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

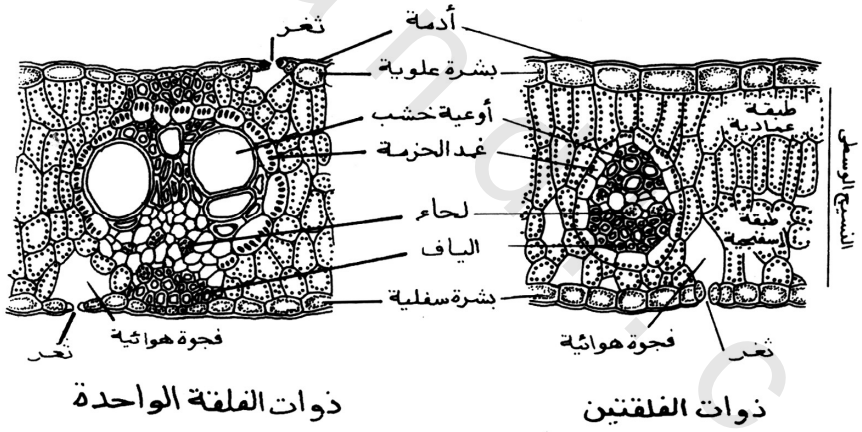
المصدر: (Ferry, 1959).

(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.

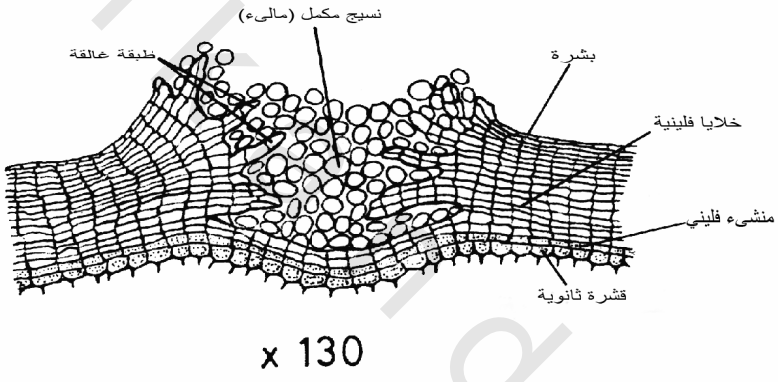
الجدول رقم (٦-٢) مقاومات نقل بخار الماء في أوراق عدد من النباتات.

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).

openkandil.com

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

obeikandl.com

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

اسم النبات	عدد الثغور/مم^{٢}		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).

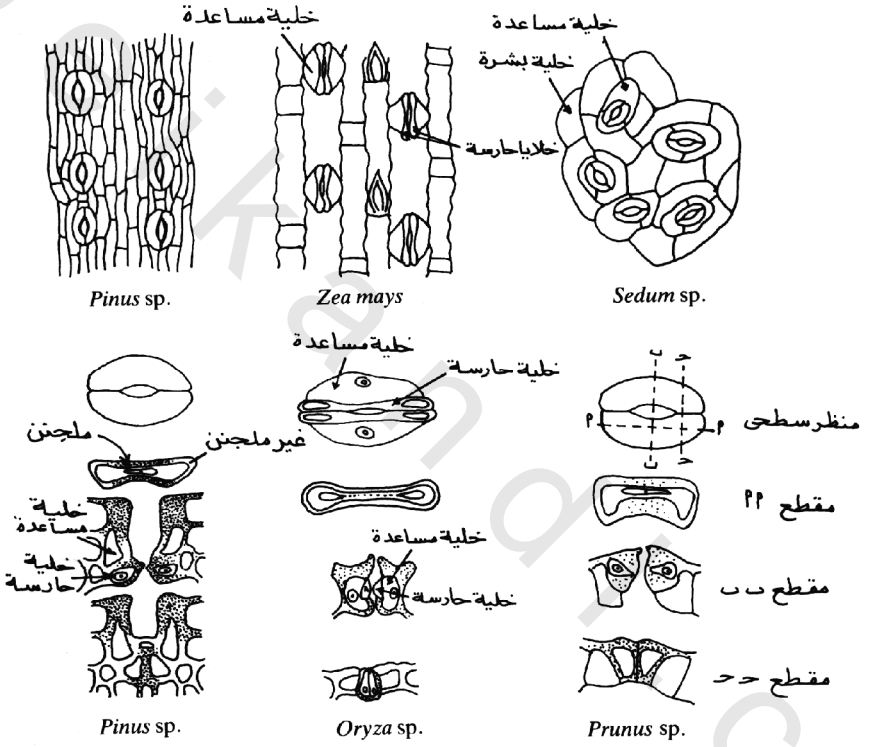
نظرا للاختلاف في أحجام خلايا البشرة فقد ظهر ما يعرف بالمعامل الثغري والذي يمكن التعبير عنه كالتالي:

