصر الخشب في النباتات متغاير، إلا أن قطر الأوعية الكبير نسبيا يجعل الفروق في النفاذية قليل الأهمية وخاصة عند مقارنة الأنظمة التوصيلية بكاملها والفرق المهم هنا هو سرعة التدفق عبر نسيج الخشب والتي قيست بطرق عدة أبسطها طريقة الومضات الحرارية الشكل رقم (٥-١٤)، حيث يوضع مصدر حراري

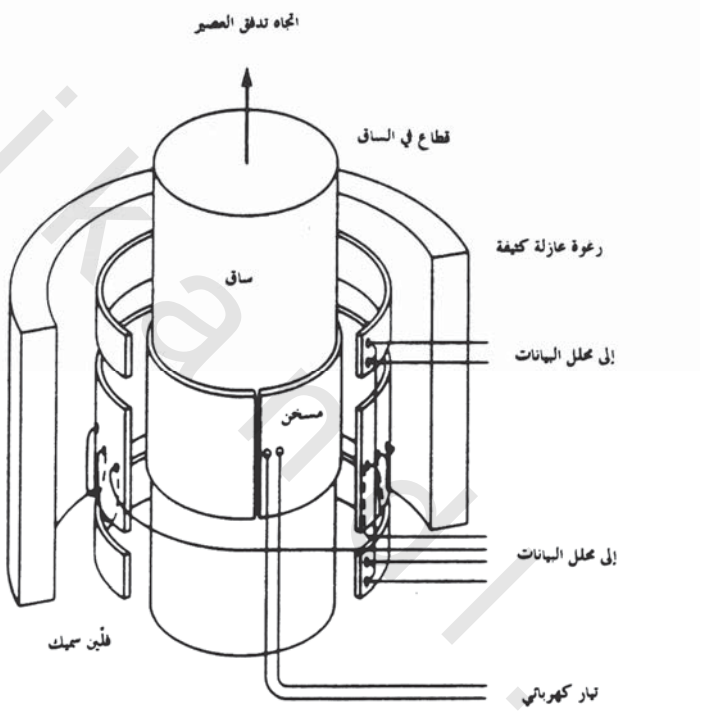


الشكل رقم (٥–١٤). رسم تخطيطي يوضح طريقة قياس سرعة التدفق عبر نسيج الخشب بالومضات الحرارية حيث مصدر الحرارة (أ) والمزدوج الحراري (ب) وموضعهما على الساق.

المصدر: (Huber and Schmidt, 1937).

عبارة عن سلك تسخين فوق الخشب بعد إزالة جزء من القلف عند نقطة معينة من الساق، وأعلى من ذلك بمسافة يوضع مزدوج حراري أو ثرمستور لقياس تغير درجة الحرارة (أي وصول الماء الساخن) وبقياس الزمن يمكن حساب السرعة بعد تسجيل المسافة التي قطعتها الومضة الحرارية مع تيار الماء. وهذه الطريقة تصلح لقياسات سرعة التدفق عندما تكون أكبر من واحد متر/ الساعة أما ما دون ذلك فالقياس لا يمكن الاعتماد عليه. هناك طريقة مباشرة لقياس التوازن الحراري للساق (Stem-flow method) بدلا من الومضة الحرارية وسرعتها ، وبهذه الطريقة المبسطة في الشكل رقم (٥–١٥) يتم قياس التيار الكهربائي اللازم للحصول على ممال حراري ثابت حول

الساق الذي يجري به تيار النتح ، ومن الحرارة النوعية للماء والطاقة (الحرارة) المضافة عند صعود العصارة إلي الأعلى يمكن الحصول على سجل مستمر لمسار النتح (Baker and van Bavel, 1987) .



الشكل رقم (٥–١٥). طريقة الاتزان الحراري (للتدفق عبر الساق، (Stem-flow method) لقياس النتح، يلاحظ أن المسخن والطبقات الثلاث من الفلين والتوصيلات الحرارية والرغوة العازلة والتي تصمغ مع بعضها مكبرة هنا للإيضاح . يربط المقياس ككل بإحكام حول الساق لتلامس الوصلات الحرارية الساق.

المصدر : Baker and van Bavel, 1987.

وقد دلت الدراسات أنه عند مقارنة أنواع النباتات فالأفضل استخدام قياس موحد كما يتبين ذلك في الجدول رقم (٥-٢) حيث ذروة سرعة التدفق وقطر الوعاء في وقت معين.

الجدول رقم (٥-٢). ذروة سرعة التدفق في منتصف النهار في بعض النباتات وعلى ارتفاع صدر الإنسان (Huber and Schmidt, 1936).

النبات	معدل السرعة (م/الساعة)	قطر الوعاء (ميكرومتر)
ذوات الخشب الحلقي (المتوسط)	(٢٢,٣٥)	(٢٤١,٧٦)
Quercus pedunculata	٤٣,٦	٢٠٠- ٣٠٠
Robinia pseudoacacia	٢٨,٨	١٦٠- ٤٠٠
Quercus rubra	٢٧,٧	٢٥٠
Fraxinus excelsoir	٢٥,٧	١٢٠- ٣٥٠
Castanea vesca	٢٤,٠	٣٠٠- ٣٥٠
Ailanthus glandulosa	٢٢,٢	١٧٠- ٢٥٠
Carya alba	١٩,٢	١٨٠- ٣٠٠
Ulmus effusa	٦,٠	١٣٠- ٣٤٠
Cytisus luburnum	٣,٩	٦٠- ٢٥٠
ذوات الخشب المنتشر (المتوسط)	(٢,٦٢)	(١١٨)
Populus balsamifera	٦,٢٥	٨٠- ١٢٠
Juglans regia	٤,١٢	٨٠- ١٢٠
Tilia tomentosa	٣,٤٣	٢٥- ٩٠
Salix viridis	٣,٠	٨٠- ١٢٠
Liviodendron tulipifer	٢,٦٢	٥٠- ١٢٠
Acer pseudoplatanus	٢,٤٠	٣٠- ١٢٠
Alnus glutinosa	٢,٠	٢٠- ٩٠

obeikandl.com

تابع الجدول رقم (٥-٢).

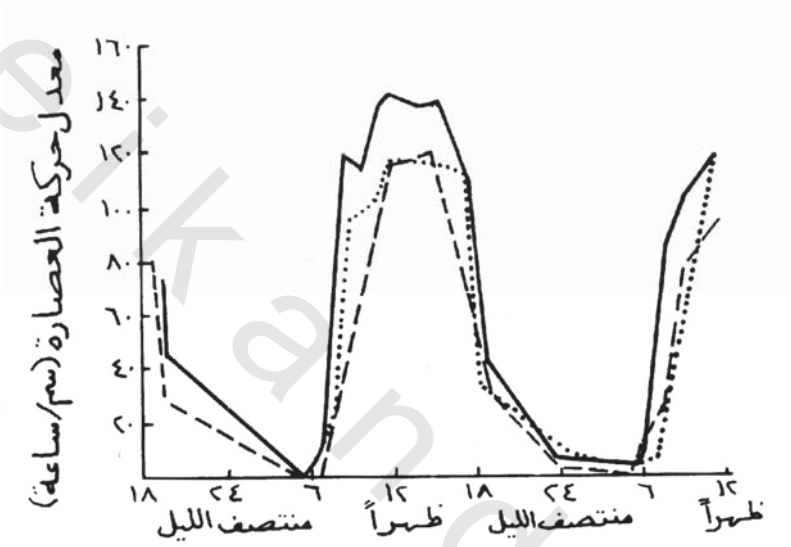
النبات	معدل السرعة (م/الساعة)	قطر الوعاء (ميكرومتر)
Betula verrucosa	١,٦	٣٠- ١٣٠
Caprinus betulus	١,٢٥	١٦- ٨٠
Pirus communis	١,١١	٥٠- ٨٠
Fugus silvatica	١,٠٧	١٦- ٨٠
المخروطيات (المتوسط)	(١,٥)	(٤٧,٥)
Larix decidua	٢,١	حتى ٥٥
Pinus strobus	١,٧	حتى ٤٥
Picea excelsa	١,٢	حتى ٤٥
Tsuga canadensis	١,٠	حتى ٤٥

تجدر الإشارة أن الصبغات والمواد المشعة وأنواع من البوتوميترات قد استخدمت لقياس سرعة التدفق ولكنها تقترن بكثير من العيوب في القياس أولها تجريح النبات وتغيير الوضع الطبيعي، وهذا بالطبع لا يعني عدم وجود عيوب لطريقة الومضات الحرارية بل هي أيضا تقترن ببعض العيوب التي قد تؤدي إلى أخطاء فادحة في القياس وأقرب الأمثلة على ذلك هو عدم حساب المسار الذي تقطعه الومضة الحرارية من مصدرها إلى الأوعية ومن الأوعية إلى المزدوج الحراري، ولكن هذه الطريقة تتحاشى تجريح النبات. على أية حال، هناك طرق حديثة لا تزال في طور التجريب وتحتاج إلى زمن لتطويرها في مثل هذه القياسات كطريقة دلتا (Tyree and Zimmermann, 1971) والتي تستغل ظاهرة سبق ذكرها وهي أن الماء في حركته يولد تيارا كهربائيا (انظر نظرية الأسموزية الكهربية) وطريقة أخرى تستغل لقياس تدفق الدم نجح في تطبيقها العالم شيريف ١٩٧٤م (Sheriff, 1974) على النباتات وتعرف باسم (The magneto hydrodynamic flow method) حيث تستغل قطبية جزيء الماء ولكنها

obeikandl.com

مازالت في بداية الطريق.

يعتمد معدل تدفق الماء كما قد يلاحظ من المعلومات السابقة على الموقع الذي تُجرَي عليه القياسات في النبات وكذلك الوقت من النهار حيث هناك اختلاف يومي للمعدل كما يوضح ذلك الشكل رقم (٥-١٦).



الشكل رقم (٥-١٦). التغير الدوري لمعدل حركة العصارة لثلاثة أنواع نباتية (____) Larix, و Picea (----------) و ( ) Fagus.

المصدر: (Huber and Schmidt, 1937).

تخضع سرعة تدفق الماء عبر نسيج الخشب أساسا لوجود ممال في جهد الماء في أية منطقة داخل النبات وهذا معناه أن اتجاه الحركة قد ينعكس وخاصة في أغصان الأشجار حيث عند غمرها في الماء فإن الاتجاه ينعكس ولكن السائد في اتجاه حركة الماء هو تدفقه من أسفل النبات إلى أعلاه نتيجة لانخفاض جهد الماء في الهواء. عندما تكون الثغور مفتوحة فإن الماء يتبخر من أسطح خلايا النسيج الوسطى في الورقة وهذا بدوره يحدث

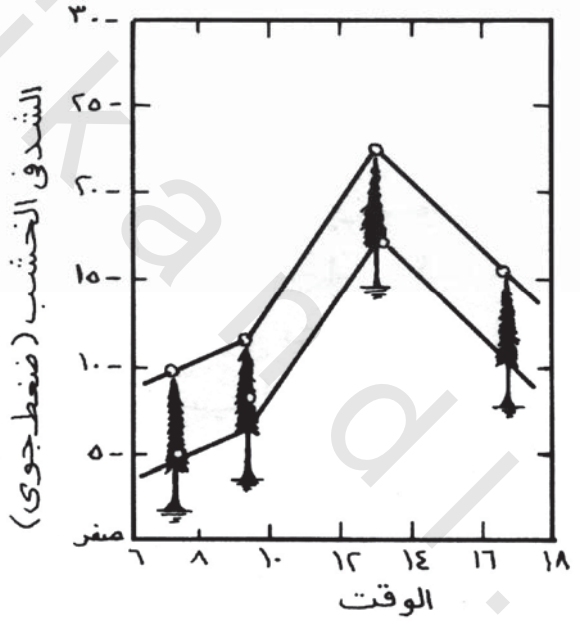
ضغطا هيدروستاتيكيا سالب القيمة في الخشب وبالتالي الجذور. ومما يساعد على نقل تأثير هذا الضغط الهيدروستاتيكي من الورقة إلى الجذر أن السائل في النبات متصل بعضه ببعض، أضف إلى ذلك ظاهرة تماسك جزيئات الماء وتلاصقها بجدر الأوعية مما يجعل السائل من التربة مستمرا ما دام مال الجهد موجود. وبالطبع لا يحدث انقطاع لعمود الماء أو تكوين فقاعة نتيجة للشد السالب على عمود الماء في الخشب للأسباب نفسها وهي قوة التماسك بين جزيئات الماء وتلاصق الماء بالجدر حيث يتميز الماء بهذه الخاصية والتي أثبتها العالم برجز في تجربته عام ١٩٥٠م. استخدم العالم برجز أنبوبة شعرية زجاجية مثنية الطرفين مملوءة بالماء ووضعها في جهاز الطرد المركزي ومن ثم حسب قوة الشد في منتصف الأنبوبة وقد سجل أن الماء في الأنابيب الشعرية الدقيقة يتحمل قوة شد تصل إلى- ٢٦,٤ ميجاباسكال قبل تكوين الفقاعة أي انقطاع عمود الماء. أما إذا كان قطر الأنبوبة ٠,٥ مم (وهذا القطر أكبر من قطر معظم الأوعية الخشبية) فإن الماء المشبع بالهواء لا تحدث به فقاعة حتى- ٢ ميجاباسكال وهذه القوة رغم أنها لقطر أنبوبة كبير ولم تأخذ في الحسبان قوى التلاصق فهي كافية لتأييد نظرية ديكسون ورنر (Dixon and Renner)لتفسير صعود العصارة. يعرف هذا التفسير بنظرية التماسك (Cohesion theory) والتي يمكن القول بأنها هي النظرية الوحيدة التي بإمكانها تفسير صعود العصارة إلى الأوراق في الأشجار الطويلة وكذلك ارتباط مقدار ما يمتص من الماء بمقدار ما يفقد منه علاوة على تماسك الماء في النبات من منطقة امتصاصه إلى منطقة فقده في الأوراق. لقد طورت طريقة الطرد المركزي هذه لقياس مقاومة أوعية الخشب لتكون الفقاعة نتيجة للإجهاد المائي لكي تشمل احتمال تكون الفقاعة من جراء دورات التجمد والذوبان حيث اتضح أن هناك علاقة وثيقة بين التجمد وقطر الوعاء (Davis *et. al.* 1999) أي تكوين الفقاعة والمساحة العرضية (القطر) للوعاء

وكذلك التوصيلية الهيدروليكية للوعاء وأنه قد تتكون الفقاعة عند القطر الحدي critical diameter وهو ٤٤ ميكرومتر أو أكبر.

من الممكن تلخيص هذه النظرية بأنه بناء على خاصية تماسك جزيئات الماء العالية في الأنابيب الدقيقة والتي يمكن تبللها بالماء (سليلوز الجدر الخلوية) فإن عمود الماء لا ينقطع حتى لو تعرض لقوى شد عالية (من ٣ إلى ٣٠ ميجاباسكال) أضف إلى ذلك أن الماء يرتبط ارتباطا وثيقا بجدر الخلايا مثل خلايا النسيج الوسطى في الورقة حيث يتبخر هناك. ويكون الماء نظاما متصلا في النبات عبر جدر الخلايا المشبعة وإذا حدث التبخر من أية منطقة فإن ذلك يعمل على انخفاض جهد الماء في تلك المنطقة دون دخول الهواء لقوى التوتر السطحي مما يتسبب في تدفق الماء إليها من الخشب ولو زادت كمية ما يفقد من الماء (عن طريق النتح) عن كمية الماء الممتص فإن الضغط في الخشب يقل إلى قيمة أقل من الصفر أي تكوين شد على عمود الماء ينتقل تأثيره إلى أبعد المناطق وهي سطوح الجذور مما يتسبب في انخفاض جهد الماء هناك ولذا يتدفق الماء من التربة إلى الجذور. بصورة أخرى تقول النظرية أن الشد الناتج من النتح وامتصاص الماء أسموزيا بواسطة الخلايا الحية وتميؤ الجدر الخلوية (كلها تأخذ الماء من مساره في النبات وهو الخشب) تعمل على سحب الماء إلي الأعلى ولا ينقطع العمود المائي في الأوعية بسبب ظاهرة التماسك سابقة الذكر .

وكأي نظرية تقدم لتفسير ظاهرة ما ، فقد انتقدت هذه النظرية طيلة الفترة الزمنية التي مضت على ظهورها (منذ عام ١٨٩٤) ومن الانتقادات ما أمكن تفسيره عن طريق البحوث والبعض الآخر لازال معلقا أو بدون تفسير مقنع حتى الآن. ومن الأمثلة على ذلك ما ورد أعلاه من إثبات لخاصية التماسك في جزيئات الماء وكذلك ما سجل من قياسات لجهد الماء في بعض النباتات والذي وصل إلى- ١٠ ميجاباسكال

حيث يفترض أن تكون قيمة الشد في خشب تلك النباتات مماثلة لذلك الجهد وهذا أمكن تفسيره عندما قدم العالم شولاندروزملاؤه ١٩٦٥م (Scholander, *et. al*., 1965) تطوير لجهاز وعاء الضغط الذي سبق ذكره حيث دلت الدراسات بذلك الجهاز على أن الشد يزداد بالزيادة في الارتفاع في الأشجار كما يوضح ذلك الشكل رقم (٥-١٧) لإحدى النباتات المخروطية مقرونا بالزمن.



الشكل رقم (٥-١٧). تدرج الضغط (الشد) في خشب أحد المخروطيات أثناء النهار (الوقت) كما قيس في الأفرع بواسطة وعاء الضغط حيث الخطوط تمثل الارتفاع بينما الدوائر المفتوحة تمثل قيم الضغط منسوبة إلى القياس في القمة.

المصدر: (Scholander, et. al., 1965).

obeikandl.com

وتجدر الإشارة هنا أنه أمكن تسجيل شد في خشب بعض الشجيرات الصحراوية يصل إلى- ٨ ميجاباسكال بواسطة هذا الجهاز. أما الانتقاد الأساسي والذي لا يزال معلقا دون تفسير مقنع هو كيفية ملء الأوعية الخشبية في الأشجار الكبيرة إذا حدث فيها فقاعة، أما البادرات والنباتات العشبية فإن الضغط الجذري الذي يمكن أن يرفع الماء إلى ارتفاع ١٠-٢٠ سم تحت بعض الظروف يكفي لملء الأوعية بها، والتفسير المقدم عن الأشجار الكبيرة هو الاحتمال بأن الأوعية لا تملأ أبدا حيث استمرار نمو الطبقة الإنشائية يعوض عن تلك الأوعية التي بها الهواء وذلك في فصول النمو المتتابعة، أما الاحتمال الآخر والذي لقي بعض التأييد التجريبي ولو بطريقة غير مباشرة فهو أن فقاعة الهواء في الوعاء الخشبي تذوب مرة أخرى في السائل بعد فترة زمنية [انظر سلاتير ١٩٦٧م (Slatyer, 1967) لمزيد من التعليل لهذه الظاهرة].

بقي نقطة أخيرة وهي أن تدفق الماء عبر الخشب في النبات حركة وكغيرها من الحركات من الممكن التعبير عنها نظريا كما ورد سابقا عند التعبير عن حركة الماء في التربة وذلك باستعمال معادلة بواسولية التي تصف تدفق الماء عبر الأنابيب الأسطوانية الشعرية طبقا للقوة المحركة كما يلي:

$$J_V = \frac{\Psi_s \, r^4 \, \Delta\Psi_p}{8n.X}$$

حيث: (J_V) التدفق المائي

و (r^4) نصف قطر الأنبوبة الشعرية.

و ($\Delta\Psi_p$) فرق جهد الضغط عبر المسار.

و (n) كثافة السائل.

و (Ψ_s) الجهد الأسموزي.

ويلاحظ هنا أن حجم الماء المتدفق يعتمد على القطر مرفوعا للقوة أربعة كما سبق ذكره عن ظاهر برنويلي، وهذه المعادلة عند تطبيقها يمكن تقدير فرق جهد الضغط اللازم لتدفق حجم معين عبر مكونات النسيج التوصيلي سواء في النقل القطري أو في النقل الرأسي إلا أنه يجب الأخذ في الحسبان تأثير الجانبية في الحالة الأخيرة. على أية حال يجب التنويه أن تطبيق المعادلة هذه يعطي قيما تقديرية نظرا لأن الأوعية تختلف عن الأنابيب الشعرية الملساء لعدة أسباب أهمها أن مسار الماء في الأوعية تعترضه الفواصل العرضية عند منطقة التقاء الوعاءين والنقر في القصيبات. ولمزيد من المناقشات عن تطبيق هذه المعادلة يرجع إلى كل من نوبل ١٩٧٤م (Nobel, 1974) و ملبرن ١٩٧٩م (Milburn, 1979).

obeikandl.com

الفصل السادس

فقد الماء من النبات

• المقدمة • تشريح الورقة • مناطق التبخر في الورقة
• الثغور • قياس النتح • العوامل المؤثرة في النتح
• الخواص العامة لانتقال الماء من النبات

(٦-١) المقدمة

بمتابعة تكشف النباتات وتواجدها على اليابسة تكشف بها النسيج التوصيلي لتفادي مشكلة حصول الأجزاء العلوية من النبات على الماء والأملاح من مصدرها وتوصيل الغذاء إلى الأجزاء السفلية، وبالمثل تكشفت الأوراق لتفادي مشكلة حصول النباتات على غاز ثاني أكسيد الكربون الذي كانت تحصل عليه من بيئتها المائية نظرا لبعد المسافة بين الأوراق والجذور وكمية غاز ثاني أكسيد الكربون الذائب في محلول التربة لا يكفي لسد حاجة النبات في البناء الضوئي. والحالة السائدة سابقا هي الحالة التي عليها الآن النباتات المائية وغيرها كالطحالب حيث تمتص الماء والأيونات وثاني أكسيد الكربون مباشرة من بيئتها، ومع أنه غير واضح من النظرة الأولى فالحال لا يختلف في خلايا المجموع الخضري في النباتات الراقية سوى المكان، فتيار النتح والفراغات الدقيقة في الجدر الخلوية (النقل عبر المادة الميتة) يوفران محلولا خارجيا للخلايا في الورقة،

وهذا المحلول متصل بالهواء في الفراغات الهوائية في الورقة (انظر تشريح الورقة لاحقا) وعرضة للتبخر عندما تفتح الثغور، وهنا ظهرت مشكلة جفاف الأجزاء العلوية من النبات نظرا لانخفاض جهد الماء في الجو المحيط بالنبات حيث جهد الماء كما سبقت الإشارة إليه. يساوي- ٩٣,٦ ميجاباسكال عند درجة حرارة ٢٠° م ورطوبة نسبية ٥٠٪. لذا فتكشف الأوراق أدى إلى تكوين نظام مسامي مغلف بجزء واق بحيث يسمح بتبادل الغازات (ثاني أكسيد الكربون والأكسيجين) ويعرض الأنسجة التي تقوم بعملية البناء الضوئي إلى أكبر قدر من الإضاءة وهنا يكون التوفيق بين فقد الماء من هذه الأسطح إلى الجو عبر الثغور في سبيل الحصول على الغازات. وهذا الفقد للماء هو النتح الذي يمكن تعريفه عموما بأنه عملية فقد الماء على هيئة بخار من أي جزء من النبات. إن عملية التبخر أساسا عملية فيزيائية بسيطة ولكنها هنا معقدة جدا نظرا لخواص الأوراق وسلوكها في الطبيعة حيث تتطلب هذه العملية وجود ظروف معينة لإتمامها كالطاقة اللازمة لتحويل السائل إلى بخار (طاقة التبخير العالية) وتوافر السائل (في الأوراق) ووجود ممال في جهد الماء يعمل كقوة محركة لانتشار البخار من الأوراق إلى الهواء وانفتاح الثغور.

والنتح عامل رئيسي في العلاقات المائية للنبات رغم أن البعض في السابق يعتقد أن فقد الماء من النبات شر لابد منه وتعود أهمية النتح في كونه يؤدي ثلاثة أغراض رئيسية للنبات. أولها أن النتح يساعد في بقاء الخلايا النباتية عند الامتلاء الأمثل للعمليات الفسيولوجية حيث إن النباتات التي تنمو على اليابسة لو نمت في ظروف رطبة جدا (دون نتح يذكر فإن الأنسجة تبدو طرية وغضة وقد يعود ذلك إلى زيادة في كبر الخلايا على حساب الجدر الخلوية حيث تكون بالتالي رقيقة، أما على اليابسة فالخلايا لا تصل إلى الامتلاء الكلي، والغرض الثاني الرئيسي من النتح أنه يعمل على

عدم ارتفاع درجة حرارة الأوراق عند تعريضها تعريضا كاملا للشمس في يوم حار حيث إن التبخر يتطلب طاقة (٥٨٠ كالوري/ جم من الماء) ولذا فالنتح قد يمنع الضرر الذي قد ينشأ من زيادة الحرارة. وللتوضيح فإن الورقة المعرضة لضوء الشمس مباشرة قد ترتفع درجة حرارتها عن حرارة الجو بنحو ٢٠ درجة بينما درجة حرارة الأوراق في الظل قد تكون أقل من درجة حرارة الجو (٣- ٥° م) وفي الأجواء الحارة جدا (التي تصل درجات الحرارة فيها ٥٠° م) فإن النتح يخفض درجة حرارة الأوراق إلى درجة حرارة تحت درجة حرارة الجو بنحو ١٠° إلى ١٥° م. أما الغرض الرئيسي الثالث فهو تنشيط عملية النقل وامتصاص المحاليل ولو أن عملية امتصاص الأيونات عملية نشطة إلا أن تيار النتح يساعد في توزيع هذه الأيونات ووصولها إلى المناطق التي تحتاجها بعد دخول تلك المواد في أوعية الخشب.

والنتح في حد ذاته يتسبب في خفض جهد الماء في النبات (كما ذكر في الغرض الرئيسي الأول) حيث ينشأ عن ذلك دخول الماء إلى الجذور، ومنه فالنتح يتحكم في معدلي امتصاص الماء وصعود العصارة في النبات ولذا فإن أي نبات يفقد قدرا من الماء أكبر مما يمتص يكون عرضة للجفاف وبالتالي الموت. من ناحية أخرى فالنباتات عموما تفقد عن طريق النتح أغلب الماء الذي تمتصه ولكن من حيث الكمية فهي مختلفة طبقا للظروف البيئية التي تنمو فيها ونوع النبات، وقد قدر ما تفقده بعض النباتات من الماء أثناء موسم النمو كما يوضح ذلك الجدول رقم (٦-١).

والنبات عادة يفقد عن طريق النتح أكثر من ٩٠٪ من الماء الذي يمتصه ويعود السبب إلى وجود الثغور المفتوحة لدخول ثاني أكسيد الكربون وبالتالي يخرج بخار الماء الموجود في المسافات البينية في الورقة، لذا فإن من المفيد التعرض لتشريح الورقة بصفة عامة.

الجدول رقم (٦–١). فقد الماء عن طريق النتح لكل نبات أثناء فصل النمو.

النبات		كمية الماء المفقودة عن طريق النتح (لتر)
البازلاء	Vigna sinensis	٤٩
البطاطس	Solanum tuberosum	٩٥
القمح الشتوي	Triticum aestinum	٩٥
الطماطم	Lycopersicum esculentum	١٢٥
الذرة	Zea mays	٢٠٦

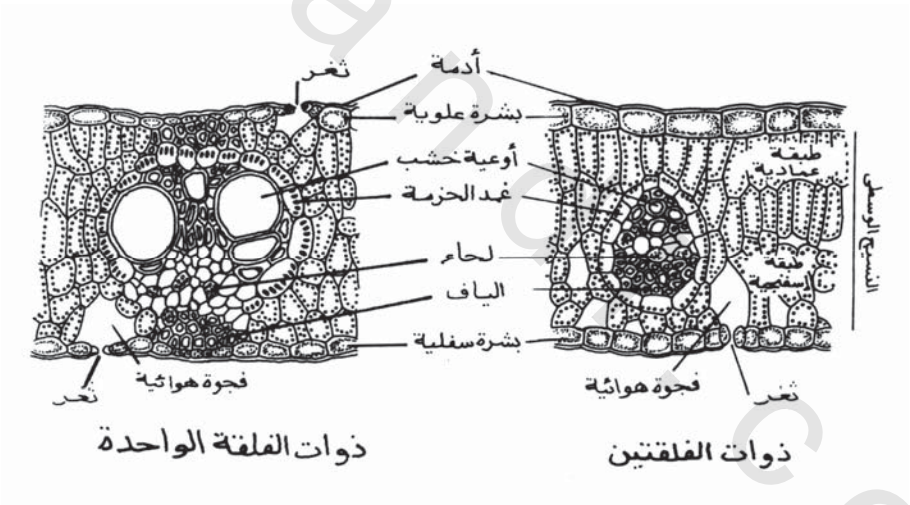
المصدر : (Ferry, 1959).

(٦–٢) تشريح الورقة

تعد الأوراق سيقان متحورة يعكس شكلها العام وتشريحها المقدرة على تبادل الغازات وامتصاص الطاقة الإشعاعية. ومن السهل التمييز بين شكلين من أوراق النباتات كاسيات البذور، ذوات الفلقتين وذوات الفلقة الواحدة، ففي النباتات ذوات الفلقتين تتكون الأوراق في البراعم كبيرة لذا فغالبية النمو الذي يشاهد ما هو إلا تمدد أكثر منه انقساما خلويا وفي الغالب تتكون الورقة من قاعدة وعنق ونصل بينما أوراق النباتات ذوات الفلقة الواحدة فتتميز بوجود منطقة إنشائية في القاعدة حيث يستمر نمو الورقة من أسفل وعادة لا يوجد عنق للورقة، وفي كلا المجموعتين تتميز الورقة بوجود نسيج توصيلي يتشعب ويغطي أكبر مساحة من الورقة، ومرة أخرى يكون التشعب شبكي في النباتات ذوات الفلقتين ومتوازي في النباتات ذوات الفلقة الواحدة. ويتصل النسيج التوصيلي في الورقة بالنسيج التوصيلي في النبات عن طريق تفرع في نسيج

الساق يعرف بأثر الورقة. والأوراق ذات أشكال متغايرة حيث تتأثر، عموماً، بالعوامل البيئية كالإضاءة وشدتها وثاني أكسيد الكربون والماء وما إلى ذلك، هذا بالإضافة إلى أن الأوراق في بعض النباتات قد تتحور إلى أشكال مختلفة مثل المحاليق والأشواك وغيرها.

يتكون نصل الورقة من نسيج برنشيمي يعرف بالنسيج الوسطي حيث تحتوي الخلايا على بلاستيدات عديدة تقوم بعملية البناء الضوئي، ويغلف هذا النسيج بطبقة من البشرة حيث تظهر في القطاع الرأسي على شكل بشرة عليا وبشرة سفلى (الشكل رقم ٦-١). تغطى خلايا البشرة- التي في الغالب لا تحتوي على بلاستيدات- بأدمة من مادة شمعية أو مادة السوبرين.



الشكل رقم (٦-١). رسمان تخطيطيان لأجزاء من قطاعين رأسيين في ورقتين من ذوات الفلقتين ومن ذوات الفلقة الواحدة لإيضاح التركيب والفروق بينهما.

المصدر: (Arnett, Jr., and Braungart, 1970).

ويمثل الشكل السابق رسوماً تخطيطية توضح أجزاء من مقاطع رأسية في ورقتين من

ذوات الفلقتين وذوات الفلقة الواحدة. ويلاحظ من الشكل المذكور أن النسيج الوسطي في ذوات الفلقتين يترتب في طبقتين مميزتين، أحدهما الطبقة العمادية وتتكون من صفين أو أكثر من الخلايا المتراصة في الجهة العلوية للورقة، بينما الطبقة الأخرى هي الإسفنجية حيث تتميز بوجود فراغات هوائية كبيرة تتشعب داخل النسيج بحيث تكون خلايا الطبقة الإسفنجية على اتصال مباشر مع هذه الفراغات. تجدر الإشارة هنا أن معظم الماء الذي يفقده النبات عن طريق الثغور يتبخر من جدر الخلايا التي لها اتصال مباشر مع هذه الفراغات حيث توجد طبقة رقيقة من الماء السائل على تلك الجدر ولأنه قلما يخطر بالبال اقتران الوظيفة بالتركيب نظرا لأن الوسيلة التوضيحية هنا عبارة عن منظر لجزء ميت فقد جرى التنويه لأهميته. كما يتبين من الشكل فإن مثل هذا التميز (أي وجود طبقتين عمادية وإسفنجية) غير واضح في أوراق النباتات ذوات الفلقة الواحدة. إن الفراغات الهوائية الكبيرة في الأوراق عموما على اتصال مباشر بالهواء الخارجي عبر ثقوب صغيرة يطلق عليها الثغور. والثغر عبارة عن فتحة صغيرة في بشرة الورقة تفتح وتغلق نتيجة لتمدد جدر الخلايا المحيطة بها وانكماشها، وهذه الخلايا تعرف باسم الخلايا الحارسة وتختلف عن خلايا البشرة في كونها تحوي بلاستيدات.

(٦–٣) مناطق التبخر في النبات

يعرف النتح (كما سبقت الإشارة إليه) بأنه عملية فقد الماء من النبات على هيئة بخار، وهو أساسا عملية تبخر ولكن تختلف عن البخر في الطبيعة نظرا لتأثير تركيب النبات. هنالك ثلاث مناطق رئيسية يعبر منها الماء من النبات على هيئة بخار، عبر الثغور وعبر أسطح خلايا البشرة في الأوراق والسيقان وعبر العديسات. بوصول الماء إلى نهايات الأوعية الخشبية أو قبل ذلك فإن الماء يسلك عدة مسارات قبل خروجه من النبات إلى الخارج، والمسار الرئيسي أن يخترق

الماء الأنسجة البرنشيمية إلى الطبقة العمادية والطبقة الإسفنجية في الورقة حيث توجد مناطق اتصال الطور السائل بالطور الغازي على الجدر الخلوية المحاطة بالفراغات الهوائية ومن هناك يتبخر الماء حيث يخرج عبر الثغور إلى الهواء الخارجي على هيئة بخار وهذا ما يعرف اصطلاحا باسم النتح الثغري، أما المسار الفرعي الموازي لذلك فهو حركة الماء من الأنسجة البرنشيمية إلى خلايا البشرة ومن هناك يخرج الماء على هيئة بخار عبر الأدمة التي تغطي خلايا البشرة وهذا يعرف باسم النتح عبر البشرة. والنتح عبر البشرة على العموم أقل بكثير في قيمته من النتح الثغري نظرا للمقاومة العالية التي يلقاها بخار الماء في مروره عبر خلية البشرة إذا ما قورنت بالحركة عبر الثغور المفتوحة وذلك لوجود طبقة الأدمة (وهي ترسبات شبه شمعية من مادة الكيوتين) ذات النفاذية (التوصيلية الهيدروليكية) المنخفضة وخاصة في البيئات المناخية الصحراوية حيث قد يصل الترسب في بعض الأنواع النباتية إلى حد كبير. وعلى سبيل المثال فالجدول التالي (الجدول رقم ٦-٢) يوضح مقاومة نقل الماء عبر الأدمة والثغور والطبقة القريبة من الثغور.

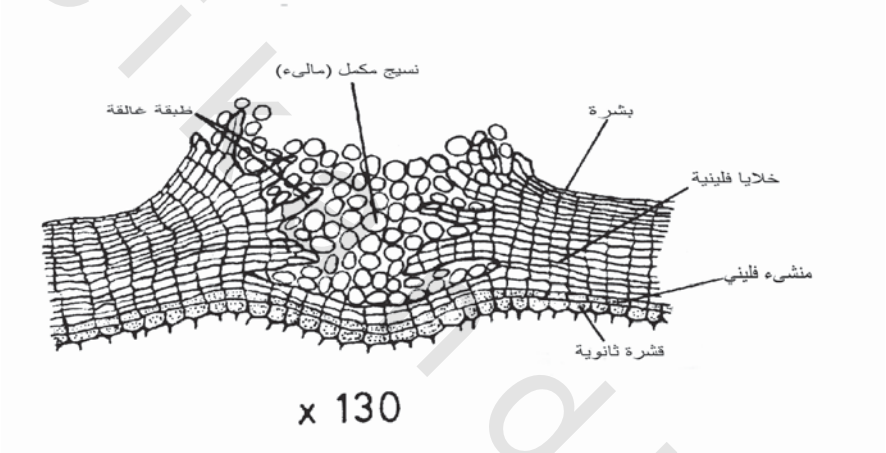
الجدول رقم (٦-٢) مقاومات نقل بخار الماء في أوراق عدد من النباتات.

النبات	المقاومة في الطبقة القريبة من الثغور (ثانية/سم)	المقاومة في الثغر (ثانية/سم)	المقاومة في البشرة (ثانية/سم)
Betula verrucosa	٠,٨٠	٠,٩٢	٨٣
Quercus robur	٠,٦٩	٦,٧٠	٣٨٠
Acer platanoides	٠,٦٩	٤,٧٠	٨٥
Circaea lutetiana	٠,٦١	١٦,١٠	٩٠
Lamium galeobdolon	٠,٧٣	١٠,٦	٣٧
Helianthus annuus	٠,٥٥	٠,٣٨	-

المصدر: (Homgren, *et. al*., 1965).

obeikandl.com

أما المسار الثالث لبخار الماء من النبات إلى الهواء فكما ذكر أعلاه عن طريق العديسات (النتح عبر العديسات) وهي تراكيب خاصة في الأنسجة الفلينية التي تغطي السيقان والأفرع في بعض النباتات وهذه التراكيب تسمح بمرور الغازات عبرها من الخارج إلى الداخل نظرا لأن الخلايا في العديسة بخلاف الخلايا الفلينية غير متسوبرة وتمتاز أحيانا بخلايا مفككة تكثر بها المسافات البينية (الشكل رقم ٦-٢).



الشكل رقم (٦-٢) رسم تخطيطي لجزء من قطاع عرضي بالساق يمر بالعديسة ومكوناتها التركيبية.

إن حركة الماء من الخشب إلى الخارج في هذه المسارات تتم بصورة رئيسية في الجدر الخلوية (المادة الميتة Apoplast) مثلها في ذلك مثل النقل في الجذر من التربة إلى البشرة الداخلية وذلك للسبب نفسه وهو مقاومة حركة الماء في هذا المسار أقل بكثير من تلك عبر المادة الحية، وقد كشف هذا المسار بعدة طرق عملية ومنها استعمال الصبغات ومعقدات الرصاص وغيرها. وتبين من حساب نسبة ما ينقل عبر المادة الحية إلى ما ينقل

عبر الجدر الخلوية في الورقة قد تصل إلى ١ : ٥٠.

تجدر الإشارة في هذا المقام عدم الخلط بين النتح وفقد الماء على هيئة سائل عبر التراكيب الخاصة المعروفة باسم الغدد المائية (Hydathodes) والموجود في أوراق بعض النباتات حيث يخرج الماء من الورقة في وقت الصباح الباكر على هيئة سائل به ما به من مواد ذائبة في ظاهرة الإدماع (Guttation) والتي تقترن بظاهرة الضغط الجذري كما سبق التنويه عن ذلك، ولمزيد من التفاصيل عن هذه الظاهرة يفضل الرجوع إلى ما كتبه العالم كريمر ١٩٥٩م (Kramer, 1959).

(٦–٤) الثغور

نظرا لما للثغور من دور كبير في فقد الماء من النبات فلا بد من إعطاء لمحة ولو مقتضبة عن هذه التكوينات المميزة لهذه الكائنات الحية. تتميز بشرة النبات الوعائي والمعرضة للهواء بوجود ثقوب صغيرة أطلق عليها اسم الثغور (Stomata) والمفرد (Stoma) حيث يتم عن طريقها بصفة رئيسية تبادل الغازات المهمة لحياة النبات. إن توزيع الثغور وعددها وحجمها يختلف باختلاف النبات ولكن الغالب أن عددها في البشرة السفلى من الورقة أكثر منه في البشرة العليا حيث قد تكون معدومة في البشرة العليا في بعض النباتات، ويختلف العدد والتوزيع لهذه الثقوب في النبات باختلاف الظروف البيئية أيضا كما يتضح من الجدول رقم (٦–٣).

الجدول رقم (٦–٣) توزيع ومتوسط أبعاد فتحة الثغر ونسبة مساحة الثغور إلى مساحة الورقة.

اسم النبات	عدد الثغور/مم^2		أبعاد فتحة الثغر (ميكرومتر)		طول الثغر (ميكرومتر)		نسبة المساحة
	البشرة العليا	البشرة السفلى	البشرة العليا	البشرة السفلى	البشرة العليا	البشرة السفلى	
Osmonda regalis	–	٦٧	–	٣٨×٥٦	–	٣٠	٠,٥
Pinus sylvestris	١٢٠	١٢٠	٢٨×٢٨	٢٨×٢٨	٢٠	٢٠	١,٢
Larix decidua	١٤	١٦	٢٦×٤٢	٢٦×٤٢	٢٠	٢٠	٠,١٥
Allium cepa	١٧٥	١٧٥	٣٨×٤٢	٣٨×٤٢	٢٤	٢٤	٢,٠
Avena sativa	٥٠	٤٥	٣١×٥٢	٢٦×٥٦	٢٠	١٩	١,٥
Hordeum vulgare	٧٠	٨٥	٢١×٤٢	٢١×٣٨	١٧	١٧	٠,٦٥
Triticum vulgare	٥٠	٤٠	٣١×٥٦	٢٨×٥٣	٢٨	٢٨	٠,٦٣
Zea mays	٩٨	١٠٨	١٩×٣٨	٢٤×٤٣	١٢	١٦	٠,٧
Eucalyptus globulus	–	٣٧٠	–	٢٣×٣١	–	١٠	٠,٩
Quercus robur	–	٣٤٠	–	١٨×٢٨	–	١٠	٠,٨
Tilia europea	–	٣٧٠	–	١٨×٢٥	–	١٠	٠,٩
Helianthus annuus	١٢٠	١٧٥	٢٥×٣٥	٢٩×٣٢	١٥	١٧	١,١
Medicago sativa	١٦٩	١٨٨	١٧×٢٦	١٧×٢٥	٩	١٣	٠,٨
Nicotiana tabacum	٥٠	١٩٠	٢٥×٣١	٢٥×٣١	١٤	١٤	٠,٨

openkandil.com

تابع الجدول رقم (٦–٣). توزيع ومتوسط أبعاد فتحة الثغر ونسبة مساحة الثغـــور إلى مـــساحة الورقة.

اسم النبات	عدد الثغور/مم٢		أبعاد فتحة الثغر (ميكرومتر)		طول الثغر (ميكرومتر)		نسبة المساحة
	البشرة العليا	البشرة السفلى	البشرة العليا	البشرة السفلى	البشرة العليا	البشرة السفلى	
Pelargonium zonale	٢٩	١٧٩	٤٠×٤٨	٣٨×٤٤	٢٤	٢٣	١,٢
Ricinus communis	١٨٢	٢٧٠	٢١×٣١	٢٤×٣٨	١٢	٢٤	٢,١
Vicia faba	٦٥	٧٥	٢٥×٤٦	٢٥×٤٦	٢٨	٢٨	١,٠
Sedum spectabilis	٢٨	٣٥	٣٢×٣٢	٣١×٣٣	٢١	٢٠	٠,٣٢
Tradescantia virginiana	٧	٢٣	٣٨×٦٧	٤٢×٧٠	٤٩	٥٢	٠,٣٥

❖ نسبة مساحة الثغر إلى مساحة الورقة الكلية على فرض أن متوسط عرض الثغر ٦ ميكرومتر.

