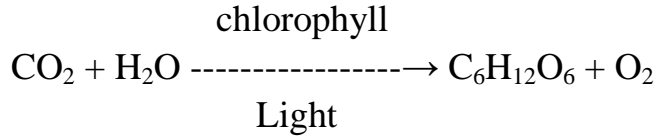


## التركيب الضوئي Photosynthesis

تعد عملية التركيب ( البناء ) الضوئي من أهم العمليات الحيوية الموجودة على سطح الأرض و لجميع الكائنات الحية ( باستثناء بعض أنواع البكتريا ) و التي تقوم بها جميع النباتات الخضراء حيث تستطيع اخذ الفوتونات الضوئية و تحويلها إلى طاقة كيميائية على شكل ATP

و يمكن تلخيص تلك العملية المعقدة بالمعادلة الكيميائية الآتية :-



## الصبغات Pigments

هنالك العديد من الصبغات المشتركة في عملية البناء الضوئي و منها :-

### 1. صبغات اليخضور ( الكلوروفيل ) Chlorophyll

وهذه تكون على عدة أنواع و يمكن تميز تسعة ( 9 ) أنواع منها كلوروفيل أ ، ب ، ج ،.... الخ لغاية ( 9 ) تسعة ، وتعد صبغة اليخضور أهم أنواع الصبغات المشتركة في عملية البناء الضوئي

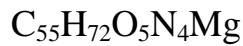
و إن كلوروفيل أ و ب يعد أهم الأنواع ، ويعد كلوروفيل أ الأكثر أهمية فهو موجود بأكثر من صورة أيضا

- مقارنة ما بين كلوروفيل أ و ب .

### Chlorophyll A

### Chlorophyll B

--



اخضر مزرق

اللون - اخضر مصفر

ذرة الكربون الثالثة - ترتبط بمجموعة الدهايد -CHO ترتبط بمجموعة مثيل -CH<sub>3</sub>

### 2. أشباه الكاروتينات Carotenoid Pigments

وهذه تمثل الصبغات المساعدة في عملية التركيب الضوئي وان وظيفتها هي :-

أ - وقاية اليخضور من الأكسدة الضوئية .

ب- امتصاص الضوء ونقله إلى اليخضور .

وتعد أشباه الكاروتينين مركبات دهنية واسعة الانتشار ذات لون يتدرج بين الأصفر و الأرجواني  
ويعد الكاروتين أول مجموعة أشباه الكاروتينات و منها اشتق اسم المجموعة ، و من  
الكاروتين الأخرى صبغة Lycopene أشباه و صبغة ألفا كالروتين و بيتا كاروتين  
الليكوبين

.  $\alpha$  Carotene  $\beta$  Carotene

3. صبغات الفايكوبيلينات Phycobilins Pigments

و منها :-

أ . الفايكو ارثرين Phycoerythrins

ب . الفايكوسيانين Phycocyanins

وتعد هذه أيضا من الصبغات المساعدة في عملية التركيب الضوئي حيث تعمل على امتصاص  
الأطيف الضوئية ( الموجات الضوئية ) التي لا يستطيع كلوروفيل أ امتصاصها و تحويلها إلى

لذلك فهي تشترك في عملية التركيب الضوئي بصورة غير مباشرة و بهذا تسمى هي و أشباه  
الكاروتينات الصبغات المساعدة .

البلاستيدات الخضر Chloroplasts

إن البلاستيدات الخضر هي احد مكونات الخلية النباتية الحية و هي لا تتشأ ذاتيا بل تنشأ  
من

بلاستيدات موجودة أصلا تسمى البلاستيدات الأولية proplastid و تعد المركز الذي يتم فيه

عملية البناء الضوئي ففيها تنتظم جزيئات اليخضور و الصبغات الأخرى المساعدة الشكل ( 5 )  
يوضح طبيعة البلاستيدة الخضراء تحت المجهر الالكتروني .

شكل ( 5 ) يوضح صورة تحت المجهر الالكتروني للبلاستيدة الخضراء .

