كلية العلوم

القسم : علم الحياة

السنة : الرابعة

المادة : تركيب ضوئي

المحاضرة : االرابعة/نظري/

{{ مكتبة A to Z }}

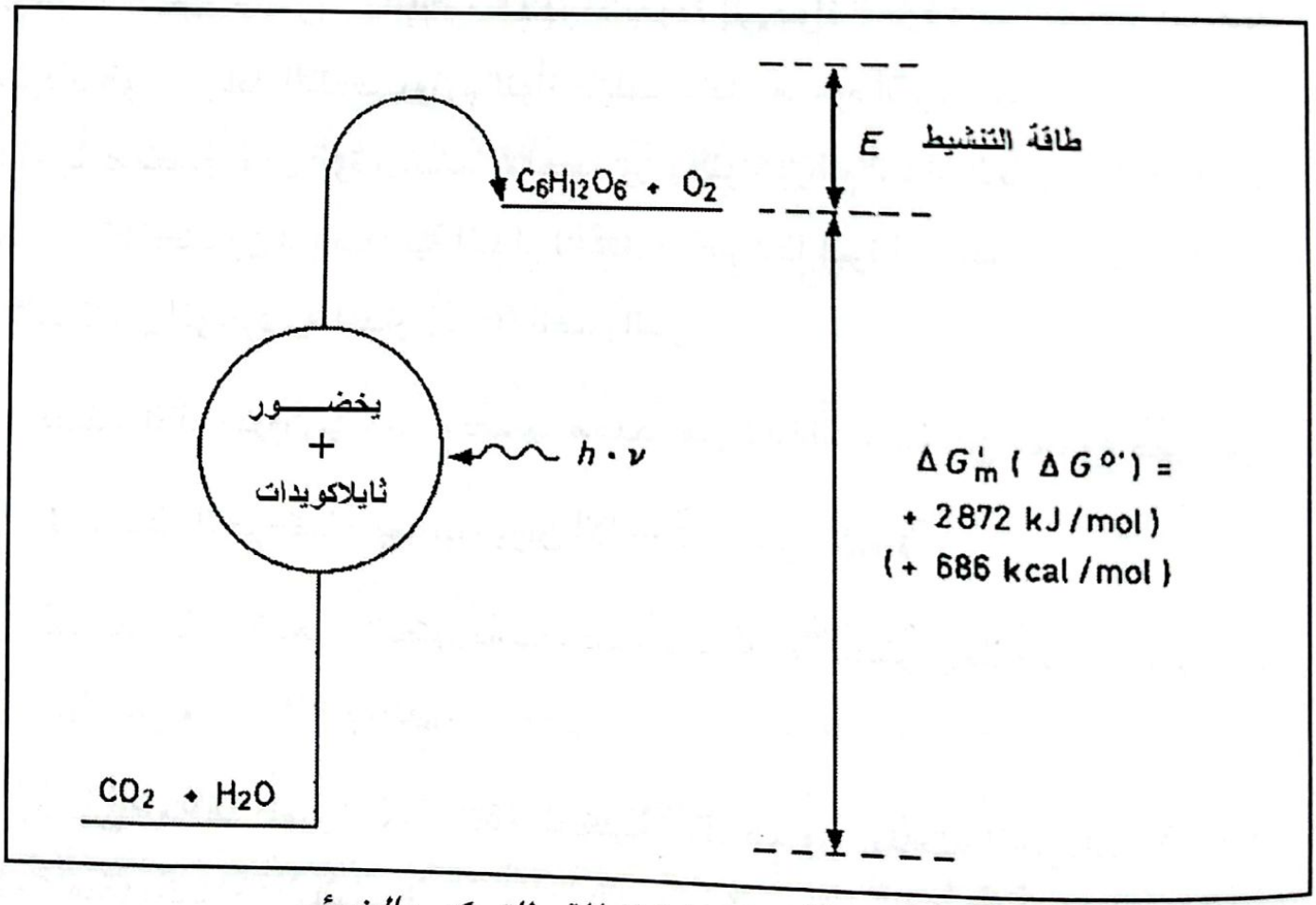
Facebook Group : مكتبة A to Z

2025

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

التفاعلات الضوئيـة
Light Reactions

يمثل التركيب الضوئي عملية ماصة للطاقة يتم خلالها امتصاص الطاقة الضوئية والاستفادة منها في اصطناع مركبات عضوية بدءاً من الماء وثاني أكسيد الكربون، ولكن بما أنّ المحتوى الطاقي للمواد الداخلة في هذه العملية أخفض بكثير من المحتوى الطاقي للمواد الكربوهيدراتية الناتجة عنها، فإن جريان هذه العملية تلقائياً يبقى أمراً غير ممكن حسب مبادىء الترموديناميك. إلا أنّ وجود اليخضور هذه الصبغة الحيوية المميّزة للخلايا النباتية الخضراء، يجعل هذه الخلايا قادرة على تحويل الأشعة الضوئية إلى طاقة جاهزة للاصطناع الكيميائي، ويجعل هذه العملية ممكنة الجريان حسب المخطط الطاقي المبيّن في الشكل (41).



الشكل (41): المخطط الطاقي للتركيب الضوئي

Scanned with CamScanner

نلاحظ من هذا المخطط أن هذه العملية تحتاج إلى طاقة أعلى من المستوى الطاقي لجزيئات السكر الناتجة. تدعى هذه الكمية الإضافية من الطاقة بطاقة التنشيط Activation energy، ونرمز لها (E)، وهي ذات أهمية كبيرة في جعل التفاعل العكسي للتركيب الضوئي، أي تحلل الكربوهيدرات إلى CO_2 وماء أمراً غير ممكن تلقائياً. وهي تفسّر في الوقت نفسه ثبات النواتج النهائية لعملية التركيب الضوئي ومعظم المركبات العضوية في الخلية في درجات الحرارة العادية على الرغم من وجود الأوكسجين في الوسط.

امتصاص الأشعة من قبل الذرات والجزيئات

يمثّل امتصاص بعض الأشعة الكهرومغناطيسية من قبل مادة ما تفاعلاً بين فوتونات هذه الأشعة و ذرات أو جزيئات هذه المادة. وتُعدّ الفوتونات فعالة، فقط تلك التي تحمل كمية من الطاقة تكفي تماماً لنقل الذرة أو الجزيئة إلى حالة مهيّجة.

يوضّح التمثيل التخطيطي في الشكل (42) بنية الذرة، إذ تتوزع الالكترونات سالبة الشحنة ضمن مدارات محددة مشدودة إلى نواة الذرة ذات الشحنة الموجبة. وتزداد قوة ارتباط الالكترون بالنواة كلما كان مداره أقرب إليها، أي إن هناك تناسباً عكسياً بين قوة ارتباط الالكترون بالنواة ورقم المدار الذي يشغله، وعلى هذا فالالكترون الموجود في المدار (n=1) يكون ذا قوة ارتباط أشد بالنواة من الالكترون الموجود في المدار (n=2) لنفس الذرة.

يمتلك الالكترون في مداره كمية محددة من الطاقة ناتجة عن مجموع كل من:

1. الطاقة الحركية، بسبب دوران الالكترون حول النواة.
2. الطاقة الكامنة الكهربائية، بسبب تأثر الالكترون بالحقل الكهربائي الناتج عن النواة الموجبة.

تعطى العلاقة المعبّرة عن الطاقة الكلية للالكترون (طاقته الحركية + طاقته الكامنة) بالعلاقة التالية:

Scanned with CamScanner

$$E = -K\frac{Z^2}{n^2}$$

إذ E: الطاقة الكلية للالكترون (الوحدة: الكترون فولت eV)

K: ثابت كولون (13.620)

Z: العدد الذري (عدد البروتونات في الذرة)

n: رقم المدار الرئيس.

عندما تكون الذرة المدروسة هي ذرة الهيدروجين مثلاً، فإن Z = 1، وتحسب طاقة الالكترون في الذرة كما يلي:

$$E = -\frac{13.620}{n^2}$$

ويحمل كل من الالكترونات الموجودة في المدار الأول (n = 1) كمية من الطاقة:

$$E_1 = -\frac{13.620}{1^2} = -13.620 \ \text{eV}$$

بينما يحمل كل من الكترونات المدار الثاني (n=2) كمية من الطاقة:

$$E_2 = -\frac{13.620}{2^2} = -3.40 \ \text{eV}$$

ومن أجل n = 3، تكون كمية الطاقة: $E_3 = -1.51$ eV

ومن أجل n = 4، تكون كمية الطاقة: $E_4 = -0.85$ eV

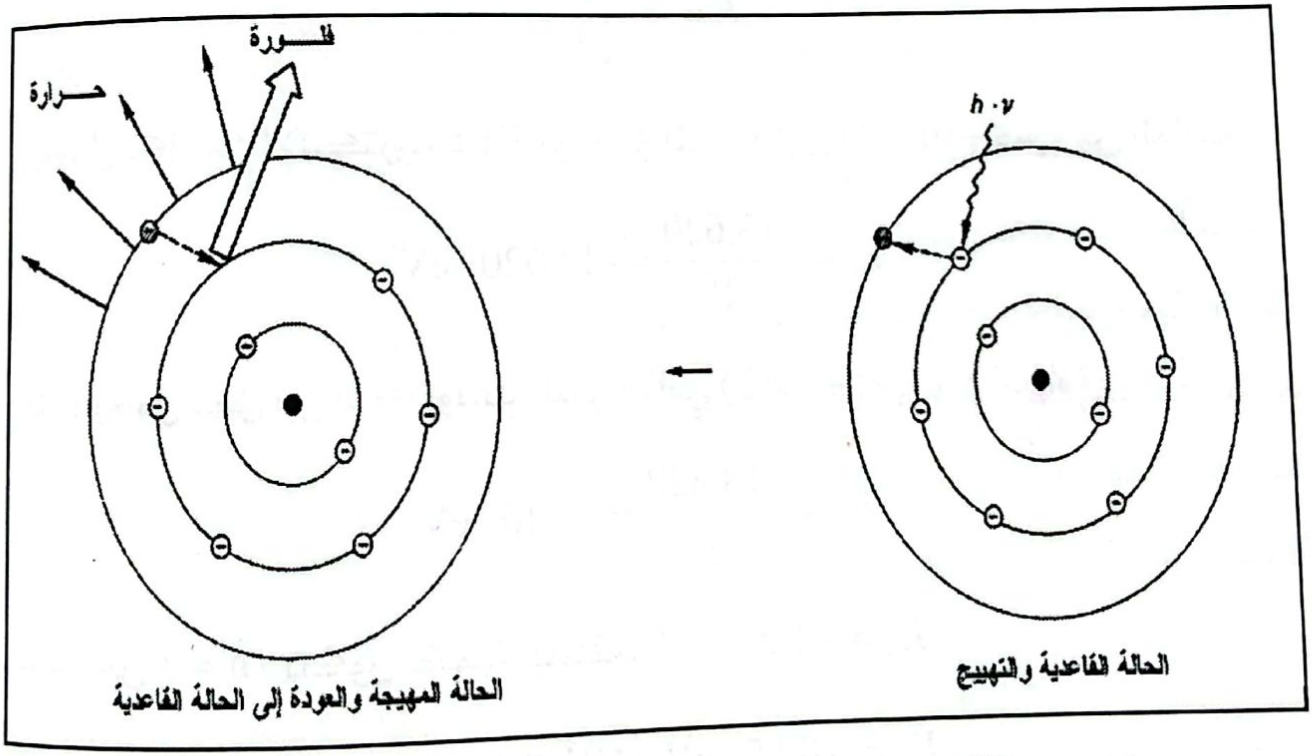
ومن أجل $n = \infty$، تكون كمية الطاقة: $E_\infty = 0.00$ eV

إذاً، إنّ نقل الالكترونات من مدار قريب من النواة إلى مدار بعيد عنها، أي تهييج الذرة، يحتاج إلى طاقة، ويتم هذا الأمر عندما تؤثّر فوتونات محددة تصيب وتحرض الكترونات محددة في الذرة. من المعلوم أنّ الفوتونات تعطي عادةً كامل الطاقة التي تحملها أي إنها لا تعطي جزءاً منها فقط، فتأثيرها في المادة يكون حسب مبدأ

Scanned with CamScanner

الكل أو لا شيء All or nothing. وهكذا يمكننا تفسير امتصاص الذرات لأشعة معينة دون غيرها بأن فوتونات هذه الأشعة تحمل الطاقة اللازمة تماماً لنقل الكترونات هذه المادة إلى مدارات أعلى، وبالتالي نقل الذرة من حالة قاعدية خاملةSteady state إلى حالة مهيّجة نشيطة Excited state مؤدية إلى تشكل خط امتصاصي للذرة Absorption line، مع الإشارة إلى أن طاقة كل فوتون (كوانتا) تُستخدم كوحدة متكاملة لنقل الكترون واحد إلى مدار أعلى.

تمثل الحالة المهيّجة للذرة أو للجزيئة (مجموعة ذرات) فترة زمنية قصيرة جداً، إذ تسعى الالكترونات المحرّضة والموجودة في المدارات البعيدة عن النواة دوماً للعودة إلى مداراتها الأصلية، يترافق ذلك مع إعطاء للطاقة الكامنة فيها إلى الوسط المحيط على شكل فلّورة أو حرارة، و تعود الذرات أوالجزيئة إلى حالتها القاعدية.



الشكل (42): الحالة القاعدية للذرة والتهيج ثم العودة إلى الحالة القاعدية

أن الأهم بالنسبة لنا هو دراسة الامتصاص من قبل الجزيئات التي تتألف من مجموعة من الذرات، إذ تتحول الخطوط الامتصاصية إلى عصابات امتصاصية Absorption bands. ومن الملاحظ أنّ كمية الطاقة اللازمة لتهييج الجزئية يكون أكبر من مجموع الطاقة اللازمة لتهييج ذراتها، ذلك لأن قسماً من الطاقة يستخدم في حوداث الالتفاف الذاتي للالكترونات والاهتزاز.

Scanned with CamScanner

تمتص المركبات العضوية ذات الروابط المشبعة في المجال فوق البنفسجي، وتعكس الأشعة أيضاً في هذا المجال فتبدو لنا عديمة اللون. بينما تبدو المركبات العضوية الحاوية على روابط مضاعفة ملونة:

$$\backslash C=C/ \quad , \quad \backslash C=O \quad , \quad \backslash C=N- \quad , \quad \backslash C=S \quad , \quad -N=O$$

إذ تمتص هذه المركبات قسماً من الأشعة في المجال المرئي وتعكس أشعة أخرى. إن السبب في تلون الروابط المضاعفة يعود إلى الالكترونات المتوضعة في المدارات π التي تتمتع بقسط كبير من حرية التنقل إذ تكون على هيئة سحابة الكترونية حول الروابط المضاعفة، إضافة إلى أن وجود المدارات π عند الروابط المضاعفة عموماً يقصر المسافة بين الحالة القاعدية والحالة المهيّجة، الأمر الذي يجعل الكترونات هذه المدارات قادرة على التهيّج بسرعة حتى بفعل الأشعة الطويلة ذات المحتوى الطاقي المنخفض وبالتالي الزيادة في تلوّن الجزيئة.

الخواص الضوئية لليخضور

يتمتع اليخضور بسبب بنيته و بحكم موقعه من الصبغات الأخرى بمجموعة من الخواص التي جعلته يتبوأ مركز الصدارة في عملية التركيب الضوئي، ومنها:

- قدرته على استقبال الأشعة الممتصة من قبل الصبغات الأخرى.
- قدرته على الاستفادة من الطاقة الضوئية في تفاعل كيمياضوئي مفيد.

لكي نستطيع تفهّم دور اليخضور عموماً في امتصاص الأشعة المرئية، يجب أن نعلم أنّ فوتونات بعض أمواج الضوء المرئي تؤدي إلى رفع الكترونات المدارات π عند هذه الصبغات إلى مدارات أعلى (انتقال من $\pi \leftarrow \pi^*$) ذات مستويات طاقية متفاوتة وذلك بحسب الطاقة التي تحملها فوتونات الأمواج الضوئية. فإذا كانت الطاقة التي تحملها فوتونات الموجة منخفضة فإن الالكترونات ستقفز إلى مدارات طاقية أعلى من مداراتها الأولية وتنتقل جزيئة اليخضور إلى الحالة المهيّجة الأولى. أما إذا كانت

Scanned with CamScanner

كمية الطاقة التي تحملها فوتونات الموجة مرتفعة فإن الالكترونات ستقفز إلى مدارات أكثر علواً، ونقول إنّ الجزيئة قد بلغت حالتها المهيّجة الثانية، الشكل (43). إذاً يمكن التمييز بين عدد من المستويات الطاقية، أهمها:

- الحالة القاعدية Ground state : ذات المستوى الطاقي الأخفض، وهي تُعدّ الحالة الأكثر ثباتاً واستقراراً للذرات والجزيئات.

- حالة الاستقرار الثانوي Triplet state : ذات مستوى طاقي أعلى من الحالة القاعدية وأقل ثباتاً منها.

- الحالة المهيّجة الأولى Excited state I : ويكون مستواها الطاقي أيضاً أعلى من السابقة ولكن يقلُّ ثباتها.