المصدر: (Meidner and Mansfield, 1968).

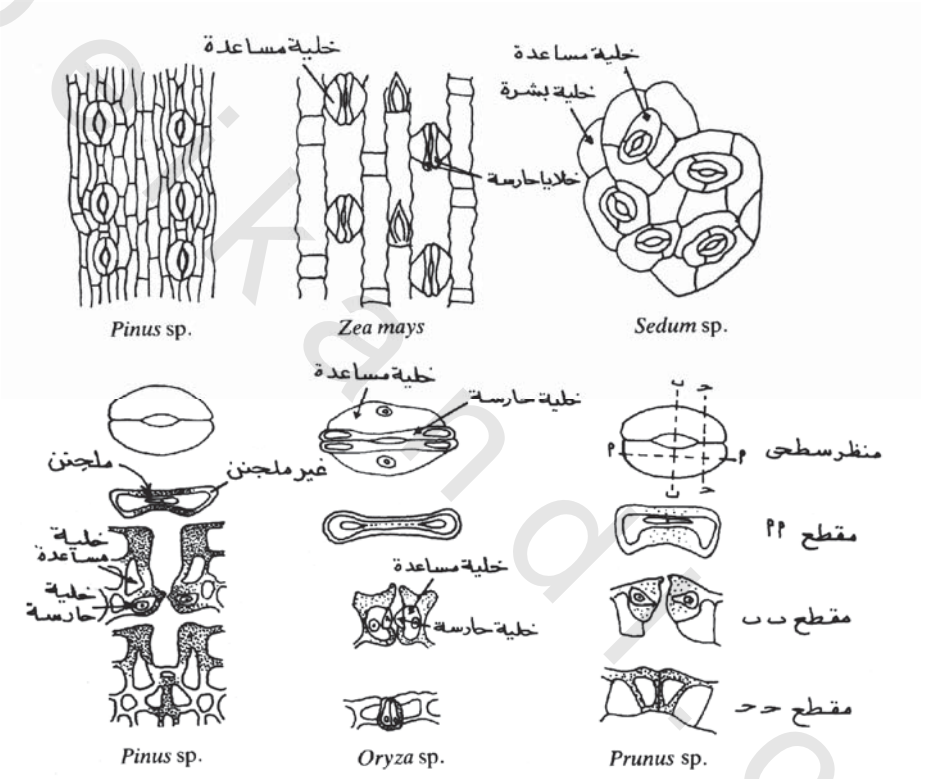
نظرا للاختلاف في أحجام خلايا البشرة فقد ظهر ما يعرف بالمعامل الثغري والذي يمكن التعبير عنه كالتالي:

$$\text{المعامل الثغري} = \frac{\text{عدد الثغور في وحدة المساحة}}{\text{عدد الثغور في وحدة المساحة + عدد خلايا البشرة في وحدة المساحة}} \times ١٠٠$$

والمعامل الثغري على ما يبدو ذو قيمة ثابتة لأي نبات.

تتكون الثغور من الطبقة المولدة للبشرة في بداية تكشف العضو النباتي ويتركب

الثغر من فتحة صغيرة تحيط بها خليتان يطلق عليهما الخلايا الحارسة وقد يقترن بهاتين الخليتين خلايا أخرى من البشرة تعرف بالخلايا المساعدة (الشكل رقم ٦-٣) وهذا ما يعرف بالجهاز الثغري.



الشكل رقم (٦-٣). رسوم تخطيطية لأشكال الثغور في ذوات الفلقتين وذوات الفلقة الواحدة وعاريات البذور يبين الثغور في المنظر السطحي ومقاطع لثغور بعض النباتات الممثلة .

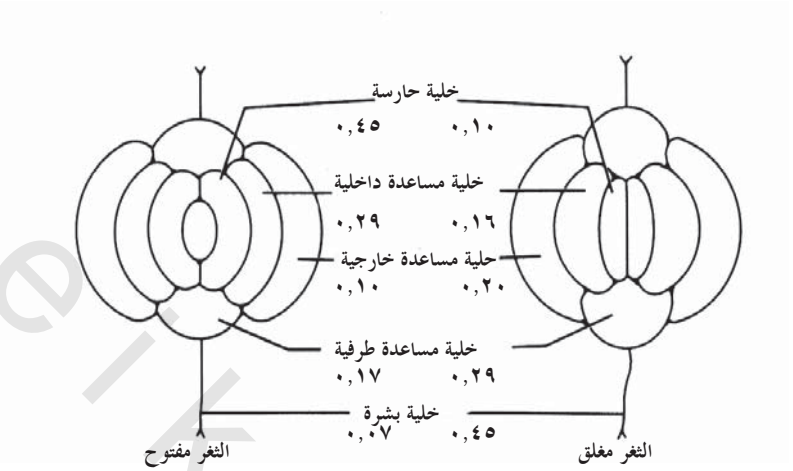
المصدر: (Meidner and Mansfield, 1968).

وتختلف الخلايا الحارسة عن خلايا البشرة من حيث الشكل والمحتوى وينعكس ذلك على النشاط الأيضي لها، فمن حيث الشكل فهو موضح في الرسوم التخطيطية السابقة أما من حيث المحتوى فيوجد في الخلايا الحارسة بلاستيدات تتميز بمحتوى نشوي غير ثابت حيث يكاد يختفي في النهار ويتراكم في الليل، أما النواة في الخلية الحارسة فهي متميزة أكثر من تلك في الخلية البشرية، والخلايا الحارسة لا تحتوي على صبغة الانثوسيانين التي غالبا ما توجد في فجوات الخلايا البشرية، وأغشية الخلايا الحارسة تتميز بنفاذية عالية علاوة على مقدرة الخلايا الحارسة على مقاومة الظروف القاسية التي لا تقاومها الخلايا الأخرى في البشرة، هناك نقطة أخيرة وهي أن الدوران السيتوبلازمي كثيرا ما يلاحظ في الخلايا الحارسة أثناء عملية انفتاح الثغور إلا أنه يتوقف عند الوصول إلى حد معين وثابت من الانفتاح حسب الظروف البيئية السائدة.

وتتحكم الخلايا الحارسة في فتحة الثغر نتيجة لتغير محتواها المائي، فمثلا في النباتات ذوات الفلقتين يختلف سمك الجدار الخلوي للخلية الحارسة حيث إن جزء الجدار الخلوي القريب من فتحة الثغر أكثر سمكاً من الجدار البعيد فإذا زاد المحتوى المائي للخلية أي أن الخلية أصبحت في حالة امتلاء فهذا يتسبب في تحدب الجدار البعيد عن الفتحة وينتج عن ذلك شد على الجدار القريب مما يؤدي إلى فتح الثغر والعكس صحيح في عملية قفل الثغر، إن هذه الآلية ما هي إلا استجابة للعديد من المؤثرات الأخرى ويأتي في مقدمتها الضوء وتركيز ثاني أكسيد الكربون والماء كما سيرد عند ذكر العوامل المؤثرة في النتح، إلا أن للثغور حركة دورية ونمطا معينا يطول شرحهما نظراً لتغيرهما حسب نوع النبات وبالإمكان الرجوع إلى الكتابات المتخصصة في فسيولوجيا الثغور مثل ميدنرومانسفيلد ١٩٦٨م (Meidner and Mansfield, 1968) وهيث ١٩٧٥م (Heath, 1975) وجارفز ومانسفيلد ١٩٨١م (Jarvis and Mansfield, 1981)، على أن من

الشائع في المملكة النباتية وبصورة مختصرة أن الثغور في بعض النباتات تفتح في الصباح ثم تغلق تدريجيا في المساء ولكن قد تغلق الثغور في منتصف النهار عندما تتعرض النباتات إلى إجهاد مائي والمثل على ذلك نبات البرسيم، وهناك نباتات تظل ثغورها مفتوحة دائما مثل نبات ذيل الحصان أو تغلق ثغورها لفترة وجيزة (نحو ثلاث ساعات) بعد غروب الشمس مثل البطاطس والبصل، أما نباتات الحبوب مثل الشعير فالثغور تبقى شبه مغلقة إلا لوقت قصير (ساعة أو ساعتان) في اليوم، على أن هناك مجموعة من النباتات تتميز بطابع معين في حركة ثغورها وهي بعض النباتات العصيرية حيث تفتح ثغورها في الليل لتقوم بتثبيت ثاني أكسيد الكربون في أحماض عضوية وتغلق ثغورها أثناء النهار كوسيلة لحمايتها من الجفاف على ما يبدو.

إن انفتاح الثغور وإغلاقها ناتج عن تراكم المحاليل في الخلايا الحارسة مما يتسبب في انخفاض جهد الماء بها حيث يتدفق الماء إليها من الخلايا المجاورة وهذا ينتج عنه كما ذكر سابقا شد في أجزاء الجدر الخلوية المتجاورة وبذا تبتعد عن بعضها مكونة الثغر، هذا في الحالة الأولى وهي عملية الانفتاح، أما الحالة الثانية وهي انغلاق الثغور فعكس العملية صحيح، وقد كان التفسير السائد لذلك في السابق فرضية تحول النشا الذي تتميز به بلاستيدات هذه الخلايا إلى مواد سكرية بطريقة التميؤ وذلك نتيجة للتغير في الرقم الهيدروجيني الذي يسببه التغير في تركيز ثاني أكسيد الكربون داخل الورقة حيث عند تعرض الأوراق للضوء تقوم بتثبيت ثاني أكسيد الكربون في عملية البناء الضوئي. إلا أن الاعتقاد السائد الآن والذي له من التجارب ما يؤيده (Raschke, 1975 ; Hsiao, 1976) هو أن تدفق أيون البوتاسيوم من خلايا البشرة إلى الخلايا الحارسة يعلل تراكم المحاليل وانخفاض جهد الماء بها والذي ينتهي بعملية فتح الثغور. تم إجراء قياسات لتركيز البوتاسيوم في الجهاز الثغري والتغيرات الكمية في حالتي فتح الثغور وغلقها كما هو موضح في الشكل رقم (٦-٤).



الشكل رقم (٦–٤). التغيرات الكمية في تركيز البوتاسيوم (مليجزيئي حجمي) في خلايا الجهاز الثغري عنما يكون الثغر مفتوحا وعندما يكون مغلقاً.

المصدر: (Penny and Bowling, 1974) بتصرف.

هناك العديد من الطرق لقياس فتحة الثغر ومن أقدمها أن تعمل سلخة في بشرة الورقة وتغمر في الكحول المطلق لحفظ شكل الثغر في ذلك الوقت ومن ثم فحصه بالمجهر، أما الطريقة الأخرى فهي عمل أثر أو طبع لأشكال الثغور وخلايا البشرة وذلك بتغطيتها بمادة شفافة (مثل مركبات مطاط السليكون) ومن ثم سلخ الطبقة الشفافة ومشاهدتها تحت المجهر إلى غير ذلك من الطرق التي كانت سائدة في وقت مضى ويلاحظ أن لكل طريقة من الطرق السابقة مآخذها ومحاسنها وليس المجال هنا للمقارنة، إلا أن هناك طرقا أخرى تعتمد على انتشار الغازات عبر الثغور وهي نوعان، نوع يعتمد على قياس تدفق الهواء عبر الورقة نتيجة لتفريغ الهواء من أحد سطحي الورقة بواسطة مضخة، والنوع الثاني يعتمد على قياس مقاومة انتشار

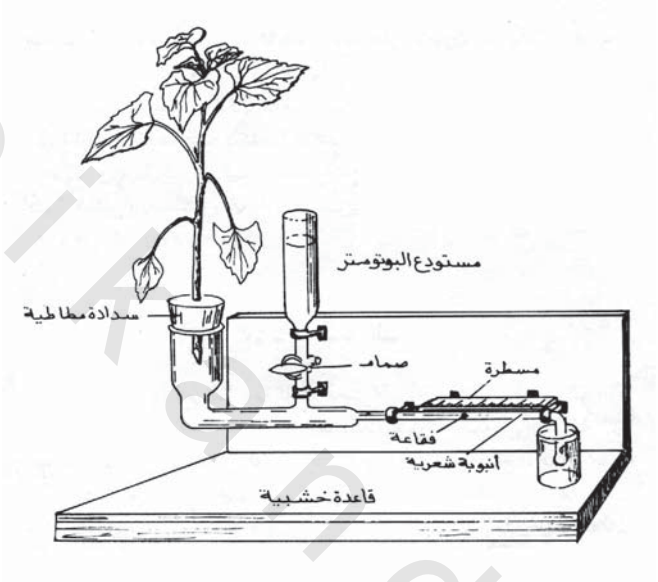
الغازات من الورقة إلى الخارج وتشبه هذه الطريقة الغرفة المغلقة سابقة الذكر ولكن الفرق هو أن القياس هنا يتم في وقت قصير مما يقلل التأثير في الثغور، لذا فهناك أجهزة لهذه القياسات عرفت بالبوروميترات من أقدمها بورومیتر دارون وبرتز في بداية هذا القرن، وقد اتخذت البوروميترات أشكالا عديدة كان آخرها بورومیتر الانتشار حيث يقيس هذا النوع المقاومة الداخلية لانتشار الغازات والذي يعتقد العالم سلاتير ١٩٦٧م (Slatyer, 1967) أن قياسها ذو أهمية أكبر من قياس معدل النتح، ولمزيد من المقارنات النظرية والعملية لطرق قياس فتحة الثغر والمقاومة راجع فان بيفل وآخرين ١٩٦٥م (van Bavel, et. al., 1965)، جارفز و سلاتير ١٩٦٦م (Jarvis and Slatyer, 1966) وكامبل ١٩٧٥م (Campbell, 1975).

(٦-٥) قياس النتح

يعد قياس النتح بصورة دقيقة، كلما دعت الحاجة إلى ذلك، أمرا صعبا نظرا لأن عملية القياس نفسها تؤثر في النتح ويعود ذلك بصورة أساسية إلى أن عملية النتح رغم بساطتها تتأثر بالعديد من العوامل المناخية والداخلية، وأن النتح ما هو إلا محصلة لتداخل هذه العوامل مع بعضها البعض وسيرد ذكر معظم هذه العوامل لاحقا. ورغم هذه الصعوبة فإن هناك طرقا عديدة اقترحها العلماء لإجراء مثل هذا القياس تتفاوت في الدقة والسرعة والتكلفة تفاوتا كبيرا إلا أنه يجب الآخذ في الاعتبار أن قياس النتح يجب أن يدل دلالة كمية لا وصفية لكي تتم المقارنة بين الأنواع النباتية في الظروف المتشابهة مقارنة سليمة.

في المعامل تستخدم طريقة أوراق كلوريد الكوبالت كطريقة كلاسيكية للدلالة على وجود النتح ولكن هذه الطريقة وصفية ولا تفيد أكثر من ذلك، وهناك طريقة

البوتوميتر تستخدم غالبا لإبراز ظاهرة النتح، والبوتوميترات متعددة الأشكال لا مجال لحصرها على أن الأساس فيها واحد لذا فذكر مثال لها كما في الشكل رقم (٦-٥)



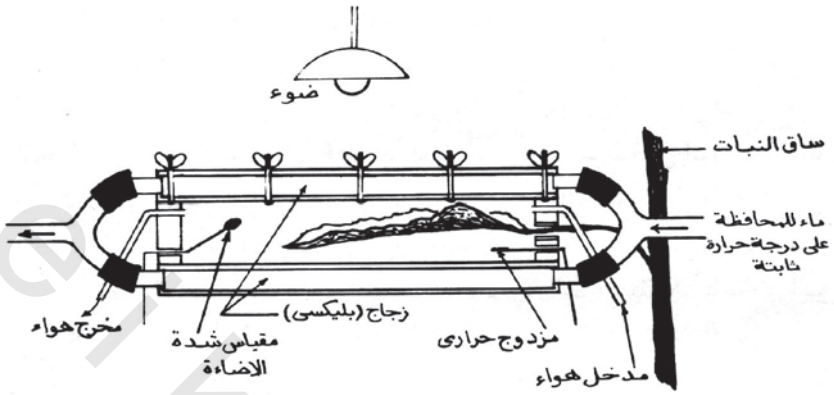
الشكل رقم (٦-٥). رسم تخطيطي لأحد أنواع البوتوميترات.

يكفي، حيث يقطع جزء ورقي من النبات ويثبت في قطعة من الفلين أو سدادة مطاطية لجعل هذا الجزء على اتصال بمستودع الماء، والماء المفقود على هيئة بخار يستعاض عنه بكمية مساوية من السائل في مستودع البوتوميتر، ويمكن الاستدلال بفقاعة الهواء في الأنبوبة الشعرية المدرجة ذات الوضع الأفقي والمتصلة بمستودع الماء على حجم ما يفقد من الماء في زمن معين ومنه يمكن تقدير معدل النتح بمعرفة حجم الماء ومساحة سطح الورقة أو الأوراق في ذلك الفرع.

والطريقة الأخرى لقياس النتح هي طريقة وزن الأصيص (Potted plant

method) حيث يغلف الأصيص الحاوي على النبات وسطح التربة بالبلاستيك غير المنفذ للماء بحيث يكون فقد الماء محصورا على المجموع الخضري ومن ثم يوزن على فترات زمنية والفرق بين وزنتين متتاليتين هو وزن الماء المفقود والذي يمكن تعديله إلى الحجم بالقسمة على الكثافة حيث يمكن تقدير معدل النتح. تعد هذه الطريقة من أفضل الطرق لقياس النتح لعدم تأثر معدل النتح بالطريقة ولكن إذا كان نمو النبات سريعا أو أن التجربة تستغرق وقتا طويلا فيجب حساب الزيادة في وزن النبات أثناء إجراء التجربة.

هناك طريقة ثالثة لقياس النتح في المعمل وتعتمد على قياس بخار الماء المفقود من النبات حيث توضع الورقة في غرفة صغيرة من مادة منفذة للضوء (زجاج أو ما شابهه) كما في الشكل التالي (الشكل رقم ٦-٦). ولذا تعرف هذه الطريقة بطريقة الغرفة المغلقة. وكما هو واضح من الشكل توضع الورقة في داخل الغرفة وتقاس الرطوبة النسبية وثاني أكسيد الكربون في الهواء الداخل وتقارن بمقدار الرطوبة النسبية وثاني أكسيد الكربون في الهواء الخارج من الغرفة. هناك الكثير من الأجهزة المستعملة لمثل هذه القياسات تختلف في التعقيد والكفاءة مثل الهيجروميتر الشعري والسيكروميترات واستخدام الأشعة الضوئية (من طول الموجة التي يمتصها الماء) لتقدير الرطوبة النسبية أو محلل الغاز بالأشعة الحمراء البعيدة. من المآخذ على هذه الطريقة أن الورقة تتأثر بحجم الغرفة فإن كانت صغيرة فيجب أن يكون تيار الهواء سريعا لتلافي ارتفاع درجة الحرارة في الغرفة، أما إذا كان الحجم كبيرا فيجب حساب الوقت اللازم لإزاحة مثل هذا الحجم الكبير من الهواء للحصول على حالة اتزان وقراءات دقيقة.



الشكل رقم (٦–٦). رسم تخطيطي للغرفة الصغيرة المستخدمة كطريقة لقياس النتح، ويتبين مدخل الهواء ومخرجه ومقياس شدة الإضاءة ودرجة الحرارة، أما مدخل المـاء ومخرجـه فهـو للتحكم في درجة الحرارة بحيث لا يتأثر كثيرا بالتقلبات الجوية أثناء التجربة.

المصدر: (Salisbury and Ross, 1969).

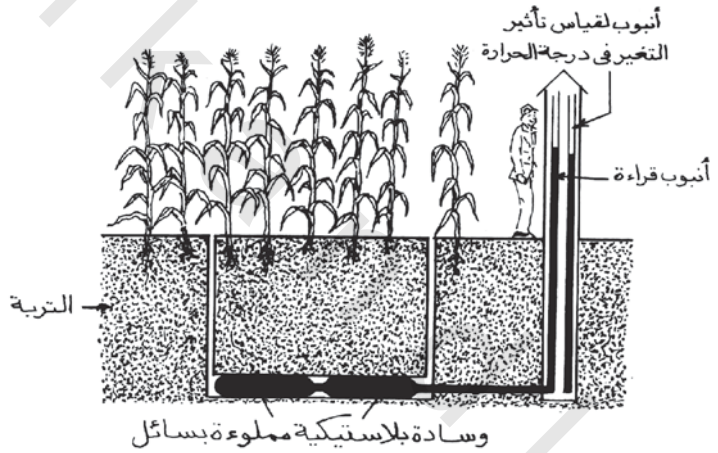
تعد الطرق المعملية السابقة طرقاً أساسية في تقدير معدل النتح إلا أن هناك تعديلات لهذه الطرق حسب الظروف، علاوة على طرق أخرى تفرضها ظروف التجربة. فعلى سبيل المثال، يمكن تقدير النتح في المزارع المائية بقياس كمية الماء اللازم إضافتها للمزرعة يوميا لكي تكون ذات مستوى ثابت، وعلى أية حال يجب مراعاة جميع الظروف المحيطة بالتجربة لتفادي الوقوع في أخطاء جسيمة عند التقدير.

أما في الحقل وخارج المعمل فمن أبسط الطرق وأكثرها استعمالا طريقة فصل الورقة عن النبات ووزنها على فترات زمنية قصيرة وبأسرع ما يمكن لتقدير النقص في الوزن وذلك نتيجة لفقد الماء من الورقة، وبقياس مساحة الورقة يمكن قياس معدل

النتح. والافتراض الأساسي في هذه الطرقة هو أن معدل فقد الماء من الورقة المفصولة عن النبات في اللحظات الأولى يتشابه مع النتح في تلك الورقة قبل فصلها عن النبات، وهذا الافتراض بالطبع غير صحيح تماما نظرا لأن الورقة قد فقدت مصدر الماء وانخفض الشد عليها، الذي كان سائداً وهي لازالت متصلة بالنبات وفي أكثر الأحيان يفوق معدل النتح في الورقة المفصولة ذلك المعدل في النبات الأصلي ولكن شيوع هذه الطريقة عائد لبساطتها. في الحقل أيضا هناك طريقة مشابهة تقريباً لطريقة الغرفة المغلقة سابقة الذكر وتعرف بطريقة الخيمة الصغيرة أو طريقة فقد بخار الماء حيث يلزم استخدام مادة بلاستيكية شفافة للإحاطة بالغصن أو النبات أو حتى مجموعة من النباتات ومن ثم تقاس الزيادة في المحتوى الرطوبي لذلك الحيز فيما عرف باسم النظام المغلق وهو أقل شيوعاً، أو أن يمرر تيار من الهواء معروفة رطوبته النسبية وكمية ثاني أكسيد الكربون ثم تقاس الرطوبة النسبية وكمية ثاني أكسيد الكربون في الهواء الخارج كما سبق ذكره في الطريقة المعملية، ومن المصاعب الأساسية في هذه الطريقة الحصول على مادة بلاستيكية منفذة لجميع الموجات الضوئية بحيث لا يختل التوازن الطبيعي في موجات الضوء المتساقطة على النبات، لأنه وكما هو مشاهد إذا امتصت تلك المادة أطوال موجات ضوئية معينة فإن هذا سينعكس على درجة حرارة الأوراق ومدى انفتاح الثغور. وأقرب المواد التجارية مادة عديد الإيثيلين (Polyethylene) حيث إنها تنفذ غالبية الموجات الضوئية الحمراء والحمراء البعيدة أكثر من أية مادة تجارية أخرى. وهذه الطريقة لها مميزاتها الخاصة حيث تسمح بإجراء قياسات متتالية على العينة نفسها ولكن في الوقت نفسه فهي بلا شك لا تمثل الوضع الطبيعي للعينة حيث إنها تغير من درجة حرارة الأوراق علاوة على التغير في سرعة الرياح.

في التجارب طويلة المدى تستعمل طريقة الليسيميتر (Lysimeter) وهي طريقة

تتشابه مع الطريقة المعملية (طريقة وزن الأصيص) وعلى الرغم من تعدد أشكال وأحجام الليسيميترات إلا أنها تتشابه في كونها أوعية كبيرة تحوي حجما معينا من التربة تزرع به النباتات حيث تقام هذه الأوعية على ميزان كبير أو على وسادة بلاستيكية بداخلها سائل وتتصل به أنبوبة صغيرة تخرج إلى مستوى سطح الأرض حيث يقاس التغير في مستوى السائل عندما يتغير محتوى التربة المائي في الليسيميتر (الشكل رقم ٦-٧).



الشكل رقم (٦-٧). رسم تخطيطي يوضح مكونات اللايسيميتر كما يبدو في مقطع رأسي.

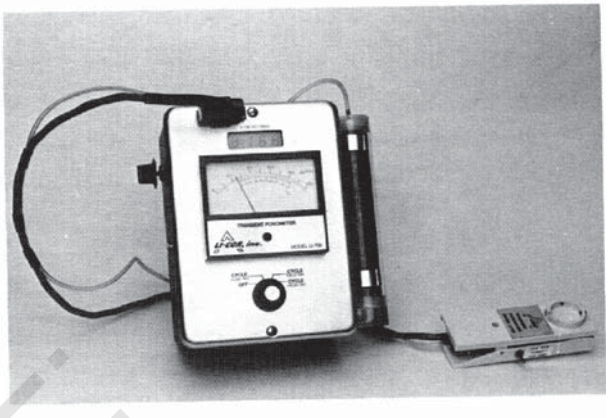
المصدر: (Salisbury and Ross, 1978).

وهذه الطريقة تعد مناسبة لقياس معدل النتح في الطبيعة بالنسبة للنباتات الصغيرة ومتوسطة الحجم ولكنها غير عملية للأشجار الكبيرة علاوة على طول الفترة الزمنية اللازمة للقيام بمثل هذه التجارب وكذلك المهارة في بناء الليسيميتر وتكاليفه.

إن الطرق سابقة الذكر ليست بالتأكيد هي الطرق الوحيدة لقياس أو تقدير معدل النتح حيث لم يقصد أساسا مراجعة جميع الطرق ولكن أريد إعطاء أمثلة

لذلك، ومن البديهي أن هناك طرقا وتعديلات وإضافات للطرق السابقة يطول ذكرها ومن أمثلة ذلك ما يعتمد على أسس سبق التنويه عنها في أماكن أخرى كالطريقة التي استعملها العالم أشتون ١٩٥٦م (Ashton, 1956) لتقدير النتح عن طريق تقدير تغير المحتوى المائي للتربة في الأصيص الذي ينمو فيه النبات بطريقة امتصاص الأشعة. وفي هذا المجال لابد من ذكر ما قام به العالم ليدفوجد ١٩٦٠م (Ladefoged, 1960) من محاولات لتقدير معدل النتح على فترات طويلة من الزمن للأشجار بطريقة قياس سرعة تدفق العصارة في الخشب باستعمال الومضات الحرارية سابقة الذكر حيث استعمل أكثر من مصدر حراري وأربعون مزدوجا حراريا، وقد تمكن من تسجيل تأثير الرياح والسحب على معدل النتح في تلك الأشجار وقارنه بمعدل امتصاص الأجزاء العليا من الشجرة بعد قطعها ووضعها في وعاء كبير به ماء، وقد كان الاعتراض على هذا العمل هو عدم صلاحية هذه الطريقة لقياس معدل النتح في وقت قصير. وينصح القارئ بمراجعة ما كتبه العالمان فرانكو وماقالهيس ١٩٦٥م (Franco and Magalhaes, 1965) لمزيد من التفاصيل عن طرق قياس النتح.

مما تجدر الإشارة إليه في هذا المقام طريقة تقدير معدل النتح في المعمل أو الحقل عن طريق قياس مقاومة الانتشار في الورقة والمقصود بالمقاومة هنا هي المقاومة لحركة الغازات (ومنها بخار الماء) عبر الورقة وعلى وجه الدقة عبر الثغور والبشرة والمسافات البينية وطبقة بخار الماء حول سطح الورقة انظر الجدول رقم (٦-٢)، تقاس المقاومة بواسطة أجهزة البورروميترات ومن أكثرها شيوعا بورروميتر الانتشار (Diffusion porometer) وهي ذات أشكال مختلفة وظهر عليها تعديلات جديدة لزيادة الكفاءة وكمثال لذلك انظر الشكل (٦-٨). لا يستغرق القياس بمثل هذه الأجهزة وقتاً طويلاً



الشكل رقم (٦-٨). بورومیتر الانتشار من إنتاج شركة لايكور.

حيث يطبق على الورقة في الغرفة الصغيرة والتي بها وصلات حساسة لقياس درجة الحرارة والرطوبة النسبية وأنبوبة صغيرة متصلة بمضخة في الجهاز، والجهاز يسجل الزمن اللازم لتجفيف هذه الغرفة، وبمعايرة الجهاز بلوحة صغيرة تحوي ثقوبا صغيرة مختلفة توضع خلفها قطعة من ورق الترشيح المبلل، ومن هذه القراءات يكون رسم بياني قياسي حيث عند استعمال ورقة النبات يسجل الوقت اللازم ويرجع للرسم البياني لتحديد المقاومة ومن هنا يمكن تقدير النتح ولمزيد من التفصيل يرجع إلى إهرلر و فان بافل ١٩٦٨م (Ehrler and van Bavel, 1968) حيث سجلا توافقا بين معدلات النتح المقاسة بهذه الطريقة والطريقة الوزنية. من الممكن أيضا، التعبير عن النتح بطريقة التوازن الحراري كما ورد في الشكل رقم (٥-١٥).

مما تقدم يمكن القول بأن هناك أساسين لتقدير النتح في النبات أو أجزائه وهما قياس التغير في الوزن أو قياس ما يفقد من بخار ماء، ومما لا شك فيه أن مثل هذه

القياسات تنطبق وتمثل ذلك الجزء الذي تم القياس عليه تحت تلك الظروف فقط ولا يستحسن أبدا أن تعمم النتيجة إلى النباتات الأخرى لأن الوضع يختلف اختلافا كبيرا وقد يصل الخطأ عند التعميم إلى قيم كبيرة، لذا والحالة هذه فإن قياس نتح النبات أو نتح جزء من النبات ليس ذا دلالة كبيرة إلا أن استعمال مثل هذه الطرق رغم عدم دقتها قد أدى إلى إبراز بعض المعلومات المفيدة وخاصة إذا حدد مصدر الخطأ ولم تنسب النتيجة إلى المجاميع النباتية. من هنا أخذ الكثير من الدارسين في دراستهم ينحون نحوا آخر في مجال العلاقات المائية وخاصة فقد الماء من النبات وتطبيقاته بحيث تؤدي القياسات إلى الاستفادة القصوى في التطبيقات البيئية حيث الحاجة الاقتصادية ومقننات الري، وهذا مجال واسع ولا بد من معرفة العلاقة بين المجاميع النباتية والظروف البيئية المحيطة بها والمجال هنا لا يتسع لشرحها والذي يهم في هذا المقام هو ما يمكن اعتباره أحد مسارات تبخر الماء يا دورته الطبيعية والتي تؤثر في المقام الأول في العمليات الفسيولوجية ألا وهي عملية التبخر عبر النبات، وهذه العملية في حد ذاتها جزء من عملية التبخر الكلية والشائعة باسم عملية البخر- نتح حيث يدل هذا المصطلح على العمليتين الرئيسيتين، التبخر من سطح التربة أو المسطح المائي والنتح من النبات.

إن عملية البخر- نتح تتم نتيجة لوجود وتداخل ثلاثة عوامل رئيسية وهي الطاقة اللازمة للتبخر ومصدرها الأساسي الشمس، ووجود ممال في جهد الماء ما بين الماء عند سطح التبخر والهواء المحيط به والعامل الثالث هو مدى المقاومة لحركة بخار الماء من الطور السائل إلى الهواء الجوي. وهذه العوامل الثلاثة تقترن بعوامل أخرى ونتيجة العملية ما هي إلا المحصلة وأي تأثير أو تغيير لها أو العوامل الأخرى المؤثرة فيها

ينتج عنه حالة اتزان جديدة لعملية البخر- نتح مما يجعل المقارنة بين القياسات المختلفة أمرا غير مناسب إلا إذا حددت جميع الظروف. يقدر مقدار الماء المفقود من الغطاء النباتي غالبا باستخدام بعض الأرصاد الجوية مثل درجة الحرارة والرطوبة النسبية وسرعة الرياح وشدة وفترة الإضاءة وغيرها عن طريق استخدام معادلات رياضية اشتقت لهذا الغرض ولا يكون التقدير دقيقا إلا إذا قورن بالقياسات العملية بواسطة الليسيميتر ولمن أراد المزيد عن هذه الطريقة يراجع المقالات التي أشرف على تحريرها ايفانز و ثيمس ١٩٨٠م (Evans and Thames, 1980) وكذلك سلاتير ١٩٦٧م (Slatyer, 1967) والمراجع المذكورة بهما.

(٦-٦) العوامل المؤثرة في معدل النتح

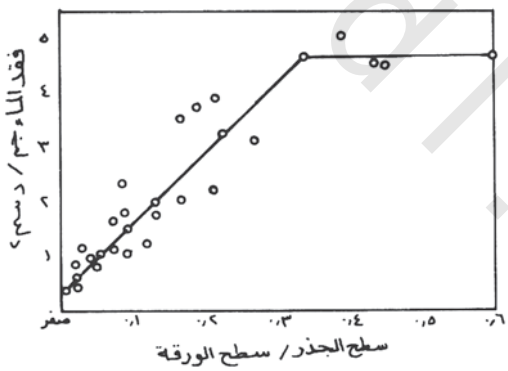
يستدل مما سبق أن فقد الماء من النبات يتم بصورة رئيسية عبر الثغور بينما ذلك الجزء المفقود عبر البشرة أو العديسات قليل ولا يمكن مقارنته بالنتح الثغري، لذا فإن العوامل المؤثرة على فتح الثغور وغلقها تؤثر في معدل النتح، ولكن هناك خصائص معروفة للنباتات تؤثر أيضا في معدل النتح مثل تركيب ومساحة الورقة ونسبة المجموع الجذري إلى المجموع الخضري وغيرها من الخصائص، إلا أن الظروف الطبيعية مثل الضوء وتركيز ثاني أكسيد الكربون والرطوبة النسبية ودرجة الحرارة وسرعة الرياح ووفرة الماء إلى غير ذلك من العوامل مثل ملوثات الجو والأمراض النباتية كلها مهمة في تأثيرها في فتح الثغور وغلقها وبالتالي معدل النتح.

بالنسبة لتركيب الورقة نجد أن كثيرا من النباتات التي تأقلمت للنمو في بيئات معينة تتميز بتحورات خاصة، فمثلا النباتات التي تنمو في مناطق جافة والمعروفة باسم النباتات الجفافية قد تتميز بأدمة سميكة وثغور غائرة أو شعيرات كثيفة مما يعمل على الإقلال من فقد

الماء من النبات، ومع هذا فإن من المشاهد تفوق معدل النتح الثغري عند وفرة الماء لهذه النباتات على معدل النتح الثغري لبعض النباتات التي تنمو في مناطق رطبة.

وقد يعود ذلك إلى تركيب الورقة حيث نسبة المساحات الداخلية المعرضة للتبخر إلى مساحة الورقة أكثر في النباتات الجفافية علاوة على وجود أجهزة الخشب التوصيلية المتطورة وكثافة الثغور نتيجة لتعرض تلك النباتات إلى الإضاءة الشديدة. وعلى أية حال فلكل نبات معدل نتح مميز تحت ظروف معينة وهذا يتحكم به التركيب الداخلي للورقة والشكل الخارجي وحجم الورقة.

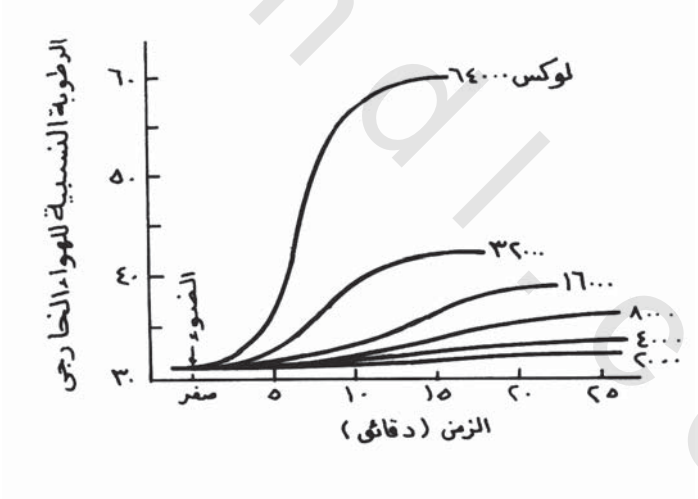
أما العامل الآخر والذي يعد من خصائص النبات فهو نسبة المجموع الجذري إلى المجموع الخضري أي نسبة أسطح الجذور الممتصة للماء إلى نسبة أسطح الأوراق التي يتبخر منها الماء فكلما كان سطح التبخر كبيرا وليس به تحورات مثل الشعيرات وأن عدد الثغور كبير كلما كان معدل النتح عاليا، وهذه العلاقة موضحة في الشكل التالي (الشكل رقم ٦-٩).



الشكل رقم (٦-٩). تأثير التغير في نسبة المجموع الجذري إلى المجموع الخضري (سطح الجذر/سطح الورقة) في معدل النتح (فقد الماء) في نبات الليمون (*Citrus limonia*).

المصدر: (Kramer, 1956).

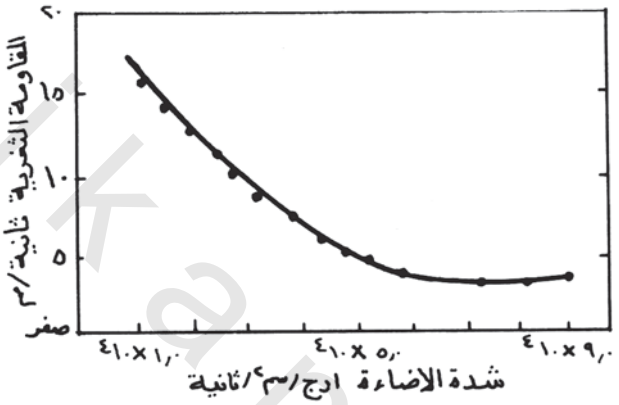
أما بالنسبة للظروف الجوية فهي تؤثر في معدل النتح إلا أن هذا التأثير قد يكون في زيادة المعدل أو الإقلال منه أو التفاعل في التأثير مع عامل آخر، ويمكن القول بأن الظروف البيئية تؤثر جميعا كوحدة متكاملة على فتح غلق الثغور أو غلقها أو مدى انفتاحها وبالتالي تؤثر في معدل النتح، فالضوء يعمل على فتح الثغور ومقدار انفتاحها إلى حد معين ولكن شدة الإضاءة في الوقت نفسه تتداخل في التأثير في معدل النتح عن طريق زيادة درجة حرارة الورقة خاصة بالأشعة الحمراء البعيدة والتي يمكن تفادي جزء منها عمليا عن طريق تمرير الضوء على طبقة من الماء عند دراسة شدة الإضاءة على النتح كما عمل العالم فيرجن ١٩٥٦م (Virgin, 1956) عند دراسة هذه الظاهرة في نبات القمح حيث توصل إلى وجود علاقة بين شدة الإضاءة والنتح كما هو موضح في الشكل (٦-١٠).



الشكل رقم (٦-١٠). تغير معدل النتح مع شدة الإضاءة لأوراق نبات القمح. قبل الإضاءة كان النتح ٣٢% لمدة ٣٠ دقيقة، وقد أستخدم كرونا هيجروميتر لقياس النتح.

المصدر: (Virgin, 1956).

وآلية تأثير شدة الإضاءة في معدل النتح هي عن طريق تأثير شدة الإضاءة في مقاومة الورقة (أي المقاومة لحركة بخار الماء) عن طريق تأثيرها على مدى انفتاح الثغر حيث العلاقة بين مدى انفتاح الثغر ومعدل النتح موضحة في الشكل التالي (الشكل رقم ٦-١١).

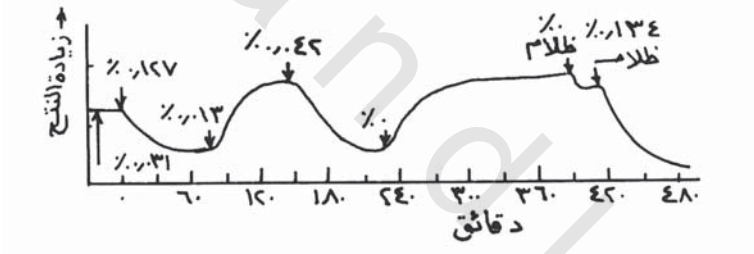


الشكل رقم (٦-١١). تأثير الضوء المرئي في فتحة الثغر في نبات الفاصوليا كما قيست بالمقاومة.

المصدر: (Rijitema, 1965).

يتسبب الضوء في فتح الثغور أثناء النهار أي عندما تكون الشمس ساطعة ولكن وضع النبات أثناء النهار في الظلام قد لا يتسبب في غلق الثغور بصورة كاملة وذلك بسبب ما عرف عن دورية حركة الثغور والتي يتحكم فيها النبات وقد سبقت الإشارة إلى ذلك عند ذكر دورية معدل حركة العصارة (انظر الشكل رقم ٥-١٥). من ناحية أخرى، هناك تأثير مباشر للضوء الأزرق في الخلايا الحارسة يؤدي إلى فتح الثغور ولم تتضح الآلية بعد.

أما تركيز ثاني أكسيد الكربون، فإن انخفاض ضغطه الجزئي داخل الورقة يؤدي إلى انفتاح الثغور وبالمثل فارتفاع ضغطه الجزيئي داخل الورقة يؤدي إلى إغلاقها. ومن الملاحظ أن الثغور في نبات الذرة (*Zea* mays) قد تستجيب للتغيرات في ثاني أكسيد الكربون في غضون ثوان، وموقع تحسس مستوى ثاني أكسيد الكربون هو داخل الخلايا الحارسة. وقد دلت الدراسات أن زيادة تركيز ثاني أكسيد الكربون الخارجي (في حدود ما هو موجود في الطبيعة ٠,٠٣٪) يؤدي إلى غلق الثغور والتأثير هذا ليس مطلقا أي أن هناك تدرج في مدى انفتاح الثغر يتناسب مع تركيز ثاني أكسيد الكربون الخارجي وهذا يؤدي بالتالي إلى التأثير على معدل النتح كما يتضح من الشكل رقم (٦-١٢).



الشكل رقم (٦-١٢). تأثير ثاني أكسيد الكربون في النتح في نبات الفجل حيث تشير الأسهم إلى تغير تركيزه أو الإضاءة التي كانت بشدة ١٦,٥ جول م$^{-٢}$. ثانية$^{-١}$.

المصدر: (Gaastra, 1959).