وحدة البناء الضوئي Photosynthetic unit

كان الاعتقاد السائد إن حدوث التركيب الضوئي الكامل يتطلب وجود بلاستيدات خضر  
كاملة ولكن ظهر نتيجة أجراء البحوث العديدة في هذا المجال إن عملية البناء الضوئي تجري

في أجزاء صغيرة للغاية من مجموع مكونات البلاستيدة الخضراء ، و هكذا اقترح الأتي : ( إن  
الخضراء ربما تتكون من الوحدات التمثيلية ( التركيبية ) Photosynthetic unit البلاستيدة  
الضوئية و تعرف بأنها :- أصغر مجموعة من جزيئات الصبغة التي تتعاون مع بعضها  
لتؤثر في سير التفاعلات الكيموضوئية و بالتالي امتصاص و انتقال الضوء إلى مراكز  
اقتناصها لإطلاق الإلكترونات .

إن الوحدة الضوئية التمثيلية هذه تتكون من 400 جزيء كلوروفيل قانص للطاقة الضوئية  
حيث

ترتيبها المحكم في الكرانات يتيح لها الفرصة الممتازة لانتقال الطاقة بطريفة الرنين الموجي  
تدعى مثل هذه الجزيئات الكلوروفيلية اسم الكلوروفيل الاستشعاري antennae chlorophyll

### طبيعة الضوء Light nature

كان الاعتقاد السائد في منتصف القرن السابع عشر إن الضوء عبارة عن ( تيار من الدقائق  
أو

الجسيمات الدقيقة تنبعث من مصدرها كالشمس أو المصباح أو الشمعة أو غيرها تخترق المواد  
الشفافة وتنعكس من على السطح المعتم ) وقد أطلق على هذا التفسير لطبيعة الضوء  
الجسيمات Corpuscular theory ( نظرية ثم ما لبثت حين عجزت عن تفسير كثير من  
أو الدقائق

الظواهر المتعلقة بالضوء لذلك ظهرت نظرية أخرى تعرف ( النظرية الموجية ) Wave theory  
إذ ترى هذه النظرية ، إن طبيعة الضوء هي عبارة عن موجات كهرومغناطيسية ذات أطوال  
موجية ثم ما لبثت حين عجزت عن تفسير ظواهر مهمة متعلقة بالضوء ، حتى تقدم  
العالم

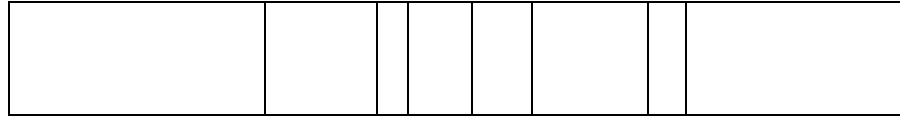
اينشتاين بنظرية التي تربط بين النظريتين السابقتين حيث سميت نظرية الفوتون ( الكم )  
والتي تنص ( إن الطاقة الموجودة في شعاع ضوئي تتركز على هيئة دقائق

### Quantum

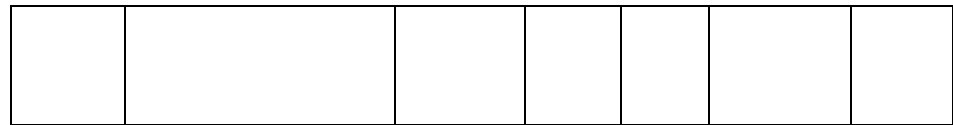
صغيرة تسمى فوتونات Photons) و الفوتون هو : وحدة الطاقة والذي يساوي الكم وهو حزمة  
أو رزمة من الإشعاع الكهرومغناطيسي . لأجل فهم طبيعة الضوء يجب الأخذ في  
الاعتبار خواص الضوء المزدوجة من الموجات و الدقائق وان الأطوال الموجية المؤثرة في نمو  
النباتات تكون محصورة بين (  $10^{-5} \times 3 - 10^{-5} \times 9$  ) ويمكن إن نعبر عنها بوحدة  
النانوميتر والذي

