التمثيل الضوئي Potosynthesis

ان الزراعة اساساً عبارة عن نظام لاستثمار الطاقة الشمسية من خلال عملية التمثيل الضوئي .

ويعد التمثيل الضوئي المصدر الرئيس للطاقة المستخدمة من قبل الانسان ، وهو يجهز الطاقة في غذائه وغذاء حيواناته وكذلك الوقود المستخدمة في تشغيل المعامل والكثير من المكائن الصناعية .

ان دراسة فسلجة المحاصيل تقودنا الى اكتشاف ان حاصل نباتات المحاصيل يعتمد بصورة رئيسة على حجم وكفاءة التمثيل الضوئي .

عملية التمثيل الضوئي Potosynthesis :-

هي عملية استثمار الطاقة الضوئية وتحويلها الى طاقة كيميائية داخل الانسجة الخضراء للنبات .

الضوء المستخدم في التمثيل الضوئي :-

يعتبر الضوء المرئي مصدر الطاقة المستخدمة من قبل النبات في عملية التمثيل الضوئي . وللطاقة الضوئية خواص مميزة يمكن توضيحها من خلال نظريتين ذات علاقة مع بعضهما .

1- نظرية الموجات الكهرومغناطيسية :- وتنص بان الضوء ينتقل خلال الفضاء على شكل موجات ويطلق على عدد الموجات المارة بنقطة معينه في فترة زمنية معينه بالتردد frequency .

$$\text{التردد (V)} = \frac{\text{سرعة التردد (3 x 10 كم/ثانية) (C)}}{\text{طول الموجة } \lambda}$$

2- نظرية الكوانتم quantum theory :- وتنص على ان الضوء ينتقل في حزم في هيئة دقائق تدعى فوتونات photons وتسمى الطاقة الموجودة في الفوتون الواحد بالكوانتم وبصورة عامة فان الضوء ينتقل على هيئة موجات ولكنه يتفاعل مع المواد على هيئة دقائق .

يعد تفاعل الضوء في التمثيل الضوئي نتيجة مباشرة لامتصاص الفوتونات من قبل صبغة الكلوروفيل، ولا تحتوي جميع الفوتونات على مستوى الطاقة المطلوب لأثارة صبغات الورقة، وان الفوتونات الواقعة بين 390 - 760 نانوميتر (المطابقة للضوء المرئي) هي التي تكون حاوية على مستوى الطاقة المناسبة للقيام بعملية التمثيل الضوئي .

وبما ان اثارة الصبغات هي نتيجة مباشرة للتفاعل بين الفوتون والصبغة لذلك فان قياس الضوء المستخدم في عملية التمثيل الضوئي يكون عادة على اساس كثافة تدفق الفوتونات بدلاً من الطاقة والتي تعرف بانها عدد الفوتونات على مساحة سطح معين بوحدة الزمن، وبما ان اطوال الموجات الواقعة بين 400 – 700 نانوميتر اكثر كفاءة في التمثيل الضوئي فان قياس الضوء المستخدم في التمثيل الضوئي يكون عادة على اساس كثافة تدفق الفوتونات ضمن اطوال هذه الموجات (الضوء المرئي) ويطلق على هذه القياسات بالأشعة الفعالة في عملية التمثيل الضوئي Photosynthetically active radition (PAR) أو تسمى كفاءة تدفق الفوتونات للتمثيل الضوئي Photosynthetic photon flux density (PPFD) والتي تمثل حوالي 50% من الاشعة الساقطة .

ويعرف مصطلح Einstein:- بانه عبارة عن مول واحد من الفوتونات، ولهذا فان الاشعة الفعالة في عملية التمثيل الضوئي(PAR) تقاس على اساس مايكروانيشتاين Einstein/ م^2 / ثانية او بوحدات النظام العالمي (مايكرومول / م^2 / ثانية) .

الورقة :-

تعتبر الورقة العضو الرئيسي الذي يقوم بعملية التمثيل الضوئي في النباتات الراقية وتمتلك الورقة تركيب يتميز بفعاليته في امتصاص الضوء اللازم لعملية التمثيل الضوئي .

وتتصف الورقة بوجود ما يلي :-

1- وجود سطح خارجي كبير .