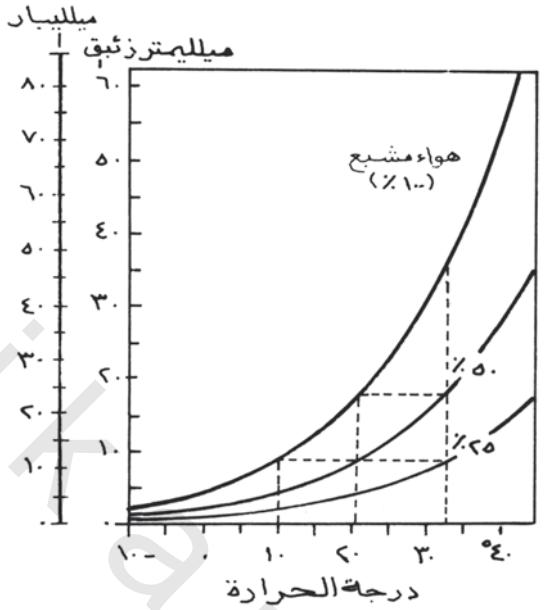
إن الرطوبة النسبية مصطلح لنسبة ضغط بخار الماء الفعلي عند درجة حرارة معينة إلى ضغط بخار الماء عند التشبع في تلك الدرجة وعليه فهي مقياس لمقدار ما يحتويه الهواء المحيط بالنبات من ماء عند درجة حرارة معينة والنتح في الحقيقة مقترن بمال جهد الماء بين سطح التبخر في الورقة والجو الخارجي ولو أن دانتي ١٩٦٩م

(Dainty, 1969) يعتقد بأن القوة الحقيقية المحركة للنتح هي الفرق في ضغط بخار الماء وليس فرق الجهد الكيميائي للماء، وعلى أية حال فالعلاقة بين الاثنين كما سبق ذكرها موجودة وهي:

$$\Psi_w = \frac{RT \ln e/e^\circ}{V_w}$$

ومن الممكن استخدام فرق الجهد ولكن المعتاد بين علماء فسيولوجيا النبات هو استخدام فرق الضغط البخاري (Δe) أو فرق التركيز (ΔC) بين المنطقتين (سطح التبخر والهواء الخارجي) كقوة محركة للنتح لارتباط انتشار الغاز بقانون فيك وسيرد ذكر ذلك في الموضوع اللاحق. وكما هو ملاحظ أعلاه عند ذكر الرطوبة النسبية تحدد درجة الحرارة نظرا للعلاقة الوثيقة بين هذين العاملين وأن الرطوبة النسبية متغيرة بتغير درجة الحرارة وكذلك التركيز والشكل (٦-١٣) يوضح العلاقة بينها.

يستدل من الشكل على أنه لو كانت كمية الماء الموجودة في الجو الخارجي ثابتة تقريبا فإن أي ارتفاع في درجة الحرارة سيؤدي إلى انخفاض في الرطوبة النسبية والعكس صحيح وهذا بالتالي سيؤدي إلى زيادة في معدل النتح، من هنا فإن النبات يستمر في النتح إلى جو خارجي مشبع عندما تتعرض أوراقه إلى شدة إضاءة عالية (أي زيادة في كمية الحرارة الساقطة على الأوراق) وتفسير ذلك أن شدة الإضاءة تؤدي إلى رفع درجة حرارة الورقة عن درجة حرارة الجو وبالتالي فالرطوبة النسبية عند سطح الورقة ستكون أقل من ١٠٠ ٪ مما يتسبب في تدفق بخار الماء من الورقة إلى تلك الطبقة وقد يتكاثف هذا البخار على الورقة كما يشاهد أحيانا يا المناطق الاستوائية بعد سقوط الأمطار وانقشاع الغيوم عن الشمس. أما الحالات الغالبة في الطبيعة فهي أن درجة حرارة الورقة أقل من درجة حرارة الجو وسطح التبخر في الورقة يكون مشبعا أو يكاد بينما الرطوبة النسبية للجو الخارجي أقل من ١٠٠٪ ويعتمد مقدارها على المنطقة التي



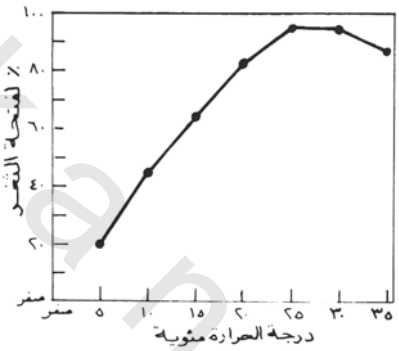
الشكل رقم (٦-١٣). العلاقة بين الضغط الجزئي لبخار الماء ودرجة الحرارة عند ٢٥% و٥٠% و١٠٠% رطوبة نسبية. والخطوط الرأسية المتقطعة تدل على أن الهواء، مثلا، يحوي كمية من الماء تتساوى تند درجة حرارة ١٠°م ورطوبة ١٠٠% تلك عند درجة حرارة ٥٠°م ورطوبة نسبية ٥٠% وكذلك عند درجة حرارة ٣٣°م ورطوبة نسبية ٢٥%.

المصدر: (Salisbury and Ross, 1969).

يعيش فيها النبات. وبصورة عامة فكلما كان الفرق في ضغط بخار الماء أو الفرق في تركيزه أو الفرق في جهد الماء- ولا يهم المصطلح المستخدم- كبيرا كلما كانت القوة المحركة للنتح كبيرة وبالتالي كلما كان معدل النتح كبيراً.

يلاحظ مما سبق تداخل العوامل المؤثرة في فتحة الثغر حيث ذكرت درجة الحرارة أكثر من مرة عند ذكر بعض العوامل المناخية المؤثرة في معدل النتح أو فتحة الثغر ولكن

من جهة أخرى فتغير الحرارة عندما تكون جميع العوامل المناخية الأخرى ثابتة يغير من معدل النتح فالزيادة لدرجة الحرارة في حدود معينة يزيد من معدل التبخر للتأثير الفيزيائي وزيادة الطاقة الحركية لجزيئات بخار الماء أي التأثير المباشر على فرق جهد الماء هذا علاوة على تأثير الحرارة المباشر على فتحة الثغر كما في الشكل التالي (الشكل رقم ٦-١٤).

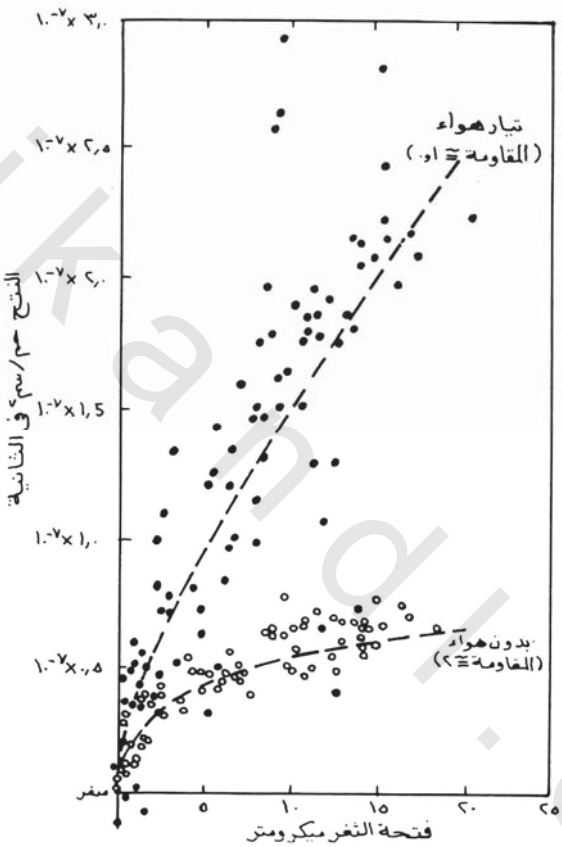


الشكل رقم (٦-١٤). العلاقة بين درجة الحرارة والنسبة المئوية لفتحة الثغر في أوراق نبات القطن.

المصدر: (Wilson, 1948).

يوضح الشكل السابق التأثير المباشر لدرجة الحرارة في فتحة الثغر حيث تكاد الثغور أن تنغلق عندما تقترب درجة الحرارة من الصفر المئوي. أما العامل البيئي الآخر فهو سرعة الرياح حيث يتداخل في تأثيره مع العوامل الأخرى نظرا لأن طبقة الهواء المحيطة بالثغور تزداد سمكا في غياب الرياح وهذا معناه ازدياد في المقاومة لحركة جزيئات الماء من سطح التبخر إلى الهواء الخارجي [انظر الجدول رقم ٦- ٢) لمعرفة قيمة مقاومة هذه الطبقة]. أما وجود الرياح فإن تيار الهواء يعمل على إزاحة جزء كبير

من تلك الطبقة وغلاف الانتشار المحيط بالثغور وبذا تقل المقاومة ويزداد النتح كما في الشكل رقم (٦-١٥). والذي يوضح العلاقة بين فتحة الثغر والنتح في غياب أو وجود



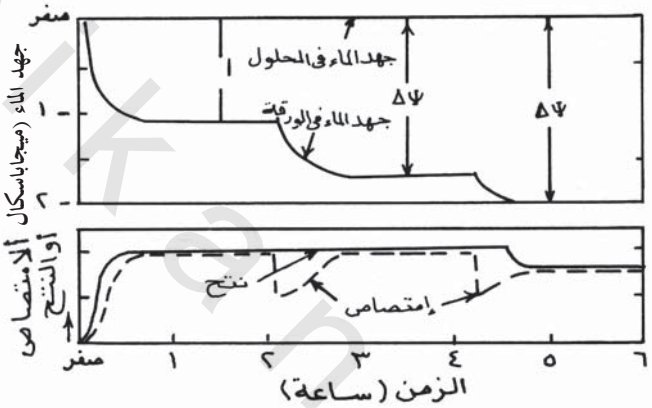
الشكل رقم (٦-١٥). معدل النتح عند اختلاف فتحة الثغر في نبات (*Zebrina*) وذلك في وجود تيار من الهواء (حيث (r_a) تساوي تقريبا ٠,١ ثانية . سم$^{-1}$) وفي الهواء الساكن (حيث (r_a) تساوي تقريبا ٢ ثانية . سم$^{-1}$).

المصدر: (Bange, 1953).

الرياح على أنه يجب أن لا يغيب عن الذهن تأثير حركة الهواء في تبريد سطح التبخر مما يقلل من درجة التشبع وبالتالي الزيادة في ممال جهد الماء، وهذا من الأمور التي تزيد من تعقيد تداخل العوامل في تأثيرها. ومع هذا فالعلاقة بين سرعة الرياح ومعدل النتح ليست علاقة تناسب لأنه عند تعريض النبات إلى تيار من الهواء بصورة مفاجئة فإن معدل النتح يزداد بحدة ثم لا يلبث أن يستقر تقريبا مما يضيف سببا آخر للاعتقاد بأن العملية معقدة، ومرة أخرى فإن من المهم جدا الإدراك بأن تغير أي عامل مناخي ليس من الضروري أن يؤدي إلى تغيير في معدل النتح أو مدى انفتاح الثغر بطريقة تناسبية وذلك لأن معدل النتح- وهو النتيجة الظاهرية لتداخل هذه العوامل في التأثير- لا يحكمه عامل واحد بل هو نتيجة تفاعل بين هذه العوامل في إبراز ممال جهد الماء كقوة محركة وفي التأثير في المقاومة لحركة بخار الماء وكذلك التأثير طويل المدى في العوامل الداخلية للنبات، ومن العوامل الأخرى المؤثرة في النتح وفرة الماء في التربة حيث إن النتح لأي نبات يتأثر بمقدار ما يتوافر من ماء في منطقة جذوره وما ظاهرة الذبول إلا نتيجة لاختلال هذا الاتزان وقلة الماء في التربة بصورة عامة، حيث إنه عندما يقل محتوى التربة وباستمرار النتح ينتج عن ذلك إجهاد للأوراق وانخفاض في جهدها المائي مؤديا بالتالي إلى إغلاق الثغور. وباستمرار الحالة هذه فإن النتح غير الثغري سيؤدي حتما إلى جفاف النبات.

أما في الحالة الخاصة لبعض النباتات حيث يكون محتوى التربة المائي ثابتا فإن من الملاحظ أن نقص المحتوى المائي للورقة في وسط النهار بسبب زيادة النتح على الامتصاص يؤدي إلى هبوط في معدل النتح رغم استمرار عوامل التبخير الجوية في الارتفاع، والمثل على ذلك نباتات المستنقعات القصبية، كالبردي حيث تمتد جذور هذا النبات في تربة مشبعة بالماء أو تكون ممتدة في الماء نفسه.

إن كمية الماء الممتصة بواسطة النبات وكمية الماء المفقودة منه تخضع لفرق في الجهد بين منطقتي تبخر الماء داخل الأوراق والهواء الخارجي إلا أن الثغور تتحكم في موازنة هذه الكمية في مدى معين وهذا ما أوضحه العالم سلاتير ١٩٦٧م (Slatyer, 1967) في أحد استنتاجاته والموضحة نتيجتها في الشكل رقم (٦-١٦) حيث تتضح العلاقة بين معدل ما يمتصه النبات ومقدار النتح والفرق في جهد الماء ($\Delta\Psi$) لكل من الورقة والتربة.

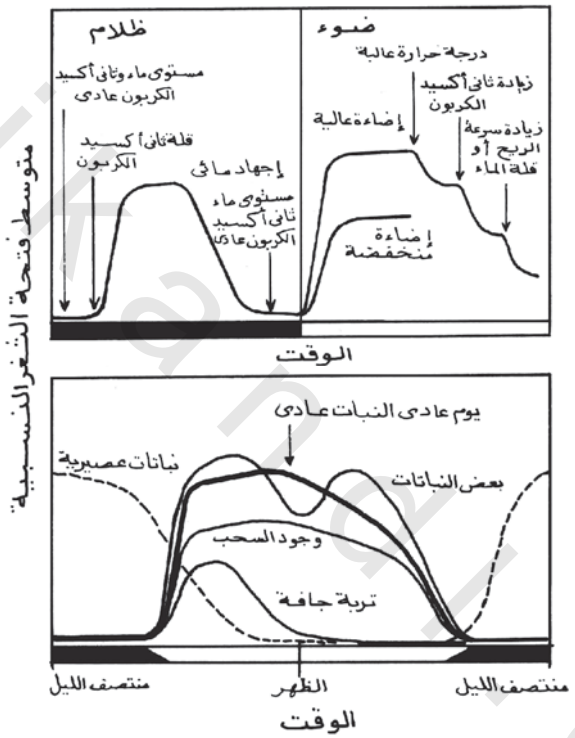


الشكل رقم (٦-١٦). رسم بياني يوضح العلاقة بين معدل الامتصاص والنتح مع الزمن (الرسم السفلي) وجهد الماء في الورقة حيث جهد الماء المحيط بالجذور يساوي الصفر ولذا فإن ($\Delta\Psi$) تمثل الفرق في الجهد إذ يزداد الفرق عندما يقل الامتصاص نتيجة لتبريد منطقة الجذور وزيادة فرق جهد الماء (أي انخفاض جهد الماء في الورقة) غير كاف لإغلاق الثغور ولذا فليس هناك انخفاض في النتح.

المصدر: (Slatyer, 1967).

وأخيراً قد يكون من المفيد وضع مختصر لتأثير معظم العوامل في فتحة الثغر وأقرب ما يكون هو ذلك المختصر الذي وضعه كل من سالسبوري و رس ١٩٦٩م (Salisbury and Ross, 1969) والموضح في الشكل التالي (الشكل رقم ٦- ١٧) حيث تتبين تلك العلاقة.

مما تقدم من ذكر لتأثير العوامل في فتحة الثغر وبالتالي معدل النتح قد يلاحظ أن الطريقة المتبعة في كل مثال لأي عامل هي الطريقة البسيطة في دراسة أي ظاهرة علمية بصورة مبدئية وهي دراسة تأثير عامل ما في العملية دون الأخذ في الاعتبار تفاعل



الشكل رقم (٦–١٧). ملخص عام لتأثير بعض الظروف المناخية في الثغور.

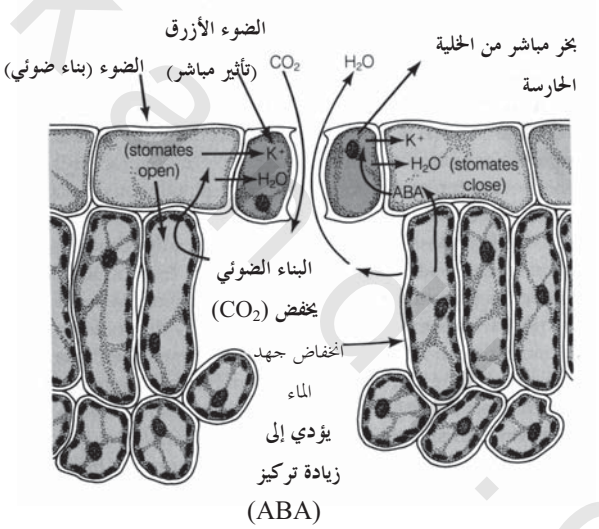
المصدر: (Salisbury and Ross, 1969).

وتداخل العوامل الأخرى في التأثير مما يؤدي في النهاية إلى الحصول على معلومات أولية عن تأثير ذلك العامل، وهذه المعلومات وإن كانت مفيدة جدا إلا أنها ليست

نهائية وممثلة لما هو قائم في الطبيعة وخاصة أن العوامل الأخرى عند إجراء الدراسة مغفلة أو ثابتة. ولكي تكون نتائج الدراسة ذات معنى أكبر فإنه يجب دراسة العوامل مجتمعة وتأثير بعضها في البعض فيما يعرف إحصائيا بطرق تحليل العوامل، وهناك أمثلة قليلة جدا لمثل هذه التجارب في هذا المجال كما نوه عن تداخل عاملين أو أكثر من الأمثلة المذكورة أعلاه وكمثال لمثل هذه التجارب انظر هيث وراسل ١٩٥٤م (Heath and Russell, 1954).

هناك ملاحظة أخيرة عن العوامل المؤثرة في معدل النتح وحركة الثغور والتي في الغالب لا تتمثل في الطبيعة بالشكل الذي يستخدمه العلماء في المعامل وهي أن الكثير من المركبات التي تؤثر بطريقة مباشرة أو غير مباشرة في أيض الخلايا النباتية تؤدي بالتالي إلى التأثير في معدل النتح وحركة الثغور ومن الأمثلة على ذلك هرمون حمض الأبسيسيك (Abscisic acid) كمثل للمركبات التي تعمل على غلق الثغور، أما مثل المركبات التي تعمل على فتح الثغور فهو أحد السموم الناتجة من أيض إحدى الفطريات والذي أطلق عليه أسم فيوزيكوكين (Fusicoccin) وهو بالتالي يؤدي إلى استمرار النتح حتى الذبول. إن هرمون حمض الأبسيسيك الذي يعرف كمثل لإحدى المجاميع الهرمونية النباتية وهي موانع أو مثبطات النمو يؤدي إلى غلق الثغر عند وجوده بتركيز ١٠$^{-5}$ جزيئي حجمي أو أقل مما يشير إلى دور هذا الهرمون في غلق الثغور عندما تتعرض النباتات إلى نقص في ماء التربة حيث عرف أن تركيز هذا الهرمون يزداد في النباتات بصورة ملحوظة عند تعريضها لفترات من الجفاف. إن مصدر هذا الهرمون هو النسيج الوسطي حيث يعمل على فقد المادة المذابة (K^+) من الخلايا الحارسة مما ينتج عنه غلق الثغور وبذا يعمل هرمون (ABA) كمؤشر للثغور بأن خلايا النسيج الوسطي تقع تحت إجهاد مائي. إن هذه الإشارة إلى دور هذا الهرمون مؤيدة ببعض البحوث

وكمثال لذلك ما عرف عن بعض أصناف الطماطم التي حدث بها طفرة ولم تعد لها المقدرة على تجميع وتراكم هذا الهرمون ولذا فثغورها تبقى مفتوحة طوال اليوم رغم ذبولها ولكن تزويد النبات بهذا الهرمون يؤدي إلى إغلاق الثغور عندما يختل التوازن بين كمية الماء الممتصة وكمية الماء المفقودة (Tal, *et. al*., 1974). تعتمد درجة استجابة الثغر للمعاملة بهرمون حمض الأبسيسيك على تركيز ثاني أكسيد الكربون في الخلية الحارسة، والشكل (٦-١٨) رسم تخطيطي يوضح عملية فتح الثغر وغلقه وعلاقة كل من هرمون حمض الأبسيسيك وثاني أكسيد الكربون والإضاءة.



الشكل رقم (٦-١٨). رسم تخطيطي يوضح علاقة كل من هرمون حمض الأبسيسيك وثاني أكسيد الكربون والإضاءة في عملية غلق الثغور (الخلية الحارسة اليمنى) وفتحها (الخلية الحارسة اليسرى)، ويلاحظ أن الضوء الأزرق ذو تأثير مباشر في عملية فتح الثغر.

المصدر: (Jensen and Salisbury, 1984) **بتصرف**.

أما آلية استجابة الثغور لهرمون حمض الأبسيسيك فغير معروفة على وجه

الدقة بل هناك تصور مبني على وجود القنوات الأيونية في الغشاء والتي يستدل على وجودها تقنية تسجيل القطع الصغيرة المشدودة (Patch-Clamp Recording Technique). والتصور هو أن ارتباط هرمون حمض الأبسيسيك مع مستقبله في الغشاء يسبب فتح قنوات الكالسيوم وبذا يتدفق الكالسيوم إلى السيتوبلازم وقد يعمل الكالسيوم كرسول ثاني لفتح قنوات الأنيونات مثل الكلور والماليت وبالتالي ينتج عن تدفق هذه الأنيونات إلى منطقة الجدار الخلوي انخفاض في جهد الغشاء الكهروكيميائي مما يؤدي إلى فتح قنوات البوتاسيوم لكي تتدفق إلى خارج الخلية الحارسة ويتبعه الماء مما يخفض ضغط الامتلاء وبالتالي غلق الثغر. ورغم كثرة البحوث في مجال تأثير هذا الهرمون على غلق الثغور وعلاقته بقلة الماء المتاح للنبات، فالموضوع لازال في بدايته وقد يحتاج إلى زمن للكشف عن آلية تأثير هذا الهرمون رغم أن هذا الهرمون يعمل على تثبيط تدفق أيون البوتاسيوم إلى الخلايا الحارسة (Hsiao, 1976).

أما المركب الآخر فيوزيكوكين فوجوده وبتركيز ١٥ $^{-٦}$ جزيئي حجمي يؤدي إلى بقاء الثغور مفتوحة حتى في الظلام (Squire and Mansfield, 1974)، وقد عرف عن هذا المركب أيضا أنه ينشط تراكم أيون البوتاسيوم في الخلايا الحارسة. ومهما يكن من تأثير لهذين المركبين فإن النقطة المهمة والتي تسترعي الانتباه هو تأثيرهما الواضح وبهذه التراكيز الضئيلة والمميزة لتأثير الهرمونات، والمجال المحتمل في تأثير هذين المركبين وغيرهما من المركبات المشابهة هو مجال الاتزان الأيوني والمائي للخلايا النباتية.

(٦–٧) الخواص العامة لانتقال الماء

ينتقل الماء من النبات على هيئة بخار من الأوراق بصفة أساسية إلى الهواء الجوي الخارجي نتيجة للاختلاف في المحتوى المائي لهاتين المنطقتين، وقد تعارف العلماء على

استعمال فرق الضغط البخاري أو فرق تركيز بخار الماء ما بين المنطقتين كقوة محركة لهذا التدفق بدلا من استخدام فرق الجهد، وكما علل لذلك دانتي ١٩٦٩م (Dainty, 1969) فإن هذا التعارف يؤدي إلى استخدام معادلة على نمط قانون فيك لانتشار الغازات ولذا فالنتح من الورقة يعبر عنه كالتالي:

$$E = \frac{\Delta c}{r_t} = \frac{273}{PT}\ \rho_v\ \frac{\Delta e}{r_t}$$

حيث: (E) النتح (جم/ سم ٢/ الثانية)

و (Δc) فرق تركيز بخار الماء بين سطح التبخر في الورقة والهواء جم/ سم ٣

و (r_t) المقاومة الكلية لتدفق بخار الماء (ثانية/ سم)، ويلاحظ هنا استخدام المقاومة بدلا من النفاذية في قانون فيك لتدفق الانتشار نظرا لاستخدام هذا المصطلح عند الحديث عن النتح.

و (Δe) فرق الضغط البخاري بين داخل الورقة والهواء (مم زئبق)

و (P) الضغط الجوي (مم زئبق)

و (T) درجة الحرارة المطلقة

و (ρ_v) كثافة بخار الماء في الهواء، والكمية {ρ_v (273/PT)} معامل تحويل من ضغط إلى تركيز.

والمعادلة السابقة تدل على أن معدل النتح مقدرا بعدد جرامات الماء المفقودة من كل سم^{٢} من الورقة في الثانية يتناسب عكسيا مع المقاومة في هذا المسار بالثانية/ سم.

والمقاومة هنا هي المجموع الجبري للمقاومات الموجودة في مسار بخار الماء وتتمثل

في المقاومتين المتوازيتين، المقاومة الثغرية (r_s) والمقاومة في طبقة الأدمة (r_c) وأخيرا المقاومة في الطبقة المحيطة بالورقة (r_a)، ومرة أخرى فإن المقاومة الثغرية هي مجموع المقاومات في مسار بخار الماء في ذلك الطريق كالتالي:

$$r_s = r_w + r_i + r_p$$

حيث: (r_w) المقاومة في جدر خلايا الورقة

و (r_i) المقاومة في المسافات البينية في الورقة

و (r_p) المقاومة في فتحة الثغر وقيمها تعتمد على مقدار انفتاح الثغر.

من كل هذه المقاومات يتضح مقدار وأهمية المقاومة في الطبقة المحيطة بالورقة (r_a) في التأثير على معدل النتح كما ذكر سابقاً في الشكل رقم (٦-١٥). أما المقاومات الأخرى فقد ورد مثال لبعض قيمها في الجدول رقم (٦-٢) إلا أنه يجب التنويه أن قيم هذه المقاومات يتحدد حسب نوع النبات والظروف البيئية المحيطة به.

عندما تُثبت قيم هذه المقاومات في وضع ما فإن معدل النتح يتحدد بقيمة الفرق في تركيز بخار الماء- أو ضغطه- بين سطح التبخر والهواء الخارجي، وضغط بخار الماء عند سطح التبخر يتأثر بدرجة الحرارة وجهد الماء في الورقة. إن تأثير درجة الحرارة مهم جدا حيث العلاقة بينهما دقيقة كما يوضح ذلك الشكل رقم (٦-١٣) والجدول التالي (الجد ول رقم ٦-٤).

obeikandl.com

الجدول رقم (٦–٤). تأثير درجة الحرارة في ضغط بخار الماء وفرق الضغط بين الورقة والهـواء، على افتراض أن جهد الماء عند سطح التبخر يساوي صفرا وكذلك التغير في الرطوبة النسبية في الهواء من الممكن إهماله.

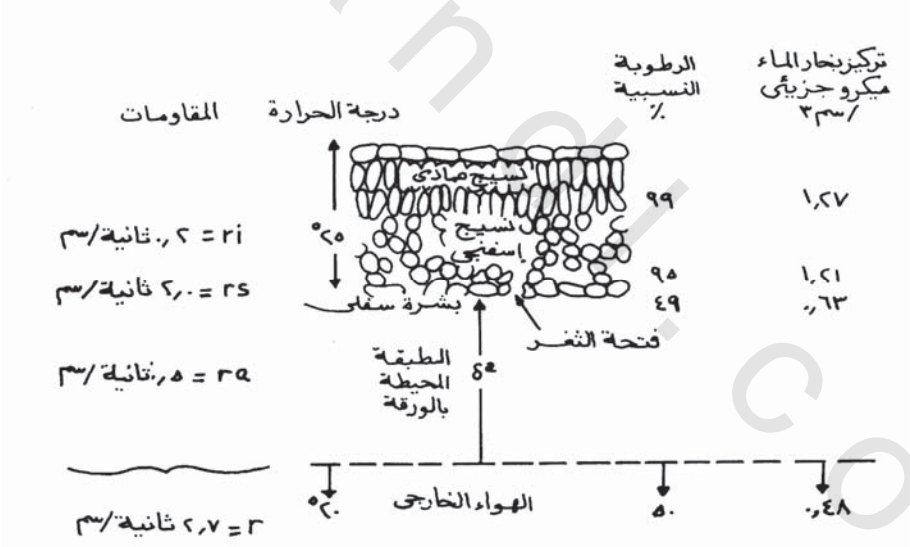
درجة الحرارة (مئوية)	ضغط بخار التشبع (مم زئبق)	ضغط البخار عند ٦٠٪رطوبة نسبية (مم زئبق)	فرق ضغط البخار (Δe) (مم زئبق)
الصفر	٤,٦	٢,٧	١,٩
١٠	٩,٢	٥,٥	٣,٧
٢٠	١٧,٥	١٠,٥	٧,٠
٣٠	٣١,٨	١٩,٠	١٤,٨
٤٠	٥٥,٣	٣٣,٢	٢٢,١

المصدر: (Kramer, 1969).

من الجدول السابق يتضح مدى التغير في فرق الضغط (Δe) عند أدنى تغير في درجة الحرارة. وهذا ما يفسر ما هو مشاهد في الطبيعة من تغيرات في معدل النتح نتيجة للتغيرات البسيطة في درجات الحرارة. وعلى أية حال فالجدول السابق أريد به إيضاح العلاقة بين فرق الضغط ودرجة الحرارة لأن الافتراض الأول وهو أن جهد الماء عند سطح التبخر يساوي الصفر غير صحيح تماما– ولو أن هذا لا يغير كثيرا من مدلول الافتراض السابق– وذلك لتأثير تراكم الأملاح المستمر في الورقة وفقد جزء من الماء عن طريق النتح على جهد الماء في الورقة وخاصة عندما يكون معدل النتح سريعا أو أن مصدر الماء في التربة محدود. وبالفعل هناك بعض القياسات على جهد الماء في الأوراق كما أشير إلى ذلك سابقا وأنه قد يصل إلى قيم كبيرة، [لقد أورد شمشي ١٩٦٣م (Shimshi, 1963) أن جهد الماء في ورقة الذرة نحو– ٩ ميجاباسكال، بينما وايتمان

وكـولر ١٩٦٤م (Whiteman and Koller, 1964) ذكـرا أن جهـد المـاء في ورقـة النبـات الصحراوي (*Reamuria*) يتراوح من- ١٨ إلى- ٣٢ ميجاباسكال] مما يدعو إلى الاعتقاد بأن جهد الماء عند سطح التبخر أقل من الصفر وبالتالي فإن الضغط البخاري في تلك المنطقة ليس هو الضغط البخاري المشبع عند درجة حرارة الورقة.

وكمثال لحركة بخار الماء من الورقة نتيجة للعوامل المتداخلة والتي تمثلها معادلة النتح فالشكل التالي (الشكل ٦-١٩) يوضح بعض القيم الممثلة لكل جزء في المعادلة والتي يلزم الحصول عليها عند إجراء مثل هذه الدراسة. ونظرا لأن هناك وحدات مختلفة للتعبير عن كمية بخار الماء المفقودة من وحدة السطح للورقة فقد تكون معاملات التحويل من وحدة إلى أخرى والتي أوردها العالم نوبل ١٩٧٤م (Nobel, 1974) ذات فائدة وهي مدرجة في الملحق رقم (٢) الجدول رقم (٢).

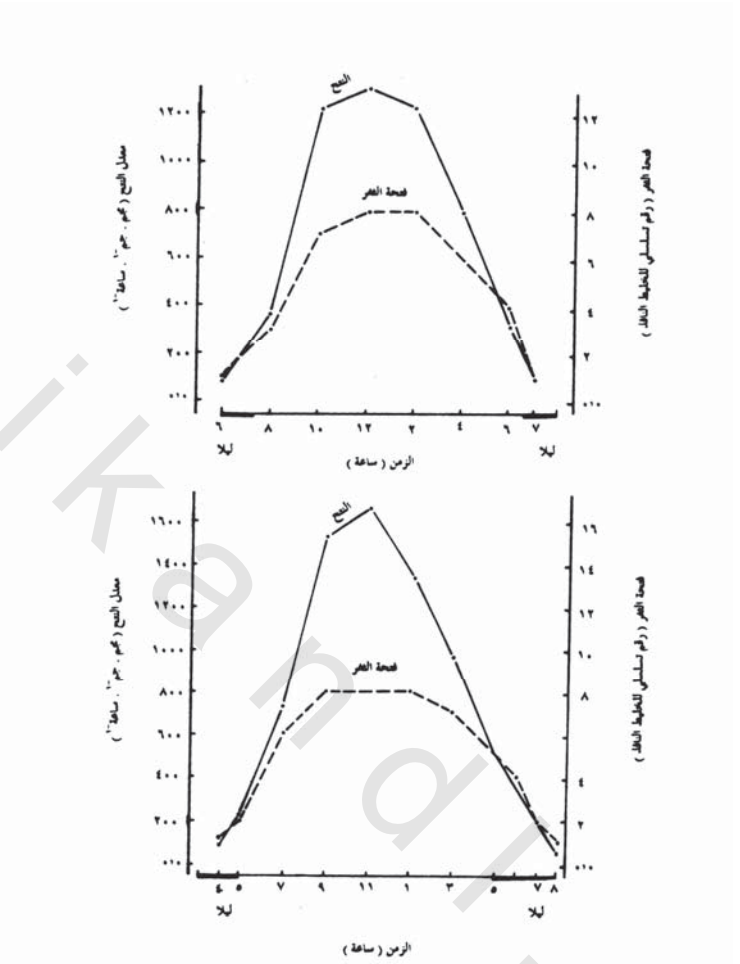


الشكل رقم (٦-١٩). بعض القيم العددية الممثلة لمعادلة النتح ويتبين قيم المقاومات المعيقة لانتشار بخـار الماء من ورقة النبات. هذه القيم غير حقيقية.

المصدر: (Nobel, 1974).

من الدراسات الميدانية (Abd El-Rahman *et. al*., 1974) على العلاقات المائية تحت الظروف الصحراوية ما وجد في نبات السوس (العرقسوس) *Glycyrrhiza glabra* (L.) وهو نبات طبي صحراوي يتحمل الظروف الجفافية وينمو في أنماط مختلفة من التربة ، بأن النبات ينتح بصورة أكبر نسبيا من غيره من النباتات الصحراوية ، وأن منحنيات معدل النتح تختلف في شكلها في الأشهر الجافة (ذات قمة واحدة) عنه في الأشهر الرطبة نسبيا (يشبه القبة) كما في الشكل (٦-٢٠). من ناحية أخرى ، أوضحت دراسة على النخيل وهو نبات صحراوي يخضع لدورات الري بعد انتخاب أصنافه بواسطة الإنسان وذلك من حيث الاختلافات بين الأصناف وحسب عمر الورقة النسبي من حيث معدل البناء الضوئي والنتح والتوصيل الثغري بأن معدل النتح يسير في الاتجاه نفسه مع التوصيل الثغري وشكل المنحنى يشبه القبة Al-Whaibi, (1988).

obeikandl.com

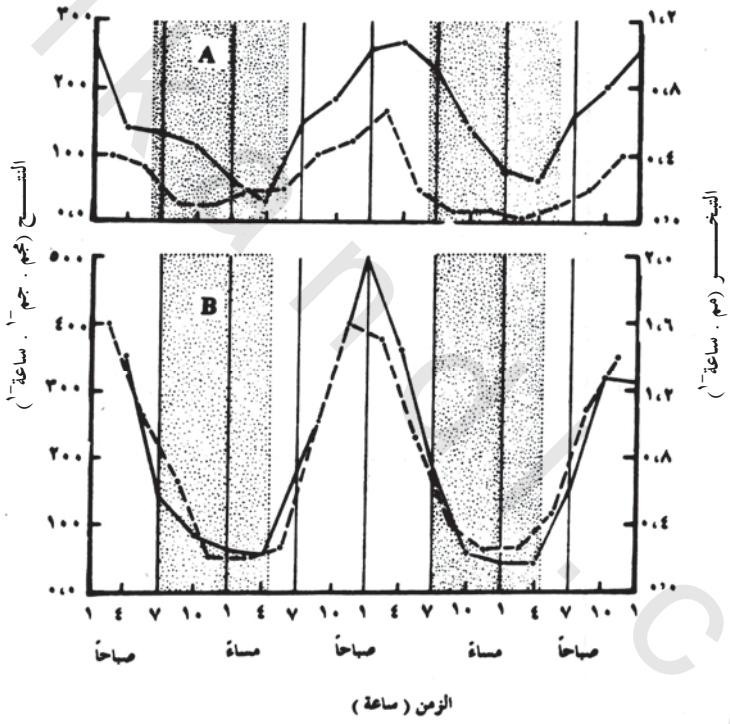


الشكل رقم (٦–٢٠). معدل النتح اليومي وفتحة الثغر لنبات السوس في شهر إبريـــل (A) وفي شهر يونيو (B) وذلك في وادي النطرون في جمهورية مصر العربية يوضح شكل القبة للمنحنى والقمة الوحيدة على التوالي.

المصدر: (Abd El-Rhman, *et. al.*, 1974).

obeikandl.com

أما في نبات الزلة (*Zilla spinosa* Prantl) فلا يختلف في هذه الظاهرة Batanouny, (1974) ويتفق في الاتجاه مع منحنى التبخر (الشكل ٦-٢١). أما النبات الجفافي عديم الأوراق [(Forsk Decne) *Leptadenia pyrotechnica*] فيظهر انخفاضا في معدل النتح في أشهر الشتاء وارتفاعا عند بدء الصيف وأن هذا يتوافق مع منحنى التبخر (Migahid, et.al.1972).



الشكل رقم (٦-٢١). المعدل اليومي للنتح (ـــــــ) والتبخر (- - - - -) في نبات الزلة الصحراوي في شهر مارس (A) مبينا شكل القبة للمنحنى، وفي شهر مايو (B) موضحا المنحني ذي القمة الواحدة.

المصدر: (Batanouny, 1974).

مما تقدم والفصول السابقة يتبين أن الماء يتدفق من التربة إلى النبات ومنه إلى الهواء الخارجي في طورين مختلفين الطور السائل والطور البخاري، والتدفق هنا تحت ظروف من درجة الحرارة الثابتة يظهر انخفاضا في جهد الماء متدرج من التربة وحتى الهواء الخارجي وقد سبق التنويه إلى أن القوة المحركة لهذا التدفق من التربة إلى الجذور ومن الجذور إلى الأوراق هي فعلا الفرق في جهد الماء وأنه نظرا لاختلاف الطور من الورقة إلى الهواء فإن القوة المحركة هي اختلاف في تركيز بخار الماء، وبما أن العملية في جميع المناطق من التربة إلى الهواء ما هي إلا عملية انتقال للماء سواء على هيئة سائل أم على هيئة بخار عبر النبات ومن أجل توحيد ظاهرة الحركة هذه في النبات والوصول إلى نتيجة محددة لأي المناطق أكثر أهمية وتحكما في الحركة فقد افترض العالم فان دن هونرت ١٩٤٨م (Van den Honert, 1948) بأن تدفق الماء عبر كل منطقة من المناطق الرئيسية التالية: من التربة إلى الجذور ومن الجذور إلى عناصر الخشب ومن الورقة إلى الهواء في حالة ثبات التدفق يتناسب مع فرق جهد الماء بين المناطق ويتناسب عكسيا أيضا مع المقاومة بين كل منطقة وأخرى، مثله في ذلك مثل قانون أوم عن التدفق الكهربائي ولذا فإن:

$$\mathbf{Jv} = \frac{\Delta\Psi}{r}$$

حيث: (Jv) التدفق

و ($\Delta\Psi$) فرق الجهد

و (r) المقاومة

ومادام التدفق ثابتا فهو متساو في كل المناطق والاختلاف يقع في مقدار المقاومة ورياضيا يمكن التعبير عن ذلك كالتالي:

$$Jv = \frac{\Delta\Psi_{s\text{—}r}}{r_{s\text{—}r}} = \frac{\Delta\Psi_{r\text{—}x}}{r_{r\text{—}x}} = \frac{\Delta\Psi_{L\text{—}A}}{r_{L\text{—}A}}$$

حيث إن : (Jv) تدفق الماء

و ($\Delta\Psi_{s\text{—}r}$) فرق جهد الماء بين التربة والجذر

و ($r_{s\text{—}r}$) المقاومة بين التربة والجذر

و ($\Delta\Psi_{r\text{—}x}$) فرق جهد الماء بين الجذر والخشب

و ($r_{r\text{—}x}$) المقاومة بين الجذر والخشب

و ($\Delta\Psi_{L\text{—}A}$) فرق جهد الماء بين الورقة والهواء

و ($r_{L\text{—}A}$) المقاومة بين الورقة والهواء

إن فروق الجهد بين كل منطقة وأخرى يمكن قياسها كما سبق أو تقديرها وكمثال لذلك فالجدول التالي يبين قيما تقريبية ليست بالضرورة تمثل قيما حقيقية لكل النباتات أو حتى نبات معين تحت كل الظروف (الجدول رقم ٦–٥).

الجدول رقم (٦–٥). بعض قيم جهد الماء ومكوناته (ميجاباسكال) الممثلة لمختلف المناطق ما بين التربة والهواء.

المنطقة	جهد الضغط	الجهد الأسموزي	جهد الجاذبية	جهد الماء في الحالة الغازية	الجهد الكلي
محلول التربة بعمق ٠,٥ وبعد واحد سم من الجذر	– ٠,٢	– ٠,١	صفر	ـ	– ٠,٣
محلول التربة قرب الجذر	– ٠,٤	– ٠,١	صفر	ـ	– ٠,٥
سائل الخشب عند سطح التربة	– ٠,٥	– ٠,١	صفر	ـ	– ٠,٦

obeikandi.com

تابع الجدول رقم (٦–٥).

المنطقة	جهد الضغط	الجهد الأسموزي	جهد الجاذبية	جهد الماء في الحالة الغازية	الجهد الكلي
سائل الخشب في الورقة على ارتفاع ١٠م	- ٠,٨	- ٠,١	٠,١	-	- ٠,٨
فجوة خلية الورقة على ارتفاع ١٠م	- ٠,٢	- ١,١	٠,١	-	- ٠,٨
السائل في الجدار الخلوي في خلية الورقة على ارتفاع ١٠م	- ٠,٤	- ٠,٥	٠,١	-	- ٠,٨
بخار الماء في فراغات الجدار الخلوي لخلية الورقة على ارتفاع ١٠م	-	-	٠,١	- ٠,٩	- ٠,٨
الهواء في الثغر عند رطوبة نسبية ٩٥٪	-	-	٠,١	- ٧,٠	- ٦,٩
الهواء خارج الثغر عند رطوبة نسبية ٦٠٪	-	-	٠,١	- ٧٠,٢	- ٧٠,١
الهواء فوق الطبقة المحيطة بالورقة عند رطوبة نسبية ٥٠٪	-	-	٠,١	- ٩٥,١	- ٩٥,٠

المصدر: (Nobel, 1974).

إن تقدير القيم المذكورة في الطور السائل تم بموجب المعادلة:

$$\Psi . \Psi_p + \Psi_s + \rho_w gh$$

حيث تأثير الجاذبية (g) أو الارتفاع (h) أو كثافة الماء (ρ_w) في جهد الماء عند ارتفاع ١٠م يؤدي إلى زيادة موجبة. وغالبا تقدر قيمة ($\rho_w g$) بقيمة ٠,٠٠٩٨

ميجاباسكال/ م، أما بقية الرموز فكالسابق.