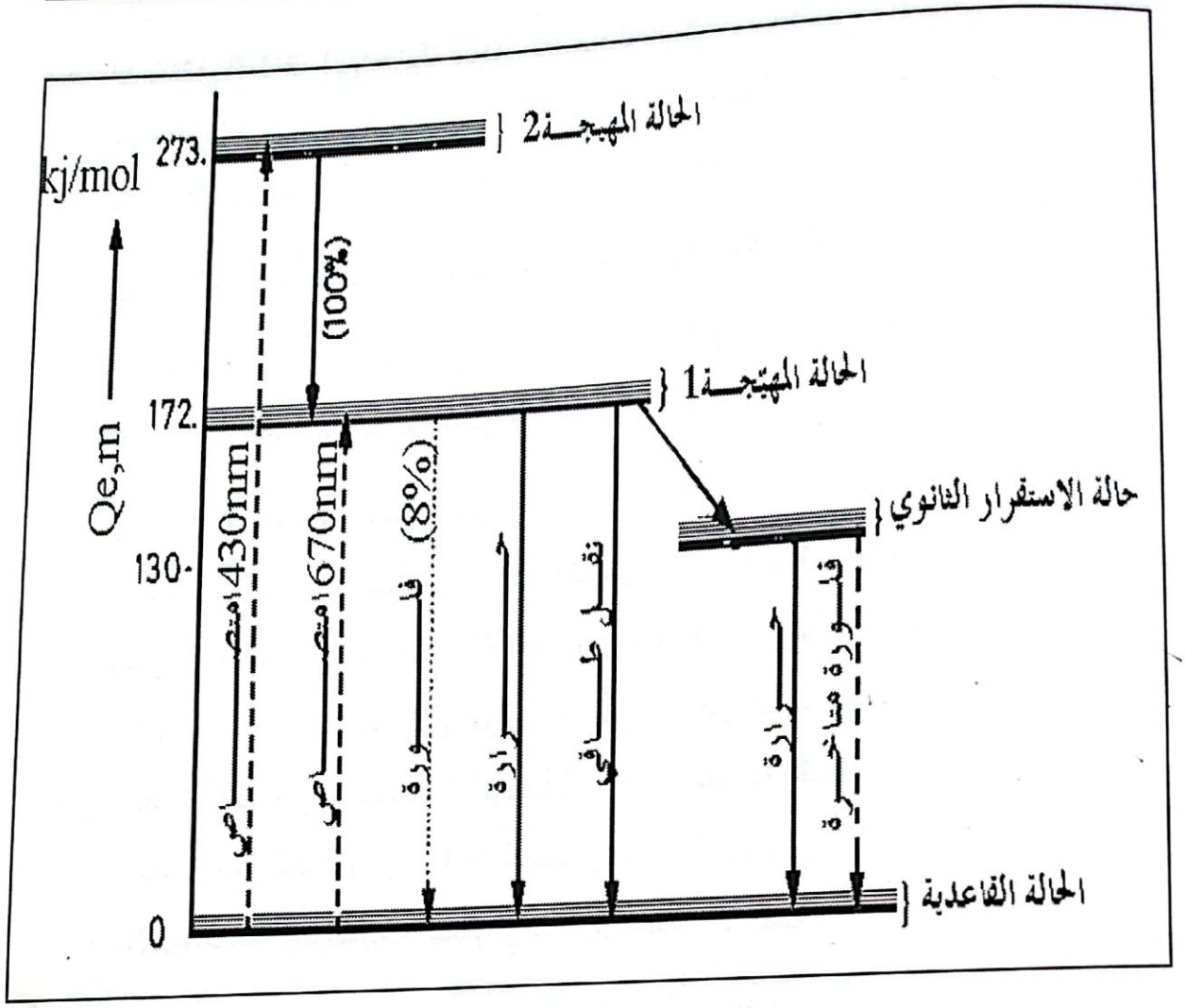
- الحالة المهيّجة الثانية Excited state II : ذات المستوى الطاقي الأعلى، وهي تمثل الحالة الأقل ثباتاً.

عندما تمتص جزيئة اليخضور فوتوناً أزرقاً (طول الموجة = 430 نانومتر) ذا طاقة عالية فإنّه يقذف أحد الالكترونات بعيداً، وتصل الجزئية إلى الحالة المهيّجة الثانية. أما عند امتصاص فوتون أحمر ذي الطاقة الأخفض (طول الموجة = 670 نانومتر) فإن الالكترون لن يُقذف بعيداً، وتصل الجزيئة إلى الحالة المهيّجة الأولى.

تتسم الحالة المهيّجة الثانية بثباتها القليل جداً (Life time $=10^{-10}s = 1ps$)، لذا فإن الالكترون المهيّج يسقط بسرعة إلى الحالة المهيّجة الأولى، وتضيع الطاقة التي يحملها والتي تمثل الفرق بين الحالتين دوماً على شكل حرارة.

إذن هناك قسط من الطاقة التي تحملها الفوتونات الزرقاء يضيع دوماً على شكل حرارة، الشكل (43).

Scanned with CamScanner



الشكل (43): مستويات التهيّج عند جزيئة اليخضور

تتسم الحالة المهيّجة الأولى بثباتها النسبي (4×10^{-9} s)، الأمر الذي يجعل انتقال الطاقة إلى جزيئة مجاورة أمراً ممكناً وبالتالي الاستفادة من هذه الطاقة في التفاعلات الضوئية، ولذا فهي تُعدّ أهم الحالات بالنسبة للتركيب الضوئي.

تعود الالكترونات فيما بعد من الحالة المهيّجة الأولى إلى الحالة القاعدية، ويمكن للطاقة المتحررة أن تستخدم في أحد الاتجاهات التالية:

- أن يغادر الالكترون جزيئة اليخضور إلى جزيئة مجاورة وذلك من الحالة المهيّجة الأولى، إذ إنّ ارتباط الالكترونات بالذرات يكون في هذه الحالة ضعيفاً. وتعود جزيئة اليخضور بعد ذلك إلى الحالة القاعدية عن طريق اكتسابها لالكترونات من جزيئة مانحة كالماء مثلاً.

Scanned with CamScanner

- أن تنتقل الطاقة إلى جزيئة مجاورة بحادثة الطنين Resonance مؤدية إلى تهيّج الكترونات الجزيئة المجاورة، ومن ثم إلى التي تليها وهكذا حتى القيام بفعل كيميائي مفيد للنباتات.
- أن يتم فقدان الطاقة عن طريق إصدارها إلى الوسط ثانية على شكل حرارة.
- أن يتم فقدان الطاقة عن طريق إصدارها إلى الوسط على شكل أشعة حمراء طويلة ذات طاقة منخفضة (فلّورة Fluorescence).
- أن ينتقل الالكترون ضمن جزيئة اليخضور المهيّجة من الحالة المهيّجة الأولى إلى حالة الاستقرار الثانوي، التي تتميّز بثباتها واستقرارها لفترة أطول من الزمن (10^{-2} s). تترافق عودة الالكترون من هذه الحالة إلى الحالة القاعدية مع هدر للطاقة على شكل حرارة أو على شكل أشعة حمراء طويلة، تُدعى بالفلّورة المتأخرة Phosphoresence. لكن عدداً قليلاً جداً من جزيئات اليخضور يمر تحت الشروط الطبيعية بحالة الاستقرار الثانوي. لذا تُعدّ هذه الحالة بالنسبة للتركيب الضوئي عملياً عديمة الأهمية.

الفلّورة اليخضورية :

وجدنا أنّه في أثناء عودة الالكترون إلى الحالة القاعدية فإنه يمكن أن يعطي الطاقة التي امتصها إلى الوسط على شكل فوتونات ضمن أشعة حمراء ذات طول موجة كبير. ندعو هذه الأشعة الصادرة أو هذه الظاهرة بالفلّورة Fluorescence. وتأتي هذه التسمية من مركب فلور الكالسيوم CaF_2، إذ وجد أن تسخين قليل من مسحوق هذه المادة في اللهب يعطي وبعد انطفاء اللهب لفترة من الزمن تألقاً خاصاً سمي بالفلّورة.

يمكننا ملاحظة ظاهرة التألق هذه أو الفلّورة عند العديد من المركبات العضوية المنحلّة والمواد الملوّنة (ايوزين، فلوروسين)، أما عند الصبغات المساهمة في التركيب الضوئي، فإننا لا نجد هذه الظاهرة إلا عند جزيئات اليخضور، ولذلك ندعوها بالفلّورة اليخضورية أو التألق اليخضوري. وعلى نحوٍ أدق فإن الفلّورة اليخضورية

Scanned with CamScanner

تقتصر على جزيئات اليخضور (a)، فاليخضور (b) ينقل كامل الطاقة الممتصة عبره إلى اليخضور (a). أما الكاروتينويدات فلا تتمتع بخاصية الفلّورة، بينما تبدي الفيكوبيلينات فلّورة منخفضة جداً ضمن الخلية الحية.

تجريبياً يمكننا مشاهدة الفلّورة اليخضورية عند تسليط ضوء أزرق على محلول لليخضور في مذيب عضوي، إذ إنّ حوالي 30٪ من الأشعة الزرقاء الممتصة ينعكس على شكل أشعة فلّورة حمراء ذات طاقة منخفضة. عند إضافة بضع قطرات من الماء إلى المحلول نلاحظ إطفاءً وإخماداً Quenching بطيئاً للفلّورة، و يعود السبب في ذلك إلى أن اليخضور يتوزع على شكل معلقات غروية عديمة الفلّورة ضمن المحلول.

