معادلات النمو النباتى وما يرتبط بها من قيم فيزيائية وبيولوجية

يُعبر العلماء عن النمو النباتى بطريقة كمية باستخدام معادلات رياضية خاصة، تعرف بمعادلات النمو Growth Formulas، أو دلائل النمو Growth Parameters.

تفيد هذه المعادلات فى دراسة تأثير المعاملات التجريبية والعوامل البيئية على النمو النباتى، وكذلك فى تحليل الاختلافات بين السلالات وإرجاعها إلى أسبابها الأولية. وتتداخل الدلائل ومعادلات النمو البيولوجية مع قيم أخرى فيزيائية محضة؛ ولذا .. فإننا نناقش الأمر كله جملة واحدة، مع تسلسل التفاصيل بشكل أقرب ما يكون إلى المنطق الذى يعين القارئ على استيعاب الموضوع.

١- الطاقة الشمسية الكلية الساقطة على النبات: يرمز لها بالرمز (S)، ويعبر عنها بالسعرات الحرارية Calories.

٢- الطاقة الشمسية النافذة transmitted (التى تسجل تحت النمو الخضرى للنبات): يرمز لها بالرمز (S)، ويعبر عنها بالسعرات الحرارية.

٣- المحصول البيولوجى Biological yield:

هو الوزن الجاف لكل الأعضاء النباتية، بما فى ذلك وزن الأجزاء الاقتصادية (أى التى يزرع من أجلها النبات). وهو تقدير للمحصلة النهائية لعمليات البناء الضوئى، والتنفس، وامتصاص العناصر.

وبرغم أن وزن المجموع الجذرى هو جزء من المحصول البيولوجى، إلا أنه يهمل — عادة — لصعوبة تقديره بدقة. ولذا .. فإن النبات يقطع عند سطح التربة — عند النضج أو الحصاد — لتقدير وزنه الجاف. ويرمز للمحصول البيولوجى بالرمز (W).

٤- الوزن الجاف — لكل الأعضاء النباتية — المتراكم خلال فترة زمنية محددة، تم خلالها تقدير كل من (S)، و (S_t) كميا (علمًا بأن الفترة الزمنية المعنية يمكن أن تكون يومًا، أو أسبوعًا، أو موسمًا زراعيًّا كاملاً): يرمز لهذه القيمة بالرمز ΔW – دلتا دبليو)، ويمكن أن يعبر عنها بالسعرات الحرارية بضرب الوزن الجاف بالكيلو جرام فى ٤٠٠٠؛ لأن كيلو جرام من الوزن الجاف يعادل (فى المتوسط) ٤٠٠٠ سعر حرارى.

٥- كفاءة اعتراض أو استقبال الضوء الساقط Efficiency Interception: يرمز لها بالرمز (E_i)، وتقدر كنسبة كما يلى:

$$E_i = \frac{S - S_t}{S} \times 100$$

أو بالمعادلة E_i = $\frac{\text{الطاقة الشمسية المتصة absorbed} - \text{الطاقة الشمسية المنعكسة reflected}}{\text{الطاقة الشمسية الكلية الساقطة على النبات}} \times ١٠٠$

فهى الطاقة الشمسية التى استقبلها النبات واحتجزها كنسبة مئوية من الطاقة الشمسية الكلية الساقطة عليه، أو هى حاصل طرح نسبة الطاقة الشمسية النافذة من مائة. وتعد هذه القيمة بمثابة تقدير للمساحة الورقية.

٦- كفاءة امتصاص الطاقة الشمسية Efficiency of Absorption:

يرمز لها بالرمز (E_a)، وتقدر كنسبة مئوية كما يلى:

$$E_a = \frac{\text{الطاقة الشمسية المتصة}}{\text{الطاقة الشمسية الكلية الساقطة}} \times ١٠٠$$

$$= \frac{\text{الطاقة الشمسية الكلية الساقطة} - \text{الطاقة المنعكسة} - \text{الطاقة النافذة}}{\text{الطاقة الشمسية الكلية الساقطة}} \times ١٠٠$$

وتعد كفاءة الامتصاص (E_a) بمثابة تقدير جيد لنسبة الطاقة الشمسية الساقطة على النبات، والتى استقبلها واستفاد منها فى عملية البناء الضوئى.

