التمثيل الضوئي Photosynthèse

صبغات و تركيب جهاز التمثيل الضوئي

مقدمة

يعتمد استمرار وجود النباتات ككائنات حية على كفاءتها في اصطياد و نقل و تخزين و استهلاك الطاقة- و تعتبر الشمس هي مصدر كل صور الطاقة في غلافنا الحيوي Biosphère – و النباتات الخضراء عن طريق جهاز التمثيل الضوئي المحكم و المتقن فإنها تمتص طاقة الضوء المرئي و تحولها إلى :

1- طاقة كيميائية (في الروابط الكيميائية) في المركب الكيميائي الغني بالطاقة و هو أدينوزين ثلاثي الفوسفات Adenosine triphosphate (ATP).

2- قوة اختزالية في صورة المرافق الإنزيمي المختزل نيكوتين أميد أدنين داى نيكليوتيد فوسفات Nicotinamide adenine dinnucleotide phosphate ($NADPH^{+} + H^{+}$)

و هذان المركبان يقودان التفاعلات المؤدية إلى تحويل ثاني أكسيد الكربون إلى المواد الكربوهيدراتية و التي تمثل مصدرا للطاقة في الخلية و تشكل مواد خام لتخليق البروتين و الدهون و المركبات النباتية الأخرى.

و تحدث عملية التمثيل الضوئي و التي نربطها عادة بإنتاج المواد الكربوهيدراتية، في جهاز التمثيل الضوئي (البلاستيدات الخضراء) و هو مجهز بطبقات معقدة من الأغشية و الصبغات – ويأسر أو يصطاد الطاقة الضوئية و يحولها إلى طاقة كيميائية- و سنبدأ دراستنا لعملية التمثيل الضوئي بدراسة الصبغات التي تلعب دورا مهما في هذه العملية.

الصبغات المشتركة في عملية التمثيل الضوئي

من الصعب أن يتصور الإنسان أن توجد أو تنشأ الحياة بدون امتصاص و تحويل الطاقة الإشعاعية إلى طاقة كيميائية. لذا قال العالم جلاس (إن الحياة هي ظاهرة كيموضوئية) و المركبات الأكثر أهمية في تحويل الطاقة الضوئية إلى طاقة كيميائية في النبات هي الصبغات التي توجد داخل البلاستيدات الخضراء (أو حاملات الصبغات Chromatophores) و يبدأ النبات عملية التمثيل الضوئي من خلال هذه المكونات و العضيات.

1- صبغات الكلوروفيل (اليخضور)

تعتبر الكلوروفيلات، تلك الصبغات الخضراء في النبات، من أهم الصبغات النشطة في عمليـــة التمثيـل الضوئي. و يمكننا تمييز تسعة أنواع منها علـــى الأقـــل هـــي: كلوروفيـــلات أ، ب، ج، د، ه، و الكلوروفيـــلات البكتيرية أ، ب، و كلوروفيلات الكلوروبيوم 650، 660.(الكلوروبيوم هي إحدى أجنـــاس البكتـــيريا التـــي تتبـــع Sclizomycetes و اسم الجنس يعني عربيا البكتيريا الملونة).

يعتبر كلا من كلوروفيل أ، ب من أكثرها معرفة و سيادة و يوجدان في جميع الكائنات ذاتية التغذية فيمـــا عدا البكتيريا المحتوية على الصبغات، و من الجدير بالذكر أن كلوروفيل ب لا يوجد فـــي كـــل مـــن الطحـــالب الخضراء المزرقة و البنية الحمراء، و لون كلوروفيل أ أخضر مزرق أما لون كلوروفيل ب فهو أخضر مصفر.

توجد كلوروفيلات ج، د، ه، فقط في الطحالب و تكون مختلطـــة مـــع كلوروفيـــل أ . أمـــا الكلوروفيـــل البكتيري أ، ب، و كلوروفيل الكلوروبيوم فتوجد في بكتيريا الضوء تمثيلية.

