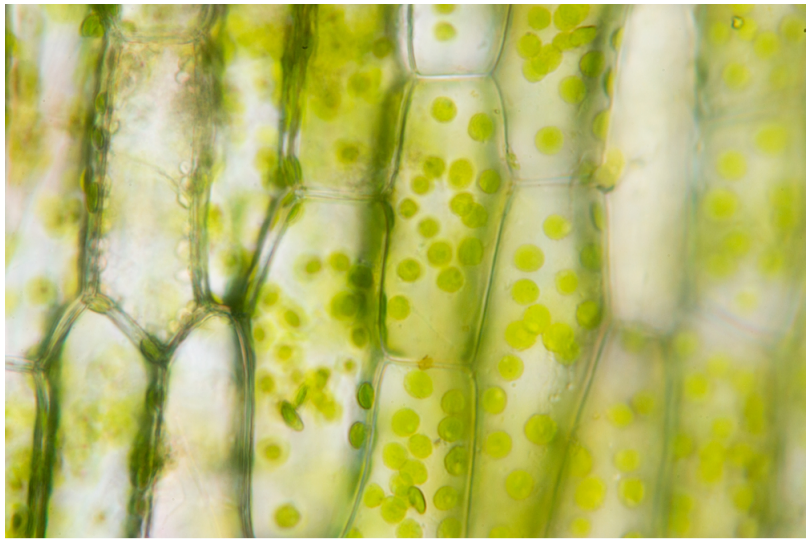
# شارح: تركيب البلاستيدة الخضراء

في هذا الشارح، سوف نتعلم كيف نصف تركيب البلاستيدة الخضراء، ونفسِّر كيف تكيفت لتوائم وظيفتها.

النباتات كائنات حية متعددة الخلايا، مثل البشر، فهي تحتاج إلى تغذية تبقيها على قيد الحياة وتساعدها على أداء وظيفتها. ولكن على عكس البشر، لا تملك النباتات جهازًا هضميًّا متخصصًا لامتصاص المغذيات من مصادر الغذاء. وما يثير الدهشة هو أن النباتات قد تطوَّرت وحلَّت هذه المشكلة عن طريق صنع غذائها بنفسها! تقوم النباتات بهذه العملية، التي تُعرف بعملية البناء الضوئي، في تركيب متخصص بالخلية يسمى البلاستيدة الخضراء. يمكنك رؤية البلاستيدات الخضراء الموجودة في الخلايا النباتية في الصورة المجهرية الآتية.

## تعريف: البناء الضوئي

البناء الضوئي هو عملية تُحول بها النباتات الخضراء ثاني أكسيد الكربون والماء إلى سكريات، مثل الجلوكوز، وأكسجين في وجود ضوء الشمس.



**الشكل 1**

دعونا نتناول عملية البناء الضوئي بمزيد من التفصيل.

عندما تقوم النباتات بعملية البناء الضوئي، فإنها تمتص ثاني أكسيد الكربون والماء وتحولهما إلى سكريات، مثل الجلوكوز بشكل أساسي، وأكسجين باستخدام الطاقة الضوئية. قد تتوفر هذه الطاقة الضوئية من مصدر ضوء طبيعي مثل ضوء الشمس، أو مصدر ضوء صناعي، مثل المصباح. تحدث عملية البناء الضوئي أساسًا في أوراق النبات؛ حيث توجد غالبية

البلاستيدات الخضراء، ولكن قد تحتوي الأنسجة البرنشيمية لسيقان النبات أيضًا على بلاستيدات خضراء، للمساهمة بقدر بسيط في عملية البناء الضوئي.

