

Photosynthesis البناء الضوئي

الأهداف

- تتلخص مرحلتي عملية البناء الضوئي.
- توضّح وظيفة البلاستيدة الخضراء في أثناء التفاعلات الضوئية.
- تصف عملية نقل الإلكترونات وترسمها.

مراجعة المفردات

الكربوهيدرات، مركبات عضوية تحوي الكربون، والهيدروجين والأكسجين فقط بنسب (1:2:1) بالترتيب.

المفردات الجديدة

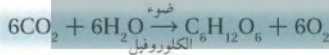
الثايلاكويد
الغرانا
الحشوة (اللحمة)
الصبغة
ناقل الإلكترون NADP+
حلقة كالفن
إنزيم روبيسكو

الفكرة الرئيسة تتحوّل الطاقة الضوئية بعد امتصاصها إلى طاقة كيميائية في أثناء عملية البناء الضوئي.

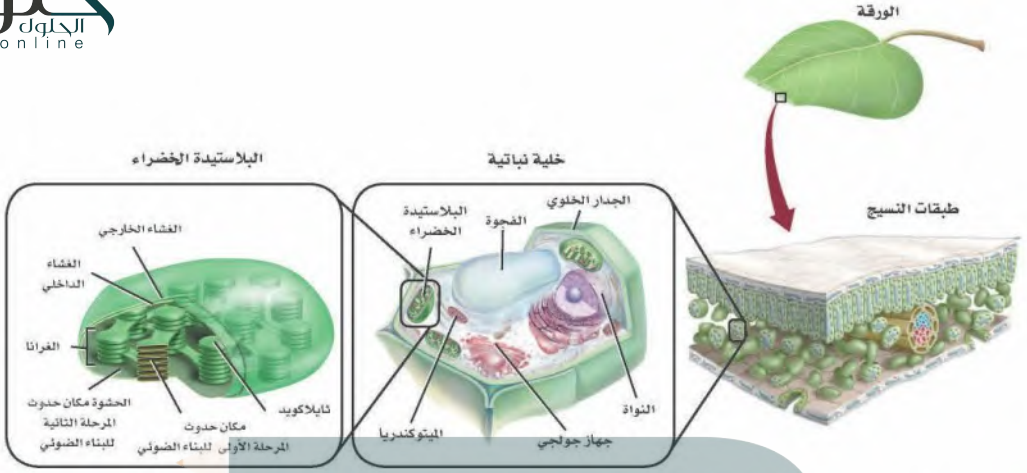
الربط مع الحياة تتحول الطاقة من حولنا كل يوم. حيث تحوّل البطاريات الطاقة الكيميائية إلى طاقة كهربائية، ويحول الراديو الطاقة الكهربائية إلى طاقة تحملها الموجات الصوتية. وبطريقة مشابهة تحول بعض المخلوقات الحية الذاتية التغذية الطاقة الضوئية إلى طاقة كيميائية من خلال عملية البناء الضوئي.

عملية البناء الضوئي Photosynthesis

معظم المخلوقات الذاتية التغذية، ومنها النباتات، قادرة على صنع المركبات العضوية مثل السكر بعملية البناء الضوئي. وتتحوّل الطاقة الضوئية في أثناء عملية البناء الضوئي إلى طاقة كيميائية. والمعادلة الكيميائية الآتية تمثل عملية البناء الضوئي:



تحدث عملية البناء الضوئي في مرحلتين؛ في المرحلة الأولى تحدث التفاعلات التي تعتمد على الضوء (التفاعلات الضوئية)، حيث يتم امتصاص الطاقة الضوئية وتحويلها إلى طاقة كيميائية على شكل ATP و NADPH. أما في المرحلة الثانية فهي التفاعلات التي تحدث في الضوء ولكن لا تعتمد عليه (التفاعلات اللاضوئية) وتسمى حلقة كالفن، بحيث يتم استخدام جزيئات ATP و NADPH التي تكونت في المرحلة الأولى لإنتاج الجلوكوز. وعندما ينتج الجلوكوز يتحد مع جزيئات سكريات بسيطة أخرى لتكوين جزيئات أكبر، وهذه الجزيئات هي كربوهيدرات معقدة مثل النشا. وقد يُستخدم الناتج النهائي لعملية البناء الضوئي في بناء جزيئات عضوية أخرى مثل البروتينات والدهون والأحماض النووية.