التركيب الكيميائي للكلوروفيل

يتركب جزيء الكلوروفيل من حلقة بورفيرين (حلقة مركبة من 4 حلقات بيرول C_4H_4) ، و تحتـــوي في وسطها على ذرة مغنزيوم و تمتد من إحدى حلقات البيرول الأربع سلسلة كحول الفيتول، و التركيب الجزيئـــي له يظهر في الشكل رقم( ).

و ترتبط سلسلة الفيتول برابطة استر مع مجموعة الكربوكسيل لذرة الكربون السابعة في حلقة البورفيرين

و يتكون كحول الفيتول من سلسلة طويلة كارهة للماء تحتوي على رابطة زوجية واحدة.

و الفرق بين كلوروفيل أ، ب يتركز في ذرة الكربون الثالثة من حلقة البورفـــيرين، حيـــث يتصـــل بـــها مجموعة مثيل CH_3 في كلوروفيل أ، و مجموعة الدهيد HC=O في كلوروفيل ب.

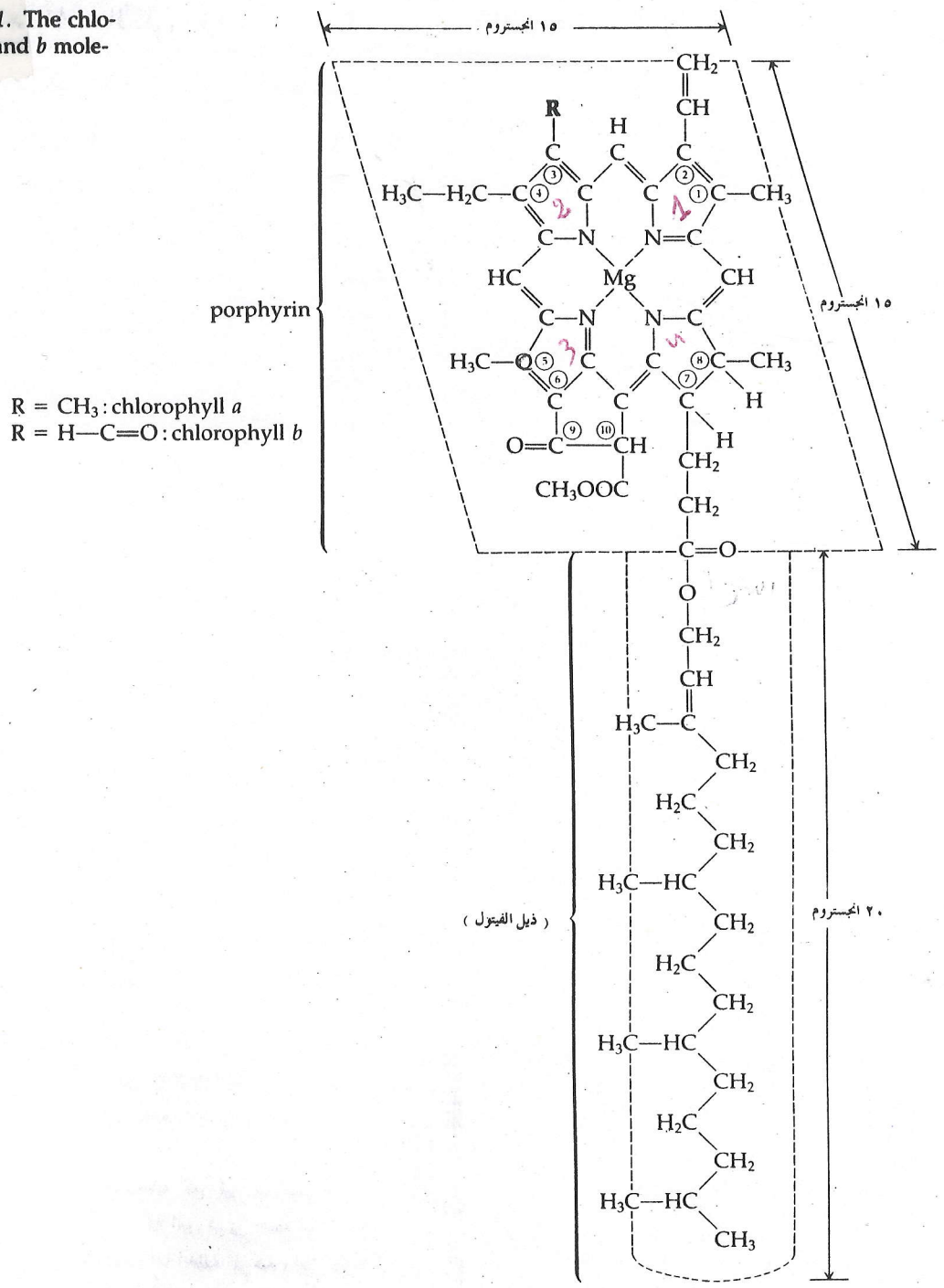
بالإضافة إلى هذه الفروق الكيميائية البسيطة توجد فروق أخرى فـــي أطيـــاف الامتصـــاص. و طيـــف الامتصاص هو قياس لدرجة امتصاص المادة للضوء ذي الألوان المختلفة، أي ذي أطوال الموجات المختلفة.