٧- كفاءة الاستخدام Efficiency of Utilization:

يرمز لها بالرمز (E_u)، وتقدر كما يلى:

$$E_u = \frac{\text{الطاقة الشمسية التى تُثبت فى عملية البناء الضوئى}}{\text{الطاقة التى اعترضها أو استقبلها النبات}}$$

$$= \frac{٤٠٠٠ \times \Delta W}{\text{الطاقة الشمسية الكلية الساقطة} - \text{الطاقة الشمسية النافذة}}$$

أو هى:

$$E_u = \frac{\Delta W \times 4000}{S - S_t}$$

$$= \frac{\Delta W \times 4000}{S \times E_i}$$

وتعد هذه القيمة بمثابة تقدير للكفاءة التمثيلية Net Assimilation Rate المقدرة على أساس وحدة المساحة من الأرض التى يشغلها النبات.

٨- كفاءة التحويل Efficiency of Conversion:

يرمز لها بالرمز (E_c)، وتقدر كما يلى:

$$E_c = E_i \times E_u$$

$$= \frac{W \times 4000}{S}$$

وتعد هذه القيمة بمثابة تقدير لمعدل النمو المحصولى Crop Growth Rate.

٩- نسبة الانعكاس Percent Reflection:

يرمز لهذه القيمة بالرمز (A)، وتقدر كما يلى:

$$A = \frac{\text{الطاقة الشمسية المعكوسة}}{\text{الطاقة الشمسية الكلية الساقطة}} \times ١٠٠$$

١٠- نسبة النفاذ Percent Transmission:

يرمز لهذه القيمة بالرمز (k)، وتقدر كما يلى:

$$k = \frac{S_1}{S} \times 100$$

١١- معامل انقراض (احتجاز) الضوء Light Extinction Coefficient بواسطة النبات، ويعطى الرمز (K).

١٢- المحصول الاقتصادى Economic Yield:

هو العضو النباتى أو الأعضاء النباتية التى يزرع من أجلها المحصول، ويعطى الرمز (EY).

١٣- المساحة الورقية الكلية Total Leaf Area:

هى مجموع مساحة الأوراق التى ينتجها النبات، ويرمز لها بالرمز (L).

ويعتقد دائمًا أن المساحة الورقية الكلية هى مقياس لقدرة النبات على البناء الضوئى، ولكن يجب أن يؤخذ فى الحسبان أن المسطحات الخضراء الأخرى للنبات تكون – أيضًا – قادرة على القيام بعملية البناء الضوئى، وربما تُسهم بنصيب كبير فى إجمالى إنتاج المادة الجافة فى النبات.

فإلى جانب أنصال الأوراق .. يحدث البناء الضوئى فى جميع الأجزاء الخضراء، بما فى ذلك السيقان، وأغماد الأوراق والسفا، والقنيبات، والأذينات، وأغلفة الكيزان، والقرون الخضراء ... إلخ. وتوجد بعض هذه الأعضاء فى الجزء العلوى من النبات، فلا تتعرض للتظليل، وتكون نشطة فى عملية البناء الضوئى.

ويعتقد البعض أن قدرة أغماد أوراق ونورات الحبوب الصغيرة على البناء الضوئى تبلغ نحو ٥٠٪-١٠٠٪ من قدرة أنصال الأوراق ذاتها. ووجد أن أغماد أوراق الشعير تُسهم بنحو ١٥٪-٤٠٪ من محصول الحبوب، وأن السنبلة تُسهم بنحو ٩٪، و ٤٠٪ من محصول الحبوب فى الأصناف العديمة السفا والأصناف ذات السفا، على التوالى.

ونظرًا لصعوبة تقدير مساحة الأجزاء النباتية غير الأوراق؛ لذا .. فقد اتفق على اعتبار مجموع المسطح الورقى لأنصال الأوراق (السطح العلوى فقط) دليلاً على المساحة النباتية التى تقوم بعملية البناء الضوئى.

١٤- الوزن النوعى للورقة Specific Leaf Weight:

هو الوزن الجاف لوحدة المساحة من الورقة، يرمز لهذه القيمة بالرمز (SLW)، وتقدر

بالسنتيمتر المربع لكل جرام من الوزن الجاف من الورقة ($cm^{-2}g^{-1}$)، وهى تعكس سمك الورقة؛ حيث يزداد السمك كلما ازدادت هذه القيمة.

