

## الفصل السادس عشر

### تثبيت الكربون أو التمثيل — التركيب الضوئى

(Photosynthesis) (Assimilation) (Carbon Fixation)

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

فالنباتات الطفيلية كالحامول (Dodder) والهلوك (Broom rape) وكثير من أنواع الفطر (Fungi) تلتصق بنفسها على غيرها من الكائنات الحية وتمتص منها كل ما تحتاج إليه من الكربون على صورة سكر وبروتينات وغير ذلك من مركبات الكربون المصطنع . وأنواع الرميات تعيش الغراب (Mush-room) وغالب أنواع الفطر العادى التى هى كالتفيليات السابقة الذكر ، خالية من الكالورويلاستات ، تحصل على الكربون اللازم لها على صورة مصطنعة مشابهة لما ذكر من المركبات الكربونية الموجودة فى بقايا النباتات والحيوانات الميتة التى تعيش عليها .

ويمحتمل أيضاً أن كل النباتات الخضراء تمتص وتستعمل مركبات الكربون العضوى من الدبال (Humus) أى البقايا النباتية أو الحيوانية المتحللة فى الأرض وان كان قد أثبت أن هذا المصدر غير كاف لاعطاء كل الكربون اللازم لتمام 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 أمّدت جذورها بمحلول من المواد الزائدة التي لا تشتمل على كربون ما دام المحلول يشتمل على كل العناصر الجوهرية الأخرى .

ففي هذه الظروف يكون المورد الوحيد الذي يستمد منه الكربون هو ثاني أكسيد الكربون الموجود في الجو المحيط بالأوراق على أنه ان كان مقداره النسبي في الجو من القلة بحيث ان متوسطه هو ٢٫٨ جزء في ١٠,٠٠٠ فانه هو المورد الذي تستمد منه كل النباتات المنزرعة بطريقة الزراعة المائية كل ما تحتاج اليه من الكربون .

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

وقد أثبتت الأبحاث الواسعة المتخذ فيها كل الحيلة أن لاشك في أن أهم مادة زائدة تتخذها النباتات الخضراء موردا لكربونها هي ثاني أكسيد 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 لا يدخل مطلقا — من قشرة الخلايا البشرية .

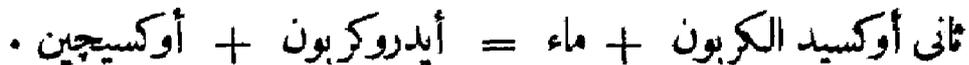
وقد بحث العالمان "براون (Brown)" و"اسكومب (Escombe)" منذ عهد قريب عن السرعة التي يحدث بها امتصاص هذا الغاز بواسطة الأوراق

فوجدنا أن مقدار ما يمتصه نبات عباد الشمس وهو معرض الى ضوء عام منتشر كان مرة ٤١٢ سنتيمترا مكعبا فى كل متر مربع من سطح الورق فى الساعة وكان امتصاص ورقة كاتالبا ٣٤٥ سم م م عن كل متر مربع فى الساعة . ووجد أن سرعة امتصاص ورقة لهذا الغاز فى ظروف مناسبة كان مساويا لنصف ما يمتصه محلول قوى من البوتاسا الكاوية مساحته كمساحة تلك وبما أن الفتحات الحقيقية الكائنة بين الخلايا الحارسة من الثغور فى الورقة التى كانت محل البحث لم تبلغ أكثر من  $\frac{1}{10}$  جزء من المساحة بأجمعها ينتج من ذلك أن السرعة التى دخل بها ثانى أوكسيد الكربون كانت أشد من سرعة امتصاص البوتاسا الكاوية لهذا الغاز بخمسين مرة وهى نتيجة مذهشة .

قد تؤدى هذه القوة الامتصاصية التى للزروعات الخضراء الى ازالة ثانى أوكسيد الكربون من الهواء ازالة كلية لولا استمرار تعويض الجو عما يفقد بما ينتج فى عمليات التنفس التى يقوم بها كل شئ حى وبما ينتج من احتراق الفحم والخشب وغيرهما من أنواع الوقود المشتمل على كربون .