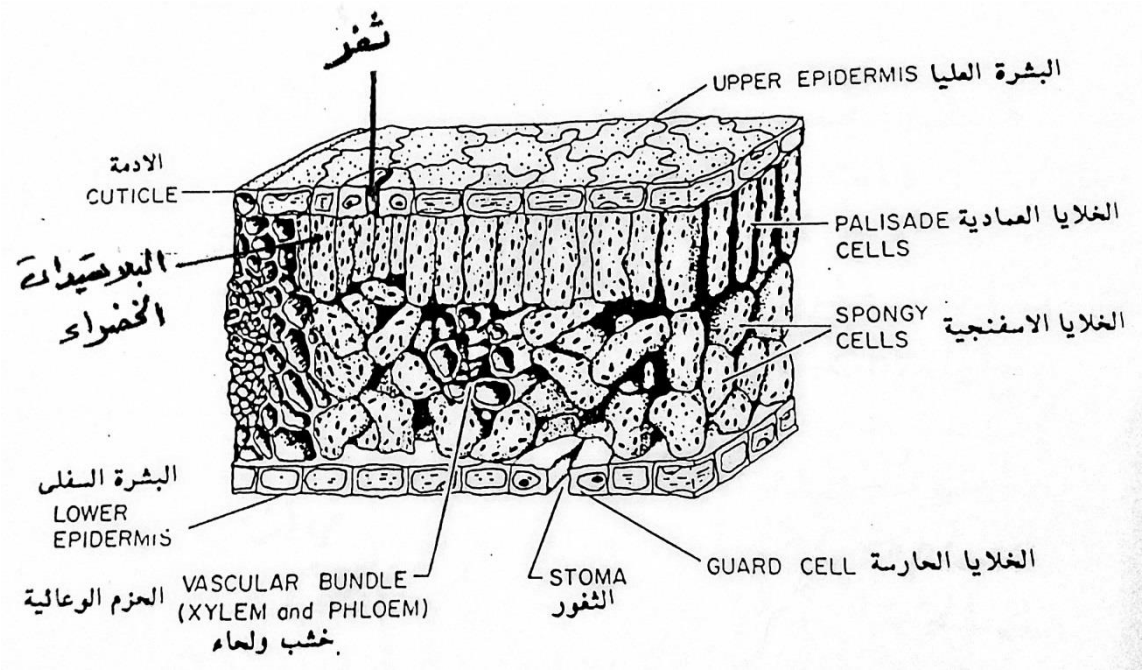
2- وجود سطح داخلي واسع وفراغات بينيه (هوائية) متصلة مع بعضها .

3- تحتوي على كمية كبيره من البلاستيدات وخاصةً في الخلايا العمادية (Pllasade cells) .

4- تقارب الاوعية الناقلة من خلايا التمثيل الضوئي .

5- وجود ثغور عديدة بوحدة المساحة .

6- سطح واقي علوي وسفلي .



شكل يوضح تشريح الورقة والاختلافات في شكل الخلايا العمادية والاسفنجية

أجـهـزة التمثيـل الضـوئـي :-

تعد البلاستيدات الخضراء chloroplast هي جهاز التمثيل الضوئي في النبات ويتراوح قطرها من 1 – 10 مايكروملميتر ، **وفيها منطقتين مميزتين هي :-**

1- الاغشية Lamellae : وتشمل على :-

أ) اغشية الحشوة Stroma Lamellae :- وهي اغشية مزدوجة .

ب) اغشية الكرانا grana Lamellae :- وهي عدد من الاغشية المتراصة فوق بعضها ، وان كلا الغشائيين عبارة عن مناطق مركزة من صبغات التمثيل الضوئي التي يحدث فيها تفاعلات الضوء .

2- الحشوة Stroma :- وهي منطقة سائلة قليلاً واقل تركيزاً من الكلوروفيل وذات لون فاتح ويحدث فيها اختزال Co_2 في تفاعل الظلام الى مركبات عضوية .

ان المعادلة العامة للتمثيل الضوئي هي

$$n\,Co_2 + nH_2o \xrightarrow[\text{كلوروبلاست}]{\text{Light}} (CH_2o)_n + nO_2$$

ان مصدر الاوكسجين الذي تحرره النباتات في عملية التمثيل الضوئي حسب استنتاج Van Niel عام (1930) يأتي من الماء وليس من Co_2 كما كان يعتقد سابقاً ....**وان الدلائل التي تثبت ذلك هي** :-

1- فكرة انشطار الماء بالضوء (Photolysis of H_2o) كخطوه اوليه في عملية التمثيل الضوئي **كما في المعادلات الاتية** :-

$$H_2o \xrightarrow[\text{Light}]{\text{Chloroplast}} \underset{\text{reductant}}{\underset{\text{عامل مختزل}}{H^+}} + \underset{\text{Oxidant}}{\underset{\text{عامل مؤكسد}}{oH^-}}$$

$$H^+ + Co_2 \longrightarrow CH_2o$$

$$oH^- + H_2o \longrightarrow O_2$$

ويمكن ان تكتب المعادلات اعلاه بالشكل الاتي:-

$$H_2o \xrightarrow[\text{Light}]{\text{Chloroplast}} \underset{\text{reductant}}{\underset{\text{مختزل}}{\underset{CH_2o}{H^+}}} \xrightarrow{Co_2} + \underset{\text{oxidant}}{\underset{\text{مؤكسد}}{\underset{O_2 \text{ or } A}{oH^-}}} \xrightarrow{H_2o \text{ or } H_2A}$$