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

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 .

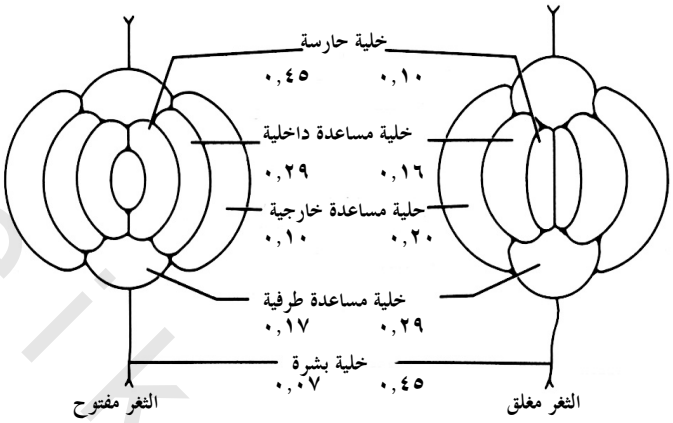
المصدر: (Meidner and Mansfield, 1968).

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 عندما 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

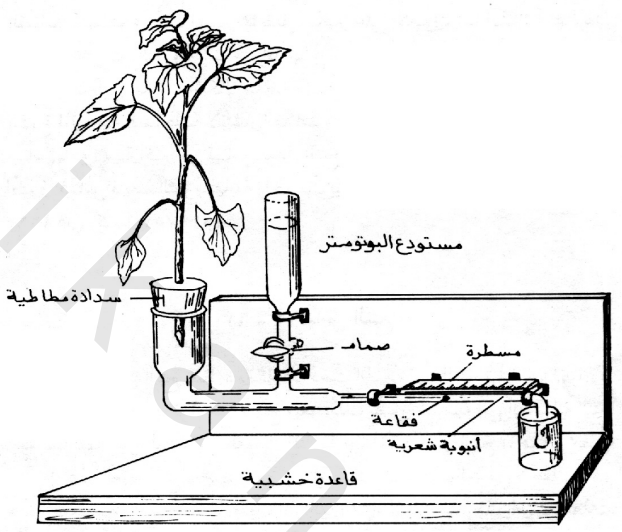
الغازات من الورقة إلى الخارج وتشبه هذه الطريقة الغرفة المغلقة سابقة الذكر ولكن الفرق هو أن القياس هنا يتم في وقت قصير مما يقلل التأثير في الثغور، لذا فهناك أجهزة لهذه القياسات عرفت بالبوروميترات من أقدمها بوروميتر دارون وبرتز في بداية هذا القرن، وقد اتخذت البوروميترات أشكالا عديدة كان آخرها بوروميتر 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)