### معادلة: البناء الضوئي

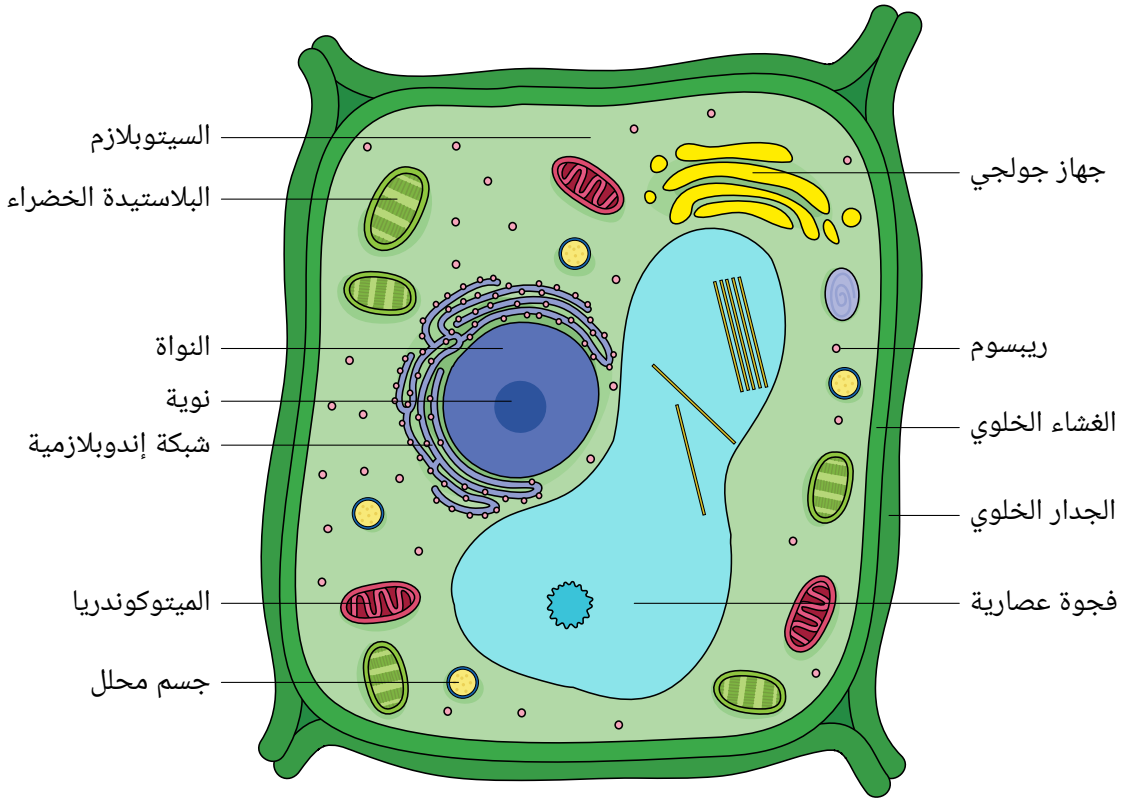
ثاني أكسيد الكربون + ماء (+طاقة ضوئية) ⟵ جلوكوز + أكسجين

توفر عملية البناء الضوئي مزايا أساسية للنبات. فالجلوكوز الذي ينتج من هذه العملية هو سكر يعمل مصدرًا لتغذية النبات؛ ما يسمح له بالنمو والتكاثر، ويساعده على القيام بالعمليات الحيوية الضرورية الأخرى. واحدة من العمليات الحيوية الضرورية هذه التنفُّس الخلوي، الذي يتكسر فيه الجلوكوز لإطلاق طاقة. يستخدم التنفُّس الخلوي الأكسجين؛ لذا فإن بعضًا من الأكسجين الناتج من عملية البناء الضوئي قد يُعاد استخدامه في عملية التنفس الخلوي.

### تعريف: التنفس الخلوي

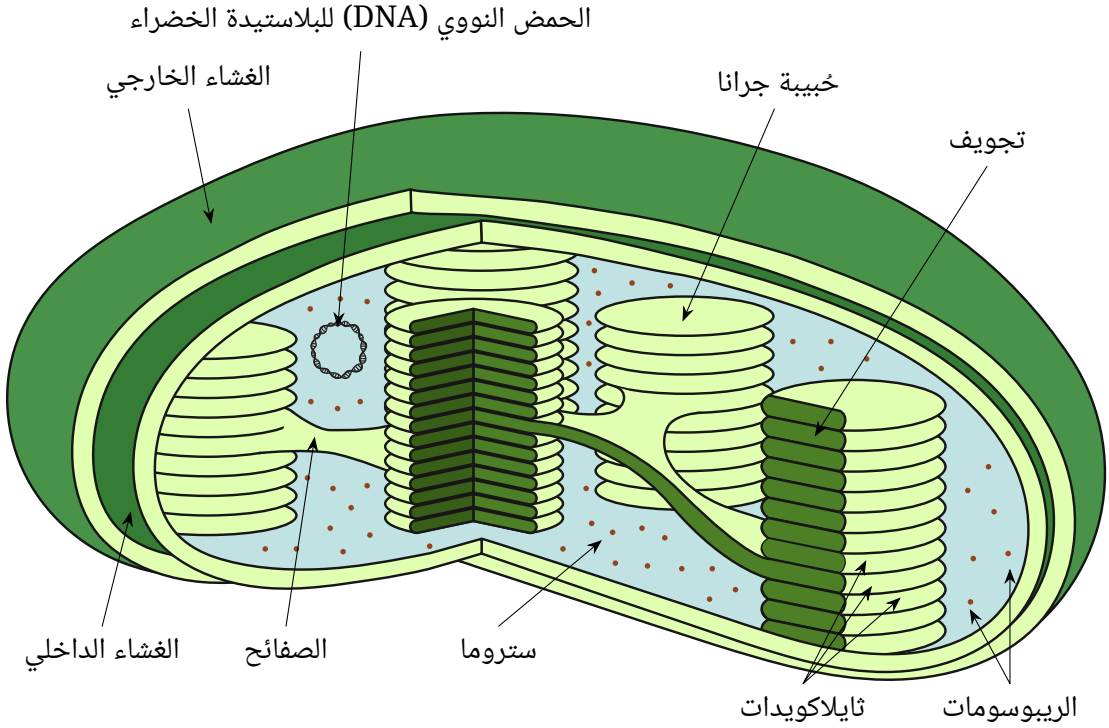
التنفس الخلوي هو عملية تحدث في الكائنات الحية وتتكسر خلالها المركبات التي تحتوي على الكربون (مثل الجلوكوز) لإطلاق طاقة في صورة جزيئات ATP.