2- الدليل الثاني وضعه العالم Sammel Ruben ومساعديه في عام (1941) حينما اضافوا الى الاشنات الخضراء (chlo. A) ماء يحتوي على الاوكسجين الثقيل (O^{18}) فلاحظ ان الاوكسجين المتحرر بعملية التمثيل الضوئي هو النظير (O^{18}) ولذلك تدخل جزيئتان من الماء وتخرج جزيئة واحدة من الاوكسجين حسب المعادلة التالية :-

$$n\,Co_2 + 2n\,H_2o^{18} \xrightarrow[\text{Light}]{\text{Chloroplast}} (CH_2o^{16})_n + n\,H_2o^{16} + O_2^{18}$$

3- وبعد ذلك تأكدت صحة فرضية Vanniel بالتجارب التي قام بها Hill سنة (1937) باستعمال البلاستيدات الخضراء المعزولة من النباتات واستنتج Hill بانه بوجود الضوء والماء يمكن استبدال Co_2 بأي مستلم صناعي للإلكترونات وحسب المعادلة التالية :-

$$4Aox. + 2H_2o \xrightarrow[\text{Light}]{\text{Chloroplast}} 4A\ red. + 4H^+ + O_2$$

حيث ان :-

A oxidant:- هي أي مادة صناعية تستلم الالكترونات وتقوم بدور العامل المؤكسد بدلاً من Co_2 ومن امثلة المركبات المستلمة للإلكترونات هي (Potassium Ferrioxalate) .

اهمية تفاعل Hill :-

تتجلى اهميته بان Co_2 غير ضروري لتحرير الاوكسجين ، أي ان Co_2 غير ضروري لتفاعل الضوء . كما ان Hill استطاع لأول مره اظهار تفاعلات التمثيل الضوئي خارج الخلية النباتية في الكلوروبلاست المعزولة .

اماكن تواجد الصبغات في الخلية النباتية :-

1- **الكلوروبلاست Chloroplast** : تحتوي على صبغات التمثيل الضوئي كالكلوروفيلات والكاروتينات وتكون محمولة على صفائح الكرانا في كلوروبلاست الاوراق المعرضة للضوء .

2- **العصير الخلوي (الفجوات)** :- وتحتوي على صبغات الفلافون Flavon والأنثوسيانين Anthocyanin وغيرها من الصبغات .

3- **السايتوبلازم** :- يحتوي على صبغات الفايتوكروم Phytochrom وغيرها، وهي صبغات بروتينية تستحث البذور على الانبات اذا تعرضت للضوء الاحمر.

صبغات التمثيل الضوئي Photosynthetic pigments :- وتشمل الاتي:-

أ- الكلوروفيلات Chlorophylls :- وتختلف هذه الصبغات في انواعها وفي وجودها في النباتات المختلفة وهي كما يأتي :-

1- كلوروفيل a (Chlorophyll a) :- يوجد في النباتات الراقية والأشنات الخضراء واعلى امتصاص له يقع بين (430 - 660) nm (نانوميتر) .

2- كلوروفيل b (Chlorophyll b) :- يوجد في النباتات الراقية والأشنات الخضراء وأعلى امتصاص له يقع بين (435 -645) nm (نانوميتر) .

