كفاءة إعتراض الكساء الخضري للأشعة الشمسية وإنتاج المادة الجافة في محاصيل الحقل

إن المحصول الكلي من المادة الجافة لنباتات محاصيل الحقل ينتج عن تجميع صافي معدل التمثيل الضوئي (صافي تمثيل غاز CO_2) أثناء موسم النمو. وأن العوامل الرئيسية المؤثرة على محصول المادة الجافة الكلية التي تكونها نباتات المحاصيل هي كفاءة الكساء الخضري في إعتراض الأشعة الشمسية الساقطة عليه، وكفاءة الإستفادة من الطاقة الضوئية الممتصة في تثبيت غاز ثاني أكسيد الكربون.

ولقد سبق أن ناقشنا في الباب الثاني، تمثيل غاز ثاني أكسيد الكربون على مستوى الخلية والنسيج والنباتات الفردية، حيث قام علماء فسيولوجيا النباتات بدراسة تثبيت غاز CO_2 في تجارب متحكم فيها تحت ظروف المعمل، وفي هذا الفصل سوف نوضح الدراسات التي قام بها علماء فسيولوجيا المحاصيل على تثبيت غاز CO_2 على مستوى المجاميع النباتية النامية معا تحت ظروف الحقل. وهنا تجدر الإشارة إلى أن نمو نباتات محاصيل الحقل معا تحت ظروف الحقل يعمل على صعوبة دراسة تثبيت غاز CO_2 بواسطة الكساء الخضري لهذه النباتات تحت هذه الظروف، ويرجع ذلك إلى أن الظروف البيئية في الحقل غير ثابتة بل تتغير باستمرار، مثل التغيرات التي تحدث أثناء موسم النمو في شدة الإضاءة وطول الفترة الضوئية، ودرجة الحرارة ويسر الماء والعناصر الغذائية الموجودة في التربة، وتركيز الأكسجين وCO_2 . وسوف نوضح في هذا الفصل كفاءة اعتراض الكساء الخضري للأشعة الشمسية الساقطة عليه، وعلاقة ذلك بإنتاجية المحصول المنزرع.

العوامل المؤثرة على كفاءة الكساء الخضري في إعتراض الأشعة الشمسية

تؤثر كثير من العوامل الخاصة بالنبات على كفاءة الكساء الخضري لنباتات محاصيل الحقل، في إعتراض الأشعة الشمسية الساقطة عليه وأهمها ما يلي:

١- مساحة السطح الورقي Leaf area ودليل مساحة الأوراق Leaf area index،
٢- زاوية الورقة على النبات Leaf angle (Inclination).
٣- كثافة النباتات Plant density.
٤- توزيع النباتات بالحقل Plant distribution.

١- تأثير مساحة السطح الورقي على كفاءة الكساء الخضري في اعتراض الأشعة الشمسية

لكي يستغل المحصول المنزرع الأشعة الشمسية الساقطة عليه بكفاءة عالية، فلابد وأن يعترض الكساء الخضري لهذا المحصول معظم الأشعة بواسطة الأنسجة الخضراء، والتي تقوم بعملية التمثيل الضوئي. وتعتبر الأوراق هي أعضاء النبات الرئيسية، والتي تقوم باعتراض الأشعة الشمسية وبالتمثيل الضوئي في نباتات محاصيل الحقل. وفي نباتات محاصيل الحقل الحولية مثل القمح والذرة، تكون مساحة السطح الورقي صغيرة في بداية حياة النبات وهي في طور البادرة، ولذلك فيعترض جزء قليل من الأشعة الشمسية الساقطة عليه، والجزء الأكبر يسقط على الأرض، ولذلك فإن أنواع المحاصيل ذات الكفاءة العالية في استغلال الطاقة الشمسية تعمل على استغلال طاقتها في المراحل الأولى من النمو في تكوين مساحة ورقية كبيرة، وهذا يؤدي بدوره إلى زيادة كفاءة الإستفادة من الأشعة الشمسية الساقطة عليها في المراحل الأولى من نمو النبات، وهناك بعض العمليات الزراعية التي تشجع النمو المبكرللنباتات لتغطي سطح الأرض بسرعة للإستفادة من الضوء الساقط عليها، ومن هذه العمليات هي إضافة كمية من السماد عند الزراعة Starter fertilizer، وزيادة كثافة النباتات في وحدة المساحة.

إن إعتراض الأشعة الضوئية بواسطة الأوراق، يزداد بزيادة مساحة السطح الورقي، وأن معدل الزيادة في مساحة السطح الورقي تكون كبيرة في

بداية النمو، ولكن نظرا إلى أن مساحة السطح الورقي في تلك الفترة من النمو تكون صغيرة، فإنه لا يحدث إعتراض معنوي للأشعة الضوئية إلا بعد بضعة أسابيع من الزراعة. وحيث أن الإزهار يوقف الزيادة في مساحة السطح الورقي في النباتات الحولية محدودة النمو، والتي فيها يقف نمو الساق نتيجة لتحول البرعم الطرفي إلى نورة، مثل النباتات النجيلية (القمح والأرز والذرة وغيرها)، فإن الهدف من العمليات الزراعية التي تجرى لهذه المحاصيل هو الوصول إلى أقصى مساحة ورقية يمكنها إعتراض كل أو معظم الأشعة الشمسية الساقطة عند طرد النورات، وبالتالي إلى الوصول إلى أقصى تمثيل ضوئي بواسطة النباتات بعد طرد النورات، وهذا مهم بالنسبة لمحاصيل الحبوب، والتي تأتي فيها غالبية المواد الكربوهيدراتية التي تدخل في تكوين حبوبها من عمليات التمثيل الضوئي بعد طرد النورات، ولذلك فتصبح المساحة الورقية الفعالة لإنتاج المحصول عند طرد النورات.

طرق قياس السطح الورقي

يتم قياس السطح الورقي للنباتات بطرق متعددة، أهمها ما يلي:

١- استخدام البلانيميتر

تعتبر هذه الطريقة أهم الطرق التقليدية لقياس مساحة السطح الورقي لنباتات محاصيل الحقل. وتتم عملية القياس بهذه الطريقة عن طريق تسيير مؤشر الجهاز حول حافة الورقة، المراد قياس مساحتها حتى يصل إلى نقطة البداية من جديد، ثم تقرأ مساحة السطح الورقي على ورنية الجهاز، ويراعى عند إستخدام هذه الطريقة ما يلي:

أ- وضع الأوراق المراد قياس مساحة سطحها تحت لوح زجاجي قبل عملية القياس، حتى تتم عملية القياس بسهولة ودقة.

ب- قياس كل ورقة عادة على حدة، ويعاد قياسها أكثر من مرة لضمان الدقة.

