كلية العلوم

القسم : علم الحياة

السنة : الرابعة

المادة : تركيب ضوئي

المحاضرة : الاولى/نظري/

{{ مكتبة A to Z }}

Facebook Group : مكتبة A to Z

2026

يمكنكم طلب المحاضرات برسالة نصية (SMS) أو عبر(What's app-Telegram)على الرقم 0931497960

الجمهورية العربية السورية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة طرطوس – كلية العلوم
قسم علم الحياة

التركيب الضوئي – محاضرة 1

الطاقة الضوئية والحقل الكهرومغناطيسي

تبحث الكائنات الحية عموماً عن مصادر الطاقة في وسطها المحيط لتبقى على قيد الحياة، فبينما تقوم العديد من الكائنات غيرية التغذية (حيوانات، فطريات، بعض النباتات الراقية المتطفلة مثل الحامول) بالحصول على الطاقة من المواد العضوية الجاهزة في الوسط، فإن الكائنات ذاتية التغذية كالطحالب والنباتات الخضراء وبعض الجراثيم تعمل على تصنيع مادتها العضوية اعتبارا من مواد لاعضوية (CO2, HNO3….) وتقوم بذلك بوجود مصدر طاقة كيميائية أو ضوئية.

الطاقة الكيميائية:

تستطيع المتعضيات الحية أن تحرر الطاقة من المركبات العضوية من خلال تفكيك روابطها بعملية الاستقلاب الخلوي مستخدمة الأنزيماتت ، ومن ثم تستخدم هذه الطاقة في عملياتها الحيوية.

مثلاً تعمل البكتيريا Nitrobacter and Nitrosomonas على أكسدة الآزوت وتحويل النشادر إلى نترات مستفيدة من الطاقة المتحررة نتيجة لذلك في إرجاع CO2 وإنتاج مادتها العضوية اللازمة لاحتياجتها في النمو والاستمرار على قيد الحياة.

ويتم ذلك بتكامل عمل البكتيريا الموجودة في التربة على الشكل الآتي:

تعمل بكتيريا النتروزوموناس Nitrosomonas والنتروكوكس Nitrococcus على تحويل آزوت المركبات العضوية إلى نتريت. والنتروباكتر Nitrobacter يتابع العملية إلى مرحلة النترات

وتسمى المتعضيات التي تستطيع الحصول على الطاقة اللازمة لاصطناع مادتها العضوية من تفكيك المركبات الكيميائية بالكائنات `ذاتية التغذية الكيميائية Chemoautotrophs أو ذات التركيب الكيميائي chemosynthesis.

الطاقة الضوئية:

يشكل ضوء الشمس المصدر الرئيسي للطاقة عند النباتات الخضراء الراقية والبكتيريا الخضراء المزرقة Cyanobacteria وتقوم هذه الكائنات باستخدام الطاقة الضوئية لتثبيت CO2 وإنتاج مادتها العضوية وتحرر O2 إلى الجو من خلال قيامها بعملية التركيب الضوئي Photosynthesis .

ولفهم آلية حدوث عملية التركيب الضوئي لابد من التعرف على طبيعة الضوء وطاقته وكيفية قياسها:

أولاً: طبيعة الضوء وطاقته:

تفترض نظريتان علميتان وفقا للعالمين نيوتن 1727 وماكسويل عام 1865 بأن الضوء هو تيار من الجسيمات وأن الضوء هو موجي في طبيعته وتعد كلتا النظريتين صحيحة في الوقت الحالي إذ يشار إلى الضوء على أنه ثنائي الطبيعة ويعرف الضوء بأنه مجموعة من الأمواج الكهرومغناطيسية electromagnetic radiation يمكن إدراكها بواسطة عين الإنسان ويشكل الطيف المرئي جزءاً صغيراً من هذه الإشعاعات.

