



فسيولوجى نبات



المحاضرة التاسعة

التحولات الغذائية (الأيض) فى النبات

تابع البناء الضوئى

شاهد المحاضرة فيديو على الروابط التالية:

https://youtu.be/_q8UTYxHkfk

<https://youtu.be/14WYzwtUxps>

<https://youtu.be/FVABo4jxCAU>

إعداد

أ.د / أحمد لطفى ونس

أستاذ النبات وعميد الكلية

ثانياً: تفاعل الظلام (التفاعلات الكيموحيوية أو تثبيت وإختزال CO_2)

Dark reaction (Biochemical reactions or CO_2 fixation and reduction)

- ✓ تحدث هذه التفاعلات فى الستروما.
- ✓ لا يلزمها وجود الضوء ولكنها تعتمد على نواتج تفاعلات الضوء (ATP & NADPH_2) فى تثبيت وإختزال CO_2 .
- ✓ تفاعلات إنزيمية (كيموحيوية) بطيئة وتتأثر بدرجة الحرارة.

يتم تثبيت وإختزال CO_2 فى النباتات من خلال ثلاث مسارات أو ثلاثة طرق على أساس الإختلافات الفسيولوجية والتشريحية بينها، وتتمثل الإختلافات الرئيسية بين المسارات الثلاثة فى المستقبل الأول لثانى أكسيد الكربون، والنواتج الأول من تثبيت CO_2 .

الطريق الأول أو المسلك الأول:

تثبيت وإختزال CO_2 فى النباتات ثلاثية الكربون (C_3 plants) وتسمى دورة كالفن وبنسون (Calvin and Banson Cycle)، فى هذا المسلك يكون الناتج الأول بعد تثبيت CO_2 هو مركب ذو ثلاث ذرات كربون هو حمض-3- فوسفوجلسريك (3PGA) والمستقبل الأول لثانى أكسيد الكربون هو سكر الريبولوز

الطريق الثانى أو المسلك الثانى:

تثبيت وإختزال CO_2 فى النباتات رباعية الكربون (C4 plants) ويسمى مسلك أو دورة هاتش وسلاك Hatch and Slack Cycle or pathway، فى هذا المسلك يكون الناتج من تثبيت CO_2 هو مركب ذو أربع ذرات كربون وهو حمض الأوكسالوخليك (OAA) Oxaloacetic acid وأحماض رباعية أخرى هى حمض المالك والأسبارتيك، والمستقبل الأول لثنائى أكسيد الكربون هو فسفوإينول حمض البيروفيك (PEP) Phosphoenol pyruvic acid.

الطريق الثالث أو المسلك الثالث:

مسلك تثبيت CO_2 فى النباتات العصارية المتشحمة Crassulacian acid Metabolism (CAM) ويسمى الأيض الحمض التشحمة، وفى هذا المسار يكون الناتج الأول من تثبيت CO_2 هو مركب عضوى ذو أربع ذرات كربون وهو (OAA) مثل النباتات رباعية الكربون والمستقبل الأول لـ CO_2 هو (PEP) أيضا فهو نفس مسلك نباتات الـ C4، ولكن تختلف هذه النباتات عن النباتات رباعية الكربون فى ميقات عملية التثبيت، حيث يتم تثبيت وإختزال CO_2 فى الظلام لأن ثغور هذه النباتات (CAM plants) تفتح فى الليل وتغلق فى النهار وهى وسيلة للتأقلم مع ظروف البيئة الجافة وقلة الماء.

المسلك الأول: تثبيت وإختزال CO_2 فى النباتات ثلاثية الكربون (دورة كالفن وبنسون)

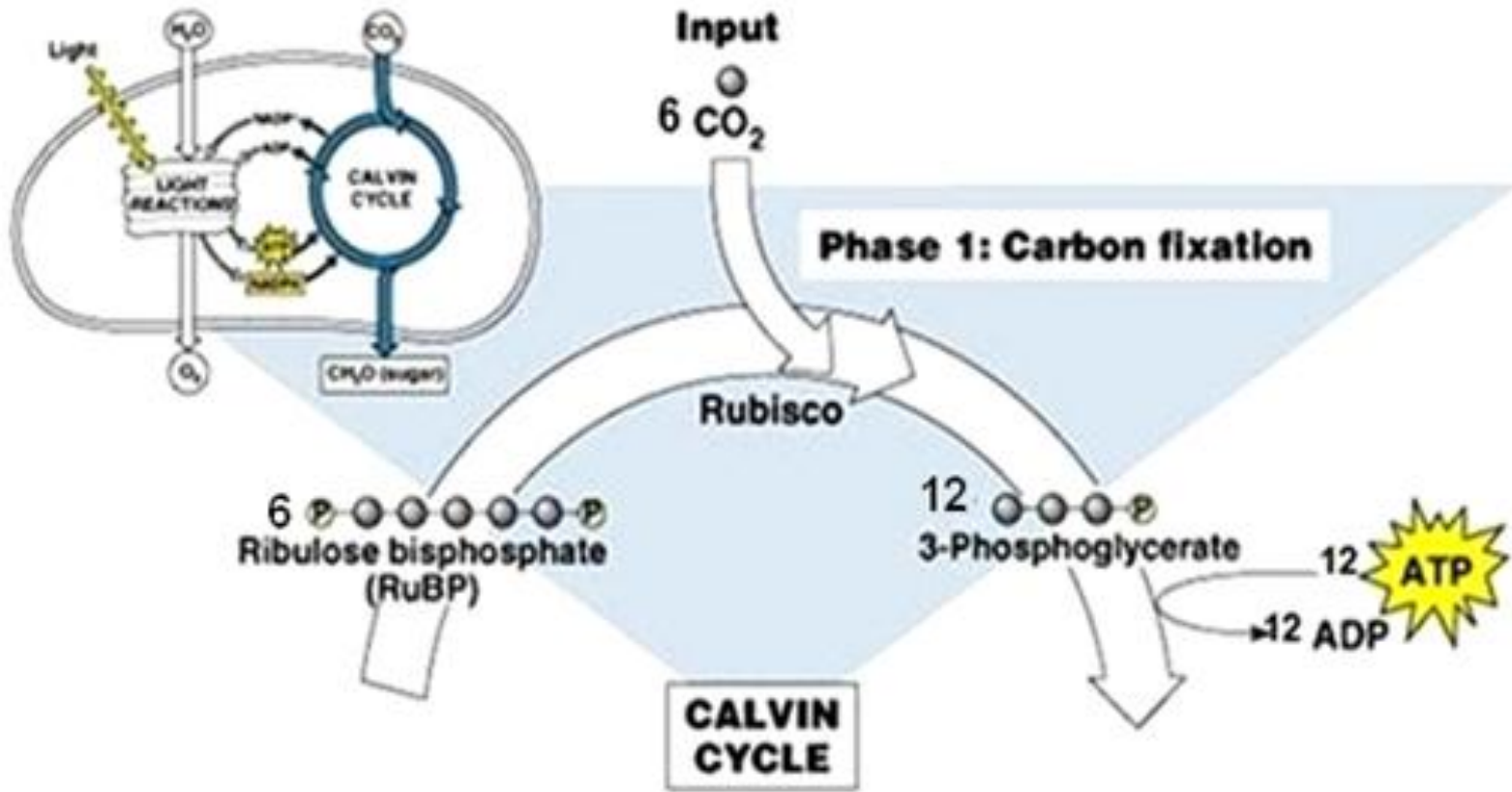
CO_2 Fixation and reduction of C3 plants (Calvin and Benson Cycle)

تتضمن دورة كالفن على تفاعلات كيميائية عديدة تحدث فى ستروما البلاستيدات الخضراء حيث توجد جميع الإنزيمات اللازمة لهذه التفاعلات، وتتخلص تفاعلات دورة كالفن فى ثلاث مراحل رئيسية هى:

❖ المرحلة الأولى: تثبيت CO_2 أو الكربسلة

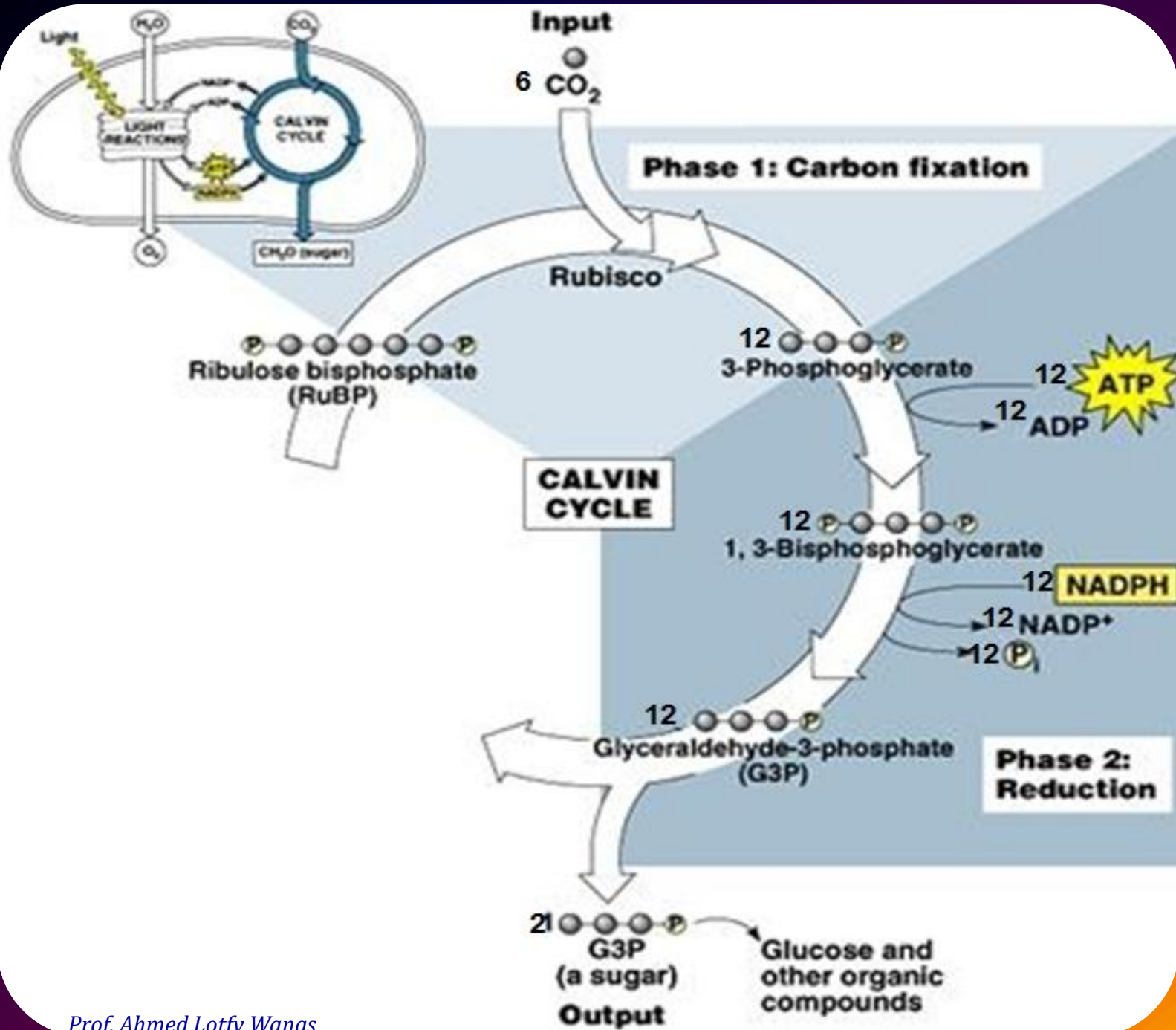
فى هذه المرحلة يتم اتحاد CO_2 الغاز مع مستقبلة وهو سكر ريبولوز ١،٥ ثنائى الفوسفات Ribulose 1,5 diphosphate (RuBP) فى وجود الماء وإنزيم RuBP carboxylase or rubisco ليعطى مركب ذو ست ذرات كربون غير ثابت وينشط سريعا إلى جزيئين من حمض ٣- فوسفوجلسريك 3-Phosphoglyceric acid (3PGA) وهو الناتج الأول من تثبيت CO_2 وهو مركب ثلاثى الكربون، ولكى يتم تثبيت ٦ جزيئات CO_2 فإنها تحتاج إلى ٦ جزيئات من RuBP لتكون ١٢ جزيء من حمض ٣- فوسفوجلسريك (3PGA)

Rubisco هى اختصار لاسم الانزيم وهو Ribulose 1,5 bisphosphate carboxylase oxygynase

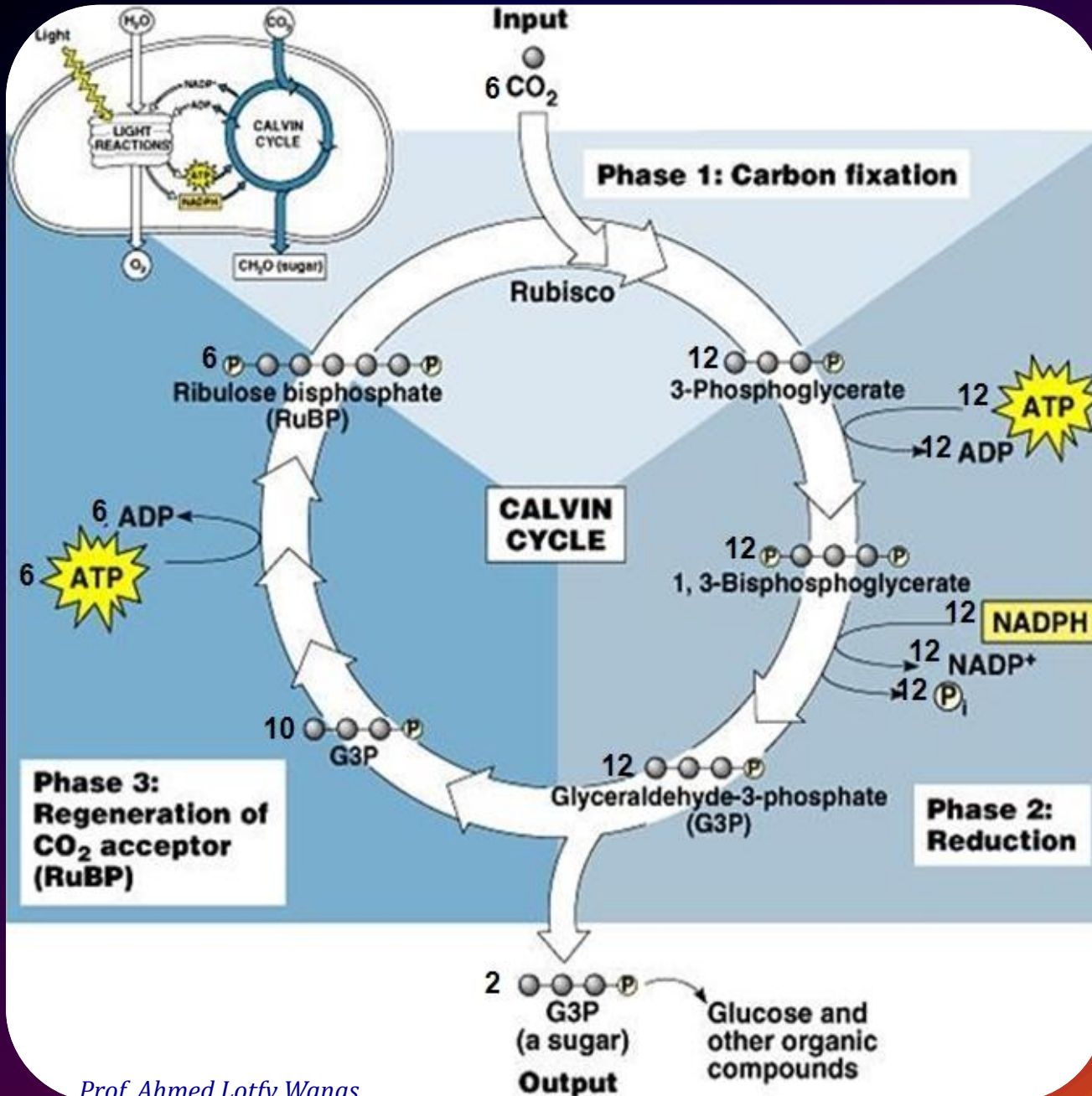


Reduction المرحلة الثانية: المرحلة الإختزالية

يستقبل كل جزيء من حمض ٣- فوسفوجليسيريك (3PGA) مجموعة فوسفات أخرى من ATP ليكون حمض ٣،١- فسفوجليسيريك الذي يختزل بواسطة NADPH_2 إلى جليسرالدهيد ٣ فوسفات (G3P) أي تختزل مجموعة الكربوكسيل (-COOH) إلى مجموعة ألدهيد (-CHO)، ومركب جليسرالدهيد ٣ فوسفات وهو سكر ثلاثي الكربون يدخل في بناء مركبات كربوهيدراتية عديدة.

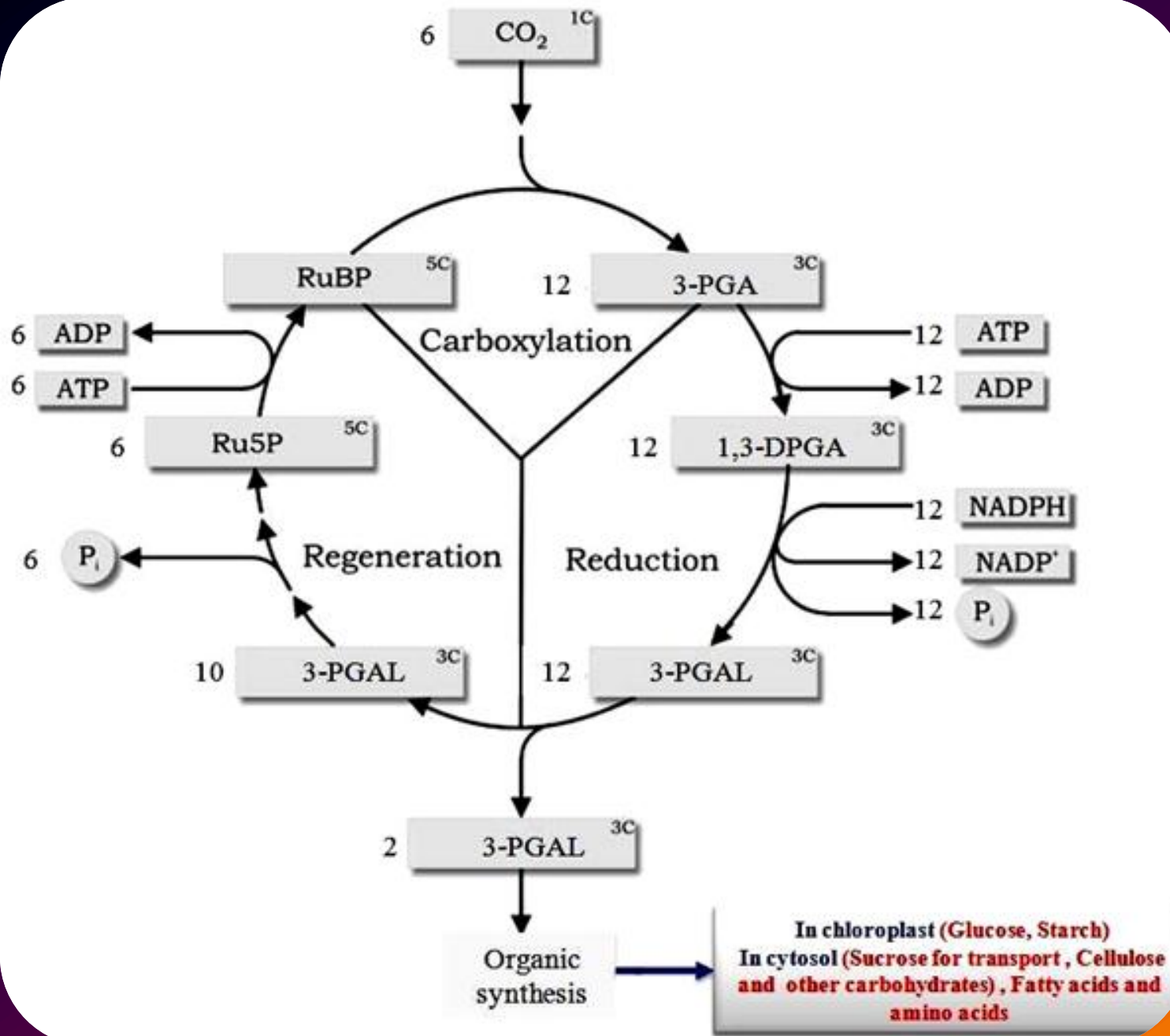


المرحلة الثالثة: إعادة توليد المستقبل الأول وخروج ناتج تثبيت CO_2 :