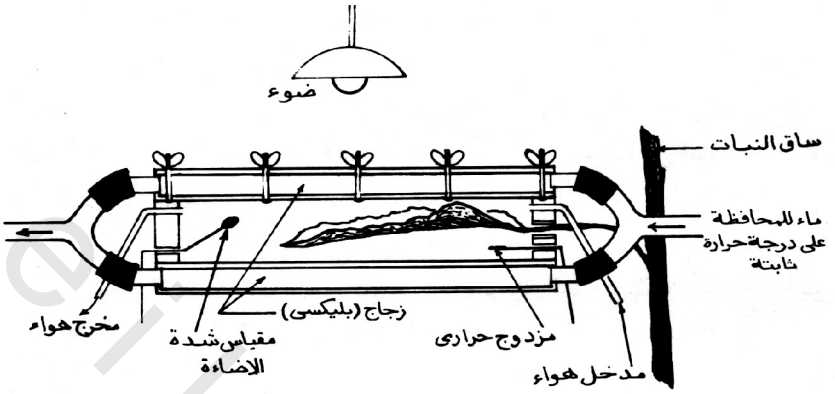
الشكل رقم (٦-٥). رسم تخطيطي لأحد أنواع البوتوميترات.

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 المـــاء ومخرجـــه فهـــو للتحكم في درجة الحرارة بحيث لا يتأثر كثيرا بالتقلبات الجوية أثناء التجربة.

المصدر: (Salisbury and Ross, 1969).

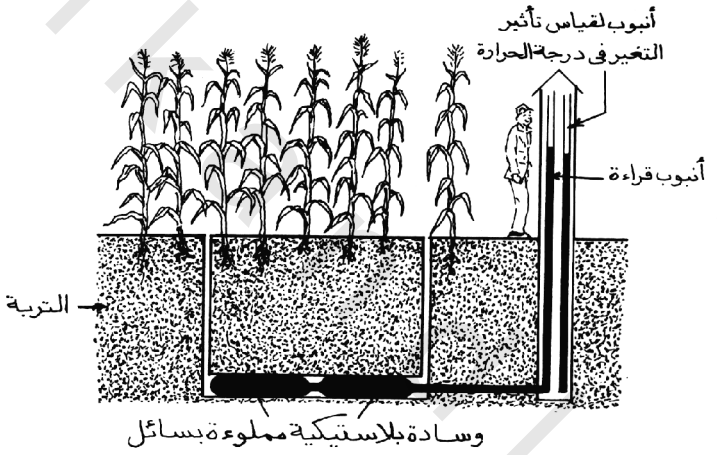
تعد الطرق المعملية السابقة طرقاً أساسية في تقدير معدل النتح إلا أن هناك تعديلات لهذه الطرق حسب الظروف، علاوة على طرق أخرى تفرضها ظروف التجربة. فعلى سبيل المثال، يمكن تقدير النتح في المزارع المائية بقياس كمية الماء اللازم إضافتها للمزرعة يوميا لكي تكون ذات مستوى ثابت، وعلى أية حال يجب مراعاة جميع الظروف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

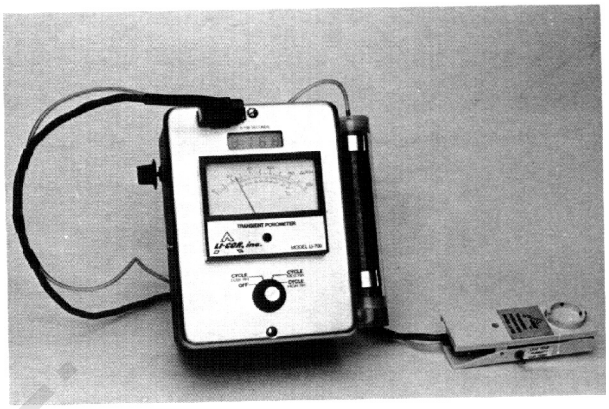
المصدر: (Salisbury and Ross, 1978).

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 البوروميترات ومن أكثرها شيوعا بوروميتر 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

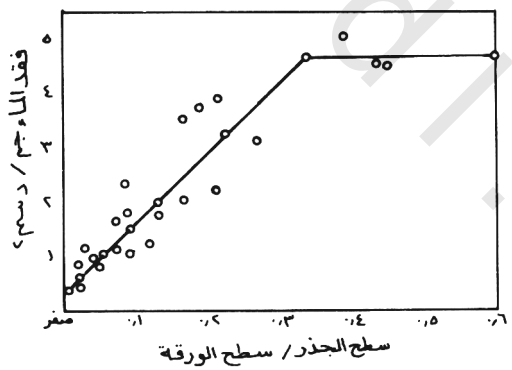
يستدل مما سبق أن فقد الماء من النبات يتم بصورة رئيسية عبر الثغور بينما ذلك الجزء المفقود عبر البشرة أو العديسات قليل ولا يمكن مقارنته بالنتح الثغري، لذا فإن العوامل المؤثرة على فتح الثغور وغلقها تؤثر في معدل النتح، ولكن هناك خصائص معروفة للنباتات تؤثر أيضا في معدل النتح مثل تركيب ومساحة الورقة ونسبة 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.