٢- وزن وحدة المساحة من السطح الورقي

توزن الأوراق التي يراد قياس مساحة سطحها ويسجل وزنها، ثم توضع هذه الأوراق فوق بعضها، وباستخدام إسطوانة معلومة القطر، يتم أخذ ثلاث أقراص أو أكثر من أماكن مختلفة على الأوراق، ويتم وزن هذه الأقراص.

ويتم حساب مساحة هذه الأوراق عن طريق معرفة الوزن الكلي للأوراق ومساحة وزن الأقراص.

٣- توضع الأوراق المراد قياس مساحتها على أفراخ من الورق المصقول، ثم يحدد شكل الأوراق عليه بالقلم الرصاص، ثم تقص هذه الأوراق ويوزن الورق المصقول، الذي يشغل مساحة الأوراق المراد قياس مساحتها.

تحدد مساحة من الورق المصقول بالضبط ولتكن ١٠ × ١٠سم، ثم توزن بدقة.

تحسب مساحة الأوراق، عن طريق معرفة العلاقة بين وزن الورق المصقول الذي تم قصه، ووزن وحد المساحة من هذا الورق. وتتميز هذه الطريقة ببساطتها، ودقتها نسبيا.

٤- عدد المربعات المغطاة

تتميز هذه الطريقة بسهولة الإجراء والدقة نسبيا، ولكنها تحتاج إلى وقت طويل نسبيا، وتحسب مساحة الأوراق بهذه الطريقة عن طريق إستعمال لوح زجاجي مقسم إلى مربعات.

٥- استخدام جهاز Areameter

يتميز هذا الجهاز بسرعته، إذ يمكن عن طريقه قياس مساحة ٥٠٠ ورقة ذرة شامية في أقل من ساعة، ويعطي الجهاز المساحة حتى ثمانية أرقام صحيحة، ويعمل بكل من البطارية أو التيار الكهربي.

٦- استعمال المعادلات الرياضية

يمكن قياس مساحة السطح الورقي للنبات، بتطبيق المعادلات الرياضية، ولقد أمكن التوصل إلى معادلة رياضية، خاصة بتقدير مساحة السطح الورقي لكل محصول من محاصيل الحقل، وسوف نذكر فيما يلي المعادلات الرياضية التي تستخدم في تقدير مساحة السطح الورقي لبعض محاصيل الحقل:

عموما- قد أمكن التوصل إلى معادلات مشابهة، لتقدير مساحة السطح الورقي، لمعظم محاصيل الحقل.

جدول (٣-١). بعض المعادلات الرياضية المستعملة في تقدير مساحة السطح الورقي في بعض محاصيل الحقل

المحصول	مساحة السطح الورقي
الذرة الشامية	(طول الورقة × أقصى عرض) × ٠.٧٥ [١]
الذرة الرفيعة	(طول الورقة × أقصى عرض) × ٠.٧٤٧ [٢]
الأرز	(طول الورقة × عرضها) × ٠.٨٠٢ [٣]
القطن	(طول الورقة × عرضها) × ٠.٧٧ [٤]
القرطم	(طول الورقة × عرضها) [٥]
الفول	(طول الوريقة × عرضها) ٠.٥٨٣ + ٠.٦٢٤ [٦]
فول الصويا	(طول الوريقة الطرفية × عرضها) ٦.٥٣٢ + ٢.٠٤٥ [٧]

[1] Francis, *et. al.*(1969)
[2] Stickler, *et. al.*(1961)
[3] Bhan and Pande (1966)
[4] Ashley, *et. al.*(1963)
[5] Sepaskhah, (1977)
[6] Gardner, *et. al.*(1985)
[7] Wiersma andey (1975)

٢- تأثير دليل مساحة الأوراق على كفاءة الكساء الخضري في اعتراض الأشعة الشمسية

تحت ظروف الحقل لا تعتبر مساحة السطح الورقي مقياسا سليما لمساحة السطح الورقي لمحصول ما في مساحة معينة من الأرض التي يشغلها هذا المحصول، وذلك لأن مساحة السطح الورقي لكل نبات تكون مرتبطة ارتباطا وثيقا بمسافات الزراعة، أو المساحة التي يشغلها النبات، ولذلك فقد استعمل دليل مساحة الأوراق للتعبير عن كفاءة النبات في تغطية مساحة معينة من سطح الأرض، والذي يؤثر على اعتراض الأشعة الشمسية. ويعرف دليل مساحة الأوراق Leaf area index (LAI) بأنه عبارة عن النسبة بين مساحة الوراق التي يحملها النبات بالنسبة لمساحة الأرض التي يشغلها هذا النبات.

ويعتبر دليل مساحة الأوراق مقياسا ذو دلالة مورفولوجية، يعبر نسبة مساحة السطح الورقي (سطح واحد فقط) للنبات، إلى مساحة الأرض التي يشغلها النبات، أو بمعنى آخر على كفاءة النبات في تغطية مساحة معينة من سطح الأرض، والتي تؤثر بدورها على كفاءة التمثيل الضوئي، وإنتاج المادة الجافة بواسطة النبات، وعلى سبيل المثال، إذا فرض أن دليل مساحة الأوراق في الذرة الشامية ٤، فإن هذا يدل على أن كل ٤سم من مساحة الأوراق تغطي ١سم من سطح الأرض التي يشغلها النبات، ويحسب دليل مساحة الأوراق، في وقت معين، من المعادلة الآتية:

$$\text{دليل مساحة الأوراق} = \frac{\text{مساحة السطح الورقي للنبات (سطح واحد فقط)}}{\text{مساحة الأرض التي يشغلها النبات}}$$

$$LAI = \frac{\text{Leaf area } (L_A)}{\text{Ground area } (G_a)}$$

ويجب التعبير عن كل من مساحة السطح الورقي ومساحة الأرض بنفس وحدات قياس المساحة (م^2/ م^2).