أما في الطور البخاري فتقدر القيمة بموجب العلاقة بين جهد الماء والرطوبة النسبية والتي سبقت الإشارة إليها وهي:

$$\Psi = \frac{RT}{V_w} \ln\left(\frac{\%RH}{100}\right) + \rho_w gh$$

إن استخدام قيم تقريبية لفروق الجهد كتلك في الجدول السابق في المعادلة التي افترضها العالم هونرت تبين أن فرق جهد الماء بين الورقة والهواء يمثل أكبر قيمة لانخفاض الجهد وبالتالي فإن أكبر قيم المقاومات في مسار تدفق الماء تقع في هذه المنطقة (أي بين الورقة والهواء) من هنا ظهرت الاستنتاجات المهمة في حركة الماء في هذا النظام وهي أن سيطرة النبات على تدفق الماء تتم في الطور البخاري وأن أي تغير في مقاومة المناطق الأخرى لا يؤثر كثيرا في تدفق الماء لأن قيمة التغير لا يمكن أن تصل إلى القيمة الكبيرة في فرق الجهد بين الورقة والهواء ولو زادت القيمة بحيث تؤثر في جهد الماء في الورقة بحيث ينخفض إلى حد معين، فالثغور ستغلق. وأخيرا فإن موقع الثغور في مسار التدفق في الطور البخاري والذي تتبين فيه فعالية التحكم في فقد البخار أكثر من أية منطقة أخرى يجعل الثغور أكثر فعالية في التحكم في كمية الماء المفقودة من النبات.

في بداية ذكر الخواص العامة لانتقال الماء ذكر أن القوة المحركة لتدفق الماء في الطور البخاري هي الفرق في تركيز بخار الماء حسب ما تعارف عليه العلماء إلا أنه يجب التنويه هنا أن آخرين [على سبيل المثال لا الحصر أورتلي ١٩٦٦م (Oertli, 1966)، ميلبرن ١٩٧٩م (Milburn, 1979) ولوتقه وهيجنباثم ١٩٧٩م (Lüttge and Higinbotham, 1979) قد عبروا عن النتح كوحدة حجم للتدفق لكل وحدة مساحة من الورقة في وحدة الزمن وباستخدام فرق جهد الماء كقوة محركة والتوصيل الهيدروليكي

للطور البخاري، كالتالي:

$$Jv = Lp\ \Delta\Psi \fallingdotseq L \frac{\Delta\Psi}{X}$$

حيث: (Jv) التدفق

و (Lp) التوصيل الهيدروليكي للغاز (بخار الماء)

و (L) التوصيلية الهيدروليكية للغاز (بخار الماء)

و ($\Delta\Psi$) فرق جهد الماء بين المنطقتين التي تفصلها المسافة (X).

هذا بالإضافة إلى طرق أخرى لتقدير النتح والبخر عن طريق استخدام قراءات الأرصاد الجوية في معادلات رياضية يطول شرحها وليس هذا مجالها.

هناك نقطة أخرى ذات علاقة بالنتح وكفاءة استخدام المياه نظرا لما لذلك من أهمية كبرى في مثل هذه المنطقة من العالم حيث الحاجة الماسة إلى ترشيد استغلال الموارد المائية المحدودة وما عرف عن كفاءة استخدام الماء وتقديرها للنباتات المزروعة أو النامية طبيعيا ومحاولة زيادة هذه الكفاءة لنباتات المحاصيل، وكما هو معروف من معايير للتعبير عن ذلك بتقدير نسبة وزن الماء المطلوب لإنتاج وزن جاف من النبات مثلا أو الناتج النهائي من النبات مثل البذور أو حتى كمية ما يتم تثبيته في عملية البناء الضوئي من ثاني أكسيد الكربون، وبالطبع تختلف هذه القيمة حسب النبات ونوعه والبيئة التي ينمو فيها وكمثال لبعض القيم المحسوبة لبعض المجاميع النباتية فإن الجدول التالي (الجدول رقم ٦-٦) يوضحها.

obeikandi.com

الجدول رقم (٦-٦). كفاءة استخدام الماء (وزن الماء المطلوب لانتاج وزن مادة جافة) لبعض المجاميع النباتية.

المجموعة النباتية	ظروف النمو ونظامه الفسيولوجي	كفاءة استخدام الماء
النباتات متوسطة الاحتياج المائي	محاصيل ذات إنتاج عالٍ	٢٠٠٠ أو أكثر
النباتات متوسطة الاحتياج المائي	مصدر الماء محدود (نباتات ثلاثية الكربون)	حوالي ٧٠٠ ± ٢٥٠
النباتات متوسطة الاحتياج المائي	مصدر الماء محدود (نباتات رباعية الكربون)	حوالي ٣٠٠ ± ٥٠
نباتات عصيرية	ذات الأيض الكراشيولي (CAM)	٥٥, أو أقل

المصدر: (Milburn, 1979).

من الجدير بالذكر أن أكبر قيمة لكفاءة استخدام الماء كانت لنبات الأغاف (*Agave deserti*) في موطنه الأصلي في صحراء سنورا بالولايات المتحدة الأمريكية حيث كانت القيمة ٤٠جم من ثاني أكسيد الكربون المثبت لكل كجم ماء مفقود عبر النتح. يستدل أيضا من بعض البحوث أن كفاءة استخدام الماء تزداد بانخفاض كمية ماء التربة المتيسرة للنبات (Eheringer and Cooper, 1988).

ومن المحاولات التي تستغل لزيادة الكفاءة ما عرف من استخدام لبعض المواد التي تكون طبقة على أوراق النباتات للتقليل من النتح والتي من أفضلها ولو نظريا استخدام مواد بلاستيكية أو مساحيق ترش بها النباتات لتكوين طبقة رقيقة على الأوراق لتقليل فقد بخار الماء [أي زيادة المقاومة (r_a)] ولا تؤثر في انتشار غاز ثاني أكسيد الكربون. وقد استعملت بعض أنواع من الزيوت ومواد كيميائية خاصة وعلى أية حال فالموضوع لازال في الطور التجريبي وليست هذه المواد متوافرة تجاريا أو أنه لا يرغب في استعمالها على نطاق واسع لعدم معرفة تأثيراتها الجانبية.

obeikandl.com

الفصل السابع

الإجهـاد المـائـي

• المقدمة • النباتات الجفافية • التغيرات الشكلية الناتجـة عن الإجهـاد المائـي • الاسـتجابات الفسـيولوجية للإجهاد المـائي

(٧-١) المقدمة

يعتمد نمو أي نبات نموا طبيعيا على حالة الاتزان بين ما يمتصه ذلك النبات من الماء وبين ما يفقده، وهي حالة قلما تكون مثالية لأي نبات وفي كل أطوار حياته. وحتى نباتات المحاصيل التي تعتمد مباشرة على الري فعدم الاتزان هذا يحدث بها كثيرا، وقد يكون عدم الاتزان ضئيلا أي أن ما يمتصه النبات من الماء بالكاد يكفي لتغطية ما يفقده، وبذا فإن خلايا وأنسجة ذلك النبات لا تكون في حالة امتلاء كاملة. إن مثل هذه الحالة لا يمكن مشاهدتها أو مشاهدة أثرها بل من الممكن قياس ذلك بالأجهزة والطرق الخاصة التي سبق الحديث عنها في المواضع السابقة. أما الحالة الأخرى فقد يكون عدم الاتزان كبيرا فتظهر آثاره على هيئة ذبول مؤقت كما يشاهد في الحقول عندما تكون الحرارة مرتفعة والشمس مشرقة وسط النهار حتى وإن كانت التربة في سعتها الحقلية. أما إذا كانت كمية الماء المفقودة من النبات تفوق ما يستطيع النبات امتصاصه وعلى درجة كبيرة، فإن

openkandi.com

أعراض الذبول الدائم تبدو واضحة وغالبا ما ينتهي الأمر بموت النبات نتيجة لجفافه.

تنعكس كل الحالات السابقة على جهد الماء داخل النبات، أي أن قياس جهد الماء في النبات يعتبر مؤشرا لحالة الاتزان من عدمه، وعلى العموم فإن جهد ماء النبات طوال فترة حياته بل وعلى مدار اليوم يمر في سلسلة من التغيرات من ارتفاع وانخفاض وقد تصل أحيانا إلى حد حرج بالنسبة لنمو النبات. وبالطبع يتبع هذا التغير في الجهد تغير في العمليات الفسيولوجية لذلك النبات بصفة عامة حيث إن فقد النبات لجزء من محتواه المائي يتبعه انخفاض في الجهد الأسموزي في خلايا وأنسجة النبات مؤديا بذلك إلى فقد ضغط الامتلاء وإغلاق الثغور وتثبيط للنمو وانخفاض في عملية البناء الضوئي وما إلى ذلك من تأثير في معظم العمليات الحيوية الأخرى. لذا فإنه يمكن القول بأن الإجهاد المائي المستمر ينتج عنه بصفة عامة تحور وتأقلم في التركيب والوظيفة يساعد بعض النباتات على مواءمة البيئة التي تنمو فيها.

لذا فهذا الفصل سيقسم إلى موضوعين أساسيين كما سيرد وذلك من أجل إيضاح أثر نقص الماء في الحياة النباتية وكيف أن بعضها يكيف نفسه بطريقة أو بأخرى للحياة تحت هذه الظروف. والإجهاد المائي مبدأ فسيولوجي (Levitt, 1980) ولذا يجب أن يقترن كغيره من فروع فسيولوجيا النبات بعلوم الفيزياء والكيمياء من حيث المصطلحات والقوانين والمعادلات. وعلى سبيل المثال وإيضاح القصد ما ذكر في الفصول السابقة من تركيز على استخدام جهد الماء طبقا لقوانين الديناميكا الحرارية، ولكن الأمر بالنسبة للإجهاد المائي ليس بهذه السهولة حيث لازال الوضع في هذا الفرع من الدراسة في مستهله والمصطلح خاضع كغيره من عوامل الإجهاد (كالحرارة والملوحة) لكثير من الآراء حول تعريفه ليس هذا مجالها نظرا لأن الإجهاد في العلوم الطبيعية يعني القوة المطبقة على وحدة المساحة والتي ينشأ منها شَدٌ (strain)، أما في

علوم الحياة فإن الإجهاد يعني، في الغالب، تأثير أي عامل يخل بالوظيفة المعتادة للكائن الحي والتعريف الأخير بالطبع غير دقيق.

يقترن الإجهاد (Stress) بمصطلح بيئي وهو الجفاف (Drought) الذي يدل على ظاهرة مناخية وهي قلة الأمطار التي بالتالي تؤدي إلى الإجهاد لكن الإجهاد نفسه قد يحدث حتى ولو لم يكن هناك جفاف مثل حالة عدم الاتزان سابقة الذكر حيث تكون كمية الماء المفقودة عن طريق النتح تفوق ولو قليلا كمية الماء الممتصة من التربة بواسطة. الجذور، أوقد يحدث بسبب تثبيط لامتصاص الماء من التربة نتيجة لانخفاض درجة حرارة التربة أو زيادة في المواد الذائبة كالأملاح أو نقص في التهوية في منطقة الجذور أو إصابة الجذور بأية وسيلة أو آفة.

(٧-٢) النباتات الجفافية

ومثلما أن هناك العديد من النباتات المختلفة التي تستوطن مناطق متغايرة من العالم فهناك الكثير من الوسائل التي تستطيع بها النباتات التأقلم للنمو والبقاء في هذه البيئات، وطبقا للمصطلحات المتعارف عليها من حيث تصنيف النباتات حسب احتياجاتها للماء والتي جرى التنويه عنها في مقدمة الكتاب، فالمجموعة المهمة في هذا المقام هي النباتات الجفافية والتي تنمو في بيئات جافة لقلة الأمطار، وبالمثل فلهذه المجموعة وسائل مختلفة مكنتها من النمو والبقاء في البيئات الجافة، وحسب ما قدمه العالم شانتز (H. L. Shantz) في مستهل القرن العشرين الميلادي من تقسيم لها، فهناك نباتات هاربة من الجفاف (Escape drought) مثل النباتات الحولية في الصحاري حيث تقاوم الجفاف على هيئة بذور لا تنمو إلا في وجود كمية من الماء تكفي في الأقل لتكوين بعض البذور، ومع أن هذه المجموعة من النباتات لا تتعرض في نموها إلى انخفاض في جهد ماء التربة لأنها سريعة النمو والإزهار وتكوين البذور قبل

تعرضها لذلك أي أنها تقاوم الجفاف بالهرب منه. وهناك مجموعة من النباتات تقاوم الجفاف عن طريق تخزين كمية من الماء في أنسجتها وهي ما عرف بالنباتات العصيرية (Succulent plants) وما لها من آلية فتح الثغور أثناء الليل للحصول على ثاني أكسيد الكربون حيث تقوم بتثبيته في أحماض عضوية وفي النهار تغلق ثغورها لتفادي تبخر الماء وتحرر ثاني أكسيد الكربون من الأحماض العضوية لتثبيته في عملية البناء الضوئي. وهذه النباتات مثلها مثل النباتات الهاربة من الجفاف لا تتعرض أنسجتها إلى جهد ماء منخفض. والمجموعة الثالثة من النباتات التي تنمو في البيئات الجافة، نباتات تتحاشى الجفاف (Avoid the drought) عن طريق تحورات تشريحية في تركيبها وهي، في الغالب، نباتات معمرة، ومن أكثر هذه التحورات كفاءة هي وجود مجموع جذري عميق قد يصل إلى مستوى الماء الأرضي إن وجد وبالتالي فهي تحصل على احتياجاتها المائية ولا تتعرض إلى انخفاض في جهد الماء الذي تتصل به جذورها. ومن التحورات الأخرى صغر في الخلايا وصغر في الأوراق أو وجود ثغور غائرة أو زيادة في الشعيرات [لزيادة سمك الطبقة المحيطة بالورقة وبالتالي الزيادة في قيمة (r_a) التي سبق ذكرها وهذا بدوره يقلل من النتح]، وكل هذه تحورات لا تكفي عادة لمقاومة الجفاف الشديد. أما المجموعة الأخيرة من النباتات فهي تلك النباتات التي تتحمل الجفاف (Endure the drought) عن طريق تحملها لفقد كميات كبيرة من الماء تفوق معدل ما تحصل عليه عن طريق الجذور وبالتالي فهي تتعرض لجهد ماء منخفض جدا دون أن تجف أنسجتها أو تبدو عليها أعراض الذبول مثل نبات ((*Larrea divaricata*) الذي قد يصل محتواه المائي إلى ٣٠٪ من الوزن الرطب دون أن يموت النبات. وهذه المجموعة من النباتات هي ما تعرف بالنباتات الجفافية الحقيقية وهي تشارك المجموعة التي تتحاشى الجفاف في وجود تحورات بها إلا أنها تتميز عنها في كون السيتوبلازم لا

خلايا النبات يتحمل الجفاف.

على أية حال، هناك أجناس نباتية تتحمل الجفاف والتجفيف مثلها مثل بعض الأنسجة النباتية (حبوب اللقاح والبذور) وتشكل مجموعة نباتية متميزة سميت " نباتات الإفاقة" Resurrection Plants. لمزيد من التفاصيل انظر (Al-Whaibi, 2004). باختصار تتميز هذه المجموعة بأن المجموعين الخضري والجذري يتحملان التجفيف الهوائي وينخفض المحتوى المائي في المتوسط من ٤ إلى ٨٪ من الوزن الجاف . يستغرق التجفيف من ٣ إلى ٧ أيام بعد المطر وتشربها من ١٢ إلى ٢٤ ساعة . تبقى الأوراق المجففة هوائيا من ٢ إلى ٥ أعوام وليس هناك حدود لعدد دورات التجفيف والتشرب . تستخدم هذه النباتات السكريات للمحافظة على ثبات الإنزيمات والتراكيب الخلوية في غياب الماء . من ناحية أخرى، تساهم الدهون وكذلك الهرمونات النباتية خاصة حمض الأبسيسيك ABA في إعطاء الإشارة أو الاستحثاث لتعبير المورثات المتعلقة بالمسارات الأيضية لتحمل الجفاف.

(٧–٣) التغيرات الشكلية الناتجة عن الإجهاد المائي

يقترن الإجهاد المائي عادة بارتفاع في درجة حرارة البيئة الطبيعية التي تنمو فيها النباتات كما هو معروف عن التوزيع الجغرافي للمناطق القاحلة وشبه القاحلة، لذا فإن التغيرات الشكلية في النبات التي سيرد ذكرها ليست نتيجة للإجهاد المائي بصورة مطلقة، وأن درجة الحرارة مُثْلَى، بل يجب التنويه أن التغير الشكلي النهائي ما هو إلا نتيجة لتفاعل هذين العاملين (أي الإجهاد المائي كعامل وارتفاع درجة حرارة البيئة الطبيعية كعامل آخر) إلا أن مدى مشاركة كل عامل في إحداث التغير قد تكون نسبية ولا يمكن تغطية تفاعل هذين العاملين بصورة وافية في هذه العجالة. والإجهاد المائي الذي لا يحدث أضرارا أولا يؤدي إلى موت النبات يتسبب في إبراز بعض الخصائص

والمميزات في الشكل لأعضاء النبات الرئيسية ولكن أكثر هذه الأعضاء تأثرا بالإجهاد المائي هو الأوراق حيث يمكن مشاهدة ظهور تلك المميزات بصورة سريعة وواضحة، وقد لقيت الأوراق دراسة أكثر في هذا المجال للسبب السابق ولكون الأوراق، في الغالب، هي الأعضاء المسؤولة بصورة أساسية عن إمداد النبات بالغذاء، ومن ناحية أخرى فأعضاء النبات الأخرى (السيقان والجذور) تبدي تغيرات في الشكل نتيجة للإجهاد المائي ولكن هذه التغيرات ليست بالوضوح المشاهد على الأوراق وقد يعود ذلك إلى طبيعة نمو كل عضو. والتغيرات الشكلية على أعضاء النبات تسمى أحيانا بالتركيبات أو الخصائص أو التشكيلات الجفافية.

تظهر تلك الخصائص الجفافية على كثير من النباتات عند إنباتها تحت الإضاءة الشديدة نظرا لأن الإضاءة الشديدة تعمل على زيادة النتح أو نتيجة لنمو النباتات في ظروف بيئية جافة وقد أدرج العالم والتر ١٩٤٩م (Walter, 1949) عددا من خصائص الورقة الشكلية مثل:

١- زيادة سمك العرق الوسطى إذا نسب إلى سطح الورقة.
٢- زيادة عدد الثغور لكل وحدة مساحة سطحية للورقة.
٣- صغر حجم الثغور.
٤- صغر حجم خلايا البشرة وكذلك خلايا النسيج الوسطى.
٥- زيادة عدد الشعيرات مع صغرها.
٦- زيادة في سمك جدر خلايا البشرة وزيادة سمك الأدمة.

وهذه التغيرات على النباتات النامية تحت هذه الظروف ما هي إلا وسيلة للتأقلم لظروف الإضاءة الشديدة التي يصاحبها معدل نتح كبير، وفي مسح عام للظواهر الشكلية المصاحبة للإجهاد المائي ذكر العالم أوبنهايمر ١٩٦٠م (Openheimer, 1960) ما

يقارب عشرين صفة تعتبر وسيلة تأقلم للنباتات الجفافية وغالبية هذه الصفات تظهر على الورقة، فبعض النباتات تعمل على إسقاط أوراقها عند الجفاف في بداية أو منتصف الصيف كما ذكره سفيشنيكوفا و زالنسكي ١٩٥٦م (Sveshnikova and Zalensky, 1956) عن بعض الأجناس النباتية التي تنمو في أواسط آسيا مثل (*Calligonum, Ephedra, Kichia, Artemisia, Salsola* and *Chondrilla*) أما البعض الآخر من النباتات وخاصة في منطقة حوض البحر الأبيض المتوسط مثل (*Thymus capitatus*) و (*Salvia triloba*) فتحمل نوعين من الأوراق، أوراق كبيرة في فصل الأمطار وأوراق صغيرة في فصل الصيف (Openheimer, 1960).

من التراكيب المميزة لبعض نباتات البيئات الجافة وجود الشعيرات على السيقان والأوراق والتي يعتقد بأنها تخفض من معدل النتح وذلك عن طريق زيادة سمك الطبقة الهوائية المحيطة بالورقة وبالتالي زيادة المقاومة لانتشار بخار الماء (r_a) السابق ذكرها، والشعيرات أيضا تزيد من المساحة الكلية للإشعاع السطحي للورقة دون زيادة تذكر للسطح المستقبل للإشعاع ولذا فهي بطريقة غير مباشرة تعمل على تبريد الورقة، والوظيفة الأخرى للشعيرات هي المساعدة في الحماية من بعض ا لحشرات.

يتم النتح كما سبق بصفة أساسية عبر الثغور، وهذا ما جعل عملية غلق الثغور في النباتات الجفافية هدفا للدراسة في محاولة لإيجاد علاقة بين الجفاف وفتحة الثغر في مثل هذه النباتات، وقد أدت الدراسة إلى المعرفة بأن النباتات المقاومة للجفاف لا تغلق ثغورها بسرعة النباتات غير المقاومة عند تعرضها للجفاف، ولكن هناك الكثير من العقبات التي تحول دون التوصل إلى نتيجة مقنعة في مثل هذه الدراسات نظرا لأن غلق الثغور في بعض النباتات العشبية لا يحمي النبات من الجفاف الذي يؤدي إلى موته نظرا لارتفاع معدل النتح عبر البشرة في تلك النباتات ومن ناحية أخرى فتركيب الثغور

وموقعها في بعض النباتات من الصعوبة بمكان بحيث لا يمكن إجراء دراسات روتينية عليها دون الإخلال بواقع فتحة الثغر إلى غير ذلك من العقبات، وعلى أية حال فالعالم مكسيموف ١٩٢٩م (Maximov, 1929) توصل إلى أن عملية غلق الثغور أثناء الفترة التي يكون فيها النبات عرضة للجفاف ليست كاملة مع أن غلقها جزئيا يساعد كثيرا من الأنواع النباتية على البقاء حية لفترات أطول.

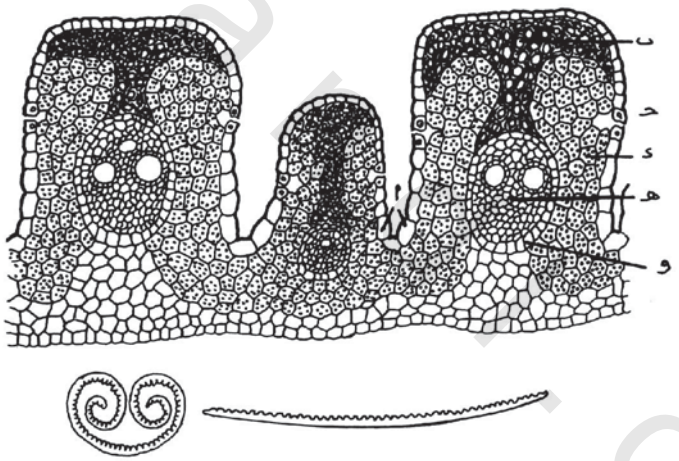
أما ظاهرة وجود أدمة سميكة في النباتات الجفافية فهي بلا شك تساعد على حماية النبات في الإقلال من عملية فقد الماء ولكن الأمر ليس بهذه البساطة نظرا لأن الأدمة تعد من التعقيد بمكان حيث يختلف تركيبها الدقيق من نوع لآخر وكذلك مكوناتها الكيميائية وبالتالي فالفعالية مختلفة رغم التشابه في السمك، وعندما تجف الأدمة فإن الجفاف يعمل على تقلص القنوات الدقيقة الموجودة في الأدمة وبالتالي فإن كمية الماء المفقودة عن طريقها تكون أقل مما يساعد على حفظ التوازن المائي للنبات، ومهما يكن فإن الأدمة والطبقة الشمعية التي تفرز على سطح الورقة بواسطة خلايا البشرة وكذلك المواد الراتنجية التي تتميز بها بعض النباتات تعتبر تحورات لها دورها في الإقلال من فقد الماء ولكن كما استنتج موريلو ١٩٥٦م (Morello, 1956) من دراسته للنبات الصحراوي (*Larrea*) في الأرجنتين بأن إقلال فقد الماء بصورة فعالة يكون عن طريق إغلاق الثغور بصفة أساسية.

يؤثرالجفاف في الأوراق بصورة عامة سواء أكان التعرض للجفاف في الوقت الذي تتكشف فيه الأوراق أو بعد اكتمال تكشفها، فالتأثير في بداية تكشف الأوراق يكون عن طريق تأثير الجفاف في معدل انقسام الخلايا وكذلك كبر حجم الخلايا وبالتالي مساحة سطح الورقة ولو أن الأخير كما يعتقد الكثيرون أكثر حساسية للظروف الجفافية. وعملية تأثير الجفاف في تكشف الأوراق غير عكسية فيما لو

تحسنت الظروف بتوافر الماء ولمزيد من المناقشات راجع بيج وترنر ١٩٧٦م (Begg and Turner, 1976). أما تأثير الجفاف في الأوراق بعد اكتمال تكشفها فهو يؤدي إلى موت الورقة أو معاكسة التأثير بإحدى الآليات. ومن الآليات الأساسية للتأقلم مع الظروف الجفافية أن تغير الورقة زاويتها مع الساق بحركة نشطة (أي تحرك الورقة عن طريق بذل طاقة من النبات) لتفادي سقوط الإشعاع رأسيا على الورقة حيث إن سقوط الإشعاع رأسيا على الورقة يتطلب زيادة معدل النتح للعمل على تبريد الورقة واستهلاك الطاقة الساقطة التي تزيد من درجة حرارة الورقة إذا لم تبدد بهذه الوسيلة، وتتلخص آلية تغيير الزاوية بتغيير ضغط الامتلاء لبعض الخلايا في قاعدة الورقة عن طريق صبغة الفيتوكروم التي تشتمل على حركة أيون البوتاسيوم من خلية لأخرى بعملية تشبه عملية فتح الثغور وغلقها [راجع بيج و تورسل ١٩٧٤م (Begg and Torssell, 1974) بالنسبة لهذه الآلية في أحد نباتات المحاصيل من الفصيلة البقولية، و وينرايت ١٩٧٧م (Wainwright, 1977) بالنسبة للنبات الصحراوي *Lupinus arizonicus*]. أما النباتات الصحراوية التي تنمو في ظروف جفافية مستمرة لفترات طويلة فإن غالبية الأوراق بها تكون في وضع ثابت بالنسبة لزاوية سقوط الإشعاع الشمسي وأوراق مثل هذه النباتات لا تتحرك بحركة نشطة كما في المثالين السابقين بل تكون أوراقها في وضع رأسي، وكمثال لذلك ما يعرف باسم نبات البترول أو الهاهوبا (Jojoba) واسمه العلمي *Simmondsia chinensis* (Link) [Scheneid.] والذي يتوقع له دور اقتصادي كبير مستقبلا، حيث يتميز هذا النبات بأوراق متقابلة متصالبة ولكنها ذات وضع رأسي حيث إن هذا الاتجاه يشكل ما بين ١٠-١٥٪ تقريبا من مساحة الورقة المستقبلة للضوء في منتصف النهار عندما تكون الإضاءة على أشدها، ويشكل وضع الأوراق هذا ما بين ٢٥- ٣٠٪ من مساحة

الورقة المستقبلة للضوء عند شروق الشمس أو غروبها وهو الزمن الذي ترتفع به كفاءة استخدام الماء وتقل الحاجة إلى التبخير (Rawson *et. al*., 1978).

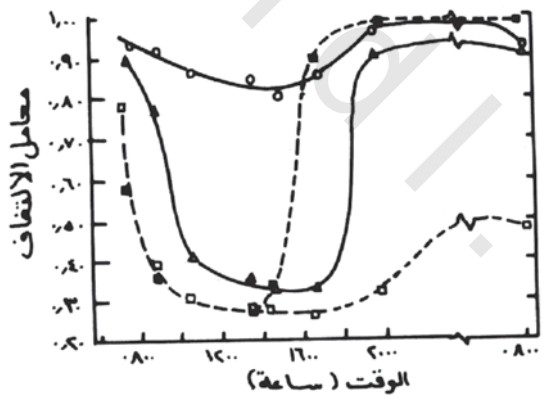
على أن هناك خاصية أخرى تقترن بالجفاف وتشاهد في بعض النباتات الصحراوية وهي ظاهرة التفاف أو انطواء الورقة كما هو مشاهد في نبات قصب الرمال (*Ammophila arenaria*) نظرا لوجود خلايا متخصصة في ثنيات الورقة حيث توجد الثغور وعندما تمتلئ بالماء فإنها تعمل على انبساط الورقة وفقد الماء من هذه الخلايا يؤدي إلى التفاف الورقة كما في الشكل رقم (٧-١).



الشكل رقم (٧-١). رسم تخطيطي لقطاع في ورقة نبات قصب الرمال (*Ammophila arenaria*)، حيث الرسم العلوي يمثل جزءا مكبرا معلّم عليه أ-خلايا حركية، وب-خلايا كولنشيمية، وجـ-ثغر، ود-خلايا كلورنشيمية، وهـ-نسيج الحزمة، وو-غلاف الحزمة. والرسم السفلي على اليمين يمثل الورقة مفتوحة بعد امتلاء الخلايا الحركية بينما الرسم السفلي على اليسار يمثل الورقة وهي ملتفة.

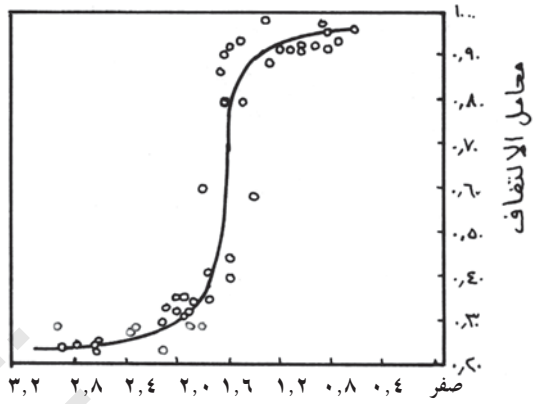
المصدر: (Coulter, *et. al.*, 1911).

وقد تتشابه هذه الظاهرة في نبات قصب الرمال مع الآلية السابقة في التحكم في اتجاه الورقة ولكن ليس من دليل لعدم دراستها، إن هذا المثل يوضح التناسق في التركيب مع الوظيفة لنبات ينمو في ظروف جفافية من الأساس، أما بالنسبة للنباتات الأخرى التي تنمو في ظروف مؤقتة من الجفاف فإن أوراقها قد تلتف بدرجات متفاوتة ويقاس مقدار الالتفاف كميا بما يعرف بتقدير معامل الالتفاف (Rolling Index, RI) حيث يمثل نسبة عرض الورقة المعرضة للإضاءة تحت ظروف جفافية إلى عرض الورقة الكلي، وقد قام العالم بيج ١٩٨٠م (Begg, 1980) بدراسة معامل الالتفاف لأحد نباتات المحاصيل (*Sorghum bicolar* cv. 100M) وتوصل إلى وجود دورية في معامل الالتفاف وأن هذا المعامل مقياس دقيق لبداية ونهاية الإجهاد كما هو موضح في الشكل رقم (٧-٢). وفوق ذلك قاس العالم المذكور تغير جهد ماء الورقة مع معامل الالتفاف ووجد بينهما العلاقة الموضحة في الشكل التالي رقم (٧-٣).



الشكل رقم (٧-٢). التغيرات اليومية في معامل الالتفاف لأوراق نبات الشعير المروية (○——○) أو غير المروية (Δ——Δ) أو المعرضة للجفاف الشديد (□——□) أو بعد ريها في الساعة ١٣,١٥ (■——■).

المصدر: (Begg, 1980).



الشكل رقم (٧–٣). العلاقة بين جهد ماء الورقة ومعامل الالتفاف في نبات الشعير حيث الجهد الأسموزي للورقة تراوح ما بين – ١,٢ إلى – ١,٣ قبل شروق الشمس و– ٢,٠ إلى – ٢,٢ ميجاباسكال في المساء.

المصدر: (Begg, 1980).

أما بالنسبة للتغيرات الشكلية في السيقان والمقترنة بالإجهاد المائي فإن النباتات التي تنمو في المناطق الجافة تبدي تحورا أو تأقلما في سيقانها قد يظهر على هيئة خزن الماء أو منع فقد الماء عن طريق السيقان أو العمل على انخفاض في المقاومة في السيقان. ودراسة المحتوى المائي لكثير من الأشجار في فصول مختلفة تبين أن هناك تأرجحا في المحتوى المائي يكون أقل ما يمكن في بداية فصل الخريف وأكبر ما يمكن في فصل الربيع حيث قد ينتج بسبب ذلك تكون ضغط موجب قبل تفتح البراعم. وقد درس العالم دايترت ١٩٣٧م (Diettert, 1937) تشريح الساق في نبات (*Artemisia tridentata*) فوجد أن هذا النبات يكون حلقات من الفلين بين الخشب كل سنة مما قد يساعد في المحافظة على المحتوى المائي وبالتالي يحافظ على اتصال عمود الماء في أوعية الخشب.

أما الجذور فلها من الخصائص المتعلقة بمقاومة الجفاف والمساعدة على إبقاء النبات حيا في فترات الجفاف مثل توقف نمو قممها مع خزن الماء في بعض الأنسجة وخاصة القشرة أو أن تقوم جذور النبات باختراق مسافات طويلة في التربة بحثا عن الماء. إن قمم الجذور في كثير من النباتات عند تعرضها للجفاف مؤقتا أو لفترة طويلة تموت في الغالب أوقد تتكون أحيانا بين الجذر والقمة طبقة من السوبرين وعند توافر الماء تتكون جذور جانبية لتحل محل القمة السابقة نظرا لما تتميز به الجذور من خاصية تكوين الجذور الجانبية. ومن الأمثلة على عملية تخزين الماء في الجذور في النباتات الصحراوية ما عرف عن نبات الحنظل (*Citrullus colocynthis*) في تكوين جذور قد تصل إلى سمك ٧ سم تحوي كميات من الماء تفي بحاجة النبات لاستمرار النتح الذي يعد أساسا لبقاء النبات حيث إنه يحول دون رفع درجة حرارة الأوراق في فترات الإضاءة الشديدة إلى درجات حرارة مميتة (Stocker, 1974) وعملية تخزين الماء في الجذور شائعة نسبيا في المناطق القاحلة وليست محدودة على أنواع معينة من النباتات ولكن قد تكون هذه الظاهرة أكثر شيوعا في بعض الفصائل. وعلى أية حال، فإن عملية خزن الماء وتكوين مادة السوبرين في الطبقات الخارجية من الجذور قد تدل على عملية تأقلم للبيئات الجفافية إلا أن هذه العمليات لا تقارن بنمط الحياة في بعض النباتات حيث إنها تقوم بتكوين جذور عميقة للوصول إلى الماء في طبقات التربة السفلى أو أبعد من ذلك لدرجة أن نبات (*Artemisia tridentata*) يعتبر مؤشرا على وجود الماء في الطبقات السفلى من التربة التي سطحها جاف تقريبا، ولكن المشكلة التي لم تعرف بعد بالنسبة لهذا النوع من النباتات هو كيفية تكوين البادرات وإنباتها في مثل هذه الظروف حيث التربة الجافة. يعتقد والتر ١٩٤٩م (Walter, 1949) بأن تكوين مثل هذه البادرات يتم في ظروف معينة من توافر الماء، ويضيف العالم

وينت ١٩٤٩م (Went, 1949) بأن هذه العمليات تتحكم فيها هرمونات النمو. علاوة على ذلك، فقد وجد باركر ١٩٦٨م (Parker, 1968) أن بادرات مثل هذه النباتات تموت عندما يتوافر الماء طوال السنين أو عندما تنمى في المناطق غير الجافة. ويبدو أن هذا النبات يتطلب فترات من الجفاف لتكوين النبات الكامل مثل تلك السائدة في المناطق القاحلة وشبه القاحلة. وعن عمق الجذور في الأراضي شبه القاحلة فإن العالم أوبنهايمر ١٩٦٠م (Openhiemer, 1960) يورد أن بعض أنواع من نبات السنط (*Acacia*) في صحراء النقب في فلسطين تتميز بنشاط مستمر للمنطقة الإنشائية (الكامبيوم) طوال فترة الجفاف ويعزو ذلك إلى عمق جذورها التي قد تصل إلى نحو ٣٠ مترا، على أن الاعتقاد السائد أن الإجهاد المائي المتدرج يعمل على زيادة نمو الجذور بصورة عامة وبالتالي زيادة نسبة المجموع الجذري إلى المجموع الخضري.

(٧-٤) الاستجابات الفسيولوجية للإجهاد المائي

تميز العقدان السادس والسابع من القرن العشرين الميلادي بزيادة ملحوظة في البحوث في مجال استجابة النباتات الفسيولوجية للإجهاد المائي وخاصة الاستجابات التي تؤهل النباتات للتأقلم لمثل هذا العامل الأساسي وأثر هذا العامل في تلك العمليات من إنبات بذور وامتصاص أيونات ونقل ونتح وبناء ضوئي وتنفس ونمو. وقد تبين على وجه العموم أن الظاهرة المميزة للإجهاد المائي العالي هي الزيادة الكبيرة والعامة في معدل الأيض الهدمي للنبات مما يؤدي إلى زيادة مستوى بعض المركبات في النبات وبالتالي تغير في التكوين الكيميائي العام لسيتوبلازم ذلك النبات. ومع أن جميع النباتات الراقية تتحمل ظروفا جفافية عالية في الأقل في أحد أطوار حياتها وهو طور البذرة إلا أن الأهمية في الموضوع تعود إلى المدى الذي تستطيع هذه النباتات تحمله في

الأطوار الأخرى. وهذا ما يميز بعض النباتات في كونها تؤقلم وتكيف عملياتها الفسيولوجية للظروف الجديدة أي الاستجابة للإجهاد المائي. إن هذه النباتات قد تنجح في هذا التأقلم حسب الإجهاد ولذا فهي تستعمر تلك البقعة من الأرض ولو أن النجاح في بعض الأحيان يكون على حساب صفة أخرى (الإنتاجية مثلا) أو أن النبات لا ينجح ولذا فهولا يوجد في ذلك المكان، ومهما يكن فإن التأقلم الحقيقي يكمن في مقدرة الخلايا الحية على الاستمرار في الحياة تحت ظروف قاسية من الجفاف ومن ثم معاودة النشاط مرة أخرى عند تحسن الظروف.

والماء في النبات يتميز بجهد سالب تعتمد قيمته على الفرق بين معدل النتح والامتصاص، وفي الطبيعة لابد للنبات من مواكبة جهد الماء السالب في التربة التي ينمو فيها، وجهد ماء التربة تختلف قيمته من موقع لآخر طبقا للمواد الذائبة فيه. وقد سجلت قيما لجهد الماء في بعض النباتات، وعلى سبيل المثال لا الحصر فقد سجل في الأشجار قيما لجهد الماء ما بين-٢ إلى- ٢,٥ ميجاباسكال وفي نباتات المحاصيل ما بين-١,٦ إلى —٢,٥ ميجاباسكال، ولكن النباتات الصحراوية التي تنمو في بيئات جافة قد يصل جهد الماء بها إلى- ٨ ميجاباسكال أو أكثر، بينما النباتات المائية التي تنمو في المياه العذبة فيتراوح جهد الماء بها من-٠,٥ إلى-١,٥ ميجاباسكال، أما النباتات التي تنمو معتمدة على ماء البحر مثل نبات ابن سيناء فجهد الماء بها مرتفع وقد يصل إلى- ٤ ميجاباسكال بينما جهد ماء البحر نحو-٢,٥ ميجاباسكال. ونظرا لما للمجموعة الأخيرة من النباتات من أهمية علمية قد تؤدي إلى أهمية اقتصادية للبشر فقد حظيت بدراسة أكثر حيث عرف أن الماء في أوعية خشبها عبارة عن ماء عذب تقريبا ولكن المكون الآخر لجهد الماء وهو جهد الضغط والناتج عن الشد العالي في أوعية الخشب على عمود الماء ويتراوح ما بين-٢,٥ إلى -٥ ميجاباسكال (Scholander, 1968)،

وبوضع هذه النباتات في بيئات صناعية بها مواد تزيد من قيمة الجهد الأسموزي وجد أن قيمة الشد قد ارتفعت وقد تصل إلى نحو- ٧ ميجاباسكال، وهذا يبرز مقدرة النباتات على تحلية ماء البحر المالح، لذا فقد استعمل وعاء الضغط بحيث وضعت الجذور في ماء مالح داخل الوعاء وزيد الضغط على الجذور وحُلِّل السائل الخارج من مقطع الجذر بعد إزالة المجموع الخضري فوجد أنه ماء نقي تقريبا، وبذا فإن جذور هذه النباتات تعمل على تحلية الماء بمعامل انعكاس للأملاح يساوي ٠,٩٥ ،. وهذه العملية هي في الحقيقة تلك العملية التجارية المعروفة بالتناضح (عكس الأسموزية) حيث تستخدم أغشية صناعية وضغط موجب لتحلية المياه المالحة.

من هنا فإن جميع النباتات تتعرض للإجهاد المائي ولكن بدرجات متفاوتة ولذا فالنباتات تتفاوت في مقاومتها لهذا الإجهاد وخاصة إذا كان جهد ماء بيئتها التي تنمو فيها يقارب تلك القيم المسجلة لجهد الماء بداخلها أو دون ذلك (أي أكثر سالبية) وهو أمر طبيعي ويحدث في كثير من الأحوال، وعند حدوث ذلك فإن العمليات الفسيولوجية تتأثر بهذا الإجهاد نظرا لأن الماء مهم لتلك العمليات بطريقة أو بأخرى. هنا تبرز نظرية الامتلاء الأمثل (Optimum turgidity) والتي تفترض أن جميع العمليات الحيوية في النبات تتطلب ضغط امتلاء معين ولذا فإنها (أي العمليات الحيوية) تتأثر بالزيادة أو النقص في ضغط الامتلاء، وزيادة ضغط الامتلاء تكون عندما يتوقف النتح أما النقص فيكون بتعرض النبات للإجهاد المائي بطريقة أو بأخرى. ومما قد يؤيد هذه النظرية هو أنه في الحقيقة عند وضع النباتات بصورة دائمة في جو رطب (١٠٠٪ رطوبة نسبية) فإن بعضها يبدي شذوذا في النمو، هذا من ناحية ومن ناحية أخرى فإن جهد ماء النبات يتأثر بجهد الماء في التربة حيث تدل الدراسات أن الماء يكون متاحا للنبات عندما يكون محتوى التربة المائي ما بين السعة الحقلية والنسبة المئوية للذبول الدائم،

وقد وجد بالنسبة لبعض النباتات (الطماطم) أن نموها يكون أفضل عندما تكون التربة قرب سعتها الحقلية منه عندما تقترب من النسبة المئوية للذبول الدائم. وعلى أية حال، فهناك العديد من الدراسات التي تمت حول تأثير جهد الماء وانخفاضه في الكثير من العمليات الفسيولوجية كما سيرد، وهناك نقطة ذات علاقة هي أنه من الممكن تحديد أنسب نقطة لنمو النبات بين هاتين القيمتين (السعة الحقلية والنسبة المئوية للذبول الدائم) عن طريق قياس الفرق بين جهد الماء في النبات وجهد الماء في التربة وكلما كان الفرق ضئيلا كلما كان ذلك دليلا على ملاءمة تلك التربة لنمو النبات. على أن هناك طريقة أخرى لتحديد أنسب نقطة لنمو النبات وهي قياس ما يعرف باسم نقص الماء (Water deficit) عن طريق أخذ ورقة مثلا ووزنها (الوزن الرطب) ثم وضع عنق الورقة في الماء وبقيتها في جو مشبع حتى يثبت الوزن (الوزن في جو مشبع) ومن ثم تجفيف الورقة في الفرن ووزنها (الوزن الجاف) وتطبيق المعادلة التالية لتقدير نقص الماء:

$$\text{نقص الماء} = \frac{\text{الوزن في جو مشبع} - \text{الوزن الرطب}}{\text{الوزن في جو مشبع} - \text{الوزن الجاف}} \times ١٠٠$$

وهذه الطريقة شائعة الاستعمال في تقدير قيم الإجهاد لمقارنة النباتات مع بعضها البعض ولمعرفة مدى تحملها للإجهاد.