١٥- فترة بقاء الأوراق على كفاءتها فى عملية البناء الضوئى Leaf Area Duration:

تأخذ هذه القيمة الرمز (LAD)، وتقدر كما يلى:

$$LAD = L \times time$$

١٦- المساحة النسبية للأوراق Leaf Area Ratio:

هى نسبة مساحة أوراق النبات (L) إلى وزن النبات الجاف الكلى (W)، ويرمز لها - غالبًا - بالرمز (LAR)، وأحيانًا بالرمز (F)، وتقدر بإحدى المعادلتين التاليتين:

$$\mathbf{LAR} = \frac{\mathbf{L}}{\mathbf{W}}$$

$$\mathbf{LAR} = \frac{(L_2 - L_1)(\log_e W_2 - W_1)}{(W_2 - W_1)(\log_e L_2 - \log_e L_1)}$$

حيث إن: L_1 و L_2 هما مساحة الأوراق، و W_1 و W_2 هما وزن الأوراق فى بداية ونهاية فترة زمنية من t_1 إلى t_2، ويعبر عنها باليوم، أو الأسبوع، أو الشهر ... إلخ.

١٧- نسبة وزن الأوراق Leaf Weight Ratio:

هى وزن الأوراق كنسبة مئوية من الوزن الكلى للنبات على أساس الوزن الجاف.

١٨- دليل المساحة الورقية Leaf Area Index:

هو مساحة المسطح الورقى بالنسبة لوحدة المساحة من الأرض التى يشغلها النبات، ويرمز له بالرمز (LAI)، ويقدر بالمعادلة التالية:

$$\text{دليل المساحة الورقية (LAI)} = \frac{\text{مساحة أوراق النبات (L)}}{\text{مساحة الأرض التى يشغلها النبات (P)}}$$

ويعنى بالمسطح الورقى مساحة أحد سطحى الورقة، وليس كليهما.

ويقدر متوسط دليل المساحة الورقية خلال فترة زمنية ($\overline{LAI}$) بالمعادلة التالية:

$$\overline{LAI} = \frac{F_2 - F_1}{Log_e F_2 - log_e F_1}$$

حيث إن:

F_1، و F_2 هما مساحة الأوراق/وحدة المساحة من الأرض فى بداية ونهاية الفترة الزمنية، على التوالى.

ويصل البناء الضوئى – عادة – إلى أكبر معدل له (بالنسبة للنبات ككل) عندما تصل قيمة دليل المساحة الورقية إلى ٥,٠ أو أكثر. ويتأثر ذلك بنظام ترتيب وتوزيع الأوراق على النبات. ومما تجدر ملاحظته أن الأوراق السفلية التى لا يصل إليها ضوء كاف قد تستهلك من الغذاء – أثناء تنفسها – كمية أكبر من تلك التى يمكنها تصنيعها.

إن دليل المساحة الورقية LAI هو – كما أسفلنا – مساحة المسطح الورقى بالنسبة لوحدة المساحة من الأرض التى يشغلها النبات، فإذا كانت قيمة دليل المساحة الورقية ٤,٠ – مثلاً – كان ذلك دليلاً على أن إجمالى مساحة المسطح الورقى للنبات يبلغ أربعة أمثال مساحة الأرض التى يشغلها النبات. وتعد هذه القيمة أفضل من قيمة المساحة الورقية الكلية عند مقارنة النباتات؛ لأن القيمة الأخيرة يمكن أن تتأثر بمسافة الزراعة .

ويكون لدليل المساحة الورقية معنى وقيمة أكبر عند ربطه بمرحلة معينة من النمو النباتى. ففى النباتات المحدودة النمو .. يقدر دليل المساحة الورقية فى بداية مرحلة النمو الإنتاجى (بداية الإزهار والعقد). أما فى النباتات غير المحدودة النمو .. فقد يستعمل فيها الحد الأقصى لدليل المساحة الورقية، أو قد تجرى المقارنة بين الأصناف فى أى وقت ما دامت قد أخذت قياسات دليل المساحة الورقية فيها فى يوم واحد.

ويعتقد أن لكل محصول قيمة مثلى لدليل المساحة الورقية، تتراوح – غالبًا – بين ٢,٥، و ٥,٠ فى مختلف المحاصيل. والقيمة المثلى هى تلك التى يحدث عندها أقصى تراكم للمادة الجافة. ويقل تراكم المادة الجافة بانحراف قيمة دليل المساحة الورقية – عن القيمة المثلى – بالزيادة، أو النقصان.

ففى الحالات التى يقل فيها دليل المساحة الورقية عن القيمة المثلى يقل إنتاج المادة الجافة؛ لأنه لا يتم استقبال كل الضوء الساقط على النبات؛ وبذا لا يكون البناء الضوئى فى أعلى معدلاته الممكنة. وعندما يزيد دليل المساحة الورقية على القيمة المثلى تصبح الأوراق السفلى مظللة؛ ويتبع ذلك نقص الكفاءة التمثيلية.