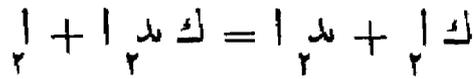
وبعد دخول ثانى أوكسيد الكربون فى خلايا الورقة مع مقدار نسي من الماء يعتبره تغير كىماوى يؤدى الى تكوّن مواد كربوايدراتية قابلة للذوبان وينطلق فى هذه العملية غاز الأوكسيجين . بذلك يصبح كربون ثانى أوكسيد الكربون "مثبتا" وسرعان ما تتجمع المواد الكربوايدراتية فى أنسجة النبات وينطلق الأوكسيجين فى الهواء .

وقد تمثل هذه العملية كما يأتى :



وقد اعتاد النباتيون أن يستعملوا كلمة "التمثيل" للدلالة على تركيب النباتات الخضراء للكربون بهذه الطريقة من ثاني أوكسيد الكربون والماء ولكن يحسن أن يستبقى هذا الاصطلاح للتعبير به عن عملية تحول الأغذية إلى مواد الأنسجة كما تواطأ الفيسيولوجيون الحيوانيون ونستعمل لهذا الإنتاج التركيبي (إنتاج الكربوايدرات) كلمة أخرى خاصة بالنباتات الخضراء . وبما أن هذه العملية تتوقف على الضوء فقد اقترح لها لفظ "التركيب الضوئي" ونرى إطلاق هذا الاصطلاح أو كلم "تثبيت الكربون" بدل لفظ "تمثيل" .

أما حقيقة طبيعة الكربوايدرات الذي يتكون أولاً أثناء العملية فغير معروفة . ولكن العالم فون بيير (Von Baeyer) ارتأى أن الفورمالدهيد (ك<sub>١</sub> بد<sub>١</sub>) هو أول ما ينتج بناء على المعادلة :



وأن هذا المركب يتكشف بعد ذلك فيصبح كربوايدرات قانونه (ك<sub>٦</sub> بد<sub>١٢</sub> إ). على أنه لا يمكن العثور على الفورمالدهيد في الأنسجة التي يحدث فيها تثبيت الكربون ، وفضلاً عن أن تجارب بوكورنى (Bokorny) تبين أن النباتات قد تستعمل الفورمالدهيد في بعض الظروف لإنتاج كربوايدرات فإن القول بأن هذا المركب هو أول درجة في تكوين المركبات الكربونية من ثاني أوكسيد الكربون والماء ليس إلا نظرية فرضية .

فأما ما لا شك فيه فهو أن أنواع السكر تتكون على عجل في خلايا البرنثيمة الورقية بعد أن تمتص أوراق النبات الخضراء ثاني أوكسيد الكربون من الهواء . وتدل الأبحاث الباهرة التي تولاهها براون وموريس أن نوع السكر الذي يصنع

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

وإذا بلغ تجمع السكر فى الأوراق من كثير من النباتات حدًا 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 المقدار الكلى لأنواع الكربويدرات 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 المقدار الذى يصنعه النبات الأول فى اثنتى عشرة ساعة فى يوم معتدل الضوء كان أزيد من ١٢ حبة من الكربويدرات لكل متر مربع من السطح الورقى .

٢ - ويتوقف صنع أو تركيب المواد الكربويدراتيه 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 التي تؤديها في العملية غير معروفة وعملية "تثبيت الكربون" عملية حيوية تنقطع بموت النبات .

والنباتات التي توجد في هواء استخراج منه ثاني أكسيد الكربون لا تزداد في وزن جوامدها ثم يصيبها الموت بعد مدة بسبب الجوع . كما أنها لا تستطيع أن تعيش في جو لا يشغله إلا ثاني أكسيد الكربون ولكنها قادرة على القيام "بتثبيت الكربون" في هواء يشتمل على ٢٠ الى ٣٠ في المائة من هذا الغاز . وتثبيت الكربوايدرات — تبعاً لتجارب مونتمارتيني (Montemartini) — يحصل على أحسن حال وأقصى سرعة في هواء يشتمل على ٤ في المائة من ثاني أكسيد الكربون وهو ستة أمثال ما يوجد منه عادة في الجو أو سبعة أمثاله .