بقي ذكر بعض الأمثلة للدراسات الكثيرة على علاقة الإجهاد بالعمليات الفسيولوجية ولمزيد من التفاصيل يرجع إلى المقالات أو البحوث المذكورة لاحقا أو المراجع بها.

obeikandl.com

إن أول اتصال للنبات بالماء يحدث والنبات في طور البذرة لذا فإن المحتوى المائي للتربة التي وضعت بها البذور يعتبر مهما لإنباتها. وبالطبع تختلف النباتات في كمية الماء اللازمة لإنبات بذورها ولكن الجزء المهم في ماء التربة هو جهد المادة أكثر من الجهد الأسموزي حسب دراسة كوليس- جورج و ساندز ١٩٦٢م (Collis-George and Sands, 1962) حيث أن جهد المادة يتساوى في تخفيض نسبة الإنبات مع الجهد الأسموزي عندما تكون قيمة الجهد الأسموزي عشرة أضعاف جهد المادة. على أن هناك نقطة أخرى ذات أهمية وهي نوعية المواد الذائبة في التربة حيث إن ذلك يؤثر في إنبات مختلف الأنواع النباتية وخاصة عندما يكون لتلك المادة الذائبة في محلول التربة أثر سمي في النبات.

أما بالنسبة للتغذية المعدنية فتظهر أهمية توافر الماء في امتصاص عناصر التغذية في كونه المذيب، والنبات لا يستطيع امتصاص إلا ما يلامس أسطح الامتصاص (الشعيرة الجذرية مثلا) والماء يعمل على نقل تلك الأيونات من التربة إلى مناطق الجذر، ولكن عندما يكون هناك إجهاد مائي فإن حركة الماء من التربة إلى مناطق الجذر ستقل أو تتوقف طبقا لحدة الإجهاد وبالتالي فالنبات يعتمد على ظاهرة الانتشار من المناطق القريبة من الجذر في الحصول على أيونات العناصر المهمة في التغذية، وبالطبع ظاهرة الانتشار لا تفي بحاجة النبات مما يجعل النقص في العناصر يظهر بصورة سريعة إذا لم يكن هناك حركة للماء داخل التربة. ومن الدراسات المهمة عن دور العناصر في مقاومة الجفاف ما نشره العالم بوزهنكو ١٩٦٥م (Bozhenko, 1965) حيث وجد أن عناصر التغذية الصغرى تؤثر في بناء ونقل المواد النشوية وتزيد من لزوجة السيتوبلازم مما يؤدي إلى انخفاض في نفاذيته، وأن هذه العناصر تزيد من مستوى حمض الأسكوربيك (أحد الفيتامينات)، وقد قام العالم المذكور، أيضا، بمعاملة بذور نبات

تباع الشمس لمدة عشرين ساعة وجففها في الهواء قبل زراعتها، وأثناء الزراعة عرض النباتات إلى ظروف متغايرة من الجفاف والحرارة وقد اشتملت معاملة البذور على ٠,٢ جم/ لتر من كل من نترات الألمنيوم والكوبالت وكبريتات الزنك والنحاس وحمض البوريك كل على حده، حيث أدت المعاملات المشتملة على كل من الألمنيوم والبورون والكوبالت إلى زيادة في مستوى ثلاثي فوسفات الأدينوزين إلى ٩٣٪ في المناطق النامية و٩٨٪ في المجموع الجذري.

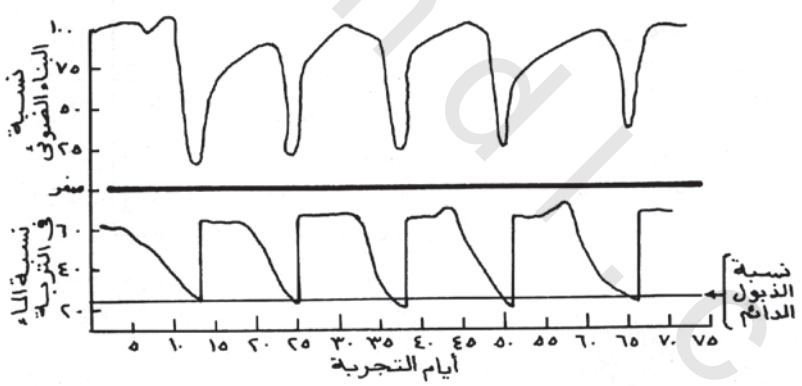
أما النقل كعملية فسيولوجية تظهر أهميتها في توزيع المواد الغذائية عبر اللحاء وتوزيع العناصر الممتصة بواسطة الجذور إلى أعضاء النبات الأخرى عبر الخشب فإن عملية النقل هذه تتأثر بالإجهاد المائي حيث إن توزيع العناصر وليس امتصاصها مرتبط بعملية النتح التي بدونها تكون عملية التوزيع ظاهرة انتشار بسيط لا تفي بحاجة النبات ومن هنا فكون جهد الماء في النبات سالب القيمة نتيجة للنتح بصورة أساسية له أهميته في عملية توزيع العناصر، أما بالنسبة لتوزيع المواد الغذائية في اللحاء فنقص الماء يزيد من تركيز المواد وهذا يؤدي إلى انخفاض في سرعة تدفق المحاليل، وقد وجد أن فرق ١٥ – ضغط جوي من نقص الماء (أي – ١,٥ ميجاباسكال) في بعض النباتات الذابلة يخفض سرعة التدفق في اللحاء إلى الثلث تقريبا.

تظهر أهمية النتح في كونه يتسبب في حركة الماء في الخشب مما يؤدي إلى توزيع العناصر الغذائية وكذلك في كون فتح الثغور يؤدي إلى دخول ثاني أكسيد الكربون إلى النبات لكي تتم عملية البناء الضوئي وخروج غاز الأكسيجين كناتج ثانوي، وعندما ينتح النبات فإن ذلك يتسبب في انخفاض جهد الماء في خلايا النسيج الوسطى للورقة وهذا التأثير ينتقل إلى أن يصل في النهاية إلى الجذر لكي يتم تعويض الماء المفقود من الورقة، وعملية التعويض هذه تتحكم فيها أعلى مقاومة في أية منطقة وهي كما سبق

ذكره في المنطقة ما بين جدر خلايا النسيج الوسطى للورقة إلى الهواء الخارجي عبر الثغور ولذا فإن النبات يتحكم لا النتح عن طريق غلق الثغور وفتحها، وقد قام جارفس وجارفس ١٩٦٣م (Jarvis and Jarvis, 1963) بدراسة حساسية بادرات بعض الأشجار للجهد الأسموزي في محلول التغذية وعلاقة النتح بذلك، أي علاقة النتح بالإجهاد المائي، وقد وجدا أن تلك البادرات تبدي اختلافات فيما بينها والتعليل لهذه الاختلافات هو أنها قد تعود إلى فروق في جهد الماء في جذور تلك البادرات أو طول الجذر بالنسبة لحجم التربة أو محلول التغذية.

من المعروف أن انخفاض جهد الماء في الورقة يؤدي إلى انخفاض في عملية البناء الضوئي ويعود ذلك إلى غلق الثغور نتيجة لانخفاض جهد الماء مما يوقف انتشار المادة الأساسية للبناء الضوئي وهي ثاني أكسيد الكربون بالإضافة إلى تأثير جهد الماء في كل من النشاط الإنزيمي ونفاذية الأغشية المختلفة. وتعد دراسة العلاقة بين الإجهاد المائي والبناء الضوئي من الصعوبة بمكان، نظرا لوجود عوامل مختلفة تؤثر على العمليتين معا، ومن هذه العوامل عملية غلق الثغور وفتحها وعملية تقدير جهد الماء كما سبق التنويه إلى ذلك عند ذكر طرق قياس جهد الماء، أضف إلى ذلك أن بعض النسج تستخدم الماء المخزون في النبات أو الماء الموجود في الأجزاء الأخرى، كما وضح ذلك ملبرن ١٩٧٩م (Milburn, 1979) عندما أخذ فرعا من المجموع الخضري لنبات (*Pelargonium*) بطول ٠,٢٥ م وعلّقه في زاوية من المعمل بعيدا عن الإضاءة الشديدة ولاحظ بعد مضي شهرين تقريبا تكون أوراق جديدة في براعم ذلك الفرع مع موت بعض الأوراق الكبيرة وبعد ذلك بدأ الساق في التجعد حتى أزهر الفرع ومات بعد نحواً من ستة أشهر، وهذه المشاهدات تدل بوضوح على مقدرة الثغور في التحكم في النتح علاوة على مقدرة القمة النامية على النمو ولو على حساب الماء من الأنسجة الأخرى.

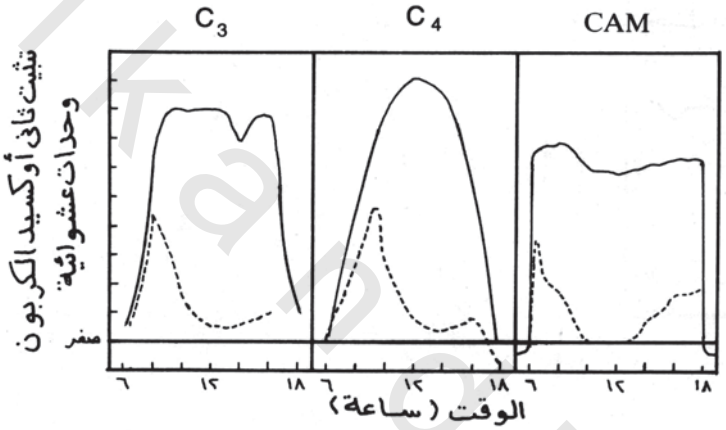
ورغم الصعوبة في دراسة العلاقة بين جهد الماء (وبالتالي الإجهاد المائي) والبناء الضوئي للأسباب السابقة، فقد درس أشتون ١٩٥٦م (Ashton, 1956) العلاقة بين البناء الضوئي ومحتوى التربة من الماء في نبات قصب السكر وتوصل إلى العلاقة المبينة في الشكل رقم (٧-٤) حيث تدل على انخفاض عملية البناء الضوئي مع انخفاض محتوى التربة من الماء ما بين السعة الحقلية ونسبة الذبول الدائم. ومما يلفت النظر في العلاقة المذكورة هو بقاء معدل البناء الضوئي عاليا حتى وصل محتوى التربة من الماء إلى حد معين عنده انخفض معدل البناء الضوئي انخفاضا شديدا ولم يعد إلى معدله السابق إلا بعد ري التربة. هذه. النتيجة ما هي إلا مثل لتأثير هذا العامل في البناء الضوئي الذي قد يتأثر تحت هذه الظروف بعدة عوامل أخرى قد تكون من الشدة في التأثير بحيث تحد من عملية البناء الضوئي والتي يدخل ضمنها المواد المصنعة وانخفاض



الشكل رقم (٧-٤). معدل البناء الضوئي في نبات قصب السكر والنسبة المئوية لمحتوى التربة المائي خلال خمس دورات من الجفاف استغرقت ٧٥ يوماً.

المصدر: (Ashton, 1956).

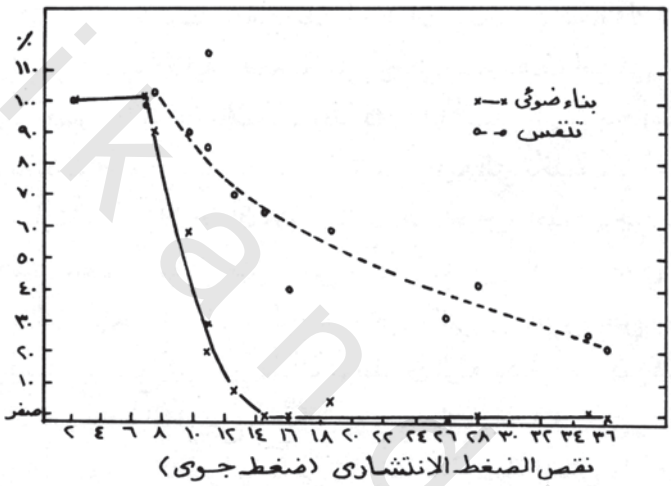
معدل نقلها كما سبق وأعمار الأوراق والرطوبة النسبية في الجو والمجموع الجذري للنبات إلى غير ذلك من المؤثرات التي ليس هذا مجال مناقشتها. في دراسات أخرى تمت المقارنة بين نباتات من مجاميع نباتية مختلفة في مساراتها الأيضية مثل النباتات ثلاثية الكربون (C_3 plants) والنباتات رباعية الكربون (C_4 plants) والنباتات العصيرية (CAM) من حيث علاقة البناء الضوئي والإجهاد المائي، والنتيجة كما جمعها أزموند وآخرون ١٩٨٠م (Osmond *et. al*., 1980) موضحة في الشكل رقم (٧-٥).



الشكل رقم (٧-٥). مسار التغير اليومي للبناء الضوئي في المجاميع النباتية كما يتأثر بجهد الماء في الورقة عندما يكون مرتفعا (المنحنى المتصل) وعندما يكون منخفضا نتيجة للإجهاد بوجود ٤٠٠ مليجزيئي من كلوريد الصوديوم مع المحلول المغذي (المنحنى المتقطع) وذلك في النباتات ثلاثية الكربون (C_3 plants) ويمثلها نبات (*Glycine max*) حيث جهد الماء قبل شروق الشمس كان يساوي - ٠,٢ ميجاباسكال للنباتات في المحلول المغذي و - ١,١ ميجاباسكال للنباتات المجهدة، والنباتات رباعية الكربون (C_4 plants) ويمثلها نبات (*Hammada scoparia*) بجهد ماء قبل شروق الشمس يساوي - ١,٤ ميجاباسكال للنباتات في المحلول المغذي و - ٤,٢ ميجاباسكال للنباتات المجهدة، والنباتات العصيرية ذات الأيض الكراشيولي (CAM) ويمثلها نبات (*Mesembryanthemum crystallinum*).

المصدر: (Osmond, *et. Al.,* 1980).

هناك العديد من البحوث المتعلقة بتأثير الإجهاد المائي في معدل التنفس قد يطول شرحها لذا يكفى ذكر بعض الأمثلة ومنها دراسة العالم بريكس ١٩٦٢م (Brix, 1962) على نبات الطماطم وبادرات أحد الصنوبريات نظراً لاشتمالها على تأثير الإجهاد المائي على كل من البناء الضوئي والتنفس والنتح.

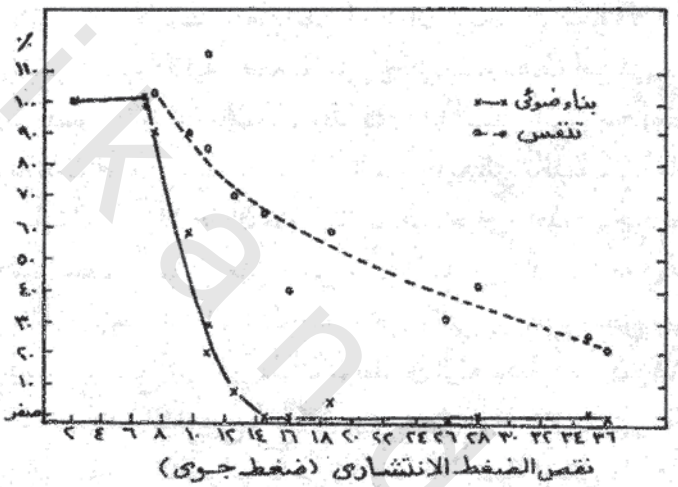


الشكل رقم (٧-٦). تأثير الإجهاد المائي في النسبة المئوية لمعدل البناء الضوئي والتنفس لأحد أنواع الصنوبريات عند السعة الحقلية.

المصدر: (Brix, 1962).

يوضح الشكل رقم (٧-٦) تأثير الإجهاد المائي في عمليتي البناء الضوئي والتنفس في الصنوبر. يتضح من الشكل المذكور التأثير في البناء الضوئي أولا قبل التأثير في التنفس والذي يبدو في هذا النوع من النباتات أكثر تعقيدا نظرا لانخفاض معدل العملية ثم ارتفاعها وبعد ذلك تبدأ في الانخفاض مرة أخرى، وقد علل الباحث ذلك بأن الانخفاض الأول في التنفس يعود إلى نقص في مادة التفاعل لانخفاض معدل البناء

الضوئي ولكن الزيادة في التنفس بعد نقطة معينة من الإجهاد المائي قد تعود إلى توافر مادة التفاعل نتيجة لبدء عملية تميؤ، النشا إلى سكر وهو مادة التفاعل. أما الانخفاض الآخر في التنفس فقد يمثل تأثير نسبة الذبول الدائم وبداية الهرم. أما نتيجة الدراسة على نبات الطماطم فموضحة في الشكل رقم (٧-٧) حيث انخفاض معدل التنفس



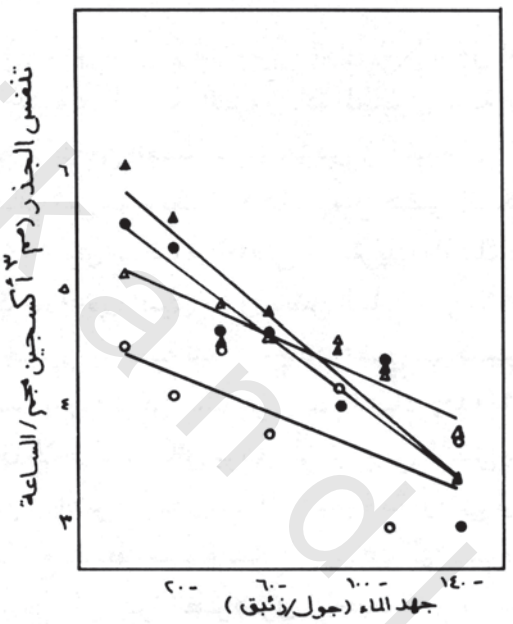
الشكل رقم (٧-٧). تأثير الإجهاد المائي في النسبة المئوية لمعدل البناء الضوئي والتنفس في نبات الطماطم عند السعة الحقلية.

المصدر: (Brix, 1962).

مقترن بالانخفاض في عملية البناء الضوئي مع الزيادة في الإجهاد المائي. أما جارفس وجارفس ١٩٦٥م (Jarvis and Jarvis, 1965) فقد وجدا علاقة بين تنفس أطراف جذور بادرات بعض الأشجار والجهد الأسموزي لمحلول التغذية الخارجي باستعمال مادة تخفض الجهد الأسموزي ولا تؤثر في الجذور وهي كاربوواكس ١٥٤٠ (Carbowax 1540) وهذه العلاقة هي أن الانخفاض في الجهد الأسموزي للمحلول يصاحبه انخفاض

في التنفس كما يستدل على ذلك من الشكل (٧-٨).

من الأمور التي لا تكاد تخفى على أحد أن النباتات عموما لا تنمو إلا حيث يوجد ماء ونمو النبات دلالة واضحة على وجود الماء وهذا أمر بديهي تعرف عليه



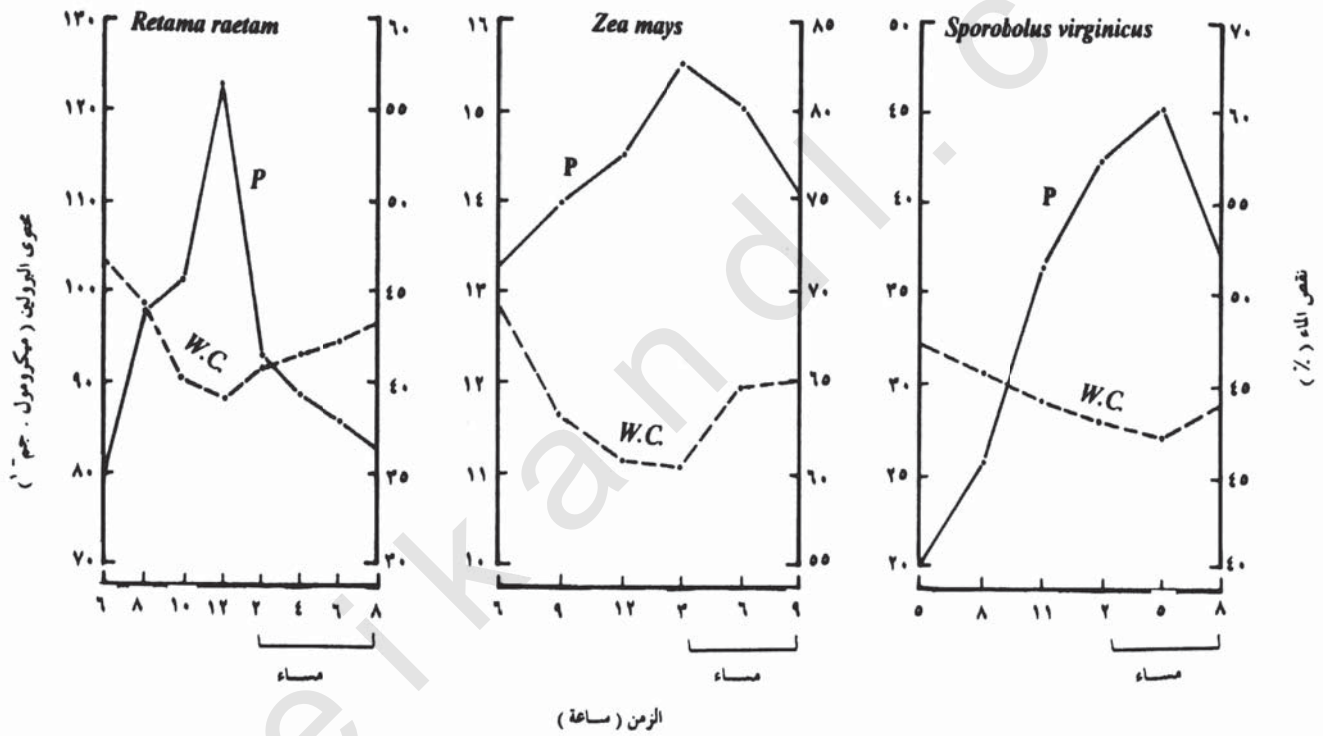
الشكل رقم (٧-٨). علاقة التنفس (امتصاص الأكسجين) والجهد الأسموزي لمحلول الوسط الموضوعة فيه قطع بطول ١-٢سم من جذور نباتات الصنوبر (▲) والراتنجية (Δ) و البتـــولا (●) و الحور (○).

المصدر: (Jarvis and Jarvis, 1965).

الاقدمون ومنه طورت الزراعة بالري منذ عدة آلاف من السنين، وقد أدى هذا التطوير إلى وجود أصناف زراعية وأصناف برية تضم ضمن ما تضم النباتات الصحراوية التي

تأقلمت للجفاف ومقاومته لفترات متغايرة ولذا يلاحظ أن نمو النباتات الصحراوية محدود بوجود الماء وإن كان يسيرا. على أية حال، فعملية النمو من وجهة نظر العلاقات المائية للخلية في النبات أو أحد أجزائه غير المفصولة عنه لم تدرس بعد (Nonami, 1998). وقد درس، في الماضي، تأثير ظاهرة الإجهاد المائي على النمو وتبين أن العلاقة في غاية التعقيد نظرا لارتباط النمو بالعمليات الفسيولوجية الأخرى التي سبق ذكر بعض منها مثل البناء الضوئي والتنفس والنتح إلى غير ذلك مما تطرق إليه فاديا وآخرون ١٩٦١م (Vaadia, *et. al.*, 1961) حيث ذكروا أيضا اختلاف المجموع الجذري بين النباتات واختلاف تركيب التربة. ومن الأمثلة على خصائص النمو التي درس تأثرها بالإجهاد المائي ما قام به العالمان جنجريش ورسل ١٩٥٦م (Gingrich and Russell, 1956) بالنسبة لنبات الذرة حيث وجدا انخفاضا في استطالة الجذير والوزن الرطب والوزن الجاف ودرجة تميؤ البادرات عندما تتعرض تلك البادرات إلى إجهاد مائي متدرج من ٠,١ إلى ١,٢ ميجاباسكال، ولكن البادرات تبدي حساسية للتغير في الإجهاد أكثر ما بين ٠,١ و ٠,٣ ميجاباسكال.

وأخيرا فالإجهاد المائي يؤثر في محتوى النبات من المواد كما وكيفا كعملية تحويل المخزون النشوي إلى سكاكر وزيادة المحتوى النيتروجيني مع تثبيط بناء البروتينات إلى غير ذلك من العمليات التي تؤدي في النهاية إلى إبراز تغير في مكونات النبات. لقد وجد في دراسة لتأثير الإجهاد المائي (-٢ ميجاباسكال) على مكونات عصير اللحاء في نبات البرسيم (Girousse, *et.al.*, 1996) ازديادا في المحتوى من الحمض الأميني البرولين مع الانخفاض في جهد ماء الورقة ، لكن التغير في الأحماض الأمينية الأخرى كان ضئيلا. في دراسة مقارنة (Batanouny, *et. al.*, 1985) على تراكم البرولين في مجاميع بيئية مختلفة نتيجة لنقص الماء ، اتضح أن الاتجاه العام لتراكم البرولين في هذه النباتات واحد (الشكل رقم ٧-٩)



الشكل رقم (٧–٩). التغير اليومي لمحتوى البرولين (P) و المحتوى المائي (W.C.) في ثلاثة نباتات ممثلة مجاميع بيئية مختلفة نتيجةلتعرضها للإجهاد المائي.

المصدر: (Batanouny, *et. al.*, 1985).

obeikandl.com

رغم اختلاف القيم العددية للمحتوى البروليني، وكان التراكم يبدأ مع شروق الشمس وحتى غروبها بأعلى قيمة له في منتصف النهار تقريبا ، وهذا يتفق مع نقص التشبع المائي. لعله من المفيد الإشارة إلي عامل آخر وهو التعرض المباشر لأشعة الشمس وتراكم البرولين، فقد كان محتوى البرولين في النباتات المعرضة للشمس أكبر من ذلك في نباتات الظل وكلاهما من النوع النباتي نفسه (Batanouny, et.al., 1984).

من ناحية أخرى، فقد درس دخول الفوسفور المشع (^{32}P) في الأجزاء المختلفة من الأحماض النووية في نبات كف مريم الصحراوي (*Anastatica hierochuntica* L) تحت ظروف الإجهاد المائي، ووجد انخفاضا في ذلك خلال ٢٤ ساعة بعد إيقاف الري، ثم يعود بناء الأحماض النووية خلال ١٢ ساعة من الري . لقد كان الاستنتاج هو أن العلاقة بين الإجهاد المائي ومحتوى النبات من الهرمونات النباتية وبناء الأحماض النووية ما هي إلا علاقة عرضية (Hartung, 1974).

تقل كمية بعض الأحماض مثل حمضي السكسينيك والفيوماريك بشكل كبير أثناء الجفاف، إلا أن محتوى النبات من حمضي السيتريك والماليك ينخفض أيضا ولكن بصورة أقل. هناك علاقة بين محتوى جذور بعض النباتات من الأحماض العضوية وعمر تلك الجذور، فالجذور الحديثة تتميز بوجود حمضي السكسينيك والفيوماريك بينما الجذور المسنة تتميز بوجود تركيزات عالية من حمض الماليك وهذا ما حدا ببعض العلماء إلى الاستنتاج أن الإجهاد المائي يؤدي إلى تغير في الأيض يشابه ذلك التغير المصاحب للتقدم في السن. أما زيادة المحتوى النيتروجيني فيعود إلى استمرار بناء الأحماض الأمينية مع تثبيط لعملية بناء البروتينات التي تستخدم الأحماض الأمينية كوحدات أساسية. ومن أبرز الظواهر في الإجهاد المائي بالنسبة للأحماض الأمينية الزيادة الملحوظة في مستوى البرولين وإلى حد ما الاسباراجين أثناء الجفاف، ويصاحب ذلك انخفاض في مستوى الفالين

وحمض الجلوتاميك لأن البرولين يتكون من حمض الجلوتاميك كما عرف عنه في أحد النجيليات (Bernett and Naylor, 1966). وفي النباتات المعرضة للإجهاد المائي مثل نبات الشعير فإنه سيرد ذكر ذلك لاحقا.

أما الهرمونات فقد عرف تغير مستواها في النبات نتيجة للإجهاد المائي حيث إن تركيز هرمون حمض الأبسيسيك يزداد في الأوراق المفصولة عند فقدها جزءا من مائها (Milborrow, 1974)، أما النبات الكامل والمعرض للإجهاد مثل الذرة فالجدول (٧-١) يبين فروق تركيز هذا الهرمون.

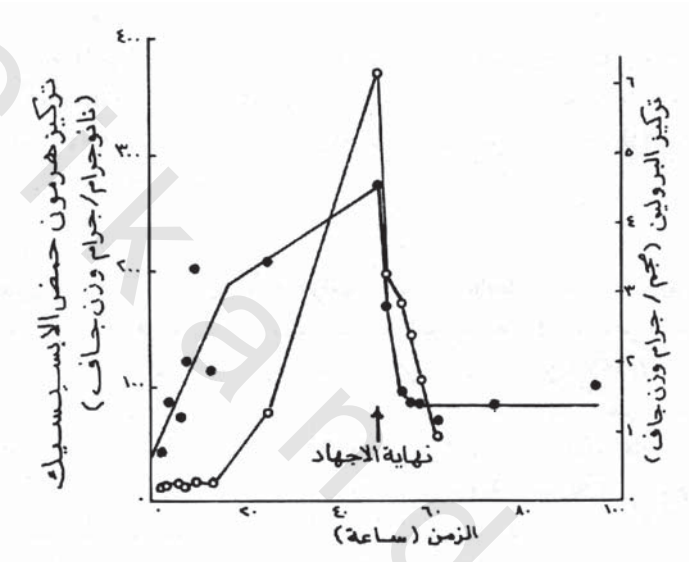
الجدول رقم (٧-١). علاقة جهد الماء في ورقة نبات الذرة (*Zea mays* cv. Iocheif) وتركيز هرمون حمض الأبسيسيك غير المرتبط بعد ٢٤ يوما من الإنبات والأيام في الجدول بعد الري.

المتغير	اليوم الثاني من الري		اليوم الثامن من الري	
	مروية	غير مروية	مروية	غير مروية
جهد الماء في الورقة (ميجاباسكال)	- ٠,٤	- ٠,٨	- ٠,٥	- ١,٨
تركيز حمض الأبسيسيك (نانوجرام/جم وزن رطب في:				
الورقة رقم ٣	٤٠	١٤٠	١٠٠	٧٠٠
النورة العليا	٤٠	٥٥٠	٧٠	٨١٠
النورة الإبطية في السلامية ٧	٨٠	١٨٠	١٤٠	٦٣٠
النورة الإبطية في السلامية ٥ و ٦	٨٠	٤١٠	٣٤٠	١١٥٠
النورة الإبطية في السلامية ٣ و ٤	٧٠	١٦٠	٣٤٠	٧٣٠

المصدر: (Damptey, *et. al.*, 1978).

obeikandi.com

إن الزيادة في تركيز هذا الهرمون أثناء الإجهاد تقل عند ري النبات أو إزالة المسبب للإجهاد كما يتضح ذلك من نتائج الدراسة على نبات الشعير الموضحة في الشكل رقم (٧-١٠). والشكل المذكور يبين أيضا علاقة تركيز البرولين بالإجهاد المائي والتي نوه عنها عند ذكر الأحماض الأمينية أعلاه.



الشكل رقم (٧-١٠). العلاقة بين تركيز هرمون حمض الأبسيسيك (●) والبرولين (○) في نبات الشعير (*Hordeum vulgare* cv. *Prior*) كما تتأثر بالإجهاد المائي وهو إضافة مادة [Polyethylene glycol (PEG)] لخفض الجهد الأسموزي لمحلول التغذية إلى -١ ميجاباسكال وبعد ٤٨ ساعة نقلت النباتات إلى محلول تغذية فقط.

المصدر: (Aspinali, 1980).

والتأثير الفسيولوجي لزيادة تركيز هرمون حمض الأبسيسيك داخل النبات هي أنه عندما يصل تركيزه إلى حد معين فهو يعمل على إغلاق الثغور المفتوحة ويمنع انفتاح الثغور المغلقة وقد سبق ذكر ذلك. وهذه الاستجابة قد تعلل بأنها آلية لتفادي

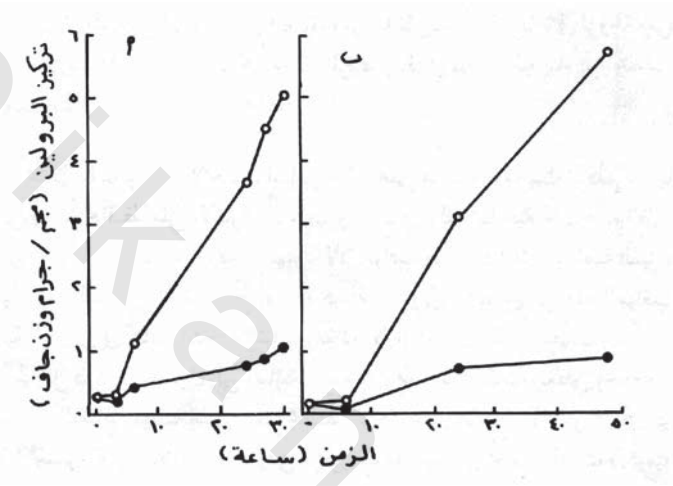
فقد الماء من النبات عن طريق إغلاق الثغور أو زيادة مقاومة الانتشار في أوراق النباتات التي لا تستجيب ثغورها لهذا الهرمون. أما بالنسبة للمجموع الجذري فتأثير زيادة تركيز هذا الهرمون تتلخص فيما اقترحه العالمان كرام وبيتمان ١٩٧٢م (Cram and Pitman, 1972) نتيجة لدراستهما وهي أن هذا الهرمون قد ينظم نقل الأيونات إلى المجموع الخضري وذلك بمنع انتقال الأيونات إليه وبالتالي الحد من تراكم هذه الأيونات في الأوراق والذي لو حدث فقد يزيد من جهد مائها.

من ناحية أخرى فإن زيادة تركيز هذا الهرمون نتيجة للإجهاد المائي تعمل على تثبيط النمو عن طريق التأثير في القمم النامية كما هو معروف بالنسبة للتأثير العام لهذا الهرمون، أما بالنسبة للمجاميع الأخرى من الهرمونات فالسيتوكينينات التي تصنع بواسطة الجذور فيعتقد بأنها لا تصل إلى المجموع الخضري في النباتات المعرضة للإجهاد المائي مما يتسبب في تعجيل الهرم وسقوط الأوراق وتثبيط بناء البروتينات وهذا الاعتقاد في وفاق تام مع زيادة تركيز هرمون حمض الأبسيسيك وتأثيراته سابقة الذكر وكذلك مع المعاملة بالأدينين كما سبق، أضف إلى ذلك ما وجد من أن إضافة السيتوكينينات إلى الأنسجة المعرضة للإجهاد المائي تعمل على عدم زيادة تركيز هرمون حمض الأبسيسيك والبرولين كما يوضح ذلك الشكل رقم (٧-١١).

ورغم كل ما سبق فإن الدليل القاطع على عدم وصول السيتوكينينات إلى المجموع الخضري لا يزال تحت البحث. أما هرمون الإيثيلين فقد وجد أن تركيزه داخل النبات يزداد مع الإجهاد المائي ولكن قد يكون ذلك ناتجا بطريقة غير مباشرة لأن وجود حمض الأبسيسيك يستحث زيادة تركيز الإيثيلين. أما الهرمونات الأخرى فليس هناك من دراسة وافية عنها وعن علاقتها بالإجهاد المائي.

من الظواهر المعروفة في مقاومة الجفاف أن مستوى الأحماض النووية (DNA)

و(RNA) في النباتات المقاومة للجفاف يكون عاليا مما يعمل على استحثاث بناء البروتينات وتثبيط تحللها، وقد سبق ذكر أثر الجفاف في بناء البروتينات وتثبيطه لذلك وحيث إن الأدينين معروف بتأثيره في رفع مستوى الأحماض النووية في النباتات،



الشكل رقم (٧–١١). تأثير الكاينتين (من السيتوكينينات) في تراكم البرولين في الأوراق المفصولة من نبات الشعير (*Hordeum vulgare* cv. *Prior*) كاستجابة للإجهاد المائي (أ) الذي هو –٢ ميجاباسكال جهد أسموزي بإضافة مادة [Polyethylene glycol, ○] **أو في وجود ٥ميكروجرام /مل من الكاينتين (●)، أو (ب)كاستجابة لوجود ٥ميكروجزيئي/مل فقط من هرمون حمض الأبسيسيك (○) أو التركيز نفسه مع ٥ ميكروجزيئي/مل من الكاينتين(●).**

المصدر: (Aspinali, 1980).

لذا فإن معاملة بعض البذور عن طريق نقعها في محلول الأدينين لمدة يومين ومن ثم تجفيفها في الهواء قبل بذرها يعمل على زيادة المقاومة للجفاف والحرارة، حيث إن النباتات الناتجة من هذه البذور المعاملة بهذه الطريقة تتميز بزيادة في لزوجة ومرونة

السيتوبلازم علاوة على زيادة كمية الماء المرتبط وبالتالي فإن عملية بناء البروتينات في مثل هذه النباتات لا تتأثر كثيرا بالجفاف.

مما لا شك فيه أن الإجهاد المائي يؤثر في النباتات بحيث تؤقلم عمليات الأيض وبذا تحافظ على الاتزان الأسموزي اللازم لبقائها حية تحت هذه الظروف الجديدة. ولكن الأمر ليس بهذه السهولة لأن عواقب الإجهاد المائي وخاصة الفيزيائية والكيميائية والفسيولوجية لم تتضح بصورة كاملة بعد ولا يعرف أي من هذه العواقب به الأهمية الكبرى في تحديد إنتاجية النبات وبقائه ولازالت مجال بحث خصب وقد يمضي وقت طويل قبل الوصول إلى نتائج تجمع بين هذه المترابطات وتعطي إجابة مقنعة لكثير من النقاط المهمة مثل كيف يحافظ النبات على الاتزان الأسموزي أي كيف تنظم الأسموزية في خلايا النبات وهل التغيرات المسجلة في محتوى النبات الكيميائي تساهم في مقدرة النبات على النمو في المناطق الجافة إلى غير ذلك. على أنه يمكن الاستنتاج مما سبق ذكره من أنه مادام النبات مكتمل النمو قد نتج من خلايا الجنين في البذرة وأن هذا الجنين قد تحمل من الجفاف درجة كبيرة ومع ذلك حافظ على حياته فإنه لابد وأن يكون لدى الجنين المقدرة الوراثية التي مكنته من ذلك وقد تكون هذه المقدرة الوراثية موجودة في خلايا النبات مكتمل النمو إلا أنه لم يعبر عنها في جميع النباتات، وقد يكون التعبير عن هذه المقدرة متدرج، لذا فإن إدراك هذا الاستنتاج في البحوث القادمة والمتعلقة بالإجهاد المائي قد تعطي نتائج ذات جدوى أكبر من أي افتراض آخر.

obeikandl.com

المـــراجـع

Abd El-Rahman, A.A., Batanouny, K. H. and Zayed, K.M. (1974). "Water Relations of *Glycyrrhiza glabra* L. under Desert Conditions". *Flora, Bd*. 163, S. 143-155 .

Al-Whaibi, M. H. (1988). "Leaf-CO_2-assimilation and Conductance of Two Date Palm Cultivars". *Date Palm J*. 6: 355-370.

Al-Whaibi, M.H. 2004. Resurrection Plants. S. Boil. J. 11 (2) : 11-23, (a review, In Arabic) .

Anderson, W. P. (1976). Transport through roots. *In:* **Lüttge, U. and M. G. Pitman** (Eds.). "Transport in Plants II part B. Tissues and Organs". *Encyclopedia of Plant Physiology, New Series*, V. 2 Springer-Verlag, Berlin.

Arnett, Jr., R. H. and Braungart, D. C. (1970) *An Introduction to Plant Biology,* 3rd. Ed. The C. V. Mosloy Co. St. Louis.

Ashton, F. (1956). "Effects of a Series of Cycles of Alternating Low and High Soil Water Contents on the Rate of Apparent Photosynthesis in Sugar Cane". *Plant Physiol. Lancaster,* 31:266-274.

Aslyng, H. **C**. (1963). *Soil Physics Terminology.* Int. Soc. Soil Soc. Bull. 23:1-4.

Aspinali, D. (1980). Role of Abscisic Acid and Other Hormones in Adaptation to Water Stress. *In:* **Turner N. C. and Kramer, P. J**. (Eds.) "Adaptation of Plants to Water and High Temperature Stress." Lohn Wiley & Sons Inc., New York.

Baker, J.M. and van Bavel, C.H.M. (1987). "Measurement of Mass Flow of Water in the Stem of Herbaceous Plants". *Plant, Cell and Environ*. 10: 777-782.

Bakke, A. L. and Noecker, N. L. (1933). "The relation of Moisture to Respiration and Heating in Stored Oats. *Iowa Agric. Exp. Sta. Res. Bull.* 165.

Bange, G. G. J. (1953). "On the Quantitative Explanation of Stomatal Transpiration." *Acta Bot. Neer.*2:255-297.

Baron, W. M. M. (1967). *Water and Plant Life.* Helnemann. London.

Barrs, H. D. (1965). "Comparison of Water Potentials in Leaves as Measured by Two Types of Thermocouple Psychrometer." *Australian J. Biol. Sc.* 18:36.

Barrs, H. D. (1968). Determination of Water Deficits in Plant Tissues. *In:* **T. T. Kozlowski,** (Ed). *Water Deficits and Plant Growth.* Vol. 1 pp. 235-367.

Batanouny, K.H. (1974). "Eco-physiological Studies on Desert Plants . IX-Types of Transpiration Curves of *Zill spinosa* Prantl, under Natural Conditions". *Flora, Bd.* 163. s. 1-6 .

Batanouny, K.H., Hassan, A.H. and Abu Sitta, Y.M. (1984). "Water Conditions and Proline Content in Shade and Sun Plants". *Qater Univ. Sci. Bull.* 4: 57-66 .