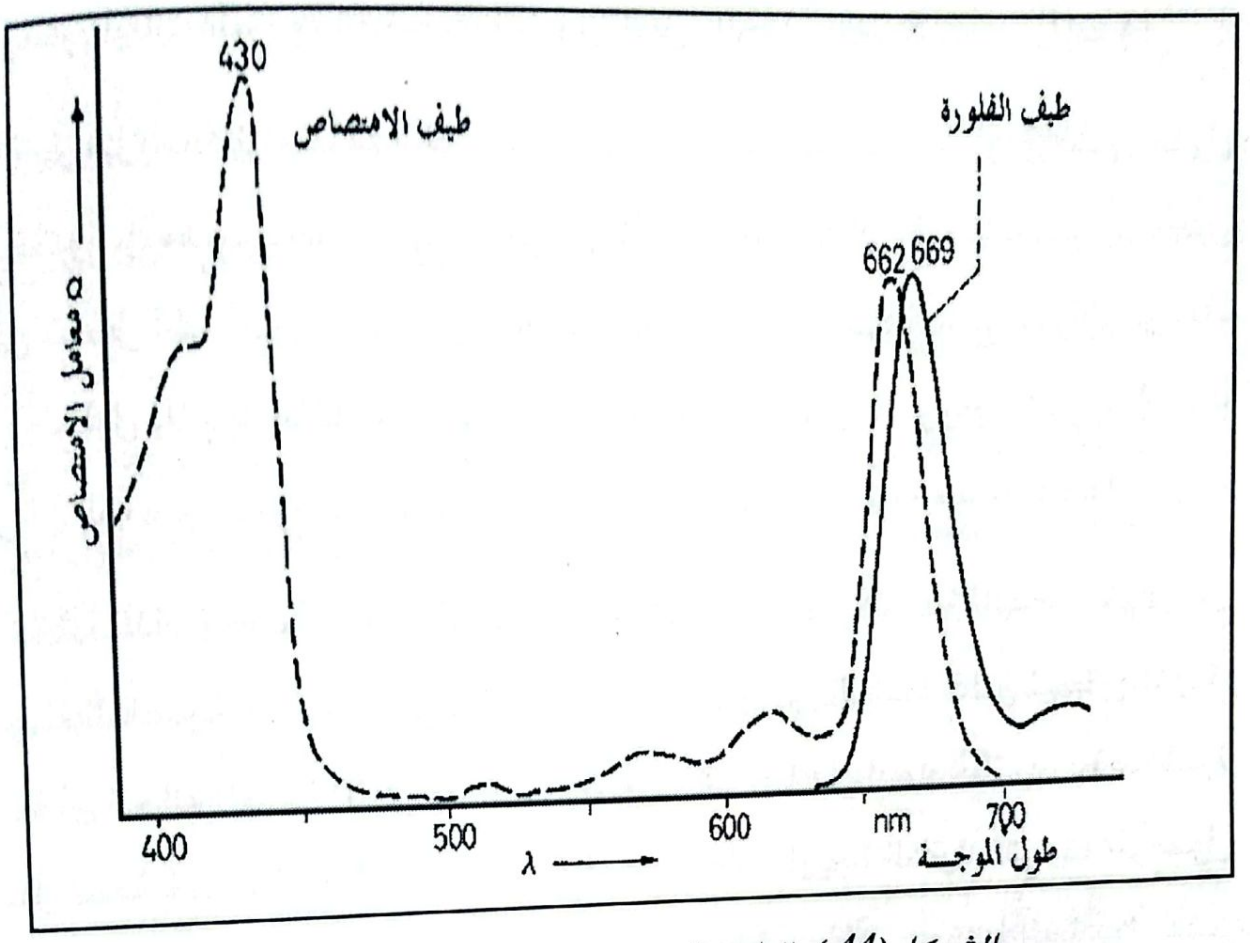
تنشأ الفلّورة كما وجدنا في أثناء عودة الالكترون من الحالة المهيّجة الأولى إلى الحالة القاعدية، إذ إنّ حوالي 8٪ من الطاقة ينطلق إلى الوسط على شكل فلّورة. وبما أن الحالة المهيّجة الأولى يمكن الوصول إليها إما من الحالة القاعدية مباشرة بفعل أشعة حمراء ذات طاقة منخفضة، أو من الحالة المهيّجة الثانية التي يتم الوصول إليها بفعل أشعة قصيرة زرقاء ذات طاقة عالية، لذا نرى أنه يمكننا الحصول على الفلّورة بفعل الأشعة الحمراء أو الأشعة الزرقاء.

يمكن أن تظهر الفلّورة أيضاً أثناء عودة الالكترون من حالة الاستقرار الثانوي Triplet state إلى الحالة القاعدية Ground state وتدعى عندها بالفلّورة المتأخرة التي يطلق عليها اصطلاح Phosphorescence، وتتميز هذه الفلّورة بتأخرها في الظهور من جهة، وبازدياد انحرافها باتجاه الأمواج الحمراء الطويلة من جهة أخرى. لكن حدوث هذه الفلّورة يُعدّ نادراً وذلك بسبب العدد الضئيل من جزيئات اليخضور التي تصل حالة الاستقرار الثانوي.

تُعدّ الأشعة الحمراء أو الأشعة الزرقاء هي الأشعة الوحيدة القادرة على إحداث الفلّورة من قبل جزيئات اليخضور. وفي كل الأحوال يجب أن يكون طول الأمواج المسببة للفلّورة أقصر دوماً من طول أمواج الفلّورة نفسها. وهكذا يقع طيف الفلّورة

Scanned with CamScanner

دوماً في المجال الأحمر، وأطول بقليل من الطيف الامتصاصي لجزيئات اليخضور في هذا المجال، الشكل (44).



الشكل (44): الطيف الامتصاصي لليخضور وطيف الفلّورة

يقوم النبات في الحالة الطبيعية بإصدار حوالي ⅓ الطاقة الضوئية الممتصة ثانية إلى الوسط على شكل فلّورة وحرارة، بينما يستخدم القسم المتبقي من الطاقة في حوادث التركيب الضوئي.

يمكن تجريبياً التمييز بين عدة أنواع من الفلّورة، أهمها: الفلّورة القاعدية ويرمز لها (Fo) والفلّورة العظمى ويرمز لها بـ (Fm). يتم الحصول على الفلّورة القاعدية من جزيئات اليخضور (a) الموجودة في معقدات اقتناص الضوء (LHC) وذلك في الحالة الطبيعية مع التعريض للضوء العادي . بينما يجري الحصول على الفلّورة العظمى عند تعريض اليخضور لتهييج شديد ناجم عن وميض ضوئي قوي، وهي تصدر أيضاً بدءاً من جزيئات اليخضور (a) إنما الموجودة في المراكز التفاعلية لكل من نظامي التركيب الضوئي.

Scanned with CamScanner

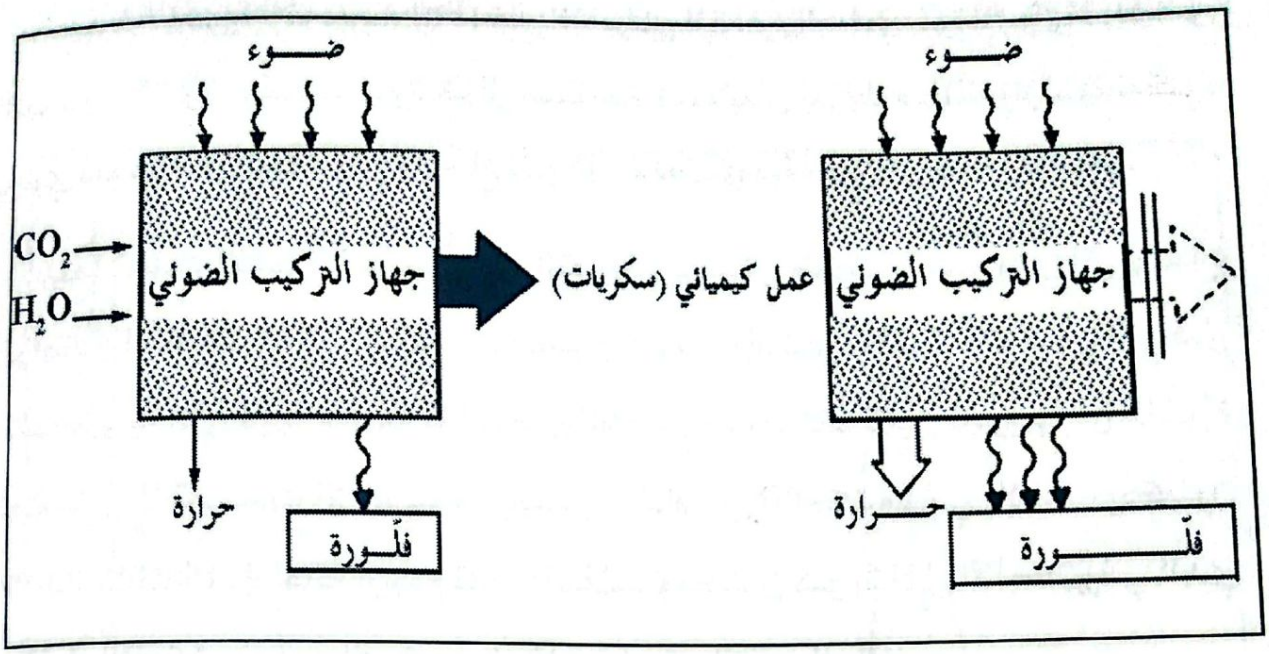
تحدث الفلّورة القاعدية (Fo) مع التعرض للضوء العادي، وتكون المراكز التفاعلية لا تزال مفتوحة، ولا تزال مستعدة لاستقبال المزيد من الفوتونات لكي يجري بعدها نقل الكتروني وإرجاع للنواقل الالكترونية التي تلي هذه المراكز.

بينما تحدث الفلّورة العظمى عند التعرض لوميض ضوئي قوي يؤدي إلى إشباع المراكز التفاعلية بالفوتونات، إذ تصبح هذه المراكز مغلقة، وتكون النواقل الالكترونية التي تليها مشبعة بالالكترونات (مرجعة)، لقد تبيّن تجريبياً أنّ الفلّورة العظمى لا تحدث إلا عندما يصبح الناقل الالكتروني بلاستوكينون Plastoquinone في حالة إرجاع تام، (البلاستوكينون هو الناقل الالكتروني الذي يستقبل الالكترونات مباشرة من النظام الضوئي الثاني PS II) .

كما يتم بواسطة كثير من الأجهزة التي تقيس معدلات الفلّورة (كجهاز قياس الفلورة Fluorometer) قياس الفلّورة المتغيرة (Fv) والتي تمثل الفلّورة العظمى مطروحاً منها الفلّورة القاعدية (Fv = Fm – Fo) .

تكتسب ظاهرة الفلّورة أهمية خاصة في أثناء دراسة التركيب الضوئي، إذ إنّها تمثل معياراً دقيقاً لمعرفة مدى سلامة جهاز التركيب الضوئي، وخاصة القسم الضوئي منه. فبما أن الفلّورة تمثل طاقة مهدورة، فهذا يعني أنه إذا كان هناك خلل أو تثبيط في تحويل الطاقة الضوئية إلى فعل كيميائي مفيد فإن نسبة الفلّورة سترتفع؛ بينما تكون نسبتها منخفضة كلما كان التحويل الطاقي جيداً وكلما كان سير عملية التركيب الضوئي سليماً، الشكل (45).

