

الباب الرابع

الاستهلاك المائي

الاستهلاك المائي للمحصول هو مقدار الماء المفقود من أسطح النبات والأرض النامي عليها بالإضافة إلى مقدار ما يحجز من ماء بالنباتات ويعبر عنه عادة بارتفاع الماء بالبوصات أو المليمترات، كما يعبر عنه بالأمتار المكعبة بالفدان. ويعتبر الماء المترسب نتيجة للندى أو المطر أو الري بالرش بدون دخوله النبات جزءاً من الاستهلاك المائي ويفيد الاستهلاك المائي في حساب الاحتياج المائي (حيث يسمى في الهند) أو المقنن المائي (حيث يسمى في مصر).

ويوجد مصطلح آخر له علاقة بالاستهلاك المائي يعرف بمصطلح النتح والتبخير وهو عبارة عن مقدار الماء المفقود من الأرض بالتبخير والأسطح الخارجية للنبات بالتبخير والنتح حيث يتجمع ماء المطر والندى والإدماج.

ويخلط البعض بين الاصطلاحين النتح والتبخير من جهة والاستهلاك المائي من جهة أخرى. ويتحدد الفارق بينهما في مقدار الماء المحتجز بأنسجة النبات حيث يحتسب هذا المقدار في الاستهلاك المائي دون حسابه في النتح والتبخير، ولما كان مقدار الماء المحتجز في أنسجة النبات لا يتجاوز 1-2% من الماء المفقود أثناء موسم النمو، لهذا فالخلاف في مقدار الماء بين الاستهلاك المائي والنتح والتبخير بسيط الأمر الذي يرى معه بعض الباحثين التجاوز عنه.

يفيد حساب الاستهلاك المائي للمحصول في تحديد الاحتياج المائي أو المقنن المائي للمحصول أو الحقل أو المزرعة أو المشروع أو المنطقة، إذ أن المقنن المائي

للمحصول يساوى حاصل جمع مقدار الاستهلاك المائى ومقدار الفقد الناتج عن الاستخدام كالفقد الناتج عن الانسياب الفائض ومقدار الماء المفقود فى باطن الأرض وكذلك مقدار الاحتياج المائى لعمليات أخرى خلاف هاتين العمليتين. ويعبر عنه بارتفاع الماء فى زمن محدد. ويعبر عن احتياج المحصول للرى بطبقة من الماء تقدر بالمليمتر تحسب فى اليوم أو الشهر أو أى مدة من الزمن ودائماً ما تحول هذه إلى تيار من الماء المستمر بوحدة المساحة وتعبر عنها حينئذ باللتر ثانية للهكتار (٨,٦ مم /يوم = ١/لتر /ثانية /هكتار)، كما يعبر عن واحد مم من الماء للفدان بما يساوى ٤,٢ م^٣ للفدان. وتعرف التوليفة التى تجمع بين عمليتي الذئح والتبخير المنفصلتين بمصطلح بخرنتح (ET) وبهما يتم فقد الماء من سطح التربة والنبات بالتبخير ومن النبات بالنتح.

مكونات مصطلح النتح بخر (ET)

التبخير:

هى العملية التى يتم فيها تحويل الماء من الصورة السائلة إلى بخار وذلك بواسطة طاقة الأشعة الشمسية المباشرة أو طاقة حرارة الهواء المحيط ويتوقف ذلك على الفرق بين الضغط البخارى لسطح التبخير والضغط البخارى للجو المحيط. وتستمر حركة البخار من سطح التبخير إلى الجو المحيط إلى أن يصبح الجو مشبعاً ببخار الماء وعندها تتوقف عملية انتقال البخار، وتنعدم قدرة الهواء المبلل على حمل مزيد من بخار الماء. ويتوقف إحلال الهواء المشبع ببخار الماء بواسطة هواء جاف أساساً على سرعة الرياح، ومن هنا كان لمقاييس الأرصاد الجوية مثل الإشعاع الشمسى، درجة حرارة الهواء وسرعة الرياح أهمية فى تقييم عملية التبخير. وحيث أن سطح التبخير هو سطح الأرض النامى عليها النبات لذلك فإن درجة تظليل المجموع الخضرى للنباتات والماء المتاح على هذا السطح من العوامل الهامة فى التأثير فى عملية التبخير.

النتح:

يتم من خلال فقد ماء أنسجة النبات فى صورة بخار وكذلك البخار الذى يوجد بالمسافات البينية للأوراق ويتم تبادل البخار مع الجو الخارجى عن طريق تحكم النبات

فى فتحات الثغور، يفقد أغلب الماء الممتص بواسطة النبات عن طريق عملية النتح ولا يتبقى سوى جزء يسير للغاية بالأنسجة النباتية يصل إلى ١-٢% من الكمية الممتصة. وتتماثل العوامل المؤثرة على عملية النتح مع العوامل المؤثرة على عملية التبخير من حيث الطاقة، حيث يحدث تدرج فى نقص الضغط البخارى من المناطق مرتفعة الضغط البخارى إلى المناطق منخفضة الضغط البخارى، ويكون تأثير الإمداد بالطاقة كبير على حركة الرياح. وبذلك تصبح عوامل الأرصاد الجوية من إشعاع شمسي، درجة حرارة الهواء والرياح من العوامل ذات التأثير الكبير فى عملية النتح والتي ينبغى أخذها فى الإعتبار. إلا أنه هناك عوامل أخرى مهمة لا يمكن تجاهلها مثل محتوى الأرض من الرطوبة، قدرة التربة على إمداد الجذور بالماء (ملوحة ومستوى الماء الأرضي)، خصائص ومرحلة نمو المحصول ورعايته، العوامل البيئية الأخرى والعمليات الزراعية.

العوامل الجوية المستخدمة فى تقدير معدل النتح بخر

أولاً- الإشعاع الشمسي Solar radiation

تقدر عملية النتح بخر بكمية الطاقة الميسرة لتبخير الماء. وتعتبر أشعة الشمس أكبر مصدر للطاقة بالعالم والقادرة على تحويل كميات هائلة من السوائل المائية إلى بخار ماء ويتوقف ذلك على كمية الإشعاع الساقط الذى يختلف تبعاً للمكان من خطوط العرض وفصول السنة نتيجة لموقع الشمس.

إن الإشعاع الشمسي الحقيقي الذى يصل إلى سطح التبخير يعتمد على درجة صفاء الجو ووجود السحب التى تعكس وتمتص أجزاء كبيرة من هذا الإشعاع. وعند تقييم الإشعاع الشمسي على عملية النتح بخر ينبغى الأخذ فى الاعتبار عدم صلاحية استعمال الطاقة المتاحة لتبخير الماء حيث يستخدم جزء من الطاقة الشمسية فى تسخين الغلاف الجوى وقطاع الأرض.

تسقط الأشعة الشمسية على سطح الكرة الأرضية مسببة الإشعاع الشمسي وتحدد كثافة الإشعاع الشمسي بمقدار الزاوية التى يصنعها مع سطح الغلاف الجوى وتتغير هذه الزاوية أثناء النهار وتبعاً لاختلاف خطوط العرض وفصول السنة.

وهناك ثلاثة مصطلحات يمكن التعرف عليها فى هذا الصدد: وهى ١- ثابت الإشعاع الشمسى Solar constant وهو عبارة عن الطاقة التى تسقط على سطح عمودى لقمة الغلاف الجوى للأرض، ٢- إشعاع الأرض الزائد Extra terrestrial radiation (R_0) وهو عبارة عن الإشعاع الشمسى الذى يستقبله السطح الأفقى للغلاف الجوى، ويتساوى ثابت الإشعاع الشمسى للأرض مع إشعاع الأرض الزائد ويكون مساوياً للقيمة $0,082$ ماجور جول / m^2 /دقيقة حينما تكون زاوية سقوط الأشعة الشمسية مساوية للصفر (أى تكون الشمس فى وضع عمودى مباشر على الأرض)، ٣- ألبيدو (α) وهو عبارة عن الإشعاع المنعكس من الإشعاع الواصل إلى سطح الأرض.

وبمجرد تخلل الإشعاع الشمسى للغلاف الجوى تتبعثر الأشعة أو تنعكس أو تمتص بواسطة غازات الغلاف الجوى والسحب والأتربة. ويطلق على كمية الأشعة التى تصل إلى أفق كوكب الأرض بالإشعاع الشمسى R_0 .

- طبيعة الطاقة الشمسية

تتطلق الطاقة المنبعثة من الشمس بواسطة موجات كهرومغناطيسية تتميز بموجات قصيرة لذلك فإن الإشعاع الشمسى يشير إلى الإشعاع كموجات قصيرة. وفى حالة صفاء الجو فإن الإشعاع الشمسى يبلغ ٧٥% داخل الغلاف الجوى من الإشعاع الأرضى الزائد، وعند وجود السحب الكثيفة يتم انعكاس قدر كبير من الإشعاع الواصل إلى سطح الغلاف الجوى إلى الحد الذى يصل إلى انعكاس ٧٥% من الإشعاع الأرضى الزائد ويتوقف ذلك بدرجة كبيرة على طبيعة السطح وزاوية سقوط الأشعة وكذلك انحدار سطح الأرض وقد يصل هذا الإشعاع المنعكس (ألبيدو α) فى حده الأعلى إلى ٩٥، عند تساقط الجليد حديثاً أو إلى حده الأدنى ٥، فى الأرض العالية المبللة بالماء، وتبلغ قيمته للسطح المغطى بالكساء الأخضر مقدراً يتراوح ما بين ٢٠، إلى ٢٥، ولقد أعتبر مساوياً ٢٣، لمسطح قياسى لعشب أخضر. ويعرف الإشعاع الشمسى بإشعاع الكون وهو عبارة عن مجموع إشعاع الموجات القصيرة المباشرة من الشمس وإشعاع السماء المنتشر من جميع الزوايا العلوية.

ويتحول الإشعاع الشمسى الممتص بواسطة الأرض إلى طاقة حرارية تُفقد من خلال انبعاثها من الأرض في صورة موجات طويلة تُمتص بواسطة الهواء الجوى أو تُفقد في الفضاء وبذلك تعمل على رفع درجة حرارة الغلاف الجوى، وعلى ذلك فإن محصلة اكتساب الأرض للحرارة وفقدانها للموجات الطويلة والقصيرة يُعبر عنها بصافى الإشعاع الذى يكون موجباً أثناء النهار وسالباً أثناء الليل والنتيجة تكون بالزائد على مدار اليوم إلا في الظروف الشاذة عند خطوط العرض المرتفعة حيث تكون بالسالب لوجود الجليد. وتقدر عملية النتج بخر بكمية الطاقة التى تلزم لتبخير الماء وتعتبر لذلك أشعة الشمس أكبر مصدر للطاقة والقادرة على تحويل الكميات الكبيرة من المياه إلى بخار ماء، وكما سبق القول يتحكم في هذه الطاقة مكان وزمان تواجدتها أثناء السنة وينبغى التأكيد على أن جزءاً فقط من الطاقة الإشعاعية للشمس تستخدم لتسخين الهواء وقطاع الأرض.

ويعبر عن الطاقة الشمسية أو الإشعاع الشمسى بوحدات من ميغا جول / م²/يوم وهذه تحول إلى ما يكافئها من بخار بوحدات من مم /يوم باستخدام معامل تحويل يساوى مقلوب الحرارة الكامنة لحرارة التبخير (1/λ = 0,408)، أى أن:

$$\text{مكافئ التبخير (مم /يوم)} = 0,408 \times \text{الإشعاع (ميغا جول /م}^2\text{/يوم)}$$

ويمكن قياس الإشعاع الشمسى بواسطة جهاز Radiometer، Pyranometer،

Solarmeter

ثانياً- درجة حرارة الهواء

ترتفع درجة حرارة الهواء نتيجة لامتنصاص الإشعاع الشمسى وللانبعاثات الحرارية للأرض ويقوم الهواء المحيط بالنبات بنقل الطاقة الحرارية إلى المحصول حيث تتحكم الحرارة في معدل النتج بخر ويزداد في الأجواء الدافئة المشمسة عن الأجواء الباردة ذات السحب.

وتقاس درجة حرارة المحصول في الهواء عند مستوى المجموع الخضرى على حين تقاس بمحطات الأرصاد على ارتفاع ٢ م وداخل ساتر يحمى الأجهزة من التعرض المباشر لحرارة الشمس في نفس الوقت الذى يسمح بحركة الهواء حرأ حول

الأجهزة ويقاس الحد الأدنى والأقصى لدرجة حرارة الهواء على مدار ٢٤ ساعة خلال اليوم أو الأسبوع بقياسها كل دقيقة ثم تحسب كمتوسط لليوم.

وتقدر درجة الحرارة بوحدات من الدرجات المئوية (سيلسيوس) وفهرنهايت أو كالفن حيث أن:

$$- \text{درجة الحرارة المئوية (سيلسيوس) } ^\circ\text{م} = (^\circ\text{ف} - 32) \times \frac{5}{9}$$

$$- \text{درجة الحرارة الفهرنهايتية } ^\circ\text{ف} = 32 + \frac{9}{5} \times ^\circ\text{م}$$

$$- \text{درجة حرارة كالفن } \text{K} = ^\circ\text{م} + 273,16$$

ثالثاً- الرطوبة الجوية

يمكن التعبير عن محتوى الرطوبة الجوية بعدة مصطلحات وأكثر المصطلحات شيوعاً هي مصطلحات الضغط البخارى، والرطوبة الجوية عند درجة حرارة نقطة الندى، والرطوبة النسبية.

- الضغط البخارى: هو عبارة عن الضغط الناشئ عن تشبع وسط ما ببخار الماء أو السائل عند درجة حرارة معينة وحجم معين، وهو كذلك ضغط البخار الذى يكون فى حالة اتزان مع السائل المنتج له أو إن شئت قل عند ما يقف البخر الظاهرى للسائل ويزداد بارتفاع درجة الحرارة. توجد علاقة مباشرة بين كمية الماء بالهواء والضغط الجزئى الناشئ من بخار الماء بالهواء وعلى ذلك فإن الضغط البخارى يقيس مباشرة محتوى الرطوبة بالهواء.