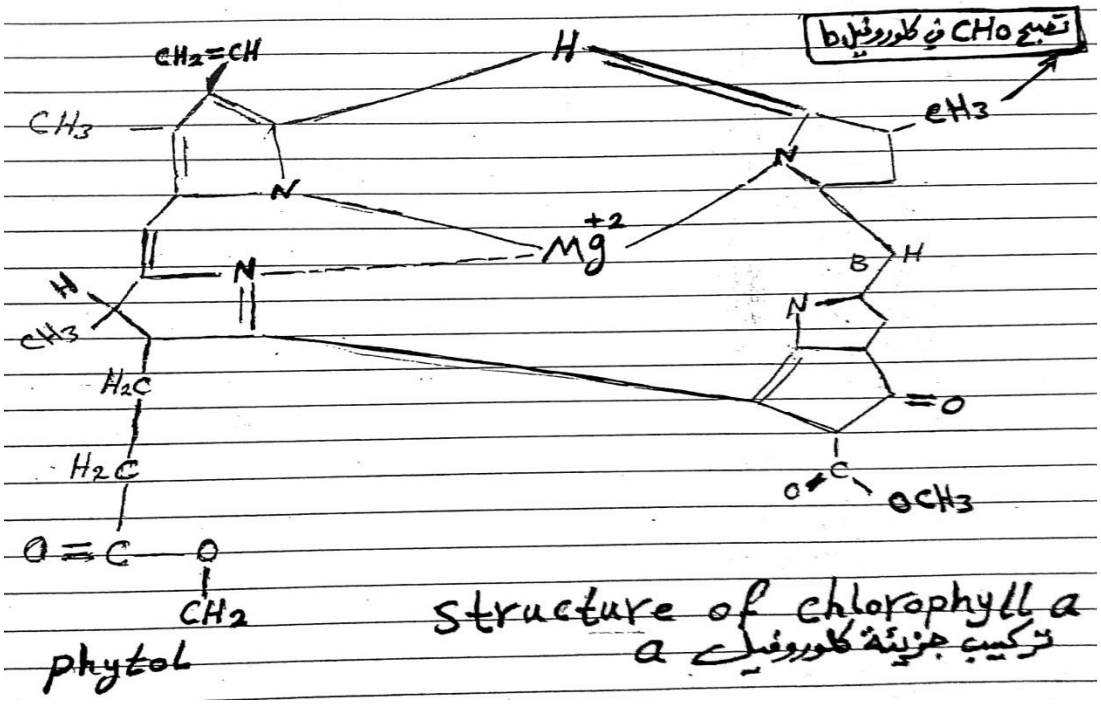
3- كلوروفيل c (Chlorophyll c) :- يوجد في الأشنات السمراء .

4- كلوروفيل d (Chlorophyll d):- يوجد في الأشنات الحمراء .

5- كلوروفيل e (Chlorophyll e) :- يوجد في بعض النباتات .

6- بكتريا كلوروفيل a وb:- توجد في بعض البكتريا القائمة بالتمثيل الضوئي.

ان جزيئة الكلوروفيلات بأنواعها تحتوي في تركيبها على رأس يسمى Porphyrin head وأربع حلقات بايرول Tetra pyrrole Ring وتتركز ذرة المغنسيوم Mg في المنتصف، كما يخرج من الرأس ذنب طويل مكون من الكحول يسمى phytol tail او phytol alcohol باستثناء كلوروفيل C .



اهمية الكلوروفيلات:-

تكمن اهميتها في امتصاص الضوء وتحويله الى طاقة كيميائية .

س/ ماهي الموجات الضوئية الاكثر تأثيراً في احداث عملية التمثيل الضوئي.

ج// تعد الموجات الضوئية الزرقاء والحمراء هي الاكثر تأثيراً في هذه العملية وهي تمتص بكفاءة عالية من قبل كلوروفيل a و b .

الضوء المستخدم في عملية التمثيل الضوئي :-

يعتبر الضوء المرئي (400 – 700 نانوميتر) مصدر الطاقة المستخدمة من قبل النبات في عملية التمثيل الضوئي .

ب- الكاروتينات Caroteins :- وهي مركبات دهنية توجد في النباتات والحيوانات وتختلف في الوانها من الصفراء والحمراء والبرتقالية والبنية وتجتمع مع صبغات الكلوروفيل في البلاستيدات الخضراء وقد توجد في البلاستيدات الملونة chromoplast في جذور الجزر وفي ثمار الطماطة الحمراء وفي الازهار المختلفة . ان الوان الكاروتينات الصفراء تكون واضحة في نباتات مغطاة البذور النامية في الظلام حيث ينعدم تكوين الكلوروفيل فيها (Etiolation) وكذلك في اوراق النباتات المتساقطة في فصل الخريف حيث يختفي الكلوروفيل

وتقسم الكاروتينات الى مجموعتين رئيستين هما :-

1- مجموعة الـ Carotene :- وتتكون بصورة رئيسية من الكاربون والهيدروجين وتوجد **بعدة انواع منها :-**

أ- Carotene - β :- وهي النوع الشائع وتكون صفراء او برتقالية اللون.

ب- Carotene - α :- وهي تشابه التي سبقتها الا انها اقل انتشاراً .

جـ - Lycopene :- وهذا النوع من الكاروتين يكون احمر اللون ويوجد في ثمار الطماطة .