Scanned with CamScanner



الشكل (45): العلاقة بين فعالية جهاز التركيب الضوئي وكل من الفلّورة والحرارة

الحرارة :

تترافق عودة الالكترونات من الحالة المهيّجة الثانية إلى الحالة المهيّجة الأولى دوماً مع إصدار كامل الطاقة التي تمثل الفرق بين الحالتين على شكل حرارة. كما أنه في أثناء عودة الالكترونات من الحالة المهيّجة الأولى أو من حالة الاستقرار الثانوي إلى الحالة القاعدية، ينطلق دوماً قسم من الطاقة على شكل حرارة. إذن فالنباتات تعكس قسماً من الطاقة الضوئية الممتصة إلى الوسط ثانية ليس فقط على شكل فوتونات كما هو الحال عند الفلّورة، بل على شكل طاقة حرارية تؤدي إلى ارتفاع حرارة الوسط المحيط بجزيئة الصبغة.

لقد تبيّن أنه عند تعرض جزيئات اليخضور إلى الضوء الشديد فإنها تتهيج، وإذا بلغ عدد جزيئات اليخضور المهيّجة حداً كبيراً فإنه تجري في الصانعة الخضراء عملية تثبيط ضوئي Photoinhibition مترافقة مع تحرر أيونات الأوكسجين الحرة (مؤكسدات قوية) ذات التأثير الضار بالبروتينات البنائية ضمن الغشاء الثايلاكويدي . لكي لا تصل الصانعات الخضراء إلى مرحلة التثبيط الضوئي تقوم في هذه الحالة جزيئات الصبغات الكاروتينويدية باستقبال طاقة التهييج من جزيئات

Scanned with CamScanner

اليخضور (أي تقوم بإخماد الحالة المهيّجة لليخضور) محررة هذه الطاقة إلى الوسط الخارجي على شكل حرارة. تقع هذه الأمواج الحرارية في مجال الأشعة تحت الحمراء وتتراوح أطوالها ما بين 3000 - 20000 نانومتر، وبالتالي وبسبب أمواجها الطويلة تكون كمية الطاقة التي تحملها منخفضة جداً، وتكون كمية الأشعة الحرارية الصادرة عن النبات قليلة، لذا فإن قياسها يحتاج إلى أجهزة قياس حرارة عالية الحساسية High temperature sensors، وذلك بعد عزل النبات أيضاً عن وسطه الخارجي.

تمثل الحرارة من منظور التركيب الضوئي أيضاً كالفلّورة طاقة مهدورة من قبل النبات. وتتفاوت نسبة كل منهما وذلك بحسب النظام الضوئي المشارك وبحسب وسط التجربة. إنما عموماً يمكن اعتبارهما مقياساً لمعرفة مدى التثبيط في فعالية الجهاز التركيبي الضوئي، كما هو موضح في الشكل (45).

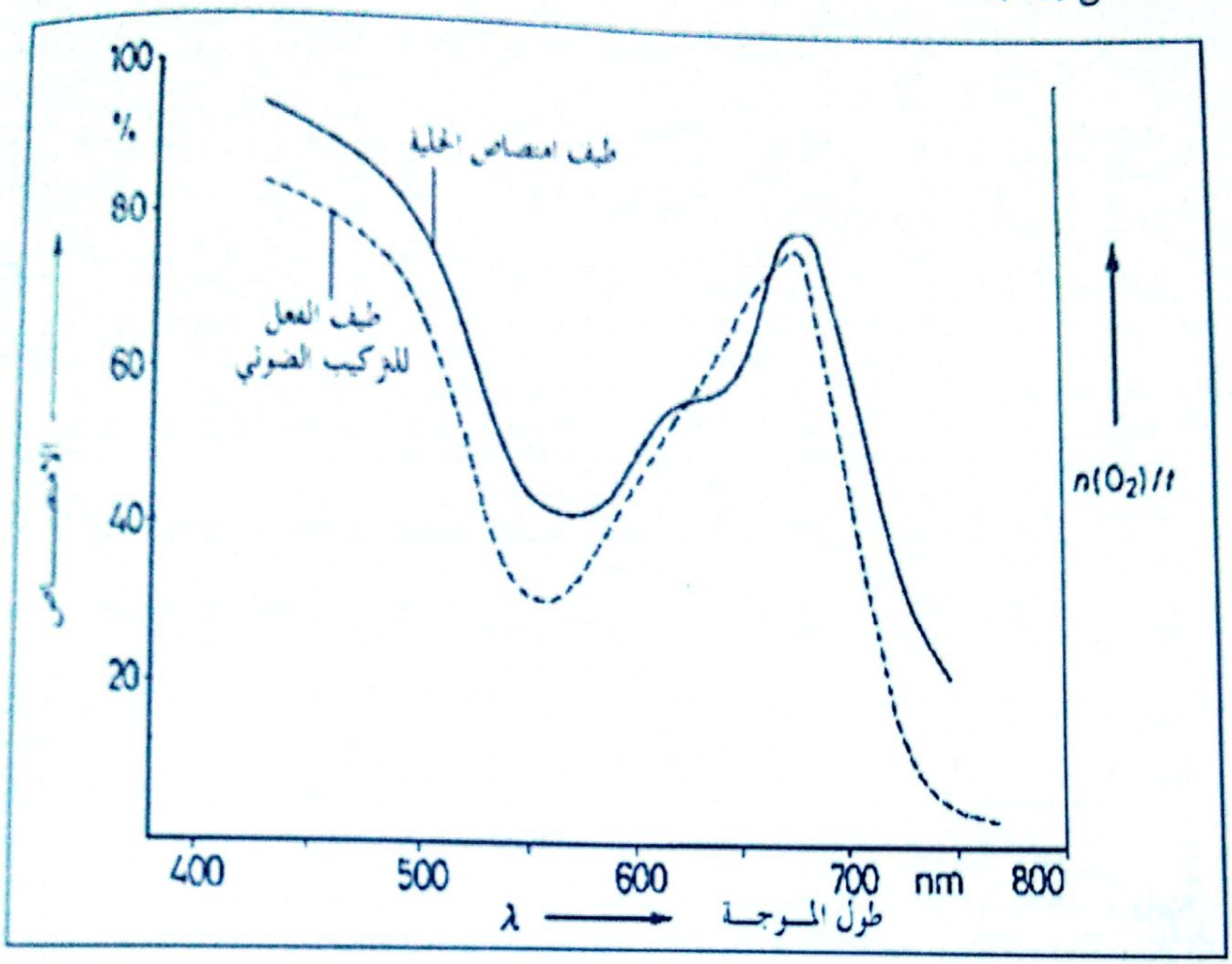
طيف الامتصاص وطيف الفعل

تقوم الصبغات الموجودة في الخلايا النباتية بامتصاص الضوء مشكّلة طيفاً امتصاصياً Absorption spectrum، إلا أنّ هذا الطيف لا يتطابق تماماً مع طيف الفعل Action spectrum لعملية التركيب الضوئي الجارية في الصانعات الخضراء أو حوامل الصبغات، وذلك بحسب نوعية الصبغات الموجودة في الخلية النباتية إلى جوار اليخضور، يكون طيف الفعل لصبغات التركيب الضوئي (مقدراً بكمية الأوكسجين المنطلقة أو بكمية ثاني أكسيد الكربون المثبتة) أخفض بقليل من طيف امتصاص هذه الصبغات للضوء.

لقد أظهرت التجارب عند طحلب الكلوريللا *Chlorella pyrenoidosa* أنّ هناك توافقاً إلى حد ما بين طيف الفعل لصبغات التركيب الضوئي والطيف الامتصاصي للخلايا وذلك في المجالين الأزرق والأحمر من المجال المرئي. إلا أنّه من الملاحظ أن القمم الامتصاصية للطيف الامتصاصي للخلايا يكون مزاحاً باتجاه الأمواج

Scanned with CamScanner

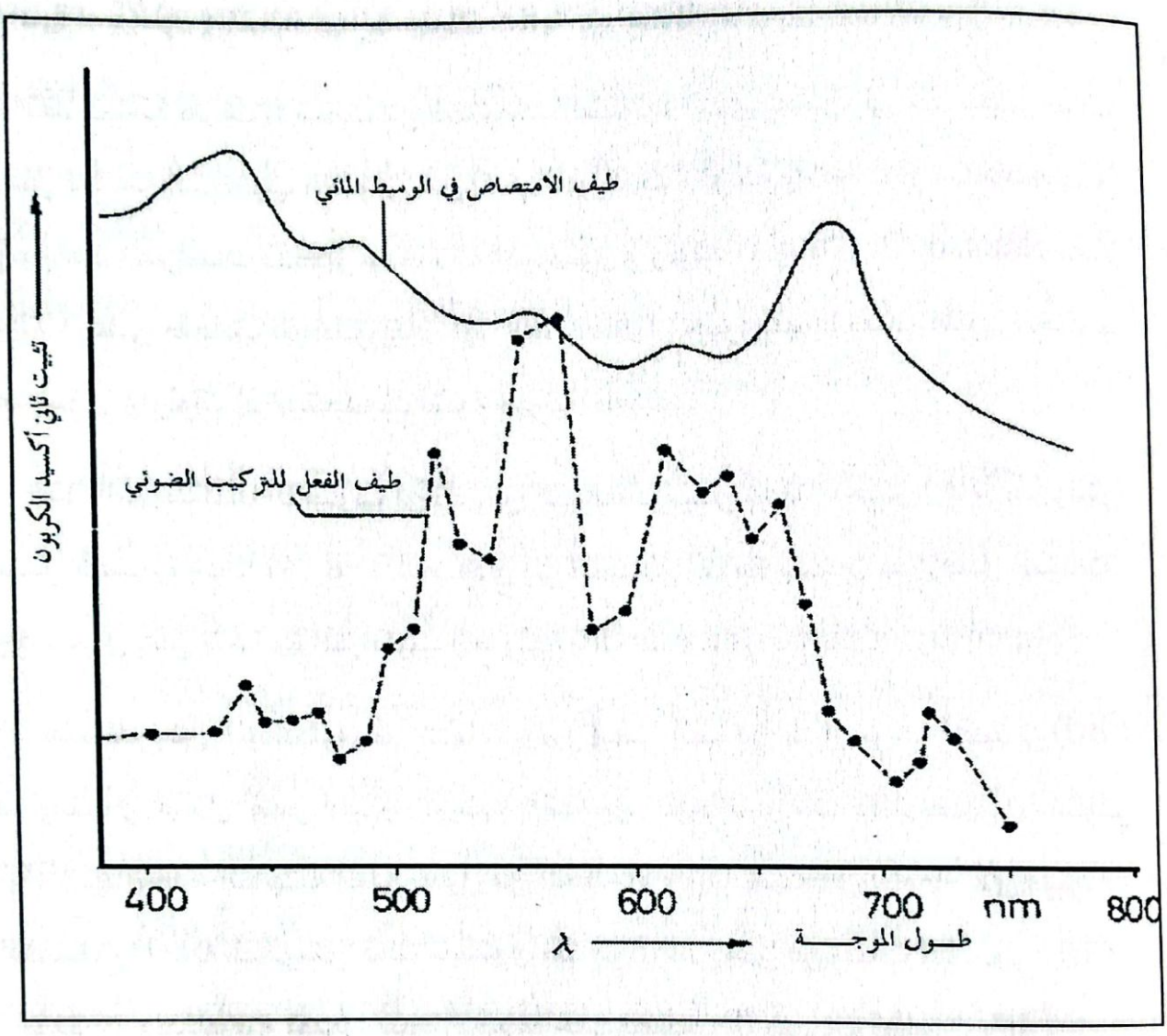
الأطول، ويعود السبب في ذلك إلى وجود الصبغات الكاروتينويدية في الخلايا، الشكل (46).