ويمكن قياس الضغط البخارى بطريقة غير مباشرة عن طريق جهاز السيكروميتر Psychrometer والتي تعتمد فكرته على قياس الفرق بين عدد ٢ ترمومتر أحدهما يغطى مستودعه بفتيل مشبع بالماء والآخر يُترك مستودعه فى الهواء الجاف ويقال أن الهواء تشبع ببخار الماء حينما تتوقف جزيئات الماء عن التحرك من وإلى الهواء الموجود فى حيز مغلق فوق سطح مائى يتم تبخير الماء منه. ويطلق على نقص الضغط البخارى أو نقص التشبع ببخار الماء بأنه الفرق بين الضغط البخارى عند تشبع الهواء ببخار الماء والضغط البخارى عند عدم التشبع ويعتبر ذلك دليل دقيق لقياس قدرة الهواء غير المشبع ببخار الماء على التشبع به.

ويُقاس الضغط البخارى بوحدات من سم أو مم زئبق، بار أو ضغط جوى أو بسكال ويمكن تحويل هذه الوحدات بسهولة إلى بعضها البعض وتستخدم فى معادلات النتج بخر وحدة بسكال Pascal (Pa) وهى قوة ضعيفة (واحد نيوتن) والواقعة على سطح كبير نسبياً (واحد م²) x الوحدات الأساسية المستخدمة وهى الكيلو حيث يعبر عن الضغط البخارى بوحدات من بسكال كيلو حيث أن (kPa=1000 Pa).

- درجة حرارة نقطة الندى: هى درجة الحرارة اللازمة لتبريد الهواء المشبع ببخار الماء للوصول إلى نقطة الندى ويعتبر الضغط البخارى الفعلى للهواء هو درجة حرارة نقطة الندى وذلك عند تشبع الهواء ببخار الماء.

- الرطوبة الجوية النسبية: هى عبارة عن النسبة المئوية لضغط البخار الفعلى للهواء (e_a) بالنسبة لضغطه فى حالة التشبع ببخار الماء فى نفس درجة الحرارة.

وبالرغم من الثبوت النسبى للضغط البخارى الفعلى إلا أن الرطوبة الجوية النسبية تتغير على مدار اليوم حيث تصل أقصاها قرب شروق الشمس وأدناها حول منتصف النهار وتُقاس مباشرة بجهاز الهيجروميتر Hygrometer.

تتوقف حركة بخار الماء فى الهواء على الفرق بين ضغطه البخارى عند الأسطح التى تتم عندها عملية النتج بخر والهواء المحيط بهذه الأسطح، فكلما زاد هذا الفرق كلما ازدادت حركة هذا البخار وفى المناطق الجافة المرتفعة الحرارة تصبح الرطوبة قليلة مما يودى إلى استهلاك قدر كبير من الماء لتوافر قدر كبير من الطاقة فى الحقول ذات المحتوى المائى المرتفع وفى ظل المناطق الاستوائية الرطبة لا تتمكن الطاقة المرتفعة هناك من استهلاك الرطوبة الجوية لإتمام عملية النتج بخر حيث يصل الهواء لدرجة التشبع بالرطوبة وعند إضافة المزيد من المياه يتم تخزينها مع انخفاض معدل النتج بخر مقارنة بالمناطق الجافة.

ونظراً لأن بيانات الرطوبة الجوية لا تتبع معادلة من الدرجة الأولى التى تتطلبها معادلة بنمان- مونتث (منظمة الأغذية والزراعة التابعة للأمم المتحدة) من ذلك تحسب بيانات الرطوبة كمتوسط للضغط البخارى بين درجة الحرارة العظمى والدنيا لليوم أو للمدة المطلوبة ويبدأ القياس من منتصف الليل وتقسّم القيمة على عدد أيام الفترة حتى يتسنى استخدام متوسط درجة الحرارة فقط فى حساب منحنى تشبع الضغط البخارى

(Δ) مع متوسط كثافة الهواء (ϵ_a) حيث يكون تأثير الخلافات فى درجة الحرارة على قيم المناخ قليل.

رابعاً- سرعة الرياح

تتميز الرياح باتجاهها وسرعتها حيث يشير الاتجاه إلى المكان الذى تتبعته منه وعادة ما تكون السرعة متغيرة حيث يتم ذلك من وقت إلى آخر لذلك تقدر سرعتها كمتوسط لفترة زمنية معينة. وتقاس سرعة الرياح بالمتري فى الثانية (م ث^{-1}) أو كيلومتر فى اليوم (كم يوم^{-1}) وتقاس سرعة الرياح بجهاز يعرف باسم أنيموميتر Anemometer.

خامساً- الضغط الجوى

عبارة عن الضغط الناشئ من وزن هواء الأرض، يزداد التبخير فى المناطق المرتفعة نتيجة لانخفاض الضغط الجوى كما يعبر عنه ثابت السيكروميتر عند درجة حرارة ٢٠م°، ويستخدم ارتفاع المكان للدلالة على قيمة الضغط الجوى تبعاً للمعادلة التالية:

$$P=101.3\left(\frac{293-0.0065z}{293}\right)^{5.26}$$

حيث أن:

P: الضغط الجوى (كيلو بسكال) [kPa] Atmospheric pressure

z: مستوى الإرتفاع عن سطح البحر (م) [m] Elevation above sea level

سادساً- الحرارة الكامنة للتبخير: (λ) Latent heat of vaporation

الحرارة الكامنة هى الطاقة اللازمة لتغيير وحدة الكتل من الماء من الصورة السائلة إلى الصورة البخارية تحت درجة حرارة وضغط ثابت وتختلف قيمها تبعاً لاختلاف درجة الحرارة إلا أن هذا الاختلاف يكون ضئيل تحت ظروف درجة الحرارة العادية لذلك تعتبر قيمة الحرارة الكامنة للتبخير حينما يكون المدى من درجات الحرارة طبيعى مساوياً للقيمة ٢,٤٥ ميغاجول كجم⁻¹ فى درجة حرارة ٢٠ م° وهى

القيمة التي تستخدم في حساب معادلة بنمان- مونتث لمنظمة الأغذية والزراعة التابعة للأمم المتحدة.

سابعاً- ثابت السيكروميتر

تقدر قيمة ثابت السيكروميتر بالمعادلة التالية:

$$\gamma = \frac{c_p P}{\epsilon \lambda} = 0.665 \times 10^{-3} P$$

حيث أن :

γ : ثابت السيكروميتر (كيلو بسكال م⁻¹ °C⁻¹) [kPa °C⁻¹] Psychrometric constant.

P: الضغط الجوي (كيلوبسكال) [kPa] Atmospheric pressure.

λ : الحرارة الكامنة للتبخير ٢,٤٥ (ميجاجول كيلو⁻¹) Latent heat of vaporization, 2.45 [MJ kg⁻¹].

c_p : الحرارة النوعية عند ضغط ثابت، ١,٠١٣^{-١٠} (ماجورجول كيلو⁻¹ م⁻¹ °C⁻¹) Specific heat at constant pressure, 1.013 10⁻³ [MJ kg⁻¹ °C⁻¹].

ϵ : نسبة وزن جزيئات بخار الماء بالنسبة للهواء الجاف = 0,622 Ratio molecular weight of water vapour/dry air = 0.622.

ثامناً- الحرارة النوعية

تعرف الحرارة النوعية تحت ضغط ثابت بأنها الطاقة اللازمة لرفع درجة حرارة وحدة الكتل من الهواء درجة واحدة مئوية عند ضغط معين. تتوقف قيمتها على محتوى الهواء من الرطوبة وتقدر القيمة بوحدات من ماجورجول كيلو⁻¹ م⁻¹ °C⁻¹ وتساوى ١,٠١٣^{-١٠} كمتوسط لعوامل المناخ وعند استعمال الضغط الجوي لكل موقع يظل ثابت السيكروميتر ثابتاً لكل موقع.

العوامل المؤثرة على الإستهلاك المائي والمقنن المائي

لقد ظل الاعتقاد بأن لكل محصول احتياجاته المائية الخاصة به (المقنن المائي) قائماً إلى أن أقام بنمان بمحطة روثامستد للتجارب الزراعية بهربندن بإنجلترا نظريته

الخاصة بتساوى الاحتياجات المائية للحاصلات المختلفة تقريبا عند نموها فى نفس الأرض ونفس موسم النمو. وتشير الدراسات المتأنية بأن الاختلافات فى المقننات المائية ترجع إلى واحد أو أكثر من العوامل التالية:

١- الاختلاف فى طول فصل النمو: يزداد مقدار الإستهلاك المائى بازدياد طول فصل النمو إذ تزداد الفترة التى تستهلك فيها النباتات الماء المتجمع المفقود بالنتح والتبخير بازدياد طول فصل النمو.

٢- النمو فى أوقات مختلفة من العام حيث تختلف الظروف الجوية: حيث تمتص النباتات الماء الذى يتدفق فى حركة مستمرة من الأرض إلى الجذر إلى أعلى النباتات إلى خارجه عن طريق الأوراق أساسا. تتراوح سرعة تدفق الماء ما بين ٦-١ أقدام فى الساعة، وتزداد سرعة تدفق هذا التيار من الماء فى الضوء وبارتفاع درجة الحرارة وبانخفاض ضغط البخار بالجو عن ضغط البخار بين خلايا الورقة وبازدياد سرعة الرياح.

٣- الاختلاف فى نوع الأرض التى تنمو فيها المحاصيل: تختلف الحاصلات فيما بينها فى أنواع الأراضي التى تزرع بها، فتزرع بعض الحاصلات فى أراضي ثقيلة ويزرع البعض الأخر فى أراضي خفيفة يتسرب منها الماء بسهولة. ويزداد المقنن المائى للحاصلات فى مثل هذه الأراضي ذات التسرب المائى السهل.

٤- الاختلاف فى الأساليب الزراعية: حيث تؤثر الأساليب الزراعية تأثيراً كبيراً على الإستهلاك المائى إذ يتساوى مقدار الماء المفقود بالتبخير من سطح الأرض مع التبخير من سطح مائى حينما يكون مستوى الماء قريبا من سطح الأرض، ويقل مقدار الماء المفقود بالتبخير إلى أن يصبح كماً مهماً بابتعاد مستوى الماء الأرضى عن سطح الأرض حيث لا يصل ماء بالخاصة الشعرية إلى سطح الأرض. ويشير ذلك إلى أهمية تأثير نظام رى المحاصيل على مقدار الإستهلاك المائى لها.

يفقد جزء كبير من الماء بالتبخير من الأرض عند إتباع الرى بالغمر كما يفقد جزء من ماء المطر المحتجز على أسطح الأوراق بعد المطر بالتبخير. ولا تنفذ قطرات المطر فى حالة الرخات التى لا تزيد عن ٠,١ بوصة إلى عمق كافٍ يسمح للنبات بامتصاصه وبالتالي استخدامه فى عملية النتح. ويمكن القول أنه تحت الظروف

العادية يستخدم الماء المتبخر مباشرة من الأرض أو الأوراق استخداماً مفيداً إذ يقل مقدار الماء اللازم فقده في عملية النتح بنقص مقدار الماء المفقود في التبخير وذلك في حالة وجود محصول بالغ النمو على سطح الأرض. وفي أول ونهاية فصل النمو لا ينتج النبات كثيراً، لهذا ففي الأرض الرطبة يزيد مقدار الماء المفقود حينئذ بالتبخير من سطح الأرض بافتراض ثبات الظروف الجوية.

طرق تقدير الاستهلاك المائي

تتعدد الطرق المستخدمة في تقدير الاستهلاك المائي ويمكن تقسيم هذه الطرق إلى مجموعتين رئيسيتين وهما: الطرق المباشرة وطرق الحساب بمعادلات عملية.

أولاً- الطرق المباشرة

تتعدد الطرق المباشرة لتقدير الاستهلاك المائي والتي أهمها ما يأتي: تجارب الليزمتر والأحواض، التجارب الحقلية، التدفق إلى ومن المساحات الواسعة.

أ- تجارب الليزمتر والأحواض:

تعتبر هذه الطريقة من أدق الطرق في تقدير الاستهلاك المائي للمحصول وذلك في حالة سلامة الإجراء ولاسيما في ظروف المطر الغزير إذ أن الخطأ المحتمل الناشئ عن زيادة الصرف في الطرق الأخرى كبير. ويؤخذ على هذه الطريقة بعض المآخذ: ١- عدم تمثيل ظروف الكساء الخضري ورطوبة الأرض بالليزومتر أو الحوض أحياناً مثيلاتها في المحصول المحيط إذ لا تمثل ظروف الليزمتر أو الحوض الظروف الطبيعية للأرض، ٢- زيادة المساحة التي تغطيها الأوراق الفعالة التي تعترض الإشعاع الشمسي والتي تفقد الماء بالنتح عن سطح الليزمتر أو الحوض أحياناً وفي عبارة أخرى قد يمتد المجموع الخضري لأبعد من محيط الليزمتر.