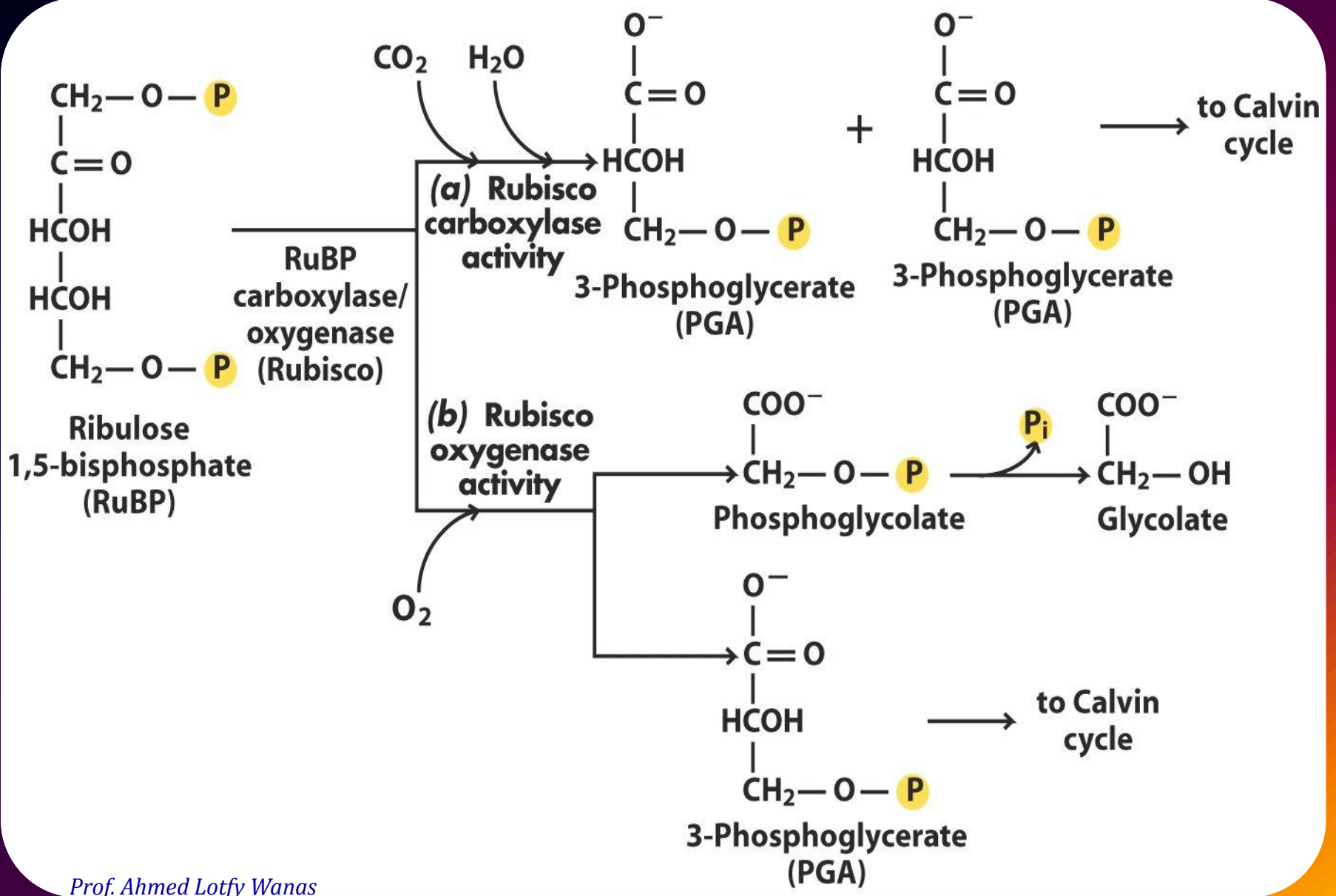


في هذه المرحلة يخرج ناتج تثبيت CO_2 على صورة جزئ سكر سداسي ويعاد توليد المستقبل الأول لثاني أكسيد الكربون وهو سكر الريبولوز ١،٥ ثنائي الفوسفات (RuBP) باستمرار.