يوضح الشكل 2 مخططًا بسيطًا للعُضَيَّات الرئيسية الموجودة في خلية نباتية. يمكننا رؤية البلاستيدة الخضراء بوضوح. عادة ما تحتوي الخلية النباتية على عدد كبير من البلاستيدات الخضراء قد يقارب المئات!




**الشكل 2**: صورة توضح العضيات والتراكيب الرئيسية الموجودة في خلية نباتية نموذجية.

يوضح الشكل 3 تركيب بلاستيدة خضراء واحدة بمزيد من التفصيل. البلاستيدات الخضراء هي أمثلة على العُضَيَّات المحاطة بغشاء مزدوج يفصل بين طبقتيه فراغ بين غشائي. يبلغ سُمك هذا الغشاء المزدوج تقريبًا 10 نانومترات أو 0.0000001 سنتيمتر فقط.




**الشكل 3**: صورة توضح تركيب البلاستيدة الخضراء، مع تحديد التراكيب الرئيسية بها.

توجد داخل البلاستيدة الخضراء حشوة سائلة تسمى السترومـا. تحتوي السترومـا على العديد من الإنزيمات، بالإضافة إلى الحمض النووي (DNA) والريبوسومات الخاصة بالبلاستيدة. وتحتوي أيضًا على حبيبات نشا تعمل باعتبارها مخازن للجلوكوز في صورة غير قابلة للذوبان. عند احتياج النبات لهذا الجلوكوز، تعود هذه الحبيبات إلى صورتها الأولى وهي جلوكوز سكر قابل للذوبان، وتنتقل في جميع أجزاء النبات لتُستخدم في عملية التنفس الخلوي. يوجد داخل السترومـا تراكيب قرصية الشكل في طبقات متراصة تسمى الثايلاكويدات. تُكون هذه الثايلاكويدات طبقات من الأقراص يبلغ عددها 15 قرصًا أو أكثر. تتراص الثايلاكويدات معًا في طبقات لتكون حُبيبة واحدة من الجرانا، ويشار إلى مجموعات الحبيبات هذه بالجرانا. ترتبط الجرانا بعضها مع بعضٍ بطَيَّات غشائية رقيقة تسمى صفائح، وهي تساعد في زيادة مساحة السطح المتاحة لامتصاص الطاقة الضوئية. داخل كل ثايلاكويد، يوجد فراغ مائي يسمى تجويف.

البلاستيدات الخضراء هي عُضَيَّات مميزة إلى حد ما. ذكرنا سابقًا، على عكس غالبية العُضَيَّات الأخرى، أن البلاستيدات الخضراء تحتوي على جزيء DNA والريبوسومات الخاصة بها. وهي أيضًا مُحاطة بغشاء مزدوج. تتشابه هذه السمات مع أنواع معينة من البكتريا. وقد دفع ذلك العلماء إلى الاعتقاد بأن البلاستيدات الخضراء ربما كانت في السابق كائنات بدائية النوى منفصلة كوَّنت علاقة تكافلية مع خلايا النباتات. ثم دُمجت بعد ذلك في خلايا أسلاف تلك النباتات وتطورت في النهاية إلى الخلايا النباتية التي نعرفها اليوم! تنطبق هذه النظرية أيضًا على الميتوكوندريا ووجودها في الخلايا النباتية والحيوانية؛ نظرًا لأنها دائمًا ما تحتوي على جزيء DNA والريبوسومات الخاصة بها، كما أنها مُحاطة بغشاء مزدوج.