يرمز له ب ( nm ) حيث يساوي  $10^{-9}$  م أو  $10^{-7}$  سم ، والشكل ( 6 ) يوضح ذلك :-

wave length ( cm )



radio wave      infrared      u.v      x- ray      g.ra      cosmic ray



infrared      red      orange      yellow      green      blue

violet

شكل ( 6 ) يوضح الطيف الكهرومغناطيسي Electromagnetic spectrum

و من هنا يمكن القول إن أعلى امتصاص للطاقة الضوئية لـ Chlorophyll A هو عند  
الطول الموجي 680 nm ) أو عند الطول الموجي 700 نانومتر (nm) ويمكن أن  
نانومتر)

تدعى الكلوروفيلات تلك باسم :-

Chlorophyll A 680 & Chlorophyll A 700 or p. 680 & p.

700

امتصاص الضوء وانتقال الطاقة Light absorption & transfer of enrage

لا تمتص كل جزيئات الصبغة الكلوروفيل الضوء في وقت واحد بل تنتقل الطاقة من جزيء إلى  
آخر قبل أن تصل إلى مكان عملها . وان طبيعة الانتقال في الطاقة من جزيء إلى آخر يستند  
إلى

حالات الإثارة Excitation لجزيئات اليخضور و حالات الإثارة هي : -

1. حالة الخمود Ground state

وتعني أن أزواج الإلكترونات تدور في اتجاهين متعاكسين و بالتالي ستكون محصلة طاقة

هذه

الدورة تساوي ( صفر ) أي بمعنى إنها حالة في الركود أو الخمود .

## 2. حالة الإثارة الفردية Single excitation state

وهي الحالة التي تمتص فيها جزيئات اليخضور فوتونات الضوء الأزرق و الأحمر فيثار الإلكترون حيث ترتفع مستوى طاقتة ، وما يلبث أن يعود إلى حالة الخمود .

## 3. حالة الإثارة الثانية Second excitation state

يحدث أن تمتص جزيئات اليخضور فوتون ضوئيا آخر بعد الأول فترتفع طاقتة إلى مستوى ثان

أعلى من الأول . بعد إثارة جزيء اليخضور ورفع مستوى طاقة الكتروناته بالإثارة الفردية و الإثارة الثانية سوف يعود الإلكترون إلى حالة الإثارة الفردية أو إلى حالة الخمود و بعودته هذه تظهر الطاقة بشكل إشعاع أو وميض وتسمى عودة الطاقة بتلك الطريقة باسم اللصق الضوئي

. Fluorescence

## 4. حالة الإثارة الثالثة Triplet excitation state

يحدث في بعض الأحيان أن يعكس الإلكترون مداره وعندئذ لا يستطيع العودة إلى الإلكترون الآخر فيقال عنه انه قد اسر Trapped رفيقه فتسمى هذه الحالة ( حالة اصطياد )

اصطياد إلكترون ( بحالة الإثارة الثالثة وهي اقل مستوى الطاقة من حالة الإثارة الفردية وذلك

بسبب فقد بعض الطاقة ، كما يمكن لهذا الإلكترون أن يعدل اتجاه دورته إلى حالتها الأصلية

فيعود عند ذاك إلى حالة الخمود فتفقد الطاقة على هيئة إشعاع وتسمى هذه الظاهرة عندئذ

ظاهرة التفسفر Phosphorescence ، وهكذا وخلال فترة 10<sup>-9</sup> ثانية سوف يتم اختزال

مستقبل الالكترونات إذ تعد حالة الإثارة الثالثة أكثر ملائمة لانتقال الالكترونات لاختزال مستقبل

الالكترونات و بداية تدفق الالكترونات ATP .و الشكل ( 7 ) يوضح حالات الإثارة هذه : لإنتاج

شكل ( 7 ) يوضح امتصاص الضوء ومستويات الطاقة المختلفة .

تأثير أمرسون Emerson effect

لاحظ الباحثون العاملين في فلسجة الصبغات المشتركة في عملية البناء الضوئي ظاهرة غريبة

وهي ( أن الضوء الممتص مباشرة من Chl .A كان أقل فاعلية و كفاءة في عملية البناء قبل

الضوئي من مثيله الممتص من قبل الصبغات المساعدة ) ، حيث لوحظت تلك الظاهرة من خلال

دراسة قياسات أللصف الخاص بـ Chl .A .