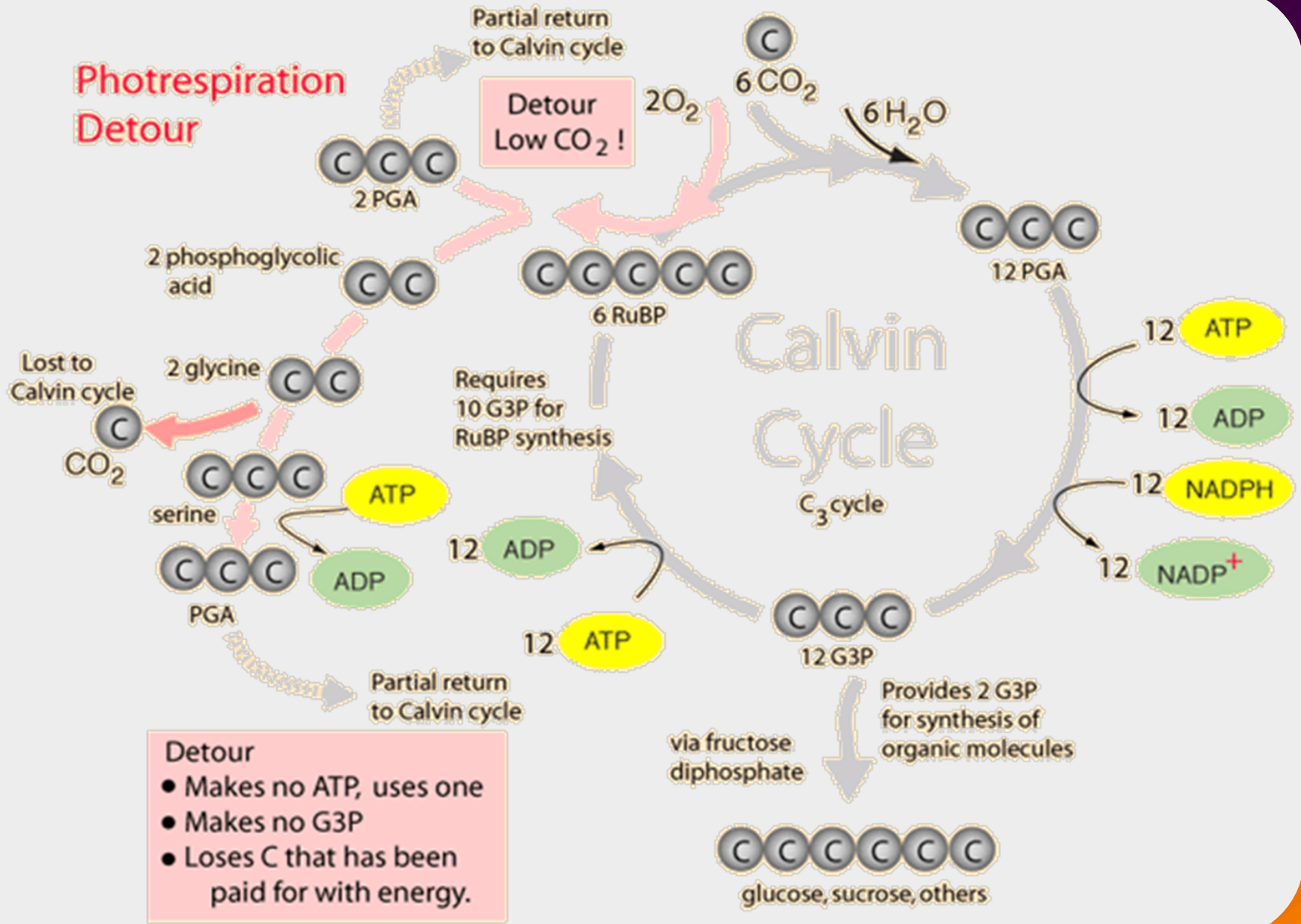
أضبط هنا



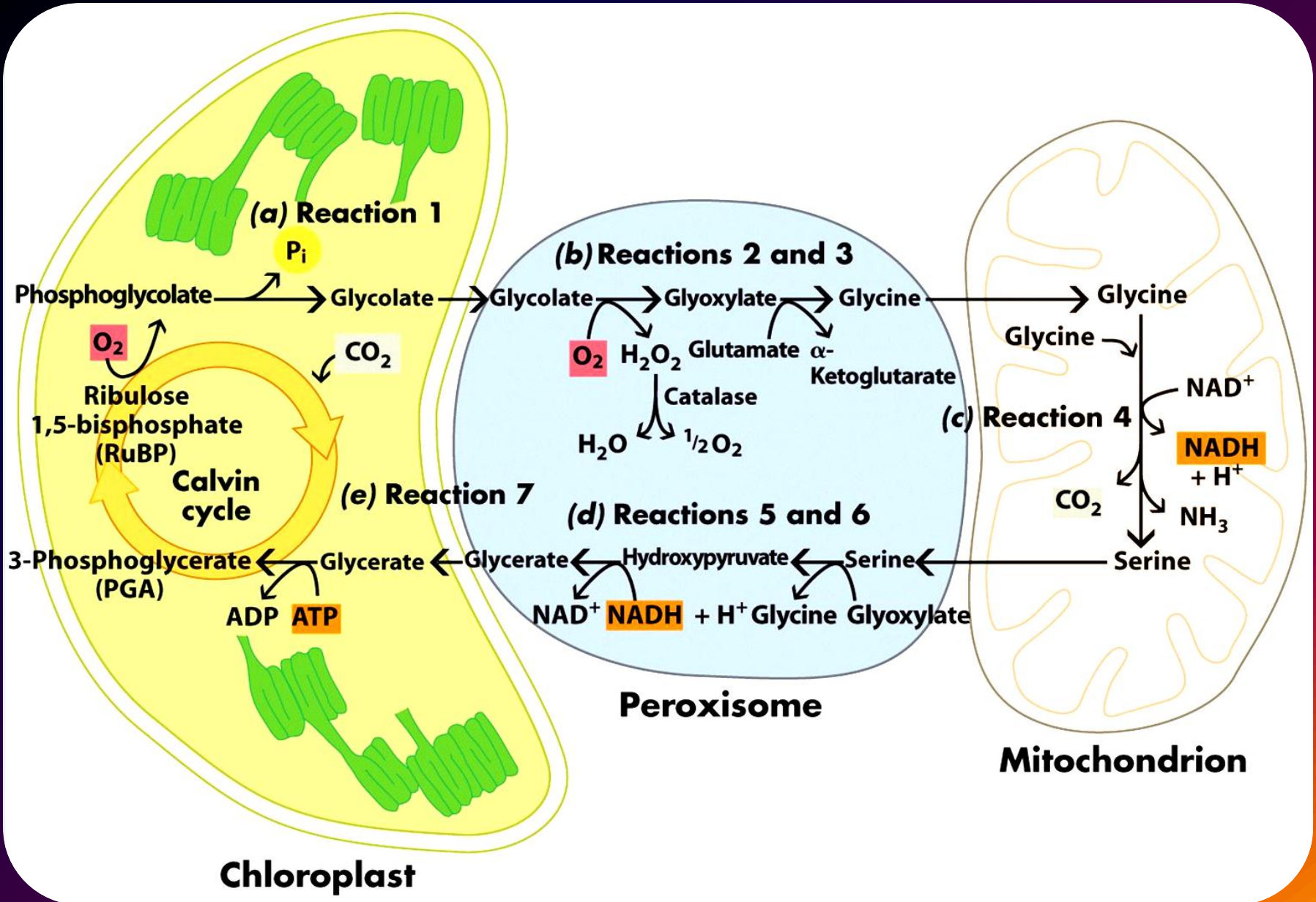
Ribulose 1,5 bisphosphate carboxylase (Rubisco) إنزيم



Photorespiration Detour



رسم تخطيطي يوضح كيفية حدوث عملية التنفس الضوئي جانباً إلى جانب مع عملية تثبيت واختزال CO₂ في النباتات ثلاثية الكربون تحت ظروف درجات الحرارة والإضاءة المعتدلة



رسم تخطيطي يوضح ميكانيكية تحويل الجليكولات السامة من خلال التعاون بين البلاستيدات الخضراء والبيروكسيسومات والميتوكوندريا

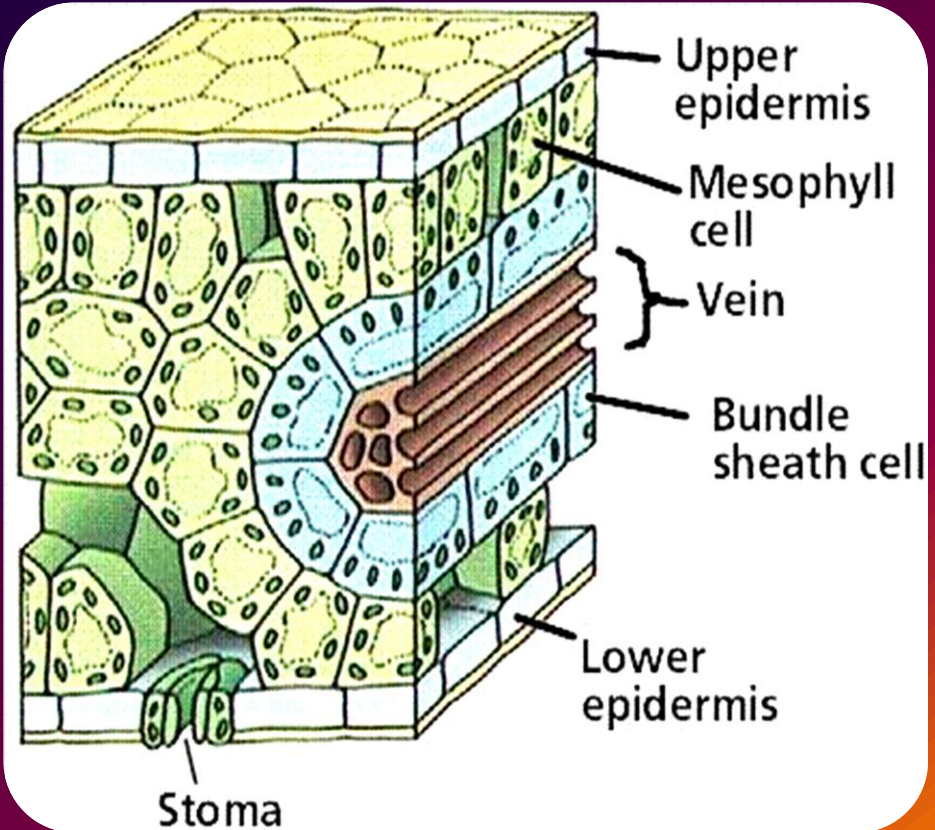
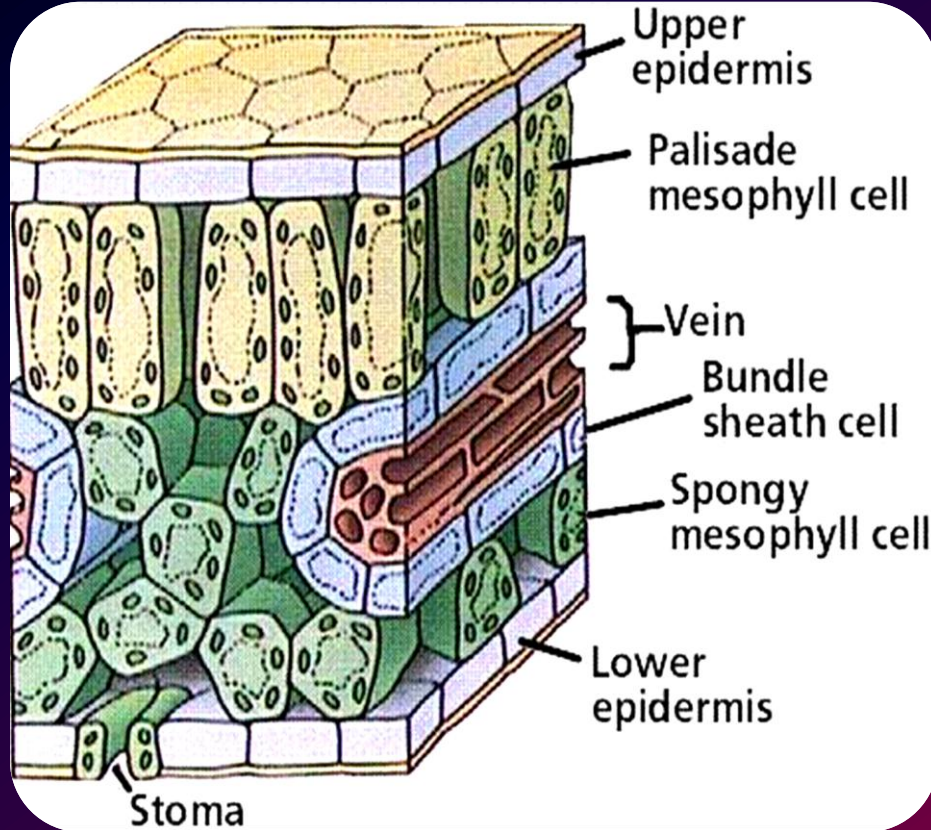
المسلك الثانى: تثبيت واخترال CO₂ فى النباتات رباعية الكربون C4 Plants

دورة هاتش وسلاك Hatch and Slack pathway

- ✓ أغلبها نباتات إستوائية تعيش فى درجة حرارة مرتفعة وشدة إضاءة عالية ونقص فى الماء، ومنها ما ينمو فى المناطق الباردة المعتدلة كما أن بعضها يتحمل الملوحة وكلها تتميز بمعدل بناء ضوئى عالى وسريع.
- ✓ الثغور تغلق بسرعة أى لها مقاومة عالية.
- ✓ لا يحدث بها تنفس ضوئى وإن حدث يكون نادراً وبمعدل منخفض للغاية.
- ✓ إنخفاض معدل بناء الجليكوليت.
- ✓ معدل عملية البناء الضوئى أكبر أو ضعف معدلها فى النباتات ثلاثية الكربون.
- ✓ سرعة نموها عالية نتيجة لكفاءة بنائها الضوئى العالية.
- ✓ إنتاجيتها عالية.