### مثال ١: تذكُّر التراكيب الموجودة داخل البلاستيدة الخضراء

أي العبارات الآتية توضح العلاقة بين الجرانا والثايلاكويدات؟

أ. الثايلاكويدات هي تراكيب قرصية الشكل تُكوِّن طبقات متراصة تسمى الجرانا.

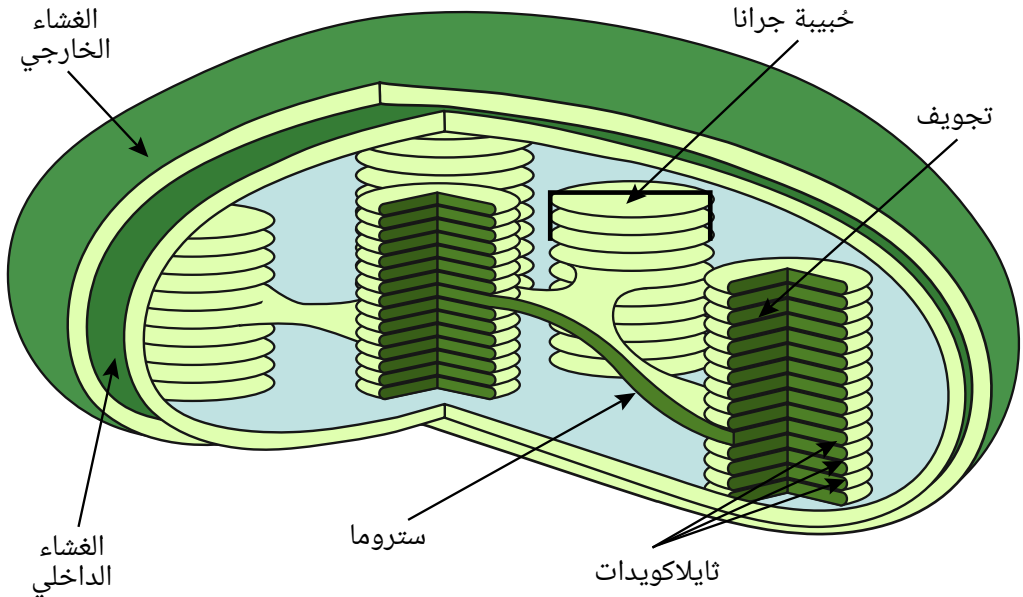
ب. تتجمع الجرانا الدائرية في طبقات متراصة لتُكون ثايلاكويدة واحدة.

ج. تتكون خلية الثايلاكويد الواحدة من عدة مكونات من الجرانا.

**الحل**

البلاستيدات الخضراء هي عُضَيَّات موجودة داخل الخلايا النباتية، وهي موقع حدوث عملية البناء الضوئي. يوجد العديد من التراكيب المتخصِّصة داخل البلاستيدة الخضراء التي تسمح لها بأداء هذه الوظيفة. لنلق نظرة على تلك التراكيب باستخدام الشكل الآتي:

**البلاستيدة الخضراء**




كما نرى في الشكل، فإن الثايلاكويدات تراكيب قرصية الشكل في طبقات متراصة داخل حشوة السترووما. هذه الثايلاكويدات لها مساحة سطح كبيرة تساعدها على القيام بوظيفتها في امتصاص ضوء الشمس لعملية البناء الضوئي. يوجد العديد من الثايلاكويدات في طبقات متراصَّة تسمى الجرانا، (مفردها: طبقة الجرانا).

من ثمَّ، فإن العبارة التي توضح العلاقة بين الجرانا والثايلاكويدات هي: الثايلاكويدات هي تراكيب قرصية الشكل تُكون طبقات متراصة تُسمى الجرانا.

هيا نتعرف بمزيد من التفصيل على وظائف كل تركيب من التراكيب المتخصصة الموجودة في البلاستيدة الخضراء.

تتمثل الوظيفة الأساسية للبلاستيدة الخضراء في أنها موقع حدوث عملية البناء الضوئي داخل الخلية النباتية. ولكي تستطيع البلاستيدة الخضراء القيام بهذه الوظيفة، يجب أن تكون قادرة على امتصاص الطاقة الضوئية. الصبغات هي جزيئات تمتص أطوال موجية محددة من الضوء وتعكس البعض الأخر. تحتوي أغشية الثايلاكويد الموجودة في

