الفصل الســادس عشر

تثبيت الكربون أو التمثيل — التركيب الضوئى

(Charbon Fixation) (Assimilation) (Photosynthesis.)

١ — قد كانت مسألة المورد الذى تستمد منه النباتات كبير مقدار الكربون الذى يتكون منــه أكثر من نصف وزن مادته الجافة موضوع بحث واسع زمنــا طويلا .

فالنباتات الطفيليــة كالحامول (Dodder) والهالوك (Broom rape) وكثير من أنواع الفطر (Fungi) تلتصق بنفسها على غيرها من الكائنات الحية وتمتص منها كل ما تحتاج اليه من الكربون على صورة سكر و بروتيدات وغير ذلك من مركبات الكربون المصطنع . وأنواع الرميات كعيش الغراب (Mush-room) وغالب أنواع الفطر العادى التى هى كالطفيليات السابقة الذكر ، خالية من الكلوروبلاستات ، تحصل على الكربون اللازم لها على صورة مصــطنعة مشابهة لمــا ذكر من المركبات الكربونية الموجودة فى بقايا النباتات والحيوانات الميتة التى تعيش عليها .

ويحتمل أيضا أن كل النباتات الخضراء تمتص وتستعمل مركبات الكربون العضوى من الدبال (Humus) أى البقايا النباتيــة أو الحيوانية المتحللة فى الأرض وان كان قد أثبت أن هذا المصدر غير كاف لاعطاء كل الكربون اللازم لتمــام تغذية النباتات التى من هذا القبيل تغذية صحيحة .

وبطريقة الزراعة المائية أو الرملية يمكن أن يبين بسهولة أن النباتات الخضراء العادية تنمو وتزداد اشتمالا على الكربون اذا أمدت جذورها بمحلول من المواد الزادية التى لا تشتمل على كربون ما دام المحلول يشتمل على كل العناصر الجوهرية الأخرى .

ففى هذه الظروف يكون المورد الوحيد الذى يستمد منه الكربون هو ثانى أوكسيد الكربون الموجود فى الجو المحيط بالأوراق على أنه ان كان مقداره النسبي فى الجو من القلة بحيث ان متوسطه هو ٢,٨ جزء فى ١٠,٠٠٠ فانه هو المورد الذى تستمد منه كل النباتات المنزرعة بطريقة الزراعة المائية كل ما تحتاج اليه من الكربون .

وينتج ثانى أوكسيد الكربون فى عمليات التخمر والتحلل الحادثة فى التربة العادية وقد يشتمل الهواء الذى يمر خلال التربة على مقدار يبلغ خمسة فى المائة من هذا الغاز بعضه يدخل جذور النباتات ذائبا فى ماء تيار النتح . على أنه قد تبين من تجارب كايتيه (Cailletet) ومول (Moll) أن مدد ثانى أوكسيد الكربون الذى يحصل عليه بهذه الطريقة هو غير كاف لحاجات النباتات الخضراء العادية .

وقد أثبتت الأبحاث الواسعة المتخذ فيها كل الحيطة أن لا شك فى أن أهم مادة زادية تتخذها النباتات الخضراء موردا لكربونها هى ثانى أوكسيد كربون الهواء وأن هذا الغاز تمتصه الأوراق . وأثبتت فضلا عن ذلك أن دخول هذا الغاز الى أنسجة النباتات انما يكون من ثغور الأوراق . وقد يدخل — أو لايدخل مطلقا — من قشرة الخلايا البشرية .

وقد بحث العالمان "براون (Brown)" و"اسكومب (Escombe)" منذ عهد قريب عن السرعة التى يحدث بها امتصاص هذا الغاز بواسطة الأوراق