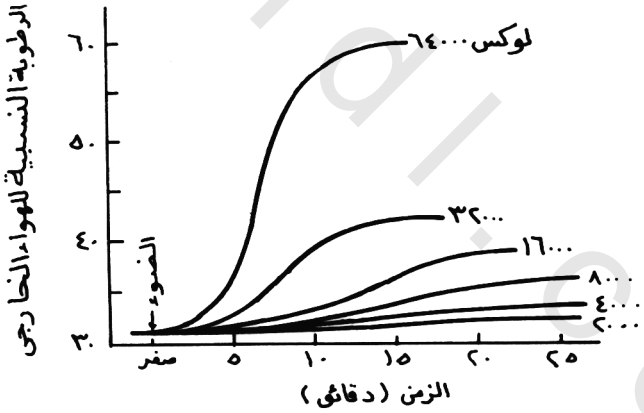
أما العامل الآخر والذي يعد من خصائص النبات فهو نسبة المجموع الجذري إلى المجموع الخضري أي نسبة أسطح الجذور الممتصة للماء إلى نسبة أسطح الأوراق التي يتبخر منها الماء فكلما كان سطح التبخر كبيرا وليس به تحورات مثل الشعيرات وأن عدد الثغور كبير كلما كان معدل النتح عاليا، وهذه العلاقة موضحة في الشكل التالي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

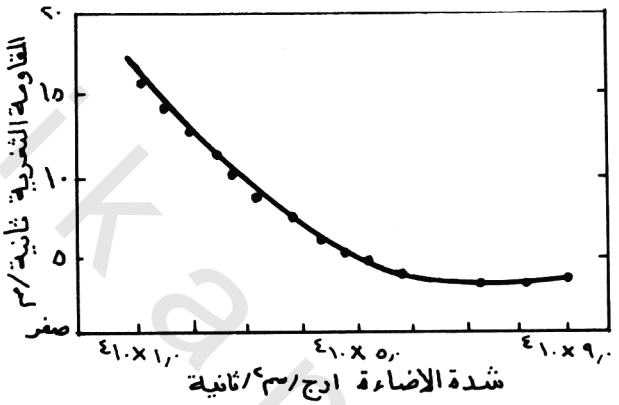
أما بالنسبة للظروف الجوية فهي تؤثر في معدل النتح إلا أن هذا التأثير قد يكون في زيادة المعدل أو الإقلال منه أو التفاعل في التأثير مع عامل آخر، ويمكن القول بأن الظروف البيئية تؤثر جميعا كوحدة متكاملة على فتح غلق الثغور أو غلقها أو مدى انفتاحها وبالتالي تؤثر في معدل النتح، فالضوء يعمل على فتح الثغور ومقدار 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).

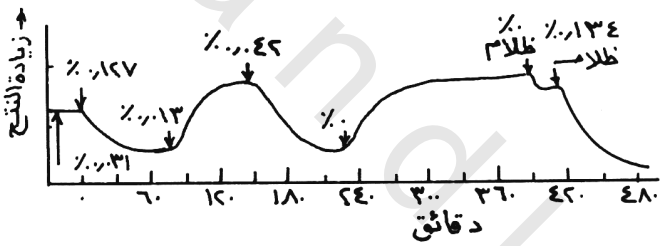


الشكل رقم (٦-١١). تأثير الضوء المرئي في فتحة الثغر في نبات الفاصوليا كما قيست بالمقاومة.

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).