و بتقدم العلم واستخدام الضوء أحادي اللون ذو الأطوال الموجية المختلفة ، تمكن العالم أمرسون من حساب إنتاج الفوتون quantum yield من خلال حساب عدد جزيئات الـ  $O_2$  ( الكوانتم )

المنطقة من عملية البناء الضوئي لكل فوتون ضوئي ممتص حيث تمكن من حساب محصلة الفوتونات للموجات الضوئية المختلفة الطول للضوء المرئي إذ لاحظ ( انخفاض مهم في إنتاج

الفوتونات عند الموجات الضوئية الأطول 680 nm وان مثل هذه الموجات تدخل ضمن من

المنطقة الحمراء ( ذروة الامتصاص لكلورفيل A ) ولكن عندما استخدم أمرسون الموجة الأقصر طولاً في أن واحد مع الموجة السابقة وجد أن معدل عملية البناء الضوئي يفوق مجموع كل من

الموجات عند استعمال كل منهما لوحدها . وقد سمي ( الارتفاع أو الزيادة في معدل عملية البناء الضوئي نتيجة لاستعمال نوعين من الموجات مع بعض في أن واحد بتأثير أمرسون ) .

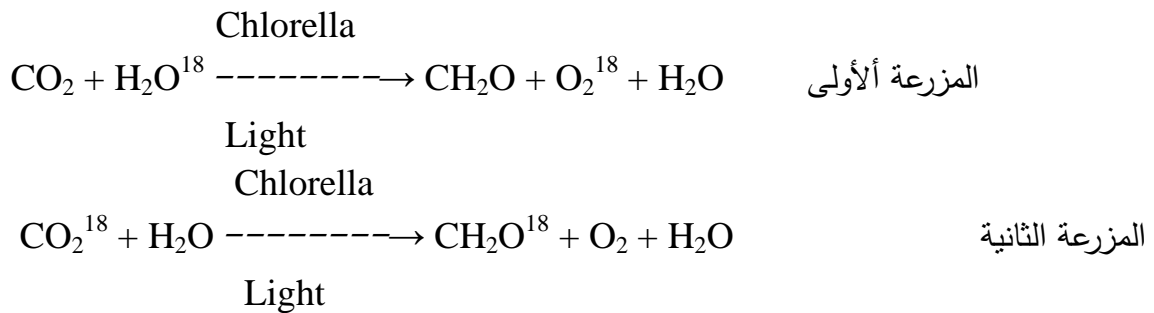
أصل الأوكسجين في عملية البناء الضوئي The organ of O<sub>2</sub> in Photosynthesis

أن أصل الأوكسجين ناتج من عملية البناء الضوئي هو الماء وليس غيره وهناك عدة أدلة تثبت ذلك وهي :-

### 1. تجارب العالم روبن Robin

أستخدم هذا العالم نظائر الأوكسجين المشعة بالاستعانة بمزرتين لطحلب *Chlorella* أحدهما ينمو في ماء اوكسجينه من النوع  $H_2O^{18}$  مع  $CO_2$  اعتيادي والثانية ذات ماء الثقيل

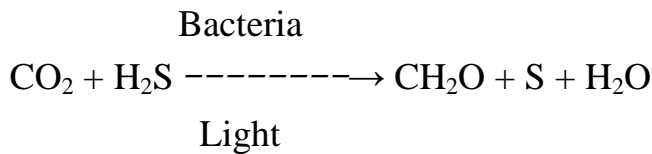
اعتيادي و  $CO_2$  اوكسجينه من النوع الثقيل  $CO_2^{18}$  ، ثم جرى قياس و معرفة نوع الأوكسجين الناتج من عملية البناء الضوئي و بأجهزة حساسة . فوجد أن الأوكسجين الناتج من المزرعة الأولى من النوع  $O_2^{18}$  وان الأوكسجين الناتج من المزرعة الثانية يكون من الثقيل النوع الاعتيادي ، كما في المعادلات آتية :-