ان انواع الكاروتينات تكون صيغتها الجزيئية $C_{40}H_{56}$

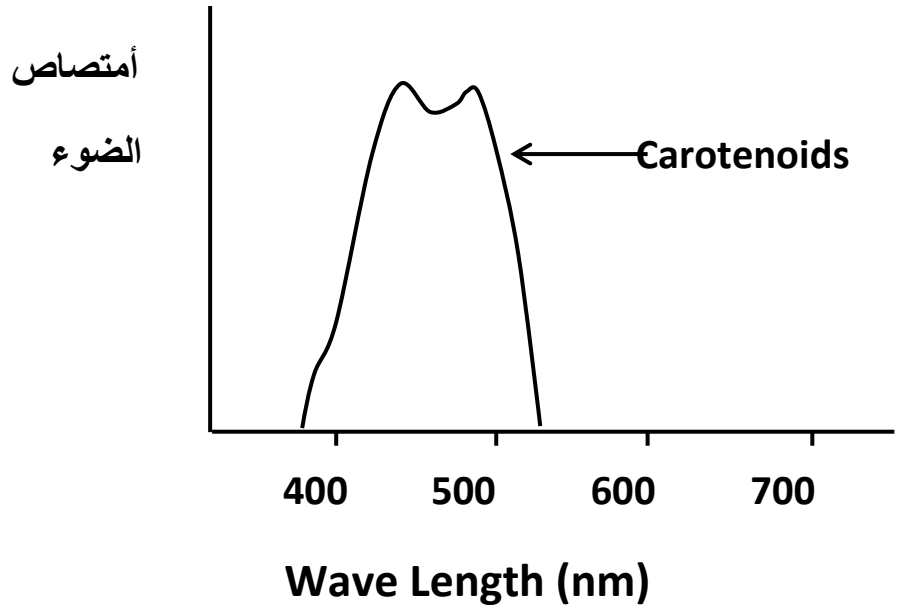
2- مجموعة الزانثوفيلات Xanthophylles :-

ان هذه الصبغات قد تكون سمراء او بنية اللون . وتختلف عن الكاروتينات بأنها تحتوي على الاوكسجين اضافةً الى الكاربون والهيدروجين ($C_{40}H_{56}O_2$) ولهذا تكون اكثر قطبية من الكاروتينات .

ان الزانثوفيل يكون اكثر شيوعاً في الطبيعة من الكاروتين وخاصه في الاوراق النامية

اذ تكون نسبة $\frac{\text{الزانثوفيل}}{\text{كاروتين}} = \frac{2}{1}$

ان ذروة امتصاص الكاروتينات (Carotenoids) للضوء يقع في طول موجي 400 - 500 نانوميتر .



وظائف الكاروتينات carotenoids :-

1- التمثيل الضوئي :- يعتقد ان دورها في التمثيل الضوئي ثانوياً وذلك لان الانسجة النباتية الخالية من الكلوروفيل لا تقوم بالتمثيل الضوئي ولهذا يعتقد بان دورها هو :

أ- منع هدم الكلوروفيل بالاكسدة الضوئية (photo-oxidation) حيث يعتقد ان الكاروتينات لها القابلية على امتصاص الطاقة الزائدة التي تمتص من قبل الكلوروفيل وتتاكسد ضوئيا لاجل حفظ الكلوروفيل من الاكسدة الضوئية .

ب- لها دور مساعد في امتصاص الضوء خلال عملية التمثيل الضوئي .أذ ان الطاقه الضوئية الممتصة من قبل الكاروتينات تتحول الى الكلوروفيل ومن ثم تستعمل في التمثيل الضوئي .

2 - الانتحاء الضوئي photo Tropism .أذ يعتقد ان بعضها او جميعها يلعب دوراً في عملية الانتحاء الضوئي .

صبغات الـ phycobillins أو biliproteins

ان هاتين الصبغتين من الصبغات المساعدة في امتصاص الضوء في عملية التمثيل الضوئي وتوجد في الاشنات الزرقاء الخضراء والاشنات الحمراء .

ان صبغات الكاروتينات والفايكوبلينات وكلوروفيل b و c و d هي صبغات ثانوية تمتص الطاقة الضوئية وتحولها الى كلوروفيل a . ويعتقد بان الفايكوبلن phycobillin توجد في الستروما Stroma وليس في الاغشية Lamella .

الاختلاف بين كلوروفيل a ، b :-

1- الصيغة التركيبية لكلوروفيل a هي :- $C_{55} H_{72} O_5 N_4 Mg$

الصيغة التركيبية لكلوروفيل b هي :- $C_{55} H_{70} O_6 N_4 Mg$

2- وجود مجموعة المثيل (CH_3) في الحلقة الثالثة لكلوروفيل a بينما توجد مجموعة الالديهايد (CHO) في هذه الحلقة في كلوروفيل b وهذا يجعل كلوروفيل b اكثر قطبية ويتحرك بصورة ابطا من كلوروفيل a عند فصلهما بطريقة الفصل الورقي paper chromotography .