C4 Plants المسلك الثاني: تثبيت وإختزال CO₂ فى النباتات رباعية الكربون

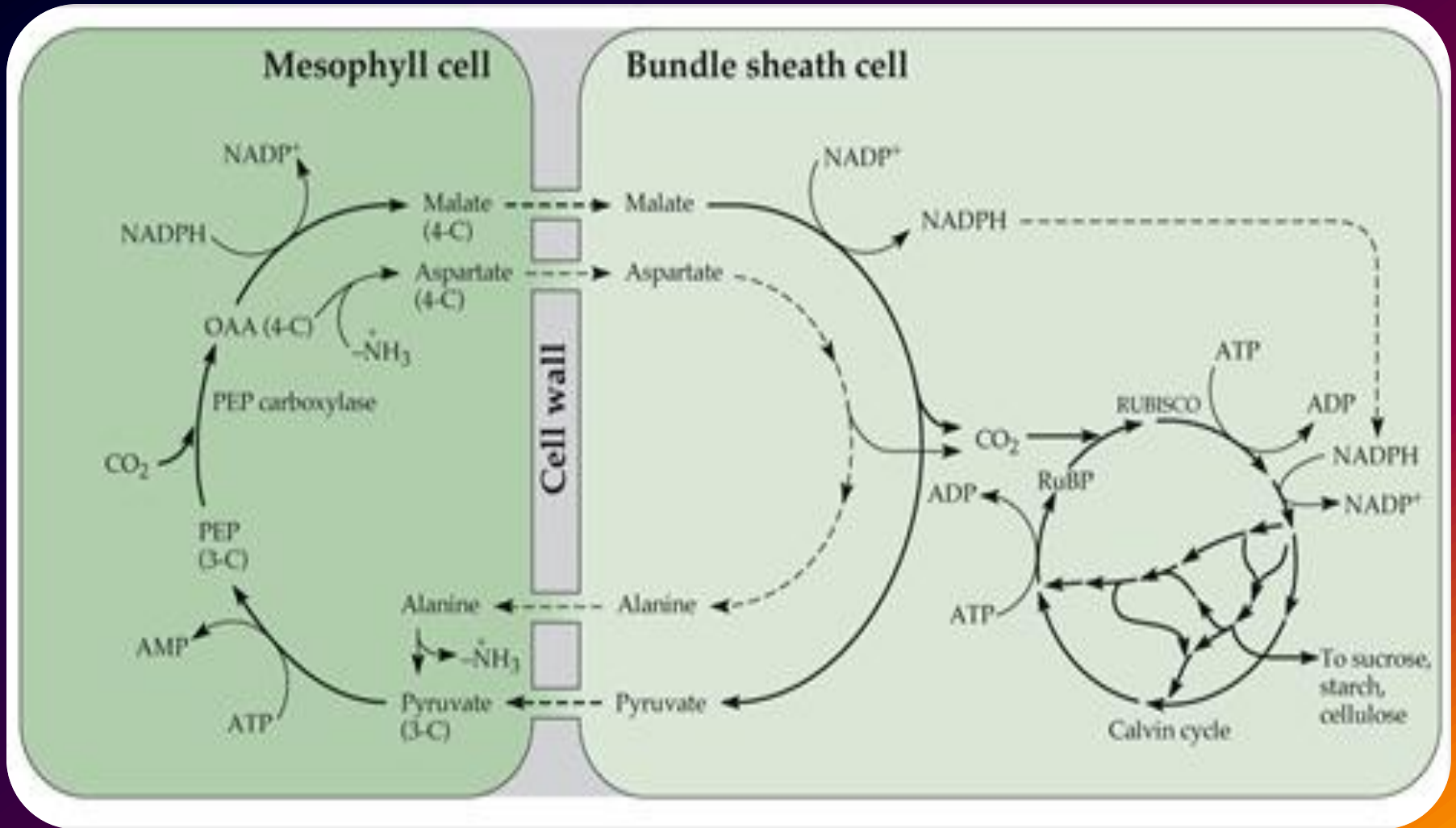
Hatch and Slack pathway دورة هاتش وسلاك



رسم ثلاثى الأبعاد يوضح أهم الفروق التشريحية بين أوراق نباتات C4 وأوراق نباتات C3.

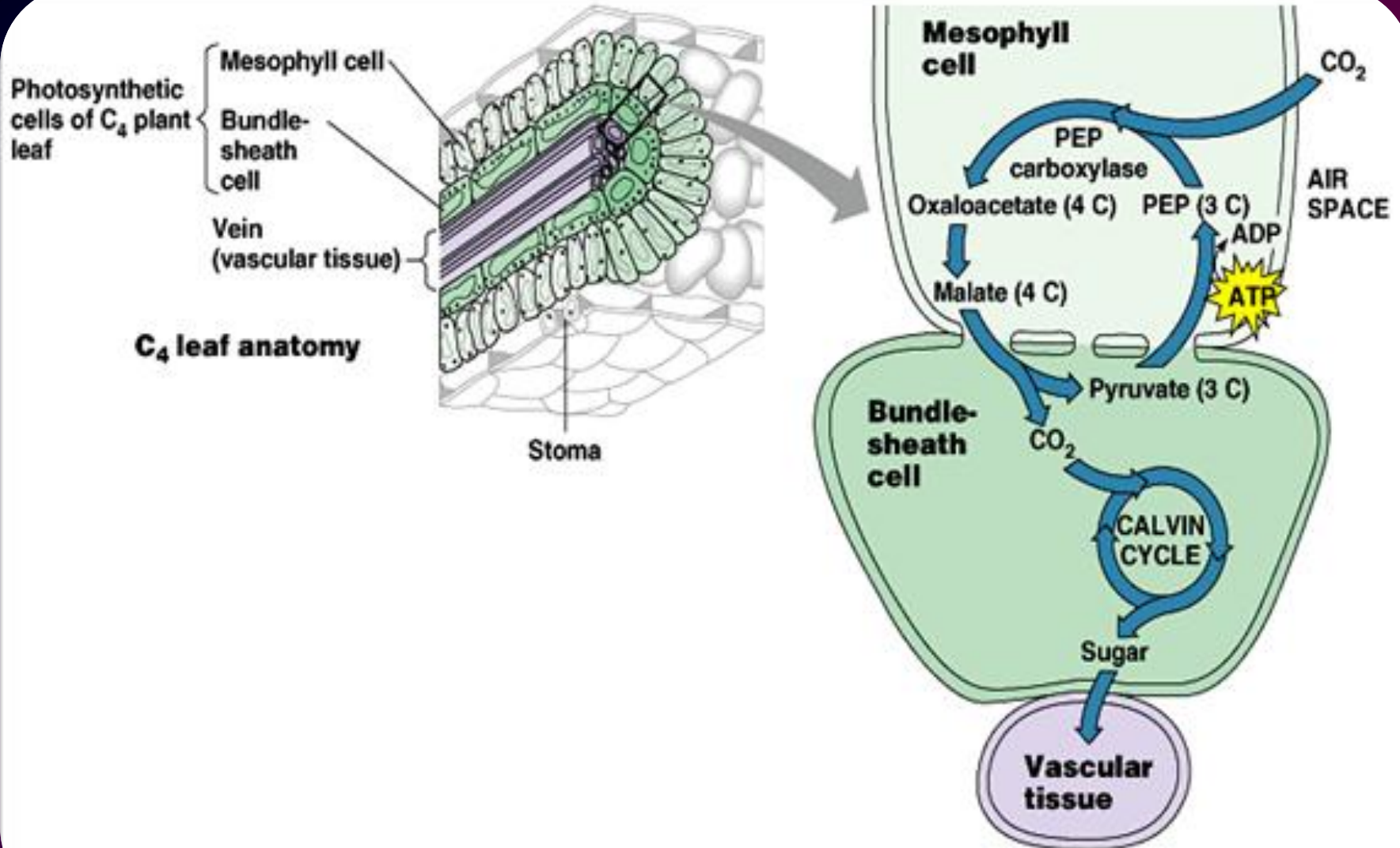
C4 Plants المسلك الثاني: تثبيت وإختزال CO_2 فى النباتات رباعية الكربون