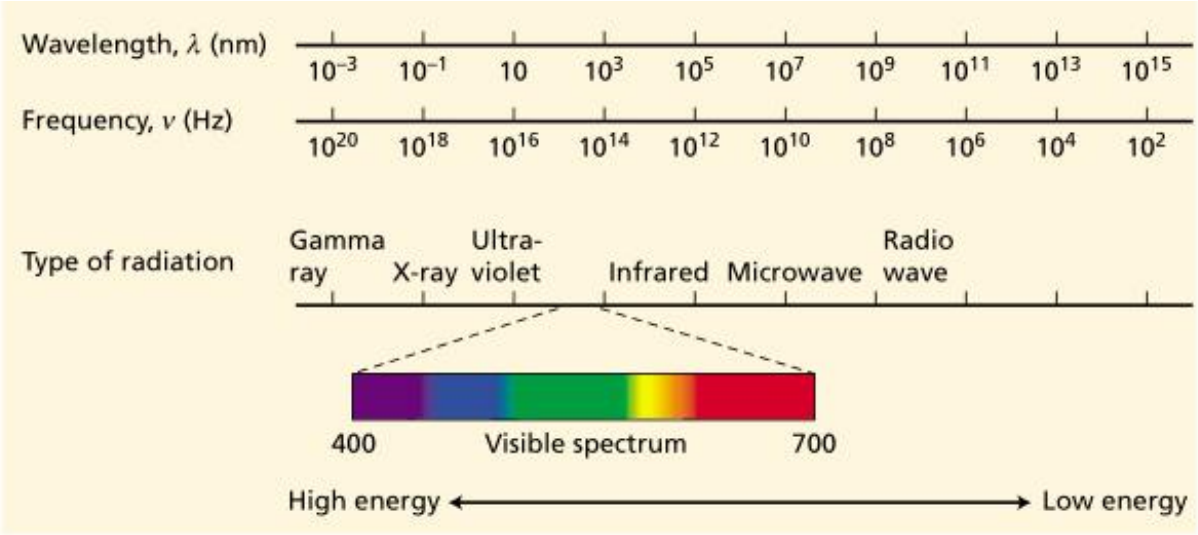
كما ينظر إليه على أنه تدفق لمجموعة من الجسيمات التي عرفت وفقا لاينشتاين وماكس بلانك لاحقاً بأنها الفوتونات Photons.

وهكذا تعد الموجات الضوئية مساراً لجزيئات متناهية في الصغر هي الفوتونات photons وتسمى طاقة الفوتون بالكوانتم Quantum، وتتناسب هذه الطاقة عكساً مع كمية الإشعاع الكهرومغناطيسي.

تشكل الشمس المصدر الرئيسي للضوء المرئي الذي يمثل شكلا من أشكال الطاقة الإشعاعية كما في الحرارة وموجات الراديو وأشعة X (أشعة رونتجن) ويشغل حيزاً ضيقاً من الأشعة الكهرومغناطيسية الصادرة عن الشمس، ويتحدد في المجال الواقع بين 390 نانومتر – 760 نانومتر ويكون هذا المجال محصوراً بين الأشعة فوق البنفسجية من جهة والأشعة تحت الحمراء من جهة أخرى.

تعكس النباتات الخضراء معظم الضوء الأخضر ولذلك يمكننا رؤيتها باللون الأخضر، ويمتد مجال الحقل المغناطيسي للأمواج الضوئية من طول أمواج الضوء الأزرق القصيرة 390nm إلى أطوال أمواج الأحمر الطويلة 760nm وبين

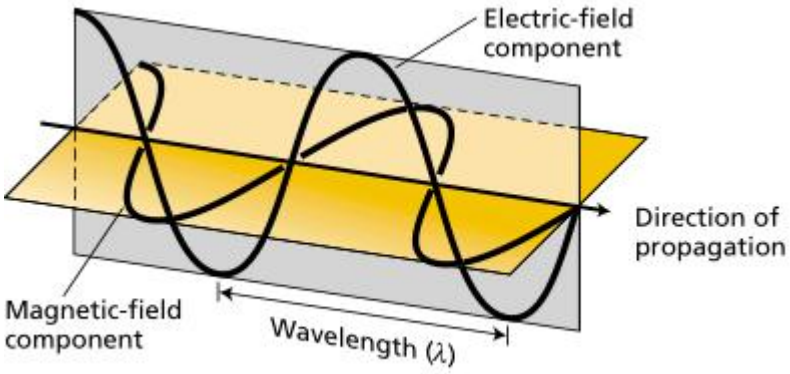
المجالين يوجد العديد من التقسيمات. والمجال الذي تستخدمه النباتات لإنجاز عملية التركيب الضوئي يقع بين 400 إلى 700 نانو متر ويسمى اصطلاحيا Photosynthetically Active Radiation (PAR) أي الإشعاعات الفعالة للتركيب الضوئي (الشكل1). تستخدم النباتات الأمواج الضوئية خارج المجال PAR في ظاهرة تعرف بالتشكل المورفولوجي الضوئي حيث تحتاج الضوء في العديد من التطورات على المستوى المورفولوجي والكيميائي الحيوي وبنية الخلية والوظيفة. وبالتالي فإن تأثير أطوال الأمواج الضوئية المختلفة على وظائف النبات وتشكله معقدة.



