الفصل السادس

شدّ الإشعاع الشمسى والفترة الضوئية

تقسيم النباتات حسب شدة الإضاءة المناسبة لها

تقسم النباتات حسب شدة الإضاءة المناسبة لها إلى مجموعتين؛ هما:

١- نباتات الضوء Heliophytes: وهى التى تنمو أحسن ما يمكن فى ضوء الشمس الكامل، وتشتمل على معظم نباتات الخضر.

٢- نباتات الظل Sciophytes: وهى التى تنمو أحسن ما يمكن فى شدة إضاءة تبلغ حوالى ١٠٪ من ضوء الشمس، وتشتمل على عيش الغراب، وعدد كبير من نباتات الزينة.

تكمن أحد الفروق الرئيسية بين نباتات الشمس ونباتات الظل فى البلاستيدات الخضراء؛ حيث تتميز نباتات الظل باحتواء بلاستيداتها على جرانات grana كبيرة غير منتظمة التوجُّه، ومحملة بنحو ١٠٠ ثيلاكويدة thylakoids فى كل منها. كما تُوجَد بنباتات الظل نسبة أعلى من الجرانات المكونة للـ lamellae، ونسبة أعلى من أغشية الثيلاكويدات إلى الاستروما stroma؛ بما يعنى زيادة المحتوى الكلوروفيلى فى وحدة المساحة الورقية، ووجود نسبة أقل من البلاستيدات الخضراء بوحدة المساحة من الورقة فى نباتات الظل مقارنة بنباتات الشمس.

وبالمقارنة.. تكون الجرانا فى البلاستيدات الخضراء لنباتات الشمس مصطفة بمحاذاة أحد محاورها، وبها نسبة أقل من الجرانات المكونة للـ lamellae، ونسبة أقل من أغشية الثيلاكويدات إلى الاستروما. ولكن تزداد أعداد الثيلاكويدات وتزداد نسبتها إلى الاستروما فى نباتات الشمس لدى نموها فى إضاءة منخفضة.

كذلك يختلف تركيز الكلوروفيل ونسبة كلوروفيل "أ" إلى كلوروفيل "ب" فى

كلوروبلاستيدات نباتات الظل عنها فى نباتات الشمس. وتتوقف كفاءة النباتات فى امتصاص الضوء على كمية الكلوروفيل بوحدة المساحة من الورقة، وهى التى تبقى ثابتة فى مدى واسع من شدة الإضاءة بالنسبة للنوع النباتى الواحد. ويؤدى التظليل الشديد إلى خفض تركيز الكلوروفيل فى أوراق نباتات الشمس، وخاصة فى الأوراق الحديثة النامية، بينما قد تحتوى نباتات الظل الإجبارية على كمية من الكلوروفيل — تحت ظروف الظل الشديد — تعادل تلك التى توجد فى نباتات الشمس فى الإضاءة القوية.

ويزداد تركيز كلوروفيل "ب" – فى ظروف الإضاءة الضعيفة — فى معظم النباتات سواء أكانت من نباتات الظل، أم من نباتات الشمس. ويساعد ذلك التغيير على زيادة الاستفادة من الموجات الضوئية "المُرشَّحة" التى تكون أغنى فى الأشعة تحت الحمراء. كما أن نباتات الظل تحتوى — عادة — على نسبة من كلوروفيل "أ" إلى كلوروفيل "ب" أقل مما فى نباتات الشمس؛ الأمر الذى يجعلها أكثر قدرة على الاستفادة من الأشعة تحت الحمراء التى تنفذ من خلال النمو النباتى.

وبالمقارنة بنباتات الشمس.. تحتوى نباتات الظل على نسبة أقل من البروتين لكل وحدة كلوروفيل، ولكل وحدة من المساحة الورقية. ويرجع النقص البروتينى أساسًا إلى نقص كمية إنزيم ribulose biphosphate carboxylase والإنزيمات الأخرى الداخلة فى أيض الكربون فى عملية البناء الضوئى.

التأقلم على شدة الإضاءة

إن قدرة نباتات الظل على التأقلم مع الإضاءة القوية محدودة؛ وهى تتعرض — عادة — لأضرار شديدة أو تموت فى الإضاءة القوية. أما نباتات الشمس فإن كفاءتها فى عملية البناء الضوئى تزداد فى ظروف الإضاءة العالية؛ نتيجة لقدرتها على التأقلم مع هذه الظروف؛ وذلك بحدوث تغيرات فيها تتمثل فى: زيادة مستوى إنزيمات أيض الكربون، وزيادة تركيز سلسلة المركبات الناقلة للإليكترونات فى عملية البناء الضوئى، وزيادة القدرة على نقل غاز ثانى أكسيد الكربون.