المرحلة الأولى: التفاعلات الضوئية Phase one: Light Reactions

يُعد امتصاص الضوء الخطوة الأولى في عملية البناء الضوئي؛ حيث تحتوي النباتات على عضيات خاصة تمتص الطاقة الضوئية. وبعد امتصاص الطاقة يتم إنتاج جزيئات تخزين الطاقة، هي NADPH و ATP؛ لاستخدامهما في التفاعلات التي لا تعتمد على الضوء (اللاضوئية).

البلاستيدات الخضراء Chloroplasts عضيات كبيرة تمتص الطاقة الضوئية في المخلوقات الحية التي تقوم بعملية البناء الضوئي. وتوجد البلاستيدات الخضراء في النباتات بشكل رئيس في خلايا الأوراق. والبلاستيدات كما في الشكل 5-5، عضيات تشبه القرص، وتحتوي على جزئين ضروريين لعملية البناء الضوئي. يسمى الجزء الأول **ثايلاكويدات thylakoids**، وهي مجموعة من الأغشية المسطحة تشبه الكيس، ترتب في رزم متراصة تسمى **الغرانا grana**. وتحدث التفاعلات الضوئية في الثايلاكويدات. أما الجزء الثاني المهم فيسمى **الحشوة (اللحمة) stroma**، وهي سائل يملأ الفراغات المحيطة بالغرانا، وتعد مكان حدوث التفاعلات اللاضوئية في المرحلة الثانية من عملية البناء الضوئي، انظر الشكل 5-5.

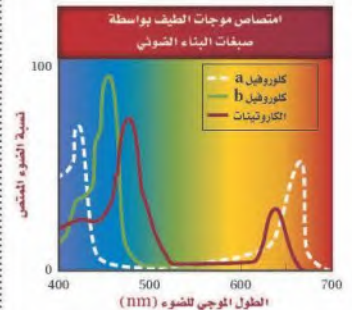
✓ **ماذا قرأت؟** ميز بين الثايلاكويد والحشوة (اللحمة).

الأصبغ Pigments تسمى الجزيئات الملونة التي تمتص الضوء **الأصبغ pigments**، وتوجد في أغشية الثايلاكويد في البلاستيدات الخضراء. وتمتص الأصباغ المختلفة أطوالاً موجية محددة من الضوء، الشكل 5-6. والصبغة الأساسية في النباتات هي الكلوروفيل، وهناك أنواع من صبغة الكلوروفيل، ومن أهمها الكلوروفيل (a) والكلوروفيل (b).

يختلف تركيب الكلوروفيل من جزيء إلى آخر، مما يسمح لجزيئات الكلوروفيل بامتصاص الضوء عند مناطق محددة من طيف امتصاص الضوء المرئي.

■ الشكل 5-5 تحدث عملية البناء الضوئي داخل عضيات صبغية تسمى البلاستيدات الخضراء.

■ الشكل 5-6 تختلف الأصباغ الملونة التي توجد في أوراق الأشجار في قدرتها على امتصاص أطوال موجية محددة من الضوء. **كُونْ فرضية** إذا لم يحتمل النبات على كلوروفيل b، فما أثر ذلك في امتصاص الضوء؟





■ الشكل 5-7 عندما يتحلل الكلوروفيل في أوراق بعض الأشجار، تصبح الأصباغ الأخرى أكثر وضوحاً.

وعموماً يزداد معدل امتصاص الضوء بواسطة الكلوروفيل في منطقة الطيف المحصورة بين الأزرق والبنفسجي من طيف الضوء المرئي، ويعكس الضوء في المنطقة الخضراء من الطيف. وهذا يفسر سبب رؤية الإنسان لأجزاء النبات التي تحوي الكلوروفيل باللون الأخضر.

