

البناء الضوئي :- photosynthesis

هناك اصطلاحين هما :-

Autotrophs :- هي عبارة عن الكائنات الحية ذاتية التغذية او هي الكائنات التي تحصل على الكربون والطاقة بدون الحاجة الى أكل كائنات حية اخرى نصف الكائنات الحية ذاتية التغذية (وليس جميعها) تحصل على طاقتها من الفوتونات اي الضوء ولذلك هذه الكائنات تسمى photoautotrophs كائنات حية ذاتية التغذية الضوئية وأشهرها هي النباتات الارضية الخضراء.

Hetero trophs :- وهي الكائنات الحية الرمية او غير ذاتية التغذية و التي تعنى حرفياً بالكائنات الحية التي تحصل على الكربون الضروري وكذلك طاقتها عن طريق اكل او التهام كائنات حية اخرى (ومن ضمنها الانسان).

اين تحدث عملية البناء الضوئي:-

عملية البناء الضوئي تحدث في عضيات خاصة تسمى الكلوروبلاست chloroplast البلاستيدات الخضراء وعادة الخلية النباتية النموذجية مثل خلية موجودة في الطبقة العمادية للورقة قد تحتوي على اكثر من 50 بلاستيدة خضراء البلاستيدة الخضراء تتالف من ثلاثة انواع من الاغشية، وكما موضح هي:-

1- غشاء خارجي ناعم يسمى **outer membrane** يكون منفذ بحرية تامه للجزيئات

2- غشاء داخلي ناعم يسمى **inner membrane** ويحتوي على العديد من النواقل او الحوامل (النقل الايونات) وهي عبارة عن بروتينات الغشاء الاساسية التي تعمل على تنظيم دخول وخروج المركبات من البلاستيدة الخضراء وتشمل:-

أ- الجزيئات الصغيرة مثل السكريات، ب- البروتينات المصنعة في سيتوبلازم الخلية الا انها تستخدم داخل البلاستيدة الخضراء.

3- اغشيه الثيلاكويد **Thylakoid membrane** اغشية الثيلاكويد عادة تحيط بتجويف وهي عبارة عن جهاز من اكياس وتكون مرتبة او مصفوفة باعداد كبيرة الواحد فوق الاخر كل صف من هذه الصفوف يطلق عليه الحبوب او البذيرات (grana)(granum).

وهناك اربعة مجاميع او معقدات بروتينية منغمسة او مندسة في اغشية الثيلاكويد وهذه المعقدات البروتينية هي:

1-photo system I

النظام الضوئي الاول

وهو يشمل جزيئات الكلوروفيل الكاروتينويدات

chlorophyll and carotenid Molecules

2-photo system II

النظام الضوء الثاني

وهو يحتوي على جزيئات الكلوروفيل والكاروتينويدات ايضاً.

3-sytochromes band f

4-ATPsynthase

انزيم تخليق ATP

هذه المعقدات الاربعة تقوم بما يطلق عليه تفاعلات الضوء لعملية البناء الضوئي Light reaction of photo synthesis ان اغشية الثيلاكويد تكون محاطه بارضية سائلة يطلق عليها الستروما (Stroma) و تحتوي على:

1-جميع الانزيمات على سبيل المثال انزيم الراسكو Rubscio الذي هو ضروري للقيام بتفاعلات الظلام للبناء الضوئي اي تحويل CO₂ الى جزيئات عضوية مثل الكلوكوز.

2-عدد من جزيئات DNA المتماثلة (المتشابهه) كل منها يحتوي على هيئة جينية كاملة للبلاستيد، وهذه الجينات تقوم بالشفر لبعض الجزيئات التي تحتاجها البلاستيد الخضراء للقيام بوظيفتها اما بالنسبه للجزيئات الاخرى التي تحتاجها البلاستيد فهذه يتم الشفر لها بواسطة الجينات الموجودة في نواة الخلية و تحدث لها عملية ترجمة في السايئوبلازم ثم تنقل هذه الجزيئات الى البلاستيد الخضراء.