ب- التجارب الحقلية:

يمكن تقدير الاستهلاك المائي بطريق مباشر بإجراء التجارب الحقلية ولعل من أهمها ما يلي:

١- علاقة كمية المحصول بمقادير الماء المضافة على فترات: يعتبر الإستهلاك المائي أكبر جزء في الاحتياج المائي لأى من محاصيل الحقل ويلجأ بعض الباحثين إلى إجراء تجارب حقلية لتحديد المقنن المائي الأمثل أو الاحتياج المائي للمحصول حيث يقوم الباحث بإضافة الماء بارتفاع معين مثلاً ١٥٠، ٢٠٠، ٢٥٠، ٣٠٠ مم على فترات مثل ٢، ٣، ٤ أسابيع وتؤخذ معاملة الري التى تعطى أكبر محصول مع استخدام أقل قدر من الماء كأمثل احتياج مائي لهذا المحصول. ولعل أهم معوقات استخدام هذا الإتجاه: ١- الاختيار الإئتاقى لمقادير الماء المضافة مما ينشأ عنه إما رى قليل أو رى زائد، ٢- الاختيار الإئتاقى لفترات الري مما ينشأ عنه رى مبكر أو رى متأخر وهكذا يتأثر المحصول بزيادة الماء فى فترة معينة من حياته ونقصها فى فترة أخرى، ٣- عدم قياس مقدار الري حقيقة فى بعض التجارب، ٤- عدم تسجيل بيانات عن المطر الفعال ومستوى الماء الأرضى وما يساهم به وكفاءة الري ونوع الأرض وعدد النباتات. وقد يؤدى ما سبق ذكره لا إلى تحديد إتباع هذا المنهج بل إلى الوقوع فى أخطاء.

٢- رفع مقدار الماء بالأرض للسعة الحقلية بعد استنفاد قدر معين من الماء الميسر: لقد حدث تحسين لطريقة دراسة العلاقة بين كمية المحصول بمقادير الماء المضافة على فترات بتحديد مقادير الماء المضافة فى الري على أساس نقص الماء الأرضى. وينبغى فى هذه الطريقة تحديد السعة الحقلية والكثافة الظاهرية للطبقات المتتالية لقطاع الأرض لحساب نقص رطوبة الأرض حسباً للمعادلة التالية:

$$\text{مقدار نقص الرطوبة} = \frac{\text{نسبة السعة الحقلية} - \text{نسبة المحتوى الحقيقى للرطوبة} \times \text{الكثافة الظاهرية} \times \text{عمق قطاع الأرض (مم)}}{100} = \text{بقطاع الأرض (مم)}$$

ويمكن تصحيح صافى النقص فى مجال الجذر بمقدار كفاءة الري التى تعطى عمق الماء اللازم إضافته فى كل رية. والماء بالأرض غير ميسر للامتصاص بدرجة متساوية فى مدى الرطوبة الميسرة من السعة الحقلية إلى مجال الذبول،

وهكذا يتأثر المحصول قبل وصول رطوبة الأرض إلى مجال الذبول. وهكذا تثبت فترات الري عند مدى الاستنفاد في مجال الماء الميسر لتحديد أنسب نظام ري. وتقاس درجة استنفاد رطوبة الأرض بعلامات مختلفة مثل نسبة التيسر والتوتر والإجهاد الرطوبي.... إلخ. تروى النباتات حينما تصل نسبة الرطوبة بمجال الجذر درجة الجفاف المرغوبة وهذا المنهج ملائم في جميع الأغراض العملية. ويمكن حساب الاحتياج المائي (المقنن المائي) بهذا التكنيك. ويؤخذ على هذا التكنيك الحاجة إلى أجهزة قد تكون مكلفة، كما أن أخذ عينات في جميع مجالات تعمق الجذر عملية صعبة وتأخذ وقتاً طويلاً.

يمكن إضافة الماء المستنفذ من الأرض بدقة لرفع مقدار ماء الأرض إلى السعة الحقلية باستخدام العدادات أو الهدارات أو ضخ الماء بقدر معين من حجرات ممثلة بالماء بالاستعانة بأنايب بيانية.

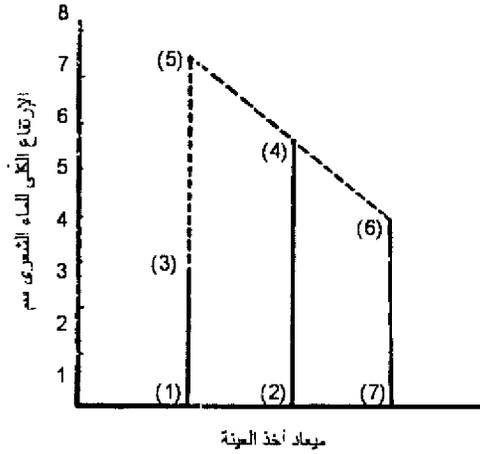
وعموماً فعند استخدام هذا التكنيك يلزم أن يُؤخذ في الاعتبار الاحتياطات التالية:

- 1- ينبغي أن تكون مواقع العينات ممثلة للظروف العامة للحقل تمثيلاً جيداً،
- 2- ينبغي أن يكون عمق قطاع الأرض الذي يشعب بالماء أكبر كثيراً من عمق مجال الجذور،
- 3- ينبغي أن يكون الصرف قليلاً وذلك باستخدام رية قبل الزراعة بنحو 20-30 يوماً أو/و تنظيم الري لإضافة ماء أقل مما يُحجز في نطاق مجال الجذر الفعال والانتظار لمدة يومين على الأقل بعد الري العادي الخفيف قبل الحصول على أول عينة (يحتاج الأمر إلى فترات أطول إذا تضمنت الدراسة رياً غزيراً أو مستويات ماء مرتفعة) وكذلك حينما يكون النتج والتبخير صغيراً وكذلك استخدام عمق مجال الجذر الفعال فقط.

- 3- دراسات رطوبة الأرض: لقد أمكن تقدير الاستهلاك المائي لعدد من المحاصيل بإجراء تجارب حقلية بتقديرات رطوبة الأرض قبل وبعد الري أثناء حياة المحصول. وتلائم هذه الطريقة المساحات التي تتميز بالتجانس وبُعد مستوى ماء الأرض لدرجة عدم التأثير على تأرجح رطوبة الأرض في مجال الجذر. وينبغي أخذ عدد كبير من العينات للحصول على الدقة المطلوبة.

ويمكن حساب الإستهلاك المائى لليوم والفترة كالتالى:

- قدر رطوبة الأرض قبل الري مباشرة.
- قدر رطوبة الأرض بعد الري.
- قدر رطوبة الأرض قبل الريه التالية مباشرة.
- عبر عن الرطوبة فى صورة أطوال بالسّم وأرسم شكلا بيانيا تستعين به لتقدير مقدار الإستهلاك المائى (شكل ١-٤)



شكل (١-٤): رسم تخطيطى لحساب الإستهلاك المائى بتقدير الماء بالأرض فى الفترات

حيث أن:

- النقطة (١)، (٢)، (٧) على المحور السينى تشير إلى ميعاد أخذ العينة قبل الري مباشرة وبعد الري وقبل الريه التالية على الترتيب.
- يشير العمود ١-٣ إلى العمق المكافئ لرطوبة الأرض قبل الري مباشرة.
- يشير العمود ٢-٤ إلى العمق المكافئ لرطوبة الأرض بعد الري.
- يشير العمود ٧-٦ إلى العمق المكافئ لرطوبة قبل الريه التالية.
- يُمد خط من النقطة (٦) إلى النقطة (٤) ليقابل امتداد العمود ١-٣ عند النقطة (٥).
- يشير الفرق بين ارتفاع العمود ٢-٤ والعمود ١-٣ إلى مقدار الزيادة فى محتوى الماء الشعري نتيجة الري.
- ويشير الفرق بين ارتفاع العمود ٧-٦ والعمود ٢-٤ إلى مقدار الماء المستنفذ فى الفترة الممتدة من (٢) إلى (٧) أى من بعد الري إلى قبل الريه التالي.

ولما كانت النباتات تستهلك قدرأ من الماء أثناء الفترة القصيرة الممتدة من قبل الريّة الأولى مباشرة إلى بعد الري وبافتراض تساوى استخدام الماء بمعدل واحد أثناء هذه الفترة، لهذا يحسب مقدار الماء الكلى الذى أستهلكه النبات فى الفترة الممتدة من (٢) إلى (٧)، أى فى الفترة من قبل الري مباشرة إلى قبل الريّة التالية بطرح مقدار ارتفاع العمود ٧-٦ من مقدار العمود ١-٥ ويحسب مقدار الاستهلاك المائى اليومى بالسّم بقسمة المقدار المستفد من الماء من قبل الري مباشرة إلى قبل الريّة التالية على عدد الأيام لهذه الفترة. كما يمكن حساب الاستهلاك المائى أثناء الفترات المختلفة لمواسم النمو بنفس الطريقة.

ثانياً- المعادلات العمليّة Empirical Equations

تستخدم هذه المعادلات فى حساب الإحتياج المائى للمحاصيل المختلفة منذ منتصف القرن التاسع عشر معتمدة فى ذلك على العوامل المناخية التى تتباين من منطقة لأخرى. ولما كانت المحاصيل تتباين فى مراحل النمو، طول موسم النمو، والعوامل المناخية اللازمة، من هنا تتعدد المعادلات المستخدمة فى حساب الإحتياج المائى، ويتم بواسطة تقدير معدل النتح والتبخير المقارن ET_0 ومعامل المحصول K_c (معدل النتح والتبخير يساوى حاصل ضرب معدل التبخير والنتح المقارن فى معامل المحصول). ويعبر عن معدل النتح والتبخير لمسطح كثيف من العشب الأخضر grass يتراوح طوله ما بين ٨-١٥ سم متماثلاً فى الارتفاع والنمو الجيد ويظل سطح التربة جيداً ولا يعانى من نقص الماء. ويتم ذلك من خلال ما يأتى:

١- معادلة بلانى وكريدل Blaney & Criddle: وفيها يتم التقدير بتوافر درجة حرارة الهواء فقط.

٢- معادلة الإشعاع Radiation: وتُطبق المعادلة فى المساحات التى تسمح بتقدير درجة حرارة الهواء والإشعاع الشمسى والسحب وليس سرعة الرياح ورطوبة الهواء.

٣- معادلة بنمان المعدلة Modified penman: وتقدم هذه المعادلة أحسن النتائج فى التنبؤ بمعدل النتح بخر للمحصول بأقل الأخطاء الممكنة.

٤- وعاء البخر Pan evaporation.

وفي هذه المعادلات يتم القياس لفترة تمتد من ٣٠-١٠ أيام بمتوسط يمثل هذه الفترة وتكون القيمة محسوبة بالمم يوم^{-١} وليست قيم محسوبة لليوم أو الساعة. ويتم اختيار المعادلة المناسبة تبعاً لتوافر بيانات المناخ والدقة المطلوبة تبعاً للجدول (٤-١).

جدول (٤-١): بيانات المناخ المطلوبة لتقدير المعادلات العملية

الطريقة	الحرارة	الرطوبة	الرياح	سطوع الشمس	الإشعاع	البخر	البيئة
بلاني وكريدل	*	x	x	x			x
الإشعاع	*	x	x	*	*		x
بنمان المعدلة	*	*	*	*	#		x
وعاء البخر		x	x			*	*

*: بيانات مقاسة، x: بيانات مقدرة، #: بيانات ماثحة وغير ضرورية (FAO,1984)

وتختلف دقة القياس من طريقة لأخرى حيث أن طريقة بنمان المعدلة تقدم أحسن النتائج حيث يصل الخطأ القياسي $\pm 10\%$ في فصل الصيف، وأكبر من 20% تحت ظروف انخفاض معدل التبخير، يليها في ذلك طريقة وعاء التبخير 15% معتمدة في ذلك على موقع الوعاء. وتصل طريقة الإشعاع إلى أكثر من 20% في فصل الصيف، وينصح باستخدام طريقة بلاني وكريدل فقط في شترات تتراوح ما بين شهر أو أكثر في ظروف خطوط العرض التي تتميز بمناطقها بارتفاع كل من الرطوبة وسرعة الرياح.

وهناك معادلة خامسة تسمى معادلة بنمان- مونتث Penman- Monteth سيأتي الحديث عنها في نهاية هذا الباب.

وكما هو واضح فإن مصطلح النتح بخر (ET) هو المستخدم في حساب الاحتياج المائي إذ تحدث عمليتي النتح والبخر متزامنتين بحيث يصعب التمييز بينهما. عندما يكون المحصول صغير يتم فقد أغلب الماء من خلال عملية التبخير حيث أن 100% تقريبا من البخر نتح تأتي من عملية التبخير وبمجرد تقدم المحصول في العمر وتمام عملية تغطية المجموع الخضرى للأرض تصبح عملية النتح العملية الأساسية حيث تساهم بأكثر من 90% من عملية البخر نتح عند اكتمال المجموع الخضرى. وعادة ما يعبر عن النتح بخر بالوحدات التالية:

- مم/وحدة الزمن (ساعة، يوم، شهر، فترة النمو، سنة)، ويعبر عن معدل البخرنتح بعمق الماء الذي يُفقد من سطح المحصول فمثلاً: عند فقد ١مم (٠,٠٠١ م) من مساحة هكتار (١٠٠٠٠ م^٢) فهذا يعنى فقد ١٠ م^٣ للهكتار وبتعبير آخر فإن ١مم يوم^{-١} يكافىء ١٠ م^٣ هكتار^{-١} يوم^{-١}.

وبنفس الطريقة يمكن حساب فقد ١ مم (٠,٠٠١ م) من مساحة فدان (٤٢٠٠ م^٢) فهذا يعنى فقد ٤,٢ م^٣ للفدان وبتعبير آخر فإن ١مم يوم^{-١} يكافىء ٤,٢ م^٣ فدان^{-١} يوم^{-١}.

- كذلك يمكن التعبير عن عمق الماء بمقدار الطاقة بوحدة المساحة. وهذه الطاقة تشير إلى الحرارة اللازمة لتبخير الماء الحر والتي تعرف بالحرارة الكامنة للتبخير وهى مدلول لدرجة حرارة الماء. ومثال ذلك فإن الحرارة الكامنة عند درجة حرارة ٢٠ م° تساوى حوالى ٢,٤٥ ميجا جول كجم^{-١} (MJ kg^{-١}) أو بتعبير آخر يلزم حرارة مقدارها ٢,٤٥ ميجا جول لتبخير ١ كجم أو ٠,٠٠١ م^٣ من الماء وبذلك يكون ١مم من الماء مكافئاً ٢,٤٥ ميجا جول م^{-٢} (MJ M^{-٢}).