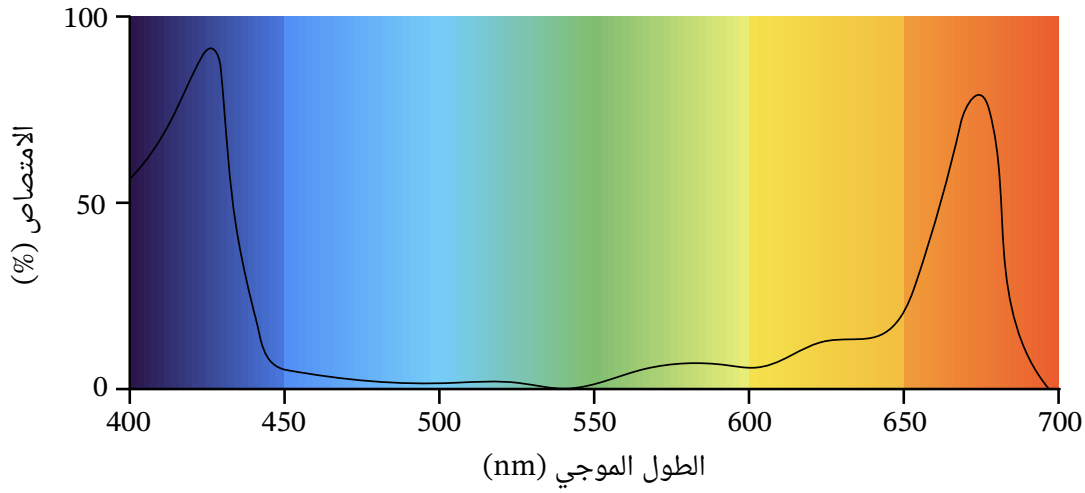
البلاستيدة الخضراء على صبغات متخصصة تسمى الكلوروفيل، وهي صبغات قادرة على امتصاص هذه الطاقة واستخدامها في عملية البناء الضوئي. عادة ما يتواجد الكلوروفيل في النبات على صورتين، هما الكلوروفيل أ والكلوروفيل ب. يوضح الشكل 4 أن صبغة الكلوروفيل أ يمكنها امتصاص الأطوال الموجية الحمراء والبرتقالية والزرقاء وأغلب الأطوال الموجية الصفراء، لكنها لا تستطيع امتصاص الكثير من الأطوال الموجية الخضراء. ولهذا السبب، يبدو الكثير من أوراق النبات التي تحتوي على الكلوروفيل خضراء للعين البشرية.

**مصطلح رئيسي: الصبغة**

الصبغات هي جزيئات تمتص أطوال موجية محددة من الضوء وتعكس أطوالًا موجية أخرى.

**تعريف: الكلوروفيل**

الكلوروفيل هو طائفة من الصبغات الخضراء توجد في البلاستيدات الخضراء في النباتات وتمتص الطاقة الضوئية اللازمة لعملية البناء الضوئي.




**الشكل 4**: طيف امتصاص الكلوروفيل أ. يمتص الكلوروفيل أ الأطوال الموجية الحمراء والبرتقالية والزرقاء، ولا يمتص الكثير من الأطوال الموجية الخضراء.

تُعرف العُضَيَّات التي تحتوي على صبغات بالبلاستيدات. وتُوصف البلاستيدات الخضراء بهذا الاسم بسبب لونها.

**مثال ٢: تفسير كيف تكيفت الثايلاكويدات لأداء وظيفتها**

كيف تكيفت الثايلاكويدات لأداء وظيفتها؟

أ. تحتوي الثايلاكويدات على صبغات البناء الضوئي داخل غشائها، لامتصاص الضوء.

ب. نسبة مساحة السطح إلى الحجم صغيرة في الثايلاكويدات؛ لهذا يمكن أن تحدث التفاعلات بشكل أسرع.

ج. تحاط الثايلاكويدات بغشاء مزدوج يسمح لها بالتحكم فيما يدخل ويخرج من البلاستيدة الخضراء.

د. تحتوي الثايلاكويدات على إنزيمات متخصصة تقوم بعملية التنفس.

**الحل**

الثايلاكويدات تراكيب قرصية الشكل موجودة داخل البلاستيدات الخضراء لخلايا النبات. تُكون الثايلاكويدات طبقات متراصة تسمى الجرانا، ووظيفتها هي مساعدة البلاستيدة الخضراء على القيام بعملية البناء الضوئي.

وبشكل أساسي، تكيفت الثايلاكويدات لتساعد البلاستيدات الخضراء على القيام بعملية البناء الضوئي؛ نظرًا لاحتوائها على صبغات البناء الضوئي داخل أغشيتها. تمتص صبغات البناء الضوئي، التي عادة ما تكون الكلوروفيل في النباتات الأرضية الزهرية أو الوعائية، ضوء الشمس المتاح وتنقله إلى مراكز التفاعلات، حيث تُستخدم الطاقة لإجراء تفاعلات البناء الضوئي.