وتزداد الفائدة التى تعود من الاعتماد على دليل المساحة الورقية – عند إجراء مقارنة بين الأصناف – بمراعاة ما يلى:

أ– ربط دليل المساحة الورقية بمرحلة معينة من النمو النباتى فى المحاصيل التى تحصد مرة واحدة كالحبوب الصغيرة. وفى نباتات المراعى نجد أن الوقت المثالى لإجراء عملية الحش يتوافق مع وقت الوصول إلى دليل المساحة الورقية المثالى.

ب– يُتوقع أعلى إنتاجية للمادة الجافة عندما تتوافق القيمة المثلى لدليل المساحة الورقية مع أفضل الظروف البيئية لعملية البناء الضوئى.

جـ– قد يشير دليل المساحة الورقية إلى المرحلة التى تكون فيها الكفاءة التمثيلية فى أقصى معدلاتها.

د– لابد من ربط دليل المساحة الورقية بفترة بقاء الأوراق على كفاءتها العالية فى عملية البناء الضوئى (LAD).

ومن أمثلة القيم المثلى لدليل المساحة الورقية التى تم التوصل إليها: ٢,٥–٥,٠ فى محاصيل الحبوب الصغيرة، و ٥,٠ فى محاصيل العلف التى تزرع نثرًا، و ٦,٢–٨,٩ فى محاصيل المراعى (عن Stoskopf ١٩٨١).

١٩– معدل النمو النسبى للورقة Relative Leaf Growth Rate:

هو مقدار الزيادة فى المساحة الورقية فى وحدة الزمن، ويرمز له بالرمز (RLGR)، ويقدر بإحدى المعادلتين التاليتين:

$$\mathbf{RLGR} = \frac{\Delta \mathbf{L}}{\mathbf{L} \times \mathbf{time}}$$

$$= (\log_e L_2 - \log_e L_1)(t_2 - t_1)$$

حيث ΔL (تُقرأ دلتا إل) هو التغير فى المساحة الورقية فى وحدة الزمن، والـ "time" هو هذه الوحدة الزمنية، و (L) المساحة الورقية الأصلية. وتلك هى القيم اللازمة لحساب معدل النمو النسبى للورقة حسب المعادلة الأولى.

أما فى المعادلة الثانية .. فإن L_1، و L_2 تمثلان المساحة الكلية للأوراق فى أوقات t_1، و t_2 قبل وبعد فترة زمنية معينة، وتقدر الفترة الزمنية باليوم، أو الأسبوع، أو الشهر ... إلخ (يلاحظ أن اللوغاريتم للأساس e وليس للأساس ١٠).

٢٠- فترة وجود المساحة الورقية Leaf Area Duration:

مع تقدم النباتات فى العمر فإن كثيرًا من الأوراق تدخل فى مرحلة الشيخوخة؛ وتقل المساحة الورقية المستقبلة للضوء نتيجة لذلك؛ الأمر الذى يترتب عليه نقص كفاءة النبات فى تكوين المادة الجافة بصورة تدريجية. وتقدر فترة وجود المساحة الورقية بحساب مساحة أوراق النبات على فترات منتظمة، ويرمز لها بالرمز LAD.

٢١- معدل النمو النسبى Relative Growth Rate:

هو الوزن الجاف المتراكم للنبات لكل وحدة من الوزن الأصلى خلال وحدة زمنية معينة، ويرمز له – غالبًا – بالرمز (RGR)، وأحيانًا بالرمز (r)، ويقدر بإحدى المعادلتين التاليتين:

$$\mathbf{RGR} = \frac{\Delta W}{W \times time}$$

$$= (\log_e W_2 - \log_e W_1) / (t_2 - t_1)$$

حيث إن:

ΔW: (تقرأ دلتا دبليو) هو التغير فى الوزن الجاف للنبات فى وحدة الزمن.

time: وحدة الزمن.

W_1: الوزن الجاف للنبات فى وقت معين t_1، و W_2: الوزن الجاف فى وقت آخر t_2 بعد انقضاء فترة زمنية معينة.

وقد يستبدل بالوزن الجاف للنبات أى مقياس آخر؛ كطول النبات مثلاً.

٢٢- معدل النمو المحصولى Crop Growth Rate:

هو الوزن الجاف للنبات المتراكم فى وحدة زمنية معينة لكل وحدة من مساحة الأرض، ويرمز له بالرمز (CGR)، ويقدر بالمعادلة التالية:

$$\mathbf{CGR} = \frac{\Delta W}{P \times time}$$

حيث إن P هى وحدة المساحة من الأرض التى يشغلها النبات.