كذلك يحدث التأقلم مع الإضاءة القوية فى نباتات الشمس بزيادة السيوبرين، والشمع، والأديم، ومكونات الجدر الخلوية بالأوراق.. وجميعها عوامل تفيد فى زيادة انعكاس الضوء.

وتعمل النباتات على تقليل التحطيم الضوئى للكلوروفيل photodestruction بزيادة محتوى أوراقها من البيتاكاروتين، والزانثوفيل، والفوسفوليبيدات.

أما تأقلم النباتات مع الإضاءة الضعيفة فإنه يتم بوسيلتين؛ كما يلى:

١- زيادة المساحة الورقية بطريقة تحدُّ من استعمال الغذاء المجهز؛ لأنها — أى زيادة المساحة الورقية — تكون على حساب انتقال الغذاء المُصنّع إلى أعضاء التخزين.

٢- نقص كمية الضوء المعكوس reflected والنافذ transmitted؛ ذلك لأن الأوراق تكون أقل سمكًا ولكن أكبر مساحة مما فى ظروف الإضاءة القوية. ويزيد امتصاص الأوراق للضوء بزيادة أعداد البلاستيدات الخضراء فى وحدة المساحة الورقية منها، وبزيادة تركيز الكلوروفيل فيها، مع انخفاض تركيز الصبغات الأخرى التى تتعارض مع عملية امتصاص الضوء. كذلك يقل تحلل الكلوروفيل؛ مما يزيد تركيزه فى النبات.

تأثير شدة الإضاءة على البناء الضوئى

نجد فى المستويات المنخفضة من الإضاءة أن معدل البناء الضوئى يتناسب خطيًّا مع شدة الإضاءة؛ حيث تكون الاستفادة من الضوء الساقط على النباتات عند حدها الأقصى. أما فى المستويات الأعلى من شدة الإضاءة فإن الزيادة فى البناء الضوئى تتناقص مع زيادة شدة الإضاءة إلى أن تتوقف الزيادة كليًّا. وتتوقف استجابة النباتات للمستويات المختلفة من شدة الإضاءة على ما إن كانت من نباتات الظل، أم من نباتات الضوء.

تحتاج نباتات الضوء إلى مستويات أعلى من شدة الإضاءة للحفاظ على مستوى عالٍ من البناء الضوئى؛ وبذا.. فهى تُظهر معدلات منخفضة من البناء الضوئى فى المستويات المنخفضة من الإضاءة. وبالمقارنة.. فإن نباتات الظل تكون قادرة على البناء الضوئى بمعدلات عالية فى مستويات الإضاءة المنخفضة.

ويعرف مستوى الإضاءة الذى يتساوى عنده معدل البناء الضوئى مع مستوى التنفس باسم Compensation Point. ويكون هذا المستوى من الإضاءة فى نباتات الضوء أعلى منه فى نباتات الظل، وخاصة أن نباتات الضوء يزيد فيها معدل التنفس عنه فى نباتات الظل.

ويحدث التشبع الضوئى فى نباتات الظل بنحو ٥٪ من قوة الإضاءة خلال النهار (عن Hale & Orcutt ١٩٨٧).

وفى الطماطم.. تستمر حياة الأوراق — عادة — لمدة ٧٠ يومًا ينخفض خلالها — تدريجيًّا — معدل البناء الضوئى، وقد وجد أن ذلك لا يحدث — فى الزراعات التى تربى فيها النباتات رأسيًّا — بسبب تقدم الأوراق فى العمر، وإنما يكون مرده — أساسًا — إلى انخفاض شدة الأشعة النشطة فى البناء الضوئى بين النموات النباتية الكثيفة (Trouwborst وآخرون ٢٠١١).

الموجات الضوئية النشطة فسيولوجيًّا وتأثيراتها

يبين جدول (٦-١) خصائص مختلف الموجات الضوئية النشطة فسيولوجيًّا، بينما يوضح جدول (٦-٢) تلك الأنشطة الفسيولوجية لكل من الموجات الضوئية.

جدول (٦-١): خصائص الموجات الضوئية النشطة فسيولوجيًّا فى النباتات.