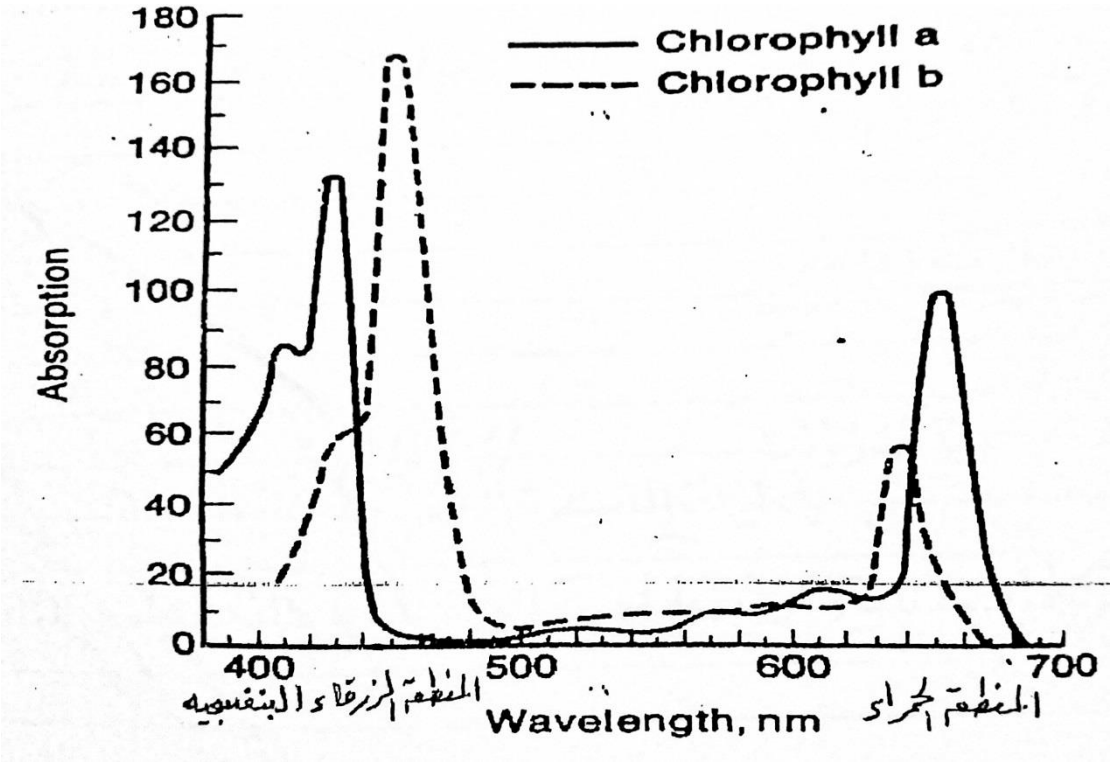
3- لون كلوروفيل a اخضر مزرق بينما لون كلوروفيل b اخضر فاتح .

4- تركيز كلوروفيل a اكثر بثلاث مرات من كلوروفيل b

$$\frac{\text{chl. a}}{\text{chl. b}} = \frac{3}{1}$$

5- امتصاص نوعية الضوء :-

ان كلوروفيل a يمتلك اعلى امتصاص له في المنطقة الزرقاء البنفسجية في طول موجة اقصر نسبياً مما في حاله كلوروفيل b بينما في المنطقة الحمراء يمتص كلوروفيل a بطول موجة اطول نسبياً مما في حالة كلوروفيل b . وان كلاهما
(كلوروفيل a و b) يمتصان بصورة رئيسية اللون الازرق الارجواني والاحمر وقليل جداً من اللون الاخضر .



العوامل المؤثرة في تكوين الكلوروفيل Chlorophyll Synthesis

يعتمد تكوين الكلوروفيل على الاتي :-

1- العامل الوراثي :- وجد ان بذور بعض اصناف الذرة وزهرة الشمس عند انباتها تكون بادرة عديمة الكلوروفيل Albino وهي خاصية وراثية متنحية وتموت البادرات حالما تستهلك المواد الغذائية المخزونة في البذرة . ويمكن ان نجعل هذه النباتات تنمو حتى النضج اذا ما جهزت بمصدر للطاقة كالسكريات .

2- الضوء :-

تتطلب مغطاة البذور الضوء لغرض تكوين الكلوروفيل على الرغم ان بعض المخروطيات وبعض الاشنات تستطيع تكوين الكلوروفيل في الظلام .

3- المعادن :-

يفترض توفر المغذيات المعدنية Fe , Mg , S , N لغرض تكوين الكلوروفيل، وان نقصها يسبب الاصفرار Chlorosis . اذ يدخل عنصري النتروجين والمغنيسيوم في تركيب جزيئة الكلوروفيل بينما العنصرين Fe , S يساعدان في تكوين كلوروفيل a .