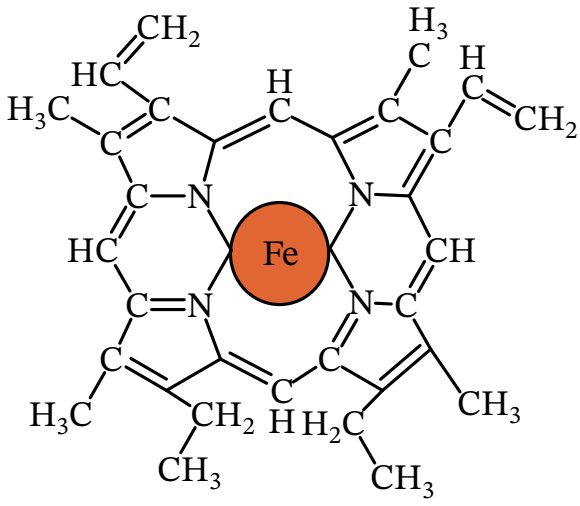
بالنظر إلى خيارات السؤال، نرى أن الخيار (أ) هو الإجابة الصحيحة. ومع ذلك، يمكننا التأكُّد من إجابتنا باستبعاد الخيارات الأخرى.

لن يكون الخيار (ب) صحيحًا؛ لأن تراكيب الثايلاكويدات القرصية الشكل توفر لها بالفعل نسبة مساحة سطح كبيرة إلى الحجم. بالإضافة إلى ذلك، فإنها تساعدها على تملك صبغات أكثر، وهو ما يرفع معدل تفاعلات البناء الضوئي. الخيار (ج) غير صحيح أيضًا؛ نظرًا لأن الثايلاكويدات غير محاطة بغشاء مزدوج، كما أنها لا تتحكم فيما يدخل أو يخرج من البلاستيدة الخضراء. فهذه هي وظيفة غشاء البلاستيدة الخضراء. بالنسبة للخيار (د)، فهو غير صحيح أيضًا؛ لأنه على الرغم من أن الثايلاكويدات قد تحتوي على إنزيمات متخصصة، فإن وجودها يساعد في عملية البناء الضوئي، وليس عملية التنفس. تُجرى عملية التنفس بواسطة عُضَيَّة مختلفة، وهي الميتوكوندريا.

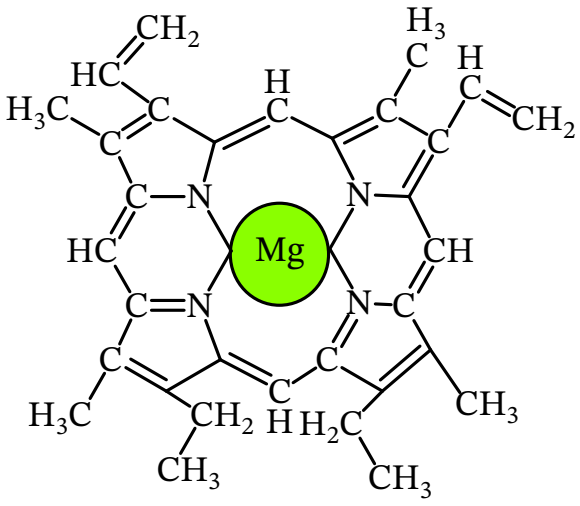
وعليه، تكيفت الثايلاكويدات لأداء وظيفتها بفضل احتوائها على صبغات البناء الضوئي داخل غشائها لامتصاص الضوء.

الكلوروفيل له تركيب معقد للغاية. يوضح الشكل 5 التركيب الجزيئي للكلوروفيل أ، وصيغته الكيميائية $C_{55}H_{72}O_5N_4Mg$. يُعتقد أن أيون المغنيسيوم الموجود في مركز الجزيء ضروري لتمكين الكلوروفيل من امتصاص الضوء. ما يثير الدهشة، كما نلاحظ في الشكل 5، فإن تركيب الكلوروفيل يشبه إلى حدٍّ كبير تركيب مجموعة الهيم الموجودة في هيموجلوبين خلايا الدم الحمراء للحيوانات!