- كما يعبر عن معدل البخر نتح بالحرارة الكامنة المتدفقة بوحدات من جول م^{-٢} يوم^{-١} (J M^{-٢} day^{-١}). و يوضح جدول (٤-٢) معامل التحويل للنتح بخر.

جدول (٤-٢): معامل التحويل للبخر نتح

المساحة	طاقة لوحدة	حجم لوحدة المساحة	عمق	
٢,٤٥	٠,١١٦	١٠	١	١مم يوم ^{-١}
٠,٢٤٥	٠,٠١٢	١	٠,١	١م ^٣ هكتار ^{-١}
١	٠,٠٤٧	٤,٠٨٢	٠,٤٠٨	١ميجا جول م ^{-٢} يوم ^{-١}

وذلك للماء ذو كثافة ١٠٠٠ كجم م^{-٣} فى درجة حرارة ٢٠ م°.

مثال: وصلت طاقة صافى الإشعاع الشمسى التى تتساقط على سطح بحيرة مقدار ١٥ ميجا جول م^{-٢} يوم^{-١} فى يوم من أيام الصيف حيث أستخدم ٨٠% منها فى تبخير الماء. أحسب عمق البخر فى اليوم بالاستعانة ببيانات جدول (٤-٢).

الحل:

$$\text{حيث أن } 1 \text{ ميجاجول م}^{-2} \text{ يوم}^{-1} = 0,408 \text{ مم يوم}^{-1} \text{ لذلك فإن عمق البخر يوم}^{-1} \\ = 0,8 \times 10 \text{ (ميجاجول م}^{-2} \text{ يوم}^{-1}) = 0,8 \times 10 \times 0,408 \text{ (مم يوم}^{-1}) = 4,9 \text{ مم يوم}^{-1}$$

ويمكن تمييز ثلاثة أنواع من معامل البخر نتج: معامل النتج بخر القياسى أو المقارن ET_c ، معامل النتج بخر القياسى للمحصول ET_c ، معامل النتج بخر المصحح للمحصول $ET_{c \text{ adj}}$.

العوامل المؤثرة على عملية النتج بخر:

١- العوامل الجوية: أهم العوامل الجوية المؤثرة على عملية النتج بخر تنحصر فى الإشعاع الشمسى ودرجة حرارة الهواء رطوبة الهواء وسرعة الرياح. وتعتمد الكثير من الطرق على هذه العوامل فى تقدير معدل البخر ويعبر عن قدرة بخر الجو بالبخر نتج القياسى ET_c وتم فرضه لدراسة حاجة الجو للبخر مستقلاً فى ذلك عن طبيعة المحصول ومرحلة نموه وإدارته. وحيث توافر الماء القابل للاستفادة بالتربة فى هذه الحالة لا يتأثر بعوامل التربة أيضاً. إذن فإن القياسات المناخية هى العوامل الوحيدة التى تؤثر فى البخر نتج. ويعبر عن سطح عشب (نجيل) grass يفترض أن ارتفاعه ٠,١٢ م مقاومة سطحه مثبتة عند $70 (SM^{-1})$ ويبلغ مقدار الأشعة المنعكسة منه ٠,٢٣ ($Albedo = \alpha$) تبعاً لمعادلة بنمان - مونتث حيث تعتبر منظمة الأغذية والزراعة معادلة بنمان - مونتث المعادلة الوحيدة التى تصلح لتقدير معامل النتج بخر القياسى بناء على ما توصل له الخبراء والمستشارون وهذا ما تم توضيحه فى مجلد منظمة الأغذية والزراعة رقم ٤٧ لعام ١٩٩٠ (Expert Consultation held in 1990 FAO, vol.47).

٢- عامل المحصول: ويعبر عنها بمصطلح النتج بخر القياسى للمحصول (ET_c) ويشير إلى كمية الماء التى يتم تبخيرها من المحصول النامى بمساحات كبيرة فى حقول يتوافر بها الماء (أى لا تعاني من أى نقص فى الماء) والإدارة الجيدة وينمو فى ظروف العوامل البيئية المثلى ويعطى أعلى محصول (بنمان - مونتث) وينبغى ملاحظة عدم تطبيق قيم عامل المحصول المحسوب تحت ظروف جوية مختلفة على الظروف الجوية المصرية لاختلاف العوامل الجوية.

٣- إدارة المحصول والظروف البيئية: إن وجود الملوحة، قلة خصوبة التربة، نقص الأسمدة المضافة، وجود الطبقة الصماء بالأرض، ضعف المقاومة للمسببات المرضية وسوء الإدارة المزرعية، كل ذلك يؤدي إلى التأثير على نمو المحصول وبالتالي يؤثر على معدل النتج بخر. وهناك عوامل أخرى ينبغي أخذها في الاعتبار مثل مدى نمو الكساء الخضرى، الكثافة النباتية، محتوى الأرض من الرطوبة سواء بالنقص أو بالزيادة ونوع التربة. وتلعب إدارة المحصول دوراً هاماً أيضاً حيث تؤدي العمليات الزراعية و طرق الري إلى التأثير على درجة ابتلال التربة وأسطح المحصول وصفاته المختلفة. كما أن وجود مصدات الرياح تعمل على تقليل سرعة الرياح وبالتالي نقص معدل البخر نتج. بالإضافة إلى مضادات عملية النتج والمواد العاكسة لأشعة الشمس. يعبر عن المحصول تحت هذه الظروف بمعدل البخر نتج المصحح للمحصول (ET_c adj) ويكون أقل من المعدل القياسى للمحصول لأن قياس هذا المعدل يتم تحت ظروف نمو غير مثلى. وعادة ما يحسب المعامل تحت ظروف الإجهاد أو بتصحيح معامل المحصول تحت جميع أنواع الإجهادات الأخرى.

ويمكن الحديث على المعادلات العملية لحساب النتج بخر فيما يلى:

معادلة بلانى وكريدل: Blaney- Criddle method

ذكر بلانى وكريدل (Blaney and Criddle, 1950) إمكانية تقدير الإستهلاك المائى للمحصول بالاستعانة بدرجات الحرارة وعدد ساعات سطوع الشمس (شكل ٤- ٢) فى موسم نمو المحصول بتطبيق المعادلة التالية:

$$س = مج س ش = مج م م ش$$

أو:

$$U = KF = \sum k f$$

حيث أن:

س (U): مقدار الإستهلاك المائى طول الموسم بالبوصة Consumptive use over the period, inches

س ش (K): مقدار الإستهلاك المائى الشهرى An empirical coefficient for the period, usually the growing season

م (F): المعامل الشهري للإستهلاك المائي للمحصول
The sum of monthly consumptive use factors f

م ش (f): العامل الشهري الدال على الحرارة وعدد ساعات الإشعاع الشمسي

ويساوى د x ع / 100،١٠٠ P/100،١٠٠
Monthly consumptive use factor, tP/100،١٠٠
حيث:

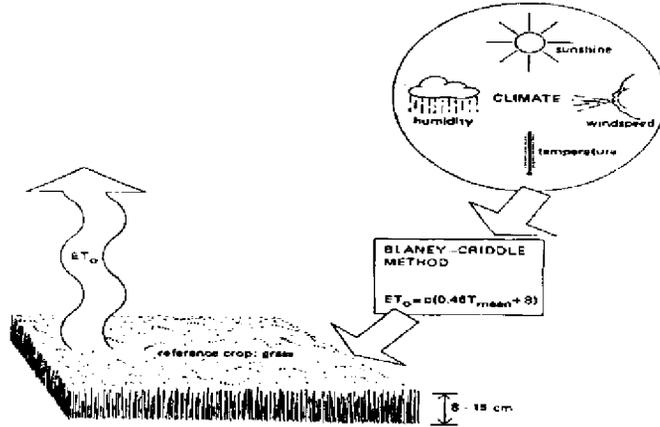
د (t): متوسط درجة حرارة الهواء بالدرجات الفهرنيتية
Mean monthly temperature, °F

ع (P): عدد ساعات الإشعاع الشمسي في الشهر معبراً عنها كنسبة

من العدد الكلي للإشعاع الشمسي في العام بالمنطقة ويمكن

تقدير المعامل الشهري للإستهلاك المائي للمحصول (م)

بالتجربة Percentage of the daylight hours of the year
occurring during a given month.



شكل (٤-٢) متطلبات معادلة Blaney & Criddle method

وتعتبر معادلة بلاني وكريدل معادلة بسيطة. ويُؤخذ عليها عدم تضمناها مقاييس جوية أخرى ذات قيمة في التأثير على مقدار الإستهلاك المائي. ولما كان معامل الإستهلاك المائي يختلف من محصول إلى آخر ومن شهر إلى آخر لهذا يصبح استخدام المعادلة محدوداً.

ويختلف المعامل الشهري للاستهلاك المائى للمحصول أثناء فصل النمو للحاصلات المختلفة إذ تتراوح قيمته لنبات القطن من ٠,٢ عند ابتداء موسم النمو إلى ٠,٨٥ فى شهر يوليو (كمال وهاشم، ١٩٦٧) ولنبات البصل من ٠,٥٤ فى يناير إلى ٠,٦٨ فى يونيو ونبات الفول من ٠,٤٠ فى نوفمبر إلى ٠,٦٥ فى مايو (والى، ١٩٧٣).

ولقد أتضح وجود العديد من المآخذ عند استخدام معادلة بلانى وكريدل حيث أن تأثير درجة الحرارة وطول النهار غير كاف لتقدير الاحتياج المائى بدقة حيث وجد اختلاف كبير فى الاحتياج المائى لمناطق ذات قيم متماثلة من درجة الحرارة وطول النهار. من هنا كان لزاماً العمل على رفع كفاءة التنبؤ عن طريق العوامل المناخية لتقدير الاحتياج المائى للمحاصيل حيث أضيف حساب معدل النتح والتبخير المقارن بها باستخدام بيانات من درجة الحرارة ومستويات متعددة من الرطوبة، والإشعاع الشمسى والرياح كالتالى:

$$ET_0 = C (P (0.46 T + 8)) = C.f \quad \text{mm day}^{-1}$$

حيث أن:

ET_0 : معدل النتح بخر المقارن (مم يوم⁻¹)

C: معامل يعتمد على الحد الأدنى لقيم الرطوبة الجوية النسبية، عدد ساعات الإشعاع الشمسى وسرعة الرياح.

P: النسبة المئوية للمتوسط اليومى لطول النهار بالنسبة لطول النهار الكلى بالساعة لكل شهر وخط عرض.

T: متوسط درجة الحرارة المئوية اليومى خلال الشهر المحسوب له معدل النتح والتبخير المقارن.

f: حاصل ضرب درجة الحرارة اليومى $0.46 \times 8 + x$ النسبة المئوية للمتوسط اليومى لطول النهار بالنسبة لطول النهار الكلى بالساعة.

وبالاستعانة بالمنحنى الموضح فى شكل (٤-٣) والقيم المحسوبة من المعادلة يتم تقدير معدل النتح بخر المقارن حيث يمثل المحور السينى القيم المحسوبة من المعادلة السابقة والمحور الصادى قيم ET_0 المناظرة ومنه وبالاستعانة بمعامل المحصول (K_c) يتم تقدير معدل النتح والتبخير.

مثال: أحسب مقدار الماء اللازم لمعدل النتج ببحر المقارن لمدينة القاهرة عن شهر يوليو محسوباً بالمم إذا علمت أنها تقع على خط عرض ٣٠ ومرتفعة بمقدار ٩٥ م عن سطح البحر.

الخطوات الواجب إتباعها

- تقدير متوسط درجة الحرارة اليومية: حيث يتم حساب متوسط درجات الحرارة العظمى والدنيا اليومية ثم حساب متوسط درجات الحرارة اليومية لشهر يوليو.
- تقدير قيمة P: وهى النسبة المئوية لمتوسط طول النهار اليومي بالنسبة لطول النهار الكلي للشهر بالساعة مع الأخذ في الاعتبار حط العرض بالاستعانة بجدول (٤-٣).
- جدول (٤-٣): النسبة المئوية لمتوسط اليومى بالنسبة لطول النهار الكلى بالساعة

Mean Daily Percentage (p) of Annual Daytime Hours for Different Latitudes

Latitude	North South ^{1/}	Jan	Feb	Mar	Apr	May	June	July	Aug	Sept	Oct	Nov	Dec
		July	Aug	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun.
60°		.15	.20	.26	.32	.38	.41	.40	.34	.28	.22	.17	.13
58		.16	.21	.26	.32	.37	.40	.39	.34	.28	.23	.18	.15
56		.17	.21	.26	.32	.36	.39	.38	.33	.28	.23	.18	.16
54		.18	.22	.26	.31	.36	.38	.37	.33	.28	.23	.19	.17
52		.19	.22	.27	.31	.35	.37	.36	.33	.28	.24	.20	.17
50		.19	.23	.27	.31	.34	.36	.35	.32	.28	.24	.20	.18
48		.20	.23	.27	.31	.34	.36	.35	.32	.28	.24	.21	.19
46		.20	.23	.27	.30	.34	.35	.34	.32	.28	.24	.21	.20
44		.21	.24	.27	.30	.33	.35	.34	.31	.28	.25	.22	.20
42		.21	.24	.27	.30	.33	.34	.33	.31	.28	.25	.22	.21
40		.22	.24	.27	.30	.32	.34	.33	.31	.28	.25	.22	.21
35		.23	.25	.27	.29	.31	.32	.32	.30	.28	.25	.23	.22
30		.24	.25	.27	.29	.31	.32	.31*	.30	.28	.26	.24	.23
25		.24	.26	.27	.29	.30	.31	.31	.29	.28	.26	.25	.24
20		.25	.26	.27	.28	.29	.30	.30	.29	.28	.26	.25	.25
15		.26	.26	.27	.28	.29	.29	.29	.28	.28	.27	.26	.25
10		.26	.27	.27	.28	.28	.29	.29	.28	.28	.27	.26	.25
5		.27	.27	.27	.28	.28	.28	.28	.28	.28	.27	.27	.27
0		.27	.27	.27	.27	.27	.27	.27	.27	.27	.27	.27	.27

^{1/} Southern latitudes: apply 6 month difference as shown.