ومن الناحية النظرية، فإن دليل مساحة الأوراق، الذي يساوي الواحد الصحيح، هو عبارة عن وحدة مساحة من السطح الورقي، لكل وحدة مساحة من سطح الأرض، ولذا فيمكن أن يعترض كل الأشعة الضوئية الساقطة عليها، لكن لا يحدث هذا عادة تحت الظروف الطبيعية بسبب شكل الورقة، وزاوية الورقة على الساق النباتات في هذه الحالة، وسمك الورقة، وهذا يؤدي إلى عدم إعتراض ١٠٠% من الضوء الساقط على النباتات في هذه الحالة. ولذلك فلكي يستطيع الكساء الخضري أن يعترض معظم الضوء الساقط عليه، فلابد أن يزيد دليل مساحة الأوراق عن الواحد الصحيح. ولقد وجد أن دليل مساحة أوراق يتراوح بين ٣-٥ يعتبر ضروريا للوصول إلى إعتراض معظم الضوء الساقط على الكساء الخضري، وكذلك أعلى إنتاج من المادة الجافة في معظم نباتات محاصيل الحقل، التي لا يكون فيها المجموع الخضري هو المحصول الإقتصادي الذي يزرع من أجله المحصول، بينما في محاصيل العلف الأخضر والتي يكون فيها المجموع الخضري هو الهدف من زراعة المحصول، فيجب أن يكون دليل مساحة الأوراق مرتفعا، للوصول بالكساء الخضري لهذه النباتات، إلى أقصى كفاءة في إعتراض الأشعة الشمسية الساقطة عليه بعد فترة قصيرة من الزراعة، وعلى سبيل المثال، محاصيل العلف الأخضر وخصوصا النجيلية، ذات الكساء الخضري ذو الأوراق

القائمة، يلزم أن يكون دليل مساحة الأوراق عاليا (٨ -١٠) تحت الظروف المثلى، وأن قيم دليل مساحة الأوراق اللازمة لأقصى إنتاجية من المحصول المنزرع، تزداد بزيادة شدة الإضاءة. وأن دليل مساحة الأوراق وتوزيعة خلال موسم النمو، يختلف بإختلاف الأنواع النباتية، وتؤثر كثير من العمليات الزراعية على دليل مساحة الأوراق، أهمها: كثافة النباتات (عدد النباتات في وحدة المساحة) والتسميد والري وميعاد الزراعة وغيرها.

علاقة دليل مساحة الأوراق (LAI) بمعدل نمو المحصول (CGR) وصافي التمثيل الضوئي (NAR)

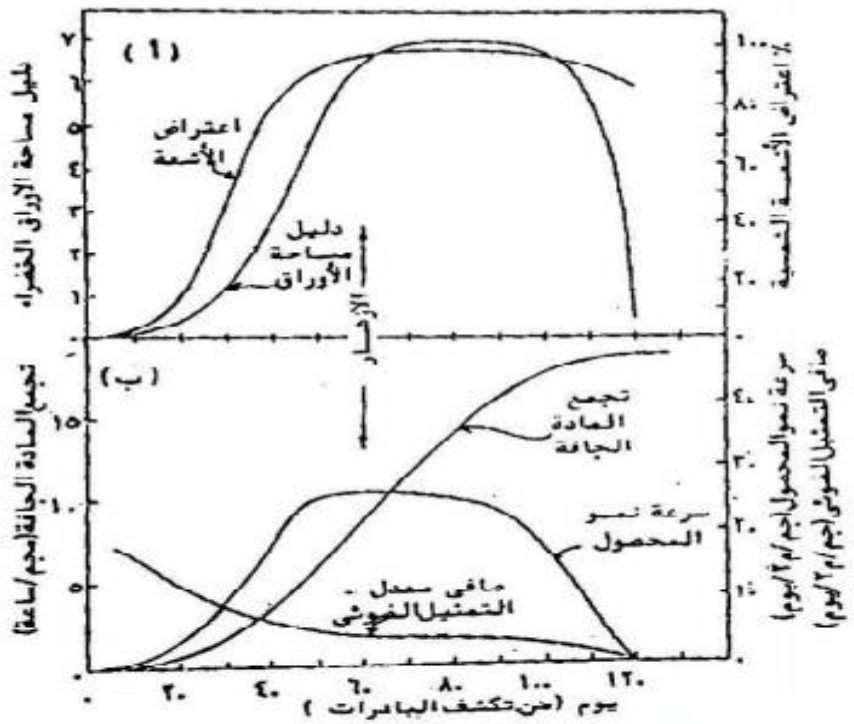
لقد وجد أن معدل نمو المحصول للأنواع النباتية المختلفة يرتبط إرتباطا وثيقا باعتراض الكساء الخضري للأشعة الشمسية (شكل ٣-١).

ومن الجدير بالذكر أن NAR تكون عالية عندما تكون النباتات صغيرة، حيث تتعرض معظم الأوراق إلى ضوء الشمس المباشر. ومع نمو النباتات يزداد LAI ويزداد معه تظليل الأوراق بعضها لبعض مسببا نقصا في NAR بتقدم النباتات في العمر (شكل ٤-١). وعندما يكون LAI مرتفعا في الكساء الخضري للنباتات، فإن الأوراق حديثة العمر، الموجودة بقمة النباتات تعترض معظم الأشعة الشمسية الساقطة على الكساء الحضري، كما أن هذه الأوراق العليا تكون ذات معدل مرتفع لتمثيل غاز CO_2، وجزء كبير من ناتجات تمثيلها الضوئي تنتقل إلى الأجزاء الأخرى بالنبات، وعلى العكس من ذلك فإن الأوراق المسنة الموجودة بقاعدة النبات، والتي تعاني من التظليل يكون معدل تمثيلها لغاز CO_2 قليل، ولذلك فإنها تساهم بجزء أقل من المواد الغذائية الممثلة بها والتي تنتقل إلى الأجزاء الأخرى من النبات. وهنا تجدر الإشارة إلى أنه عند حساب NAR لا يؤخذ في الحسبان الأجزاء الأخرى الممثلة ضوئيا عدا الأوراق مثل البتلات والسيقان وأغماد الأوراق والنورات، والتي يمكن أن تساهم مساهمة معنوية في محصول البذور في بعض النباتات.

وحيث أن NAR تعتبر مقياسا لمتوسط تمثيل CO_2 لكل وحدة مساحة من السطح الورقي من الكساء الخضري، فإنه عند ضرب NAR في LAI ينتج معدل نمو المحصول CGR كالآتي:

معدل نمو المحصول = صافي معدل التمثيل الضوئي × دليل مساحة الأوراق

CGR = NAR × LAI



شكل (٣-١). علاقة دليل مساحة الأوراق باعتراض الأشعة الشمسية الساقطة على الكساء الخضري ومعدل نمو المحصول وانتاج المادة الجافة أثناء فصل نمو نبات من نباتات محاصيل الحبوب محدود النمو. (Gardner, *et.al.* 1985).

دليل مساحة الأوراق الحرج والأمثل

إن معدل نمو المحصول يزداد بزيادة دليل مساحة الأوراق حتى يصل دليل مساحة الأوراق إلى قيمة عندها يعترض الكساء الخضري للمحصول ٩٥% من الأشعة الضوئية الساقطة عليه، كما يصل معدل نمو المحصول إلى أقصى قيمة له أيضا. ويطلق على دليل مساحة الأوراق عند هذه النقطة بـ:

١) **دليل مساحة الأوراق الحرج** Critical leaf area index إذا لم يحدث نقص أو حدثت زيادة غير معنوية في معدل نمو المحصول بزيادة دليل مساحة الأوراق عن ذلك، أو،

٢) **دليل مساحة الأوراق الأمثل** Optimum leaf area index إذا انخفض معدل نمو المحصول بزيادة دليل مساحة الأوراق عن ذلك.