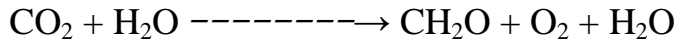
### 2. تجارب فسلجة النبات المقارن

أن وظيفة الماء هي إنتاج و تكوين القوة الاختزالية و الطاقة ، و أن البكتريا التي تقوم بعملية التركيب الضوئي تستخدم كبريتيد  $H_2S$  بدل  $H_2O$  وكنتيجة لذلك الاستعمال لهذه الهيدروجين

القوة المختزلة سوف تترسب جزيئات الكبريت S بدلا من الـ  $O_2$  كما في المعادلات آتية:



Plant



Light

النظام الضوئي الأول Photosystem I

ويقصد به مركز جمع الطاقة الضوئية، وهو عبارة عن كلوروفيل A الذي تكون ذروة امتصاصه للضوء عند الطول الموجي 700nm ويختصر بـ P.700 . أن هذا النظام على وجه التحديد:-  
1. 200 جريئة كلوروفيل منها جزيء واحد أو اثنان من النوع P.700 .

2. كلوروفيل B .

4. سايتوكروم f واحد .

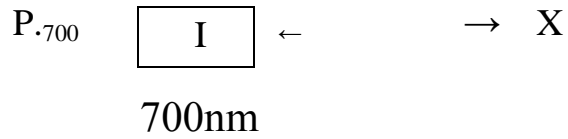
5. و بلاستوسيانين واحد .

6. وسايتوكرومين b .

7. الفريديوكسينات .

أن التفاعلات الضوئية الحادثة في هذا النظام تكون عاملين مهمين هما :-  
أ . عامل مؤكسد ضعيف وهو الـ ( P.700 ) .

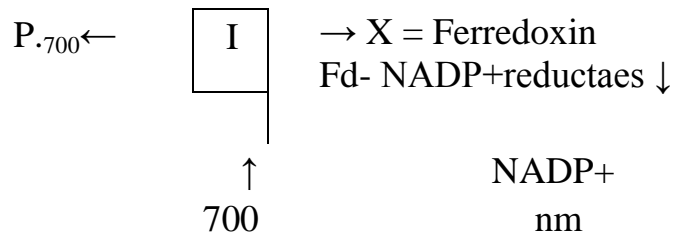
ب . عامل مختزل قوي هو الـ ( X ) .



إن طبيعة العامل X و الذي يعد المستلم الأول للالكترونات وهو غير معروف لذلك المختزل

أعطي X لكنه من الممكن أن يكون الفريديوكسين حيث يقوم الأخير باختزال المركب الرمز

NADPH إلى NADP<sup>+</sup> بالاستعانة بإنزيم خاص لذلك وكما يلي :-



NADPH

## النظام الضوئي الثاني Photosystem I I

ويقصد به مركز جمع الطاقة الضوئية، وهو عبارة عن كلوروفيل A الذي تكون ذروة امتصاصه للضوء عند الطول الموجي 680nm ويختصر بـ P<sub>680</sub>. أن هذا النظام على وجه التحديد:-

1. 200 جريئة كلوروفيل منها ثلاث جزيئات من النوع P<sub>680</sub>.

2. كلوروفيل B .

3. فايكوبيلين بروتين Phycobilins protein .

4. عدد من جزيئات كاروتينية .

5. جريئتين سايتوكروم B .

6. ستة ذرات Mn .

أن التفاعلات الضوئية الحادثة في هذا النظام تكون عاملين مهمين هما :-

1 . عامل مؤكسد قوي وهو الـ Z<sup>+</sup> .

2. عامل مختزل ضعيف هو الـ Q<sup>-</sup> .