فوجدا أن مقـدار ما يمتصه نبـات عبّاد الشمس وهو معرض الى ضوء عام منتشر كان مرة ٤١٢ سـنتيمترا مكعبا فى كل متر مربع من ســطح الورق فى الساعة وكان امتصاص ورقة كاتالبـا ٣٤٥ سـ م م عن كل متر مربع فى الساعة . ووجد أن سرعة امتصاص ورقة لهذا الغاز فى ظروف مناسـبة كان مساويا لنصف ما يمتصـه محـلول قوى من البوتاسا الكاوية مساحتـه كمساحة تلك وبمـا أن الفتحات الحقيقية الكائنـة بين الخلايا الحارسـة من الثغور فى الورقة التى كانت محل البحث لم تبلغ أكثر من $\frac{1}{100}$ جزء من المساحة بأجمعها ينتج من ذلك أن السرعة التى دخل بها ثانى أوكسيد الكربون كانت أشدّ من سرعة امتصاص البوتاسا الكاوية لهذا الغاز بخمسين مرة وهى نتيجة مدهشة .

قد تؤدى هــذه القوة الامتصاصــية التى للزروعات الخضراء الى ازالة ثانى أوكســيد الكربون من الهواء ازالة كلية لولا استمرار تعويض الجوّ عمـا يفقد بمـا ينتج فى عمليات التنفس التى يقوم بها كل شئ حى وبمـا ينتج من احتراق الفحم والخشب وغيرهما من أنواع الوقود المشتمل على كربون .

وبعد دخول ثانى أوكسيد الكربون فى خلايا الورقة مع مقدار نسى من المـاء يعتوره تغير كيماوى يؤدى الى تكوّن مواد كربوايدراتيـة قابلة للذوبان وينطلق فى هــذه العملية غاز الأوكسجين . بذلك يصبح كربون ثانى أوكسيد الكربون "مثبتا" وسرعان ما تتجمع المواد الكربوايدراتيـة فى أنسجة النبات وينطلق الأوكسيجين فى الهواء .

وقد تمثل هذه العملية كما يأتى :

ثانى أوكسيد الكربون + ماء = أيدروكربون + أوكسيجين .

وقد اعتاد النباتيون أن يستعملوا كلمة "التمثيل" للدلالة على تركيب النباتات الخضراء للكربون بهذه الطريقة من ثانى أوكسيد الكربون والماء ولكن يحسن أن يستبق هذا الاصطلاح للتعبير به عن عملية تحول الأغذية الى مواد الأنسجة كما تواطأ الفيسيولوچيون الحيوانيون ونستعمل لهذا الانتاج التركيبى (انتاج الكربوايدرات) كلمة أخرى خاصة بالنباتات الخضراء . وبما أن هذه العملية تتوقف على الضوء فقد اقترح لها لفظ "التركيب الضوئى" ونرى اطلاق هذا الاصطلاح أو كلم "تثبيت الكربون" بدل لفظ "تمثيل" .

أما حقيقة طبيعة الكربوايدرات الذى يتكون أولا أثناء العملية فغير معروفة . ولكن العالم فون بيير (Von Baeyer) ارتأى أن الفورمالدهيد (ك بد$_{٢}$ ا) هو أول ماينتج بناء على المعادلة :

$$\text{ك}_{٢}\text{ا} + \text{بد}_{٢}\text{ا} = \text{ك بد}_{٢}\text{ا} + \text{ا}_{٢}$$

وأن هذا المركب يتكثف بعد ذلك فيصبح كربوايدرات قانونه(ك$_{٦}$ بد$_{١٢}$ ا$_{٦}$). على أنه لا يمكن العثور على الفورمالدهيد فى الأنسجة التى يحدث فيها تثبيت الكربون ، وفضلا عن أن تجارب بوكورنى (Bokorny) تبين أن النباتات قد تستعمل الفورمالدهيد فى بعض الظروف لانتاج كربوايدرات فان القول بأن هذا المركب هو أول درجة فى تكوين المركبات الكربونية من ثانى أوكسيد الكربون والماء ليس إلا نظرية فرضية .

فأما ما لا شك فيه فهو أن أنواع السكر تتكون على عجل فى خلايا البرنشيمة الورقية بعد أن تمتص أوراق النبات الخضراء ثانى أوكسيد الكربون من الهواء . وتدل الأبحاث الباهرة التى تولاها براون وموريس أن نوع السكر الذى يصنع

أولا هو سكر القصب ثم أن الد كستروز واللفيولوز والمالتوز تظهر فى الأوراق تبعا لفعل الأنزيمـات فيما تكون قبلها من سكر القصب والنشا .