عملية البناء الضوئي

هي عملية الامتصاص الطاقة الضوئية و استخدامها لتحويل ثنائي اوكسيد الكربون والماء الى سكريات اي خزن تلك الطاقة (طاقة الضوء) في الاواصر الكيميائية للسكريات المعادلة العامة للبناء الضوئي هي



Keq = 10-500

ثابت التوازن

هذا التفاعل لا يمكن ان يحدث بصورة مباشرة كما هو مكتوب. ان عملية البناء الضوئي هي عبارة عن تفاعل اكسدة واختزال تسير بواسطة الضوء ويسمى اكسدة واختزال redox reaction وبصورة عامة تتضمن الانتقال المستمر للالكترونات بين الذرات. فالاختزال reaction –gain of electrons هو اكتساب الالكترون او الالكترونات والاكسدة oxidation =loss of electrons هي عبارة عن فقد الكترون او الالكترونات.



يختزل بواسطة (e4) و(4بروتون)



معلوماتنا عن ميكانيكية البناء الضوئي جاءت لأول مرة من التجارب التي قام باجرائها الباحث (van neil) في 1920's في العشرينيات استخدم هذا الباحث البكتيريا البنائية الضوئية غير المحرره او المطلقة للاوكسجين مثل بكتيريا الكبريت المركزية.

purple bacteria (مركزية) هذه البكتيريا تستطيع النمو مستخدمة مركبات الكبريت المختزلة التفاعل لهذه البكتيريا هو (تفاعل التركيب الضوئي)



نلاحظ هذه المعادلة عندما تقارن مع تلك التي تحدث في النباتات الخضراء بعدم انطلاق الاوكسجين مما يعني ان الماء هو مصدر الاكسجين المطلق في عملية البناء الضوئي كما انه ايضاً مصدر الالكترونات التي تستخدم في اختزال CO_2 وبعبارة اخرى ان الماء يتأكسد و المعادلة العامة للبناء الضوئي التي تحت الاشارة اليها تحدث في عدة خطوات يؤثر عليها العديد من الانزيمات وهذه العملية يمكن تقسيمها الى ثلاثة اجزاء التي هي:

1-light harvesting او حصاد الضوء.

2-water oxidation and reduction of NADP^+ to NADPH coupled to ATP synthesis

3-use of ATP and NADPH to reduce CO_2 to sugars CH_2O

التفاعلين الاول والثاني تسمى تفاعلات الضوء او التفاعلات المختزلة على الضوء

اما التفاعل الثالث يسمى تفاعلات الظلام وهي عبارة عن تفاعلات بايو كيميائية تعتمد مسالك يتم فيها اختزال CO_2 و سنشير لها لاحقاً.

تفاعلات الضوء:- (الطيف المرئي هو المستخدم في التفاعل)

light reactions of photosynthesis

تفاعلات الضوء تحدث في اغشية الثايلاكويد الموجودة في البلاستيدة الخضراء وهي تفاعلات كيمو ضوئية photo chemical reaction سريعة جداً. (اجزاء من الثانية) ($10^{-12}s$) (بيكوسكند) نظراً لاحتوائها على الصبغات النباتية التي تقوم بامتصاص الطاقة الضوئية وتحويلها الى طاقة ميكانيكية و كذلك احتوائها على جهاز النقل الالكتروني ومعقد تخليق ATP الذي يسمى (ATP synthase) تفاعلات الضوء او المعتمدة على الضوء وظيفتها هي تكوين ATP وكذلك المرافق الانزيمي المختزل وهي ضرورية للتفاعلات CO_2 اللاحقة و تفاعلات الضوء تتضمن ما يلي:-

1- اقتناص او اصطياد الفوتون الضوئي (الجسيم الضوئي) photon بواسطة النظام الضوئي الموجود في الكلوروفيل

مجموعة الصبغات تجمع الضوء photo system وهو عبارة عن مجموعة من الصبغات

2- تحول طاقة الفوتون الضوئي الى طاقة مخزونة بواسطة الالكترونات (طاقة كيميائية)

3- اقتناص او اصطياد هذه الطاقة الكيميائية بواسطة الكلوروفيل مركز التفاعل الموجود في النظام الضوئي

4- اكسدة كلوروفيل مركز التفاعل بواسطة مستقبل الالكترون اولي

5- التدفق اللا دوري للالكترونات.