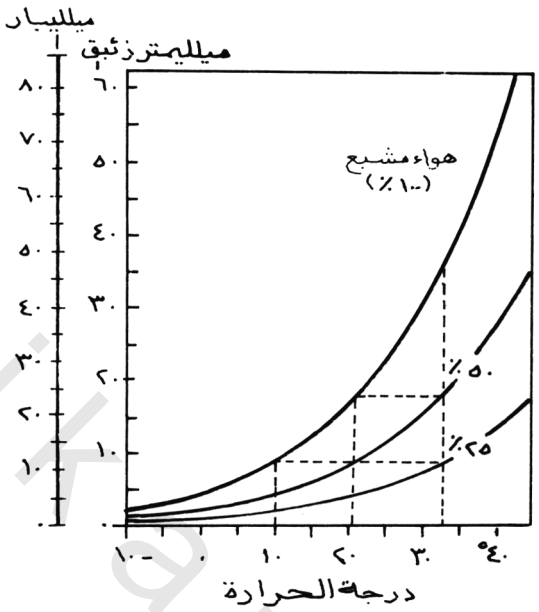
إن الرطوبة النسبية مصطلح لنسبة ضغط بخار الماء الفعلي عند درجة حرارة معينة إلى ضغط بخار الماء عند التشبع في تلك الدرجة وعليه فهي مقياس لمقدار ما يحتويه الهواء المحيط بالنبات من ماء عند درجة حرارة معينة والنتح في الحقيقة مقترن بمال جهد الماء بين سطح التبخر في الورقة والجو الخارجي ولو أن دانتي ١٩٦٩م

(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



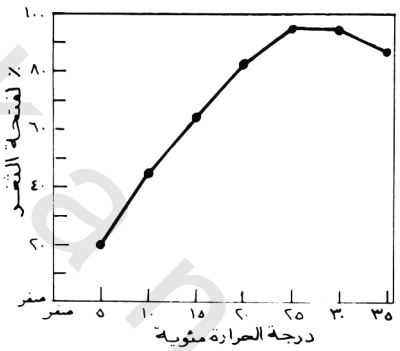
الشكل رقم (٦-١٣). العلاقة بين الضغط الجزئي لبخار الماء ودرجة الحرارة عند ٢٥% و٥٠% و١٠٠% رطوبة نسبية. والخطوط الرأسية المتقطعة تدل على أن الهواء، مثلا، يحوي كمية من الماء تتساوى تند درجة حرارة ١٠°م ورطوبة ١٠٠% تلك عند درجة حرارة ٥٠°م ورطوبة نسبية ٥٠% وكذلك عند درجة حرارة ٣٣°م ورطوبة نسبية ٢٥%.

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).

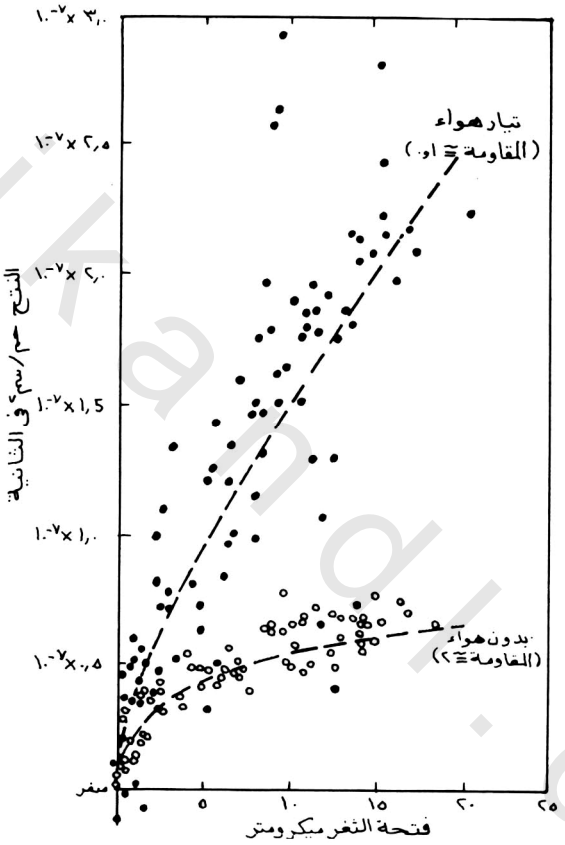


الشكل رقم (٦-١٤). العلاقة بين درجة الحرارة والنسبة المئوية لفتحة الثغر في أوراق نبات القطن.