كما أن:

$$\mathbf{CGR} = \frac{W_2 - W_1}{t_2 - t_1}$$

٢٣- كثافة المساحة الورقية Leaf Area Density:

تُعّبَر كثافة المساحة الورقية عن مدى كثافة النمو الورقى فى الحيز الذى يشغله النبات، وهى نسبة مساحة السطوح الورقية إلى الحيز الذى يشغله النبات، وتميز بالسنتيمتر المربع إلى كل سنتيمتر مكعب. ويتأثر هذا القياس – كثيرًا – بمدى قوة النمو الخضرى للنبات.

٢٤- الكثافة النوعية للورقة Specific Leaf Weight:

تحسب الكثافة النوعية للورقة – التى تعطى الرمز SLW – بالمعادلة التالية:

$$\mathbf{SLW} = \frac{\text{Leaf dry weight (mg)}}{\text{Leaf area (cm}^2\text{)}}$$

وهى تميز بالمليجرام لكل سنتيمتر مربع.

وترتبط الكثافة النوعية للورقة بمعدل البناء الضوئى، وتعد مقياسًا له فى بعض المحاصيل.

٢٥- معدل إنتاج الأعضاء النباتية Organ Production Frequency:

يحسب معدل إنتاج الأعضاء النباتية (تكتب اختصارًا: OPF) بالمعادلة التالية:

$$\mathbf{OPF} = \frac{X_2 - X_1}{X_1}$$

حيث إن:

X_1 = أعداد الأوراق أو الأزهار أو غيرها من الأعضاء النباتية فى وقت معين t_1 (يحسب الوقت باليوم أو الأسبوع أو الشهر).

X_2 = أعداد العضو النباتى نفسه فى وقت لاحق t_2.

٢٦- معدل موت الأعضاء النباتية Organ Death Frequency:

يحسب معدل موت الأعضاء النباتية (كالأوراق مثلاً) بالمعادلة التالية:

$$\mathbf{ODF} = \frac{2(d_2 - d_1)}{X_1 - X_2 - 2d_1}$$

حيث إن:

d_1 = عدد الأوراق الميتة فى وقت معين (يُحسب الوقت باليوم أو الأسبوع أو الشهر).

d_2 = عدد الأوراق الميتة فى الوقت الأول t_2.

X_1 = العدد الكلى للأوراق فى الوقت الأول t_1.

X_2 = العدد الكلى للأوراق فى الوقت اللاحق t_2.

٢٧- الكفاءة التمثيلية Net Assimilation Rate:

هى الوزن الجاف المتراكم لكل وحدة مساحة ورقية فى وحدة الزمن. وهى ليست مقياسًا دقيقًا لمدى كفاءة عملية البناء الضوئى، ولكنها مقياس للزيادة فى الوزن الجاف للنبات، والتى هى محصلة الفرق بين البناء الضوئى والتنفس، ويرمز لها – غالبًا – بالرمز (NAR)، وأحيانًا بالرمز (E)، وتقدر بإحدى المعادلتين التاليتين:

$$\mathbf{NAR} = \frac{\Delta W}{L \times time}$$

$$= \frac{(W_2 - W_1)(\log_e L_2 - \log_e L_1)}{(L_2 - L_1)(t_2 - t_1)}$$

وقد سبقت الإشارة إلى مدلولات جميع الرموز المستخدمة فى المعادلتين.

وقد يعبر عن (L) بمقاييس أخرى؛ مثل وزن الأوراق، أو محتواها من النيتروجين، أو البروتين، ويعطى ذلك قيمًا مختلفة للكفاءة التمثيلية؛ ولذا .. فإنها قد تُعْطَى الرمز (E) عند استعمال مساحة الأوراق، والرمز (E_W) عند استعمال وزن الأوراق ... إلخ.

كذلك فإن:

$$NAR = \frac{W2 - W1}{t_2 - t_1} \times \frac{(\log_e F_2 - \log_e F_1)}{F_2 - F_1}$$

حيث إن:

W = الوزن الجاف/وحدة المساحة من الأرض.

F = المساحة الورقية/وحدة المساحة من الأرض.

ويستدل مما تقدم بيانه على أن:

معدل النمو النسبى (RGR) = الكفاءة التمثيلية (NAR) × المساحة النسبية للأوراق (LAR).