و طيف الامتصاص يدل على العلاقة بين الامتصاص و بين طول الموجة الضوئية المقدرة بالنانومتر.

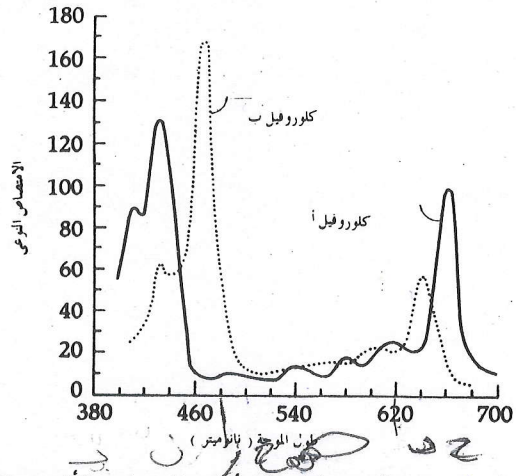
1 نانومتر = 1/1000 مكرون= 1/1000 ملم.

و يوضح الشكل رقـــم ( ) أطيـــاف الامتصـــاص لكـــل مـــن كلوروفيـــل أ، ب كمـــا قـــدر بجـــهاز الاسبكتروفوتومتر أي جهاز قياس الأطياف الضوئية.

Figure 12–1. The chlorophyll *a* and *b* molecule.



شكل ١٢ – ١ : جزيء كلوروفيل أ ، ب



شكل ١٢ - ٢ : أطياف الامتصاص لكل من كلوروفيل أ ، ب المستخلص بالأثير (خلاصات أثيرية ether)