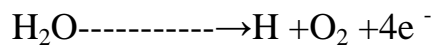
يعتقد أن العامل Q ربما يكون بلاستوكونون ، ويعد كل من الـ Cl و Mn من المتطلبات الواجب توفرها لكي يؤدي هذا النظام وظيفته بصورة تامة . هذا ويمكن أن يثبط عمل هذا النظام

بأحد المبيدات العشبية مثل مادة DCMU وعند بامتصاص هذا النظام للموجات الضوئية الـ

المناسبة 680nm سوف يتكون العاملين السابقين وكما يلي :-

أن العامل المؤكسد Z<sup>+</sup> يكون قويا جدا بحيث يستطيع أكسدة جريئة الماء و تحرير الـ O<sub>2</sub> كما يلي :-

Z



وحال استقرار الإلكترونات على المختزل الضعيف Q<sup>-</sup> تبدأ بالانتقال عبر الحوامل الالكترونية إلى النظام الضوئي الأول وان الفراغ الذي يتركه انتقال الالكترونات في النظام الضوئي الثاني سوف يعوض بالالكترونات المتحررة من تحلل الماء ضوئياً .

الفسفرة الضوئية Photo phosphorylation

تحتوي البلاستيدة الخضراء على الأنزيمات اللازمة لإنتاج الـ ATP اللازم لتمثيل  $\text{CO}_2$  و بالتالي إنتاج الكربوهيدرات . اثبت العالم Arnon أن البلاستيدة الخضراء المعزولة و المضاءة لها المقدرة على إنتاج ATP ، وقد أطلق على هذه العملية اسم الفسفرة الضوئية

phosphorylation. إن عملية الـ ATP في البلاستيدة الخضراء عن طريق التمثيل الضوئي يختلف و يستقل عن تكوين الـ ATP المايوتوكوندرية حيث تدعى تلك الفسفرة التأكسدية ، إن إنتاج الـ ATP و الـ NADPH يتم بطريقتين هما : -

## 1. الفسفرة الضوئية غير الدائرية Non – Cyclic phosphorylation

تمثل هذه التكامل بين النظامين الضوئيين  $p. 680$  &  $p. 700$  حيث تمثل تلك احد الوسائل لإنتاج الـ ATP داخل البلاستيدة الخضراء ، كما يمكن إن يشار لها أيضا بانتقال الالكترونات الغير دائري ، حيث تتساب الالكترونات داخل الثالوكويد و الذي يبدأ في آن واحد للنظامين الضوئيين وذلك من خلال التفاعلات المتكاملة و المترابطة بينهما ، و إن انحلال الماء ضوئيا photolysis of water وهو الذي يمد النظام ككل بالالكترونات اللازمة لإنتاج ATP و القوة الاختزالية المتمثلة بالمرافق الإنزيمي المختزل ( NADPH ) .

## 2. الفسفرة الضوئية الدائرية Cyclic phosphorylation

عند إعاقه عمل الفسفرة الضوئية الغير الدائرية لأي سبب يتعلق بإيقاف عمل النظام الضوئي الثاني مثل استخدام أطوال موجية اكبر من 680 أو استخدام المبيدات العشبية كالـ DCMU و Dichlorophenyl dimethyl urea و المانع لأكسدة الحامل الالكتروني Q . و تحت مثل هذه

الظروف فإن النظام الضوئي الأول سوف ينشط ولكن سوف يتوقف سريان الالكترونات من تحلل

الماء ضوئيا و تتوقف الفسفرة الضوئية الغير دائرية و يترتب على ذلك إعاقه تمثيل  $\text{CO}_2$  وبإعاقته

لا تصبح جزيئات NADP متاحة كمستقبل للالكترونات ، عندها سوف تسري من  $P. 700$  إلى

المستقبل ( AFeS ) و منه إلى  $\text{Cyt } b_6$  و منه إلى  $\text{cyt } f$  و من الأخير إلى إلى  $p. 700$

ثانية

لتغلق الدورة ولذلك سميت بالفسفرة الضوئية الدائرية أي ( المغلقة ) .إن أهم ما يميز هذه الدورة عن سابقها ، هو تكوين جزيء الـ ATP فقط دون تكوين الـ NADPH حيث يتكون الـ ATP في مكان ما غير معروف بالتحديد و لذلك يرمز له في بعض الأحيان بالخط المنقط في بعض المصادر ( كطريق لسريان الالكترونات بشكل غير معروف ) ، و الشكل ( 8 ) يوضح ذلك :

شكل ( 8 ) يوضح مخططات الفسفرة الضوئية أ . الدائرية ب . غير الدائري