الأشعة	مدى الموجات الضوئية (nm)	الموجة الضوئية المُمثلة (nm)	التردد (دورة/ثانية) ($Hz \times 10^{14}$)	الطاقة (eV/photon)	الكيلوكالورى لكل مول من الفوتونات
فوق البنفسجية	< ٤٠٠	٢٥٤	١١,٨٠	٤,٨٨	١١٢,٥
البنفسجية	٤٠٠-٤٢٥	٤١٠	٧,٣١	٣,٠٢	٦٩,٧
الزرقاء	٤٢٥-٤٩٠	٤٦٠	٦,٥٢	٢,٧٠	٦٢,٢
الخضراء	٤٩٠-٥٦٠	٥٢٠	٥,٧٧	٢,٣٩	٥٥,٠
الصفراء	٥٦٠-٥٨٥	٥٨٠	٥,١٧	٢,١٤	٤٩,٣
البرتقالية	٥٨٥-٦٤٠	٦٢٠	٤,٨٤	٢,٠٠	٤٦,٢
الحمراء	٦٤٠-٧٤٠	٦٨٠	٤,٤١	١,٨٢	٤٢,١
تحت الحمراء	> ٧٤٠	١٤٠٠	٢,١٤	٠,٨٨	٢٠,٤

جدول (٦-٢): النشاط الفسيولوجى - لمختلف الموجات الضوئية - فى النباتات.

العملية الضوئية	التفاعل أو الاستجابة	المركبات المستقبلة للضوء	الموجات الضوئية الفعالة (nm: peaks)	تحولات الطاقة أو المنتجات
تمثيل الكلوروفيل	اختزال البروتوكلوروفيل	البروتوكلوروفيل	الأزرق : ٤٤٥ الأحمر: ٦٥٠	كلوروفيل أ كلوروفيل ب
البناء الضوئى	تحلل الماء	الكلوروفيل	الأزرق: ٤٣٥	H
		الكاروتينات	الأحمر: ٦٧٥	مركبات مفسفرة
	اختزال الكربون	الكلوروفيل	الأحمر: ٦٥٠ تحت الأحمر: ٧١٠	مركبات مفسفرة
تفاعلات الضوء الأزرق	الانتحاء الضوئى	الكاروتينات	فوق البنفسجية: ٣٧٠	أكسدة الأوكسينات
	لزوجة البروتوبلازم	غير معروفة	غير مؤكدة	-
	تنشيط تفاعلات	النيكليوتيدات البريدينية الريبوفلافين	غير مؤكدة	-
تفاعلات الضوء الأحمر وتحت الأحمر	إنبات البذور	الفيتوكروم	الأحمر: ٦٦٠	-
	النمو	-	-	-
	تمثيل الأنثوسيانين	الفيتوكروم	تحت الأحمر: ٧١٠ و ٧٣٠	-
	استجابة الكلوروبلاستيدات	الفيتوكروم	تحت الأحمر: ٧١٠ و٧٣٠	-

كثافة الإشعاع الشمسى والعوامل المؤثرة فيه

إن كثافة الإشعاع الشمسى التى تصل إلى النباتات تخف كثيرًا، وتضعف خلال مرورها فى طبقات الغلاف الجوى.

فبداية.. نجد أن الإشعاع الشمسى الكامل - غير المرشح - تكون كثافته عند دخوله طبقة الأيونوسفير Ionosphere ١,٣٩ كيلو واط kW/ م٢ (وهو ثابت الشمس)، ويتراوح طول موجاته بين ٢٢٥ و ٣٢٠٠ نانوميتر nm (مللى ميكرون). ويكون ٤١٪ من هذا الإشعاع بين موجتى ٤٠٠، و٧٠٠ نانوميتر، وهى الموجات الضوئية التى تكون نشطة فسيولوجيًا فى النباتات.

وفى الاستراتوسفير stratosphere تمتص طبقة الأوزون ozone الأشعة فوق البنفسجية، بينما يمتص بخار الماء، وثانى أكسيد الكربون، والأكسجين — فى التروبوسفير Troposphere — الموجات الضوئية من ١١٠٠ إلى ٣٢٠٠ نانوميتر.

وعند مستوى سطح البحر يكون مدى الموجات الضوئية المتاح للنباتات من ٣١٠ إلى ١١٠٠ نانوميتر، ويكون ٤٦٪ من هذا الإشعاع بين موجتى ٤٠٠، و٧٠٠ نانوميتر (الضوء المرئى).