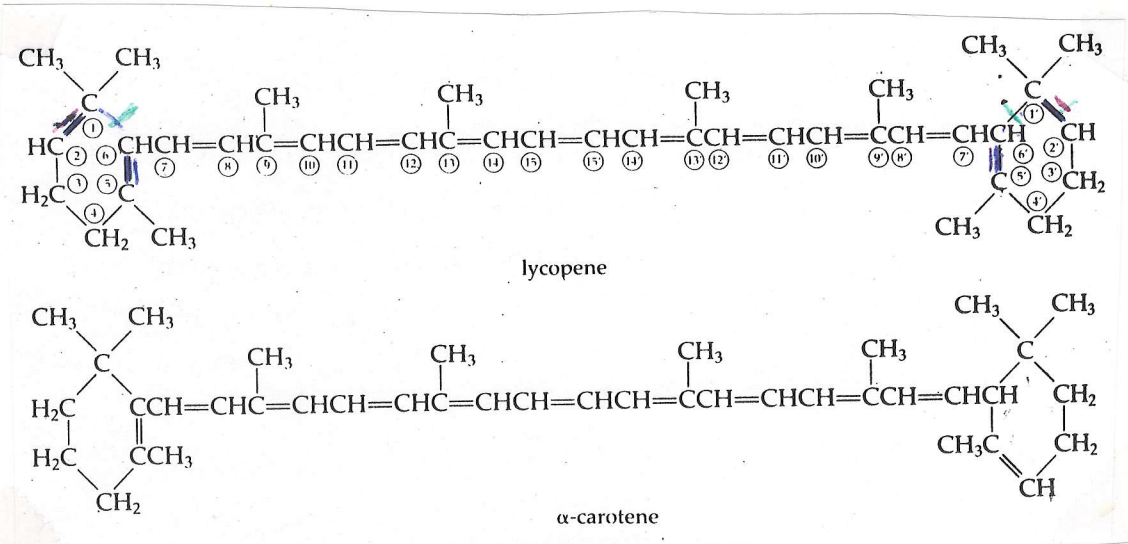
يظهر كل من كلوروفيل أ، ب دورات امتصاص في المنطقة الزرقاء -البنفسجية و المنطقة الحمراء البرتقالية من الطيف المرئي أو المنظور. لاحظ أن أقل امتصاص لكل من كلوروفيل أ، ب يكون أو يحدث في المنطقة الخضراء و الصفراء أي الموجات من 500-600 نانومتر.

و أطياف الامتصاص التي ذكرناها سابقا تختص بمستخلص الكلوروفيل في المذيبات العضوية -و تختلف أطياف الامتصاص للكلوروفيل عند قياسها أو تقديرها في الأوراق الحية *in vivo* في مكانه و موضعه الطبيعي- كذلك تختلف تبعا لنوع المذيب المستخدم في الاستخلاص - و كذلك تختلف ذروات الامتصاص ببضع نانومترات تبع المصدر الكلوروفيل المستخلص من الأنواع النباتية المختلفة.

2- صبغات الكاروتينويدات

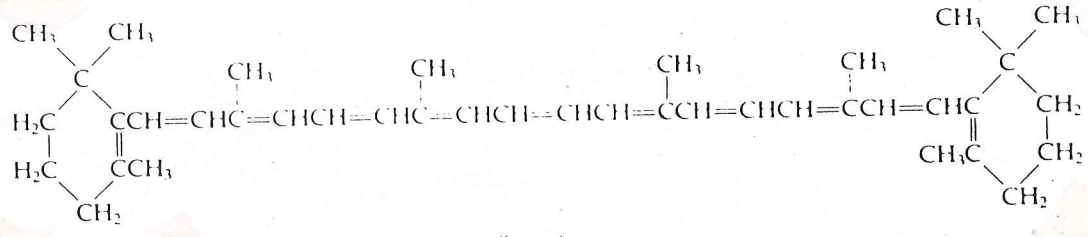
الكاروتينويدات هي مركبات دهنية واسعة الانتشار في الحيوانات و النباتات و يتدرج لونها من الأصفر إلى الأرجواني، و تنتشر الكاروتينويدات بتركيزات مختلفة في جميع النباتات الراقية تقريبا، و كذلك في العديد من الكائنات الدقيقة بما فيها الطحالب الحمراء و الخضراء و بكتريا التمثيل الضوئي و الفطريات. و لقد تم عزل أول أفراد مجموعة الكاروتينويدات و هو الكاروتين من جذور نبات الجزر و منه اشتق الاسم سنة 1831م.