طيف الامتصاص Absorption spectrum

6- اكسدة الماء

7- النقل الالكتروني الدوري

هذه العمليات السبعة السابقة تؤدي الى انتاج الاوكسجين و تكوين (ATP) والمرافق الانزيمي المختزل.

ان جهاز النقل الالكتروني الذي يوجد في اغشية الثايلوكويد يتكون من نظامين ضوئيين هما

1- **photo system I (psI)** النظام الضوئي الأول

2- **photo system II (PslI)** النظام الضوئي الثاني

3- **cytochrome complex** **معقد الساييتوكروم** وكذلك

هذه المعقدات الثلاثة مربوطة بواسطة البلاستوسيانين.

plastocyanin(PC)

plastquinone(PQ)

وهذين المعقدين هو عبارة عن ناقلات الكترونية متحركة وتسمى

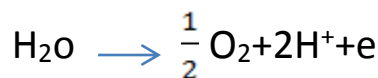
mobile electron carriers

وهي تتحرك بحرية ضمن نظام غشاء الثايلوكويد ان كل نظام ضوء (c61) يتكون من مركز تفاعل الذي يسمى (Reaction centre) وكذلك معقد الحصاد الضوئي (مجموعة من الصبغات تسمى بالهوائي وظيفتها سحب الطاقة الضوئية) يوجد هناك مركز تفاعل في النظام الضوئي الاول يسمى الصبغة (P700) وعادة هذا الرقم يشير الى ان ذروة امتصاص تكون هذا الطول الموجي كما يوجد ايضا مركز تفاعل في النظام الضوئي (c) يسمى (P680) (الطول الموجي ل نانوميتر)

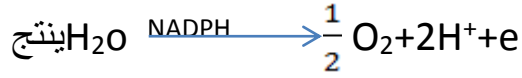
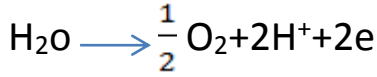
nanometer =nm 10⁻⁹M

الطاقة الضوئية تم جمعها بواسطة اطهواني (مجموعة صبغات او معقد الحصاد الضوئي ثم تمرير الى مركز التفاعل) (اما صبغة 680 او 700) وفي مركز التفاعل فانه يتدفق الالكترونات يبدأ بواسطة انفصال الشحنة (photo oxidation) وكنتيجة، لذلك فان الالكترونات التي يتم الحصول عليها في اكسده الماء تمر خلال النظام الضوئي الثاني ثم معقد الساييتوكروم ثم النظام الضوئي الاول، وبعد ذلك الى المرافق الانزيمي (NADP⁺) للبروتونات التي يتم ضخها خلال او عبر الغشاء بين النظامين الاول والثاني تؤدي الى حدوث فسفرة الضوئية

NADPH+H⁺



هو بالاصل (2H⁺)+(2e) احد الالكترونات تذهب الى NADP⁺ لتزيل الاشارة الموجبة



والكترون الخر يتحد مع البروتون ليعطي H يضاف الى NADP ويصبح NADPH او ينتج (H⁺) ويكون الناتج (NADPH+H)

يمكن تلخيص عملية النقل الالكتروني بالخطوات التالية (اللا دوري) والذي هو يبدأ بالماء وينتهي بالمرافق الانزيمي ويسمى non cyclic electron flow