Batanouny, K.H., Hassan, A.H. and Zayed, K.M. (1985). "Proline Accumulation in Plants of Different Ecological Groups as a Response to Water Deficit". *Qater Univ. Sci. Bull*. 5: 131- 141 .

Begg, J. E. (1980). Morphological Adaptations of Leaves to Water Stress. *In:* **Turner N. C. and Kramer, P. J**. (Eds.) "Adaptation of Plants to Water and High Temperature Stress." Lohn Wiley & Sons Inc., New York.

Begg, J. E. and **Torssell, B. W. R.** (1974). *In:***R. L. Bieleski, A. R. Ferguson, and M.M. Creswell.** (Eds). "Mechanisms of Regulation of Plant Growth." *Bulletin* 12, Royal Society of New Zealand, Wellington, p. 277.

Begg, J. E. and **Turner, N. C.** (1976). "Crop Water Deficits". *Adv. Agron.* 28:161-217.

Bennet-Clark, T. A. (1959). Water Relations of Cells *In:* **F. C. Steward** (ed.) *"Plant Physiology".* Vol. 2: 105-191. Academic Press Inc. New York.

Bernal, J. D. (1965). "The Structure of Water and its Biological Implications". *Symp. Coc Exp. Biol.* 19: 17-32. Cambridge Univ. Press, New York.

Bernett, N. M. and Naylor, A. W. (1966). "Amino Acids and Protein Metabolism in Bermuda Grass during Water Stress." *Plant Physiol.* 41:1222.

Biddulph, O., **Nakayama, F. S.** and **Cory, R.** (1961). Transpiration and ascension of Calcium. *Plant Physiol. Lancaster* 36:429-436.

Boyer, J. S. and Knipling, E. B. (1965). "Isopiestic Technique for Measuring Leaf Water Potential with a Thermocouple Psychrometer". *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 54:1044.

Bozhenko, V. P. (1965). The Influence of Microelements on ATP Content in Plants in the Presence of Water Deficit and Under the Influence of High Temperature. *In:* **B. Slavik** (ed.). *Water Stress in Plants. Proc. Symp. Prague, 1963.* Czech. Acad. Sci. ,Prague.

Briggs, L. J. and Shantz, H. L. (1912). "The Relative Wilting Coefficients for Different Plants. *Bot. Gaz.* 53:229-235.

Brix, H. (1962). "The Effect of Water Stress on the Rates of Photosynthesis and Respiration in Tomato Plants and Loblolly Pine Seedlings". *Physio. Plantarum* 15:10-20.

Brouwer, R. (1954). "Water Absorption by the Roots of *Vicia faba* at Various Transpiration Strengrhs. I. Analysis of the Uptake and the Factors Determining it." *Proc. K. Aed. Akad. Wet.* C56:106-115.

Brown, R. W. and Van Haveren, B. P. (eds). (1972). Psychrometry in Water Relations Research. Proc. Symp. On Thermocouple Psychrometers. Utah State Univ. March, 17-19, 1971. *Utah Agric. Exp. St.*, Utah, U.S.A.

Buckingham, E. A. (1907). "Studies of the Movement of Soil Moisture". *U. S. Dept. Agric. Bull.* 38.

Buswell, A. M. and Rodebush, W. H. (1956a). "Water". *Sci. Amer.* 194(4):77-89.

Buswell, A. M. and Rodebush, W. H. (1956b). "Water". *Sci. Amer.* 202:1-10.

Campbell, G. S. (1975). Steady State Diffusion Porometer. *In:* **E. T. Kanemasu** (ed.). "*Measurment os Stomatal Aperture and Diffusive Resistance*". *Washington Agric. Res. Center Bull.* 809, Washington State Univ., Pullman.

Clark, A. J. (1956). *Investigation of the Drought Hardening of the Soy-bean Plant.* Ph. D. Thesis. Univ. of Missouri, Columbia, Mo.

Collis-George, N. and Sands, J. E. (1962). "Comparison of the Effects of the Physical and Chemical Components of Soil Water Energy on Seed Germination". *Aust. J. Agric. Res.* 13:575.

Coulter, J. M. , Barnes, C. R. and Cowles, H. C. (1911). *A Textbook of Botany,* Vol. II. *Ecology.* American Book Co. New York.

Crafts, A. S., Currier, H. B. and **Stocking, C. R.** (1949). *Water in the Physiology of Plants.* Chronica Botanica Waltham, Massachusetts.

Cram, J. and **Pitman, M. A. (1972). "**The action of Abscisic Acid on Ion Uptake and Water Flow in Plant Roots". *Aust. J. Biol. Sci.* 25: 1125-1132.

Cutler, D. F. (1978). *Applied Plant Anatomy.* Longman, London and New York.

Dainty, J. (1963). "Water Relation of a Plant Cell". *Adv. Bot. Res.* 1:279-326.

Dainty, J. (1969). Water Relations of Plants. *In:* **M. B. Wilkins.** (ed.).*The Physiology of Plant and Development.* McGraw-Hill Book Co., London.

Dainty, J. (1976). Water Relations of Plant Cells. *In:* **Lüttge, U. and M. G. Pitman** (Eds.). "Transport in Plants II part A. Cells". *Encyclopedia of*

Plant Physiology, New Series, V. 2. Pp. 12-35. Springer-Verlag, Berlin.

Dainty, J. and Ginzburg, B. Z. (1964). "The Measurement of Hydraulic Conductivity (Osmotic Permeability to Water) of Internal Characean Cells by means of Transcellular Osmosis". *Biochem. Biophys. Acta,* 79:102-111.

Damptey, H. B., Coobe, B. G. and Aspinali, D. (1978). "Apical Dominance, Water Deficit and auxillary Inflorescence Growth in *Zea mays*: The Role of Abscisic Acid". *Ann. Bot.* (London) 42:1447-1458.

Davis, S. D., Sperry, J. S. and **Hacke, U. G.** (1999). "The Relationship between Xylem Conduit Diameter and Cavitation Caused by Freezing". *Amer. J. Bot*. 86:1367.

Diettert, H. (1937). "The Morphology of *Artemisia tridentata* Nutt. *Lloydia,* 1:3.

Edlefsen, N. E. (1914). "Some Thermodynamic aspects of the Use of Soil-moisture by Plants". *Trans. Amer. Geophys. Un.* 22:917-940.

Ehleringer, J., Mooney, H. A. and **Berry, J. A.** (1979). "Photosynthesis and Microclimate of *Camissonia claviformis* a Desert Winter Annual. *Ecology* 60: 280-286.

Ehleringer, J. R. and Cooper, T.A. (1988). "Correlations between Carbon Isotope Ratio and Microhabitat in Desert Plants". *Oecologia* 76: 562-566 .

Ehrler, W. L. and **Van Bavel**. (1968). "Leaf Diffusion Resistance, Illuminance and Transpiration". *Plant Physiol.* 43:208-214.

Esau, K. (1960). *Anatomy of Seed Plants.* John Wiley and Sons, New York.

Evans, D. and Thames, J. L. (1980). "Water in Desert Ecosystems". *US/IBI Synthesis Series II.* Dowden,Hutchinson and Ross, Inc. Stroudsburg, Pennsylvania.

Ferry, J. F. (1959). *Fundamentals of Plant Physiology.* The Macmillan Co. New York.

Franco, C. M. and Magalhaes, A. C. (1965). "Techniques for Measurement of Transpiration of Individual Plants". *Arid Zone Res.* 25:211-224 UNESCO, Paris.

Frank, H. S. and Wen, W. (1957). "Structural Aspects of Ion-solvent Interaction in Aqueous Solutions: A Suggested Picture of Water Structure". *Discuss. Faraday Soc.* 24: 133-140.

Gaastra, P. (1959). "Photosynthesis of Crop Plants as Influenced by Light, Carbon Dioxide, Temperature and Stomatal Diffusion Resistance". *Meded. V. d. Landbouwhogeschool., Wageningen,* 59:1-68.

Gingrich, J. R. and Russell, M. B. (1956). "Effect of Soil Moisture and Oxygen Concentration on the Growth of Corn Roots". *Agron. J.* 48:517.

Girousse, C., Bournoville, R. and Bonnemain, J. (1996). "Water Deficit-induced Changes in Concentrations in Proline and some Other Amino Acids in the Phloem Sap of Alfalfa". *Plant Physiol.* 111: 109-113.

Glinka, Z. and Reinhold, L. (1964). "Reversible Changes in the Hydraulic Permeability of Plant Cell Membranes. *Plant Physiol.,* Lancaster 39:1043-1050.

Green, P. B. and Stanton, R. W. (1967). "Turgor Pressure: Direct Manometric Measurement in Single Cells of *Nitella"*. *Science.* 155:1675-1676.

Halvorson, W. L. and Patton, D. T. (1974). "Seasonal Water Potential Chandes in Sonoran Desert Shrubs in Relation to Topography". *Ecology,* 55:173-177.

Hartung, V.W., (1974). "The Effect of Water Stress on the Nucleic Acid Content in *Anastatica hierochuntica* L". *Flora, Bd.* 163.S. 156-162.

Heath, O. V. S. (1975). *Stomata.* Oxford U. P. London.

Heath, O. V. S. and Russell, J. (1954). "Investigation of the Light Responses of Wheat Stomata with the Attempted elimination of Control by the Mesophyll. Part 1. Effect of Light independent of Carbon Dioxide". *J. Exp. Bot.* 5:1-15.

Homgren, P., **Jarvis, P. G. and Jarvis, M. S**. (1965). "Resistances to Carbon Dioxide and Water Vapour Transfer in Leaves of Different Plant Species". *Physiol. Plantarum* 18:557-573.

Hsiao, T. C. (1976). Stomatal Ion Transport. *In:* **Lüttge, U. and M. G. Pitman** (Eds.). "Transport in Plants II part B. Tissues and Organs". *Encyclopedia of Plant Physiology, New Series*, V. 2 195-221. Springer-Verlag, Berlin.

Hsieh, J. J. C., Enfield, C. G. and Ungate, E. P, (1972). Application of Temperature-compensated Psychrometers to Measurement of Water Potential Gradients. *In:* **Brown, R. W. and Van Haveren, B. P**. (eds). (1972). Psychrometry in Water Relations Research. Proc. Symp. On Thermocouple Psychrometers. Utah State Univ. March, 17-19, 1971. *Utah Agric. Expt. St.*, Utah, U.S.A.

Huber, B. and Schmidt, E. (1936). "Weitere Thermo-elektrische Untersuchungen über den Transpirationsstrom der Bäume". *Tharandt. Forstl JP* 87:369-412.

Huber, B. and Schmidt, E. (1937). "Eine Kompensationsmethode zur Thermo-elektrische Messung Langsamer Saftstrome". *Ber. Dtsch. Bot. Ges.* 55:514-529.

Hüsken, D., Steudle, E. and Zimmermann, U. (1978). "Pressure Probe Technique for Measuring Water Relations of Cells in Higher Plants". *Plant Physiol. 61:158-163.*

Jarvis, P. G. and **Jarvis, M. S**. (1963). "The Water Relations of Tree Seedlings. III. Transpiration in Relation to Osmotic Potential of the Root Medium". *Physiol. Plantarum* 16:269.

obeikandl.com

Jarvis, P. G. and Jarvis, M. S. (1965). The Water Relations of Tree Seedlings. V. Growth and Root respiration in Relation to Osmotic Potential of the Root Medium. *In:* **B. Slavik** (ed.). *Water Stress in Plants. Proc. Symp. Prague,* 1963. P. 167, Czech. Acad. Sci. ,Prague.

Jarvis, P. G. and **Mansfield, T. A. (**eds.). (1981). *Stomatal Physiology.* Cambridge University Press, Cambridge.

Jarvis, P. G. and **Slatyer, R. O**. (1966**).** "A Controlled Environment Chamber for Studies of Gas Exchange by Each Surface of a Leaf." *C. S. I. R. O. Aust. Div. Land Res. Tech*. Paper 29.

Jensen, W.A. and Salisbury, F.B. (1984). Botany, Second Edition. Wadsworth, Belmont, Calif.

Kaufman, M. R. (1968**). "**Water Relations of Pine Seedlings in Relation to Root and Shoot Growth". *Plant Physiol.* 43:281-288.

Kotyk, A. and **Janvacek, K.** (1977). *Membrane Transport.* Academia, Prague.

Kramer, P. J. (1940). "Root resistance as a Cause of Decreased Water Absorption by Plants at Low Temperatures". *Plant Physiol.* 15:63-79.

Kramer, P. J. (1956). "Roots as Absorbing Organs". *Encyclopedia of Plant Physiology*. Vol. 3:188-214, Springer-Verlag OHG, Berlin.

Kramer, P. J. (1959). Transpiration and Water Economy of Plants. *In:* **F. C. Steward** (ed.) *"Plant Physiology".* Vol. 2: Academic Press Inc. New York.

Kramer, P. J. (1969). *Plant and Soil Water Relationships. A Modern Synthesis.* McGraw-Hill Book Co. New York.

Kramer, P. J., Knipling, E. B. and **Miller, L. N.** (1965). "Terminology of Cell Water Relations". *Science* 152:889-890.

Kreeb, K. (1965). **"**Untersuchungen zu den Osnotischen Zustandsgrössen. I. Mitteiliung: Ein Tragbares Electronisches Mikrokryoskop für Okophysiolgische Arbeiten". *Planta* 65:269.

Kuiper, P. J. C. (1963). Some Considerations on Water Transport Across Living Cell Membrane. *In:* **I. Zelitch (ed.).** *Stomata and Water Relations in Plants.* Pp. 59-68. Connecticut Agricultural Experiment Station. New Haven, Conn. U.S.A.

Ladefoged, K. (1960). "A Method for Measuring the Water Consumption of Larger Intact Trees". *Physiol. Plantarum* 13:648-658.

Lang, A. R. G. (1967). "Osmotic Coefficients and Water Potential of Sodium Chloride Solution from 0 to 40°C". *Aust. J. Chem.* 20:2017-2023.

Levitt, J. (1964). *In:* **D. W. Newman** (ed.). *Instrumentation in Experimental Biology.* P. 405. Macmillan, New York.

Levitt, J. (1980). Adaptation of Plants to Water and High Temperature Stress: Summary and Synthesis, 1-Stress Terminology. *In:* **N. C. Turner** and **P. J. Kramer** (eds.), *Adaptation of Plants to Water and High Temperature Stress*: John Wiley and Sons. New York.

Lockhart, J. A. (1959). "A New Method for the Determination of Osmotic Pressure". *Amer. Jour. Bot.* 46:704-708.

Lopushinsky, W. (1964). "Effect of Water Movement on Ion Movement into Xylem of Tomato Roots". *Plant Physiol.* 39:494-501.

Lüttge, U. and **Noe Higinbotham**. (1979). *Transport in Plants.* Springer-Verlag, New York.

Macklon, A. E. S. and **Weatherley, P. E.** (1965). **"**A Vapour Pressure Instrument for the Measurement of Leaf and Soil Water Potential". *J. Expt. Bot.* 16:261.

MacMahon, J. A. and **Schimpf, D. J.** (1981). Water as a Factor in the Biokogy of North American Desert Plants. *In:* **Evans, D. and Thames, J. L.** (eds.). "Water in Desert Ecosystems". *US/IBI Synthesis Series 11.* Dowden,Hutchinson and Ross, Inc. Stroudsburg, Pennsylvania. U.S.A.

Maximov, N. A. (1929). *The Plant in Relation to Water.* Allen and Unwin, London.

Meidner, H. and **Mansfield, T. A**. (1968). *Physiology of Stomata.* McGraw-Hill Book Co., London.

Meyer, B. S. (1945). **"**A Critical Evaluation of the Terminology of Diffusion Phenomena". *Plant Physiol.* 20:142-164.

Meyer, B. S. and **Wallace, A. M.** (1941). "A Comparison of Two Methods of Determining the Diffusion Pressure Deficit of Potato Tuber Tissue". *Amer. Jour. Bot.* 28:838.

Migahid, A.M., Abdel Wahab, A.M. and Batanouny, K.H. (1972). "Eco-physiological Studies on Desert Plants. VII- Water Relations of *Leptadenia pyrotechnica* (Forsk.) Decne. Growing in the Egypt Desert". *Oecologia (Berl.)*.10:79-91.

Milborrow, B. V. (1974). **"**The Chemistry and Physiology of Abscisic Acid". *Ann. Rev. Plant Physiol.* 25:259.

Milburn, J. A. (1979). *Water Flow in Plants.* Longman Group Ltd. London.

Morello, J. (1955-1956). "Estudios Botanicos en las Regiones Aridas de la Argentina". *Rev. Agron. Noroeste Arg.* 1:301,305; 2:79.

Münch, E. (1930). *Die Stoffbewegungen in der Flanze.* Jena: Gustav Fisher.

Némethy, G. and **Scheraga, H. A.** (1962). "Structure of Water and Hydrophilic bonding in Proteins 1. A Model for the Thermodynamic Properties of Liquid Water".*J. Chem. Phys.* 36:3382-3400.

Newman, E. I. (1966). "Relationship between Root Growth of Flax (*Linum unitatissimum*) and Soil Water Potential". *New Phytol.* 65:273-283.

Nobel, P. S. (1974). *Introduction to Biophysical Plant Physiology*. W. H. Freeman and Company, San Francisco.

Nonami, H. (1998). "Plant Water Relations and Control of Cell Elongation at Low Water Potentials". *J. Plant Res.* 111:373-383.

Oertli, J. J. (1966). "Active Water Transport in Plants". *Physiol. Plantarum* 19:809-817.

obeikandl.com

Oppenheimer, H. R. (1960). Adaptation to Drought: Xerophytism. *In:* Plant-water Relationships in Arid and Semi-arid Conditions. *Review of Research. P.*105. UNESCO, Paris.

Osmond, C. B., Winter, K. and Powles, S. B. (1980). Adaptive Significance of Carbon Dioxide Cycling during Photosynthesis in Water-stressed Plants. *In:* **Turner N. C. and Kramer, P. J**. (Eds.) "Adaptation of Plants to Water and High Temperature Stress." John Wiley & Sons Inc., New York.

Parker, J. (1968). Drought-resistance Mechanisms. *In:* **T. T. Kozlowski (**ed.). *Water Deficits and Plant Growth.* Vol. 1. Academic Press, New York.

Peck, A. J. and **Rabbidge, R. M.** (1966). *Australia, CSIRO, Conf. Instrumentation Plant Environment Measyrements.* Aspendale. 1966, p. 20. Society of Instrument Technology, Melbourne.

Penny, M.G. and Bowling, D.J.F. (1974). A study of potassium gradients in the epidermis of intact leaves of *Commelina communis* L. in relation to stomatal opening. Planta, 119: 17-25.

Philip, J. R. (1957). "Evaporation and Moisture and Heat Fields in the Soil". *J. Meteorol.* 14:354-366.

Preston, R. D. and Wardrop, A. B. (1949). "The Sub-microscopic Organization of the Walls of Conifer Cambium". *Biochem. Biophys. Acta* 3:549-559.

Price, C. A. (1970). *Molecular Approach to Plant Physiology*. McGraw-Hill Book Co., New York.

Raschke, K. (1975). "Stomatal Action". *Ann. Rev. Plant Physiol***.** 26:309-340.

Raven, P. H., Evert, R. F. and **Eichhorn, S. E**. (1999). *Biology of Plants*. 6th ed. W.H. Freeman and Company/Worth Publishers. New York.

Rawson, H. M., Turner, N. C. and Begg, J. E. (1978). "Agronomic and Physiological Responses of Soybean and Sorghum Crops to Water Deficits. IV. Photosynthesis, Transpiration and Water Use Efficiency of Leaves". *Aust. J. Plant Physiol.* 5:195-210.

Richards, B. G. (1965). *In: Moisture Equilibria and Moisture Changes in Soils Beneath Covered Areas: a Symposium in Print.* P.47 Butterwoth, Sydney.

Richards, B. G. (1965b). "Thermistor Hygrometer for Determining the Free Energy of Moisture in Unsaturated Soil". *Nature* 208:608-609.

Richards, L. A, and **Ogata, G.** (1958). "Thermocouple for Vapour Pressure Measurements in Biological and Soil Systems at High Humidity". *Science* 128:1089.

Richards, L. A. (1949). "Methods of Measuring Soil Moisture Tension". *Soil Sci.* 68:112.

Richards, L. A. (1965). **"**Physical Condition of Water in Soils". *Agronomy Monographs.* 9 Part 1, 128.

Richter, H. (1976). The Water Status in the Plant, Experimental Evidence. *In:* **Lang *et. al.*** (eds.). *Water and Plant Life: Problems and Modern Approaches.* Springer-Verlag, Berlin.

Rijtema, P. E. (1965). "Analysis of Actual Evapotranspiration".*Wageningen*. *Agri. Res. Rep.* 659.

Robenson,R.A. and Stocks, R.H. (1959). Electrolyte solutions: the measurment and interpretation of conductance, chemical potential, and diffusion in solutions of simple electrolytes. 2nd ed (revised).; Buttersworths Scientic Publications: London.

Salisbury, F. B. and **Ross, C. W.** (1969). *Plant Physiology*. Wadsworth Publishing Co. Belmont, Calif.

Salisbury, F. B. and **Ross, C. W.** (1978). *Plant Physiology* 2nd. Ed. Wadsworth Publishing Co. Belmont, Calif.

Salisbury, F.B. and Ross, C.W. (1992). *Plant Physiology.* 4th ed. Wadsworth Publishing Co.Belmont, Calif. U.S.A.

Scholander, P. F. (1968). "How Mangroves Desalinate Sea Water".*Physiol. Plantarum*. 21:251-261.

Scholander, P. F., Hammel, H. T., Bradstreet, E. D. and **Hemmingsen, E. A.** (1965). "Sap Pressure in Vascular Plants". Science 148:339-346.

Sheriff, D. W. (1974). "Magnetohydrodynamic Sap Flux Meters: An Instrument for Laboratory Use and the Theory of Calibration". *J. Expt. Bot.* 25(87):675-683.

Shimshi, D. (1963). "Effect of Soil Moisture and Phenylmercuric Acetate upon Stomatal Aperture, Transpiration and Photosynthesis". *Plant Physiol*. 38:713-721.

Shirk, H. G. (1942). "Freezable Water Content and the Oxygen Respiration in Wheat and Rye Grain at Different Stages of Ripening. *Amer. J. Bot.* 29:105-109.

Shull, C. A. (1916). "Measurement of the Surface Forces in Soils. *Bot. Gaz.* 62:1-31.

Slatyer, R. O. (1962). "Methodology of a Water Balance Study Conducted on a Desert Woodland (*Acacia aneura.*F. Muell) Community in Central Australia". *Arid Zone Res.* 16:15-26. UNESCO, Paris.

Slatyer, R. O. (1967). *Plant-Water Relationships.* Academic Press. London.

Slavik, B. (1963). "Relationship between the Osmotic Potential of Cell Sap and the Water Saturation Deficit during the Wilting of Leaf Tissues". *Biol. Plantarum* 5:258.

Squire, G. R. and **Mansfield, T. A.** (1974). "The Action of Fusicoccin on Stomatal Guard Cells and Subsidiary Cells". *New Phytol.,* 73:433-440.

Steudle, E. and **Zimmermann, U.** (1974). "Determination of the Hydraulic Conductivity and Reflection Coefficients in *Nitella flexilis* by Means of Direct Cell-turgor Pressure Measurement".*Biochem. Biophys. Acta,* 332:399-412.

Stocker, O. (1974). "Water-and Photosynthesis-Relations of Desert Plants in the South Algerian Sahara.:III. Annual Course and Constitutional Types". *Flora (Jena),* 163(6): 480-529.

Sutcliffe, J. (1968). *Plant and Water, Studies in Biology no.* 14 Edward Arnold (Publishers) Ltd. London.

Sveshnikova, M. V. and **Zalensky, O. V.** (1956). Water Regime of Plants of Arid Territories in Central Asia and Kazakstan. *18th. Inter. Geogr. Congr. Moscow.* 1956, p. 227. USSR Academy of Science, Leningrad.

Taiz L., and Zeiger E. (2006). A Companion to Plant Physiology, Fourth Edition online, CHAPTER 3, Topic 3.6. retrieved at:http://4e.plantphys.net/index.php on August, 12, 2010.

Tal, M., Imber, D. and **Gardi, I**. (1974). "Abnormal Stomatal Behavior and Hormonal Imbalance in Flacca, a Wilty Mutant of Tomato. Effect of Abscisic Acid and Auxin on Stomatal Behavior and Peroxidase Activity". *J. Expt. Bot.* 25:51-60.

Tanford, C. (1963). "The Structure of Water and of Aqueous solutions". *In: Temperature- its Measurement and Control in Science and Industry.* Vol. 3:123-129. Reinhold Publishing Corporation, New York.

Taylor, S. A., Evans, D. D. and **Kemper, W. D.** (1961). "Evaluating Soil Water". *Utah Agric. Expt. Sta. Bull.* 426.

Tazawa, M. (1957). "A New Method of Measuring the Osmotic Value of a Cell". *Protoplasma,* 48:342.

Tomos, A. D., Steudle, E. Zimmermann, U. and **Schulze, E.** (1981). "Water Relations of Leaf Epidermal Cells of *Tradescantia virginiana*". *Plant Physiol.* 68:1135-1143.

Troughton, J. **and Donaldson, L. A.** (1972). *Probing Plant Structure*. A. H. and A. W. Reed Sydney.

Tyree, M. T. (1976). "Negative Turgor Pressure in Plant Cells: Fact or Fallacy. *Can. J. Bot.* 54:2738-2746.

Tyree, M. T. and **Hammel, H. T.**(1972). "The Measurement of the Turgor Pressure and the Water Relations of Plants by the Pressure-bomb Technique". *J. Expt. Bot.* 23:267-282.

Tyree, M. T. and **Zimmermann, M. H.** (1971). "The Theory and Practice of Measuring Transport Coefficients and Sap Flow in the Xylem of Red maple Stem *Acer rubrum". J. Expt. Bot.* 22:1-18.

Tyurine, M. M. (1957). "The Effect of Negative Turgor Pressure on the Moisture Retaining Capacity of Leaves". *Botan. Zh.* 42:1035.

Vaadia, Y., Raney, F. C. and Hagan, R. M. (1961). "Plant Water Deficits and Physiological Processes". *Ann. Rev. Plant Physiol.* 12:265.

Van Andel, O. M. (1952). "Determination of the Osmotic Value of Exudation Sap by Means of the Thermoelctric Method of Baldes and Johnson". *Koninkl Ned Akad. Wetenschop. Proc. Ser. C* 55, 40.

openmedicine

Van Bavel, C. H. M., Nakayama, F. S. and **Ehler, W. L.** (1965). "Measuring Transpiration Resistance of Leaves". *Plant Physiol. Lancaster.* 40:535-540.

Van den Honert, T. H. (1948). **"**Water Transport as a catenary Process". *Faraday Soc. Discuss. No.* 3:146-153.

Virgin, H. I. (1955). "A New Method for the Determination of the Turgor of Plant Tissues". *Physiol. Plantarum,* 8:954.

Virgin, H. I. (1956). "Light Induced Stomatal Movements in Wheat Leaves Recorded as Transpiration. Experiments with the Corona Hygrometer". *Physiol. Plantarum*. 9:280-303.

Wainwright, C. M. (1977). "Sun-tracking and Related Leaf Movements in a Desert Lupine (*Lupinus arizonicus*)". *Amer. J. Bot.* 64:1032-1040.

Walter, H. (1949). "Einfûhrung in Die Phytologie", Band 111: Grundlagen Der Pflanzen-verbreitung, Teil 1: Standortslehre. Ulmer, Stuttgart.

Walter, H. (1960). *Einfûhrung in Die Phytologie*. Vol. 3 Pt. 1. Ulmer, Stuttgart.

Waring, R. H. and **Clearly, B. D. (1967). "**Plant Moisture Stress: Evaluation by Pressure Bomb". *Science*, 155:1248-1254.

Weatherley, P. E. (1960). "A New Micro-osmometer". *J. Expt. Bot.* 11:258.

Went, F. W. (1949). **"**Ecology of Desert Plants. 11. The Effect of Rain and Temperature on Germination and Growth". *Ecology*, 30:1.

Whiteman, P. C. and **Koller, D. (1964). "**Saturation Deficit of the Mesophyll Evaporating Surfaces in a Desert Halophyte". *Science*, 146:1320-1321.

Wiebe, H. H. (1981). **"**Measuring Water Potential (Activity) from Free Water to Oven Dryness". *Plant Physiol.* 68:1218-1221.

Wiebe, H.H. and **Kramer, P. J.** (1954). "Translocation of Radio-active Isotopes from Various Regions of Roots of Barley Seedlings". *Plant Physiol ,* 29:342-348.

Wiebe, H. H., Cambpell, G. S., Gardner, W. H., Rawlins, S. L., Cary, J. W. and **Brown, R. W.** (1971). "Measurement of Plant and Soil Water Status". *Utah Agricultural Experimental Station Bulletin,* 484.

Wilson, C. C. (1948). "The Effect of some Environmental Factors on the Movements of Guard Cells". *Plant Physiol. Lancaster*, 23:5-37.

Woolley, J. T. (1965). "Radial Exchange of Labeled Water in Intact Maize Roots". *Plant Physiol.* 40:711-717.

Zimmermann, U. and **Steudle, E.** (1974). "The Pressure-dependence of the Hydraulic Conductivity, the Membrane Resistance and Membrane Potential during Turgor Pressure Regulation in *Valonia urticularis.*". *J. Membrane Biol.* 16:331-352.

Zimmermann, U. and **Steudle, E.** (1978). "Physical Aspects of Water Relations of Plant Cells". *Adv. Bot. Res.* 6:45-117.

Zimmermann, U. and **Steudle, E.** (1980**).** Functional Water Relations Parameters. *In:* **R. M. Spanswick, W. J. Lucas,** and **J. Dainty.** (eds.). *Plant Membrane Transport: Current Conceptual Issues*, pp. 113-130. Elsevier/North-Holland Biomedical Press, Amsterdam, New York, Oxford.

Zimmermann, U., Rade, H. and **Steudle, E.** (1969). "Kontinuierliche Druckmessung in Pflanzenzellen". *Naturwissenschaften.*56:634.

obeikandl.com

الملاحـــــــق

ملحق رقم (١)

الجدول رقم (١). بعض خواص الماء.

الكثافة (حم سم$^{-3}$)	٠,٩٩٩٨٧	عند درجة صفر مئوي
الكثافة (حم سم$^{-3}$)	١,٠	عند درجة ٤°م
الكثافة (حم سم$^{-3}$)	٠,٩٩٩١٠	عند درجة ١٥°م
اللزوجة (حم سم$^{-1}$ ثانية$^{-1}$)	١,١٤٠٤×١٠$^{-3}$	عند درجة ١٥°م
قوة الشد (مم زئبق سم$^{-2}$)	١٠,٦٤×١٠$^{-3}$	
السعة الحرارية (سعر جم$^{-1}$)	١,٠	
حرارة التبخير (سعر جم$^{-1}$)	٥٩٦	عند درجة الصفر المئوي
حرارة الانصهار (سعر جم$^{-1}$)	٧٩,٧	عند درجة الصفر المئوي
التوتر السطحي (إرج سم$^{-2}$)	٧٦	بين السائل والهواء
ثابت التعادل الكهربائي	٦٩	

الجدول رقم (٢). بعض الخواص الفيزيائية للماء مقارنة ببعض السوائل.

الخاصية	الماء	إيثانول	هكسان	كلوروفورم
السعة الحرارية (سعر جم$^{-1}$)	١,٠	٠,٦	٠,٥	٠,٢٤
حرارة التبخير (سعر جم$^{-1}$)	٥٩٦	٢٦٢	٧٩	٥٩
عند درجة حرارة °م	(٠)	(٦٤)	(٦٨)	(٦١)
حرارة الانصهار (سعر جم$^{-1}$)	٧٩,٧	٢٤,٩	-	-
عند درجة حرارة °م	(٠)	(-١١٤,٤)	-	-
التوتر السطحي (إرج سم$^{-2}$)	٧٦	٢٢	١٨	١١
ثابت التعادل الكهربائي	٦٩	٢٤	١,٩	٥

obeikandl.com

الجدول رقم (٣). خواص الماء الفيزيائية عند درجات حرارة مختلفة (Milburn, 1979).

درجة الحرارة مئوية (^{o}م)	الكثافة ×١٠^{٢}كجم/م^{٣}	الحرارة النوعية ×١٠^{٣}جول/كجم/درجة حرارة	اللزوجة الديناميكية ×١٠$^{-٤}$كجم/م/ثانية (باسكال.ثانية)	الحجم الجزيئي ×١٠$^{-٦}$م^{٣}/جزيئي	التوتر السطحي ×١٠$^{-٣}$نيوتن/م (جول/م٢)	التوصيلية الحرارية وات/م/درجة حرارة
٠	٩,٩٩٨٧	٤,٢٢	١٧,٩	١٨,٠١٨	٧٥,٦	٠,٥٥
١٠	٩,٩٩٧٣	٤,١٩	١٣,١	١٨,٠٢١	٧٤,٢	٠,٥٨
١٥	-	-	-	١٨,٠٣٢	-	-
٢٠	٩,٩٨٢٣	٤,١٨	١٠,١	١٨,٠٤٨	٧٢,٨	٠,٦٠
٢٥	٩,٩٧	-	٨,٠	١٨,٠٥٦	-	-
٣٠	٩,٩٥٦٨	٤,١٨	٦,٥	١٨,٠٩٤	٧١,٢	٠,٦٢
٤٠	٩,٩٢٢٥	٤,١٨		١٨,١٥٧	٦٩,٦	٠,٦٣
وعند ٣,٩٨	١٠					

obeikandl.com

الجدول رقم (٤). خواص بخار الماء الفيزيائية عند درجات حرارة مختلفة. (Milburn, 1979).

درجة الحرارة مئوية (°م)	الكثافة عند التشبع ×١٠^٣ كجم/م^٣	ضغط بخار الماء المشبع ×١٠^-٨ نيوتن/م^٢ (١٠^-٤ ميجاباسكال)	ضغط بخار الماء (مم زئبق)	تركيز بخار الماء ×١٠^٣ كجم/م^٣	حرارة التبخر ×١٠^٤ جول/جزيء	معامل الانتشار لبخار الماء ×١٠^٦ م^٢/ثانية
صفر	٤,٤٥	٦,١	٤,٦	٤,٨٥	٤,٤٩	٢٢,٦
٥	٦,٨٠	-	٦,٥٢	٧,٨	-	٢٣,٣
١٠	٩,٤٠١	١٢,٣	٩,٢	٩,٤١	٤,٤٥	٢٤,١
١٥	١٢,٨٣	-	١٢,٨	١٢,٨	-	٢٤,٩
٢٠	١٧,٣٠	٢٣,٣	١٧,٥	١٧,٣	٤,٤١	٢٥,٧
٢٥	٢٣,٠٥	٣١,٧	٢٣,٨	٢٣,١	٤,٣٩	٢٦,٥
٣٠	٣٠,٣٨	٤٢,٤	٣١,٨	٣٠,٤	٤,٣٣	٢٧,٣
٤٠	-	٧٣,٧	٥٥,٣	٥١,١	٤,٣١	-

obeikandi.com

الملحق رقم (٢)

الجدول رقم (١). وحدات التحويل عند التعبير عن جهد ماء التربة (Slatyer, 1967) مضافا الوحدة الدولية.

ميجاباسكال	بار	إرج.جم$^{-١}$	جول.كجم$^{-١}$	ضغط جوي	سم ماء
٠,١	١,٠	$١٠\times١,٠^{٦}$	$١٠\times١,٠^{٢}$	٠,٩٨٧	$١٠\times١,٠٧^{٣}$
$١٠\times١,٠^{-٧}$	$١٠\times١,٠^{-٦}$	١,٠	$١٠\times١,٠^{-٤}$	$١٠\times٠,٠٩٨٧^{-٦}$	$١٠\times١,٠١٧^{-٣}$
$١٠\times١,٠^{-٣}$	$١٠\times١,٠^{-٢}$	$١٠\times١,٠^{٤}$	١,٠	$١٠\times٠,٠٩٨٧^{-٢}$	١٠,١٧
٠,١٠١٣	١,٠١٣	$١٠\times١,٠١٣^{٦}$	$١٠\times١,٠١٣^{٢}$	١,٠	$١٠\times١,٠٣^{٣}$
$١٠\times٩,٨٣٣^{-٥}$	$١٠\times٩,٨٣٣^{-٤}$	$١٠\times٩,٨٣٣^{-٢}$	$١٠\times٩,٨٣٣^{-٢}$	$١٠\times٩,٧٠٣^{-٤}$	١,٠

الجدول رقم (٢). معاملات التحويل من وحدة نتح لأخرى.

وحدة النتح	ميكروجزيئي سم$^{-٢}$ ثانية$^{-١}$	ميكروجرام سم$^{-٢}$ ثانية$^{-١}$
ميكروجزيئي ماء سم$^{-٢}$ ثانية$^{-١}$	-	١٨,٠٢
ميكروجرام ماء سم$^{-٢}$ ثانية$^{-١}$	٠,٠٥٥٥	-
ميكروجرام ماء سم$^{-٢}$ دقيقة$^{-١}$	$١٠\times٩,٢٥^{-٤}$	٠,١٦٦٧
ميكروجرام ماء ديسم$^{-٢}$ دقيقة$^{-١}$	$١٠\times٩,٢٥^{-٣}$	٠,١٦٦٧
جرام ماء ديسم$^{-٢}$ ساعة$^{-١}$	٠,١٥٤٢	٢,٧٨

obeikandl.com

ملحق رقم (٣)

الجدول رقم (١). جهد الماء الكلي لمحلول كلوريد الصوديوم (جول/كجم) عن لانج ١٩٦٧م (Lang, 1967).

التركيز	درجة الحرارة (مئوية)								
جزيئي وزني	٠	٥	١٠	١٥	٢٠	٢٥	٣٠	٣٥	٤٠
٠,٠٥	-٢١٤,٤	-٢١٨,٤	-٢٢٢,٣	-٢٦٢,٢	-٢٣٠,١	-٢٣٣,٩	-٢٣٧,٧	-٢٤١,٦	-٢٤٥,٤
٠,١	-٤٢٣	-٤٣١	-٤٣٩	-٤٤٧	-٤٥٤	-٤٦٢	-٤٧٠	-٤٧٧	-٤٨٥
٠,٢	-٨٣٦	-٨٥٢	-٨٦٨	-٨٨٤	-٩٠٠	-٩١٥	-٩٣٠	-٩٤٦	-٩٦١
٠,٣	-١٢٤٧	-١٢٧٢	-١٢٩٧	-١٣٢١	-١٣٤٤	-١٣٦٨	-١٣٩١	-١٤١٥	-١٤٣٧
٠,٤	-١٦٥٨	-١٦٩٣	-١٧٢٧	-١٧٥٩	-١٧٩١	-١٨٢٣	-١٨٥٥	-١٨٨٦	-١٩١٧
٠,٥	-٢٠٧٠	-٢١١٥	-٢١٥٨	-٢٢٠٠	-٢٢٤١	-٢٢٨١	-٢٣٢٢	-٣٤٦٢	-٢٤٠٢
٠,٦	-٢٤٨٤	-٢٥٣٩	-٢٥٩٣	-٢٦٤٤	-٢٦٩٤	-٢٧٤٤	-٢٧٩٤	-٢٨٤٣	-٢٨٩١
٠,٧	-٢٩٠١	-٢٩٦٧	-٣٠٣٠	-٣٠٩١	-٣١٥١	-٣٢١٠	-٣٢٧٠	-٣٣٢٨	-٣٣٨٥
٠,٨	-٣٣٢٠	-٣٣٩٨	-٣٤٧٢	-٣٥٤٣	-٣٦١٢	-٣٦٨٢	-٣٧٥١	-٣٨١٨	-٣٨٨٥
٠,٩	-٣٧٤٣	-٣٨٣٢	-٣٩١٧	-٣٩٩٨	-٤٠٧٩	-٤١٥٨	-٤٢٣٧	-٣٤١٤	-٤٣٩٠
١,٠	-٤١٦٩	-٤٢٧٠	-٤٣٦٦	-٤٤٥٩	-٤٥٥٠	-٤٦٤٠	-٤٧٢٩	-٤٨١٥	-٤٩٠١
١,١	-٤٥٩٩	-٤٧١٣	-٤٨٢٠	-٤٩٢٤	-٥٠٢٦	-٥١٢٧	-٥٢٢٦	-٥٣٢٢	-٥٤١٨
١,٢	-٥٠٣٢	-٥١٦٠	-٥٢٧٨	-٥٣٩٤	-٥٥٠٧	-٥٦٢٠	-٥٧٣٠	-٥٨٣٥	-٥٩٤١
١,٣	-٥٤٧٠	-٥٦١١	-٥٧٤٢	-٥٨٦٩	-٥٩٩٤	-٦١١٩	-٦٢٣٩	-٦٣٥٤	-٦٤٧١
١,٤	-٥٩١٢	-٦٠٦٨	-٦٢١٠	-٦٣٥٠	-٦٤٨٧	-٦٦٢٣	-٦٧٥٤	-٦٨٨٠	-٧٠٠٦
١,٥	-٦٣٥٩	-٦٥٢٩	-٦٦٨٤	-٦٨٣٧	-٦٩٨٦	-٧١٣٤	-٧٢٧٦	-٧٤١١	-٧٥٤٨
١,٦	-٦٨١١	-٦٩٩٦	-٧١٦٣	-٧٣٣٠	-٧٤٩١	-٧٦٥٢	-٧٨٠٥	-٧٩٥٠	-٨٠٩٧
١,٧	-٧٢٦٠	-٧٤٦٠	-٧٦٤٠	-٧٨٢٠	-٨٠٠٠	-٨١٧٠	-٨٣٣٠	-٨٤٩٠	-٨٦٥٠
١,٨	-٧٧٣٠	-٧٩٤٠	-٨١٣٠	-٨٣٣٠	-٨٥٢٠	-٨٧٠٠	-٨٨٨٠	-٩٠٤٠	-٩٢١٠
١,٩	-٨١٩٠	-٨٤٣٠	-٨٦٣٠	-٨٨٤٠	-٩٠٤٠	-٩٢٤٠	-٩٤٣٠	-٩٦٠٠	-٩٧٨٠
٢,٠	-٨٦٧٠	-٨٩٢٠	-٩١٣٠	-٩٣٦٠	-٩٥٧٠	-٩٧٨٠	-٩٩٨٠	-١٠١٦٠	-١٠٣٥٠

obeikandl.com

الجدول رقم (٢). الجهد الأسموزي (–ميجاباسكال) لمحلول السكروز (بالوزنية الجزيئية) عند درجة حرارة ٢٠°م.