الشكل 1: طيف الأشعة الكهرومغناطيسية ومن ضمنها طيف الضوء المرئي بشكل منفصل.

(wavelength: طول الموجة- frequency: التردد – type of radation: نوع الأشعة – visible spectrum: الضوء المرئي- high energy: طاقة عالية – low energy: طاقة منخفضة).

وتختلف الأمواج الضوئية فيما بينها من حيث طاقة الفوتونات كما تختلف بحسب طول الموجة وسرعة ترددها (عدد الموجات المنطلقة في وحدة الزمن) ويقاس طول موجة الضوء عادة بالنانومتر وهو المسافة بين ترددين متتالين للموجة الواحدة (الشكل2).



الشكل 2: شكل توضيحي لحركة الأمواج الكهربائية والمغناطيسية ومفهوم طول الموجة.

(Electric- field component: مكونات الحقل الكهربائي – magnetic-field component مكونات الحقل المغناطيسي – direction of propagation: اتجاه الانتشار.

وكلما كان طول الموجة wavelength قصيراً كان طاقة الإشعاع عالية وكذلك كان تردد الموجه مرتفعا والعكس صحيح ويمكن التعبير رياضياً عن طاقة الفوتون كالآتي:

$$Q_e = h.v = h.c/\lambda$$

Q_e: طاقة الكوانتم الواحد من الشعاع بالجول او بالالكترون فولط.

h : ثابت بلانك (plank's constant= 6.625×10^{14} joule/sec).

V : تردد الموجة

C: سرعة الضوء في الفراغ 3×10^8 m.sec

λ: الطول الموجي لسيل الفوتونات ضمن ذلك الشعاع المرئي ويقدر بالنانومتر.

يعبر عن كمية الطاقة تبعا لمول واحد باسم الطاقة الإشعاعية المولية وتحسب كمايلي : $Q_e = L.h.c/\lambda$ حيث أن L هو عدد أفوكادو ويساوي 6.022×10^{23} . وتقدر الطاقة الإشعاعية المولية بالنسبة للأشعة المرئية بـ كيلوجول / مول أو كيلوكالوري / مول حيث كل 1كالوري = 4.18 جول.

ويمكن أن تقاس الطاقة التي يحملها الضوء بدراسة القوة الإشعاعية أو الشدة الضوئية التي تمثل عدد الفوتونات الساقطة على وحدة السطح خلال الزمن وتقدر باللوكس ولكن هذه الطريقة تهمل فيها طاقة الأشعة غير المرئية وطاقتها.

ثانياً: صبغات التركيب الضوئي

يتم امتصاص الضوء عند النباتات الراقية والطحالب من قبل الصبغات الكيميائية والتي تمثل جزيئات عضوية تستطيع امتصاص أمواج ضوئية محددة بفضل وجود روابط مضاعفة في تركيبها الكيميائي، ولا تعد جميع الصبغات هامة في اقتناص الطاقة الضوئية اللازمة للتركيب الضوئي، وتصنف وفقاً لذلك صبغات التركيب الضوئي في ثلاث مجموعات:

اليخضور chlorophyll وهو الصباغ الرئيسي في عملية التركيب الضوئي - الكاروتينوئيدات carotenoids و الفيكوبيللينات phycobilins وهاتان المجموعتان هما صبغات ملحقة باليخضور.