الشكل (46): طيف الامتصاص وطيف الفعل عند طحلب الكلوريللا

تلعب الصبغات الفيكوبيلينية عند الطحالب الحمراء والبكتيريا الخضراء المزرقة دوراً كبيراً في تحديد المسار والشكل الذي يأخذه طيف الفعل إلى جوار الطيف الامتصاصي للخلايا. تحتوي البكتيريا الخضراء المزرقة فورميديوم يونيكاتوم *Phormidium unicatum* على صبغتي الفيكوسيانين والفيكواريترين إلى جوار بعضهما في الخلية، ففي المجال الامتصاصي للفيكواريترين (500 . 560 نانومتر) يكون طيف الفعل للتركيب الضوئي في شدته القصوى ومسايراً إلى حد كبير لطيف الامتصاص، بينما يكون طيف الفعل في المجال الامتصاصي لكل من اليخضور والفيكوسيانين (610 . 680 نانومتر) أخفض من طيف امتصاص هذه الصبغات للضوء، الشكل (47).

Scanned with CamScanner



الشكل (47): طيف الامتصاص وطيف الفعل عند البكتيريا فورميديوم يونيكاتوم

إن في هذا تأكيداً على الدور الرئيس للصبغات الملحقة (الفيكواريترين في هذه الحالة) في امتصاص الضوء الضروري للتركيب الضوئي وتحويله إلى اليخضور، مما يؤدي بالنتيجة إلى ارتفاع معدلات طيف الفعل.

لابد من التأكيد في هذا السياق أن قياس طيف الفعل عند مجال محدد أو مجموعة واحدة من الأشعة الضوئية يبقى غير دقيق، إذ تبيّن للعالم الأمريكي اميرسون Emerson في أثناء تجاربه على طحلب الكلوريللا أن طيف الفعل يكون أشد عندما تتعرض الخلية الطحلبية إلى كامل الطيف المرئي بما فيه من أشعة زرقاء وحمراء في الوقت نفسه.

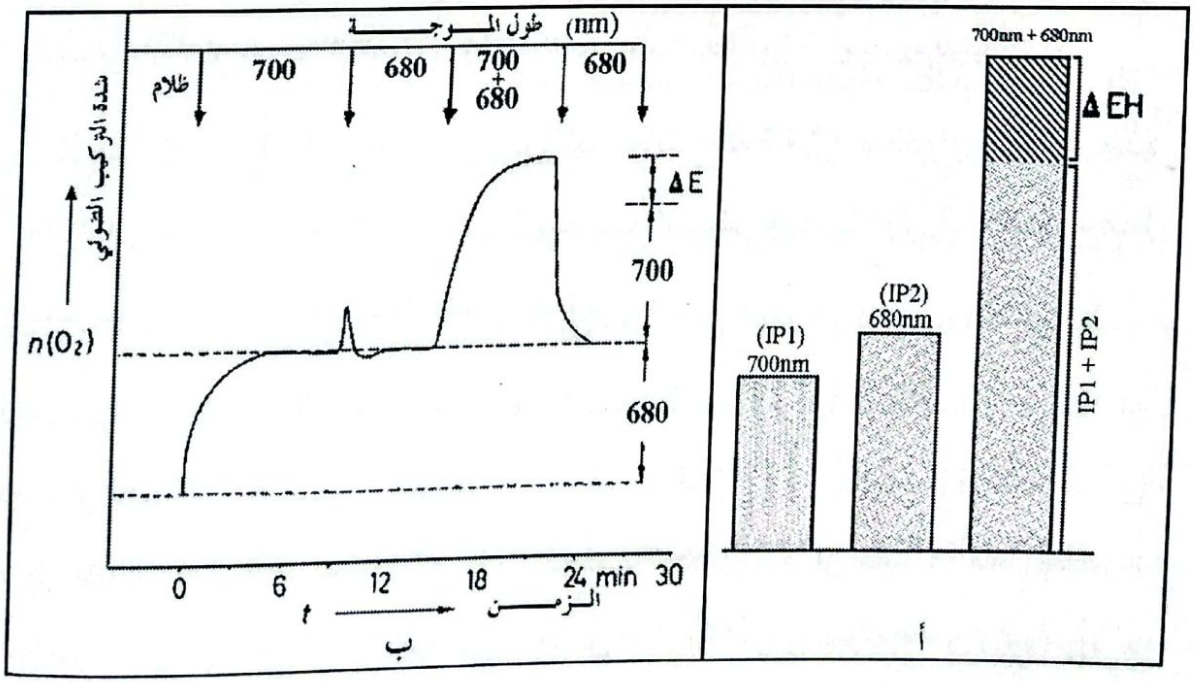
Scanned with CamScanner

ظاهرة اميرسون والنظامان الضوئيان

تُعدّ دراسة طيف الامتصاص للصبغات الضوئية الذي يماثل إلى حد بعيد طيف الفعل لحادثة التركيب الضوئي من أهم الدراسات الأولية في مضمار هذه الحادثة. وأهم تلك الدراسات نذكر ما قام به اميرسون وآرنولد Emerson & Arnold عام 1957 على طحلب الكلوريللا *Chlorella sp.* . جرى فيما بعد تطوير تجارب اميرسون وآرنولد إذ استخدمت أشعة ضوئية مختلفة.

لقد أظهرت تلك التجارب أنّ تعرّض النبات لوميض شعاع أحمر (700نانومتر) لفترة قصيرة جداً (10 μ s) يؤدي إلى انطلاق الأوكسجين من قبل النبات، والحصول على شدة في التركيب الضوئي(IP_1) Intensity of photosynthesis .

عند تعريض النبات لوميض شعاع أحمر أيضاً إنما ذو طول موجة أقصر (680 نانومتر) و خلال نفس الفترة الزمنية القصيرة لوحظ أنّ شدة التركيب الضوئي (IP_2) في الحالة الثانية أعلى بقليل من الحالة الأولى، الشكل (48)، لأنّ فوتونات الشعاع (680 نانومتر) ذات مستوى طاقي أعلى من فوتونات الشعاع (700 نانومتر)، ولذلك يتم تعديل شدة الإضاءة حتى تصبح IP_2 مساوية تماماً لـ IP_1.