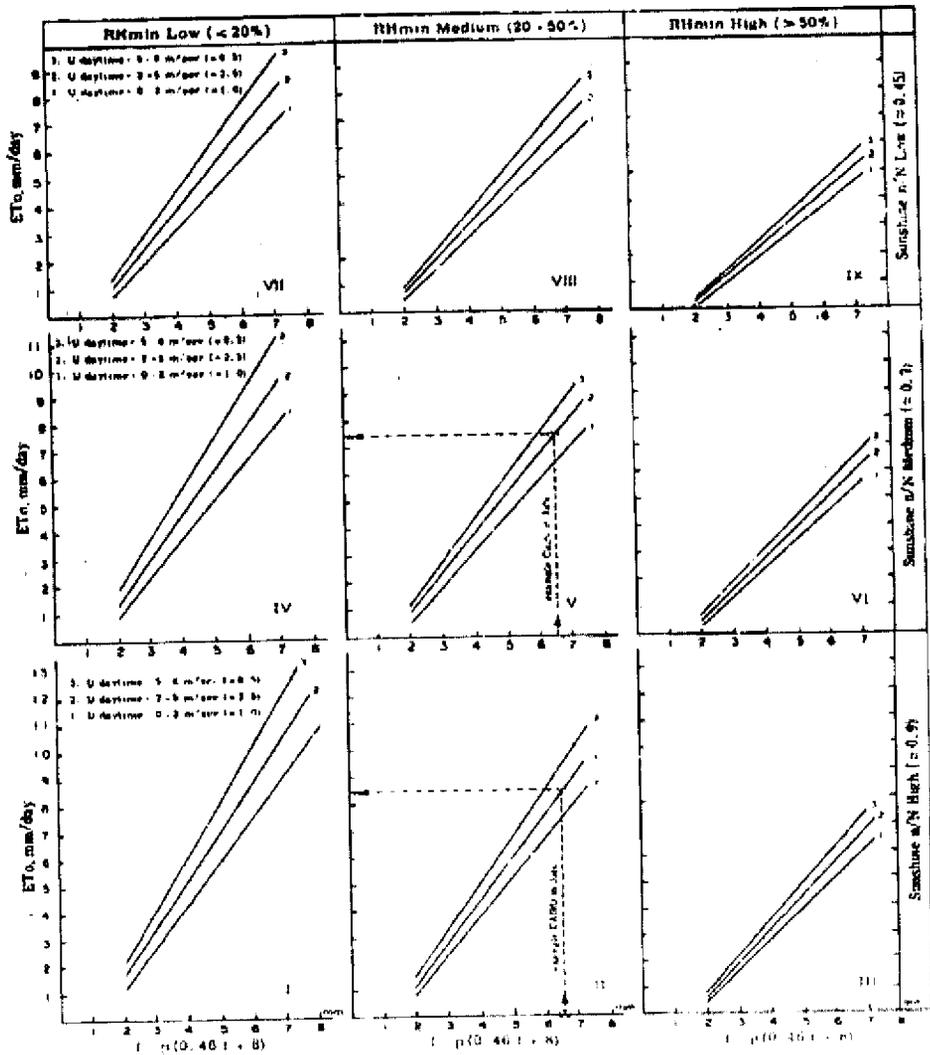
- حساب قيمة f: وهى حاصل ضرب (متوسط درجة الحرارة اليومية $\times 0.46 + 1$)

(P)

- تقدير قيمة C.

ولابد من الأخذ في الاعتبار عند حساب معامل المحصول مايتأتى:

- ١- الفترة بين الريه والأخرى فى المرحلة الأولى من حياة المحصول (منحنى متوسط قيمة معامل المحصول فى المرحلة الأولى من حياته initial، كما فى شكل (٤-٣).



شكل (٣-٤) منحني متوسط قيمة معامل المحصول في المرحلة الأولى من حياته initial

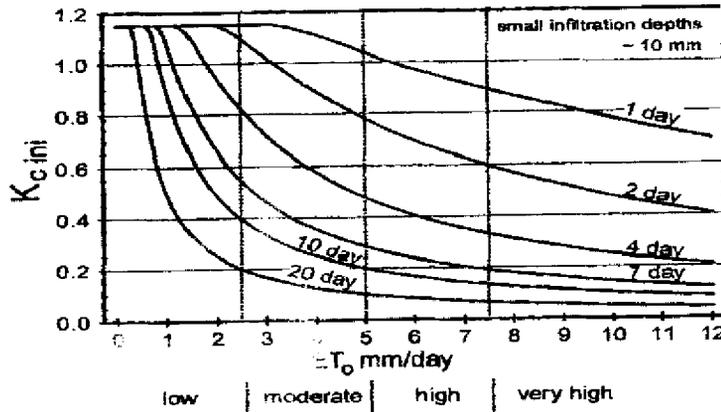
٢- تحديد قيمة معامل المحصول في المراحل التالية: Crop Development, Mid Season and Harvest or Maturity وذلك بالاستعانة بجدول (٤-٤).

جدول (٤-٤): معامل المحصول Kc لمحاصيل الحقل و الخضر خلال مراحل النمو المختلفة

Crop	Humidity		RHmin > 70%		RHmin < 70%	
	Wind m/sec		0-5	5-8	0-5	5-8
All field crops	<u>Crop stage</u>					
	initial	1	Use Fig. 7			
	crop dev.	2	by interpolation			
Artichokes (perennial- clean cultivated)	mid-season	3	.95	.95	1.0	1.05
	at harvest or maturity	4	.9	.9	.95	1.0
Barley		3	1.05	1.1	1.15	1.2
		4	.25	.25	.2	.2
Beans (green)		3	.95	.95	1.0	1.05
		4	.85	.85	.9	.9
Beans (dry)		3	1.05	1.1	1.15	1.2
	Pulses	4	.3	.3	.25	.25
Beets (table)		3	1.0	1.0	1.05	1.1
		4	.9	.9	.95	1.0
Carrots		3	1.0	1.05	1.1	1.15
		4	.7	.75	.8	.85
Castorbeans		3	1.05	1.1	1.15	1.2
		4	.5	.5	.5	.5
Celery		3	1.0	1.05	1.1	1.15
		4	.9	.95	1.0	1.05
Corn (sweet) (maize)		3	1.05	1.1	1.15	1.2
		4	.95	1.0	1.05	1.1
Corn (grain) (maize)		3	1.05	1.1	1.15	1.2
		4	.55	.55	.6	.6
Cotton		3	1.05	1.15	1.2	1.25
		4	.65	.65	.65	.7
Crucifers (cabbage, cauliflower, broccoli, Brussels sprout)		3	.95	1.0	1.05	1.1
		4	.80	.85	.9	.95
Cucumber		3	.9	.9	.95	1.0
	Tree market	4	.7	.7	.75	.8
Machine harvest		4	.85	.85	.95	1.0
	Egg plant (aubergine)	3	.95	1.0	1.05	1.1
Flax		4	.8	.85	.85	.9
		3	1.0	1.05	1.1	1.15
Grain		4	.25	.25	.2	.2
		3	1.05	1.1	1.15	1.2
Lentil		4	.3	.3	.25	.25
		3	1.05	1.1	1.15	1.2
Lettuce		4	.3	.3	.25	.25
		3	.95	.95	1.0	1.05
Melons		4	.9	.9	.9	1.0
		3	.95	.95	1.0	1.05
Millet		4	.65	.65	.75	.75
		3	1.0	1.05	1.1	1.15
		4	.3	.3	.25	.25

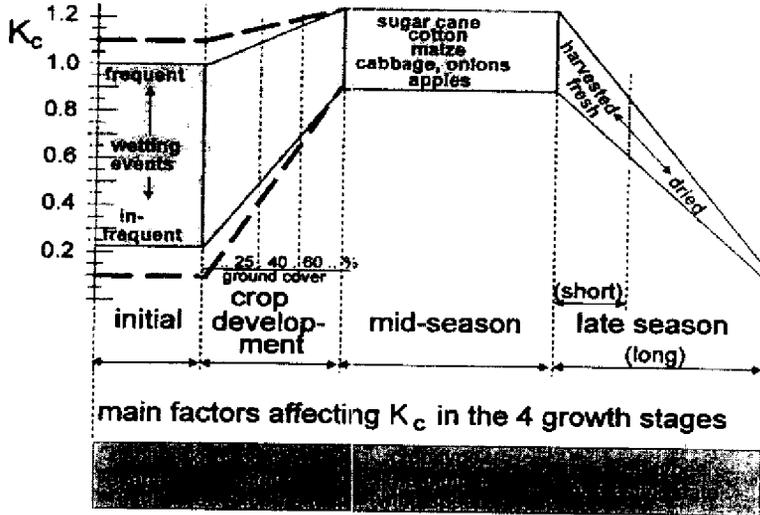
Crop	Humidity		RHmin > 70%		RHmin < 20%	
	Wind m/sec		0-5	5-8	0-5	5-8
Oats	mid-season	3	1.05	1.1	1.15	1.2
	harvest/maturity	4	.25	.25	.2	.2
Onion (dry)		3	.95	.95	1.05	1.1
		4	.75	.75	.8	.85
	(green)	3	.95	.95	1.0	1.05
		4	.95	.95	1.0	1.05
Peanuts (Groundnuts)	3	.95	1.0	1.05	1.1	
	4	.55	.55	.6	.6	
Peas	3	1.05	1.1	1.15	1.2	
	4	.95	1.0	1.05	1.1	
Peppers (fresh)	3	.95	1.0	1.05	1.1	
	4	.8	.85	.85	.9	
Potato	3	1.05	1.1	1.15	1.2	
	4	.7	.7	.75	.75	
Radishes	3	.8	.8	.85	.9	
	4	.75	.75	.8	.85	
Safflower	3	1.05	1.1	1.15	1.2	
	4	.25	.25	.2	.2	
Sorghum	3	1.0	1.05	1.1	1.15	
	4	.5	.5	.55	.55	
Soybeans	3	1.0	1.05	1.1	1.15	
	4	.45	.45	.45	.45	
Spinach	3	.95	.95	1.0	1.05	
	4	.9	.9	.95	1.0	
Squash	3	.9	.9	.95	1.0	
	4	.7	.7	.75	.8	
Sugarbeet	3	1.05	1.1	1.15	1.2	
	4	.9	.95	1.0	1.0	
Sunflower	no irrigation	4	.6	.6	.6	.6
	last month	3	1.05	1.1	1.15	1.2
Tomato		4	.4	.4	.35	.35
		3	1.05	1.1	1.2	1.25
Wheat		4	.6	.6	.65	.65
		3	1.05	1.1	1.15	1.2
		4	.25	.25	.2	.2

NB; Many cool season crops cannot grow in dry, hot climates. Values of k_c are given for latter conditions since they may occur occasionally, and result in the need for higher k_c values, especially for fall rough crops.



شكل (٤-٤) متوسط قيمة معامل المحصول في المرحلة الأولى من حياته initial بالنسبة إلى مستوى معدل النتج بخر المقارن وتكرار الري أو المطر الفعال

٣- وبعد مراعاة ما جاء في أرقام ١ و ٢ تستخرج قيمة معامل المحصول من المنحنى التالى الذى يعبر عن المنحنى المثالى لمعامل المحصول (شكل ٤-٥)



Typical ranges expected K_c in the four growth stages

شكل (٤-٥): قيم K_c المتوقعة فى أربع مراحل نمو فى قصب السكر، القطن، الذرة، الكرنب، البصل، التفاح

الحل

- تقدير متوسط درجة الحرارة اليومية T

$$\text{مجموع درجات الحرارة العظمى اليومية} / 31 = 35^\circ \text{م}$$

$$\text{مجموع درجات الحرارة الدنيا اليومية} / 31 = 22^\circ \text{م}$$

$$\text{متوسط درجة الحرارة اليومية} = 28,5^\circ \text{م}$$

- قيمة P

$$\text{من الجدول تستخرج القيمة لخط عرض } 30 \text{ شمالا} = 0,31$$

$$\text{إذن قيمة } P = 0,31 = (0,46 \times 28,5 + 1) \times 6,7 \text{ مم/يوم}$$

وبالاستعانة بمقادير الرطوبة النسبية والنسبة المئوية لطول النهار وسرعة الرياح (متوسطة، ومرتفعة إلى متوسطة، معتدلة) على الترتيب كما هو موضح بالشكل يبلغ معدل النتح والتبخير المقارن (E_0) ٨ مم/يوم.

معادلة بنمان Penman method: تم إقتراح هذه المعادلة عام ١٩٤٨ وهى تصلح للمناطق التى تتوافر فيها بيانات الأرصاد الجوية من درجات الحرارة، الرطوبة، الرياح، مدة التعرض لأشعة الشمس، حيث تعطى أفضل النتائج مقارنة ببقية المعادلات المقترحة أن ذلك.

ولقد اعتمدت المعادلة الأصلية على التنبؤ بالماء المفقود بالتبخير من سطح مائى معرض للظروف الجوية (E_0) ولقد أتضح عند تقدير معامل المحصول تجريبياً أنه كان يتراوح ما بين ٠,٦ فى أشهر الشتاء الباردة إلى ٠,٨ فى أشهر الصيف (بالحساب باستخدام معدل التبخير E_0 ذو العلاقة بمعدل النتح والتبخير للنجيليات تحت ظروف المناخ بانجلترا).