يتبين مما تقدم أنه لا يصل إلى سطح الأرض سوى ٤٧٪ من الإشعاع الكلى الصادر عن الشمس باتجاه الأرض، بينما يُفقد أكثر من نصف الإشعاع الكلى بالانكسار refraction، والانحراف diffraction فى طبقات الجو العليا. كما أن السُّحُب والجسيمات العالقة فى الهواء تعكس الإشعاع الشمسى، أو تشتته، أو تمتصه.

وفى منتصف النهار، يمكن أن تبلغ كمية الإشعاع الكلى — التى تتلقاها النباتات التى تنمو عند مستوى سطح البحر وخط عرض متوسط — حوالى ٩٠٠ واط W/م٢. وتتباين كمية الإشعاع الفعلية حسب كثافة السحب، وخط العرض، ومدى الارتفاع عن سطح البحر.

ولا تخف وتضعف حدة الإشعاع الشمسى بالظروف الجوية، وعند مرور الإشعاع فى طبقات الغلاف الجوى فقط، ولكنها تتأثر — كذلك — بالبيئة النباتية ذاتها. ففى مجتمع النباتات.. تُشكِّل الأوراق العليا — التى تقوم بعملية البناء الضوئى — حاجزًا أمام وصول الضوء إلى الأوراق السفلى. وتزداد الكمية الممتصة من الإشعاع الساقط — تدريجيًّا — أثناء مروره بين طبقات الأوراق إلى أن يستنفذ معظمه، ولا يكاد يصل منه شئ إلى الأوراق السفلى. ويتوقف مدى نفاذية الأوراق للضوء على تركيبها وسمكها؛ حيث يزداد مقدار الضوء النافذ من الأوراق كلما نقص سمكها.

وترتبط كمية ونوعية الضوء — التى تتاح لأوراق النباتات — بالكثافة النباتية،

وارتفاع النباتات، وشكل الأوراق؛ حيث تزداد كثافة الضوء التى تُتاح للأوراق النباتية عند انخفاض كثافة الزراعة، وقصر النباتات، وضيق أوراقها.

يمكن للنباتات أن تعكس الضوء الساقط عليها، أو تمتصه، أو تسمح بمروره خلالها، ويتوقف ذلك على طول الموجة الضوئية الساقطة، وتركيب الورقة، وزاوية ميلها. وتتوقف قدرة النبات على عكس الضوء الساقط عليه على سطح الورقة؛ حيث تزيد الشعيرات — مثلاً — من انعكاس الضوء.

يمكن للورقة أن تعكس ٧٠٪ من الأشعة تحت الحمراء، ومن ٦٪— ١٢٪ من الضوء المرئى، ولكنها لا تعكس سوى ٣٪ من الأشعة فوق البنفسجية. ويزيد انعكاس الضوء الأخضر — الذى يتراوح بين ١٠٪ و٢٠٪ — عن انعكاس كل من الضوء البرتقالى والأحمر الذى يكون فى حدود ٣٪—١٠٪.

ويُمتص الإشعاع الذى يخترق الورقة بأجسام ومكونات الورقة المختلفة. فنجد أن الأشعة فوق البنفسجية تُمتص كثيرًا بواسطة طبقة الشمع السطحى (الأديم)، والسيوبرين، والمركبات الفينولية التى توجد بالورقة. كما تمتص الصبغات الكلوروفيللية الضوء المرئى، ويتوقف مدى ذلك الامتصاص على كثافة الكلوروفيل. وتُمتص الأشعة تحت الحمراء التى يزيد طول موجاتها على ٧٠٠ نانوميتر — بسهولة — بواسطة النباتات (عن Hale & Orcutt ١٩٨٧).

الأشعة غير المرئية وأهميتها

تختلف الأشعة غير المرئية عن الضوء الأبيض العادى، وأهم ما يصل منها إلى النباتات بجرعات محسوسة: الأشعة تحت الحمراء، والأشعة فوق البنفسجية.

الأشعة تحت الحمراء

تشكل الأشعة تحت الحمراء (الأشعة الحرارية) حوالى ٥١٪ من الأشعة الشمسية الإجمالية التى تصل إلى النباتات. وتلعب الأشعة القصيرة منها — التى لا يزيد طول

موجاتها على ٨٠٠ ملى ميكرون — دورًا فى عملية البناء الضوئى. أما الأشعة الطويلة الموجة منها فإن تأثيرها يقتصر على رفع درجة حرارة النبات.