ولتوضيح دليل مساحة الأوراق الحرج، فقد قام Brougham عام١٩٥٦م، بإجراء تجربة على حشيشة الراي والبرسيم، ووجد أنه بتقدم النباتات في العمر

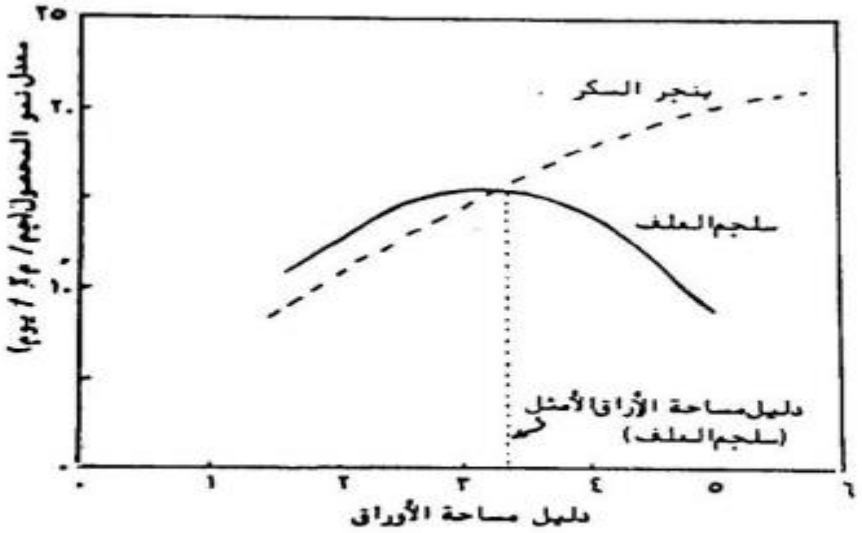
يزداد LAI، كما يزداد أيضا اعتراض الكساء الخضري للأشعة الضوئية الساقطة عليه حتى وصل دليل مساحة الأوراق إلى ٥، وعندها اعترض الكساء الخضري للنباتات ٩٥% من الأشعة الشمسية الساقطة عليه، وبزيادة دليل مساحة الأوراق عن ٥، حدثت زيادة غير معنوية في سرعة نمو المحصول، ولذلك فقد أطلق على دليل مساحة الأوراق هذا بـ"دليل مساحة الأوراق الحرج".

ولقد أجرى واتسون Watson عام ١٩٥٨م، في إنجلترا، تجربة مثل التي أجراهابروغام بهدف توضيح دليل مساحة الأوراق الأمثل، وفي هذه التجربة قام واتسون بزراعة كل من سلجم العلف، وبنجر السكر كل على انفراد، على خطوط، وقام بزراعة عدد نباتات مختلف في كل خط، لكي يغير من دليل مساحة الأوراق. وقام بقياس معدل نمو المحصول للنباتات كل ١٠ يوم، ولقد وجد واتسون نتائج مشابهة لتلك التي وجدها بروغام، فيما عدا أن معدل نمو المحصول في سلجم العلف فقط قد وصل إلى أعلى قيمة له عند دليل مساحة أوراق قدره ٣.٥، ثم انخفض بعد ذلك بزيادة دليل مساحة الأوراق عن ذلك، ولذلك فقد أطلق على دليل مساحة الأوراق هذا (٣.٥) بـ"دليل مساحة الأوراق الأمثل" بينما في نباتات بنجر السكر لم ينخفض معدل نمو المحصول بزيادة دليل مساحة الأوراق عن قيمتها المثلى، ولذلك فتعتبر نباتات بنجر السكر أكثر كفاءة من سلجم العلف، إذ لم تصل النباتات إلى أقصى CGR حتى عند LAI قدره ٥، ويبين شكل (٣-٢) علاقة معدل نمو المحصول بدليل مساحة الأوراق في نباتات سلجم العلف Kale وبنجر السكر.

ويرجع السبب في أن بعض النباتات لها دليل مساحة أوراق أمثل، إلى أن عملية التمثيل الضوئي للكساء الخضري تزداد بزيادة LAI حتى يتم اعتراض ٩٥% من الأشعة الضوئية الساقطة عليه بواسطة الأجزاء الممثلة ضوئيا، وأن أي زيادة إضافية أخرى في مساحة السطح الورقي في مثل هذه النباتات نتيجة لإستمرار النمو الذي يحدث بعد الإزهار وتكوين أوراقا جديدة عند قاعدة النبات، سوف تعمل فقط على تظليل الأوراق السفلى الحديثة التكوين والتي تصبح بعد ذلك غير قادرة على إنتاج ناتجات تمثيل ضوي تكفي إحتياجات تنفسها ونموها، ولذلك فتستمد إحتياجاتها من ناتجات التمثيل الضوئي اللازمة لنموها من أوراق أخرى مجاورة لها، أي أن هذه الأوراق المظللة قد تصبح متطفلة Parasitic وهذا يؤدي إلى نقص معدل النمو، ولذلك فيظهر دليل مساحة أوراق أمثل لمثل هذه النباتات (شكل ٤-٢).

ويظهر دليل مساحة الأوراق الحرج في الأنواع النباتية التي تكون أوراقا جديدة في قمة النبات، والأوراق السفلى المسنة الموجودة عند قاعدة النبات تصبح مظللة، وأن الأوراق تامة الإنبساط لا تستمد ناتجات تمثيل ضوئي من أوراق أخرى، وبالإضافة إلى ذلك، فبمجرد أن تصبح الأوراق السفلى مظللة، فإن معدل تنفسها يقل، نتيجة لنقص معدل تمثيلها الضوئي (Duncan, *et. al.* 1967). ولا يحدث نقصا في معدل نمو المحصول بزيادة دليل مساحة الأوراق، ولذلك فتظهر مثل هذه النباتات دليل مساحة أوراق حرج، وفي هذا المجال وجد كنج وايفانز عام ١٩٦٧م، أن الزيادة في معدل تنفس الأوراق السفلى المسنة، يقل بدرجة كبيرة، بمجرد الوصول إلى دليل مساحة الأوراق الحرج في نباتات القمح والبرسيم الحجازي.

مما سبق يتضح أنه على الرغم من أن دليل مساحة الأوراق الحرج والأمثل يختلفان في التعريف إلا أن كلا منهما عبارة عن دليل مساحة الأوراق الذي يحقق أعلى معدل نمو للمحصول CGR، وأن الكساء الخضري عند كل من دليل مساحة الأوراق الحرج والأمثل يعترض معظم الأشعة الضوئية الساقطة عليه.