مجموعة الهيم



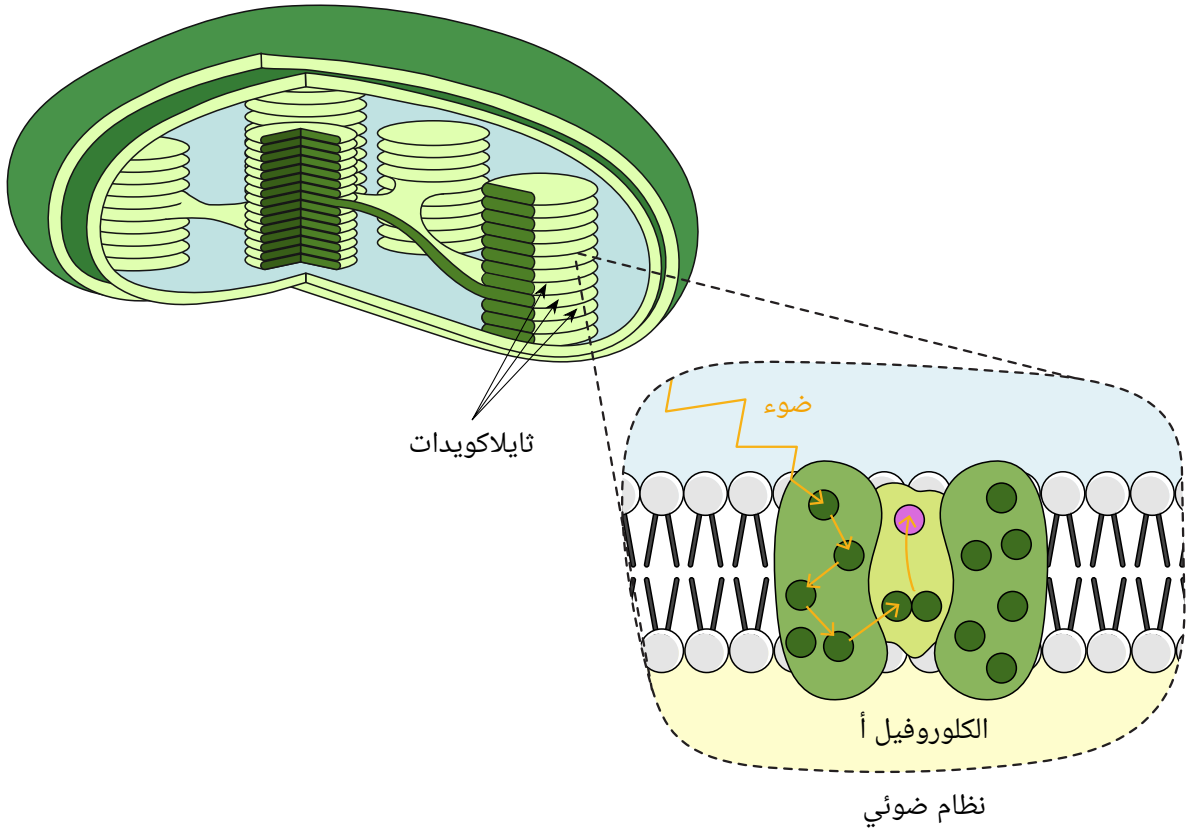

الكلوروفيل




**الشكل 5**: صورة توضح أوجه التشابه بين التراكيب الجزيئية للكلوروفيل أ ومجموعة الهيم الخاصة بالهيموجلوبين.

الكلوروفيل ليس الصبغة الوحيدة التي قد توجد في البلاستيدة الخضراء. قد تحتوي النباتات أيضًا على صبغات بناء ضوئي أخرى، مثل الزانثوفيل والبيتا كاروتين، وهما صبغتان تعطيان تراكيب النبات لونًا أصفر أو برتقاليًا أو مائلًا للحُمرة. هاتان الصبغتان غير متوافرتين بكثرة مثل صبغات الكلوروفيل، وهذا يفسر السبب وراء أن معظم أوراق النباتات خضراء اللون.

في أغشية الثايلاكويد، توجد الصبغات مثل الكلوروفيل داخل أنظمة ضوئية. يوضح الشكل 6 مخططًا مبسطًا لنظام ضوئي. وبشكل رئيسي، تكون وظيفة هذه التراكيب هي امتصاص ضوء الشمس واستخدامه في المرحلة الأولى من البناء الضوئي، التي تعرف بالمرحلة الضوئية. تتألف هذه المرحلة من سلسلة من التفاعلات التي تمتص الطاقة الضوئية وتستخدمها في تكسير جزيئات الماء لتوليد طاقة كيميائية في صورة جزيئات ATP.




**الشكل 6**: مخطط مبسط لنظام ضوئي يوجد في غشاء الثايلاكويدات. تمتص الصبغات الموجودة في النظام الضوئي الطاقة الضوئية، وهذا يُسبب إثارة للإلكترونات ($e^-$).