و ظل الأمر كذلك حتى عام 1925م حيث استطاع العديد من الباحثين تحديد التركيب الكيميائي لبعض الكاروتينويدات بدقة. و تعتبر الكاروتينويدات الموجودة طبيعيا مشتقات لمركب الليكوبين Lycopene و هي صبغة حمراء توجد في ثمار الطماطم و العديد من النباتات الأخرى، و تتكون من سلسلة مستقيمة من الهيدروكربونات غير المشبعة – و هذه السلسلة تتكون من وحدتين متماثلتين طبق الأصل و متصلتين مع بعض برابطة زوجية بين ذرتي الكربون 15،15 . و الرمز الكيميائي العام هو ($C_{40}H_{51}$) – و نورد هنا ثلاثة أنواع مختلفة من الكاروتينويدات مع تركيباتها الجزيئية و هي الليكوبين و ألفا كاروتين و البيتا كاروتين شكل ( ).

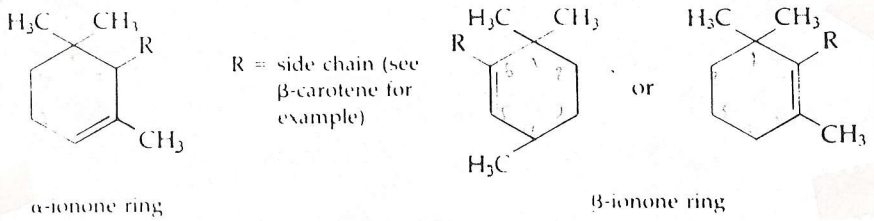


lycopene

α-carotene



β-carotene



α-ionone ring

β-ionone ring

يعتبر البيتا كاروتين من أكثر الكاروتينويدات و أهمها وجودا و انتشارا في أنسجة النباتات و لونه أصفر برتقالي و يختلط به الفا كاروتين عادة بنسب تتراوح بين 0-35% و الفرق الكيميائي بين الفا كاروتين و البيتا كاروتين يتلخص في أن البيتا كاروتين تحتوي على حلقتين من حلقات بيتا أيونون أما الفا كاروتين فإنها تحتوي على حلقة من ألفا أيونون و حلقة من البيتا أيونون -لاحظ ذلك في تركيباتها الجزيئية السابقة.

و الكاروتينويدات التي تتكون فقط من الكربون و الهيدروجين تسمى كاروتينات Carotenes أما التي تحتوي على الكربون و الهيدروجين و الأكسيجين فتسمى الزنثوفيلات Xanthophylls. و على هذا الأساس فان مجموعة الكاروتينات ينتهي اسمها بالمقطع (ene-) و أفراد مجموعة الزنثوفيلات ينتهي اسمها بالمقطع (in-). و الزنثوفيلات أوسع انتشارا و وجودا في الطبيعة من الكاروتينات، و في الأوراق الخضراء النامية فان تركيز الزنثوفيلات إلى الكاروتينات في حدود 1:2 .

الدور المحتمل للكاروتنويدات في النبات

تركزت معظم الدراسات السابقة على الدور الفيزيولوجي للكاروتنويدات حول علاقتها بفيتامين أ ، و التغذية الحيوانية، أما في السنوات الحديثة فقد وجه العلماء انتباههم إلى الدور المحتمل أن تلعبه الكاروتينويدات في النبات، و يوجد دوران على الأقل قد أقيم الدليل عليهما و هما:

1/ وقاية الكلوروفيل من الأكسدة الضوئية Photooxidation .

2/ امتصاص و نقل الطاقة الضوئية إلى كلوروفيل أ.

وقاية الكلوروفيل من الأكسدة الضوئية

تعتبر الطفرة الخضراء المزرقة من طحلب Rhodopseudomonas spheroides من الوجهة العلمية خالية من الكاروتينويدات، لذا فإنها تعاني من الأكسدة الضوئية للكلوروفيل. و هذه الطفرة تنمو و تمثل ضوئيا تحت الظروف اللاهوائية، أما الطفرة الخضراء الشاحبة من طحلب Clamydomonas فخالية من الكاروتينويدات تماما. و كما هو متوقع فان هذه الطفرة يجب أن تنمو في الظلام تماما و تموت إذا نمت في الضوء. في الواقع عدد قليل من الطفرات الكلوروفيللية الذي ينقصها الكلوروفيل هي في الواقع طفرات كاروتينويدية ينقصها الكاروتينويدات. و الظاهرة السابقة الذكر أدت إلى اقتراح أن الكاروتينويدات تقي الكلوروفيل من التحطيم.