1- اقتناص الفوتون بواسطة النظام الضوئي الثاني

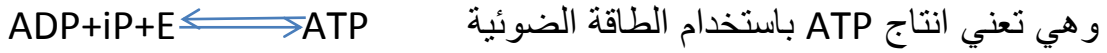
2- اكسدة النظام الضوئي الثاني

3- انتقال الالكترون من النظام الضوئي الثاني المستقبل للالكترونات الاولى

4- اكسدة الماء

5- انتقال الالكترونات

6- الفسفرة الضوئية (انتاج ADP)



وهي تعني انتاج ATP باستخدام الطاقة الضوئية

7- اختزال النظام الضوئي الاول

8- اقتناص الجسيم الضوئي بواسطة النظام الضوئي الاول

9- اكسدة النظام الضوئي الاول

10- انتقال الالكترون الى المستقبل الالكتروني (Fd)

11- اختزال المرافق الانزيمي

لاحظ ان كل النظامين الاول والثاني يمتصان الفوتونات الضوئية في اطوال موجية مختلفة قليلاً حيث يمتص النظام الضوئي الاول على طول موجي (700nm)، في حين يمتص النظام الضوئي الثاني على طول موجي ثاني (680nm).

اما بالنسبة للنقل الالكتروني الدوري او الدائري فانه يتضمن مايلي:-

1- يشمل النظام الضوئي الاول فقط.

2- الالكترونات لا تصل الى المرافق الانزيمي وانما الى مستقبل وسطي

3- نفس الالكترونات تقوم النظام الضوئي الاول.

الفسفرة الضوئية الدورية تنتج ATP فقط حيث لا يتأكسد الماء و لا يتم اختزال المرافق الانزيمي وهذا الشيء يحدث عند تعريض النبات مثلا الى اطوال موجيه اعلى من (nm680) وبذلك لا يستطيع مركز الامتصاص امتصاصه وكذلك يحدث عند تعريض النباتات لبعض المركبات الكيميائيه مثل مبيدات الادغال مثل (Monuron Diaron) وهذا تثبط عملية الاكسدة الضوئية للماء حركة الالكترونات اللادورية مما يؤدي الى موت النباتات

تفاعلات الظلام (غير المعتمده على الضوء):-

هذه التفاعلات تحدث في ستروما البلاستيدات الخضراء حيث تتوفر الانزيمات اللازمه لذلك والحقيقة هذه التفاعلات قامه بالكشف عن اسرارها الباحث الامريكي (calvin) كلفن و حصل على جائزة نوبل للكيمياء سنة 1961 وسميت تفاعلات اختزال CO_2 باسم دورة كالفن (calvin cycle) نسبة الى مكتشفها تبدأ هذه الدورة بدخول CO_2 عن طريق الثغور ثم يصل الى خلايا النسيج الوسطي في الورقة المحتوية على البلاستيدات الخضراء حيث يتحد مع سكر خماسي يوجد بكثره في الخلية يسمى رايبلوز1، 5 بيوفوسفات.

$CO_2 + H_2O + Ribulose-1.5- bisphosphate \rightarrow RUBP + Rubitce + carboxylase$

هذا التفاعل ينتج لدينا مركب سداسي الكربون قلق سرعان ما ينقسم الى جزيئين من مركب ثلاثي الكربون هو حامض الفسفوكلسريك اختصاره (PGA) 2 phosphogluceric acid

هذه الخطوة من دورة كالفن عادة يطلق عليه اصطلاح

1-مرحلة التثبيت Fixation stage

بمعنى ان تحويل ثنائي اوكسيد الكربون الذي هو غاز الى جزء من مركب عضوي.