بالنسبة للمرحلة الثانية من البناء الضوئي، وهي المرحلة اللاضوئية (أو دورة كلفن)، فإنها تحدث في ستروما البلاستيدات الخضراء. الستروما متكيفة جيدًا للقيام بهذه الوظيفة؛ نظرًا لاحتوائها على الإنزيمات اللازمة للتفاعلات الكيميائية التي تحدث في المرحلة اللاضوئية.

**مثال ٣: تذكُّر مواقع حدوث التفاعلات الضوئية والتفاعلات اللاضوئية في البلاستيدة الخضراء**

أي من الجداول الآتية يوفق بين التراكيب داخل البلاستيدة الخضراء وتفاعل البناء الضوئي الذي يحدث في كل منها؟

أ.

| التركيب | الستروما | الصفائح |
|---|---|---|
| التفاعل | التفاعل الضوئي | التفاعل اللاضوئي |

ب.

| التركيب | الغشاء الداخلي | الغشاء الخارجي |
|---|---|---|
| التفاعل | التفاعل الضوئي | التفاعل اللاضوئي |

ج.

| التركيب | غلاف البلاستيدة الخضراء | الستروما |
|---|---|---|
| التفاعل | التفاعل الضوئي | التفاعل اللاضوئي |

د.

| التركيب | الثايلاكويد | الستروما |
|---|---|---|
| التفاعل | التفاعل الضوئي | التفاعل اللاضوئي |

**الحل**

البلاستيدات الخضراء هي عُضَيَّات متخصصة توجد في الخلايا النباتية، وتتمثل وظيفتها الأساسية في القيام بعملية البناء الضوئي. تكيفت البلاستيدات الخضراء عدة تكيفات سمحت لها بتنفيذ هذه الوظيفة؛ فعلى سبيل المثال، تحتوي البلاستيدات الخضراء على أنظمة ضوئية متخصصة تمتص الضوء أو تملك إنزيمات تُحفز تفاعلات البناء الضوئي.

توجد مرحلتان رئيسيتان في عملية البناء الضوئي: المرحلة الضوئية والمرحلة اللاضوئية (تُعرف كذلك باسم دورة كلفن).

تتطلب المرحلة الضوئية، كما يدل اسمها، طاقة ضوئية لكي تحدث. تحتوي ثايلاكويدات البلاستيدات الخضراء على تراكيب متخصصة داخل أغشيتها متكيفة لامتصاص الضوء، تسمى الأنظمة الضوئية. ومن ثَمَّ، تحدث المرحلة الضوئية أساسًا داخل الثايلاكويد، وتحديدًا في أغشية الثايلاكويد.

تحدث المرحلة اللاضوئية بعد المرحلة الضوئية؛ نظرًا لأنها تستخدم بعض النواتج التي تكونت في المرحلة الضوئية. تتطلب المرحلة اللاضوئية إنزيمات ومرافقات إنزيمات متخصصة، إلى جانب ثاني أكسيد الكربون الذي تمتصه أوراق النبات. توجد كل هذه المواد داخل ستروما البلاستيدة الخضراء، وهي وسط مليء بسائل تنتشر فيه التراكيب الأخرى. وعليه، فإن المرحلة اللاضوئية تحدث أساسًا داخل الستروما.

إذن، تكون إجابتنا عن هذا السؤال هي الخيار (د): الثايلاكويد موقع حدوث التفاعل الضوئي، والستروما موقع حدوث التفاعل اللاضوئي.

لنلخص ما تعلمناه في هذا الشارح عن تركيب البلاستيدات الخضراء.

## النقاط الرئيسية

- البلاستيدات الخضراء هي عُضَيَّات موجودة داخل الخلية النباتية، وهي موقع حدوث عملية البناء الضوئي.
- تُحاط البلاستيدات الخضراء بغشاء مزدوج، وتحتوي على ثايلاكويدات توجد في طبقات متراصَّة في الستروما تُسمى الجرانا.
- تحتوي البلاستيدات الخضراء على صبغات البناء الضوئي، التي عادة ما تكون الكلوروفيل أ والكلوروفيل ب، وعلى الرغم من ذلك، فإنها قد تحتوي أيضًا على صبغات أخرى مثل البيتا كاروتين والزانثوفيل.
- الثايلاكويدات هي موقع حدوث التفاعلات الضوئية لعملية البناء الضوئي، وتحتوي على صبغات البناء الضوئي الضرورية لهذه الوظيفة.
- الستروما هي موقع حدوث التفاعلات اللاضوئية لعملية البناء الضوئي، وتحتوي على الإنزيمات ومرافقات الإنزيمات الضرورية، بالإضافة إلى ثاني أكسيد الكربون.