واذا بلغ تجمع السكر فى الأوراق من كثير من النباتات حدّا محدودا كوّنت البلاستات اللونية (كلورو بلاست) منه حبوبا نشوية وتظهر هذه الحبوب فى باطن مادة الكلورو بلاستات وكانت أول حاصل منظور من عملية تثبيت الكربون . ويتوقف المقـدار الكلى لأنواع الكربو يدرات الناتجة بواسطة أوراق ذات مساحة واحدة على الخواص الحيوية الباطنية التى لمختلف أنواع النباتات واليك مثلا : تنتج ورقة عباد الشمس من هذه المواد فى وقت معين أكثر مما تنتجه ورقة من نبات الفول القصير (Dwarf bean) ذات مساحة مساوية لمساحة تلك . فقد وجد "براون" و"موريس" أن المقـدار الذى يصنعه النبات الأول فى اثنتى عشرة ساعة فى يوم معتـدل الضوء كان أزيد من ١٢ حبة من الكربوايدراتات لكل متر مربع من السطح الورقى .

٢ — ويتوقف صنع أو تركيب المواد الكربوايدراتيه بالطريقة المشروحة على شرائط أهمها ما يأتى :

(١) أن تكون النباتات حية .
(٢) أن يكون ثانى أوكسيد الكربون موجودا فى الهواء المحيط بالأوراق .
(٣) أن تشتمل الأوراق على كلورو بلاستات .
(٤) أن يتيسر مقدار معلوم من الشدّة فى الضوء .
(٥) أن تكون هناك درجة مناسبة من الحرارة لاجراء العملية .
(٦) "تثبيت الكربون" يتأثر أيضا بوجود أو فقدان بعض المواد المعدنية ولا سيما مركبات البوتاسيوم التى يحصل عليها من التربة ولكن الوظيفة

الخاصة التى تؤديها فى العملية غير معروفة وعملية "تثبيت الكربون" عملية حيوية تنقطع بموت النبات .

والنباتات التى توجد فى هواء استخرج منه ثانى أوكسيد الكربون لا تزداد فى وزن جوامدها ثم يصيبها الموت بعد مدة بسبب الجوع . كما أنها لاتستطيع أن تعيش فى جو لايشغله إلا ثانى أوكسيد الكربون ولكنها قادرة على القيام "بتثبيت الكربون" فى هواء يشتمل على ٢٠ الى ٣٠ فى المائة من هذا الغاز. وتثبيت الكربوايدرات — تبعا لتجارب مونتمارتينى (Montemartini) — يحصل على أحسن حال وأقصى سرعة فى هواء يشتمل على ٤ فى المائة من ثانى أوكسيد الكربون وهو ستة أمثال ما يوجد منه عادة فى الجو أو سبعة امثاله .

والظاهر أن عملية "تثبيت الكربون" انما تقوم بها بعض أجزاء مخصصة من پروتوپلازم الخلايا أى الكلوروبلاستات إذ أن هذه العملية لاتحدث إلا فى الأوراق والأجزاء التى هى خضراء . فأما الجذور و بتلات الأزهار والأجزاء البيضاء من الأوراق الملونة التى خلت من الكلوروبلاستات فليس لها يد فى هذه العملية وكذلك الأمر فى النباتات الطفيلية والسبروفيتية التى هى خالية من هذه الكيانات (الكلوروبلاستات) فانها غير قادرة على استعمال ثانى أوكسيد الكربون لتكوين — أوتركيب — المواد الكربوايدراتية . فأما أوراق الباذنجان الأرجوانى والبنجر الأحمر وغيرهما من النباتات فلها عصارة خلوية تضرب الى الحمرة تخفى تحتها اخضرار لون الكلوروبلاستات الموجودة فى البرنشيمتين العمادية (Palisade) والاسفنجية من هذه الأوراق . وعليه فهذه النباتات تقوم بعملية "تثبيت الكربون" كما تقوم ذوات الأوراق الخضراء العادية .