2-Reduction (مرحلة الاختزال)

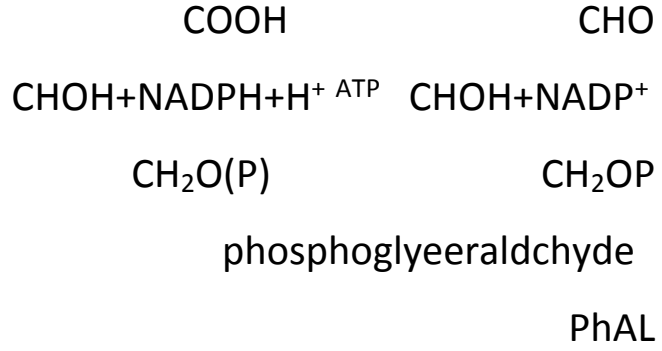
2- الخطوة الثانية :-

فسفوكليسريك اسيد $COOH$

$CHOH$

$CH_2O(P)$

في هذه الخطوة يتم اختزال حامض الفوسفوكليسريك بواسطة الهيدروجين المتحد مع المرافق الانزيمي



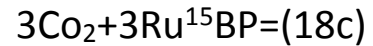
هذه العملية تتطلب طاقة و ATP التي تم الحصول عليها من تفاعلات الضوء هي التي تجهزنا بالطاقة اللازمة لهذا الاختزال ناتج هذا التفاعل هو عبارة عن مركب سكري ثلاث الكربون هو فوسفوكليسيرلك الدهايد وهو يعتبر حجر الاساس للبناء الكثير من مكونات الخلية ومن الناحية النظرية فان عملية البناء الضوئي تكون قد انتهت بتكون مركب PGAL حيث ان له الكثير من صفات السكريات الا ان مركب PGAL مركب نشط سريع التفاعل لذلك لا يتراكم مركب PGAL في الخلية النباتية بل ان الجزء الاكبر منه يتحول الى السكر الخماسي ليعيد الدورة من جديد و جزء بسيط يتحول الى سكريات مفسفرة.

3-Regeneration stage

الخطوة الثالثة

(R.of RuBP)

فهي إعادة تكوين السكر الخماسي وفي هذه الخطوة يتم تكوين السكر الخماسي RuBP ووجد ان ثلاثة جزيئات من ثنائي الكربون تتحد مع ثلاثة جزيئات من السكر الخماسي وجد ان الست جزيئات

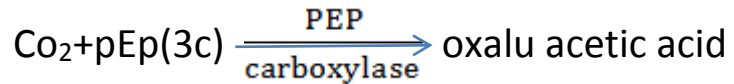


الناتجة من هذا التفاعل جزئين واحد منها تتحول الى سكريات مفسفرة اما الجزيئات الخمسة الاولى فانها تتكاثف مكونة ثلاثة جزيئات من السكر الخماسي، وهذا النوع او المسلك من تثبيت ثنائي اكسيد الكربون يطلق عليه ايضاً اسم C₃-path way (C₃plants)

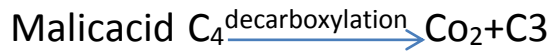
المسلك الثلاثي الكربون والنباتات التي تمارس عملية البناء الضوئي بهذا المسلك يطلق عليها اصطلاح النباتات ثلاثية الكربون وعادة هذه النباتات تستوطن المناطق الباردة والمعتدلة تتوفر الرطوبة بدرجة كبيرة.

اوضحت التجارب بان هناك C₄-path way of carban reduction المسلك الرباعي في اختزال ثنائي اوكسيد الكربون هذا المسلك من اختزال ثنائي اوكسيد

الكاربون يحدث في النباتات التي تستوطن البيئات ذات الدرجات الحرارية العالية نهاراً و ضوء الشمس الشديد (الجافة) وهو يعتبر محور في النواحي البيوكيميائية والتشريحية ففي هذه النباتات التي تسمى نباتات رباعية الكربون C₄-plants والتي معظمها من ذوات الفلقة الواحدة يدخل CO₂ عن طريق الثغور ثم ينتشر الى داخل خلايا النسيج الوسطي وهذه الخلايا عادة لا تحتوي على انزيم الرابيسكو الذي يوجد في اوراق نباتات ذوات الفلقتين (الثلاثية) بدلاً من ذلك فان CO₂ سوف يتحد مع مركب ثلاثي الكربون يتكون لدينا حامض رباعي الكربون يسمى اوكرالواستيك اسيد