تحوي معظم المخلوقات الحية التي تقوم بعملية البناء الضوئي أصبغاً إضافية بالإضافة إلى الكلوروفيل، تسمح للنباتات بامتصاص طاقة ضوئية إضافية من مناطق أخرى من الطيف المرئي. ومن هذه الأصباغ مجموعة أصباغ الكاروتينات، ومنها صبغة β كاروتين (بيتا-كاروتين) التي تمتص الضوء في المناطق الزرقاء والخضراء من الطيف، في حين تعكس أغلب الضوء في المناطق الصفراء والبرتقالية والحمراء، الشكل 5-7. وتعد أصباغ الكاروتينات المسؤولة عن ألوان كل من الجزر والبطاطا الحلوة. تعد صبغة الكلوروفيل في الأوراق أكثر شيوعاً ووفرة من الأصباغ الأخرى، لذلك فهي تغطي عليها، وتمنع ظهور ألوان الأصباغ الأخرى. ومع ذلك يمكن أن يظهر اللون الأصفر والأحمر والبرتقالي في الأوراق في فصل الخريف نتيجة تحليل جزيئات الكلوروفيل، مما يسمح بظهور ألوان الصبغات الأخرى.

المفردات

مفردات أكاديمية

النقل Transport

هو حمل شيء من مكان إلى آخر.

وتنقل جزيئات $NADP^+$ الإلكترونات في أثناء عملية البناء الضوئي.

نقل الإلكترون Electron Transport يُشكّل تركيب غشاء الثايلاكويد الأساس في الانتقال الفعال للطاقة في أثناء نقل الإلكترون؛ حيث يتميز غشاء الثايلاكويد بمساحة سطح كبيرة، مما يوفر المساحة اللازمة للاحتفاظ بأعداد كبيرة من الجزيئات الناقلة للإلكترون، وكذلك وجود نوعين من البروتينات المعقدة التي تسمى الأنظمة الضوئية.

تجربة 2 - 5

ملاحظة البلاستيدات الخضراء

كيف تبدو البلاستيدات الخضراء؟ تعتمد معظم الأنظمة البيئية والمخلوقات الحية في العالم على عُضيات صغيرة جداً تسمى البلاستيدات الخضراء. اكتشف كيف تبدو البلاستيدات الخضراء في هذا الاستقصاء؟

خطوات العمل

1. املا بطاقة السلامة في دليل التجارب العملية.
2. لاحظ شرائح خلايا نباتية وأخرى للطحالب الخضراء بالمجهر المركب.
3. حدد البلاستيدات الخضراء في الخلايا التي تلاحظها.
4. اعمل جدول بيانات لتسجيل ملاحظاتك، ثم ارسم البلاستيدات الخضراء داخل الخلايا.

التحليل

1. قارن بين خصائص البلاستيدات الخضراء التي لاحظتها في الخلايا المختلفة.
2. كون فرضية لماذا تختلف أوراق النبات الخضراء في لونها؟

يحتوي النظامان الضوئيان (I و II) أصبغاً تمتص الضوء، وبروتينات نقل الإلكترونات، دوراً مهماً في التفاعلات الضوئية.

تتبع الشكل 8-5 في أثناء قراءتك عن نقل الإلكترونات.

- أولاً تحفز الطاقة الضوئية الإلكترونات في النظام الضوئي II، كما تؤدي الطاقة الضوئية إلى تحلل جزيء الماء منتجة إلكترونات واحداً إلى نظام نقل الإلكترونات وأيون هيدروجين (H^+ (يسمى أيضاً البروتون) - إلى الفراغ في الثايلاكويد - وكذلك الأكسجين (O_2) بوصفه ناتجاً غير مُستخدم.
- تنتقل الإلكترونات المُحفزة من النظام الضوئي II إلى جزيء مستقبل للإلكترونات يوجد في غشاء الثايلاكويد.
- ينقل الجزيء المستقبل للإلكترونات لاحقاً الإلكترونات عبر سلسلة من نواقل الإلكترونات إلى النظام الضوئي I.
- ينقل النظام الضوئي I مع وجود الضوء الإلكترونات إلى بروتين يسمى فيرودوكسين، ويتم تعويض الإلكترونات المفقودة في النظام الضوئي I بالإلكترونات من النظام الضوئي II.
- وأخيراً ينقل بروتين فيرودوكسين الإلكترونات إلى ناقل الإلكترون $NADP^+$ مكوناً الجزيء المخزن للطاقة NADPH.