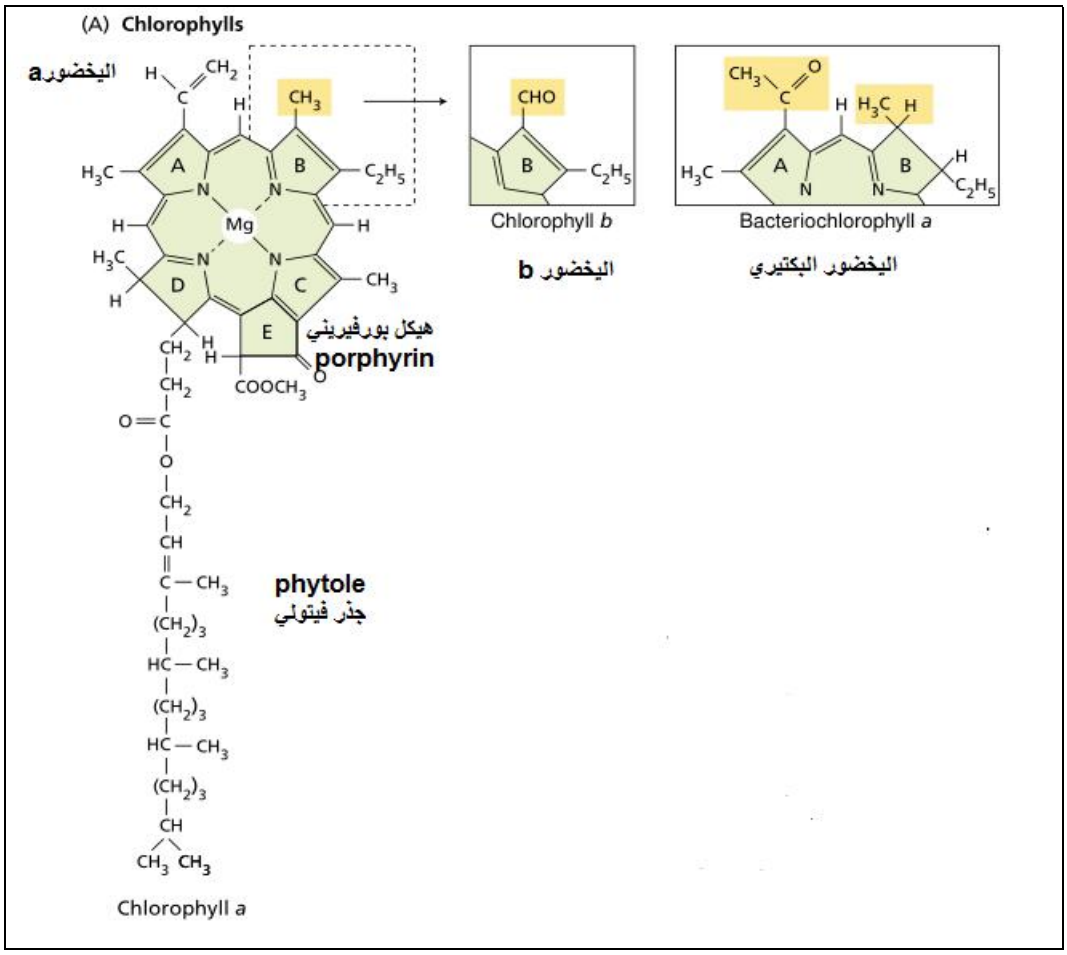
توجد صبغات التركيب الضوئي في الصانعات chloroplasts عند النباتات الراقية وفي حاملات الصبغة chromatophores عند الطحالب، او في كييسات صغيرة حرة في السيتوبلازم عند البكتيريا ذات التركيب الضوئي.

أولاً: الصبغات اليخضورية:

يطلق على الصبغات اليخضورية اسم الصبغات الفعالة وذلك لدورها الهام الفعال في عملية التركيب الضوئي، وتبدو هذه الصبغات خضراء اللون في المحاليل. وتكسب أوراق النباتات لونها الأخضر، وهي ثابتة البنية العامة عند جميع المتعضيات ذات التركيب الضوئي ويوجد أكثر من نوع من اليخضور وتختلف عن بعضها البعض بالجذور الكيميائية.