والكلوروبلاستات كيانات صغيرة مطمورة فى سيتوبلازم الخلية ؛ يتخلل مادتها صبغ أخضر يسمى " الكلوروفيل " أى الخضير (أو الغضير) تصحبه مادة برتقالية تضرب الى الحمرة وتعرف " بالكاروتين " (Carotin) ومادة صفراء تسمى " زانثوفيل " (Xanthophyll) ملحقة بالكاروتين .

أما طبيعة الكلوروفيل (الخضير) الكيمياوية فغير معروفة على أن تولده يتوقف بصورة ما على وجود عنصر الحديد فى النباتات وان كان لايظهر أنه يشتمل على هذا العنصر .

وكلوروبلاستات النباتات المزروعة فى الظلام أو التى تغطى مدة ماتفقد اخضرار لونها وتصبح عديمة اللون أو صفراء باهتة .

ويتوقف تولد الكلوروفيل على الضوء ماعدا كلوروفيل الكلوروبلاستات الموجودة فى أجنة بعض النباتات . وعليه فالفلقتان وأول أوراق أغلب البوادر والأوراق الناشئة من البراعم الأرضية من النباتات المعمرة هى وحدها التى تخضر عند ماتصل الى سطح التربة . كما أن تكون الكلوروفيل يتأثر بالحرارة ، فان بلاستيدات كثير من النباتات النامية فى الظلام لاتحدث لونا أخضر حتى ولو عرضت للنور اذا كانت الحرارة تحت درجة التجمد ولكنها تحدث هذا اللون على درجات أعلى من تلك .

ويستخرج الكلوروفيل بواسطة الكؤول ولعله يكون إذ ذاك على صورة متغيرة . محاليله فلورية أى متلونة فتظهر حمراء كالدم اذا هى نظرت بضوء منعكس وتظهر خضراء اذا نظرت بضوء مخترق . واذا عوملت بالحوامض تغير لونها فأصبح أخضر كدرا ضاربا الى السمرة وبعد موت سيتوبلازم الخلايا تنتشر العصارة الخلوية الحمضية التى توجد فى باطن تجويف الخلايا

والنبات حتى خلال السيتوبلازم حتى تبلغ الى الكلوروبلاستات فتدعوها الى التغيّر الى لون الخضرة السمراء التى هى خاصة بالأوراق الميتة . وليس تكوين الكلوروفيل بالأمر الوحيد الذى يكون الضوء له ضروريا بل الضوء ضرورى مباشرة لعملية تثبيت الكربون إذ أن الطاقة (Energy) أى القدرة اللازمة لتحليل ثانى أوكسيد الكربون والماء المستعملين فى هذه العملية مستمدة من أشعة الشمس ولا تستطيع النباتات الخضراء أن تحدث تركيب المواد الكربوايدراتية من ثانى أوكسيد الكربون والماء فى الظلام . ولذلك فهى فى هذه الظروف تفقد من وزن جوامدها نظرا الى مايفقد منه فى عملية التنفس الحاصلة فى كل الأوقات (أنظر الفصل التاسع عشر) .

لايكون صنع المركبات الكربونية فى الظل وفى الأمكنة السيئة الاضاءة وفى الصوبات وفى أيام الشتاء الغائمة إلا قليلا لا يكفى فى الغالب لامداد النباتات بحاجاتها الصحيحة . وبازدياد شدّة الضوء يزداد "تثبيت الكربون" ازديادا نسبيا حتى يصل الى الدرجة القصوى وهذه لايوصل اليها فى كثير من النباتات حتى تكون معرّضة لضوء الشمس مباشرة .