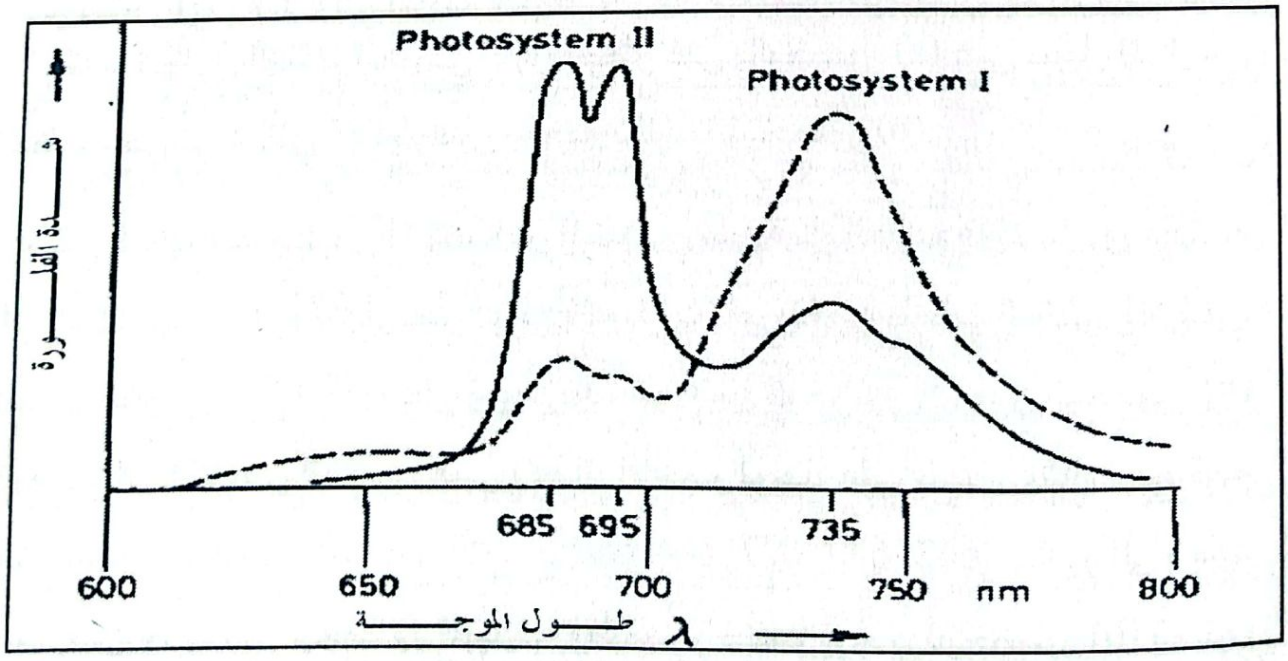


الشكل (48): تمثيل عمودي (أ) وآخر بياني (ب) لأثر اميرسون

أخيراً وجد أنّه عند تعريض النبات في الوقت نفسه إلى شعاع بطول 700 نانومتر وآخر بطول 680 نانومتر، أنّ شدة التركيب الضوئي (IP_{1+2}) ـ فقط تجاه هذين الشعاعين دون غيرهما من أمواج المجال المرئي ـ تبلغ قيماً أعلى من المعدل الذي يمثل مجموع فعل كل من الشعاعين عندما يكونان بشكل منفرد، أي $IP_{1+2} > IP_1 + IP_2$ وقد دعي هذا الفرق أو الزيادة Enhancement بأثر اميرسون – Emerson Effect ويرمز له بـ ΔEH، الشكل (48).

من مجمل ذلك كان الاستنتاج بوجود موقعين لاستقبال الطاقة الضوئية (الفوتونات)، وقد دعي هذان الموقعان بالنظام الضوئي الأول Photosystem I أو PSI الذي يبدي قمة امتصاصه عند طول موجي قدره 700 نانومتر، والنظام الضوئي الثاني Photosystem أو PSII الذي يبدي قمة امتصاصية عند الموجة 680 نانومتر.

لقد جاءت تجارب الفلّورة في درجات الحرارة المنخفضة (- 190 °م) فيما بعد لتؤكد على وجود هذين النظامين، إذ وجد أنّ النظام الضوئي الأول يبدي فلّورة أعظمية عند الموجة ذات الطول 735 نانومتر، ومنخفضة عند الموجة 684 نانومتر. بينما تكون الفلّورة الصادرة عن النظام الضوئي الثاني PSII أعظمية عند الموجتين 685، 695 نانومتر، ومنخفضة عند الموجة 735 نانومتر، الشكل (49).



الشكل (49): التأكيد على وجود النظامين الضوئيين من خلال الفلّورة الصادرة عن كل نظام

Scanned with CamScanner

بتوالي البحوث تبيّن أن هناك اتصالاً وارتباطاً وثيقاً بين كل من نظامي التركيب الضوئي، وأنّ كل نظام يحتوي على مركز تفاعلي Reaction center أو (RC) ويتمثل بزوج من اليخضور (a) ذو قمة امتصاصية محددة، إذ يبلغ طول الموجة عند هذه القمة 700 نانومتر بالنسبة لمركز النظام الأول 700 Pigment أو P700، و680 نانومتر بالنسبة لمركز النظام الثاني 680 Pigment أو P680.

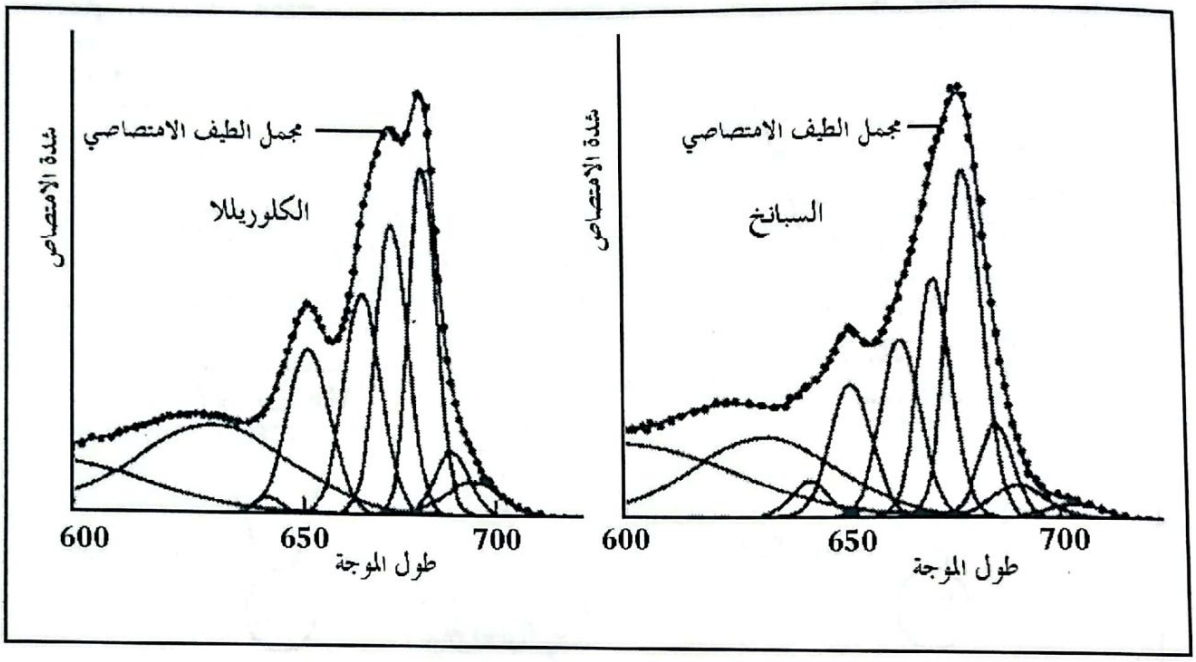
يتألف هذان النظامان من مجموعة من البروتينات، ترتبط ببعضها مجموعة نواقل الكترونية وفق ترتيب محدد، كما تترتب إلى جوار كل نظام صبغات التركيب الضوئي مشكّلة معقدات اقتناص الضوء Light harvesting complex (LHC) خاصة بالنظام. تقوم هذه المعقدات بدور هوائيات Antenna تستقبل الطاقة الضوئية (الفوتونات) وتمررها إلى المركز التفاعلي لكل نظام. يختلف النظامان الضوئيان الأول والثاني فيما بينهما بالطيف الامتصاصي لمركزيهما التفاعليين، كما تختلف معقدات اقتناص الضوء LHC II و LHC I، بنوعية الصبغات ونسبها في كل منها، إذ يُعتقد حالياً أنّ الصبغات تترتب ضمن LHC I على الشكل: [كاروتينات إلى الخارج، يخضور (b)، أشكال مختلفة من اليخضور (a) (690، 685، 670، 660)]، وضمن (LHCII) على الشكل: [زنتوفيلات إلى الخارج، يخضور (b)، أشكال مختلفة من اليخضور a (660، 670، 678)].

كما يكون النظام الضوئي الأول أكثر غنىً باليخضور (a) على سبيل المثال من النظام الضوئي الثاني، والعكس صحيح بالنسبة لليخضور (b).

لقد أكدت تجارب الامتصاص الضوئي من قبل العالم فرنش وزملائه French et al. عام 1972 على الثايلاكويدات المعزولة من طحلب الكلوريللا تحت شروط التجميد(C° 190-) على وجود عدة أنواع من اليخضور (a) ومن اليخضور (b) في معقدات اقتناص الضوء . ففي المجال الأحمر توجد على سبيل المثال أربع قمم امتصاصية لليخضور (a) عند الأمواج (662, 670, 677, 684 nm) تشير إلى وجود عدد من جزيئات اليخضور المتباينة وظيفياً، كما يوجد لليخضور (b) قمتين امتصاصيتين في هذا المجال (640, 650 nm) مما يشير إلى وجود نوعين على الأقل

Scanned with CamScanner

من جزيئات هذا اليخضور المتباينة وظيفياً. ومنه فإن الطيف الامتصاصي لليخضور في المجال الأحمر يمثل محصلة أو مجموع القمم الامتصاصية لجزيئات اليخضور المختلفة، الشكل (50).