شكل (٣-٢).علاقة معدل نمو المحصول بدليل مساحة الأوراق في نباتات سلحم العلف وبنجر السكر. لاحظ أن نباتات سلجم العلف تظهر دليل مساحة أوراق أمثل (واتسون، ١٩٥٨).

ثانيا- تأثير زاوية الورقة على الساق على اعتراض الأشعة الشمسية

يقسم الكساء الخضري للمحاصيل المختلفة إلى أربعة أنماط وذلك على حسب زاوية الورقة على الساق كالآتي:

١- كساء مائل إلى الإستواء (الأفقي) Planophile: وفيه تكون معظم الأوراق أفقية (مستوية) Horizontal، وفيه تكون زاوية الورقة على الساق أقل من ٣٥ درجة من المستوى الأفقي.

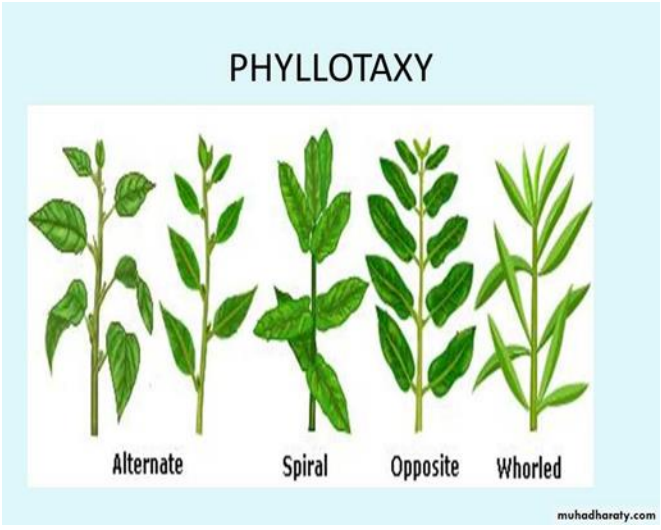
٢- كساء مائل للإنتصاب (قائم) Erectophile: وفيه تكون معظم الأوراق تقريبا قائمة وتكون زاوية الورقة على الساق أكبر من ٦٥° من السطح الأفقي.

٣- كساء مائل للإنحراف Plogrophile : وفيه تكون الأوراق على الساق مائلة للإنحراف.

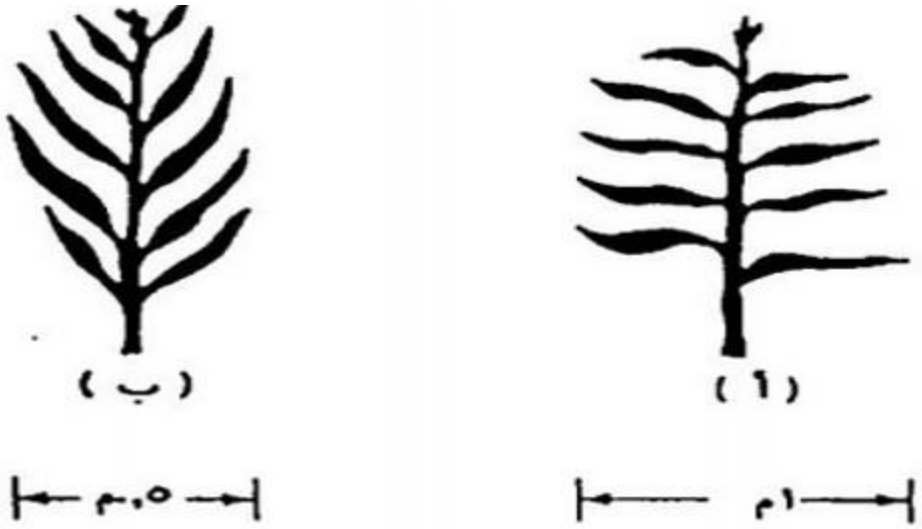
٤- كساء مائل للخلط Extremophile: وفيه تتكرر الأوراق الأفقية والقائمة على الساق.

وتؤثر زاوية الورقة على كفاءة إعتراض الكساء الخضري للأشعة الشمسية الساقطة عليه، إذ وجد أن الكساء الخضري ذو الأوراق الأفقية في نباتات البرسيم يحتاج إلى مساحة ورقية أقل لإعتراض معظم الأشعة الشمسية الساقطة، بالمقارنة بالكساء الخضري لنبات نجيلي ذو أوراق قائمة كما هو مبين بشكل (٣-٣)، ولقد وجد أن معامل إنقراض الكساء الخضري لنباتات البرسيم يساوي ٠,٦ تقريبا ولنباتات العشب النجيلي هي ٠,٢٥ (Loomis and Williams, 1969)، ومن الشكل يتضح أن الكساء الخضري للبرسيم يعترض ٩٥% من الأشعة الشمسية الساقطة عليه عند دليل مساحة أوراق قدره ٥، ويعبر عنه بدليل مساحة الأوراق الحرج للبرسيم، بينما في النبات النجيلي فقد استمر معدل نمو المحصول في الزيادة حتى دليل مساحة أوراق حرج قدره ٩.

Рис. 5. Листорасположение: *а* – очередное; *б* – супротивное; *в* – мутовчатое



ولقد كان في الماضي ينتخب للنباتات ذات الأوراق الأفقية، وذلك لأن في مثل هذه النباتات تكون أكثر مقاومة للحشائش الضارة النامية معها، وتحد من نموها وتقضي على الكثير منها. ولكن الأصناف ذات الأوراق الأفقية تحتاج إلى مساحة أكبر من مثيلتها ذات الأوراق القائمة وبالتالي يكون عدد النباتات في وحدة المساحة أقل في حالة النباتات ذات الأوراق الأفقية، مما يؤثر على كمية المحصول في وحدة المساحة. ويبين شكل (٣-٤) طرازين من النباتات، أحدهما ذو أوراق أفقية والآخر ذو أوراق قائمة.