الأسموزية الكيميائية Chemiosmosis بالتزامن مع نقل الإلكترون يتم إنتاج جزيء ATP بعملية تسمى الاسموزية الكيميائية، وهي عملية يتم فيها إنتاج ATP نتيجة انتقال الإلكترونات مع تدرّج التركيز. ولا تقتصر أهمية عملية تحلل جزيء الماء على توفير الإلكترونات اللازمة لبدء سلسلة نقل الإلكترون فقط، بل توفر أيضاً البروتونات H^+ الضرورية لتنشيط عملية بناء جزيء ATP خلال عملية الاسموزية الكيميائية. وتتراكم أيونات H^+ التي تحررت خلال عملية نقل الإلكترون على الجانب الداخلي للثايلاكويد. وبسبب التركيز العالي من أيونات H^+ داخل الثايلاكويد وانخفاض تركيزها في الحشوة، تنتقل أيونات H^+ مع تدرّج التركيز من داخل الثايلاكويد إلى الحشوة عبر قنوات أيونية في الغشاء، كما في الشكل 8-5، وهذه القنوات عبارة عن إنزيمات تسمى إنزيمات بناء الطاقة (ATP synthases). وكلما انتقلت أيونات H^+ عبر إنزيمات بناء الطاقة تكوّن ATP في الحشوة.

✓ **ماذا قرأت؟** لخص وظيفة الماء في أثناء الاسموزية الكيميائية في عملية البناء الضوئي.

المرحلة الثانية: حلقة كالفن Phase two: Calvin Cycle

على الرغم من أن جزيئات NADPH و ATP تزود الخلايا بكميات كبيرة من الطاقة إلا أنها جزيئات غير مستقرة بصورة كافية حتى تُخزن الطاقة الكيميائية فترات زمنية طويلة. لذا هناك مرحلة ثانية من عملية البناء الضوئي تسمى **حلقة كالفن** calvin cycle، يتم فيها تخزين الطاقة في جزيئات عضوية مثل الجلوكوز. وتعد حلقة كالفن من التفاعلات التي لا تعتمد على الضوء. تتبع الشكل 9-5 في أثناء دراستك خطوات حلقة كالفن.

- في الخطوة الأولى من حلقة كالفن تتحد ستة جزيئات من CO₂ الجوي مع ستة جزيئات من سكر الرايبولوز الثنائي الفوسفات (سكر خماسي الكربون) تسمى هذه العملية (تثبيت الكربون) لينتج 6 جزيئات من مركب سداسي الكربون.

- في الخطوة الثانية، تنتقل الطاقة الكيميائية المخزنة في جزيئات ATP و NADPH إلى جزيئات (3-PGA) لتكوين جزيئات ذات طاقة عالية تسمى جليسر ألدهايد 3- الفوسفات (G3P). فجزئيات ATP تحفز مجموعة الفوسفات على تكوين (G3P)، في حين يوفر جزيء NADPH أيونات الهيدروجين والإلكترونات.

- في الخطوة الثالثة، يخرج جزيئا (G3P) من الحلقة ليستخدم في إنتاج الجلوكوز ومركبات عضوية أخرى.