حماية الكلوروفيل من الأكسدة الضوئية تحدث أيضا في النباتات الراقية، على الأرجح، فعلى سبيل المثال إذا عرضت بادرات طفرة الذرة البيضاء-3 ، و هي طفرة خالية من الكاروتينويدات إلى الظروف الهوائية و الضوء، فإنها تخلق الكلوروفيل. و لكن إذا طالت مدة الإضاءة ، فان الكلوروفيل يتحطم، مما يدل على ان الطفرة لها المقدرة على تخليق الكلوروفيل لكنه يتحطم بالضوء، و الدليل على أن الكلوروفيل يتحطم بالأكسدة الضوئية، أنه عند إضاءة البادرات في جو من النيتروجين، فان الكلوروفيل لا يتحطم.

امتصاص و نقل الطاقة إلى الكلوروفيل

يستند توقعنا إلى أن للكاروتينويدات دورا ما في عملية التمثيل الضوئي إلى وجودها في جميع الأنسجة التي تقوم بهذه العملية و على أي حال فان هذا الدور لابد أن يكون ثانويا - حيث أن الأنسجة الغنية بالكاروتينويدات و الخالية من الكلوروفيل لا تستطيع أن تقوم بعملية التمثيل الضوئي، و يبدو أن الطاقة الضوئية الممتصة بالكاروتينويدات تنتقل إلى كلوروفيل أ حيث تستغل في عملية التمثيل الضوئي، و لقد حصل الباحثون على دليل قوي يؤيد هذا الاقتراح، فقد بينوا أن امتصاص الكاروتينويدات للطاقة الضوئية يسبب لصف أي تفلور Fluorescence الكلوروفيل.

3- صبغات الفيكوبلينات Phycobilins

توجد مركبات البليبروتين الحمراء red bilipotein و تسمى فيكواريثرين phycoerythrins، و كذلك توجد مركبات البليبروتين الزرقاء blue biliprotein و تسمى فيكوسيانين phycocyanins بكثرة في الطحالب و البكتيريا التي تقوم بعملية التمثيل الضوئي. و يسمى الشطر الحامل للون في مركبات البليبروتين باسم فيكوبلين phycobilin و يكون متصلا اتصالا وثيقا بالبروتين مما يجعل دراسة خواص الفيكوبلين في صورته النقية أمرا صعبا جدا، و ترتب على ذلك أن أغلب معلوماتنا عن هذه الصبغات نتجت من دراسات تمت على مركب أو معقد الصبغة مع البروتين.

و أطياف الامتصاص لصبغات الفيكوبلين ذات أهمية خاصة إذا أخذنا في الاعتبار أن الفيكوبلين له نشاط في نقل الطاقة الضوئية إلى الكلوروفيل لاستغلالها في التمثيل الضوئي من الشكل (12-5،12-6) نرى أن صبغات الفيكوسيانين و الفيكوارثرين تمتص الضوء بكفاءة في مجال من أطوال الموجات الضوئية التي لا يمتصها الكلوروفيل، و يعتبر هذا من الأسباب التي تجعلنا نعتبر أن صبغات الكاروتينويدات و الفيكوبلينات نشطة في امتصاص الطاقة الضوئية التي تستغل في التمثيل الضوئي، و من ثم نشير إليها على أنها الصبغات المساعدة لأن دورها في التمثيل الضوئي دورا غير مباشر، أي أن الطاقة التي تمتصها هذه الصبغات تنتقل إلى الكلوروفيل قبل أن تكون فعالة أو تستغل في التمثيل الضوئي. و هذه الصبغات المساعدة تعطي ذروات لصف (تفلور) تتداخل مع بعضها البعض و هذا التداخل مهم لنظام انتقال الطاقة في جهاز التمثيل الضوئي (الكلوروبلاستيدات).