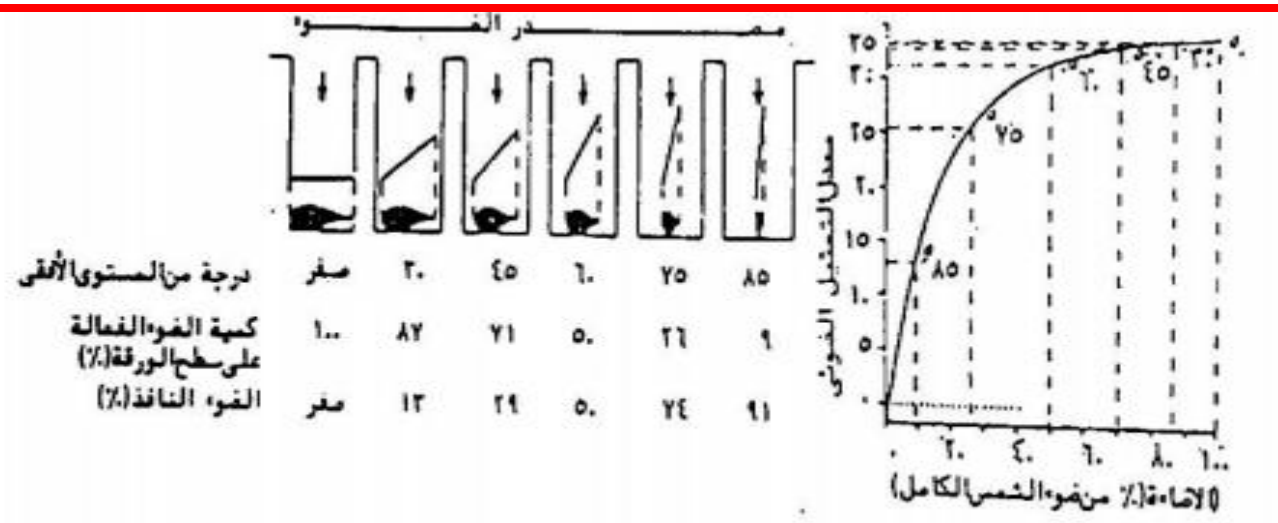


شكل (٣-٤). طرازين مختلفين من النباتات: أ) نبات ذو أوراق أفقية، ب) نبات ذو أوراق قائمة. يلاحظ أن النبات ذو الأوراق الأفقية يشغل مساحة من الأرض أكبر مما يشغلها النبات ذو الأوراق القائمة (Stokopf, 1981).

العلاقة بين زاوية الورقة وكفاءة التمثيل الضوئي وانقراض الأشعة الضوئية خلال الكساء الخضري ومعدل نمو المحصول

في ضوء الشمس المباشر تكون معظم الأوراق الفردية مشبعة ضوئيا (شكل ٤-٥). وفي الكساء الخضري ذو الأوراق الأفقية، فإن الأوراق العليا تكون مشبعة ضوئيا، بينما تكون الأوراق السفلى ذات معدل تمثيل ضوئي منخفض نتيجة للتظليل.

ومن الناحية النظرية، يمكن أن تزداد كفاءة التمثيل الضوئي للكساء الخضري ذو الأوراق الأفقية، عندما يكون توزيع الأشعة الشمسية على أسطح الأوراق متماثلا، ولكن مثل هذا التوزيع المتساوي لا يتم إلا إذا احتوى مثل هذا الكساء الخضري على أوراق قائمة (على الأقل الأوراق العليا) عندما تكون الشمس عمودية.



شكل (٣-٥). العلاقة بين زاوية الورقة، والأشعة الشمسية عند سطح الورقة ومنحنى الإستجابة للضوء في ورقة نبات برسيم أحمر. (Gardner, *et.al.* 1985).

إن شكل (٣-٥) يوضح الفكرة النظرية لإمكانية زيادة كفاءة التمثيل الضوئي للكساء الخضري عن طريق توجيه الأوراق ناحية الوضع القائم. وعلى سبيل المثال، عندما تكون زاوية الورقة ٧٥ درجة من المستوى الأفقي، وأسقط عليها من مصدر ضوئي أشعة عمودية، فإن الأوراق تعترض ٢٦% فقط من هذه الأشعة بالمقارنة بالأوراق الأفقية، وأن كمية الأشعة الضوئية الفعالة على هذه الورقة يكون أيضا ٢٦% بالمقارنة بمثيلتها على الأوراق الأفقية، وأن كفاءة الأشعة الضوئية تكون أعلى في كثافة ضوئية منخفضة نسبيا ، وأن الأوراق القائمة تكون أكثر فعالية أو كفاءة لكل وحدة من الضوء الذي تعترضه وفي شكل (٣-٥) عندما تكون زاوية الورقة ٧٥ درجة من السطح الأفقي، وتعترض ٢٦% فقط من الضوء الساقط، فإن التمثيل الضوئي للورقة ينخفض بمقدار ٢١% فقط من التمثيل الضوئي للأوراق ذات الوضع الأفقي. وأن هذا النقص القليل في معدل التمثيل الضوئي للأوراق العليا بسبب وضعها الرأسي (القائم)، يسمح بكمية أكبر من الأشعة الضوئية أن تنفذ إلى الأوراق السفلى، ولذلك فإنه من الناحية النظرية، يمكن زيادة معدل التمثيل الضوئي وسرعة نمو المحصول زيادة كبيرة عن طريق توجيه الأوراق وحفظها قائمة عندما يكون دليل مساحة الأوراق كبيرا كما هو مبين بجدول (٣-٢). ويتضح من الجدول أن أعلى تمثيل ضوئي للكساء الخضري في مساحة معينة من الأرض، أمكن التوصل إليه عندما كانت زاوية الأوراق على النبات ٨٥ درجة.

جدول (٣-٢). العلاقة بين زاوية الورقة، والتمثيل الضوئي، ودليل مساحة الأوراق (LAI)، والتمثيل الضوئي الكلي للكساء الخضري (محسوبة من بيانات شكل ٤-٥).

زاوية الورقة من المستوى الأفقي	التمثيل الضوئي للورقة (مجم/ ك أ/ دم^{٢}/ ساعة)	LAI اللازم لاعتراض معظم الضوء الساقط	التمثيل الضوئي الكلي للكساء الخضري في مساحة من الأرض (مجم/ ك أ/ دم^{٢} من الأرض/ ساعة)
صفر	٣٣	١	٣٣
٦٠	٣١	٢	٦٢
٧٥	٢٦	٤	١٠٤
٨٥	١٢	١٠	١٢٠

وفي هذا المجال وجد دانكن عام ١٩٧١ أنه بالنسبة لنباتات الذرة الشامية المنزرعة في الولايات المتحدة في منطقة حزام الذرة الشامية أن النباتات الأكثر إنتاجية، تكون زاوية أوراقها مساوية ٨٠ درجة من المستوى الأفقي.

جدول (٣-٣). تأثير زاوية الورقة على كمية محصول الحبوب ونسبة النباتات الخالية من الكيزان (الدكر) في الذرة الشامية.