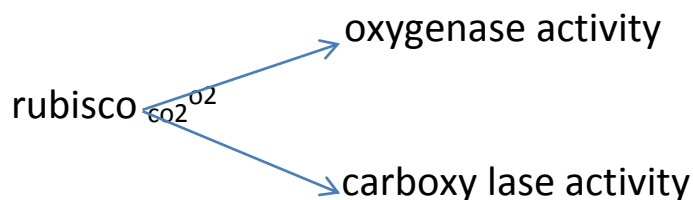
حامض رباعي الكربون OAA وهذه التفاعلات تحدث في الجزء العلوي في الورقة التي لا تحتوي على انزيم الرابيسكو هذا الحامض (رباعي الكربون) يتحول بالاختزال الى حامض المالك Malic acid (وهو حامض رباعي) بعد ذلك يتحرك حامض المالك من الجزء العلوي للورقة عن طريق الروابط البلازمية الى ان يصل الى منطقة خلايا غمر الحزمة وعندما يصل حامض المالك الى منطقة غمر الحزمة تحدث له عملية ازالة او سحب CO₂.



CO₂ الناتج من هذه العملية سوف يتحد مع السكر الخماسي الذي هو الرايبيلوز ثنائي الفوسفات ويدخل دورة كالفن كما تم وصفه للنباتات الثلاثية اما المركب الثلاثي (C₃) فيرجع ثاني الى خلايا النسيج الوسطي لاعادة الدورة من جديد من امثلة النباتات التي تمارس عملية البناء الضوئي هي البذرة البيضاء والصفراء وكذلك قصب السكر.

س/ ما هو السبب في وجود هذا المسلك (سلك رباعي الكربون):- توجد هناك عدة اسباب لوجود النظام الرباعي الكربون في هذه النباتات ومنها:

التقليل او الحد من ظاهرة التنفس الضوئي photo respiration وهو نوع خاص من التنفس يحدث في الضوء فقط ويعتبر احد عيوب المسلك الثلاثي الكربون حيث ان النباتات الثلاثية توجد فيها هذه الظاهرة و بسبب حدوث هذه الظاهرة هو ان انزيم الرابيسكو يستخدم كل من ثنائي اكسيد الكربون والاكسجين كمادة تفاعل



$$\frac{CO_2}{O_2} = \frac{4}{1}$$
 النسبة للأستخدام

ففي حالة اتحاد الرابسكو مع CO_2 يحدث لنا بناء ضوئي اما في حالة استخدام للاكسجين فيحدث تنفس ضوئي وهو خسارة للنبات حيث لا يؤدي الى انتاج ATP والتنفس يحدث جزئياً في البلاستيدات الخضراء وعضيات هي الاجسام الدقيقة وبالتحديد 1-chloroplast 2-perexisomes 3-Mitochondria ولهذا فان النباتات الرباعية قد طورت من طريقة صنع غذائها لكي يتم تجنب هذه الظاهرة بان تعمل على زيادة تركيز CO_2 في منطقة غمر الحزمة بحيث لا تعطي مجال لانزيم الرابسكو بان يتحد مع الاوكسجين الذي لو حدث لسبب خسارة كثيرة في مثل هذه النباتات نظرا لانها تعيش في مناطق حارة مما يزيد من سرعة التنفس اكثر بكثير كما هو الحال في النباتات الثلاثية التي تستوطن المناطق الباردة اما السبب الاخر فهو ان هذه النباتات سوف تفتح ثغورها لمدة قليلة ما يمكنها من الاحتفاظ بكمية كافية من الماء تحت ظروف الحر الشديدة والجفاف.