معدل النمو المحصولى (CGR) = الكفاءة التمثيلية (NAR) × دليل مساحة الورقة (LAR).

تستخدم الكفاءة التمثيلية كمقياس لمعدل البناء الضوئى مطروحًا منه الفاقد بالتنفس. وتتأثر الكفاءة التمثيلية بكل من: درجة الحرارة، والضوء، وغاز ثانى أكسيد الكربون، والماء، وعمر الأوراق، والعناصر المعدنية التى يحتاج إليها النبات، ومحتوى الكلوروفيل بالأوراق، والتركيب الوراثى للنبات.

وتعد درجة الحرارة من أهم العوامل المؤثرة فى الكفاءة التمثيلية؛ وذلك لتأثيرها المزدوج فى كل من عمليتى التنفس والبناء الضوئى. فكل عملية حيوية نباتية تتم فى حدود حرارية معينة. فبعد درجة حرارة صغرى Minimum temperature (أو درجة حرارة الأساس base temperature) نجد أن ارتفاع درجة الحرارة يكون مصاحبًا بزيادة فى معدل العملية الحيوية (مثل التنفس، والنمو، والبناء الضوئى ... إلخ)، ويعرف معدل الزيادة باسم قيمة الـ Q_{10}.

ولكل عملية حيوية Q_{10} خاص بها. ويعنى Q_{10} = ٢ – مثلاً – أن معدل العملية الحيوية يتضاعف مع كل ارتفاع فى الحرارة قدره ١٠ درجات مئوية، ولكن ذلك يكون فى المجال الحرارى المحصور بين درجة الحرارة الصغرى، ودرجة الحرارة المثلى Optimum temperature التى تكون فيها العملية الحيوية فى أعلى معدلاتها. وبارتفاع درجة الحرارة عن الدرجة المثلى ينخفض معدل العملية الحيوية إلى أن يتوقف تمامًا – مرة أخرى – عند درجة الحرارة العظمى Maximum temperature.

وتختلف تلك الدرجات الثلاث (الصغرى، والمثلى، والعظمى) كثيرًا باختلاف النوع النباتى، والصنف، وعمر النبات، والعملية الحيوية ذاتها. فمثلاً .. نجد فى الذرة أن درجات الحرارة الصغرى، والمثلى، والعظمى هى على التوالى ١٠°م، و ٣٠–٣٥°م، و ٤٥°م بالنسبة للكفاءة التمثيلية، و ٨–١٠°م، و ٣٢–٣٥°م، و ٤٠–٤٤°م بالنسبة لإنبات البذور.

ونجد أن معدل التنفس الضوئى Photorespiration يزداد – بارتفاع درجة الحرارة – بدرجة أكبر من معدل ازدياد التنفس الظلامى dark respiration. كما أن معدل التنفس الضوئى يزداد – فى الحرارة العالية – بدرجة أكبر من معدل الزيادة فى البناء الضوئى؛ فمثلاً .. وجد فى البطاطس أن معدل البناء الضوئى يصل إلى أقصاه فى حرارة ٢٠°م، ولكن التنفس يكون – فى تلك الدرجة – حوالى ١٢٪ فقط من أقصى معدلاته الممكنة. وبارتفاع الحرارة إلى ٤٨°م يصل التنفس إلى أقصى معدلاته، بينما ينخفض معدل البناء الضوئى إلى الصفر. ومن الطبيعى أن تنخفض الكفاءة التمثيلية – فى حالات كهذه – مع أى ارتفاع فى درجة الحرارة عن الدرجة المثلى للبناء الضوئى.

وفى البرسيم الحجازى قدرت الـ Q_{10} بنحو ١,٤٦ للتنفس، مقارنة بنحو ١,١٨ للكفاءة التمثيلية؛ الأمر الذى يعنى ازدياد معدل التنفس بدرجة أكبر من ازدياد معدل البناء الضوئى مع ارتفاع درجة الحرارة. ففيما بين درجتى حرارة ٩°م، و ٢٦°م كان التأثير الإيجابى لارتفاع الحرارة على معدل البناء الضوئى نحو خُمس تأثيرها السلبى الناشئ عن زيادتها لمعدل التنفس.

ويكون التأثير السلبى لارتفاع درجة الحرارة أكثر وضوحًا، وأشد وقعًا على النباتات الـ C_3؛ مما يكون عليه الحال فى النباتات الـ C_4. كما أن تأثير الحرارة يختلف بشدة فيما بين النجيليات الاستوائية ونجيليات المناطق الباردة. فنجد — مثلاً — أن الكفاءة التمثيلية تبلغ أقصى معدلاتها فى حرارة ٢٠°–٢٥°م فى نجيليات المناطق الباردة، بينما يرتفع المجال الحرارى المثالى للكفاءة التمثيلية إلى ٣٠°م–٣٥°م فى النجيليات الاستوائية، بما فى ذلك الذرة.