مراحل عملية التمثيل الضوئي :-

1- تفاعلات الضوء Light reaction :- تعمل على أكسدة الماء واختزال NADP + وفسفرة ADP **وتتضمن الاتي :-**

أ- تفاعل هل Hill reaction :-

يحدث هذا التفاعل في الكرانا، وبواسطة هذا التفاعل تنقسم جزيئة الماء داخل الكرانا لتكوين عامل مختزل ويتحرر الأوكسجين

الضوء

$$H_2o + NADP \xrightarrow{\text{الكلوروبلاست}} NADPH + O_2 + H^+$$

طاقة قليلة طاقة عالية

ب- تفاعل الفسفرة الضوئية Photophosphorylation ويحدث أيضا في الكرانا Grana

الضوء

$$ADP + Pi \xrightarrow{\text{الكلوروبلاست}} ATP$$

طاقة قليلة طاقة عالية

2- تفاعلات الظلام Dark reaction

وهي تفاعلات انزيمية تحدث في منطقة الستروما (Stroma) التي تكون أقل تركيزاً من الكلوروفيل وتتوفر فيها الانزيمات اللازمة لهذه التفاعلات، اذ يتم فيها اختزال CO_2 الى مركبات عضوية . وهذه التفاعلات تحدث بوجود الضوء وعدمه وتتأثر بدرجة الحرارة وبفعالية الانزيمات . ويتطلب تثبيت المول الواحد من CO_2 ثلاث مولات من ATP ومولين من NADPH في نباتات **C_3**.... وحسب المعادلة الاتية :-

$$CO_2 + 3H_2O + 2NADPH + 3ATP \xrightarrow[\text{الكلوروبلاست}]{\text{الضوء}} (CH_2O)_n + 3NADP + 3ADP + 2H_3PO4$$

وظائف تفاعلات الضوء :-

1- تحرير الأوكسجين . 2- تكوين القوة الاختزالية NADPH .

3- أنتاج الطاقة ATP بعملية الفسفرة الضوئية .

وهذا يدل على ان المايتوكوندريا ليست الجزء الوحيد الذي ينتج الطاقة في الخلية .

أنواع الفسفرة الضوئية :-

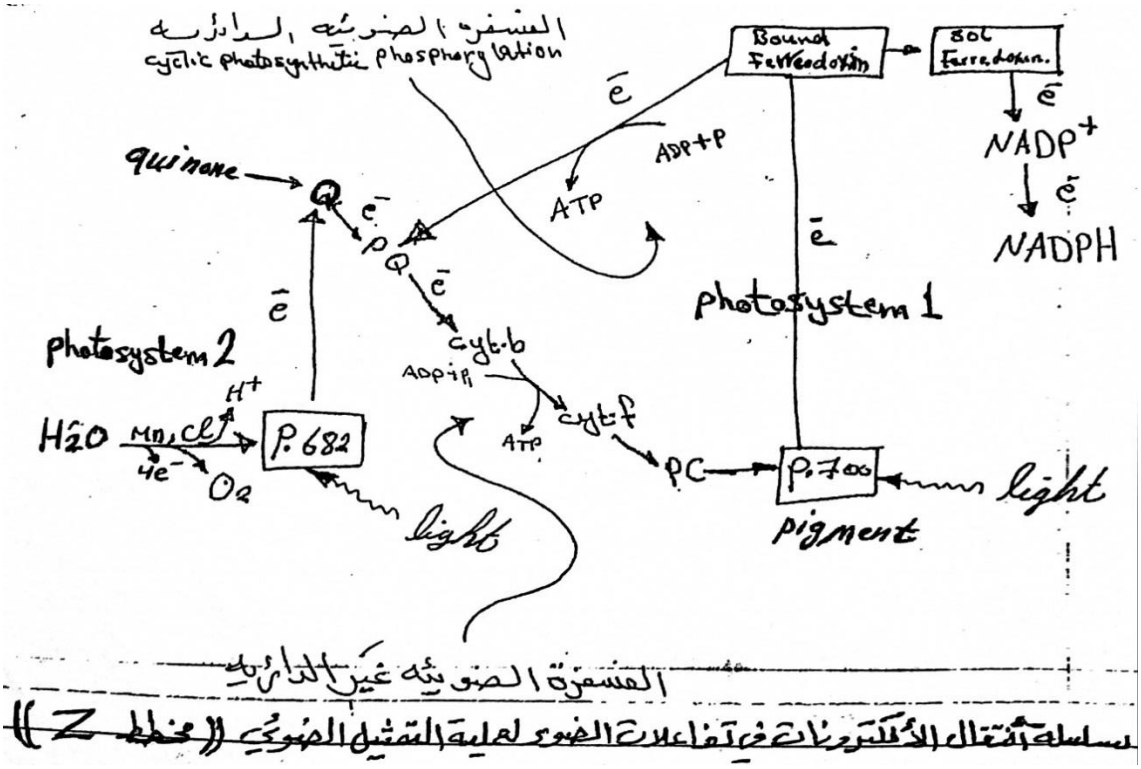
أ- الفسفرة الضوئية الدائرية Cyclic Photosynthetic Phosphorylation