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



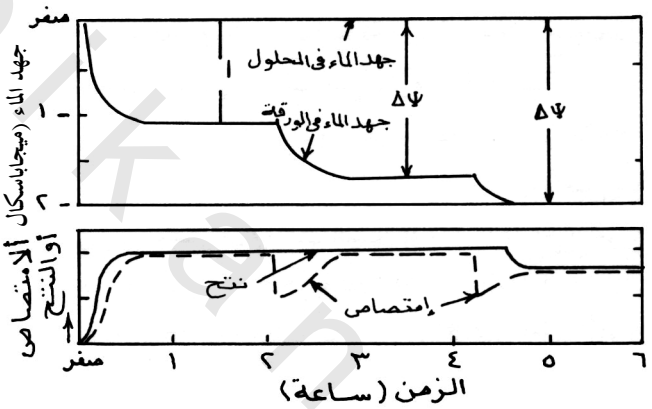
الشكل رقم (٦-١٥). معدل النتح عند اختلاف فتحة الثغر في نبات (*Zebrina*) وذلك في وجود تيار من الهواء (حيث (r_a) تساوي تقريبا ٠,١ ثانية . سم$^{-1}$) وفي الهواء الساكن (حيث (r_a) تساوي تقريبا ٢ ثانية . سم$^{-1}$).

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.

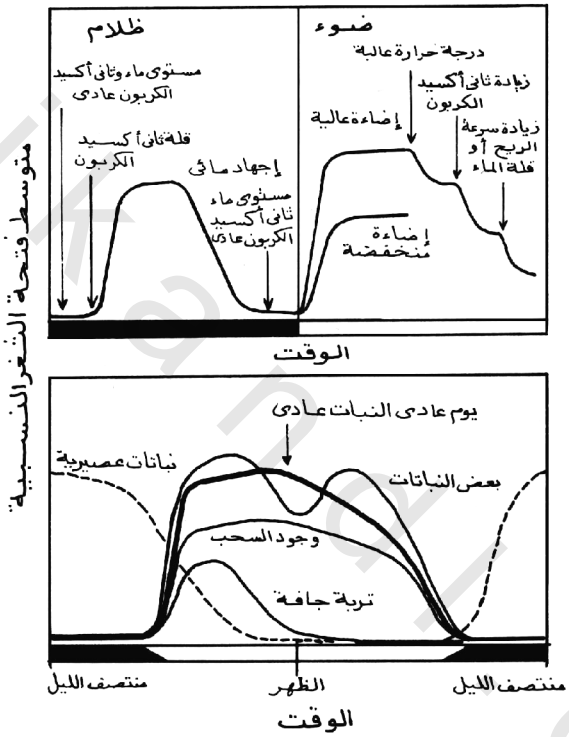


الشكل رقم (٦-١٦). رسم بياني يوضح العلاقة بين معدل الامتصاص والنتح مع الزمن (الرسم السفلي) وجهد الماء في الورقة حيث جهد الماء المحيط بالجذور يساوي الصفر ولذا فإن ($\Delta\Psi$) تمثل الفرق في الجهد إذ يزداد الفرق عندما يقل الامتصاص نتيجة لتبريد منطقة الجذور وزيادة فرق جهد الماء (أي انخفاض جهد الماء في 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.

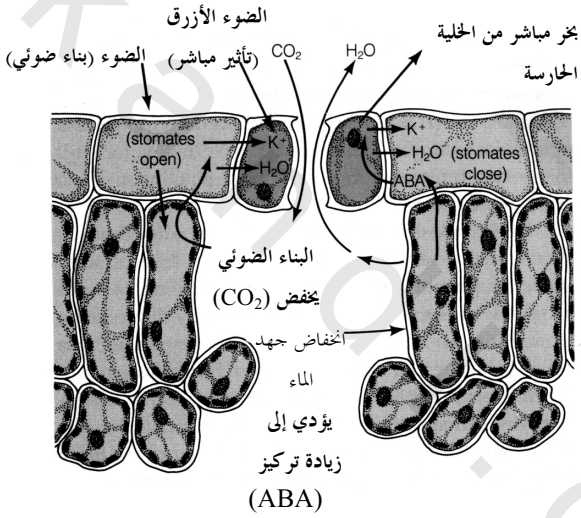
المصدر: (Salisbury and Ross, 1969).