وقد وجد فى القمح الربيعى — وهو من نباتات المناطق الباردة ذات المسار البنائى C_3 — أن ارتفاع الحرارة درجة واحدة مئوية — فى بداية مرحلة تكوين السنابل — صَاحَبَه انخفاض قدره ٤٪ فى محصول الحبوب.

ومن ناحية أخرى .. فإن انخفاض شدة الإضاءة، وتقدم الأوراق فى العمر يكون مصاحبًا بانخفاض فى معدل البناء الضوئى، بينما تبقى معدلات التنفس على ما هى عليه ما دامت الأوراق حية. ويبين جدول (١٨–١) تلك العلاقة فى مثال افتراضى.

ويتبين من الجدول أن البناء الضوئى فى النبات الكبير (ذى الأوراق السبع) أعلى مما فى النبات الصغير (ذى الأوراق الأربع)، ولكن إجمالى التنفس فى النبات الكبير أعلى بكثير مما فى النبات الصغير؛ الأمر الذى يؤدى إلى انخفاض الكفاءة التمثيلية فى النبات الكبير مقارنة بالنبات الصغير.

ومما تجدر الإشارة إليه أن الكفاءة التمثيلية كانت صفرًا فى الورقة الخامسة (جدول ١٨–١)، بينما كانت سالبة القيمة فى الورقتين السادسة والسابعة. ويقال على الورقة الخامسة — فى حالات كهذه — إنها وصلت إلى نقطة التعادل Compensation Point؛ حيث كان الفقد فيها بالتنفس مكافئًا للزيادة بالبناء الضوئى. أما الورقتان السادسة والسابعة فيقال إنهما متطفلتان على النبات، وهو وصف يطلق على الأوراق التى تفقد من الغذاء — بالتنفس — أكثر مما تصنعه بالبناء الضوئى. ولكن يجب ألا ننسى أن الأوراق الخامسة، والسادسة، والسابعة تلك كانت قد أسهمت — فى النبات الصغير، أى وهى صغيرة — فى الكفاءة التمثيلية بدرجة عالية؛ حيث كان صافى إسهامها فى النمو النباتى إيجابيًّا.

جدول (١٨-١): علاقة عدد الأوراق وعمرها بكل من معدلى البناء الضوئى والتنفس، وتأثير ذلك فى الكفاءة التمثيلية على مستوى الورقة، ومستوى النبات؛ فى كل من النباتات الصغيرة والكبيرة (مثال افتراضى).

عمر النبات	رقم الورقة	معدل البناء الضوئى	معدل التنفس	الكفاءة التمثيلة
النبات الصغير	١	١٢	٢	١٠
(٤ أوراق)	٢	١٠	٢	٨
	٣	٧	٢	٥
	٤	٣	٢	١
		٣٢	٨	٢٤
نباتات أكبر عمرًا	١	١٢	٢	١٠
(٧ أوراق)	٢	١٠	٢	٨
	٣	٧	٢	٥
	٤	٣	٢	١
	٥	٢	٢	صفر
	٦	صفر	٢	٢-
	٧	صفر	١	١-
		٣٢	١٣	٢١

٢٨- دليل الحصاد Harvest Index:

يطلق على دليل الحصاد أحيانًا الأسماء: معامل الفاعلية Coefficient of Effectiveness، ومعامل انتقال الغذاء إلى الأجزاء الاقتصادية للنبات (معامل الهجرة) Migration Coefficient، وهو المحصول الاقتصادى كنسبة مئوية من الوزن الجاف الكلى للنبات، ويرمز له بالرمز (HI)، ويقدر بالمعادلة التالية:

$$HI = \frac{EY}{W} \times 100$$

حيث إن:

EY = المحصول الاقتصادى (الجزء النباتى الذى يزرع من أجله المحصول).

W = المحصول البيولوجى (الوزن الجاف الكلى للنبات) (عن Thorne ١٩٦٠،

و Wallace وآخـــرين ١٩٧٢، و Evans ١٩٧٢، و Bleasdale ١٩٨٤، و Leopold & Kriedmann ١٩٧٥، و Stoskopf ١٩٨١، و Kalloo ١٩٨٨).