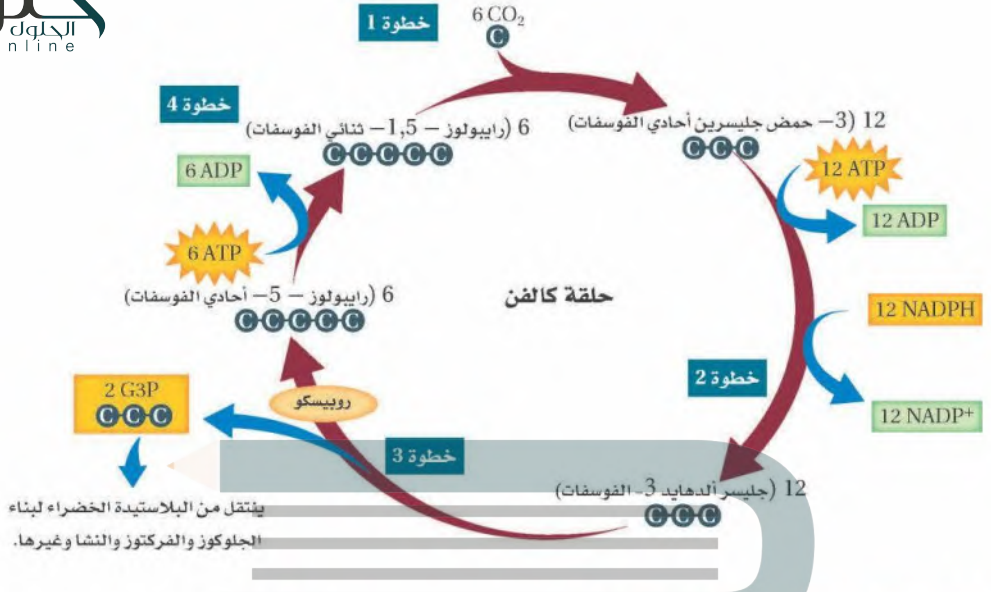
- في الخطوة النهائية من حلقة كالفن يحول إنزيم يسمى **روبيسكو** rubisco، الجزيئات العشرة المثبتة من (G3P) إلى ستة جزيئات خماسية الكربون تسمى رايبولوز 5- أحادي الفوسفات، التي تتحول فيما بعد إلى ستة جزيئات من رايبولوز 1،5- ثنائي الفوسفات (RuBP). تتحد هذه الجزيئات مجدداً مع جزيئات جديدة من ثاني أكسيد الكربون لإعادة الحلقة مرة أخرى. ويعتد إنزيم روبيسكو واحداً من أهم الإنزيمات الحيوية؛ لأنه يحول جزيئات CO₂ غير العضوية إلى جزيئات عضوية تستخدمها الخلية. بالإضافة إلى استخدام السكر الناتج عن حلقة كالفن مصدرًا للطاقة فإن النبات يستخدمه بوصفه وحدات بناء أساسية في الكربوهيدرات المعقدة، ومنها السيليلوز الذي يوفر الدعم للنبات.

مهن مرتبطة مع علم الأحياء

اختصاصي كيمياء النبات

Phytochemist عالم الأحياء

الذي يدرس النواتج الكيميائية للنباتات، ويقوم بالأبحاث الطبية لإيجاد علاجات جديدة للأمراض.



■ الشكل 9-5 تربط حلقة كالفن ثاني أكسيد الكربون مع الجزيئات العضوية داخل الحشوة في البلاستيدات الخضراء. حدد المركب الذي يخزن الطاقة في نهاية حلقة كالفن.

مسارات بديلة Alternative Pathways

تؤثر البيئة التي يعيش فيها المخلوق الحي في قدرته على القيام بعملية البناء الضوئي؛ فالبيئة التي لا يوجد فيها كميات كافية من الماء أو ثاني أكسيد الكربون تقلل من قدرة المخلوق الحي الذي يقوم بعملية البناء الضوئي على تحويل الطاقة الضوئية إلى طاقة كيميائية. فمثلاً تتعرض النباتات التي تعيش في البيئات الجافة والحارة إلى فقدان كميات كبيرة من الماء؛ مما يقلل من عملية البناء الضوئي. وتحوي النباتات التي تعيش في مناخات قاسية مسارات بديلة في عملية البناء الضوئي تمكنها من تحويل الحد الأقصى من الطاقة.