الأشعة فوق البنفسجية

تشكل الأشعة فوق البنفسجية — وهى التى يقل طول موجاتها عن ٣٩٠ ملى ميكرون — نحو ٦٪-٧٪ من مجموع الأشعة الشمسية التى تصل إلى النباتات. تعد الأشعة ذات الموجات الضوئية الأقل من ٣٠٠ ملى ميكرون منها ضارة بالنباتات، لكن لا يصل إلى سطح الأرض منها إلا النذر اليسير؛ لامتصاصها من قِبَل طبقة الأوزون. أما الأشعة فوق البنفسجية التى يتراوح طول موجاتها بين ٣٠٠ و ٣٩٠ ملى ميكرون فإنها تخترق الغلاف الجوى وتصل إلى سطح الأرض، وتلعب دورًا هامًّا فى تكوين فيتامين "ج" فى أوراق النباتات، وفى المساعدة على تقسية النباتات، وزيادة قدرتها على تحمل الحرارة المنخفضة، كما تَحُول دون استطالة سيقان البادرات. كذلك تلعب هذه الأشعة دورًا فى تلوين الأوراق فى الخريف، وفى زيادة تركيز اللون فى بعض الثمار.

ونظرًا لأن الزجاج لا يسمح بنفاذ الأشعة فوق البنفسجية.. لذا نجد أن محتوى الخضروات المنتجة فى الصوبات الزجاجية من فيتامين "ج" يقل بمقدار ٣٠٪-٥٠٪ عن نظيرتها المنتجة فى الحقول المكشوفة أو فى الصوبات البلاستيكية التى تسمح بمرور ٧٠٪-٨٠٪ من هذه الأشعة (عن بوراس ١٩٨٥).

تُمتص الأشعة فوق البنفسجية فى النباتات بواسطة الكروموفورات Chromophores، التى تتضمن: الأحماض النووية، والبروتينات، وإندول حامض الخليك، وحامض الأبسيسك، والفلافوبروتينات. وربما يؤدى امتصاص الأحماض النووية للأشعة فوق البنفسجية إلى انحراف فى تمثيل البروتين، وإلى زيادة معدل حدوث الطفرات، وظهور التراكيب الكروموسومية غير العادية.

وقد يؤدى امتصاص الهرمونين: إندول حامض الخليك وحامض الأبسيسك للأشعة فوق البنفسجية إلى حدوث تغيرات فى تركيز كلٍّ منهما؛ الأمر الذى يؤدى إلى عدم انتظام النمو. وقد يظهر ذلك فى صورة ضعف فى الإزهار، أو فقدان للسيادة القمية، أو سقوط للأوراق، أو تغيرات فى تركيز العناصر المغذية بالأنسجة النباتية.

وترتبط كفاءة النبات فى مقاومة أضرار الأشعة فوق البنفسجية بقدرته على إصلاح الضرر الذى تحدثه الأشعة للحامض النووى دى إن أى (الدنا)، كما ترتبط — أيضًا — بتمثيله لمركبات مثل الفلافانويدات flavanoids، والفلافونات flavones فى طبقة البشرة. كما يمكن للشمع السطحى بطبقة الأديم امتصاص قدر ضار من الأشعة فوق البنفسجية. ويؤدى تغيير اتجاه الورقة أو زيادة قدرتها على عكس الضوء إلى مزيد من الإفلات من التعرض لأضرار الأشعة فوق البنفسجية.

تأثير أشعة الشمس القوية على الثمار

إن تعرض ثمار الخضر لأشعة الشمس القوية المباشرة قبل الحصاد يمكن أن يتسبب فيما يلى:

١–ارتفاع حرارة لُب الثمار حتى ١٥°م أعلى من حرارة الهواء المحيط بها؛ بما يعنى احتمال وصول حرارته حتى ٥٠°م.

٢–قد يحدث تدرج حرارى كبير — يصل إلى ١٥°م — ما بين الجزء المتعرض لأشعة الشمس من الثمرة والجزء المظلل منها.

٣–ترتفع حرارة الأجزاء الأكثر تلونًا من الثمار بدرجة أكبر من الارتفاع فى حرارة الأجزاء الأقل تلونًا؛ فيمكن أن تكون ثمار الطماطم الحمراء أعلى حرارة بمقدار ٤–٨°م عن حرارة الثمار الخضراء فى نفس الظروف.

هذا.. ولا تحدث تلك التغيرات الحرارية إن لم تتعرض الثمار لأشعة الشمس بصورة مباشرة.