تتكون معادلة بنمان من شقين الأول يتعلق بالطاقة أو إن شئت قل الإشعاع والثانى يتعلق بالعوامل الديناميكية للهواء (الرياح والرطوبة). وتختلف أهمية كل منهم تبعاً لظروف المنطقة المناخية، حيث تقل أهمية العوامل الديناميكية للهواء تحت ظروف استقرار المناخ بالمقارنة بعوامل الطاقة. عندئذ تستخدم فى المعادلة الأصلية معامل المحصول المساوى ٠,٨ للتنبؤ بمعدل النتح والتبخير المقارن ليس فقط فى المناطق الباردة والرطبة من إنجلترا ولكن أيضا فى المناطق شديدة الحرارة والشبه جافة. ولا بد من الحرص فى استخدام ذلك فى المناطق الأخرى وعلى الأخص الأكثر جفافا حيث تصبح العوامل المتعلقة بديناميكية الهواء أكثر أهمية وبذلك تصبح نتائج التنبؤ بمعدل النتح والتبخير المقارن باستخدام الرقم ٠,٨ كقيمة تعبر عن الماء المفقود بالتبخير غير صحيحة.

وقد تبدو طريقة الحساب لمعدل النتح بخر المقارن معقدة وذلك لاحتواء المعادلة على مكونات تحتاج لاستخلاصها من قياسات مناخية عندما لا يمكن قياس بعضها مباشرة مثل عدم إمكانية قياس الإشعاع الشمسى مباشرة فى بعض الأماكن مما يستوجب الحصول عليها بطريق غير مباشر بقياس الإشعاع الشمسى، وفترة سطوع الشمس أو ملاحظة تراكم السحب مع قياس الرطوبة ودرجة الحرارة. ويستخدم تكنيك

القياس بالكمبيوتر وبالإستعانة بالجداول التى تسهل عملية الحساب الضرورية (FAO, 1984).

طريقة الإشعاع Radiation method

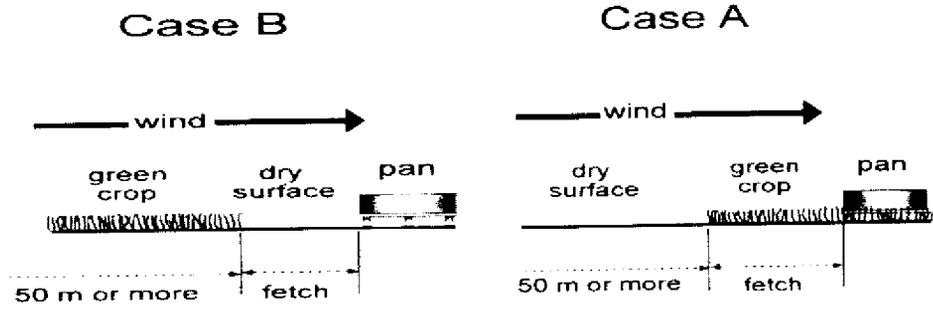
تم اقتراح هذه الطريقة للمساحات التى تتوافر بها بيانات المناخ التى تتضمن درجة حرارة الهواء والإشعاع الشمسى وتكاثر السحب أو الإشعاع ولا تقيس الرياح ولا الرطوبة الجوية. ولما كان قياس هذه العوامل مطلوباً لحساب معدل البخر نتح المقارن بناء على هذه المعادلة فيتم الحصول على بيانات الرطوبة الجوية والرياح من بيانات الأرصاد المنشورة أو من المصادر المحلية وغيرها.

وتعتبر هذه الطريقة أكثر صلاحية من طريقة بلانى وكريدل. وفى الواقع فإن هذه الطريقة صالحة تحت ظروف المناطق الاستوائية والجزر الصغيرة أو المرتفعة حتى مع عدم توافر قياس بيانات الإشعاع الشمسى أو تكاثر السحب، عندئذ فإن خرائط الإشعاع الشمسى المعدة بالمناطق المختلفة من العالم تكون ضرورية للإمداد ببيانات الإشعاع الشمسى.

وعاء التبخير Pan Evaporation method:

تمد هذه الطريقة الباحث الذى يريد قياس عملية التبخير ببيانات متكاملة للإشعاع، الرياح، درجة حرارة الهواء والرطوبة الجوية من مسطح مائى معين معرض للهواء الجوى. وفيه يكون المحصول معرض لنفس المتغيرات المناخية ولكن توجد عوامل أخرى عديدة قد يكون لها تأثيرات معنوية أخرى مختلفة على فقد الماء.

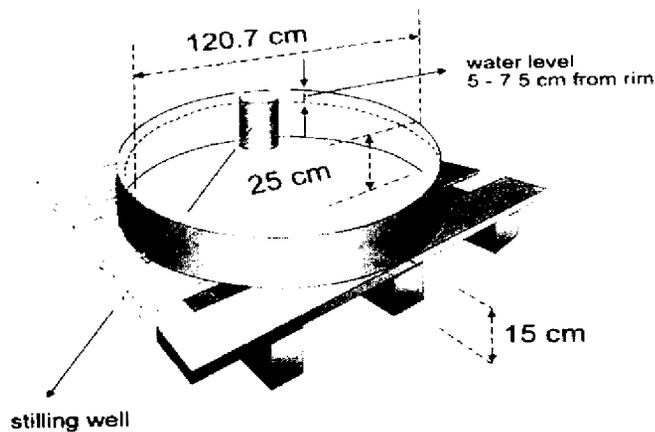
ورغماً عن أن انعكاس الإشعاع من السطح المائى يبلغ ٥-٨% فقط ومن سطح المجموع الخضرى ٢٠-٢٥% إلا أن تخزين الحرارة خلال وعاء البخر قد يسبب عملية بخر تتساوى تقريباً أثناء النهار والليل حيث أن معظم المحاصيل تحدث بها عملية النتح أثناء النهار فقط، وأن الفقد فى الماء من الوعاء والمحاصيل يمكن أن يتواجد عند حدوث اضطرابات للهواء، ودرجة الحرارة ورطوبة الهواء مباشرة فور حدوثها. وتتأثر النتائج المتحصل عليها من الوعاء بلونه أو باستخدام سائر والمكان الموجود به وعلى الأخص فى أرض خالية من المحصول عما إذا كان بحقل منزرع بالمحصول (شكل ٤-٦). ويمكن الرجوع إلى (Hounam 1973) للتعرف على العوامل اللازمة لاستخدام الوعاء فى التنبؤ بالبخر الحادث من بحيرة ما.



شكل (٤-٦) وعاء التبخر في أرض منزرعة بالمحصول

هناك نوعان من أوعية البخر الأول ويطلق عليه طراز (أ) شكل (٤-٧) والثاني طراز (ب) شكل (٤-٨).
أحواض البخر من النوع أ

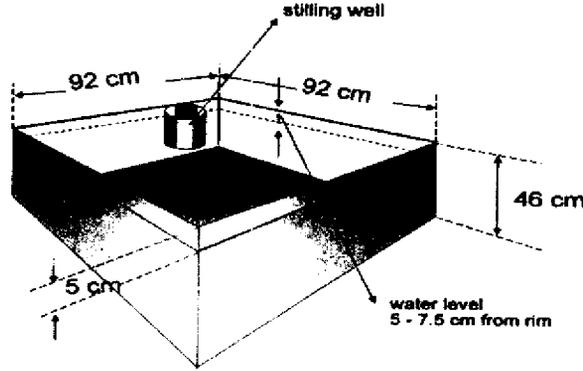
تعتبر الهيئة الوطنية للرصد الجوي في الولايات المتحدة الأمريكية أحواض التبخر من النوع أ هو وسيلة القياس المعيارية لأحواض التبخر. وهذا الحوض المعياري عبارة عن أسطوانة بقطر 120.7 سم بعمق ٢٥ سم، ويرتكز على قاعدة خشبية. كما يحاط بسور من السلاسل لمنع الحيوانات من الشرب منه. ونقاس نسبة التبخر فيه بشكل يومي بمعرفة كمية المياه المتبخرة في ارتفاع واحد بوصة. يبدأ القياس اليومي بملاً ٢ بوصة من أعلى الحوض، وفي نهاية اليوم أي بعد مضي ٢٤ ساعة تحسب كمية المياه اللازمة للمحافظة على مستوي البوصتين.



شكل (٤-٧) أحواض البخر من النوع أ

أحواض كولارادو المدفونة (ب)

وهي عبارة عن حوض بشكل مربع طول ضلعه ٩٢ سم وعمقه ٤٨ سم وكما يوحي من اسمه فإنه يدفن في الرمال حتى ٥ سم من حافته. يمكن إجراء مقارنة بين هذا النوع من أحواض التبخر والنوع أ من خلال معامل تصحيح، والذي يساوي ٠,٨ كمعامل سنوي.



شكل (٤-٨) أحواض كولارادو المدفونة (ب)

ويمكن الحصول على معدل النتح بخر المقارن عن طريق العلاقة التالية:

$$ET_o = K_p \cdot E_{pan}$$

حيث أن:

ET_o : بخر الوعاء محسوب م/يوم ويمثل المتوسط اليومي للقيم خلال الفترة المطلوبة

Reference evapotranspiration [mm/day]

K_p : معامل الوعاء [-] Pan coefficient

E_{pan} : بخر الوعاء (م يوم^{-١}) Pan evaporation [mm/day]

ورغم كل المحاذير فلا يزال استخدام وعاء البخر موصى به حين حساب معدل

النتح بخر لفترة ١٠ أيام أو أكثر.

معامل المحصول

يتم اختيار معامل المحصول بعد التنبؤ بمعدل النتح بخر المقارن كما سبق الذكر في الطرق المستخدمة في تقدير الاحتياج المائى السابقة حتى يمكن الحصول على معدل النتح بخر للمحصول بالمعادلة التالية:

$$ET_c = K_c \cdot ET_o$$

وينبغي مراعاة اختلاف الظروف الجوية عند حساب معامل المحصول

تؤثر صفات المحصول على العلاقة بين معدل البخر نتح المقارن ومعدل البخر نتح للمحصول، وترجع الخلافات الكبيرة بين المحاصيل وبعضها البعض إلى اختلاف مقاومة عملية النتح بين المحاصيل وبعضها مثل قدرتها على غلق الثغور أثناء النهار كما يحدث في نبات الأناناس أو/ والأوراق الشمعية كما هو فى الموالح، وارتفاع النبات ودرجة خشونة أو نعومة أسطح النباتات التي تؤثر على انعكاس الأشعة ومدى تغطية الكساء الخضرى للأرض. هذا بالإضافة إلى ميعاد زراعة المحصول، مرحلة نمو المحصول، طول موسم النمو والظروف الجوية. وعلى وجه الخصوص تتأثر قيمة معامل المحصول بعدد الريات أو تكرار المطر فى فترات ما بعد الزراعة والمرحلة المبكرة من حياة النبات.

ويؤثر ميعاد الزراعة على طول موسم النمو ومعدل تطور المحصول للوصول لاكتمال الكساء الخضرى وبداية البلوغ. ومثال على ذلك بنجر السكر الذى قد تختلف فترة حياته تبعاً لميعاد زراعته حيث تصل إلى فترة تتراوح ما بين ١٦٠-٢٣٠ يوم عند زراعات فى الخريف والربيع، ويتراوح طول فترة حياة فول الصويا ما بين ١٠٠ يوم بالمناطق المنخفضة الدافئة إلى ١٩٠ يوم بالمناطق المرتفعة (٢٥٠٠ م) بالمناطق الاستوائية بأفريقيا والذرة من ٨٠-٢٤٠ بنفس المناطق على الترتيب. حيث وجد أن بنجر السكر يحتاج إلى ٦٠% و ٣٥% من موسم النمو الكلى ليصل إلى اكتمال التطور أو أقصى احتياج مائى فى الزراعة بالخريف والزراعة مبكراً فى الصيف على الترتيب (FAO, 1984). كما يمكن الأخذ فى الاعتبار ظروف المناخ عموماً وعلى الأخص الرياح والرطوبة، حيث تؤثر الرياح فى معدل النتح للمحاصيل الطويلة الملساء أكثر من الزوابع فوق سطح نباتى ذو مسطح خشن ويكون ذلك أكثر تأثيراً فى الأجواء الجافة عنه فى الأجواء الرطبة، لتصبح قيم معامل المحصول لأسطح النبات الخشنة أكبر فى الأجواء الجافة.

مراحل نمو المحصول

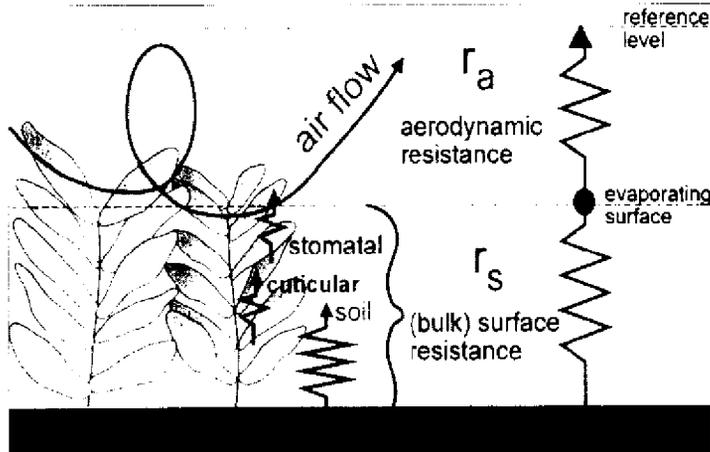
تقسم مراحل نمو المحاصيل إلى أربعة مراحل لتقدير معامل المحصول كما يلى:

- مرحلة النمو المبكرة Initial stage: وتتضمن مرحلة الإنبات والمراحل المبكرة من حياة النبات وعندها تقل نسبة الغطاء الأخضر التى تشغل سطح الأرض عن أقل من ١٠%.