الجزيئية الوزنية	الجهد الأسموزي	الجزيئية الوزنية	الجهد الأسموزي	الجزيئية الوزنية	الجهد الأسموزي	الجزيئية الوزنية	الجهد الأسموزي	الجزيئية الوزنية	الجهد الأسموزي
٠,٠١	٠,٠٣	٠,٣٣	٠,٩١	٠,٦٥	١,٩٩	٠,٩٧	٣,٣٥	١,٢٩	٥,١٦
٠,٠٢	٠,٠٥	٠,٣٤	٠,٩٤	٠,٦٦	٢,٠٣	٠,٩٨	٣,٤٠	١,٣٠	٥,٢٣
٠,٠٣	٠,٠٨	٠,٣٥	٠,٩٧	٠,٦٧	٢,٠٧	٠,٩٩	٣,٤٥	١,٣١	٥,٢٩
٠,٠٤	٠,١١	٠,٣٦	١,٠٠	٠,٦٨	٢,١٠	١,٠٠	٣,٥٠	١,٣٢	٥,٣٦
٠,٠٥	٠,١٣	٠,٣٧	١,٠٣	٠,٦٩	٢,١٤	١,٠١	٣,٥٥	١,٣٣	٥,٤٣
٠,٠٦	٠,١٦	٠,٣٨	١,٠٦	٠,٧٠	٢,١٨	١,٠٢	٣,٦٢	١,٣٤	٥,٥٠
٠,٠٧	٠,١٩	٠,٣٩	١,٠٩	٠,٧١	٢,٢٢	١,٠٣	٣,٦٧	١,٣٥	٥,٥٦
٠,٠٨	٠,٢١	٠,٤٠	١,١٢	٠,٧٢	٢,٢٥	١,٠٤	٣,٧٢	١,٣٦	٥,٦٣
٠,٠٩	٠,٢٤	٠,٤١	١,١٥	٠,٧٣	٢,٣٠	١,٠٥	٣,٧٧	١,٣٧	٥,٧٠
٠,١٠	٠,٢٦	٠,٤٢	١,١٩	٠,٧٤	٢,٣٤	١,٠٦	٣,٨٢	١,٣٨	٥,٧٧
٠,١١	٠,٢٩	٠,٤٣	١,٢٣	٠,٧٥	٢,٣٧	١,٠٧	٣,٨٧	١,٣٩	٥,٨٤
٠,١٢	٠,٣٢	٠,٤٤	١,٢٦	٠,٧٦	٢,٤١	١,٠٨	٣,٩٣	١,٤٠	٥,٩٢
٠,١٣	٠,٣٤	٠,٤٥	١,٢٩	٠,٧٧	٢,٤٦	١,٠٩	٣,٩٨	١,٤١	٥,٩٩
٠,١٤	٠,٣٧	٠,٤٦	١,٣٢	٠,٧٨	٢,٥٠	١,١٠	٤,٠٤	١,٤٢	٦,٠٧
٠,١٥	٠,٤١	٠,٤٧	١,٣٥	٠,٧٩	٢,٥٤	١,١١	٤,٠٩	١,٤٣	٦,١٤
٠,١٦	٠,٤٣	٠,٤٨	١,٣٩	٠,٨٠	٢,٥٨	١,١٢	٤,١٤	١,٤٤	٦,٢١
٠,١٧	٠,٤٦	٠,٤٩	١,٤٢	٠,٨١	٢,٦٣	١,١٣	٤,٢٠	١,٤٥	٦,٢٩
٠,١٨	٠,٤٨	٠,٥٠	١,٤٥	٠,٨٢	٢,٦٧	١,١٤	٤,٢٥	١,٤٦	٦,٣٦
٠,١٩	٠,٥١	٠,٥١	١,٤٨	٠,٨٣	٢,٧١	١,١٥	٤,٣١	١,٤٧	٦,٤٤
٠,٢٠	٠,٥٤	٠,٥٢	١,٥٢	٠,٨٤	٢,٧٥	١,١٦	٤,٣٧	١,٤٨	٦,٥٢
٠,٢١	٠,٥٧	٠,٥٣	١,٥٥	٠,٨٥	٢,٧٩	١,١٧	٤,٤٣	١,٤٩	٦,٥٩
٠,٢٢	٠,٦٠	٠,٥٤	١,٥٨	٠,٨٦	٢,٨٣	١,١٨	٤,٤٨	١,٥٠	٦,٦٦
٠,٢٣	٠,٦٢	٠,٥٥	١,٦٢	٠,٨٧	٢,٨٨	١,١٩	٤,٥٤	١,٥١	٦,٧٤
٠,٢٤	٠,٦٥	٠,٥٦	١,٦٥	٠,٨٨	٢,٩٢	١,٢٠	٤,٦٠	١,٥٢	٦,٨٢
٠,٢٥	٠,٢٨	٠,٥٧	١,٦٩	٠,٨٩	٢,٩٧	١,٢١	٤,٦٦	١,٥٣	٦,٩٠
٠,٢٦	٠,٧١	٠,٥٨	١,٧٣	٠,٩٠	٣,٠١	١,٢٢	٤,٧٢	١,٥٤	٦,٩٨
٠,٢٧	٠,٧٤	٠,٥٩	١,٧٦	٠,٩١	٣,٠٦	١,٢٣	٤,٧٨	١,٥٥	٧,٠٦
٠,٢٨	٠,٧٦	٠,٦٠	١,٨٠	٠,٩٢	٣,١١	١,٢٤	٤,٨٤	١,٥٦	٧,١٥
٠,٢٩	٠,٧٩	٠,٦١	١,٨٣	٠,٩٣	٣,١٥	١,٢٥	٤,٩٠	١,٥٧	٧,٢٤
٠,٣٠	٠,٨٢	٠,٦٢	١,٨٧	٠,٩٤	٣,٢٠	١,٢٦	٤,٩٦	١,٥٨	٧,٣٤
٠,٣١	٠,٨٥	٠,٦٣	١,٩١	٠,٩٥	٣,٢٥	١,٢٧	٥,٠٢	١,٥٩	٧,٤٢
٠,٣٢	٠,٨٨	٠,٦٤	١,٩٥	٠,٩٦	٣,٣٠	١,٢٨	٥,٠٩	١,٦٠	٧,٤٩

Open Education .com

الملحق رقم (٤)

الجدول رقم (١). بعض المعاملات الأسموزية والضغط الأسموزي* (يساوي جهد الضغط الذي يحدثه محلول عند وضعه في أسموميتر لكي يعادل الجهد الأسموزي لذلك المحلول) لبعض المحاليل الجزيئية الوزنية عند درجة ٢٥°م.

الجزيئية الوزنية (وزن جزيئي لتر$^{-1}$)	السكروز		كلوريد الصوديوم		كلوريد البوتاسيوم		كلوريد الكالسيوم	
	المعامل الأسموزي	الضغط الأسموزي	المعامل الأسموزي	الضغط الأسموزي	المعامل الأسموزي	الضغط الأسموزي	المعامل الأسموزي	الضغط الأسموزي
٠,١	١,٠٠٨	٢,٤٩	٠,٩٣٢٤	٤,٦٢	٠,٩٢٢٦	٤,٥٨	٠,٨٥٤٠	٦,٣٣
٠,٢	١,٠١٧	٥,٠٣	٠,٩٢٤٥	٩,١٤	٠,٩١٣٠	٩,٠٣	٠,٨٦٢	١٢,٧٩
٠,٣	١,٠٢٤	٩,٢٠	٠,٩٢١٥	١٣,٦٦	٠,٩٠٦٣	١٣,٤٤	٠,٨٧٦	١٩,٥٠
٠,٤	١,٠٣٣	١٠,٢١	٠,٩٢٠٣	١٨,٢٠	٠,٩٠١٧	١٧,٨٣	٠,٨٩٤	٢٦,٥٢
٠,٥	١,٠٤١	١٢,٨٧	٠,٩٢٠٩	٢٢,٧٦	٠,٨٩٨٩	٢٢,٢٢	٠,٩١٧	٣٤,٠٠
٠,٦	١,٠٥١	١٥,٥٧	٠,٩٢٣٠	٢٧,٣٨	٠,٨٩٧٦	٢٦,٦٣	٠,٩٤٠	٤١,٨٣
٠,٧	١,٠٦٠	١٨,٣٤	٠,٩٢٥٧	٢٩,٦٧	٠,٨٩٧٠	٣١,٠٤	٠,٩٦٣	٤٩,٩٩
٠,٨	١,٠٦٨	٢١,١٢	٠,٩٢٨٨	٣٦,٧٤	٠,٨٩٧٠	٣٥,٤٨	٠,٩٨٨	٥٨,٦٢
٠,٩	١,٠٧٩	٢٤,٠١	٠,٩٣٢٠	٤١,٤٧	٠,٨٩٧١	٣٩,٩٢	١,٠١٧	٦٧,٨٨
١,٠	١,٠٨٨	٢٦,٧٠	٠,٩٥٥	٤٦,٢٥	٠,٨٩٧٤	٤٤,٣٧	١,٠٤٦	٧٧,٥٧
١,٢	١,١٠٨	٣٢,٨٧	٠,٩٤٢٨	٥٥,٩٤	٠,٨٩٨٦	٥٣,٣١	١,١٠٧	٩٨,٥٢
١,٤	١,١٢٩	٣٩,٠٧	٠,٩٥١٣	٦٥,٨٥	٠,٩٠١٠	٦٢,٣٦	١,١٧١	١٢١,٥٨
١,٦	١,١٥	٤٥,٤٨	٠,٩٦١٦	٧٦,٠٧	٠,٩٠٤٢	٧١,٥٣	١,٢٣٧	١٤٦,٧٨
١,٨	١,١٦٩	٥٢,٠٢	٠,٩٧٢٣	٨٦,٥٣	٠,٩٠٨١	٨٠,٨١	١,٣٠٥	١٧٤,٢٠
٢,٠	١,١٨٩	٥٧,٧٩	٠,٩٨٣٣	٩٧,٢٣	٠,٩١٢٤	٩٠,٢٢	١,٣٧٦	٢٠٤,٠٩
٢,٥	١,٢٤٠	٧٦,٦٣	–		–	–	١,٥٦٨	٢٩٠,٧١
٣,٠	١,٢٨٨	٩٥,٥٢	١,٠٤٥٣	١٥٥,٠٤	٠,٩٣٦٧	١٣٨,٩٣	١,٧٧٩	٣٩٥,٨٠
٣,٥	١,٣٣٤	١١٥,٤٢	–		–	–	١,٩٨١	٥١٤,٢٠
٤,٠	١,٣٧٥	١٣٥,٩٦	١,١١٥٨	٢٢٠,٦٦	٠,٩٦٤٧	١٩٠,٧٨	٢,١٨٢	٦٤٧,٢٨
٤,٥	١,٤١٤	١٥٧,٢٩	–		–	–	٢,٣٨٣	٧٩٥,٢٧
٥,٠	١,٤٥٠	١٧٩,٢٢	١,١٩١٦	٢٩٤,٥٧	–	–	٢,٥٧٤	٩٥٤,٤٥
٥,٥	١,٤٨٢	٢٠١,٤٩	–		–	–	٢,٧٤٣	١١١٨,٨٣
٦,٠	١,٥١١	٢٢٤,١١	١,٢٧٠٦	٣٧٦,٩٢	–	–	٢,٨٩١	١٢٨٦,٤٠

***طريقة حساب الضغط الأسموزي لمحلول نقي** (Robenson & stocks 1959)

عند وضع محلول ذي جهد أسموزي (Ψs) في أسموميتر، فإنه عند الاتزان ينتج عنه ضغط يرفع الماء في الأسموميتر يعرف بجهد الضغط (Ψp) أو الضغط الأسموزي حسب المصطلحات الأولى وقيمته تعادل جهد المحلول الأسموزي، أي أن:

$$\Psi = 0 = (\Psi p) + (\Psi s)$$

وبذا فإن:

$$\Psi p = - \Psi s$$

و (Ψs) هي الضغط الأسموزي لذلك المحلول والتي يرمز لها، عادة، بالرمز (π)، وبافتراض أن المحلول مثال، فإنه طبقا لمعادلة فانت هوف المشتقة من قوانين الغازات فإن:

$$\Psi p = - \Psi s = \frac{RTMm}{\overline{V}1000}$$

وحيث أن كثيرا من المواد المتأينة ذات أسموزية تتحدد بعدد الأيونات، لذا لا بد من استخدام معامل الأسموزية (∅) والتكافؤ (Z) لتلك المادة في المعادلة السابقة ويكون ذلك كالتالي:

$$\Psi p = \frac{RTMmZ\varnothing}{V1000}$$

وكمثال لذلك فإن ٠,٦ جزيئي وزني من كلوريد الصوديوم عند درجة ٢٥°م يكون ضغطه الأسموزي بعد التعويض في المعادلة أعلاه كالتالي:

$$\text{الضغط الأسموزي} = \frac{٨,٣١٤٣ \times (٢٥+٢٧٣) \times ١٨,٠١٦ \times ١٠^{-٦} \times ٠,٦ \times ١٠^{-٥} \times ٠,٩٢٣٠ \times ٢ \times ١٠}{٠,١٨٠٥٦ \times ١٠^{-٦}}$$

= ٢٧,٣٦ بار

= ٢,٧٣٦ ميجاباسكال

الجدول رقم (٢). مقارنة الضغوط المختلفة لبعض النظم المألوفة في حياتنا اليومية لمقارنتها بالضغط في النبات (Milburn, 1979).

النظام	الوحدات المألوفة	بار	الوحدات الدولية باسكال (نيوتن . مم$^{-2}$)
ضغط دم الإنسان (انقباض القلب)	١١٠ مم زئبق	٠,١٥	$١٠\times١,٥^{٤}$
ضغط دم الإنسان (انبساط القلب)	٧٠ مم زئبق	٠,٠٩	١٠×٩^{٣}
ضغط دم الإنسان (وريد)	١٠ مم زئبق	٠,٠١	١٠×١^{٣}
ضغط الهواء في عجلة السيارة	٣٠ رطل/بوصة^{٢}	٢,٠	١٠×٢^{٥}
ضغط الهواء في عجلة دراجة السباق	١٢٠ رطل/بوصة^{٢}	٨,٠	١٠×٨^{٥}
ضغط مصدر الماء المنزلي	٩٩ رطل/بوصة^{٢}	٦,٠	١٠×٦^{٥}
ضغط الماء الحار لمنزل من طابقين	٣٠ رطل/بوصة^{٢}	٢,٠	١٠×٢^{٥}
ضغط الهواء في أسطوانة الغوص	١٥٠ ضغط جوي	١٥٢	$١٠\times١,٥٢^{٧}$
الضغط الجوي	واحد ضغط جوي	١,٠١٣	$١٠\times١,٠١٣^{٥}$

obeikandl.com

obeikandl.com

ثبت المصطلحات

عربي – آنجليزي

أ

الإجهاد	Stress
الإجهاد الكلي لماء التربة	Total soil-moisture stress
الإدماع	Guttation
الأسموزية الكهربائية	Electr-osmosis
الأسموزية عبر الخلية	Transcellular osmosis
الأسمول	Osmole
الأسموميتر	Osmometer
أسموميتر بارجر- هالكت	Barger-Halket osmometer
أسموميتر فان أندل	Van Andel osmometer
آلة لوسيدا	Camera Lucida
أيون الهيدروجين	Hydrogen ion

obeikandl.com

أيون الهيدروكسيل	Hydroxyl ion
أيون الهيدرونيوم	Hydronium ion
امتلاء	Turgid
الامتلاء الأمثل	Optimum turgidity

ب

البشرة	Epidermis
البشرة الخارجية	Exodermis
البشرة الداخلية	Endodermis
البلزمة الحدية	Limiting plasmolysis
البلزمة المؤقتة	Incipient plasmolysis
البلزمة المحدبة	Convex plasmolysis
بورومیتر الانتشار	Diffusion Porometer

ت

التجمعات المتقطعة	Flickering cluster
التحلل المائي	Hydrolysis
تدفق الكتلة	Mass flow
تذبذب الطنين	Resonance frequency
تقلص الخلية	Cytorrhysis
التوصيلية الهيدروليكية	Hydraulic conductivity

obeikandl.com

ث

الثرموستر	Thermoster
الثغر	Stoma
الثغور	Stomata

ج

الجفاف	Drought
جل	Gel
الجهد الأسموزي	Osmotic (solute) potential
جهد الجاذبية	Gravitational potential
جهد الضغط	Pressure Potential
جهد الماء	Water potential
جهد المادة	Matric potential

ح

حالة الماء في الخلية	Hydrature
حمض الأبسيسيك	ABA
حمض الأبسيسيك	Abscisic acid
حمض الخل الإندولي	IAA
حمض الخليك	Acetic acid
حمض الفورميك	Formic acid

obeikandl.com

خ

الخلايا الحركية	Bulliform cells

ر

الرقم الهيدروجيني	pH

س

السعة الحقلية	Field capacity

ش

شريط كاسبار	Casparian strip
الشيلم	Rye

ض

الضغط الأسموزي	Osmotic pressure
ضغط الامتلاء (الهيدروستاتيكي)	Turgor pressure

ط

الطاقة الحرة الكامنة	Specific free energy
طرقة الخلية	Cell method
الطرقة الكريوسكوبية (الاستصراد)	Cryoscopic method

obeikandl.com

طريقـــة التـــدفق الهيـــدروديناميكي المغناطيسي	Magneto hydrodynamic flow method
طريقة التدفق في الساق	Stem-flow method
طريقة وزن الأصيص	Potted plant method

ظ

ظاهرة بلتيه	Peltier effect
ظاهرة سيبيك	Seebeck effect

ع

عديد الإيثيلين	Polyethylene

غ

الغدد المائية	Hydathodes
غشاء شبه منفذ	Semi-permeable membrane

ف

فكرة النقل عبر المادة الحية والميتة	Apoplast-symplast concept
الفيوزيكوكين	Fusicoccin

ق

قاعدة تروتن	Trouton`s rule

obeikandl.com

قانون دارسي	Darcy`s law
قانون فيك	Fick`s law
القشرة	Cortex
قنطرة هويتستون	Wheatstone bridge
قوة المص	Suction force
قوة المص الكلية	Total suction
قوة امتصاص الماء	Water absorbing power

ك

كاربوواكس	Carbowax
الكحول الميثيلي	Methanol
كرومل- ب	Chromel-p
الكلوروفورم	Chloroform
كونستانتان	Constantan

ل

اللبلاب	Ivy
الليسيميتر	Lysimeter

م

ماء التبلور	Crystalline water
ماء الجاذبية الأرضية	Gravitational water

obeikandl.com

Capillary water	الماء الشعري
Hygroscopic water	الماء المقيّد
Symplast	المادة الحية (النقل في المادة الحية)
Osmoticum (= Osmolyte)	مادة مكونة للجهد الأسموزي
Mannitol	المانيتول
Plasmolysed	مبلزمة
Flaccid	مترهلة
Amino group	مجموعة أمينية
Carbonyl group	مجموعة كربونيلية
Hydroxyl group	مجموعة هيدروكسيلية
Halophiles	محبة للأملاح
Water content	المحتوى المائي
Hypertonic solution	محلول عالي الأسموزية
Isopiestic (Isobaric)solution	محلول متعادل
Isotonic solution	محلول متعادل الأسموزية
Hypotonic solution	محلول منخفض الأسموزية
Thermocouples	المزدوجات الحرارية
Apoplast	المسار الميت (النقل خارج الخلية)
Pressure probe	مسبر الضغط
Reflection coefficient	معامل الإرجاع (الانعكاس)
Selective coefficient	معامل الاختيارية
Rolling index	معامل الالتفاف
Refractive index	معامل الانكسار

obeikandl.com

مقاومات التغير الحراري	Thermo-variable resisters
مقياس الماء	Hydrometer
ممالات مستمرة	Persistent gradients
ممتلئة	Turgid

ن

ناقل الضغط	Pressure transducer
ناقل الضغط	Pressure transducer
النبات الحلوة (السكرية)	Glycophytes
النباتات الجفافية	Xerophytes
النباتات الرطوبية	Hygrophytes
النباتات العصيرية	Succulent plants
النباتات العصيرية (الكراشيولية)	CAM plants
النباتات المائية	Hydrophytes
النباتات المتوسطة	Mesophytes
النباتات الملحية	Halophytes
نباتات تتحاشى الجفاف	Avoid drought
نباتات تتحمل الجفاف	Endure drought
النباتات ثلاثية الكربون	C3 plants
النباتات رباعية الكربون	C4 plants
نباتات هاربة من الجفاف	Escape droughtt
النسبة المئوية للذبول الدائم	The permanent wilting percentage
نظرية التماسك	Cohesion theory

obeikandl.com

النفاذية الانتشارية	Diffusional permeability
نقص الضغط الانتشاري	Diffusion pressure deficit
نقص الماء	Water deficit

هـ

الهاهوبا (نبات البترول)	Jojoba

و

الوصلات البلازمية "البلازموديزماتا"	Plasmodesmata
وعاء الضغط	Pressure chamber (Bomb)

ي

اليوريا الميثيلية	Methylurea

obeikandl.com

إنجليزي– عربي

A

ABA	حمض الأبسيسيك
Abscisic acid	حمض الأبسيسيك
Acetic acid	حمض الخليك
Amino group	مجموعة أمينية
Apoplast	المسار الميت (النقل خارج الخلية)
Apoplast-symplast concept	فكرة النقل عبر المادة الحية والميتة
Avoid drought	نباتات تتحاشى الجفاف

B

Barger-Halket osmometer	أسموميتر بارجر- هالكت
Bulliform cells	الخلايا الحركية

C

C3 plants	النباتات ثلاثية الكربون
C4 plants	النباتات رباعية الكربون
CAM plants	النباتات العصيرية (الكراشيولية)
Camera Lucida	آلة لوسيدا
Capillary water	الماء الشعري
Carbonyl group	مجموعة كربونيلية
Carbowax	كاربوواكس

obeikandl.com

Casparian strip	شريط كاسبار
Cell method	طرقة الخلية
Chloroform	الكلوروفورم
Chromel-p	كرومل- ب
Cohesion theory	نظرية التماسك
Constantan	كونستانتان
Convex plasmolysis	البلزمة المحدبة
Cortex	القشرة
Cryoscopic method	الطرقة الكريوسكوبية (الاستصراد)
Crystalline water	ماء التبلور
Cytorrhysis	تقلص الخلية

D

Darcy`s law	قانون دارسي
Diffusion Porometer	بورومیتر الانتشار
Diffusion pressure deficit	نقص الضغط الانتشاري
Diffusional permeability	النفاذية الانتشارية
Drought	الجفاف

E

Electro-osmosis	الأسموزية الكهربائية
Endodermis	البشرة الداخلية
Endure drought	نباتات تتحمل الجفاف
Epidermis	البشرة
Escape droughtt	نباتات هاربة من الجفاف

obeikandl.com

Exodermis	البشرة الخارجية

F

Fick`s law	قانون فيك
Field capacity	السعة الحقلية
Flaccid	مترهلة
Flickering cluster	التجمعات المتقطعة
Formic acid	حمض الفورميك
Fusicoccin	الفيوزيكوكين

G

Gel	جل
Glycophytes	النبات الحلوة (السكرية)
Gravitational potential	جهد الجاذبية
Gravitational water	ماء الجاذبية الأرضية
Guttation	الإدماع

H

Halophiles	محبة للأملاح
Halophytes	النباتات الملحية
Hydathodes	الغدد المائية
Hydrature	حالة الماء في الخلية
Hydraulic conductivity	التوصيلية الهيدروليكية
Hydrogen ion	أيون الهيدروجين
Hydrolysis	التحلل المائي
Hydrometer	مقياس الماء

obeikandl.com

أيون الهيدرونيوم	Hydronium ion
النباتات المائية	Hydrophytes
مجموعة هيدروكسيلية	Hydroxyl group
أيون الهيدروكسيل	Hydroxyl ion
النباتات الرطوبية	Hygrophytes
الماء المقيّد	Hygroscopic water
محلول عالي الأسموزية	Hypertonic solution
محلول منخفض الأسموزية	Hypotonic solution

I

حمض الخل الإندولي	IAA
البلزمة المؤقتة	Incipient plasmolysis
محلول متعادل	Isopiestic (Isobaric)solution
محلول متعادل الأسموزية	Isotonic solution
اللبلاب	Ivy

J

الهاهوبا (نبات البترول)	Jojoba

L

البلزمة الحدية	Limiting plasmolysis
الليسيميتر	Lysimeter

M

طريقة التدفق الهيدروديناميكي المغناطيسي	Magneto hydrodynamic flow method
المانيتول	Mannitol

obeikandl.com

Mass flow	تدفق الكتلة
Matric potential	جهد المادة
Mesophytes	النباتات المتوسطة
Methanol	الكحول الميثيلي
Methylurea	اليوريا الميثيلية

O

Optimum turgidity	الامتلاء الأمثل
Osmole	الأسمول
Osmometer	الأسموميتر
Osmotic (solute) potential	الجهد الأسموزي
Osmotic pressure	الضغط الأسموزي
Osmoticum (= Osmolyte)	مادة مكونة للجهد الأسموزي

P

Peltier effect	ظاهرة بلتيه
Persistent gradients	ممالات مستمرة
pH	الرقم الهيدروجيني
Plasmodesmata	الوصلات البلازمية "البلازموديزماتا"
Plasmolysed	مبلزمة
Polyethylene	عديد الإيثيلين
Potted plant method	طريقة وزن الأصيص
Pressure chamber (Bomb)	وعاء الضغط
Pressure Potential	جهد الضغط
Pressure probe	مسبر الضغط

obeikandl.com

Pressure transducer	ناقل الضغط
Pressure transducer	ناقل الضغط

R

Reflection coefficient	معامل الإرجاع (الانعكاس)
Refractive index	معامل الانكسار
Resonance frequency	تذبذب الطنين
Rolling index	معامل الالتفاف
Rye	الشيلم

S

Seebeck effect	ظاهرة سيبيك
Selective coefficient	معامل الاختيارية
Semi-permeable membrane	غشاء شبه منفذ
Specific free energy	الطاقة الحرة الكامنة
Stem-flow method	طريقة التدفق في الساق
Stoma	الثغر
Stomata	الثغور
Stress	الإجهاد
Succulent plants	النباتات العصيرية
Suction force	قوة المص
Symplast	المادة الحية (النقل في المادة الحية)

T

The permanent wilting percentage	النسبة المئوية للذبول الدائم
Thermocouples	المزدوجات الحرارية

obeikandi.com

الثرموستر	Thermoster
مقاومات التغير الحراري	Thermo-variable resisters
الإجهاد الكلي لماء التربة	Total soil-moisture stress
قوة المص الكلية	Total suction
الأسموزية عبر الخلية	Transcellular osmosis
قاعدة تروتن	Trouton`s rule
امتلاء	Turgid
ممتلئة	Turgid
ضغط الامتلاء (الهيدروستاتيكي)	Turgor pressure

V

أسموميتر فان أندل	Van Andel osmometer

W

قوة امتصاص الماء	Water absorbing power
المحتوى المائي	Water content
نقص الماء	Water deficit
جهد الماء	Water potential
قنطرة هويتستون	Wheatstone bridge

X

النباتات الجفافية	Xerophytes

obeikandl.com

كشاف الموضوعات

أ

الآبار ٢٠٥

أبعاد فتحة الثغر ٢٣٤، ٢٣٥

الأبواغ ٨، ١١

الإتزان الأيوني والمائي ٢٦٣

أثر سمي ٢٩٥

آثار الجفاف ٢٠٥

الإجهاد الكلي لماء التربة ٤٤

الإجهاد المائي ٢٧٧- ٣٠٩

الاحتكاك ١٩٠

الأحماض الأمينية ٧٢، ٣٠٢، ٣٠٤

الأحماض العضوية ٧٢، ٢٨٠ ٣٠٤

الأحماض النووية ٨، ٢٦، ٣٠٤، ٣٠٧

الإدماع ١٢٤، ٢٠١، ٢٠٢

الأدمة ٢، ٢٢٩، ٢٣١، ٢٦٥، ٢٨٢، ٢٨٤

الأدينين ٣٠٨

الإذابة ٣٠

الأراضي ٣٩، ٤٨، ٥٣

الأراضي الطينية ٣٩، ٤٢

الأراضي القلوية ٤٢

الأراضي الملحية ٤٢

أرج ٤٤

الأرجنتين ٢٨٤

الأرصاد الجوية ٢٤٩

الأرض ١، ٦، ٢٠٤

أزرق المثيلين ١٣٠

الإزهار ٢٧٩

الأزيد ٢١١، ٢١٢

الأسباراجين ٣٠٤

obeikandl.com

أستأميد ٩٢
الاستجابات الفسيولوجية للإجهاد المائي ٢٩٠- ٣١٠
أستراليا ١٧٣، ١٧٥
استطالة الجذر ١٩٠
أسطح الجذور ٢٠٤، ٢٠٥
الأسموزية ١١٠، ١١٨
الأسموزية عبر الخلية ٩٨
الأسموزية الكهربائية ١١٧، ١١٨
الأسمول ١١٤
أسموميتر بسيط ١١١
أسموميتر الانخفاض في درجة التجمد ١٥١، ١٥٢
أسموميتر بارجر- هالكت ١٥٣
أسموميتر فان أندل ١٥٤
أسموميتر ويثرلي ١٥٦
أسموميترات الضغط البخاري التجارية ١٥٧
آسيا ٢٨٣
الأسيتيلين ٥٣
الإشعاع ٣١، ٢٨٣
الإشعاعات الحرارية ٣١
الأشعة الحمراء البعيدة ٣١
أشعة الخشب ٢١٣، ٢١٤
الأشعة الضوئية ٣١
الأشن ٣، ٨، ١٥
الأصقاع ٢٨
الأصناف ٢٦٨
أصناف برية ، ٣٠٠
أصناف زراعية ، ٣٠٠
أصماغ ٧٢
الإضاءة ١٣٥، ٢٤٣، ٢٥١، ٢٥٣، ٢٥٤، ٢٦٢، ٢٨٢
الأطعمة المجففة ٥٤
الأعشاب ١٧٥، ١٧٦
إفراز الماء ٢٠٠
الأفرع ٣٩، ٢٩٦
آفة ٢٧٩
الأكسجين ٢، ١، ١٧، ١٨، ٢٠، ٢٣، ٢٨ ٢٩٥، ٣٠٠
أكسيد السليكون ٣٦
إلكترودات ٥٤، ٥٩،

obeikandl.com

إلكترون (إلكترونات) ١٨ ،
ألمانيا ١٧٣
الألومنيوم ٣٦
الألياف ١٩٤ ، ١٩٦ ، ٢١٣
آلية الانتقال ١٠٥- ١١٨
آلية فتح الثغور
إمتزاز ٣٦
امتصاص الماء ٢٠٣
امتصاص الماء للضوء ٣١ ، ٣٢
الامتلاء الأمثل ٢٩٢
الامتلاء التام ٧٨ ، ٨٣
أمثلة لمدى جهد الماء في النبات
١٦٨- ١٨٦
الأمراض النباتية ٢٤٩
الأمشاج ١١
الأمطار ٧ ، ٤٨ ، ٢٧٩ ، ٢٨١
الأمونيا ١٧ ، ٢٤ ، ٢٥ ، ٢٩
الأميدات ٧٢
أنابيب اختبار ١٢٧
إنبات ٢٩٤
الأنبوبة الشعرية ٩٨ ، ١٠٠ ، ١٣٠ ،
١٣١ ، ١٣٣ ، ٢٢٠
الإنتاجية ٢٩١ ، ٣٠٩
الانتحاء الرطوبي ٢٠٤
الانتشار ٩٠ ، ١٠٦ ، ١١٠
انتقال الماء إلى النبات ١٨٧- ٢٢٤
الأنثوسيانين ٧٢
إنجلترا ١٧٥
الانخفاض في درجة حرارة
التجمد٥٨ ، ٥٩ ، ١٤٩-
١٥٢
أندول حمض الخل ٢١١
الإنزيمات ٧١ ، ١١٧ ، ٢٨١
أنسب نقطة نمو للنبات ٢٩٣
الأنسجة التوصيلية ١٩٦
أنسجة الجذر ١٨٩- ١٩٢
الأنسجة الفلينية ٢٨٧
أنسجة تخزينية ١٢٧
انطواء ٢٨٦
الأنظمة الأحيائية ٢٤
انغلاق الثغور ١١ ، ٢٥٢

obeikandl.com

انفتاح الثغور ١١، ٢٥٢
انقطاع عمود الماء ٢١٣، ٢١٩، ٢٢٠
الأنهار ٥، ٧، ٢٨
أنواع الأراضي ٣٤، ٣٥
أنواع البلزمة ٨٥
أهمية الماء للنبات ١، ٧- ١٢
أهمية النتح ٢٢٦- ٢٢٨
أوريجون ١٧٥
أوعية الخشب ٧٧، ١٩٦، ٢٩١
إيثانول ٨٧، ٩٢
الأيثر ٩٣
الإيثيلين ٣٠٧
إيثيلين جليكول ٩٢
أيزوبروبانول ٩٢
الأيض ١٠، ٢٩
أيون البوتاسيوم ٩٤
أيون الصوديوم ٩٤
أيون الكالسيوم ٩٤
أيون الهيدروجين ٢٩، ١١٧
أيون الهيدروكسيل ٢٩
أيون الهيدرونيوم ٢٩
الأيونات ٢٨، ٣٤، ٩٤
الأيونات الأحادية ٩٥

ب

البادرات ٢٨٩، ٢٩٦، ٢٩٩، ٣٠٢
البار ٤٤، ٤٧، ٧٦
البحر الأبيض المتوسط
البحيرات ٢، ٧، ٢٨، ٣١
بخار ٦، ٤٩
البخر- نتح ٢٤٨
بذرة (البذور) ٨، ١٠، ١١، ١٤، ١٥، ٥٦، ٢٧٥، ٢٧٩، ٢٨١، ٢٩٠، ٣٠٨
البراعم ٢٢٨، ٢٨٨
البرافين ٣٢، ١٢٧
البردي ٢٥٨
البرمائيات ١
البروتوبلازم ٨، ١٢، ١٥، ٣١،
البروتينات ٨، ٢٦، ٧٠، ٧٢
البرولين ٣٠٢، ٣٠٤
بساتين النخيل ٢٠٥

obeikandl.com

البشرة ١٢٨ ، ١٩٤
البشرة الداخلية ١٩٥ ، ١٩٦ ، ١٩٩
بشرة سفلى ٢٢٩ ، ٢٣٣
بشرة عليا ٢٢٩ ، ٢٣٣
البصل ١٠٣ ، ٢٠٦
البطاطس ١٢٧ ، ١٢٩
البطيخ ١٤
البكتيريا ٤
البلاستيدات ١٦
البلاستيدات الخضراء ١٥ ، ٦٩
البلزمة ٨٣- ٨٩
البلزمة الحدية ١٥٧
البلزمة الكاذبة ٨٥ ، ٨٨
البلزمة المؤقتة ٨٥ ، ١٥٧ ، ١٥٩
البلزمة المحدبة٨٦
البلورات المعدنية ٧٢
بناء البروتينات ٣٠٨ ، ٣٠٩
البناء الضوئي ٣ ، ٥ ، ١٠ ، ٢٤ ، ٢٢٩ ، ٢٦٢ ، ٢٧٨ ، ٢٩٥ ، ٢٩٩
البنجر الأحمر ٤٠ ، ١٥٩
البنزين ٩٣
البوتوميتر (البوتومترات) ١٩١ ، ٢٤١
بوروميتر (بوروميترات) ٢٤٠
بوروميتر الانتشار ٢٤٦ ، ٢٤٧
البورون ٥٤ ، ٢٩٥
البيئات الجافة ٢٠٥ ، ٢٧٩
البيئات الرطبة ١٧٥
البيئة الخارجية ١٩٩
البيوت الزجاجية ٥٦

ت

تأقلم ٢٧٩ ، ٢٨٣ ، ٢٨٨ ، ٢٩١
تأين الماء ٢٩ ، ٣٠
تبادل الغازات ٢٢٦ ، ٢٢٨ ، ٢٣٣
تباع الشمس ١٣ ، ٨٠ ، ٢٩٥
التبخر ٥ ، ٢٦ ، ٢٣٠
تجانس التربة ٣٨
التجمد ٢٨ ، ٥٧
التجمعات المتقطعة ٢١ ، ٢٢
التحلل المائي ١٠
تحلية ٢٩٢

obeikandi.com

التحليل الكهربائي ٢٤
تحمل الجفاف ٢٨٠، ٢٨١
تحور (التحورات) ٢٧٨، ٢٨٠، ٢٨٤، ٢٨٨
التدفق الأسموزي ١١٠
تدفق الانتشار ١٠٦، ١١٠
تدفق أيون البوتاسيوم ٢٣٨، ٢٣٩
تدفق الكتلة ١٠٥، ٢١٤
التدفق الكهربائي ١١٧
التدفق من السائل إلى البخار ١١٥
تذبذب الطنين ١٦١، ١٦٢، ١٦٥
تربة جافة ٤٥، ٥١، ١٧٦، ١٧٧، ٢٦٠
التربة الرملية ٣٥، ٣٦، ٤٢، ٥٥
تربة شبه جافة ١٧٦، ١٧٧
التربة الطفالية ٣٥، ٥٨
التربة الطينية الثقيلة ٣٥
التربة المتجمدة ٢٠٩
التربة المشبعة ٤١، ٢٥٨
تربة مروية ٤٨
التركيب البلوري ٢٠، ٢١
تركيب الجذر ١٨٨- ١٩٥
تركيب الخلية ٦٨- ٧٣
تركيب الغشاء ٧٠
تركيب الماء ١٧، ١٨- ٢٣
تركيز (تراكيز) ٥٥
التريتيوم ٢٣
التشرب ٦٨، ١٠٧
تشريح الورقة ٢٢٨- ٢٣٠
تعبير المورث ٢٨١
تعرية ٧، ٣٤
التغذية المعدنية ٣٣، ٢٩٤
التغلظ الثانوي ١٩٦
تغير حجم الخلية ٧٩، ٨٠، ٩٩
تغير زاوية الورقة ٢٨٤
التغيرات الدورية ٢١٩
التغيرات الشكلية الناتجة عن الإجهاد المائي ٢٨١- ٢٩٠
تغيرات موسمية ١٦٨، ١٦٩
التفاح ١٤، ١٢٩
التفتيت ٣٤، ٥٩
تقدير النفاذية ٩٧- ١٠٥

obeikandl.com

تقلص الفجوة ٨٨
التكثيف ٥، ١٠، ٥٨
تكساس ١٧٣
التلاصق ٨، ٣٢، ٧٧، ٢٢٠
التماسك ٣٢، ٣٦، ٢٢٠
تمدد التربة ٤٨
التميؤ ٢٤، ٤١، ٩٤
التميز ٧٢، ٢٠٥
التناضح ٢٩٢
التنافس ٢٠٥
تهوية التربة ٢٠٩
التوازن الطبيعي ٢٤٤
التوتر السطحي ٣٢، ٤٩، ٨٧
توزيع الثغور ٢٣٣
التوصيل الثغري ٢٦٨
التوصيلية الكهربائية
التوصيلية الهيدروليكية ٥٠، ٥١، ٩٨، ١٨٠، ٢٧٤
تيار ٥٤
تيارات الهواء ٦، ٢٠٦، ٢٠٧
تيسر ماء التربة ٢٠٧- ٢٠٩

ث

ثابت الإتزان ٢٩
ثابت التعادل الكهربائي ٣٠
ثابت العزل الكهربائي ٥٤
ثابت الغازات ٥٧
الثاقب الفليني ١٢٧، ١٣٥
ثاني أكسيد الكربون ١٠، ٢٤، ٢٥، ٣٠، ٩٤، ٢٤٢، ٢٥٣، ٢٦٢
ثبات الإنزيمات ٢٨١
ثرموستر ١٣٧، ١٤٢
ثرموميتر (ثرموميترات)
الثغور ٣، ٢٣٣- ٢٣٩، ٢٨٣، ٢٩٦، ٣٠٦
ثغور غائرة ٢٤٩، ٢٨٠
الثقوب ٣١
ثلاثي فوسفات الأدينوزين ٢٩٥
الثلج ١٩- ٢١، ٢٧
ثمرة (الثمار) ١١، ١٤، ١٥
ثنائي نترات الفينول ٢١١

obeikandl.com

ثوابت خواص الماء ٣٢، ثيوسيانات البوتاسيوم ٨٧

ج

الجاذبية الأرضية ٣٧، ٣٨، ٤٠، ٤٩، ١٠٥، ٢٠٣
الجبال ٥
الجبس ٥٩
الجدار الخلوي ١٥، ٦٨، ١٩٨
الجدار الخلوي الابتدائي ٦٨
الجدار الخلوي الثانوي ٦٩
الجذر (الجذور) ١٣، ١٥، ٣٣، ٣٩، ٤٩،
الجذر الابتدائي ١٩٦، ٢٠٤
الجذور الجانبية ٢٠٤، ٢٨٨
الجذور الحديثة ٣٠٤
الجذور المسنة ٣٠٤
جذور حية ١٣١، ٢١٠
جذور عميقة ٢٠٥، ٢٨٩
جذور ميتة ٢١٠
الجريان السطحي ٦
الجزء الطيني المعدني ٣٥
الجزء المعدني ٣٤، ٣٥
الجزر ١٥، ١٠٤
جزيئات عضوية ٧٧
جل ٨
الجفاف ٣٦، ٣٧، ١٧٣، ٢٧٩، ٢٨٤
الجلسيرول ٩٢
جلفانوميتر ٥٨، ١٣٨، ١٤١
الجلوكوز ٩٢
الجهاز الثغري ٢٣٦، ٢٣٨
جهاز جولجي ٦٩
جهاز غشاء الضغط ٦٢
جهاز ناقل الضغط ١٤٦
الجهد الأسموزي ٤٤، ٤٦، ٧٧، ١٤٨، ١٥٠، ١٧٨، ٢٧٢
جهد الجاذبية ٤٤، ٤٦، ٢٧٢
الجهد الشعري ٤٣، ٤٤، ٤٦، ٤٨،
جهد الضغط ٤٤، ٤٧، ٧٧، ١٧٤، ١٨٠، ٢٧٢
جهد الغشاء الكهروكيميائي ٢٦٣

obeikandi.com

الجهد الكلي ٤٤، ٥٠، ١٧٤
الجهد الكلي لماء التربة ٤٥، ٥١
الجهد الكيميائي ٤٢- ٤٤، ٧٥
جهد الماء ٤٣، ٤٥، ٧٧، ١٧٠- ١٧٧، ٢٧٢
جهد الماء النقي ٤٣، ٤٤
جهد المادة ٤٤، ٤٦، ٥٦، ٧٧
جهد ماء البحر ١٧٤، ٢٩١
جهد ماء التربة ٤٣، ٤٥، ٥٥، ٥٧، ٢٧٩
جو مشبع ٣٩، ٢٩٣