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 $١٠^{-٥}$ 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 والهـــواء، على افتراض أن جهد الماء عند سطح التبخر يساوي صفرا وكذلك التغير في الرطوبة النسبية في الهواء من الممكن إهماله.

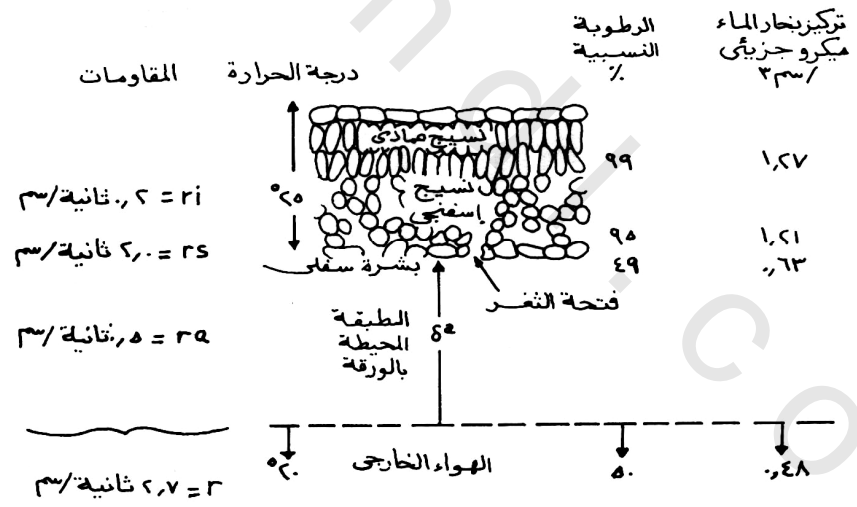
درجة الحرارة (مئوية)	ضغط بخار التشبع (مم زئبق)	ضغط البخار عند ٦٠٪رطوبة نسبية (مم زئبق)	فرق ضغط البخار (Δe) (مم زئبق)
الصفر	٤,٦	٢,٧	١,٩
١٠	٩,٢	٥,٥	٣,٧
٢٠	١٧,٥	١٠,٥	٧,٠
٣٠	٣١,٨	١٩,٠	١٤,٨
٤٠	٥٥,٣	٣٣,٢	٢٢,١

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

وكولر ١٩٦٤م (Whiteman and Koller, 1964) ذكرا أن جهد الماء في ورقة النبات 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.

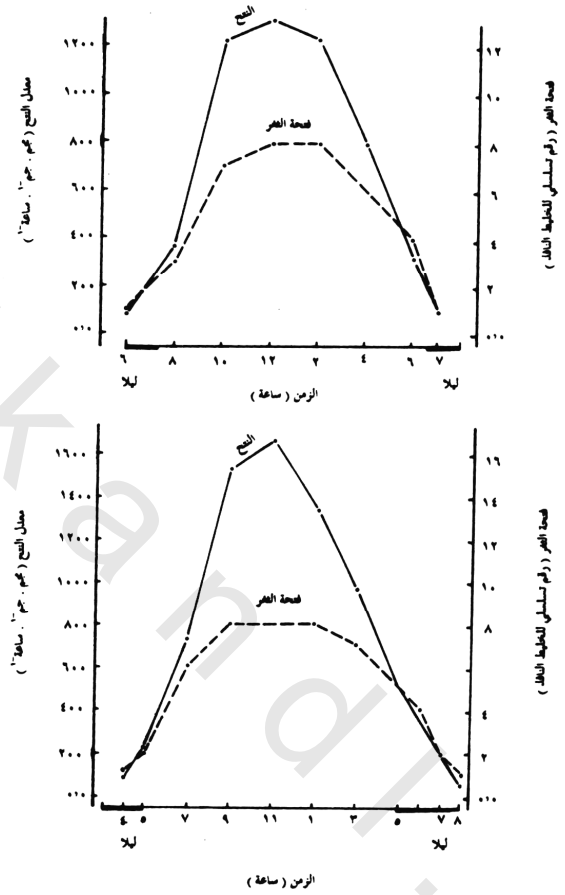
وكمثال لحركة بخار الماء من الورقة نتيجة للعوامل المتداخلة والتي تمثلها معادلة النتح فالشكل التالي (الشكل ٦-١٩) يوضح بعض القيم الممثلة لكل جزء في المعادلة والتي يلزم الحصول عليها عند إجراء مثل هذه الدراسة. ونظرا لأن هناك وحدات مختلفة للتعبير عن كمية بخار الماء المفقودة من وحدة السطح للورقة فقد تكون معاملات 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 بخار 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).