Hatch and Slack pathway دورة هاتش وسلاك



C4 Plants المسلك الثاني: تثبيت وإختزال CO_2 فى النباتات رباعية الكربون

Hatch and Slack pathway دورة هاتش وسلاك



CAM Plants مسلك تثبيت CO₂ فى النباتات العصارية المتشحمة

Crassulacean Acid Metabolism (CAM) الأيض الحمضى التشحمة

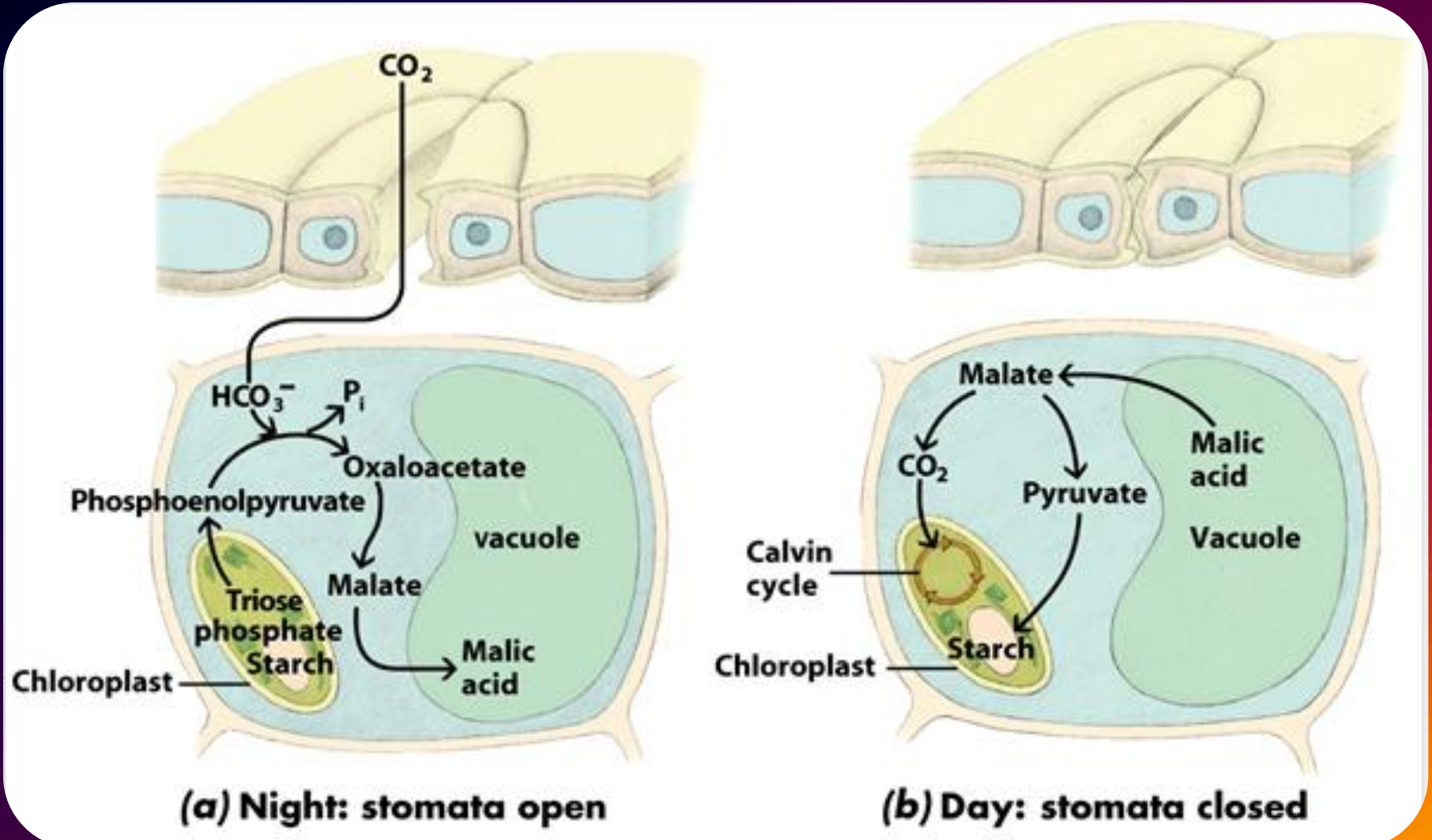
تتميز هذه النباتات ببعض الخصائص التشريحية والفسىولوجية التى تميزها عن النباتات العادية مثل:

- (1) زيادة سمك طبقة الأدمة على بشرة الأوراق، صغر حجم الأوراق، الثغور غائرة تغطيها شعيرات.
- (2) لا يوجد بها غلاف للحزم الوعائية (Kranz) لذا يوجد بها نوع واحد من البلاستيدات الخضراء فى خلايا النسيج المتوسط فقط.

هذه النباتات لها مسلك أو مسار لتثبيت CO₂ وإختزاله يشابه مسلك النباتات رباعية الكربون (C4 Plants) من حيث الناتج الأولى (حامض الأوكسالوخليك) والمستقبل الأول لـ CO₂ (فوسفو إينول حامض البيروفيك) والإنزيمات والتفاعلات ولكنها تختلف عن نباتات رباعية الكربون (C4) فى توقيت العملية، فهذه المجموعة من النباتات ثغورها تفتح ليلا (فى الظلام) ليدخل CO₂ ليتم تثبيته وإختزاله إلى حمض رباعى وهو حامض المالك الذى يخزن فى الفجوات العصارية للخلايا. وفى أثناء النهار (الضوء) تقفل الثغور ويتم تحرير CO₂ من حامض المالك ليتم تثبيته وإختزاله فى البلاستيدات الخضراء من خلال دورة كالفن لتكوين الكربوهيدرات (السكريات والنشا)، إذن هذه النباتات تكون أحماض رباعية بالليل وتكون النشا أو سكريات بالنهار للتخلص من الحموضة. والنشا يتحلل ويعطى فوسفوإينول بيروفيك PEP الذى يستقبل CO₂ فى الظلام

CAM Plants مسلك تثبيت CO_2 في النباتات العصارية المتشحمة

Crassulacean Acid Metabolism (CAM) الأيض الحمضي التشحمي



(a) Night: stomata open

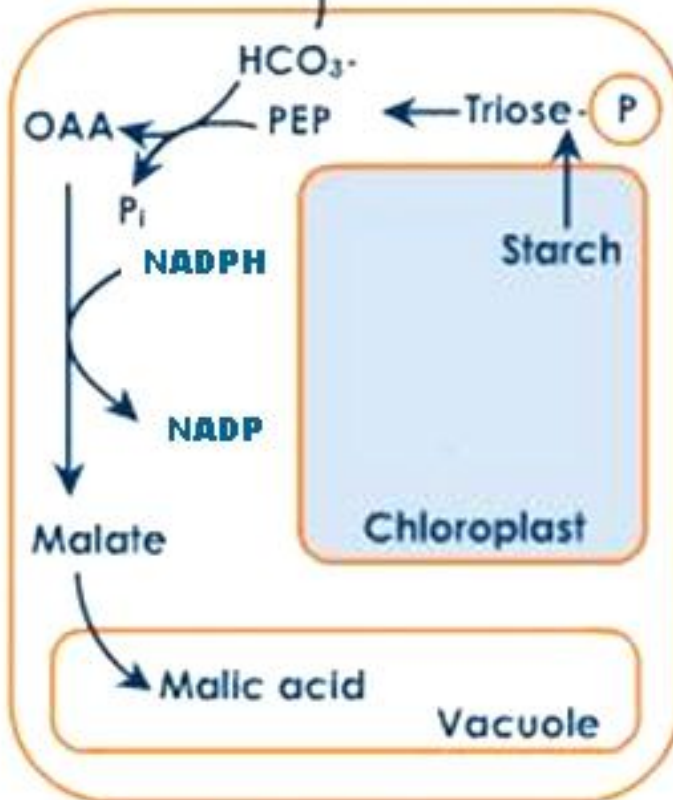
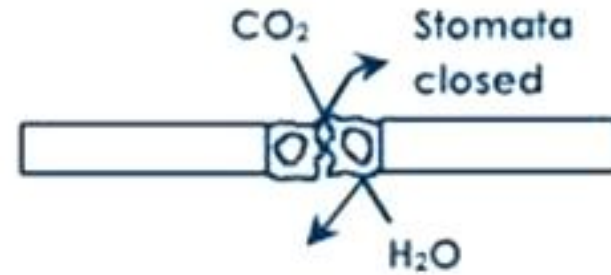
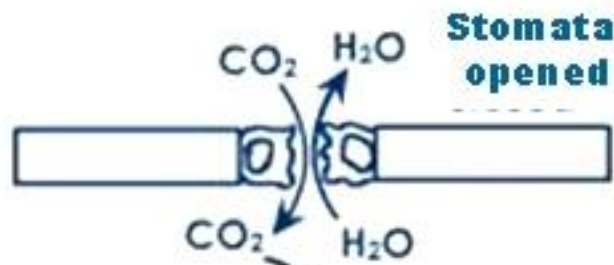
(b) Day: stomata closed

(a) Night: stomata open

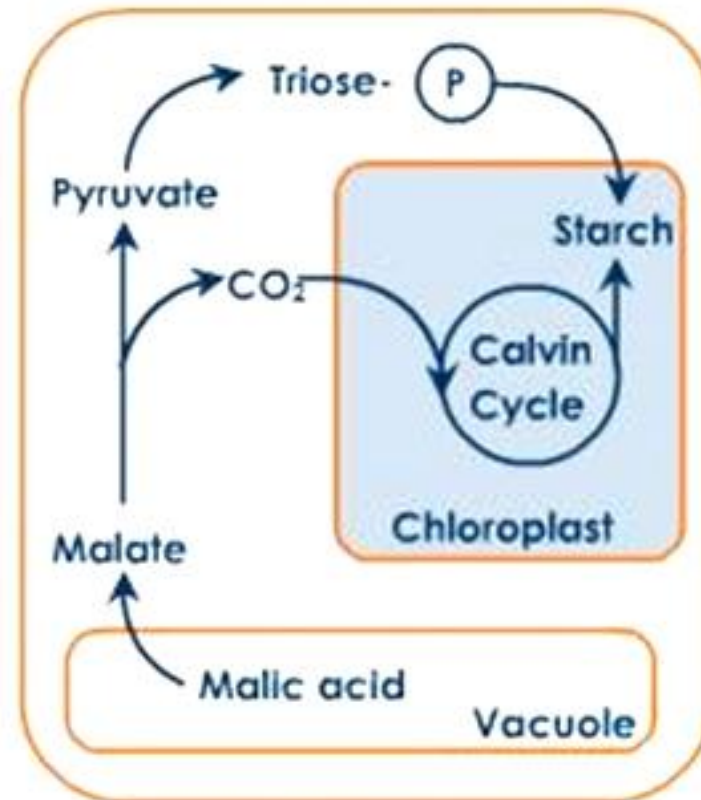
(b) Day: stomata closed

CAM Plants مسلك تثبيت CO_2 في النباتات العصارية المتشحمة

Crassulacean Acid Metabolism (CAM) الأيض الحمضي التشحمي



During night



During day

Sucrose and Starch Synthesis

يتم بناء السكروز والنشا كعملية تنظيمية أثناء عملية البناء الضوئي، حيث يتم بناء السكروز في السيتوبلازم (cytosol) خارج البلاستيدات الخضراء، أما بناء النشا فيتم ويخزن في حشوة البلاستيدات الخضراء، وهما من أهم نواتج عملية البناء الضوئي من ناحية الإستهلاك والقيمة التجارية للإنسان.

(١) يتم بناء السكروز والنشا من السكر الثلاثي المفسفر جليسرالدهيد ٣ فوسفات (G3P) والداي هيدرووكسي أسيتون فوسفات (DHAP) من نواتج تفاعلات الظلام في عملية البناء الضوئي.