ح

حالة اتزان ٢٠٠، ٢٧٧، ٢٧٨
الحالة السائلة ٥، ٢١، ٢٢، ٢٤، ٢٥، ٢٦، ٢٨
الحالة الصلبة ١٧، ١٩، ٢١، ٢٤، ٢٥
الحالة الغازية ٥، ١٩، ٢٤، ٢٥، ٢٦
حالة الماء في الخلية ٧٤
الحبوب ١٠، ١٥، ٥٤
حبيبات التربة ٣٢، ٣٤، ٥٨
حجم البروتوبلاست النسبي ٨١
حجم التربة ٣٤، ٢٠٤
حجم الجذر ٢٠٦
الحجم الجزيئي الجرامي ٧٦
حجم الخلية ٧٩، ٨٠، ٩٩
حجم الماء الجزئي ٥٧
حجم الماء المتدفق ٩٠
الحجم النسبي ٨٠
الحديد ٣٦، ٥٤،
حرارة الانصهار والتمدد ٢٧، ٢٨
حرارة التبخر الكامنة ٢٦، ٢٧
حرارة التربة ٤٧
الحرارة النوعية ٢٨، ٢٩، ٣٢
حركة الأوراق ٢٨٤
الحركة العشوائية ١٠٦، ١٠٧
حركة الماء في التربة ٣٣، ٣٨، ٤٨- ٥١
حركة الماء إلى الخشب ١٩٦- ٢٠٢
حركة الماء بين الخلايا ١٠٥- ١٢٤

obeikandl.com

حركة الماء في التربة ٤٨- ٥٢
حركة الماء القطرية ١٩٧
الحزازيات ٣
الحزم الوعائية ٢١٢
حساب جهد الماء (أمثلة) ١١٨-
١٢٤
الحشرات ٣٣، ٢٨٣
الحقل ٥٦، ٥٧
حقول القوى ٤٥
حمض الأبسيسيك ٢١١، ٢٦١،
٢٦٢، ٢٨١، ٣٠٥، ٣٠٦
حمض الأسكوربيك ٢٩٤
حمض البوريك ٢٩٥
حمض الجلوتاميك ٣٠٥
حمض الخليك ٢٥
حمض السكسينيك ٣٠٤
حمض السيتريك ٣٠٤
حمض الفورميك ٢٥
حمض الفيوماريك ٣٠٤
حمض الكبريتيك ٧٣، ١٠٧، ١٠٨
الحياة الاقتصادية ٢
الحيوانات ٤

خ

الخاصية الشعرية ٣٨
الخروع ١٤٤
خزن الماء ٢٨٨
الخس ١٥
الخشب ١٣، ١٩٦، ٢٨٨
خصائص التربة ٣٣، ٣٤- ٣٦
خصائص الورقة الشكلية ٢٨٢
خط الاستواء ٢
خلات فينيل الزئبق ٩٤
الخلايا الإنشائية ٧٨
الخلايا البرنشيمية ٧٢، ٧٨
الخلايا الحارسة ٢٣٦، ١٣٧، ٢٥٢،
٢٦٢
الخلايا الحركية ١١
الخلايا الفلينية ٧٠
الخلايا الكولنشيمية
الخلايا المساعدة ٢٣٦، ٢٣٩
خلايا مزروعة من نسيج تمثيلي

obeikandl.com

خلايا الورقة ١٤٧
الخلية النباتية ٨، ١١، ٢٨،
خلية بشرة ١٠٣، ١٨٦
خلية ثمرة ١٠٤
خلية غدية ١٠٣
الخواص العامة لانتقال الماء من النبات ٢٦٣- ٢٧٦
خواص الماء١٧، ٢٤- ٣٢
خواص الماء التركيبة والفيزيائية ١٧- ٣٤

د

الدائرة الكهربائية ٥٨
الدائرة المحيطية ١٩٥
داخل التربة ٤٨، ٤٩
الداين ٧٦
درجة الحرارة المطلقة ٥٧،
درجة الغليان ٢٤، ٢٥
الدعامة ٢١٤
الدقائق ٢٣، ٣٥، ٤٤
الدقيق ٥٤
الدهون ٧٢، ٢٨١
الدهون الفوسفاتية ٧٠
دودة الأرض ٣٣
الدوران السيتوبلازمي ١٠٦
دورة ٤، ٥، ، ١٦٨، ١٦٩، ٢٨١
دورة الماء ١، ٤- ٧
دورية حركة الثغور ٢٣٧، ٢٥٢
الديتريوم ٢٣
الديناميكا الحرارية ٤٢، ٤٥

ذ

الذائب (الذائبات) ٣٠، ٤٢- ٤٤
الذبول ١٢، ٣٩
الذرة ١٣، ٤٠، ١٠٤، ٢٥٣
ذرَّة (ذرات) ١٠، ١٨
ذرة الحقل ١٤
الذرة الحلوة ١٤
ذروة سرعة التدفق ٢١٧
ذوات الخشب الحلقي ٢١٧
ذوات الخشب المنتشر ٢١٧

obeikandl.com

ذوات الفلقة الواحدة ٢٢٨، ٢٢٩، ٢٣٦
ذوات الفلقتين ٢٢٨، ٢٢٩، ٢٣٦
ذوبان الثلج ٢٧

ر

رابطة هيدروجينية ١٩، ٢٠، ١١٢
رابطة تساهمية ١٨، ١٩، ٢٠
الربيع ٢
رتب ٣٥
رجل الغراب ٣
رسم هوفلر ٨٢
الرصاص ٢٣٢
الرطوبة النسبية ٣، ٩، ١٤، ١٠٨، ٢٤٢، ٢٥٤، ٢٦٧
الرقم الهيدروجيني ٢٩، ٣٠، ٧٣، ١١٧
الرمل الخشن ٣٥
الرمل الناعم ٣٥
الروابط الببتيدية ٧٢
الروابط الهيدروجينية ١٩، ٢٠، ٢٢، ٢٣، ٢٥، ٢٦، ٣٠، ٣١
الري ٣٧، ٣٨، ٢٠٥
الرياح ٦، ٤٨، ٢٤٤، ٢٥٨
ريبوزومات ٧١

ز

الزئبق ٩٤، ٩٦، ٢٦٦
الزجاج ٣٢
الزنك ٢٩٥
الزهور ١١
زوج ١٩، ٢٠
زيادة جهد الماء
زيت السليكون ١٠٠
الزيوت ٢٦٧

س

سائل الخشب ٢٠٣
السالبية الكهربائية ٢٥
ستيرولات ٧٠، ٧١

obeikandl.com

السحب ٢٤٦
السدود ٢
السراخس ٣٨
سرعة التدفق ٢١٣
سرعة الرياح ٢٤٤، ٢٥٨
سرعة الصوت ١٠٥
سريان الماء ٣٨
سطح التبخر ٥٦
سطح التربة ٣٨، ٤٨، ٥٠، ٥٤
٢٤٨
السعة الحقلية ٣٧- ٤١، ٥٣
سعر (سعرات) ١٨، ٢٦، ٢٨
سكر (سكريات) ١٠، ٢٨١
السكروز ٨٧، ٩٢، ١٠٩، ١١٢،
١٣٢
سكوتلاندا ١٧٥
سلخة (سلخات) ٢٣٩
سلم (شجيرة) ٤٩
السليكات ٣٦
سليكات الألومنيوم ٣٦
السليكون ٣٦
السليلوز ٣٢
السماد (الأسمدة) ٣٧
سمك الغشاء ٧٠
السموم ٢٦١
السوبرين ٢٢٩، ٢٨٩
السويد ١٧٥
السويقة الجنينية العليا
السيادة القمية ٢٠٣
السيانيد ٢١١، ٢١٢
السيتريك ٣٠٤
السيتوبلازم ١٥، ٢٨٠، ٢٩٠
السيتوكينين ٢١١
السيتوكينينات ٣٠٧
السيقان ١٣
سيكروميتر ٥٦- ٥٨
سيكروميتر قياس الضغط البخاري
النسبي ١٣٧
سيكروميتر المزدوج الحراري ١٤٠
السيكروميترات الرطبة البسيطة ١٥٥
السيول ٢٠٥

ش

شارداكوف ١٣٠
شاطئ ٨٩، ١٧٤

obeikandi.com

الشبكات البلورية ٣٠، ٤١
الشبكة الاندوبلازمية
شبكي ٢٢٨
الشتاء ٢٨، ٢٧٠
الشجيرات ٢٠٥
الشحنات السطحية ٣٦
الشحنة الكهربائية ١٩، ٣٠، ٤١
شحنة جزئية ١٩
الشدّ ٣٢، ٣٩، ٤٣، ٧٧، ٢٢٠، ٢٧٨، ٢٩١
شدة الإضاءة٢٥١
شريحة (شرائح) ١٣٣
شريط كاسبار ٨٨، ١٩٥، ١٩٨، ٢٨٣
الشعير ١٣، ١٥، ٢٨٧، ٣٠٦
الشعيرات ٢٨٢، ٢٩٤
شغل ٤٣، ٤٥
الشقيق ١٩٨، ١٩٩
الشكل الخماسي ١٩
الشكل السداسي ١٩
الشمس ٣١، ٢٤٨، ٢٧٧، ٣٠٤
الشوفان ٨، ٩، ١٥، ٤٠، ٢٠٦
الشيلم ٨

ص

الصباح ٢٣٣، ٢٣٧
الصبغات ٢٣٢
صحراء باها (كاليفورنيا)
صحراء الحوض الكبير (واشنطن) ١٧٠
صحراء سونورا ١٧٠، ٢٧٦
صحراء كولورادو ١٧١، ١٧٢
صحراء موهيف ١٧١، ١٧٢
صحراء النقب (فلسطين) ١٧٠، ٢٩٠
الصخور ٣٤، ٣٧
صعود العصارة ٢١٦
صعود العصارة في الخشب ٢١١-٢٢٤
الصفات التحورية) ٢٧٨، ٢٨٠، ٢٨٤، ٢٨٨
الصنوبر ١٣، ٢٠٦، ٢٩٩
الصيف ٢، ٢٧٠، ٢٨٣

obeikandl.com

ض

ضحل ٢٠٤
ضخ الأيونات ١٩٨ ، ٢٠٣
الضغط الأسموزي ٤٦ ، ٥٦ ، ٧٨ ، ١١٣
ضغط الامتلاء ١١ ، ٧٨ ، ٩١ ، ٢٦٣ ، ٢٩٢
ضغط الامتلاء (الهيدروستاتيكي) ٧٦ ، ٧٨
ضغط بخار التشبع ٢٦٦
الضغط البخاري للماء ٧٥
الضغط البخاري النسبي ٥٧
الضغط الجداري ٤٣ ، ٧٧
الضغط الجذري ١٩- ٢٠٢
الضغط الجزئي ٢٥٥
ضغط جوي ٧٦
الضغط السالب ٤٣ ، ٤٧ ، ٧٧
ضغط السيتوبلازم ٨٥
ضغط الغازات ٤٥ ، ٤٧
ضغط الماء البخاري
الضغط الهيدروستاتيكي ٤٣ ، ١١٣ ، ١٩٨
ضغط جوي ٤٣ ، ٤٤ ، ٤٧
الضغوط الجوية ٤٢
الضوء ٣١ ، ٩٦ ، ٢٠٩ ، ٢٣٧ ، ٢٥٢
الضوء الأحمر ٣١
الضوء الأحمر البعيد ٣١
الضوء الأزرق ٢٦٢

ط

الطاقة ١٨ ، ٢٨ ، ٤٣ ، ٢٢٨
الطاقة الحرة ٤٣ ، ٧٤
الطاقة الحرة الكامنة ٤٣
الطاقة الشمسية ٦
طاقة جبز الحرة ٤٣ ، ٤٥
طبقات التربة ٢٠٤
طبقة الشمعية ٢٨٤
طحلب (طحالب) ٩٠ ، ٩٦
طحلب بحري ١٨١
طحلب ماء عذب ١٨٢

obeikandl.com

الطرد المركزي ٣٨، ٢٢٠
طرق الاتزان البخاري ٥٦، ١٣٢- ١٤٤
طرق الاتزان مع السوائل ١٢٥- ١٣٢
طرق الاتزان مع الضغط ١٤٥- ١٤٧
طرق التعادل البسيطة ١٣٢- ١٣٥
طرق قياس الجهد الأسموزي ١٤٨- ١٦٤
طرق قياس الجهد الأسموزي للعصير الخلوي ١٤٨- ١٥٧
طرق قياس الجهد الأسموزي للنسيج ١٥٧- ١٦٤
طرق قياس الجهد الكلي للماء ١٢٥- ١٤٧
طرق قياس جهد الماء ومكوناته ٥٥- ٥٩، ١٢٤- ١٦٨
طرق قياس جهد المادة ٥٩- ٦٣
طرق قياس ضغط الامتلاء ١٦٤- ١٦٧
طرق قياس ماء التربة ٣٣، ٥٢- ٦٥
الطرق المبنية على تغير خواص العينة ١٢٧- ١٢٩
الطرق المبنية على تغير خواص المحلول ١٢٩- ١٣١
طريقة الاتزان الحراري ٢١٥، ٢١٦
طريقة الأسموزية عبر الخلية ٩٧
طريقة امتصاص أشعة جاما ٥٤
طريقة أوراق كلوريد الكوبالت ٢٤٠
طريقة البلزمة الحدية ٩٧، ١٥٧
طريقة البوتوميتر ١٩١، ٢٤١
طريقة تبادل السائل
طريقة التجفيف ٥٢
طريقة تدفق الماء المشع ٩٨
طريقة تشتيت النيوترونات ٥٣، ٥٤
طريقة التعادل البسيطة ١٢٦
طريقة تعيين الجهد الكلي بتغير الحجم ١٣٣
طريقة التغير في طول قطعة النسيج ١٢٧
طريقة تغير الكثافة (شارداكوف) ١٢٩، ١٣٠

obeikandl.com

طريقة التمدد والإنكماش ٩٩
طريقة التوصيلية الحرارية ٥٤، ٥٥
طريقة جرين وستانتون ١٦٥، ١٦٦
الطريقة الحقلية ٥٦
طريقة الخلية ١٢٧
طريقة دلتا ٢١٨
طريقة دي فريز ١٦٠
طريقة السعة الكهربائية ٥٤
الطريقة السيكروميترية ٥٧، ٥٨، ١٤٢
طريقة الغرفة المغلقة ٢٤٢
طريقة فصل الورقة ٢٤٣، ٢٤٤
طريقة قوة الضغط الخارجي ١٠٢
طريقة قياس تغير وزن السائل ١٣٤
طريقة قوالب المقاومة الكهربائية ٥٩
طريقة قياس تغير وزن العينة ١٣٤
طريقة قياس سرعة التدفق عبر الخشب ٢١٥
الطريقة الكريوسكوبية (الاستصراد) ٥٨، ٥٩، ١٤٩- ١٥٢
طريقة الليسيميتر ٢٤٤، ٢٤٥
طريقة مسبر الضغط ١٠٠
الطريقة المعملية ٥٦، ٦٢
طريقة مقدار الإنحناء ١٢٨
طريقة مقياس التوتر السطحي ٦٠، ٦١
طريقة الوزن (أو الحجم) ٥٢، ١٢٧
طريقة الوزن والتجفيف ١٣
الطريقة الوزنية ١٢٧
طريقة وزن الأصيص ٢٤١
طفرة ٢٦٢
الطماطم ١٤، ٤٠، ٢٦٢، ٢٩٩
الطور البخاري ١١٥، ٢٧٤
الطور الجاميتي ١٨٢
الطور السائل ١١، ١٢، ١١٥، ٢٧٣
طول الثغر ٢٣٤، ٢٣٥
الطين ٣٥

ظ

ظاهرة الإنتحاء الرطوبي ٢٠٤
ظاهرة التمدد والانكماش ٩٩
ظاهرة برنولي ١٠٦، ٢٢٤

obeikandl.com

ظاهرة بلتيه ٥٨ ، ١٣٧
ظاهرة سيبك ١٣٨
ظاهرة (cytorrhysis) ٨٨
الظروف الصحراوية ٢٦٨
الظروف الطبيعية ٢٠٠ ، ٢٠٧ ، ٢٠٩
الظروف المناخية ٢٠٩ ، ٢١٠
الظلام ٢٥٢
الظهيرة ٢٠٩

ع

عاريات البذور ٢١٢ ، ٢٣٦
عدد الثغور ٢٣٤ ، ٢٣٥ ، ٢٥٠
عديد الإيثيلين ٢٤٤
العديسات ١٩٦ ، ٢٣٢
العرق ٢٨٢
العصير الخلوي ١٤٨
العلاقات المائية للخلية ٦٧- ١٨٦
العمود المائي ٢٨٨
العناصر المعدنية ٣٣
عنصر (العناصر) ١ ، ٤ ، ٣٣ ، ٢٩٤
عناصر الخشب ٢١٣
العوامل ٣٤
العوامل الفيزيائية ٤٠
العوامل المؤثرة في الامتصاص ٢٠٣- ٢١٠
العوامل المؤثرة في معدل النتح ٢٤٩- ٢٦٢
عياري ٧٣

غ

الغابات ٢٠٥
الغابات الاستوائية ٢
غابات الجبال ٢
غاز النيتروجين ١٤٥
الغازات ٤٤ ، ٤٥ ، ٢٤٠
الغاسول ١٠٣
الغدد المائية ٢٣٣
الغرين ٣٥
غشاء ٤٧
الغشاء الخلوي ٦٩ ، ٧٠ ، ٧١ ، ٨٧

obeikandl.com

غشاء شبه منفذ ١١٠، ١٩٩
غشاء الفجوة ٦٩، ٧٠، ٨٧
الغطاء النباتي ٢
غلاف الانتشار ٢٥٧
الغلاف الجوي ٥، ٦، ٣١
الغلاف الخارجي ٥، ١٨، ١٩
الغمد الورقي ١٥
غير مروية ٢٨٧، ٣٠٥

ف

الفازلين ٩٨، ١٣٣
الفاصوليا ١٥، ١٩٢، ٢٥٢
الفالين ٣٠٤
فان درفال ١٩
فتحة الثغر ٢٢٨، ٢٢٩، ٢٥٦، ٢٨٤
فجوات كروية الشكل ٦٨، ٧٢
الفجوة (الفجوات) ١١، ١٥، ٦٩، ٧٢، ٧٨، ٨٥، ٢٢٩
فجوة مركزية ٦٨
الفراغات ٢١، ٣١، ٣٢
الفراغات المسامية ٣٤- ٣٦، ٣٨، ٤٠، ٤٨، ٤٩
الفراغات الهوائية ٣، ٢٢٦
فراغات شعرية ٦٨
الفراولة ١٥
فرجينيا الغربية ١٧٥
فرضية تحول النشا ٢٣٨
فرق الجهد ٤٣
فرق الطاقة الحرة ٤٣
فرنسا ١٧٣
فصل النمو ٢
فصائل ٣٥
الفضة ١٣٧، ١٣٩
الفطريات ٤، ١٣، ٢٦١
فعالية الجذور كأعضاء امتصاص ٢٠٣- ٢٠٧
فقاعة ٩٧، ٩٨، ٢٢٠
فقد الماء من النبات ٢٢٥- ٢٧٦
فلفل ١٠٤
الفلور ٢٥
فلين ٢٨٨

obeikandi.com

فورماميد ٩٢
الفوسفور المشع ٣٠٤
الفول السوداني ١٥ ، ٢٠٦
الفيتامينات ٢٩٤
الفيتوكروم ٢٨٥
الفيروسات ٢٦
الفيزياء ٢٧٨
فيزياء الماء ٧٧
الفيضانات ٧
فيوزيكوكين ٢٦١

ق

قاحلة الشجيرات ٢
قاعدة ٨ ، ٢٦ ، ١٣٢ ، ١٣٥ ، ٢٨٤
قاعدة الإتزان ١٢٥
قاعدة تروتن ٢٦
قانون أوم ٢٧١
قانون الكتلة ٢٩
قانون دارسي ٥٠
قانون فيك ٩٠ ، ١٠٩ ، ٢٦٤
القبة ٢٦٧ ، ٢٦٨
القرنبيط ١٣
القشرة ١٩٤ ، ٢٨٨
قصيبات ١٩٦ ، ٢١٢ ، ٢١٣ ، ٢٢٣
قطارة ١٢٧
القطب ٢
قطبي ١٩ ، ٢٣ ، ١١٧
قطبية جزيء الماء ١٩ ، ١١٧
القطر ٥٢ ، ٦٠ ، ٦٨ ، ١٣٥ ، ٢٠٧ ، ٢٢١
قطر الفراغات المسامية التقريبي ٣٥
قطر الوعاء ٢١٧
القطرة ٤٩ ، ٩٨ ، ١٢٦ ، ١٢٧
القطن ٣٢ ، ٤٠ ، ١٠٤
قفل الثغر ٢٣٠ ، ٢٣٧ ، ٢٣٨
قلة الأمطار ٢٧٨
القلنسوة ١٨٨ ، ١٨٩
قمة واحدة ٢٦٧ ، ٢٦٨
القمح ٤٠ ، ١٤١ ، ٢٥١
القمح الشتوي ٢٢٧
قمم الجذور ٢٠٦

obeikandl.com

القمم النامية ١٣ ، ٢٠٥ ، ٢٨٧ ، ٢٩٦
قنطرة ٥٩ ، ١٤٣
قنوات البوتاسيوم ٢٦٣
قنوات الكالسيوم ٢٦٣
قوانين الغازات ١١٢
قوة المص ٤٤ ، ٤٧ ، ٧٤
قوة المص الكلية ٤٧ ، ٧٤
قوة امتصاص الماء ٣٩ ، ٧٤
قوى التجاذب ٣٠
قوة النتح ٢٠٠
قياس الجهد الأسموزي لمحلول التربة ٦٣- ٦٥
قياس الطول ١٢٤
قياس النتح ٢٤٠- ٢٤٩
قياس تدفق الدم ٢١٨ ، ٣٣١
قياس تدفق الهواء ٢٣٩
قياس جهد المادة ٥٧- ٦١
قياس ضغط البخار أو الرطوبة النسبية في الطور البخاري ١٣٥
قياس فتحة الثغر ٢٣٩

ك

الكائنات الحية ١ ، ٥ ، ٢٧ ، ٢٨ ، ٣٥ ، ٣٦ ، ١٨٧
الكائنات الدقيقة ٣٣ ، ٢٠٩
الكائنات الملحية ٤
كاتيونات ٨٦
كاربوواكس ١٣٢ ، ١٤٦ ، ٣٠٠
كاليفورنيا ١٧٠- ١٧٣
الكاينتين ٣٠٨
كبريتات ٢٩٢
كبريتيد الهيدروجين ١٧
الكتان ٤٠
كثافة التربة ٥٢ ، ٥٤
كثافة السائل ٢٨ ، ٢٢٣
كثافة الماء ٢١ ، ٢٧ ، ٢٧٣ ، ٣٢٤
الكثافة النسبية ١٠٨
الكثافة النوعية ٥٢
الكحول الميثيلي ٢٥ ، ٥٢
الكربون ٢٤
كربيد الكالسيوم ٥٣
الكرة الأرضية ٥

obeikandl.com

الكسر الجزيئي ٤٣
الكفاءة ٢٤٦ ، ٢٧٩
كفاءة استخدام المياه ٢٧٥ ، ٢٧٦ ، ٢٨٦
الكلوروفورم ٩٣ ، ٣٢٣
كلوريد الصوديوم ١٠٦ ، ١٠٨ ، ١٣٦ ، ٢٩٦ ، ٣٢٧
كلوريد الكالسيوم ٣٢٩
كلوريد الكوبالت ٢٤٠
الكلورين ٥٤ ، ٢٦٣
كمثرى ١٢٩
كمية الماء ٣٦
الكوارتز ٣٦
الكوبالت٢٤٠ ، ٢٩٢
كولورادو ١٧٥
كوليوس ٤٠
كونيتيكوت ١٧٦
كوينزلاند ١٧٣
الكيمياء ٢٧٨
الكيمياء الفيزيائية ٤٢
كينيا ١٧٦

J

اللجنين ٦٩ ، ٢١٤
اللحاء ١٣ ، ١٢٨ ، ١٩٦ ، ٢٩٣
اللحاء الثانوي ١٩٦
اللدونة ٣٦
اللزوجة ٣١ ، ٣٢ ، ٢١٠ ، ٢٩٤ ، ٣٢٣
لزوجة السيتوبلازم ٧١ ، ٨٧ ، ٢٩٤
اللوغاريتم السالب ٢٩
اللوغاريتم الطبيعي ٧٥
الليثيوم ٩٦
الليل ٣١ ، ٣٢ ، ٣٩ ، ٢١٩
الليبفات ٦٨

م

الماء الأرضي ٣٨ ، ٢٨٠
ماء البحر ٨٩ ، ٢٩١
ماء التبلور ٤١

obeikandl.com

ماء التربة ٣٣، ٣٦- ٤٧
ماء التربة المتاح ٤٠- ٤٢، ٤٩، ٢٦٣
الماء الثقيل ٢٣
ماء الجاذبية الأرضية ٤٠، ٤١
الماء الشعري ٣٨، ٤١
الماء المرتبط ١٠، ٢٦
الماء المشع ٢٤، ٩٨، ٢١٤
الماء المقيّد ٤١
الماء النقي ٤٣، ٤٥، ٧٤، ٧٩
ماء بحيرة ١٧١
الماء والإذابة ٣٠، ٣١
الماء والتربة ٣٣- ٦٦
الماء والنبات ١- ١٦
المادة الحية ٨- ١٠، ١٩٨، ٢١٠
المادة الذائبة ٣٠
المادة الصلبة ٣٤
مادة مشعة ٢٤، ١٩٠، ٢١٨
مادة ميتة ١٩٨
الماليك ٣٠٤
مانوميتر ١٠٨
المانيتول ٨٧، ١٣٢، ١٦٢
مبدأ فسيولوجي ٢٧٨
مبلزمة ٨٢
متأينة ١١٠، ٣٣٠
مترهلة ٧٨، ٨٣، ١١٧
متسوبرة ٢٠٥، ٢٠٦
مثبطات التنفس ١٨٦، ٢١١
مثبطات النمو ٣٠٥
مجاميع نباتية ٢٧٥، ٢٧٦، ٢٩٨، ٣٠١
مجففات ١٣٤
المجموع الجذري ١٣، ٢٠٣، ٢٨١، ٢٩٠، ٢٩٥، ٢٠٥، ٣٠٧
المجموع الجبري للمقاومات ٢٦٥
المجموع الخضري ١٢، ٢٠٤، ٢١١، ٢٢٥، ٢٨١، ٢٩٠، ٢٩٢، ٣٠٧
مجموعة أمينية ٢٦
مجموعة كربونيلية ٢٦
مجموعة هيدروكسيلية ٢٦
المجهر الإلكتروني ٦٨، ٧٠

obeikandl.com

مجهر ضوئي ١٤٨، ١٥٣، ١٦٢، ٢٣٩
المحاصيل ٣، ٢٨، ٤٩، ٥٠، ٢٧٥
المحاليق ٢٢٨
محبة للأملاح ٤
محبة للماء ٣١
محتوى التربة المائي ٥٥
المحتوى المائي ١، ٨، ٩، ٣٦، ٤٤، ٤٥، ٥١
المحتوى المائي للنبات ١، ١٢- ١٦، ٣٩
المحتوى النيتروجيني ٣٠٠
محلل الغاز بالأشعة الحمراء البعيدة ٢٤٢
المحلول ٨٣، ١٠٨، ١١٥، ١١٦، ١٢١، ١٢٥
محلول التربة ٣٣، ٣٤، ٣٧، ٤٢
محلول عالي الأسموزية ٨٤
محلول متعادل الأسموزية ٨٣، ١٢٥
محلول مغذي ١٧٦
محلول منخفض الأسموزية ٨٣
محور الأرض ٢٠٤
المحيطات ٥، ٢٨
المخروطيات ٢١٤، ٢١٨، ٢٢٢
المخزون النشوي ٣٠٠
المذاب ٣٠، ٨٤، ٨٧، ١٠٦، ١١٣
المذيب ١٠، ٣٠، ٨٤، ١٠٦، ١١٣
المراعي ٤٩
مراقبة نقطة الانصهار ٢٧
مرطاب ٥٥
مركب (المركبات) ٢٥، ٣٧
المركبات الهيدروكربونية ٢٥
مرن ٢١
مرونة ٨، ، ٢٨٧١٧٦
مرونة الجدار الخلوي ٧٧، ٨٩، ٩٧- ٩٩، ١٧٦، ١٧٩، ١٨٠
مروية ١٧٢، ٢٨٦، ٣٠٣، ٣٠٥
المزارع المائية ٢٤٣
مزارع النخيل ٢٠٥
مزدوج حراري ٥٨، ١٣٧، ١٤٠، ١٧٦، ١٥٠، ١٦٨، ٢١٥، ٢١٨، ٢٤٦

obeikandi.com

مزدوج سبانر الحراري ١٣٧
المساحة ٩٧، ١٠٦، ٢٣٤، ٢٤١
مساحة الخلية ٩٧، ٩٨
مساحة الورقة ٢٨١، ٢٨٢، ٢٨٤
مساحيق ٢٦٧
مسار الماء في الخشب ١٩٧
مسار النتح ٢١٦
المسارات الأيضية ٢٨١
المسافة بينية ٦٩، ١٢٩
مسبر الضغط ١٠٠- ١٠٢، ١٦٧
مستودع ٣٣، ٤٥
المسطحات المائية ٦
مصدر الماء ٥٢، ٢٠٤، ٢٠٧، ٣٣١
مصرد ٥٥
مصطلحات العلاقات المائية للخلية
٧٣- ٨٣
مطاط السليكون ٩٨، ٢٣٩
المطر ٢، ٦، ٣٧، ٢٨١
معادلة بواسوليه ٢٢٣
معادلة فانت هوف ١١٢
معادلة النتح ٢٦٤، ٢٦٧
معامل الإرجاع (الانعكاس) ١٨٠، ٢٩٢
معامل الأسموزية ١١٤، ٣٢٩
معامل الاختيارية ٩١
معمل الإلتفاف ٢٨٧، ٢٨٨
معامل الانتشار ١٠٩، ٣٢٥
معامل الانعكاس ٩١، ١٣١
معامل الانكسار ١٤٨
المعامل الثغري ٢٣٥
معامل الذبول ٣٩
معامل النفاذية للخشب ٢٠٧، ٢١٤
معامل مرونة الجدار الخلوي ٩١،
١٨١- ١٨٣
المعامل الهيدروليكي ٩١
المعاملات الأسموزية ٣٢٩
معاملات التحويل ٢٦٧
معاملات نقل الماء ١٨١، ١٨٢، ١٨٤
معدل الامتصاص ١٣١
معدل الامتصاص- قمة الجذر
١٩١، ١٩٢، ٢٠٦، ٢٢٧

obeikandl.com

معدل الإنتشار ١٠٩
معدل الأيض الهدمي ٢٩٠
معدل البناء الضوئي ٢٩٤، ٢٩٥، ٢٩٧، ٢٩٩، ٣٠٠
معدل التبخر ٢٦٩
معدل تدفق الماء ٩٦، ٢٠٦، ٢٠٨، ٢١٨
معدل التنفس ٨، ٩، ٢٩٩، ٣٠٠
معدل حركة الماء ٢١٢
معدل السرعة ٢١٧
معدل النتح ٢٤٢، ٢٤٤، ٢٤٥، ٢٤٩- ٢٦٢
معدل نفاذ الماء ٤٧، ٤٨، ٩٦
المغنيسيوم ٣٦
المقاومة ٢٦٤، ٢٧٠، ٢٩٣
المقاومة الثغرية ٢٦٥
مقاومة انتشار الغازات ٢٨٢
المقاومة في طبقة الأدمة ٢٦٤
مقننات الري ٢٤٨
مقياس التوتر السطحي ٦١
مقياس الماء ٥٢
المكافئ الرطوبي للتربة ٣٨
مكتملة النمو ١٣
ملء الأوعية الخشبية ٢٢٢
ملوثات الجو ٢٤٩
الملوحة ٥٨، ٢٠٧، ٢٧٨
ممال ٤٨، ١٩٨، ٢٠٧، ٢١٥
ممال الجهد ٥٧، ١٩٩، ٢٠٧
ممال جهد الماء ٥٠، ٥٧- ٥٩، ١٩٦، ٢٤٨، ٢٥٣
ممتلئة ١١
المميزات ٢٨١
المناطق الاستوائية ٢٥٤
المناطق القاحلة وشبه القاحلة ٢٨١، ٢٨٩، ٢٩٠
مناطق التبخر ٢٣٠- ٢٣٣
المنتجات الصناعية ٥٤
المنجنيز ١٥٤
منحنى التبخر ٢٧٠
منحنى المعايرة ٥٨
منسوب الماء الأرضي ٥١
منطقة انتقالية ٤٨

obeikandl.com

المنطقة الإنشائية القمية ١٩٠
منطقة الابتلال ٤٨
منطقة الاستطالة ١٩٠، ١٩٣
منطقة التشبع ٤٨
منطقة التميز ١٩٠، ١٩٣
منطقة الجذور الجانبية ١٨٨
منطقة حوض البحر الأبيض المتوسط ٢٨٣
منطقة الشعيرات الجذرية ١٨٨، ١٩٣، ١٩٦
منطقة القشرة ٩٤
منطقة مثقبة ٢١٣
منطقة مقدمة الماء ٤٨
منطقة نفاذ الماء ٤٨
منقلة ١٦١
مواءمة البيئة ٢٠٩، ٢٧٨
المواد الإلكتروليتية ٣٠
المواد البكتينية ٦٨
مواد بلاستيكية ٢٧٦
المواد التنينية ٧٢
المواد الدهنية ١٦، ٦٩
المواد الذائبة ٣٤، ٤٥، ٧٧، ٢٩٤
المواد الراتنجية ٥٩، ٢٨٤
المواد السكرية ٨، ٢٣٨
المواد شبه الموصلة ١٣٨
المواد العضوية ٣٤، ٤٩، ٥٣، ٥٥، ٥٨
المواد الغذائية ٢٩٣
المواد الغروانية ٣٦، ٧٧، ١١٣
المواد غير القطبية ٣٠
مواد كيميائية ٢٧٦
المواد اللجنينية ٩٣، ٢١٤
مواد مشعة ٢٤، ١٩١
المواد المصنعة ١٩٦، ٢٩٤
المواد النشوية ٢٩٢، ٢٩٤
المواد الهيدروكربونية ٢٤
المواد غير القطبية ٩٢
موجات الضوء ٣٠
موجات متضاغطة ١٠٣
الموجة ٣٠
مورد (موارد) ٤٢، ٢٧٤
موسم النمو ٢٢٧

obeikandl.com

الموقع ١٦٥، ١٦٨
المياه الجارية ٧
المياه المتجمدة ٥
الميتوكوندريا ١٦، ٦٩
الميثان ٢٤، ٢٥
ميثانول ٨٧، ٩٢
ميجاباسكال ٤٤، ٤٧، ٥٩، ٧٦، ٢٢٠
ميزان الضغط ١٦٠
الميكروميتر ١٠٠
مينيسوتا ١٧٥

ن

ناتج ثانوي ٢٩٣
ناقل الضغط ١٠٠، ١٤٦
نبات ابن سيناء ٢٩٠
نبات الأغاف ٢٧٦
نبات الأقحوان ٣
نبات البترول(هاهوبا) ٢٨٥
نبات البرسيم ٢٣٨
نبات الحنظل ٢٨٩
نبات ذيل الحصان ٢٣٨
نبات الزلة ٢٧٠
نبات السنط ٢٩٠
نبات السوس ٢٦٨، ٢٦٩
نبات الشورى ١٦٩
نبات طبي ٢٦٨
نبات قصب الرمال ٢٨٦
نبات قصب السكر ٢٩٧
نبات القهوة ٢٠٦
نبات كف مريم ٣٠٤
نبات اللبلاب ١٦١
نبات الليمون ٢٥٠
نباتات الإفاقة ٢٨١
النباتات الأولية ١١
النباتات ثلاثية الكربون ٢٩٨
النباتات الجفافية ٤، ٢٤٩، ٢٧٠، ٢٧٧، ٢٧٩- ٢٨٠
النباتات الجفافية الحقيقية ٢٨٠
النباتات الحلوة (السكرية) ٣
النباتات الحولية ١٦٩، ٢٠٤، ٢٧٩
النباتات الخشبية ٨، ١٢ ١٧٥

obeikandl.com

نباتات ذوات الفلقتين ٢٢٨، ٢٢٩، ٢٣٦
النباتات الراقية ١، ٢، ١٠، ٣٣
النباتات رباعية الكربون ٢٩٨
النباتات الرطوبية ٣
النباتات الزهرية ١١
النباتات الصحراوية ١٦٨، ١٦٩، ١٧٠- ١٧٢، ١٧٨، ٢٦٨
نباتات الظل ٢٣٨
النباتات العشبية ٢، ٨، ١١، ١٢، ١٧٦، ٢١٢، ٢٨٣
النباتات العصيرية ٢٧٦، ٢٨٠، ٢٩٨
النباتات غير الحولية ٣
النباتات المائية ٢، ٣، ٤٠، ٢٩١
النباتات المتوسطة ٣، ٢٧٦
نباتات المحاصيل ٣، ٢٨، ٢٧٦
نباتات المستنقعات ١، ٢٥٨
النباتات المعمرة ٢٠٤، ٢٧٩، ٢٨٠
نباتات مقابر الإنسان ١٧٤
النباتات الملحية ٤
نباتات مقابر الإنسان ١٦٩، ١٧٠
النباتات الهاربة ٢٨٠
ن- بروبانول ٩٢
النتح ٢٧، ٣٢، ٢٢٦، ٢٣٠- ٢٦٢
النتح الثغري ٢٣٠
النتح عبر البشرة ٢٣٠
النتح عبر العديسات ٢٣١
نترات ٩٤، ٢٩٢
نترات البوتاسيوم ٨٧
النجيليات ٣٠٥
النحاس ١٤٠، ٢٩٥
النخيل ٢٠٥
نسبة الإنبات ٢٩٢
النسبة المئوية للذبول ٣٩
النسبة المئوية للذبول الدائم ٣٩، ٤٠، ٥٣
نسبة المجموع الجذري إلى المجموع الخضري ٢٤٩، ٢٥٠
نسبة المساحة ٢٣٥
نسيج أسفنجي ٢٦٧
النسيج التخزيني ١٢٣، ١٩٤

obeikandi.com

النسيج التوصيلي ١٨٨ ، ١٩٥ ، ١٩٦ ، ٢٢٥ ، ٢٢٨
نسيج عمادي ٢٦٧
نسيج ورقة ١٧٧ ، ١٧٨ ، ٢٢٩
نسيج وسطي ٢١٩ ، ٢٢٩ ، ٢٦١ ، ٢٨١ ، ٢٩٣ ، ٢٩٥
النشا ١٠ ، ٢٣٨
نشاط إفرازي ٢٠٠
النشاط الإنزيمي ٢٩٤
النشاط الأيضي ٢١٠ ، ٢٣٧
النشاط الفسيولوجي ٨
نصف الزمن لتبادل الماء ١٧٩ ، ١٨٠
نصف الفترة الزمنية ٩٧
نصل ٢٢٩
النضح ٦
نظائر الماء ١٧ ، ٢٣ ، ٢٤
النظام ٤٣ ، ٧٤ ، ٧٧ ، ١٠٤
النظام المغلق ١١٢
نظام مسامي ٢٢٦
نظرية (نظريات) ٢١
نظرية التماسك ٢٢٠ ، ٢٢١
النظم الغروية ٣٦
النظير الهيدروجيني المشع ٢٤
نفاذية الأغشية ٢٤
النفاذية الاختيارية ١٩٥
النفاذية الانتشارية ٩٩
نفاذية الجذور للماء ٢٢٦ ، ٢٠٧
نفاذية الخلية ٨٧ ، ٩٩ ، ٨٩- ١٠٤
نفاذية الغشاء الخلوي ٧١ ، ٨٩ ، ٩٢ ، ٩٤ ، ٩٩ ، ٢٠٠ ، ٢٩٤
نفاذية الماء ٤٨ ، ٩٣ ، ٩٥
نقرة (نقر) ٢١٣
نقص الأكسجين ٢
نقص الضغط الانتشاري ٤١ ، ٤٢ ، ٧٨
نقص الماء ٨ ، ١٠ ، ١٢ ، ١٠٩ ، ١١٢ ، ٢٠٥ ، ٢٩٣
نقص في العناصر ٢٩٢
نقطة التعادل ١٤٢
نقطة الذبول ٣٩
النقل ١١ ، ١٩٨ ، ٢١٤ ، ٢٣١ ، ٢٣٢ ، ٢٨٩ ، ٢٩٢
نقل الأيونات ١٩٨ ، ٢٩٢ ، ٣٠٤

obeikandl.com

النقل الرأسي ٢٢٣
النقل القطري ٢٠٣، ٢٢٣
النمسا ١٧٥
النمو ١١، ١٢
النمو الثانوي ١٩٦
نموذج الخلية المعزولة ١٠٢
نموذج من خلية لأخرى ١٠٢
النهار ٣٢، ٢١٩، ٣٠٤
نواة الخلية ٦٩
النورة الإبطية ٣٠٥
النورة العليا ٣٠٥
النوع ٤٠
نوع التربة ٣٣، ٣٤، ٤٢
نوع الخلية ١٧٩، ١٨٠
نوع النبات ٩١، ١٩١، ٢٠٧، ٢٠٩، ٢٦٤، ٣٠٢
النيتروجين ٤، ١٤١
النيوترونات ٥٣، ٥٤

هـ

الهرم ٢٩٧
الهرمونات ٢٦١، ٢٦٢، ٢٨٨، ٣٠٢- ٣٠٦
الهرمونات النباتية ٢١١، ٢٦١، ٢٨١، ٣٠٢
الهليون ١٣
الهند ١٧٦
الهواء ٣٤، ٢٤٢، ٢٦٧
الهيجروميتر ١٤٠، ٢٤٢، ٢٥١
الهيدروجين ١٨، ٢٠، ٢٣، ٢٤، ٢٨، ٥٣
هيدروكربونات ٢٥، ٣٢
هيدريد عنصر ١٧
هيدريدات ١٧، ٢٥

و

الوحدات الدولية ٤٤
وحدات الضغط ٤٤، ٤٧
وحدات الطاقة ٤٤، ٤٥
وحدة حجم للتدفق ٢٧٥
وحدة الكتلة ٤٤
وحدة المساحة ٢٣٥، ٢٧٨

obeikandl.com

وديان ٧
الورقة (الأوراق) ١١ ، ١٣ ، ١٥ ،
٣٩ ، ٢٠٨ ، ٢٥٤ ، ٢٦٦ ،
٢٦٧ ، ٢٧٣ ، ٢٧٦ ، ٢٨٠ ،
٢٨٢- ٢٨٤
الوزن الجاف ١٤ ، ١٥ ، ٣٩ ، ٢٩٣
الوزن الجزيئي ٢٣- ٢٥
الوزن الذري ٢٣
الوزن الرطب ١٣- ١٦ ، ٢٩٣
وزن العينة ٥١
وسادة بلاستيكية ٢٤٥
وسط ١ ، ٢٤
الوصلات البلازمية "البلازموديزماتا"
٦٩ ، ٨٥ ، ١٩٧
الوضع الطبيعي ٢١٨ ، ٢٤٤
وعاء الضغط ١٤٥ ، ١٤٦ ، ١٦٨ ،
١٧٣ ، ١٧٦ ، ٢٢٢
وظائف الماء ٧- ١٢
الوظيفة ١٨٧ ، ٢٣٠ ، ٢٨٢ ، ٢٨٥
الومضات الحرارية ٢١٤ ، ٢١٥ ،
٢١٨ ، ٢٤٦

اليابسة ١٨٧ ، ٢٢٥ ، ٢٢٦
يوريا٩٢
اليوريا الميثيلية ٨٧
اليوم ٢٦١ ، ٢٧٨ ، ٣٠٣

obeikandl.com