- مرحلة تطور المحصول Crop development stage: وتبدأ من نهاية المرحلة الأولى إلى التغطية الفعالة الكلية للكساء الأخضر وفيه تصل نسبته إلى ٧٠-٨٠% (عادة مايقرب معامل المحصول من نهايته العظمى).
- مرحلة منتصف موسم النمو Mid- season stage: وتبدأ من الوصول إلى التغطية الفعالة الكلية للكساء الأخضر إلى بداية ميعاد النضج (عندما تصفر أوراق الفول، تتساقط أوراق القطن مثلاً).
- مرحلة موسم النمو المتأخر Late season stage: وتبدأ من نهاية منتصف موسم النمو وحتى اكتمال النضج أو ميعاد الحصاد.
- وتتبع الخطوات التالية للوصول إلى قيم معامل المحصول:
١. تحديد ميعاد زراعة المحصول من المعلومات المحلية أو من أماكن مشابهة للظروف المناخية.
 ٢. تحديد طول موسم النمو وطول فترات نمو المراحل السابق الإشارة إليها.
 ٣. تحديد معامل المحصول الخاص بمرحلة النمو المبكرة عن طريق الاستعانة بمنحنى العلاقة بين معامل المحصول وفترات رى المحصول (FAO, 1984).
 ٤. تحديد معامل المحصول بمرحلة منتصف موسم النمو بالاستعانة بالجدول السابقة (FAO, 1984) تحت ظروف الرطوبة والرياح الخاصة بالمحصول المراد تحديد معامل محصوله ورسمه على أساس أنه خط مستقيم بالرسم البياني.
 ٥. تحديد معامل المحصول بمرحلة موسم النمو المتأخر بالاستعانة بنفس الجدول السابق وتحت نفس الظروف السابق ذكرها ورسمه على المنحنى بفرض وجود خط مستقيم بين نقطة معامل المحصول عند مرحلة منتصف موسم النمو ونقطة نهاية موسم النمو.
 ٦. تحديد نقطة مرحلة تطور المحصول بفرض وجود خط مستقيم بين كل من قيمة معامل المحصول في نهاية مرحلة النمو المبكر وبداية مرحلة منتصف النمو.

معادلة بنمان - مونتث Penman- Monteith

لقد أوصت منظمة الأغذية والزراعة التابعة للأمم المتحدة باستخدام معادلة بنمان - مونتث كطريقة وحيدة للتنبؤ بمعدل النتج بخر المقارن وكطريقة سليمة بالمناطق المختلفة تحت مدى واسع من الظروف المناخية. وتعتمد هذه الطريقة على الجمع بين المقاومة الديناميكية للهواء وعوامل مقاومة الأسطح (شكل ٤-٩).



شكل (٤-٩) الجمع بين المقاومة الديناميكية للهواء وعوامل مقاومة الأسطح لانسحاب بخار الماء

١- المقاومة الديناميكية للهواء: وهي المقاومة التي يبديها الهواء أعلى الكساء الخضرى والتي تتضمن الاحتكاك الناشئ عن انسياب الهواء فوق سطح المجموع الخضرى

٢- عوامل مقاومة الأسطح: توصف بأنها عبارة عن مقاومة انسياب البخار خلال فتحات الثغور والمساحة الكلية للورقة و سطح الأرض. وهناك العديد من العوامل التي تشكل مقاومة الأسطح والتي تندمج مع بعضها البعض لتصبح عامل واحد تمثل حاصلتها مقاومة السطح الكلى Bulck الذى يعمل بدوره فى سلسلة واحدة تؤثر فى المقاومة الديناميكية للهواء. وبالرغم من كثرة وتعقد عمليات التبادل خلال طبقات الكساء الخضرى إلا أنه فى الإمكان إيجاد ارتباطات جيدة بين قياساتها وحساب معدل النتج بخر وعلى الأخص عند التنبؤ لمسطح قياسي متجانس من

العشب ويتم حساب التآلف بين المقاومة الديناميكية للهواء ومقاومة سطح الكساء الخضري أو إن شئت قل مقاومة الأسطح وفقاً للمعادلة التالية⁽¹⁾:

$$\lambda ET = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)}$$

حيث أن:

R_n : صافى الإشعاع

G : تدفق حرارة الأرض

$(e_s - e_a)$: نقص الضغط البخارى للهواء

ρ_a : متوسط الكثافة عند ضغط ثابت

c_p : الحرارة النوعية للهواء

Δ : انحدار ضغط بخار الهواء عند التشبع ودرجة الحرارة saturation vapor pressure ,temperature

γ : ثابت السيكروميتر

r_s and r_a : مقاومة السطح الكلى

المقاومة الديناميكية للهواء

يتم تقدير تحول الحرارة وبخار الماء من سطح التبخير إلى الهواء أعلى الكساء الخضري بواسطة المقاومة الديناميكية للهواء من خلال المعادلة التالية⁽²⁾:

$$r_a = \frac{\ln \left[\frac{z_m - d}{z_{om}} \right] \ln \left[\frac{z_h - d}{z_{oh}} \right]}{k^2 u_z}$$

حيث أن:

r_a : المقاومة الديناميكية للهواء بالمناطق المختلفة [s m⁻¹]

z_m : إرتفاع الرياح [m]

z_h : إرتفاع الرطوبة [m]

d: إرتفاع سطح الأزاحة فوق المستوى صفر
Zero plane displacement height [m]

z_{om} : إرتفاع السطح الخشن الذى يتحكم فى قوة الدفع
Roughness length governing momentum transfer [m]

z_{oh} : إرتفاع السطح الخشن الذى يتحكم فى تحول البخار والحرارة (م)
Roughness length governing transfer of heat and vapour [m]

k: ثابت فون كارمن ٠,٤١ (-) [k] 0.41 Von Karman's constant

u_z : سرعة الرياح عند ارتفاع z [m s⁻¹]

تطبق هذه المعادلة فى حالة الظروف المستقرة طبيعياً من الحرارة والضغط
الجوى وسرعة الرياح والتي تتميز بعدم وجود تغيرات حرارية حيث لا تحتاج إلى
تصحيح حيث توافر الرطوبة وقلة تبادل الحرارة.

ويمكن حساب ارتفاع سطح الإزاحة فوق المستوى صفر (d) وارتفاع السطح
الخشن الذى يتحكم فى قوة الدفع (z_{om}) فى معظم المحاصيل بواسطة تقدير ارتفاع
النبات محسوباً بالمتر.

ويمكن حساب ارتفاع السطح الخشن الذى يتحكم فى تحول البخار والحرارة (z_{oh})
بطريقة تقريبية من خلال العلاقة التالية:

$$\begin{aligned} d &= 2/3 h \\ z_{om} &= 0.123 h \\ z_{oh} &= z_{om} \quad (z_m = z_h = 2 \text{ m}), \end{aligned}$$

بفرض أن ارتفاع النبات يبلغ ٠,١٢ م وأن z_m هي الارتفاع القياسى لسرعة
الرياح، الحرارة والرطوبة فإن

$$z_m = z_h = 2 \text{ m},$$

وبالتعويض عما سبق يمكن حساب المقاومة الديناميكية للهواء لسطح قياسى من
العشب تبعاً للمعادلة التالية:

$$r_a = \frac{\ln \left[\frac{2 - 2/3(0.12)}{0.123(0.12)} \right] \ln \left[\frac{2 - 2/3(0.12)}{(0.1)0.123(0.12)} \right]}{(0.41)^2 u_z^2} = \frac{208}{u_z^2}$$

حيث أن:

u_2 : سرعة الرياح عند ٢ م

وتقدر المعادلة (٣) التالية المقاومة الكلية للسطح

$$r_s = \frac{r_i}{LAI_{active}}$$

حيث أن:

r_s : المقاومة الكلية للأسطح [s m⁻¹] Bulk surface resistance

r_i : المقاومة الكلية للثغور لورقة جيدة الإضاءة bulk stomata resistance of the well-illuminated leaf [s m⁻¹]

LAI_{active} : دليل مساحة الأوراق الفعال (م^٢/م^٢) للسطح العلوي فقط لوحدة سطح الأرض [Active (sunlit) leaf area index [m² (leaf area)/ m² (soil surface)]] والتي تتراوح قيمتها للمحاصيل المختلفة ما بين ٣-٥، ويعرف بأنه مساحة الورقة الفعال التي تساهم في نقل الحرارة والبخار وتقدر وفقاً للعلاقة التالية:

$$LAI_{active} = 0.5 LAI$$

وهي عادة تمثل السطح العلوي للورقة

وتقدر مقاومة الثغر (r_i) لورقة واحدة بمقدار حوالي ١٠٠ s m⁻¹ تحت ظروف توافر المياه.

وبفرض أن ارتفاع النبات يبلغ ٠,١٢ م، يمكن تقدير مقاومة سطح العشب القياسي (r_s) تبعا للمعادلة التالية:

$$r_s = \frac{100}{0.5(24)(0.12)} \approx 70 \text{ s m}^{-1}$$

وبعد مناقشات مستفيضة بين الخبراء تم تبني دمج طريقة بنمان - مونتث كطريقة قياسية جديدة للتنبؤ بمعدل النتح بخر وذلك بحساب مقاييسها المختلفة.

ثم تم اختيار مواصفات المحصول القياسي الذي هو عبارة عن نبات يبلغ ارتفاعه ٠,١٢ م ذو مقاومة سطحية تبلغ ٧٠ (r_s) وأليبدو يبلغ ٠,١٢ وبذلك يكون معدل النتح بخر له مشابهاً لمعدل النتح بخر لعشب أخضر متجانس الإرتفاع ذو نمو جيد تتوافر له المياه.

لقد أمكن التغلب على جميع المحاذير الخاصة بمعادلة بنمان السابقة باستخدام معادلة بنمان- مونتث باستعمال بيانات واسعة والإمداد بقيم أكثر ثباتاً للتقدير الحقيقي لمعدل النتح بخر للمحصول، حيث تم دمج المعادلة الأصلية (١) ومعادلة ديناميكية الهواء (٢) ومعادلة مقاومة الأسطح (٣) ليتم تقدير معدل النتح بخر المقارن تبعاً للمعادلة (٤) التالية:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(P_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1+0.34u_2)}$$

حيث أن:

Reference evapo-transpiration (م/م/يوم) ET_0 : معدل النتح بخر اليومي المقارن (م/م/يوم)
[mm day⁻¹]

Net (ماجورجون /م^٢/يوم) R_n : صافي الإشعاع الشمسي على سطح النبات (ماجورجون /م^٢/يوم)
radiation at the crop surface [MJm⁻²day⁻¹]

Soil heat flux density [MJ /م^٢/يوم] G : كثافة سريان حرارة التربة (ماجورجون /م^٢/يوم)
m² day⁻¹

Mean daily air (بالدرجة المنوية م ارتفاع ٢ م) T : متوسط درجة حرارة الهواء على ارتفاع ٢ م
temperature at 2 m height [°C]

Wind speed at 2 m height [m s⁻¹] u_2 : سرعة الرياح على ارتفاع ٢ م (م/ث)

Saturation vapour pressure [kPa] e_s : ضغط البخار عند التشبع (كيلوبسكال)

Actual vapour pressure [kPa] e_a : ضغط البخار الفعلي (كيلوبسكال)

Saturation vapour pressure deficit (كيلوبسكال) $e_s - e_a$: نقص تشبع ضغط البخار
[kPa]

Slope vapour pressure curve (كيلوبسكال/م) Δ : إنحدار منحنى الضغط البخارى (كيلوبسكال/م)
[kPa °C⁻¹]

Psychrometric constant [kPa °C⁻¹] γ : ثابت السيكروميتر (كيلوبسكال/م)

معايير استخدام معادلة بنمان - مونتث

ينبغي عند تطبيق هذه المعادلة لحساب معدل النتح بخر المقارن استخدام بيانات المناخ القياسية للإشعاع الشمسى (سطوح الشمس) وحرارة الهواء والرطوبة وسرعة الرياح على ارتفاع ٢م فوق سطح أخضر كثيف من العشب يظل الأرض وتتوافر له المياه (أو التحويل إلى ارتفاع ٢م). وعند استخلاص معامل المحصول ولتقدير معدل النتح بخر المقارن (معادلة (٤)) والمعادلات المصاحبة التي تقدر المقاومة الكلية للأسطح والمقاومة الديناميكية للهواء، أن يؤخذ في الاعتبار إمكانية حساب ET للنباتات المختلفة الارتفاع والذي يتبعه بالضرورة الاختلاف في دليل مساحة الأوراق (LAI)، ارتفاع المسطح الخشن الذي يتحكم في قوة الدفع وبالتالي قيمة النتح بخر المقارن (ET_0) التي تم التنبؤ بها. بالإضافة إلى أن هذا المعدل يتوقف على فترات الري.

ونظراً للعلاقة الوطيدة بين العوامل الفيزيائية والفسولوجية التي تتحكم في عملية النتح بخر، لذلك فإن استعمال التعريف الخاص بمعادلة بنمان - مونتث الخاصة بمعدل النتح بخر يمكن استخدامها في مواقع الأبحاث ذات العلاقة بقياس معدل النتح بخر للمحصول (ET_c) من خلال المعادلة التالية:

$$K_c = ET_c / ET_0$$

حيث يستخدم معامل المحصول في التفريق بين الخلافات الفيزيائية والفسولوجية للمحاصيل.

غياب بعض القياسات المناخية

في بعض الأحيان يتعذر الحصول على بعض القياسات المناخية اللازمة لحساب معدل النتح بخر المقارن، لذلك ينبغي تجنب استخدام المعادلات التي تعتمد فقط على قياسات محدودة والتوصية باستخدام معادلة بنمان - مونتث بعد حل مشكلة البيانات الغائبة حيث اتضح أن الفرق بين قيمة معدل النتح بخر بعد حل هذه المشكلة ضئيل باستخدام جميع القياسات مقارنة باستخدام المعادلات الأخرى. وعموماً تظل التقديرات معقولة عند توافر درجات الحرارة العظمى والدنيا حيث يمكن استخلاص قيمة الإشعاع الشمسى من الفرق في درجة الحرارة وسرعة الرياح وكذا الرطوبة الجوية من أقرب محطة للأرصاد الجوية كما يمكن استخلاص بيانات الرطوبة الجوية من درجات الحرارة الدنيا اليومية.