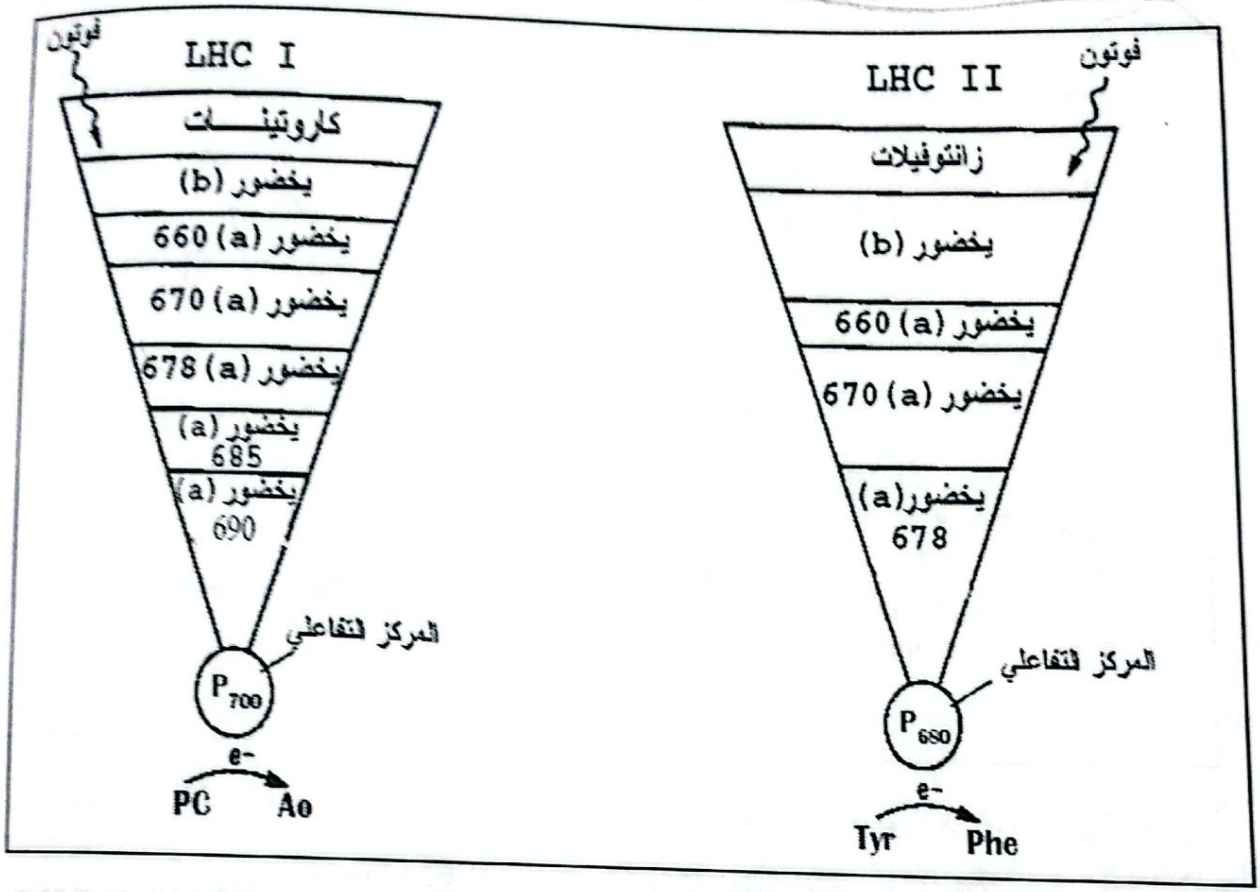


الشكل (50): الطيف الامتصاصي لليخضور عند السبانخ والكلوريللا في المجال الأحمر الذي يمثل مجموع الأطياف الامتصاصية لجزيئات اليخضور المختلفة

يجري في حال سير عملية التركيب الضوئي بشكل طبيعي نقل طاقي موجّه من الحالة المهيّجة الأولى للجزيئة الصبغية التي استقبلت الفوتونات مباشرةً إلى الجزيئة الصبغية المجاورة ضمن معقدات اقتناص الضوء، وهكذا حتى تصل الطاقة إلى المركز التفاعلي للنظام الضوئي. تجري عملية النقل الطاقي هذه بين الجزيئات الصبغية بفعل حادثة الطنين Resonance، إذ تؤثر الجزيئة المستقبلة للفوتون في الجزيئة المجاورة مؤدية إلى اهتزازها، ومن ثم نقلها من الحالة القاعدية إلى الحالة المهيّجة الأولى، بينما تعود الجزيئة المانحة إلى الحالة القاعدية. ولكي لا يحدث بعد ذلك انتقال للطاقة بشكل عكسي فإن الصبغات الضوئية تترتب ضمن معقدات اقتناص الضوء بشكل وظيفي باتجاه الزيادة في طول الطيف الامتصاصي، وبالتالي انخفاض المحتوى الطاقي، وهكذا لن تستطيع الجزيئة المستقبلة ذات المحتوى

Scanned with CamScanner

الطاقي المنخفض أن تعطي الطاقة ثانية بشكل عكسي إلى الجزيئة المانحة التي تتمتع بطول موجة أقصر وطاقة أعلى، الشكل (51).



الشكل (51): ترتب صبغات التركيب الضوئي ضمن معقدي اقتناص الضوء LHC I، LHC II

يؤدي وصول الطاقة الضوئية الممتصة في نهاية المطاف إلى المركز التفاعلي ضمن كل من النظامين إلى تحويل المركز من حالة قاعدية إلى حالة مهيّجة، إذ يقوم بعدها بإعطاء الكترون إلى مستقبل الكتروني مجاور Acceptor (A)، وبهذا يختلف اليخضور (a) في هذا المركز عن بقية الصبغات الضوئية. بعد إعطاء الالكترون يبقى المركز التفاعلي مؤكسداً على شكل $P680^{\oplus}$ أو $P700^{\oplus}$ لفترة من الزمن إذ يتم بعد ذلك إرجاعه بواسطة مانح الكتروني Donator (D)، الشكل (52)، يمكننا تمثيل دور المركز التفاعلي من خلال المعادلتين التاليتين :

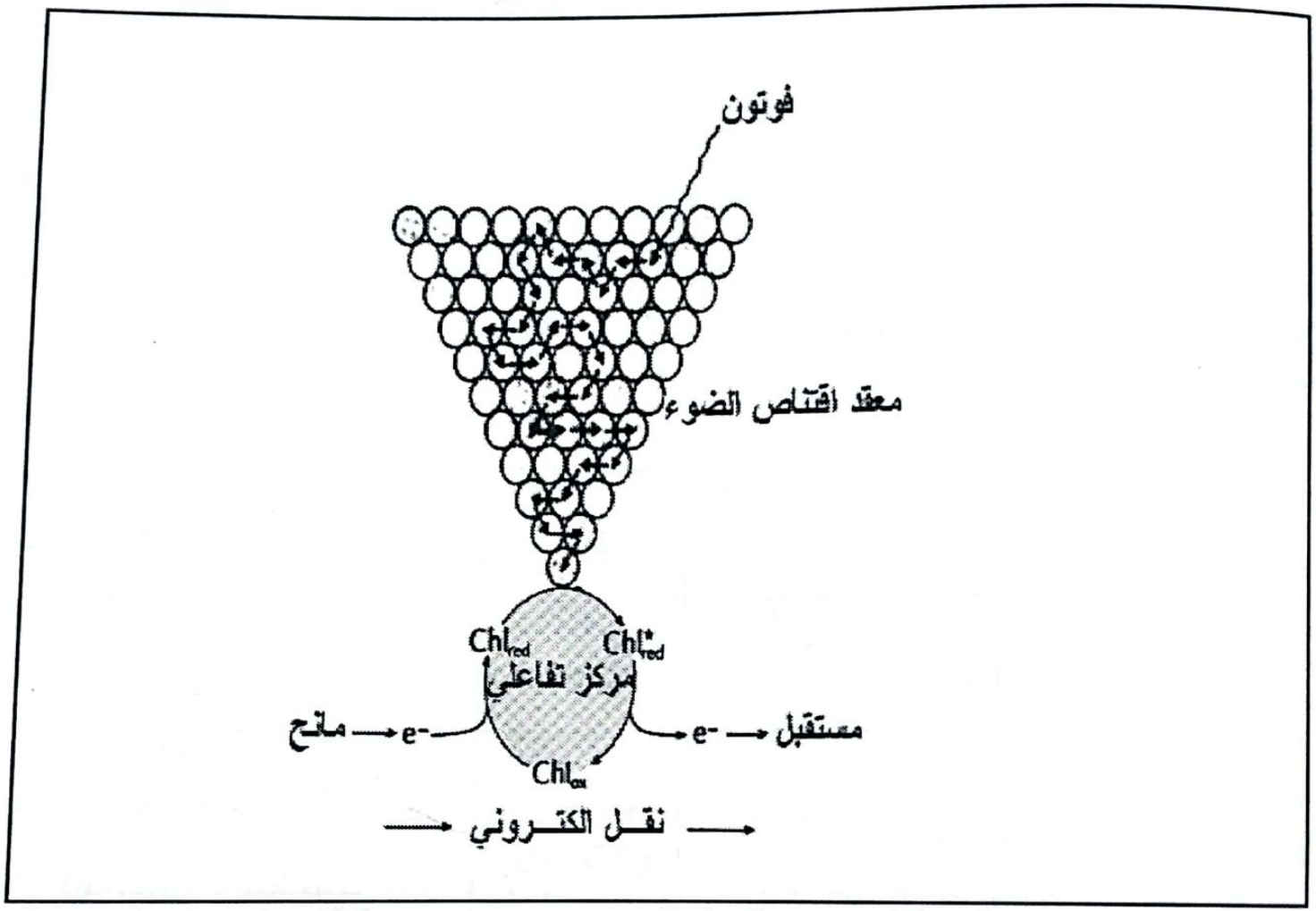
$$1\text{-}\ RC^{\bullet} \longrightarrow RC^{*} + A \longrightarrow RC^{\oplus} + A^{\ominus}$$

خامل — مهيّج — مشحون إيجابياً

$$2\text{-}\ RC^{\oplus} + D \longrightarrow RC^{\bullet} + D^{\oplus}$$

Scanned with CamScanner

إنّ عملية إرجاع مستقبل الكتروني وأكسدة آخر عاطٍ للالكترونات في المركز التفاعلي تمثّل الفعالية الضوئية للنظام الضوئي ونقطة تحويل الطاقة الضوئية إلى طاقة الكتروكهربائية تتمثّل في كمون الأكسدة والإرجاع.



الشكل (52): آلية عمل معقد اقتناص الضوء والمركز التفاعلي

Scanned with CamScanner