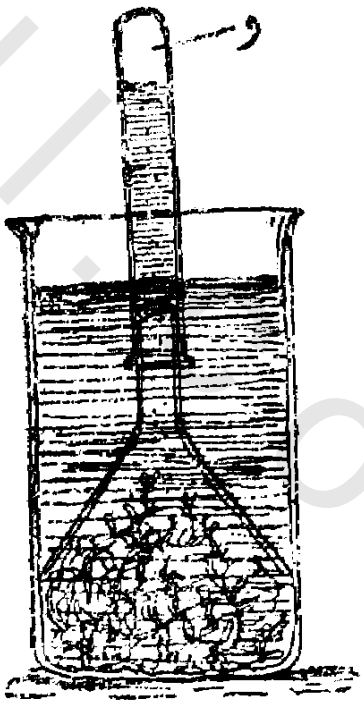
على أن من النباتات التى تألف الظل ما يحتاج الى مقدار شدّة فى الضوء معتدلة لتغذيته تغذية صحيحة . فاذا عرضت الى ضوء شديد قل تنشطها أو وقف . وأصاب الأذى كلوروبلاستاتها وغيرها من محتوياتها الخلوية البروتوبلازمية .

وخلايا البشرة فى أغلب النباتات خالية من الكلوروبلاستات ، ولا شك أن محتويات خلايا هذا النسيج تحمى كلوروبلاستات الأنسجة الواقعة بعدها من سوء فعل شدّة الضوء وفضلا عن ذلك فان الكلوروبلاستات تنقل الى

مواضع أكثر افادة لها فى باطن الخلايا اذا أصبحت شدّة الضوء الواقع على الأوراق بالغة .

والأشعة الحمراء والبرتقانية والصفراء الموجودة فى ضوء الشمس هى أشدّ الأشعة أثرا فى "تثبيت الكربون" أما الأشعة الأرجوانية والبنفسجية فليس لها من الأثر فى هذه العملية إلا قليل جدّا .

"تثبيت الكربون" فى كثير من النباتات يحدث بمقـدار قليل على درجة او اثنتين فوق درجة التجمد فاذا ازدادت درجة الحرارة ازدادت العمليـة تنشطا حتى تصـل الى درجة ٢٠ م أو ٢٥ م فأما بعد هـذه الدرجة فان هذه العملية يقل تنشطها حتى اذا بلغت درجة ٥٦ م وقفت وانتهى الأمر تموت النبات .



شكل ٧٨)

تج ١١٢ : ضـــع بعض فراخ من النبات المائى (Potamogeton) فى كوبة ملأى بالماء وضـع فمها زجاجيا فيها مقلوبا كما فى (شكل ٧٨) وضع أنبوبة اختبار ملأى بالماء على طرف القمع . وعرض جميع ذلك لوضاح ولاحظ أن فقاقيع من الغاز تصعد عن أوراق النباتات وتجتمع فى نقطة (و) فى الأنبوبة الاختبارية وبعد أن تجتمع بضعة سنتيمترات مكعبة من الغاز فى الأنبوبة انتزعها من القمع وضع ابهامك على الطرف المفتوح منهـا وهى تحت المـاء حتى تمنع الهواء من الدخول . ثم ارفع الأنبـوبة من المـاء رفعا كليا واقلبها ولا يفارق ابهامك طرفها الذى سـددته طول المدّة ، ثم ارفع ابهامك وأنزل عود ثقاب متجمر فى الغاز .

أجل ، ان الغاز المتجمع ليس أوكسيجينا نقيا ولكنه يشتمل على نسبة منه عظيمة ولذلك يسبب لعود الثقاب المتجمر أن يلتهب عند وضعه فيه .

تج ١١٣ : (١) أربط فرخا طرفيا من نبات الپوتاموجيتون طوله ٤ بوصات أو ٦ بقضيب زجاجى وضعه بحيث يكون الطرف المقطوع من الفرخ الى أعلى فى أنبوبة زجاجية ملأى بماء بئر .

عرض جميع ذلك الى ضوء نهار ضاح ، وأرقب وعد فقاقيع الأوكسيجين التى تصعد عند الطرف المقطوع من الفرخ فى دقيقتين أو ثلاث .

(٢) انقل هذا الجهاز الى مكان سيء الاضاءة وعد الفقاقيع التى تنطلق فى نفس الوقت السابق . واذكر هل يزداد عددها اذا عرضت النبات لضوء ضاح عما اذا عرضت لضوء مظلم أم لا؟

تج ١١٤ : أعد هذه التجربة ولكن استعمل فيها ماء سبق لك غليه حتى اخرج منه كل غاز ثانى أوكسيد الكربون . ولاحظ أنه لا ينطلق من الورق إلا قليل من الغاز إن لم يمتنع بتاتا . عند ذلك أضف مقدارا من ثانى أوكسيد الكربون الى الماء بأن تنفخ فى أنبوبة زجاجية منغمسة فيه .