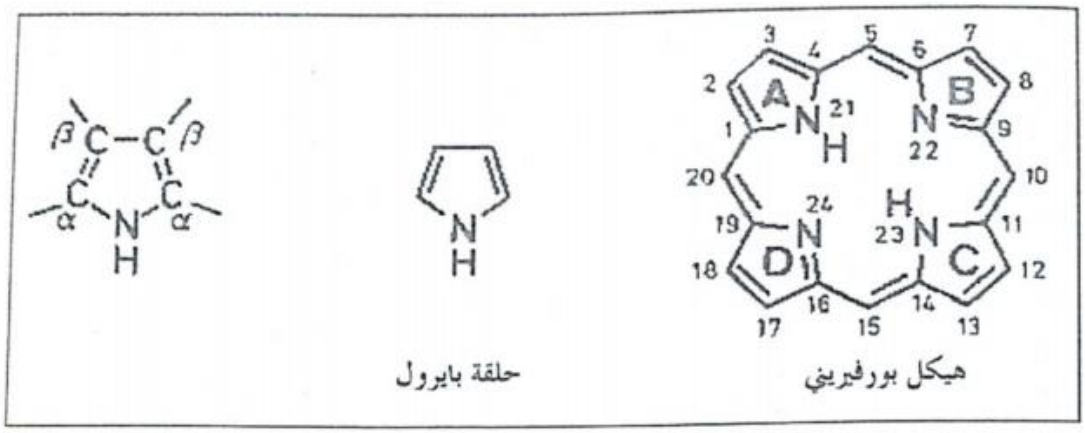
ثانيا: بنية اليخضور وأنواعه:

بين العلماء عند دراستهم للبنية التفصيلية لليخضور أنه يتكون من هيكل رباعي حلقة البايرول ويدعى بالهيكل البورفيريني وجذر فيتول مرتبط به (الشكل1)،



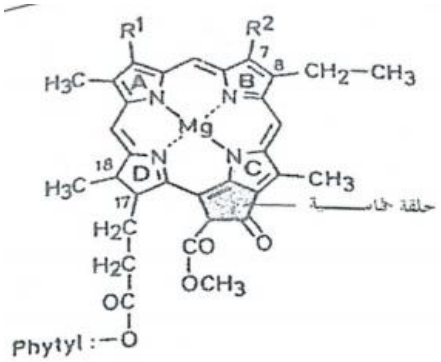
الشكل 3: الهيكل البورفيريني لجزيء اليخضور a والفرق بينه وبين اليخضور b واليخضور البكتيري.

يتكون جزيء اليخضور بشكل أساسي من ارتباط أربع حلقات بايرول معا بجذور ميتيلية (-CH=) وتتم الإشارة إلى الحلقات الأربع بـ A,B,C,D ويتم ترقيم ذرات الكربون في الهيكل من 1إلى 20 (الشكل1)، والبايرول (الشكل2)وهو مركب حلقي عضوي يتكون 4 ذات كربون وذرة آزوت ترتبط معاً في بنية حلقية تحتوي روابط مشتركة مفردة ومضاعفة ويشار إلى ذرات الكربون المجاورة لذرة الآزوت بـ α بينما يشار إلى الذرتين الأخريتين بـ ، ويحتوي الهيكل البورفيرني الذي يميز جزيئات اليخضور على أيونات المغنزيوم الذي يضمها إليه، وتجدر الإشارة إلى أن هذا الهيكل ذاته يميز الهيموغلوبين والسيتوكرومات وأنزيمات البيروكسيداز إذا ضم أيونات الحديد ويميز جزيئات فيتامين B_{12} إذا احتوى الكوبالت.



الشكل2: لحلقة البايرولية والهيكل البورفيريني وطريقة ترقيم ذرات الكربون.

إن عدد الروابط المضاعفة وتناوبها مع الروابط البسيطة هو الذي يكسب جزيئة اليخضور خاصية امتصاص الضوء والتلون، ويشكل مركب البايرول الحلقي الحاوي على النتروجين الحجر الأساس في تركيب جزيئة اليخضور.



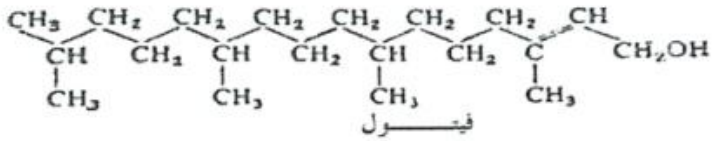
الشكل3: بنية جزيئة اليخضور

تحمل ذرات الكربون βالثمانية عدداً من الأيونات والجذور الكيميائية نذكر منها:

تحمل ذرتا الكربون 18- 17 للحلقة البايرولية D ذرتي هدروجين إضافيتين تلعبان دورا في امتصاص اليخضور للأشعة الطويلة. وتحمل الحلقة البايرولية C حلقة خماسية إضافية ترتبط بزمرة كربوكسيلية مؤسترة بالميتانول مما يؤدي لنشوء زمرة ميتيل كاربونيل -CO-O-CH3 ، كما تحمل ذرات الكربون 2 و12و 18 جذورا ميتيلية وذرة الكربون 8 جذرا ايتيلياً. (الشكل 3). وتحمل ذرة الكربون D جذر بروبانوئيلي وهو مرتبط بدوره بجذر الفيتول.

يعد جذر الفيتول كحولا طويل السلسلة C20H39OH ينتمي إلى أشباه الإيزوبرين ويتألف من أربع وحدات من الإيزوبنتيل خماسية الكربون (الشكل4). وهو يكسب جزيئة اليخضوره خاصية دهنية، ويمنع تجمدها في درجات الحرارة المنخفضة ويعيق انحلالها في الماء الموجود ضمن الخلية، ويسهل انحلال اليخضور مخبرياً في المذيبات العضوية كالأسيتون والكحول الميتلي، وله دور هام في تثبيت جزيئة اليخضور في الأغشية الثايلاكوئيدية ضمن الصانعات الخضراء، وذلك عن طريق انغماسه ضمن طبقتي الدسم لهذه الأغشية. يمكن إثبات دور جذر الفيتول

باستبداله كيميائيا بجذر ميتانولي او ايتانولي ويسمى المركب الناتج من إزالة الفيتول من الكلوروفيل باسم كلوروفيليد، وبالتالي عندما يستبدل بما سبق تسمى المركبات الناتجة ميتيل كلوروفيليد او ايتيل كلورفيليد، وينحل كل منهما بسهولة في الماء، ويمكن بلورة تلك المركبات الناتجة أيضاً.



الشكل4: بنية جذر الفيتول

يتمتع الهيكل البورفيريني بخاصية شديدة القطبية وخاصة الحلقة الخماسية أي أنه محب للماء وبالتالي نجد ان جزيئة اليخضور تتمتع بخاصية انحلال مزدوجة، مما يساعد اليخضور على القيام بوظائفه الحيوية ضمن الخلية.

تكون البنية العامة لليخضور ثابتة عند جميع المتعضيات التي تقوم بعملية التركيب الضوئي ويوجد أكثر من نوع من اليخضور تختلف عن بعضها في بعض الجذور الكيميائية نذكر منها:

1- اليخضور (أ) (a) chlorophyll:

يتمتع اليخضور أ بالصيغة الإجمالية التالية: $(C_{55}H_{22}O_5N_4)Mg$ ويشكل الصبغة الرئيسية في عملية التركيب الضوئي إذإنه يشكل المركز التفاعلي لكلمن النظاميين الضوئيين الأول والثاني عند النباتات الراقية والطحالب كما سنرى لاحقاً، كما ان نسبته في الصانعات الخضراء تفوق نسب جميع أنواع اليخضور الأخرى. ففي النباتات الراقية تكون نسبة اليخضور a أكبر من نسبة اليخضور b بثلاث إلى أربع مرات وفي الطحال 5-12 مرة ويتراوح وزنه في الاوراق من 0.2- 0.8% من الوزن الجاف.

2- اليخضور ب (b) chlorophyll: يتمتع هذا اليخضور بالصيغة الإجمالية الآتية $(C_{55}H_{22}O_6N_4)Mg$ ويوجد بشكل مترافق مع اليخضور (a) ولكن بنسبة أقل عند جميع النباتات الراقية ومعظم الطحالب. وقد يغيب كليا عند بعض الطحالب مما يولد اعتقادا لدى البعض بأن دوره ثانوياً في عملية التركيب الضوئي. وما يميز اليخضور b عن اليخضور

a بنيويا هـو احتواءه على زمرة ألدهيدية -CHO بدل الجذر الميتلي -CH3 في الموقع R2 على حلقة البايرول B ويقود الاختلاف البنيوي إلى:

- نقصان في انحلالية اليخضور b في المذيبات العضوية مقارنة معع اليخضور a مما يسهل عملية الفصل العمودي لهاتين الصبغتين عن بعضهما.
- تغير في مجال امتصاصه الضوئي إذ يصبح أضيق منهعند اليخضور a
- تغير في اللون إذ يبدو هذا اليخضور أخرا مصفرا بينما يكون اليخضور a ذو لون أخر مزرق.