	المحصول (كجم/ هكتار	% النباتات الدكر
نباتات ذات أوراق طبيعية	**٦٢٠٢أ**	**٢٨أ**
نباتات ذات أوراق قائمة	**٨٧٦٩ب**	**١٤ب**
توجيه الأوراق يدويا في الصنف بيونير ٣٣٠٦		
أوراق تركت كما هي بدون معاملة	**١٠٦٨٣جـ**	**٤جـ**
كل الأوراق حفظت في الإتجاه القائم	**١١٣٨٦جـ د**	**٦ب جـ**
كل الأوراق الموجودة فوق الكوز حفظت في الإتجاه القائم	**١٢٢٠٢د**	**٣جـ**

عن بندليتون، وآخرون، عام ١٩٦٨م.

*المتوسطات المتبوعة بنفس الحرف لا تختلف معنويا عند مستوى ٥%.

التباين في زاوية الورقة داخل الكساء الخضري

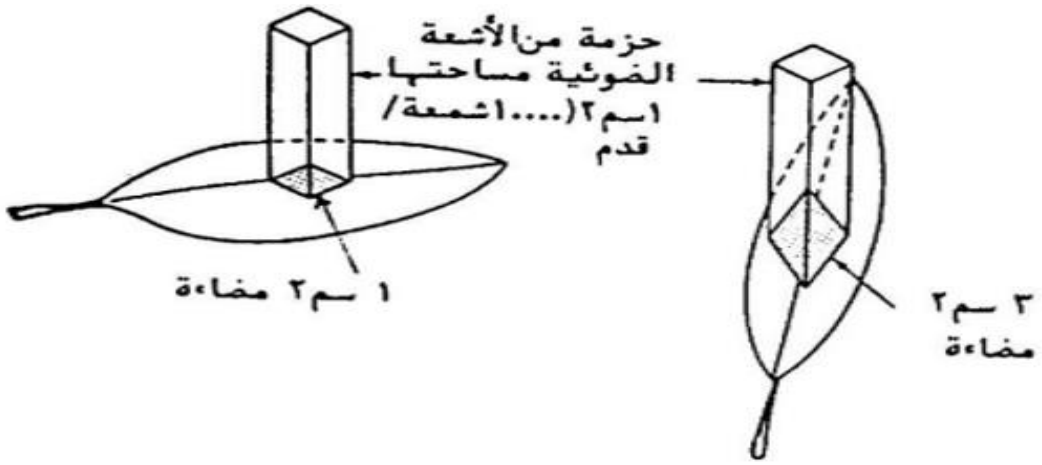
قد تختلف زاوية الورقة على النبات في الطبقات المختلفة في الكساء الخضري. ويبين شكل (٣-٨) نبات ذو أوراقا قائمة في الجزء العلوي منه، وتصبح تدريجيا أفقية في الجزء السفلي منه، ويطلق على مثل هذا الكساء الخضري بـ"الشكل المثالي للكساء الخضري "Idial foliage display (Trenbath and Angus, 1975).

ولقد وجد بندليتون وآخرون، عام ١٩٦٨، أن الكساء الخضري لنباتات الذرة الشامية الذي حفظت فيه كل الأوراق الموجودة فوق الكوز في وضع قائم، قد أعطت محصولا أعلى من كل من النباتات التي تركت أوراقها طبيعية، وأيضا من النباتات التي حفظت كل أوراقها في الوضع القائم (جدول ٤-٣). ويمكن تفسير ذلك على أساس أن نظام حفظ الأوراق العليا على النبات في الوضع القائم، ووجود الأوراق السفلى في الوضع الأفقي يسمح للأوراق القائمة في ظروف الإضاءة العالية بأن تعترض كمية أقل من الأشعة الشمسية الساقطة كافية للوصول بالأوراق إلى أعلى معدل تمثيل ضوئي، وفي نفس الوقت تسمح بنفاذ كمية كبيرة من الأشعة الشمسية إلى الأوراق السفلى.

مزايا وعيوب الكساء الخضري ذو الأوراق القائمة

١- يتميز الكساء الخضري ذو الأوراق القائمة بأنه ذو قدرة أكبر على اعتراض الأشعة الشمسية الساقطة عليه (شكل ٤-٦). كما أن زاوية الورقة تؤثر على توزيع وانتشار وشدة الضوء داخل الكساء الخضري، وعلى سبيل المثال، يستقبل سطح الورقة وقت الظهيرة في يوم مشمس، إضاءة شدتها ١٠٠٠٠-١٢٠٠٠ شمعة/ قدم، وأن معظم الأنواع النباتية لا تستطيع الإستفادةمن هذه الكثافة الضوئية العالية، إذ أن أقصى تمثيل ضوئي لكثير من النباتات يتم عند تشبع ضوئي بين ٢٠٠٠-٣٠٠٠ شمعة/ قدم. ولقد وجد أن انتشار الضوء الساقط على الكساء الخضري على مساحة ورقية أكبر، يؤدي إلى نقص شدته. ولتوضيح ذلك، تصور أن هناك حزمة من الأشعة الشمسية شدتها ١٠٠٠٠ شمعة/ قدم، ساقطة على ورقة أفقية (شكل ٤-٦)، ثم افترض أن الورقة مالت تدريجيا، لاحظ أن مقدار المساحة من سطح الورقة التي تسقط عليها هذه الأشعة تزداد تدريجيا، وعلى العكس من ذلك، تقل شدة الإضاءة على هذه المساحة من سطح الورقة تدريجيا أيضا. وبوجه عام، يمكن القول بأن زاوية الورقة المساوية لـ ٨٠ درجة من المستوى الأفقي تعتبر الوضع الأمثل للورقة في الكساء الخضري للنباتات للإستفادة من الإضاءة الساقطة عليه كما سبق أن ذكرنا.

٢- يتميز الكساء الخضري ذو الأوراق القائمة بأن الجزء المنعكس من الضوء بواسطة الأوراق القائمة، ينعكس داخل الكساء الخضري للنباتات، حيث تستفيد منه الأوراق السفلى على النباتات أو النباتات المجاورة، وعلى العكس من ذلك، فإن الأوراق الأفقية تعكس جزءا من الضوء في الجو المحيط بالنباتات، حيث لا تستفيد منه النباتات، كما هو مبين بشكل (٣-٧).



شكل (٣-٦). حزمة أشعة ضوئية عمودية ساقطة على: أ) ورقة قائمة، ب) ورقة أفقية. (عن Stoskopf عام ١٩٨١).