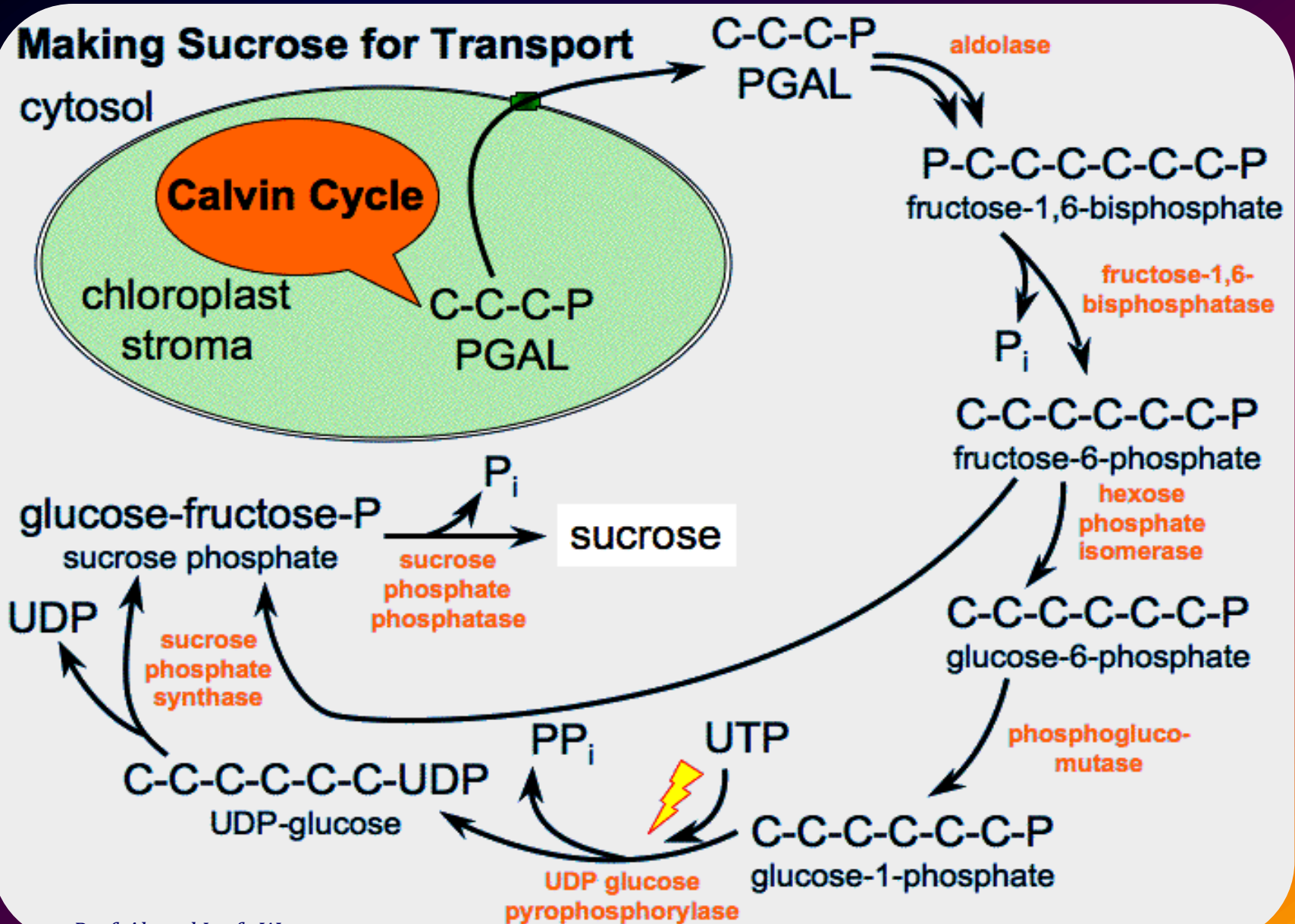
(٢) الذي يحدد بناء السكروز في السيتوبلازم وبناء النشا في البلاستيدات الخضراء هو تركيز الفوسفات غير العضوية (pi) في السيتوبلازم وتركيز السكر الثلاثي المفسفرة (G3P) في البلاستيدات الخضراء.

(٣) يتم نقل الفوسفات غير العضوية (pi) إلى داخل البلاستيدات ونقل السكر الثلاثي (G3P) إلى السيتوبلازم بالتبادل عن طريق حامل بروتيني.

(٤) عندما يزداد تركيز (pi) في السيتوبلازم يزداد تبادله مع (G3P)، فيزداد إنتقال (G3P) إلى السيتوبلازم وبالتالي يتم بناء السكروز بمعدل عالي، كما يزداد إنتقال الفوسفات غير العضوية إلى البلاستيدات الخضراء على حساب G3P فيقل بناء النشا.

(٥) يتم بناء النشا عندما يقل تركيز (pi) في البلاستيدات الخضراء وتزداد سرعة البناء الضوئي فيتراكم السكر الثلاثي المفسفر (G3P) في البلاستيدة فيبدأ بناء النشا في الستروما ويخزن أثناء النهار ثم يتحلل في الظلام وينتقل ليستعمل في العمليات الحيوية أو يخزن مرة أخرى في أماكن لتخزين، ويشبط بناء النشا في وجود تركيز عالي من pi في السيتوبلازم.

Sucrose Synthesis بناء السكر



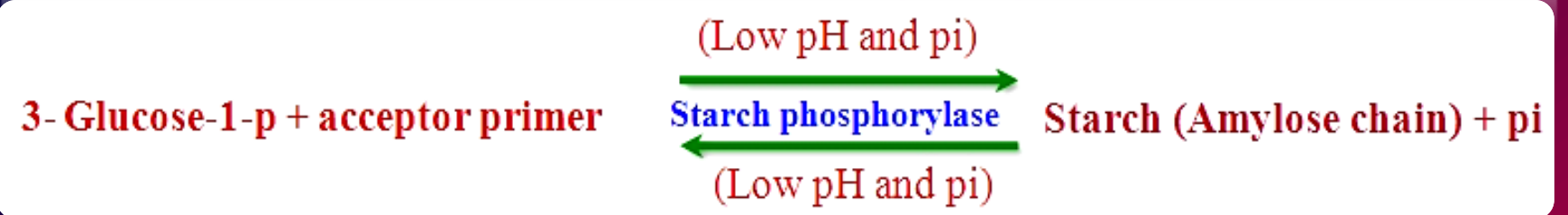
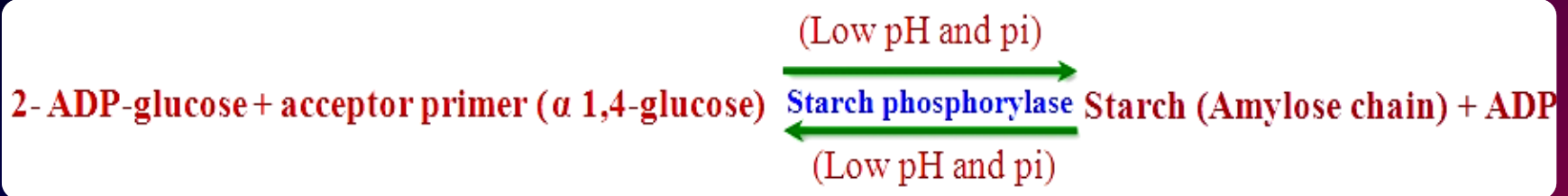
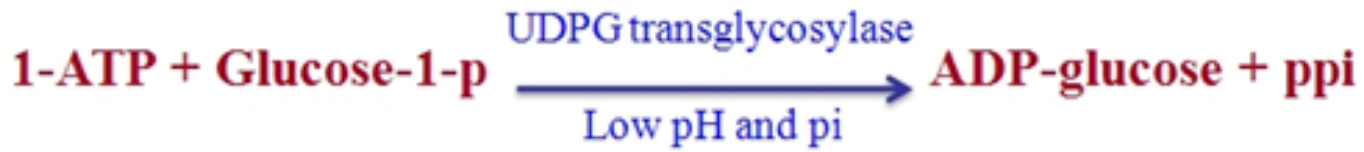
١. بناء النشا Starch Synthesis

النشا من السكريات العديدة Polysaccharides وهو أحد أقسام الكربوهيدرات وأكثرها إنتشارا وهو ناتج تخزيني غذائي لعملية البناء الضوئي، ويتم بناء النشا في ستروما البلاستيدات الخضراء أثناء النهار عندما يكون معدل البناء الضوئي (إنتاج السكريات الثلاثية المفسفرة) في البلاستيدات عالي وينخفض تركيز الفوسفات غير العضوية (pi) في السيتوبلازم منخفض والـ PH منخفض فيزداد تراكم السكريات الثلاثية المفسفرة (G3P) في الستروما وتستخدم في بناء النشا من خلال مسلك أو مسار بناء النشا من السكريات الثلاثية المفسفرة داخل البلاستيدات الخضراء.

يبدأ بناء النشا بتكوين جلوكوز-1- فوسفات من السكريات الثلاثية (G3P) الناتجة من دورة كالفن، حيث يتحد جزيئين من جلوكوز-1- فوسفات وتتكون بينهما رابطة جلوكوسيدية α -1,4 مع خروج جزيء من الفوسفات غير العضوية (pi)، حيث يحتاج بناء النشا إلى مستقبل acceptor أو بادئ primer يتكون على الأقل من 2 : 4 وحدات من الجلوكوز مثل المالتوز – المالتو ترايوز – مالتو تتروز).