3- اليخضور ج chlorophyll c :

يمثل اليخضور (ج) الصبغة المميزة عند الطحالب البنية phaeophyaceae وبعض المشطورات Bacillariophycaeae يشبه اليخضور الكلوروفيليد من الناحية البنيوية، إذ يغيب الجدذر الفيتولي الذي جرى استبداله بجذر كاربوكسي الفينيل -CH=CH-COOH إضافة إلى ذلك توجد عند هذا اليخضور رابطة مضاعفة بين ذرتي الكربون 17و 18.

يوجد اليخضور c بشكلين هما chl.c1 و chl.c2 وبينما يكون النمط الثاني موجود دوما يغيب الأول عند بعض المجموعات الطحلبية.

4- اليخضور د (chlorophyll d): يوجد هذا اليخضور بكميات قليلة غلى جانب اليخضور a عند الكثير من الطحالب الحمراء Rodophyta وكان يعتقد في الماضي أنه يشكل صبغة مستقلة وإنما مركبا وسيطا في خطوات تحلل اليخضور ويختلف هذا اليخضور بنيويا عن اليخضور a بانه يحمل في الموقع R1 جذر فورميل -O-CHO- بدلا من الجذر الفينيلي -CH=CH2.

5- اليخضور البكتيري أ Bacterio-chlorophyll a :

يحل هذا اليخضور ذو الصيغة المجملة (C55H74O6N4)Mg محل اليخضور a الذي يغيب كليا عند البكتيريا، وهو يمثل الصبغة الرئيسية عند البكتيريا ذات التركيب الضوئي، كالبكتيريا الخضراء المزرقة Cyanobacteria، والبكتيريا الارجوانية الكبريتية Chromatiaceae.

يختلف هذا اليخضور بنيويا عن اليخضور a في موقعين:

تحمل الحلقة البايرولية A في الموقع R1 جذراً استيلياً بدلاً من الجذر الفينيلي.

تحمل الحلقة البايرولية B ذرتي هيدروجين إضافيتين في الموقعين 7 و8 مما يؤدي إلى زوال الرابطة المزدوجة في هذه الحلقة.

يؤدي احتواء هذا اليخضور على ذرات هدروجين إضافية إلى انحراف مجال امتصاصه الضوئي باتجاه الامواج تحت الحمراء الطويلة.

كما توجد أشكال أخرى لليخضور البكتيري، ومنها اليخضور البكتيري ب(Bacteriochlorophyll b) الذي يوجد عند البكتيريا الأرجوانية اللاكبريتية Rhodospirillaceae، إضافة إلى أنماط أخرى من اليخضور البكتيري (e, d, c) والتي تختلف عن اليخضور a بأنه يحل عندها جزيئة كحول أخرى هي فارنسول Farnesol محل الجذر الفيتولي Phytol. توجد هذه الصبغات عند البكتيريا كلوروبيوم Chlorobium من البكتيريا الخضراء الكبريتية. وكانت هذه الصبغات الثلاث الأخيرة تدعى سابقاً بالبكتوفيريدين أو يخضور الكلوروبيوم وتمتص هذه الصبغات الضوء في مجال الأشعة تحت الحمراء.

الصبغة	R_1	R_2	7	8	18 , 17
يخضور Chl(a)	$-CH=CH_2$	$-CH_3$	–	$-C_2H_5$	–
يخضور Chl(b)	$-CH=CH_2$	-CHO	–	$-C_2H_5$	-
يخضور بكتيري B.Chl(a)	$-CO-CH_3$	$-CH_3$	-H	$-C_2H_5$ و-H	-
يخضور بكتيري B.Chl(b)	$-CO-CH_3$	$-CH_3$	-H	$=CH-CH_3$	-
طليعة اليخضور	$-CH=CH_2$	$-CH_3$	-	$-C_2H_5$	رابطة مزدوجة

الشكل5: مواقع الاختلاف بين أنواع اليخضور المختلفة وطليعة اليخضور.

مكتبة

A to Z

Group

تواصي المحاضرات

phon