نباتات C₄: C₄ plants وهب الله - سبحانه وتعالى - للنباتات تكييفاً في أحد المسارات التي تساعد على الحفاظ على عملية البناء الضوئي بأقل حد ممكن من فقدان الماء، يسمى مسار C₄. ويحدث هذا المسار في نباتات منها قصب السكر والذرة، وتسمى هذه النباتات نباتات C₄؛ لأنها تُثَبَّت ثاني أكسيد الكربون وتربطه مع مركبات رباعية الكربون بدلاً من مركبات ثلاثية الكربون في أثناء حلقة كالفن، كما أن لنباتات C₄ تكييفات تركيبية مهمة في ترتيب الخلايا في الأوراق. وعموماً تعمل نباتات C₄ على إغلاق ثغورها في الأيام الحارة، في حين تنتقل المركبات الرباعية الكربون إلى خلايا خاصة، حيث يدخل فيها ثاني أكسيد الكربون حلقة كالفن، مما يسمح باستهلاك كمية كافية من ثاني أكسيد الكربون، ويقلل كمية الماء المفقودة.

نباتات أيض الحمض العشبي CAM plants من مسارات التمثيل الغذائي التي تستخدمها النباتات للقيام بعملية البناء الضوئي بأقصى فاعلية مسار يسمى أيض الحمض العشبي CAM (Crassulacean Acid Metabolism).

يحدث هذا المسار في النباتات التي تحتفظ بالماء وتعيش في الصحراء والمستنقعات المالحة وأي بيئة أخرى؛ حيث الوصول إلى الماء محدود جداً. ومنها الصبار والسحلب والأناس في الشكل 10-5، التي تسمح لثاني أكسيد الكربون بالدخول إلى الأوراق في الليل فقط، أي عندما يميل الجو إلى البرودة والرطوبة. وفي الليل تقوم النباتات بتثبيت ثاني أكسيد الكربون في مركبات عضوية. وفي أثناء النهار يتم تحرير ثاني أكسيد الكربون من هذه المركبات، ويدخل حلقة كالفن. كما يسمح هذا المسار باستهلاك كمية كافية من ثاني أكسيد الكربون وتقليل فقدان الماء.



■ الشكل 10-5 نبات الأناس مثال على نباتات CAM.

التقويم 2-5

الخلاصة

- تحتوي النباتات على بلاستيدات خضراء وأصبغ تمتص الضوء، وتحول الطاقة الضوئية إلى طاقة كيميائية.
- تمر عملية البناء الضوئي بمرحلتين تضم تفاعلات ضوئية وحلقة كالفن.
- في التفاعلات الضوئية، تمتص المخلوقات الحية الذاتية التغذية الطاقة الضوئية، وتحولها إلى طاقة كيميائية في صورة ATP و NADPH.
- في حلقة كالفن تستخدم الطاقة الكيميائية المخزنة في جزيئات ATP و NADPH لإنتاج الكربوهيدرات ومنها الجلوكوز.

فهم الأفكار الرئيسية

1. **المقارنة** **التياسة** **تلخص** كيف تتكون الطاقة الكيميائية من الطاقة الضوئية في أثناء عملية البناء الضوئي.
2. **اربط** تركيب البلاستيدة الخضراء مع مراحل عملية البناء الضوئي.
3. **فسر** أهمية الماء في التفاعلات الضوئية.
4. **تلخص** الخطوات في حلقة كالفن.
5. **ارسم** آلية نقل الإلكترون وفسرها.

التفكير الناقد

6. **توقع** كيف تؤثر العوامل البيئية مثل كثافة الأشعة الضوئية ومستويات CO_2 في معدلات البناء الضوئي؟
7. **الكتابة في علم الأحياء** ابحث في آثار الاحتباس الحراري في عملية البناء الضوئي، واكتب مقالة تلخص فيها ما توصلت إليه.