وقد وجدت اختلافات كبيرة فى دليل الحصاد بين ٢٤ صنفًا وسلالة من فول الصويا، ولكن لم تظهر علاقة واضحة بين المحصول ودليل الحصاد. كذلك تراوح دليل الحصاد بين ٤٤٪ و ٥٥٪ بين سبعة أصناف وسلالات من الفاصوليا، ولم يظهر فيها – كذلك – علاقة واضحة بين الصفتين.

كما سجلت – كذلك – اختلافات كبيرة فى دليل الحصاد بين أصناف وسلالات المحاصيل الدرنية؛ حيث تراوح من ٦٥٪–٨٠٪ فى البطاطس، ومن ١,٢٪–٥٦٪، و ٣٧٪–٨١٪، و ٦٤٪–٨٤٪ فى (دراسات مختلفة) فى البطاطا، ومن ٢٥٪–٦٠٪ فى الكاسافا (عن Bhagsari & Ashley ١٩٩٠).

٢٩– القدرة النسبية للأعضاء الاقتصادية من النبات على جذب الغذاء إليها Relative Sink Strength: يرمز إليها بالرمز (RSS)، وهى قيمة اقترحها Scully & Wallace (١٩٩٠) من دراساتهم على الفاصوليا الجافة، وتقدر كما يلى:

$$\text{RSS} = \frac{\text{معدل نمو البذور (المحصول الاقتصادى)}}{\text{معدل الزيادة فى المحصول البيولوجى)}}$$

وفى الفاصوليا .. تدل قيم الـ RSS المساوية للواحد الصحيح – أو التى تزيد عليه – على تمتع البذور بقدرة عالية على جذب الغذاء إليها وتخزينه فيها، وقدرة عالية للنبات على نقل هذا الغذاء المجهز إليها. ويمكن أن يحل محلّ البذور فى المعادلة أىُّ عضو نباتى اقتصادى آخر – كالجذور أو الدرنات مثلاً – حسب المحصول.

٣٠– درجة الإنتاجية Productivity Score:

هى حاصل جمع كل من: المحصول الاقتصادى، والمحصول البيولوجى، ودليل الحصاد. تعد درجة الإنتاجية مقياسًا واحدًا لمقارنة التباينات بين التراكيب الوراثية فى المحصول، وعند مقارنة تأثير بعض المعاملات (عن Stoskopf ١٩٨١).

ومن الدراسات التى اعتمدت قياساتها – أساسًا – على دلائل النمو نذكر أبحاث Nieuwhof وآخرين (١٩٩١) التى أجريت على ١٥ صنفًا وسلالة من الطماطم فى حرارة بدأت بـ ١٩°م نهارًا، و ١٤°م ليلاً، مع فترة إضاءة ضعيفة مقدارها ثمانى ساعات، ثم عوملت النباتات بتعريضها ليلاً لحرارة مقدارها ٦°م، أو ١٠°م، أو ١٤°م (بهدف تقييم النمو النباتى فى ظروف الإضاءة الضعيفة والحرارة المنخفضة). وقد توصل هؤلاء الباحثون إلى ما يلى:

أ- وجدت اختلافات جوهرية بين أصناف الطماطم – تحت هذه الظروف – فى كل من دلائل النمو: RGR، و NAR، و LAR، و SLA، و LWR.

ب- ازداد كل من RGR، و LAR، و SLA، بينما انخفض الـ LWR فى حرارة الليل العالية.

جـ- وجد ارتباط سالب قوى بين كل من NAR، و LAR، وبين NAR، و SLA، بينما وجد ارتباط موجب قوى بين LAR، و SLA.

فسيولوجيا المحصول

إن الإنتاج المحصولى – لأى نبات – يعتمد على أربعة عوامل أساسية؛ هى:

١- معدل البناء الضوئى Photosynthesis.

٢- معدل التنفس Respiration.

٣- معدل انتقال الغذاء المجهز من أماكن تصنيعه فى الأوراق إلى حيث يستفيد منه النبات فى نموه، أو إلى حيث يخزن فى أعضاء التخزين (Translocation).

٤- نسبة الغذاء المجهز التى تنتقل إلى الأجزاء الاقتصادية من النبات – وهى الأجزاء التى يزرع من أجلها المحصول – من الغذاء المُصّنع الكلى الذى يحتفظ به النبات بعد استقطاع الجزء المفقود منه بالتنفس.

ويتفرع من هذه العوامل الأربعة أمور أخرى كثيرة تتفاعل معها؛ حيث تؤثر فيها وتتأثر بها.