photophosphorylation

الفسفرة الضوئية

مسلك CAM CAMplants

CAM : crossulacean acid metabolism

هذه النباتات هي ايضاً النباتات رباعية الكربون ولكن بدلاً من عزل المسلك الثلاثي والرباعي في اجزاء مختلفة من الورق يوجد هنالك فصلاً وعزل في وقت حدوث تفاعلات البناء الضوئي ففي الليل او الظلام نباتات الكام تأخذ CO_2 خلال ثغورها المفتوحة هذا ثنائي اوكسيد الكربون يرتبط مع PEP ويتكون اوكزالوستيك اسيد

هذا الحامض (اوكزالوستيك اسيد) يتحول الى حامض الماليك الذي هو حامض رباعي فهذا الحامض يتراكم في فجوات هذه النباتات اثناء الليل وفي الصباح فأن الثغور سوف تغلق بهدف المحافظة على الرطوبة وكذلك تقليل كمية الاوكسجين الداخلة بعد ذلك فان حامض الماليك المتراكم في الفجوات سوف تحدث لها عملية ازالة CO_2 (بعد ان يغادر الفجوة) CO_2 الناتج سوف يدخل في دورة كالفن كما تم وصفه سابقاً، وهذه التحورات تحدث مثل هذه النباتات تستوطن المناطق التي تمتاز بما يلي :-

1- ارتفاع درجات الحرارة نهاراً.

2- وجود اضاءة عالية

3- كمية رطوبة قليلة جداً (مثل المناطق الصحراوية)

و من امثلة النباتات التي تمارس عملية البناء الضوئي بهذا المسلك هي الصبيرييات،
ومن امثلة النباتات البستانية هو الاناناس

جدول مقارنة في خصائص عملية البناء الضوئي للنباتات الثلاثية الكربون
والرباعية و العصارية (نباتات الكام)(CAM)

الصفة	C ₃	C ₄	CAM
1- تشريح الورقة	لا يوجد غمر الحزمة بصورة واضحة او مستقلة	يكون غمر الحزمة واضح (انظر للرسم)	لا يحتوي عادة على خلايا عمادية و تمتاز الورقة باحتوائها على فجوات كبيرة
2- الانزيم المسؤول عن اضافة CO ₂ Carboxylating enzyme	الرابسكو Rubisco	PEP Carboxy_lase	PEP ase ←
نقطة التعويض ل CO ₂ : كمية CO ₂ الداخلة في البناء الضوئي تساوي كمية CO ₂ بها لتنفس			
3- احتياجات الطاقة النظرية Co ₂ ATP NADPH	2 3 1	2 5 1	2 6.5 1
4- نسبة النتح Transpiration rati (gH ₂ o/g dry wt.)	450 – 950	250 – 350	18 – 125
5- سرعة البناء الضوئي mgCo ₂ /dcm ⁻² .h ⁻¹ photosynthesis rati	15 -30 MG Co ₂ dm ⁻² h ⁻¹	40 – 80	10w
6-نسبة الكلوروفيل Ch1. a/b rati	2.8	3.9	2.5 – 3.0
7-احتياجات لعنصر الصوديوم	كلا لا تحتاج	نعم تحتاج احد العناصر الصغرى	كلا لا تحتاج
8-نقطة التعويض ل CO ₂ compensation poin	50 – 150 ppm	0 – 10 ppm	0 – 5 ppm
9- تثبيط عملية البناء	نعم / ظاهرة تنفس	كلا	كلا

الضوئي بالاكسجين	ضوئي	فقط في منطقة غمر الحزمة	فقط بعد منتصف النهار تحدث
10-وجود ظاهرة التنفس الضوئي	نعم	30 - 47°C	35°C
11-درجة الحرارة المثلى لعملية البناء الضوئي	15 - 25°C	عالية 87 - 50 مثال الذرة الصفراء	قليلة ومتغيرة
12-انتاج المادة الجافة	قليلة 30 - 26 مثال الحفظ		