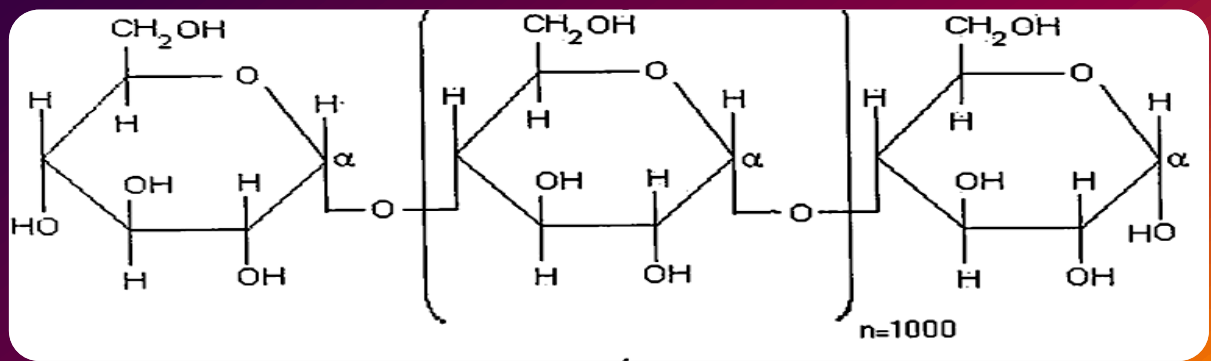
يتم بناء النشا في وجود إنزيم نقل الجلوكوز UDPG transglycosylase الذي ينقل وحدات الجلوكوز إلى البادئ أو المستقبل لترتبط به برابطة جلوكوسيدية α -D (1,4) في وجود إنزيم فوسفوريليز النشا Starch phosphorylase والذي يسمى أيضاً Starch synthetase وهذا الإنزيم يعمل على بناء النشا أثناء النهار عند إنخفاض الـ pH ووجود تركيز منخفض من pi وتراكم السكريات الثلاثية داخل البلاستيدات الخضراء، أما في الظلام وبعد توقف عملية البناء الضوئي يرتفع الـ pH ويزداد تركيز الفوسفات غير العضوية (pi) يعمل الإنزيم على تحليل النشا إلى سكر الجلوكوز والسكريات الثلاثية التي تنتقل من البلاستيدات الخضراء إلى السيتوبلازم لتكوين السكر

Starch Synthesis بناء النشا

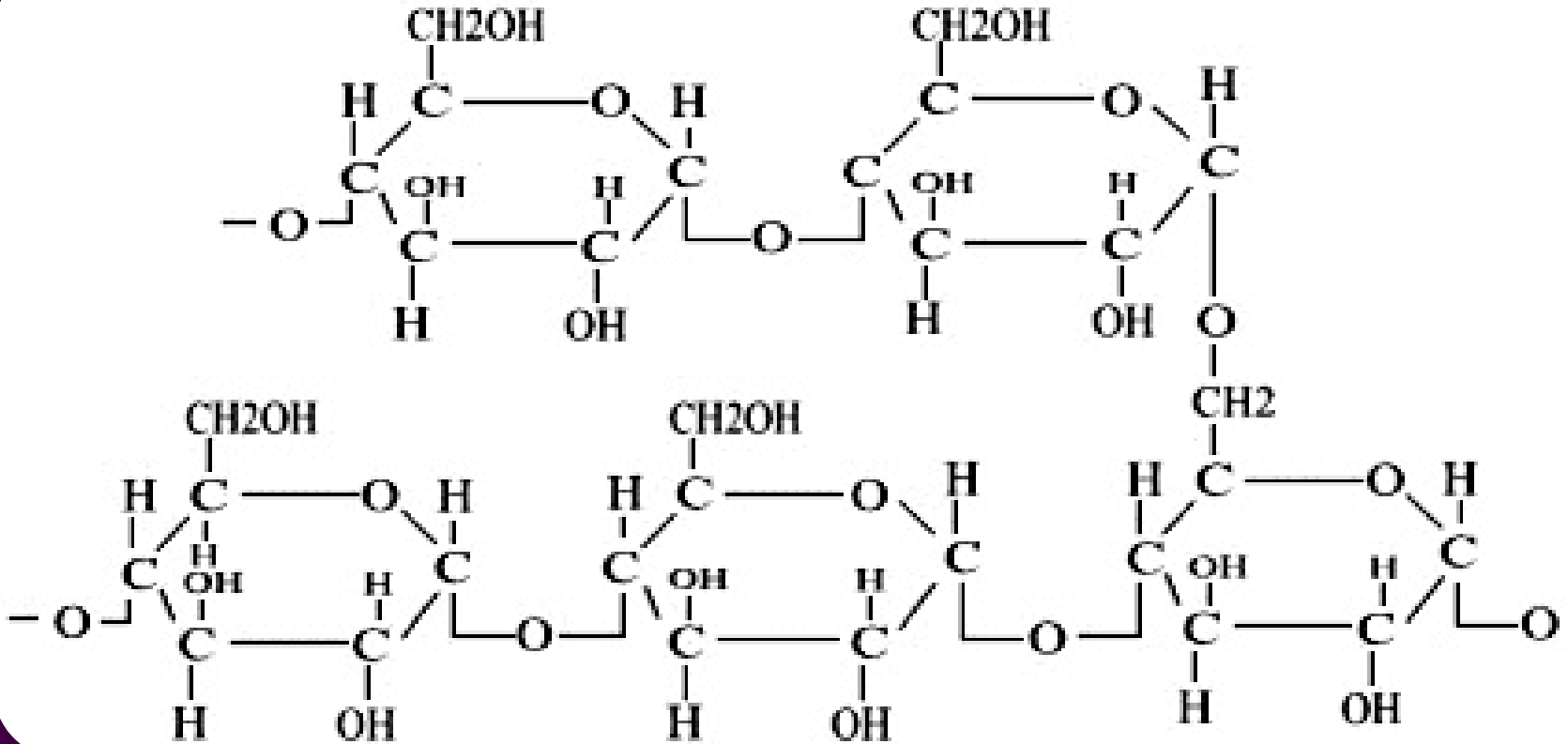


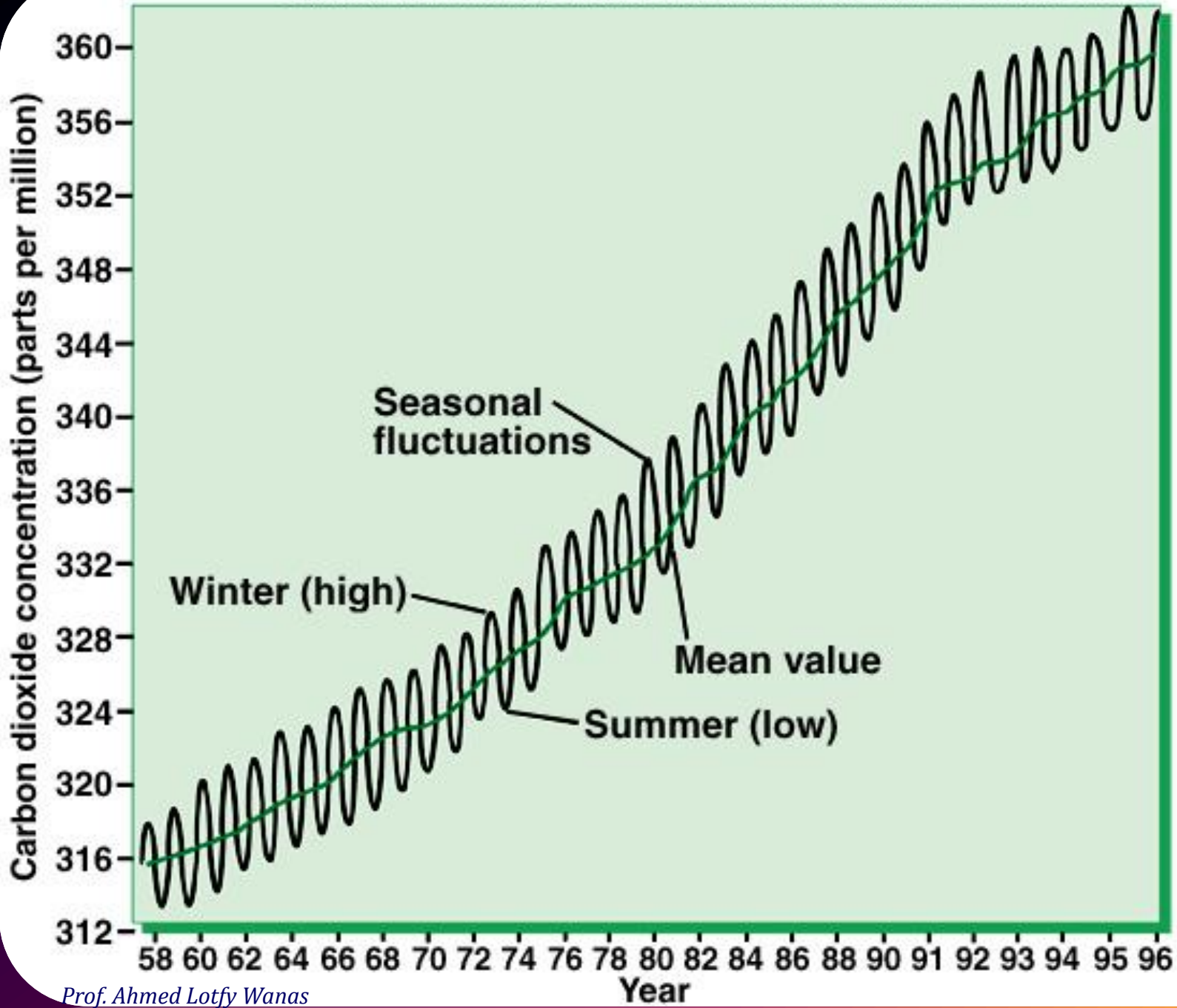
ويوجد نوعين من النشا هما:

- الأميلوز Amylose وهو يتكون من وحدات جلوكوز مرتبطة مع بعضها في سلسلة مستقيمة برابطة $\alpha\text{-D}(1,4\text{-glucoside})$ ويعطى لون أزرق مع اليود.



- الأميلوبكتين Amylopectin وهو يتكون من جزئ متفرع يتكون من عدة سلاسل من وحدات الجلوكوز، حيث توجد تكون وحدات الجلوكوز مرتبطة في سلاسل مستقيمة بروابط α -1,4- glucoside وترتبط السلاسل ببعضها بروابط α -1,6-glucoside. الإنزيم الذي ينشط الرابطة α -1,4 هو D-enzyme وأما الرابطة α -1,6 فينشطها إنزيم Q-enzyme والأميلوبكتين غير ذائب في الماء ويعطى لون أرجوانى أو أحمر مع اليود.





**Rising
CO₂
Levels**

Global Warming