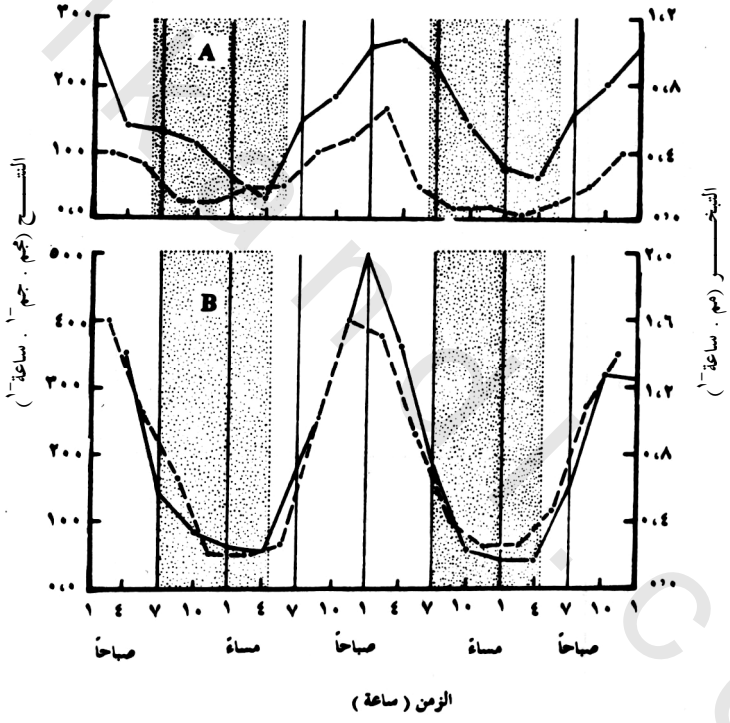


الشكل رقم (٦–٢٠). معدل النتح اليومي وفتحة الثغر لنبات السوس في شهر إبريـــل (A) وفي شهر يونيو (B) وذلك في وادي النطرون في جمهورية مصر العربية يوضح شكل القبة للمنحنى والقمة الوحيدة على التوالي.

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:

$$\mathbf{Jv} = \frac{\Delta\Psi_{s—r}}{r_{s—r}} = \frac{\Delta\Psi_{r—x}}{r_{r—x}} = \frac{\Delta\Psi_{L—A}}{r_{L—A}}$$

حيث إن : (Jv) تدفق الماء

و ($\Delta\Psi_{s—r}$) فرق جهد الماء بين التربة والجذر

و ($r_{s—r}$) المقاومة بين التربة والجذر

و ($\Delta\Psi_{r—x}$) فرق جهد الماء بين الجذر والخشب

و ($r_{r—x}$) المقاومة بين الجذر والخشب

و ($\Delta\Psi_{L—A}$) فرق جهد الماء بين الورقة والهواء

و ($r_{L—A}$) 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	-	- ٠,٣
محلول التربة قرب الجذر	- ٠,٤	- ٠,١	صفر	-	- ٠,٥
سائل الخشب عند سطح التربة	- ٠,٥	- ٠,١	صفر	-	- 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)	٠,٥٥ 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.