وينبغي تقدير صحة قياس طرق معدل النتح بخر على مستوى المنطقة بمقارنة الحساب من بيانات كاملة مع الحساب من بيانات غائبة حيث ينبغي أن تكون النسبة بينهما قريبة من الواحد الصحيح وحين انحرافها معنوياً تستخدم هذه النسبة كمعامل تصحيح للمعدل المحسوب من البيانات الغائبة، وعندما يزيد الخطأ القياسي عن ٢٠% من المتوسط ينبغي معرفة أسباب ذلك.

وعند غياب البيانات ينصح بحسابها بالطرق التالية قبل استخدامها في الحسابات الخاصة بمعادلة بنمان مونتث.

أ- حساب بيانات الرطوبة:

حيث أن الهواء الجوى يكون مشبعاً ببخار الماء بنسبة ١٠٠% عند أدنى درجة حرارة يومية لذلك يمكن تقدير الضغط البخارى الحقيقى (e_a) بفرض أن درجة حرارة نقطة الندى تحدث قريباً من أدنى درجة حرارة يومية ويتم ذلك بالمعادلة التالية:

$$e_a = e^{\circ}(T_{min}) = 0.611 \exp \left[\frac{17.27 T_{min}}{T_{min} + 237.3} \right]$$

وتطبق هذه المعادلة بالموقع الذى لا يعانى محصوله من نقص الماء ولا تصل الرطوبة إلى ١٠٠% فى درجة الحرارة الدنيا تحت ظروف المناخ الجاف حيث تكون أعلى من نقطة الندى لذلك يتم طرح عدد ٢-٣ م° من درجة الحرارة الدنيا المستخدمة فى المعادلة السابقة.

ب- بيانات صافى الإشعاع الشمسى:

يتم الاستعانة ببعض بيانات الأرصاد الجوية (بيانات مستخلصة من أقرب محطة أرصاد جوية) مثل الإشعاع الشمسى أو عدد ساعات سطوع الشمس ودرجة حرارة الهواء وضغط بخار الهواء لاستخلاص بيانات صافى الإشعاع الشمسى والموجات الضوئية الطويلة التى لا يمكن قياسها مباشرة عن طريق الأجهزة التى تتطلب مهارة لضبطها وعادة لا يتم تركيبها بمحطات الأرصاد الجوية. وحيثما لا تكون هناك إمكانية لسطوع الشمس لا يمكن حساب الإشعاع الشمسى بهذه الطريقة.

وتوجد بعض الطرق التي يمكن الاستعانة بها لتقدير صافي الإشعاع الشمسي نذكر منها ما يأتي:

الأولى: تعتمد هذه الطريقة على بعض الحقائق وهي أن المتغيرات التي تؤثر على الإشعاع الشمسي ومدة سطوع الشمس تكون متماثلة خلال المنطقة في نفس الشهر وعادة في نفس اليوم وعلى الأخص في ظروف المساحات الصغيرة وتمائل كتل الهواء التي تتحكم في سقوط الأمطار وتكاثر السحب وتمائل الجغرافيا الطبيعية، في هذه الحالة يمكن استخلاص البيانات من أقرب محطة للأرصاد الجوية، وعندما تبعد محطة الأرصاد الجوية بمسافة تزيد عن ٥٠ كم إلى الشمال أو الجنوب فإن قيمة الإشعاع الشمسي تتغير وعلى ذلك ينبغي تصحيحها عن طريق العلاقة التالية:

$$R_s = \frac{R_{s,reg}}{R_{a,reg}} R_a$$

حيث أن:

$R_{s,reg}$: الإشعاع الشمسي للمنطقة (ماجور جول م^{-٢} يوم^{-١}) Solar radiation at the regional location [MJm⁻²day⁻¹]

$R_{a,reg}$: الإشعاع المنطلق من الأرض للمنطقة (ماجور جول م^{-٢} يوم^{-١})-terrestrial radiation at the regional location [MJm⁻²day⁻¹]

وبمجرد استخلاص بيانات الإشعاع من أقرب محطة أرصاد يمكن تقدير صافي إشعاع الموجات الضوئية الطويلة عن طريق المعادلة التالية و التي يوصى بها عند حساب معدل البخر القياسي (E_o) لشهر، وينبغي الحذر عند حسابه ليوم واحد وبمجرد استخلاص بيانات الإشعاع من أقرب محطة أرصاد:

$$R_{nl} = \sigma \left[\frac{T_{max}^4 + T_{min}^4}{2} \right] \left(0.34 - 0.14 \sqrt{E_o} \right) \left(1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right)$$

حيث أن:

R_{nl} : صافي إشعاع الموجات الطويلة للمنطقة (ماجور جول م^{-٢} يوم^{-١}) Net outgoing longwave radiation [MJm⁻²day⁻¹]

σ : ثابت ستيفن- بولتزمان (٤,٩٠٣ ١٠^{-٨} ماجورك^{-٤} م^{-٢} يوم^{-١}) Stefan-Boltzmann constant [4.903 10^{-٨} MJK^{-٤} m^{-٢} day^{-١}]

T_{\max} K: درجة الحرارة المطلقة العظمى أثناء فترة ٢٤ ساعة (درجة الحرارة المطلقة)
 $273,16 + ^\circ \text{م} = \text{K}$

Maximum absolute temperature during the 24-hour period [K = $^{\circ}\text{C} + 273.16$]

T_{\min} K: درجة الحرارة المطلقة الدنيا أثناء فترة ٢٤ ساعة (درجة الحرارة المطلقة) = k
 $273,16 + ^\circ \text{م}$

Minimum absolute temperature during the 24-hour period [K = $^{\circ}\text{C} + 273.16$]

e_a : الضغط البخارى الحقيقى (كيلوبيسكال) Actual vapor pressure [kPa]

R_s/R_{so} : الإشعاع النسبى للموجات الضوئية القصيرة محدد بثابت ستيفن $\geq 1,0$
 Relative shortwave radiation (limited to ≤ 1.0)

R_s : الإشعاع المحسوب أو المقاس (ماجورجول م^{-٢} يوم^{-١}) Measured or calculated solar radiation [MJm^{-٢} day^{-١}]

R_{so} : الإشعاع المنبعث من السماء الصافية (ماجورجول م^{-٢} يوم^{-١}) Calculated clear-sky radiation [MJ m^{-٢} day^{-١}]

وتحسب قيمة الإشعاع R_s من المعادلة التالية:

$$R_s = \left(a_s + b_s \frac{n}{N} \right) R_a$$

حيث أن:

R_s : إشعاع الموجات القصيرة (ماجورجول م^{-٢} يوم^{-١}) Solar or shortwave radiation [MJ m^{-٢} day^{-١}]

N: طول فترة سطوع الشمس الحقيقية (ساعة) Actual duration of sunshine [hour]

N: أقصى طول فترة ممكنة لسطوع الشمس أو عدد ساعات النهار (ساعة) Maximum possible duration of sunshine or daylight hours [hour]

n/N: = فترة الإشعاع الشمسى النسبية [-] Relative sunshine duration

R_s : الإشعاع الزائد المنطلق من الأرض (ماجورجول م⁻² يوم⁻¹) Extraterrestrial radiation [MJ m⁻² day⁻¹]

a_s : ثابت الإنحدار الذى يعبر عن مكونات الإشعاع الزائد فى الأيام الملبدة بالغيوم
Regression constant, expressing the fraction of extraterrestrial radiation reaching the earth on overcast days (n = 0)

$a_s + b_s$: مكونات إشعاع الأرض الزائد الواصل إليها فى الأيام الصافية Fraction of extraterrestrial radiation reaching the earth on clear days (n = N)

ويمكن التعبير عن إشعاع الموجات القصيرة بوحدات مكافئة من البحر محسوبة مم يوم⁻¹ ويمكن الحصول عليها بضرب القيمة $0,408 \times R_s$

ولحساب بيانات الإشعاع الحقيقية يوصى بقيم $a_s = 0,25$ ، $b_s = 0,50$

ويحسب صافى الإشعاع بالفرق بين صافى إشعاع الموجات القصيرة الساقطة وصافى إشعاع الموجات الطويلة المنطلقة بالمعادلة التالية:

$$R_n = R_{ns} - R_{nl}$$

R_n : صافى الإشعاع الشمسى على سطح النبات (ماجورجول /م²/يوم)

R_{ns} : صافى إشعاع الموجات الطويلة المنطلقة (ماجورجول /م²/يوم)

R_{nl} : صافى إشعاع الموجات القصيرة المنطلقة (ماجورجول /م²/يوم)

الثانية: تعتمد هذه الطريقة على بيانات مستخلصة من الفرق فى درجات حرارة الهواء. حيث توجد علاقة بين الفرق فى درجة الحرارة العظمى والدنيا للهواء والسحب التى تغطى المنطقة حيث ينتج عن صفاء السماء ارتفاع درجة حرارة الهواء أثناء النهار ويكون بمقدور الجو الصافى نقل الإشعاع الشمسى المسبب لرفع درجة حرارة الهواء، بينما تنخفض درجة حرارته أثناء الليل حيث قلة إشعاع الموجات الطويلة المنطلقة من الأرض أو الممتصة بواسطة الجو. وعلى العكس لا يصل الإشعاع إطلاقاً إلى سطح الأرض، ويتم امتصاصه وانعكاسه بواسطة السحب فى حالة الجو الملبد بالغيوم وبذلك تصبح درجة الحرارة الدنيا مرتفعة نسبياً حيث تعمل السحب كغطاء يقلل من انطلاق إشعاع الموجات الطويلة. وبذلك يمكن استخدام الفرق بين درجة الحرارة العظمى ومثيلتها الدنيا

كمؤشر على مكونات الإشعاع الزائد المنطلق من الأرض والذي يصل إلى سطح الكرة الأرضية. ولقد تم تطوير تقدير معدل النتج بحر المقارن باستخدام بيانات درجة حرارة الهواء فقط. وتم التحقق من صحة المعادلة للإشعاع تحت ظروف العديد من محطات الأرصاد لمجموعة مختلفة من الظروف المناخية كالتالي:

$$R_s = k_{RS} \sqrt{(T_{max} - T_{min})} R_a$$

حيث أن:

R_a : الإشعاع الزائد المنطلق من الأرض (ماجورجول م⁻² يوم⁻¹) Extraterrestrial radiation [MJ m⁻² d⁻¹]

T_{max} : درجة الحرارة العظمى للهواء (م[°]) [°C]

T_{min} : درجة الحرارة الدنيا للهواء (م[°]) [°C]

k_{RS} : معامل التصحيح (0,16 إلى 0,19) [م[°] °^{-0,5}] Adjustment coefficient (0.16-0.19) [°C^{-0.5}]

ولقد وجد أن الجذر التربيعي للفرق بين درجتى الحرارة العظمى والدنيا قريب من قيمة الإشعاع الشمسى اليومي للمنطقة المقاس، وأن معامل التصحيح يختلف تبعاً للمنطقة إذا كانت ساحلية أم غير ذلك. حيث = 0,16 بالمنطقة البعيدة عن الساحل، 0,19 بالمنطقة الساحلية.

ج- بيانات سرعة الرياح:

يتم استخدام بيانات سرعة الرياح من أقرب محطة أرصاد جوية مع الأخذ فى الاعتبار وجود خلاقات كبيرة أثناء اليوم وأقل عند قياسها لفترات طويلة. وعادة ما تكون الرياح الشديدة مصحوبة بانخفاض فى الرطوبة الجوية النسبية وتكون سرعتها بطيئة عندما تكون الرطوبة الجوية النسبية مرتفعة. وعلى ذلك فإن الخلاف بين الرطوبة الجوية النسبية المرتفعة والمنخفضة يكون متماثلاً للموقعين. ونظراً لأن الخلاف يكون صغيراً بين متوسط سرعة الرياح على مدار الشهر ويتذبذب حول المتوسط لذلك فمن الممكن قياس القيمة الشهرية على شرط الأخذ فى الاعتبار التغيرات الموسمية.

أقل البيانات المطلوبة لحساب معدل النتح بخر القياسي ET_o :

تستخدم معادلة بديلة في حالة غياب بيانات المناخ (الإشعاع الشمسي، الرطوبة النسبية و/أو سرعة الرياح وهي كالتالي:

$$ET_o = 0.0023 (T_{mean} + 17.8) (T_{max} - T_{min})^{0.5} R_a$$

قائمة المراجع

- كمال أ. ع، هاشم ع. (١٩٦٧) ضبط وتوزيع مياه الري في جمهورية مصر العربية المتحدة، وزارة الري مصلحة المساحة. القاهرة.
- مرسى م. ع، نورالدين. نعمت ع. ١٩٧٧. ري محاصيل الحقل، الناشر مكتبة الأنجلو المصرية، ٣٣٢ صفحة.
- Blaney, H.F. and Criddle, W.D. 1950 .Determining Water Requirments in Irrigated Areas from Climatological and Irrigation Data. U.S.D.A (SCS) tp-96,48P.
- Expert Consaltation Held in May 1990 FAO, Vol.47.
- Food Agriculture Organization of the United Nations Regional Office for the Near East (1984). FAO.
- Crop Water Requirements (Guidelines for Predicting Crop Water Requirements, Vol. 24.
- Food Agriculture Organization of the United Nations Regional Office for the Near East (1990).FAO ,Vol.47.
- Hounman,C.E.1973. Comparison Between Pan and Lake Evaporation. WMO Tech. Note 126 , 52 P. Report Asrapporteur on lake evaporation of the commission for hydrology.
- Penman ,H.L.1948. Royal Soc. ,London Proc. Ser. A, 193:120-146.
- Waly, M.A.1973. Water Requirements of some Vegetable Crops. Ph.D. Thesis, Fac. Agric. Ain Shams Univ. Egypt.