والظاهر أن عملية "تثبيت الكربون" إنما تقوم بها بعض أجزاء مخصصة من بروتوبلازم الخلايا أي الكلوروبلاستات إذ أن هذه العملية لا تحدث إلا في الأوراق والأجزاء التي هي خضراء . فأما الجذور وبتلات الأزهار والأجزاء البيضاء من الأوراق الملونة التي خلت من الكلوروبلاستات فليس لها يد في هذه العملية وكذلك الأمر في النباتات الطفيلية والسيروفيقية التي هي خالية من هذه الكيانات (الكلوروبلاستات) فإنها غير قادرة على استعمال ثاني أكسيد الكربون لتكوين — أو تركيب — المواد الكربوايدراتية . فأما أوراق الباذنجان الأرجواني والبنجر الأحمر وغيرهما من النباتات فلها عصارة خلوية تضرب إلى الحمرة تخفى تحتها اخضرار لون الكلوروبلاستات الموجودة في البرنشيمتين العمادية (Palisade) والاسفنجية من هذه الأوراق . وعليه فهذه النباتات تقوم بعملية "تثبيت الكربون" كما تقوم ذوات الأوراق الخضراء العادية .

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

أما طبيعة الكلوروفيل (الخضير) الكيماوية فغير معروفة على أن تولده يتوقف بصورة ما على وجود عنصر الحديد في النباتات وان كان لا يظهر أنه يشتمل على هذا العنصر .

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

ويتوقف تولد الكلوروفيل على الضوء ماعدا كلوروفيل الكلوروبلاستات الموجودة في أجنة بعض النباتات . وعليه فالفلقنان وأول أوراق أغاب البوادر والأوراق الناشئة من البراعم الأرضية من النباتات المعمرة هي وحدها التي تخضر عند ما تصل الى سطح التربة . كما أن تكون الكلوروفيل يتأثر بالحرارة ، فان بلاستيدات كثير من النباتات النامية في الظلام لا تحدث لونها 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 كالدّم اذا هي نظرت بضوء منعكس وتظهر خضراء اذا نظرت بضوء محترق . واذا عوملت بالحوامض تغير لونها فأصبح أخضر كدرا ضاربا الى السمرة وبعد موت سيتوبلازم الخلايا تنتشر العصارة الخلووية الحمضية التي توجد في باطن تجويف الخلايا

والنبات حتى خلال السيتوبلازم حتى تبلغ الى الكلوروبلاستات فتدعوها الى التغير الى لون الخضرة السمرء التي هي 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 أكسيد الكربون والماء المستعملين فى هذه العملية مستمدة من انزجى أشعة الشمس ولا تستطيع النباتات الخضراء أن تحدث تركيب المواد الكربوايدراتية من ثانى أكسيد 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) .

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

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

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

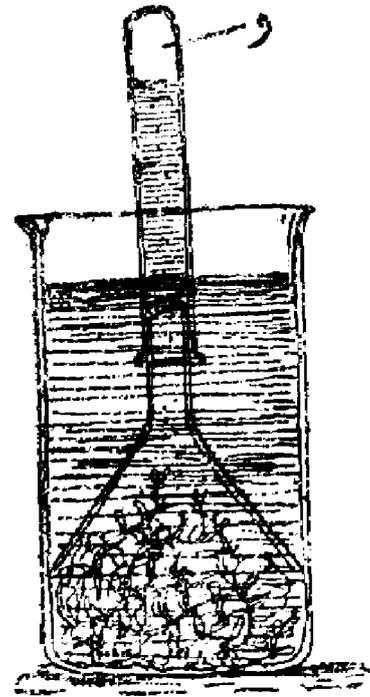
مواضع أكثر افادة لها في باطن الخلايا اذا أصبحت شدة الضوء الواقع على الأوراق بالغة .

والأشعة الحمراء والبرتقالية والصفراء الموجودة في ضوء الشمس هي أشد الأشعة أثرا في "تثبيت الكربون" أما الأشعة الأرجوانية والبنفسجية فليس لها من الأثر في هذه العملية إلا قليل جدا .

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

تج ١١٢ : وضع بعض فراخ من النبات المائي (Potamogeton) في كوبة مملأى بالماء وضع قعما زجاجيا فيها مقنونا كما في (شكل ٧٨) وضع أنبوبة اختبار مملأى بالماء على طرف القمع . وعرض جميع ذلك لورضاح ولاحظ أن فقاعات من الغاز تصعد عن أوراق النباتات وتجمع في نقطة (و) في الأنبوبة الاختبارية وبعد أن تجتمع بضعة سنتيمترات مكعبة من الغاز في الأنبوبة انتزعها من القمع وضع ابهامك على الطرف المفتوح منها وهي تحت الماء حتى تمنع الهواء من الدخول . ثم ارفع الأنبوبة من الماء رفعا كليا واقلمها ولا يفارق ابهامك طرفها الذي سدده طول المدة ، ثم ارفع ابهامك وأزل عود ثقاب متجمر في الغاز .