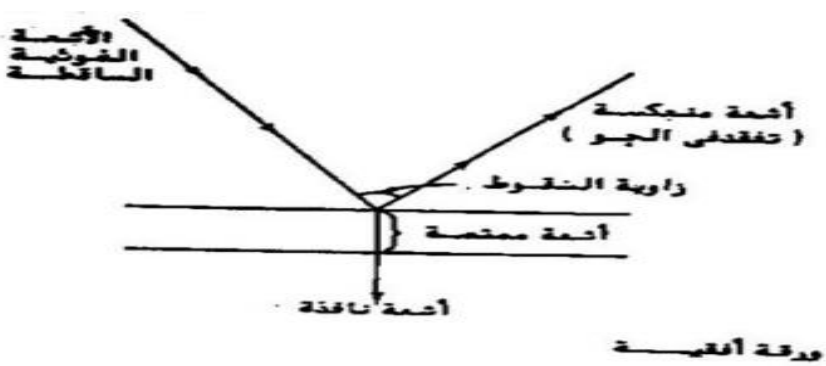
٣- تتميز الأوراق القائمة أيضا بأنها تسمح للضوء بالنفاذ إلى الأوراق السفلى من النبات كما سبق أن ذكرنا. ولقد وجد أن دليل مساحة الأوراق الحرج والذي عنده يتم إعتراض ٩٥% من الأشعة الضوئية الساقطة عليه يكون منخفضا في حالة الكساء الخضري ذو الأوراق الأفقية، وعاليا في الكساء الخضري الخضري ذو الأوراق القائمة. ولقد وجد أن الكساء الخضري ذو

الوراق الأفقية يعطي أعلى CGR عند دليل مساحة أوراق أقل من ٣، بينما يحتاج الكساء الخضري ذو الأوراق القائمة إلى دليل مساحة أوراق قدره ٤ أو أكثر للوصول إلى أعلى CGR، وهنا تجدر الإشارة، إلى أنه عند دليل مساحة الأوراق المنخفض، تقل درجة تظليل الأوراق بعضها لبعض، ولذلك فإن الكساء الخضري ذو الأوراق الأفقية يكون أفضل نسبيا في هذه الحالة من مثيله ذو الأوراق القائمة، وعلى العكس من ذلك، عند دليل مساحة الأوراق المرتفع، فإن الكساء الخضري ذو الأوراق القائمة، يتميز عن الكساء الخضري ذو الأوراق الأفقية في أن الضوء يكون فيه موزعا توزيعا متماثلا على السطح الورقي كما أن الأوراق العليا تعترض كمية أقل من الضوء الساقط عليها، وهذا يسمح بنفاذ كمية أكبر من الضوء إلى الأوراق السفلى على النبات، بعكس الكساء الخضري ذو الأوراق الأفقية.

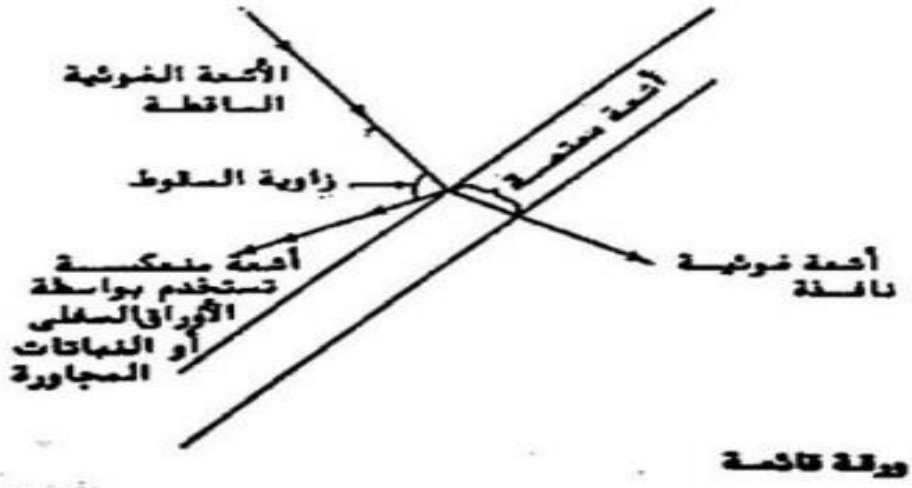
ولقد وجد Angus و Trenbath عام ١٩٧٥م، أن معدل نمو المحصول في الطرز ذات الأوراق القائمة في نباتات بنجر السكر، والشعير والأرز كانت أعلى بنسبة تراوحت بين ١٩-١٠٨% عن معدل نمو المحصول في الطرز ذات الأوراق الأفقية لهذه المحاصيل.

عموما- تعتبر زاوية الورقة أحد العوامل الرئيسية المسؤلة عن التباين بين الأصناف عالية المحصول وتلك المنخفضة المحصول في كثير من المحاصيل ومنها الشعير (Gardner, *et.al.* 1964)، وأن الأصناف عالية المحصول تتميز بالأوراق القائمة الرفيعة، أما الأصناف المنخفضة المحصول تكون ذات أوراق عريضة متهدلة. وهنا تجدر الإشارة إلى أن الأوراق القائمة تكون ذات تأثير وفاعلية أكبر على زيادة المحصول عندما يكون دليل مساحة الأوراق عاليا (Duncan, 1971) وهذا يتطلب زراعة مثل هذه الطرز ذات الأوراق القائمة بكثافة نباتية تحقق أو تزيد عن دليل مساحة الأوراق الحرج.

وفي دراسة أجراها دانكن (١٩٧١م) وجد أن أعلى معدلات تمثيل ضوئي يمكن التوصل إليها في النباتات التي تحتوي على أوراق قائمة في الجزء العلوي منها، وأوراق أفقية في الجزء السفلي منها كما هو مبين بشكل (٣-٨).



(أ) ورقة أفقيـــــة



شكل (٣-٧). نموزج مبسط، يوضح مصير الأشعة الضوئية الساقطة على سطح، أ) ورقة أفقية، ب) ورقة قائمة، (عن Stoskopf، عام ١٩٨١).

شكل (٣-٨). الشكل المثالي للنبات. يلاحظ أن الأوراق العليا قائمة، والسفلى أفقية. (Stoskopf, 1981).

يتضح مما سبق أنه يمكن الجصول على محصول مرتفع من بعض أنواع المحاصيل المنزرعة عن طريق زراعة الأصناف ذات الأوراق القائمة منها، وهذا هام بالنسبة لمنتج المحصول، ولكن على الرغم من ذلك فإن التربية للطرز القائمة لم تحقق حتى الآن نجاحا كبيرا في معظم المحاصيل، وذلك لأسباب متعددة، أهمها هو تأثير الوضع القائم للورقة على النبات ببعض الظروف البيئية، مثل الرطوبة، والتسميد الأزوتي. إذ يؤدي تعرض النباتات للجفاف إلى نقص إمتلاء خلايا الورقة، وهذا يؤدي إلى تهدلها. كما تصبح الأوراق متهدلة أيضا في بعض النباتات، تحت ظروف التسميد الأزوتي المرتفع، وتصبح أفقية. وعلاوة على ذلك، فقد يكون الإنتخاب لصفة الأوراق القائمة على حساب صفات أخرى مهمة.