تج ١١٥ : أعد التجربة ١١٢ واستعمل جذورا وأزهارا وغيرها من الأجزاء النباتية غير الخضراء لتبين أنه لا ينطلق أوكسيجين من مثل هذه الأجزاء .

تج ١١٦ : (١) أقطف ورقة من بعض النباتات العريضة الأوراق وذلك فى عصر يوم دافىء وضاح الضوء . واختبر هل تجد بها نشا . وذلك بأن تضعها أولا فى ماء غال مدة دقيقة تنقلها بعدها الى اناء فيه كؤولات ممثلة دافئة لاذابة الخضير وغيره من الأصباغ . واترك الأوراق فى هذا الاناء بضع ساعات حتى يبهت لونها ثم انقلها بعد ذلك الى طبق فيه محلول اليود (أنظر تج ٧٩) .

فاذا كانت الأوراق تشتمل على نشا انقلبت سوداء أو أرجوانية قاتمة .

(٢) اختبر هل تجد نشا فى الأوراق المبقعة بلطخ بيضاء وبين أن لا نشا فى الأجزاء البيضاء التى خلت من الكلوروفيلاستات .

تج ١١٧ : (١) ادهن ورقة كمثرى بالزبدة أو الشحم على جانبيها لسد الثغور واتركها بعد ذلك يومين وفى عصر اليوم الثالث أزل الزبدة أو الشحم بماء حار واختبر هل تجد نشا فى الورقة .

ولاحظ أنه لا يتكون نشا فى النصف الذى منع غاز ثانى أوكسيد الكربون من الدخول اليه .

(٢) ادهن السطح الأعلى فقط من ورقة كمثرى والسطح الأسفل من ورقة كمثرى أخرى واتركهما ثلاثة أيام ثم ابحث عن النشا .

ابحث أى الورقتين أحوى للنشا ، ثم تحقق على أى السطحين تكثر الثغور .

تج ١١٨ : لبيان تأثير الظلام فى تكوين النشا ضع ورقة تروبيولم مربوطة فى كيس من الورق الأسمر حتى لايدخل اليها نور بتة ودعها كذلك يومين ثم ابحث عن وجود النشا .

تج ١١٩ : اغل مقدارا من أوراق النجيليات دقيقة أو اثنتين ثم انتزع منها الخضير بوضع الأوراق فى كؤول قوى فى خزانة مظلمة .

وصب بعض المحلول فى كوبة أو فى أنبوبة كبيرة ولاحظ اخضرار لون المحلول عند عرضه فى النور وحمرته القاتمة اذا نظر اليه بنور منعكس عنه .

ولاحظ مايحدث من التأثير فى الضوء عند وضع بعض نقط من الحامض الأيدروكلوريك الى المحلول .

تج ١٢٠ : انبت بعض بوادر من القمح والخردل والبازلاء فى ظلام دامس . ولاحظ أن أوراق هذه البوادر لاتكون خضراء . ثم عرض النباتات للضوء وراقب الوقت الذى تبدو فيه أول علامات اخضرار اللون المعين .

تج ١٢١ : ضع ماجورا أو سلطانية أو حوضا مقلوبا على مكان من غيط نابت حتى يمتنع الضوء عن النبات الذى تحته . وراقب كيف يفقد النبت اخضرار لونه بعد أيام .

الفصل السابع عشر

تكون البروتيدات — نقل الزاد واختزانه

١ — تحدث على الدوام فى جسم النبات عدة تغيرات كيماوية عظيمة يطلق على جملتها اسم "العمليات الميتابولية" أو "الميتابولزم" (Metabolism) (التحويل الغذائى) ومن هذه العمليات مايؤدى — كالتى سبق بحثها فى الفصل السابق — الى تكون مركبات معقدة من مركبات أبسط منها . وتسمى هذه