أجل ، ان الغاز المتجمع ليس أوكسيجيننا نقيا ولكنه يشمل على نسبة منه عظيمة ولذلك يسبب لعود الثقاب المتجمر أن ياتهب عند وضعه فيه .



(شكل ٧٨)

تج ١١٣ : (١) أربط فرخاً طرفياً من نبات الپوتاموجيتون ضوله ٤ بوصات أو ٦ بمضيب زجاجي وضعه بحيث يكون الطرف المقطوع من الفرخ الى أعلى في أنبوبة زجاجية ملامى بماء بئر .

عرض جميع ذلك الى ضوء نهار ضاح ، وأرقب وعد الفقاع الأوكسيجين التي تصعد عند الطرف المقطوع من الفرخ في دقيقتين أو ثلاث .

(٢) انقل هذا الجهاز الى مكان سوي الاضاءة وعد الفقاع التي تنطلق في نفس الوقت السابق . واذا كرهت زياد 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 ثانی أوكسيد الكربون . ولاحظ أنه لا ينطلق من الورق إلا قليل من الغاز إن لم يمنع بتاتا . عند ذلك أضف مقدارا من ثانی أوكسيد الكربون الى الماء بأن تنفخ في 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 في عصر يوم دافئ . وضاح الضوء . واختبر هل تجدها نشا . وذلك بأن تضعها أولا في ماء غال مدة دقيقة تنقلها بعدها الى افاة فيه كؤولات ممتلئة دافئة لاذابة الخضير وغيره من الأصباغ . واترك الأوراق في 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 اقلبت سوداء أو أرجوانية قائمة .

(٢) اختبر هل تجدها نشا في الأوراق المبقعة بلطخ بيضاء . وبين أن لانشا في الأجزاء البيضاء التي حات من الكوروبلاستات .

تج ١١٧ : (١) ادهن ورقة كثرى بالزبدة أو الشحم على جانبيها اسدائنه ووراكها بعد ذلك يومين وفي عصر اليوم الثالث أزل الزبدة أو الشحم بماء حار واختبر هل تجدها نشا في الورقة . ولاحظ أنه لا يتلون نشا في النصف الذي منع غاز ثانی أوكسيد الكربون من الدخول اليه . (٢) ادهن السطح الأعلى فقط من ورقة كثرى والسطح الأسفل من ورقة كثرى 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 تروبيوم مربوطة فى كيس من الورق الأسمر حتى لا يدخل إليها نورية ودعها كذلك يومين ثم ابحث عن وجود النشا .
- تج ١١٩ : اغلى مقدارا من أوراق النجيليات دقيقة أو اثنين ثم اترع منها الخضر بوضع الأوراق فى كؤول قوى فى خزانة مظلمة .
- رصب بعض المحلول فى كوبة أو فى أنبوبة كبيرة ولاحظ اخضرار لون المحلول عند عرضه فى النور وحرمة القائمة اذا نظر اليه بنور منعكس عنه .
- ولاحظ ما يحدث من التأثير فى الضوء عند وضع بعض نقط من الحامض الأيدروكلوريك الى المحلول .
- تج ١٢٠ : ائب بعض بوادر من القمح والجرذ والبازلاء فى ظلام دامس . ولاحظ أن أوراق هذه البوادر لا تكون خضراء . ثم عرض النباتات للضوء وراقب الوقت الذى تبدو فيه أول علامات اخضرار اللون للعين .
- تج ١٢١ : ضع ماجورا أو ساطنية أو حرضا فى قلوبا على مكان من غيبط نابت حتى يمنع الضوء عن النبات الذى تحته . وراقب كيف يفقد النبات اخضرار لونه بعد أيام .

## الفصل السابع عشر

### تكوين البروتيدات — نقل الزاد واختزانه

- ١ — تحدث على الدوام فى جسم النبات عدة تغيرات كىماوية عظيمة يطلق على جمعتها اسم "العمليات الميتابولية" أو "الميتابولزم" (Metabolism) (التحويل الغذائى) ومن هذه العمليات ما يؤدى — كالتى سبق بحثها فى الفصل السابق — الى تكوين مركبات معقدة من مركبات أبسط منها . وتسمى هذه