ان تكوين الـ ATP في هذه العملية لا يتعلق بوجود اي تغير في مستلم الالكترونات او مسلمها ، وان الالكترونات المنبعثة من الكلوروفيل قد ترجع اليه وخلاصة التفاعل كالاتي :-

$$\mathbf{nADP + nH_3PO_4 \xrightarrow[\text{الكلوروبلاست}]{\text{الضوء}} n\,ATP + nH_2O}$$

ب - الفسفرة الضوئية اللا دائرية Non Cyclic Photosynthtic Phosphorylation

ان عملية تكوين الـ ATP مرتبطة بنقل الالكترونات من الماء الى المستلم النهائي للإلكترونات وهو الـ $NADP^+$ خلال عدة مركبات او حوامل لنقل الالكترونات ، ويتطلب ذلك اشتراك كلا النظامين وهما Photosystem 1 و Photosystem 2 .



ان الرموز التالية الموجودة في عملية الفسفرة الضوئية الدائرية واللادائرية **تعني الاتي :**

Plastoquinone : PQ

هو مركب عضوي يعاني تفاعلات الاكسدة و الاختزال في عملية التمثيل الضوئي بسبب نقله للالكترونات.

Cyt.b : سايتوكروم b و Cyt.F : سايتوكروم F

FD : الفـيرودكـــسن Ferredoxin

هو نوع من البروتينات الذائبة الموجودة في الكلوروبلاست والذي يختزل بشكل خاص الـ NADP مع تحرير الاوكسجين ، ويحتوي على ذرتين من الحديد ، أحداهما تعاني الاختزال والاكسدة عند انتقال الالكترونات من الماء .

PC : بلاستوسيانين Plastocyanin

وهو مركب بروتيني ذو لون ازرق يحتوي على ذرتين من النحاس ويقوم بنقل الالكترونات من النظام الضوئي الثاني الى النظام الضوئي الاول ،ويوجد فقط في البلاستيدات الخضراء بنسبة 1جزيئه لكل 600 جزيئة كلوروفيل .

هناك منطقة واحده يتم فيها انتاج الطاقة في الفسفرة الضوئية غير الدائرية تقع بين Cytochrom b و Cytochrom F .

سلسلة انتقال الالكترونات :-

عند سقوط اشعة الشمس على الورقة تحدث اثاره للكلوروفيل وتنطلق الالكترونات ويمر الالكترون المنطلق بسلسلة من الحوامل ، وخلال مروره في الحوامل يفقد طاقتة، أذ يؤدي تفاعل ADP مع مجموعة الفوسفات Pi الى تكوين الـ ATP ،ويؤدي انشطار جزيئة الماء بواسطة الضوء الى تكوين الـ H الذي يتحد مع NADP لتكوين NADPH الذي يعتبر من أقوى المختزلات في النظام البايلوجي .

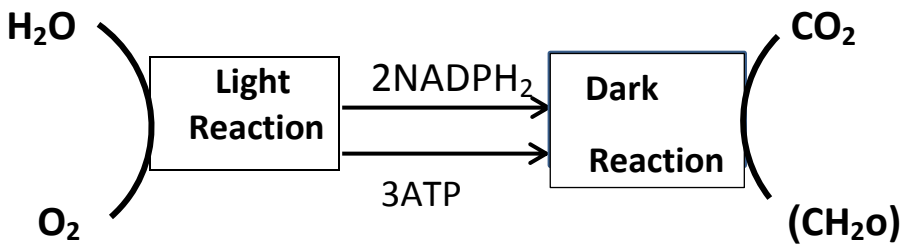
<u>وظائف الفيرودكسن:-</u>

أ- تكوين القوة الأختزالية $NADPH + H^+$ في التمثيل الضوئي .
ب- يشترك الفيرودكسن في عملية اختزال النترات nitrate reductase أي تحويل النترات الى امونيا حيث لا تستطيع بعض النباتات من استعمال النترات كمصدر للنتروجين أذا ما تركت في الظلام .

جـ - يقوم الفيرودكسن بدور مهم في عملية تثبيت النتروجين .

<u>تفاعلات الظلام : Dark reaction</u>

وهي تفاعلات أنزيمية يتركز حدوثها في الستروما وهي المنطقة الاقل تركيزاً في الكلوروفيل وتتوافر فيها الانزيمات اللازمة لهذه التفاعلات، أذ يستلزم استخدام نواتج تفاعلات الضوء في اختزال جزيئات CO_2 الى كاربوهيدرات .



الخطوة الاولى: تشتمل على اكسدة الماء و اختزال $NADP^+$ وفسفرة ADP .
الخطوة الثانية: تشمل خطوات اختزال CO_2 وكذلك سلسلة التحولات التي تحدث في تفاعلات الظلام .