الحصيلة المعرفية للوحدة 01: آليات تحويل الطاقة الضوئية الى طاقة كيميائية كامنة.

الأستاذ: حمزة سمراني

تذكير بالمكتسبات

- تعريف عملية التركيب الضوئي: هي ظاهرة حيوية يتم فيها تحويل الطاقة الضوئية الى طاقة كيميائية كامنة في جزيئات المواد العضوية ومقرها على مستوى الصانعات الخضراء.
- شروطها: يجب توفر الشروط التالية:
- اليخضور. - الضوء. - CO_2. - الماء والاملاح المعدنية.
- مظاهرها: تتمثل في: امتصاص CO_2 وطرح O_2 وتركيب مادة عضوية.
- معادلة التركيب الضوئي:

$$6CO_2 + 12H_2O \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6H_2O + 6O_2$$
$$n(CO_2) + 2n(H_2O) \rightarrow (CH_2O)n + nO_2 + nH_2O$$

مقر عملية التركيب الضوئي

✓ وصف بنية الصانعة الخضراء:

- عضية ذات شكل بيضوي محاطة بغلاف مكون من غشاءين خارجي وداخلي يحيط بسائل يسمى المادة الأساسية (الحشوة، ستروما) والتي تحتوي على شبكة من التراكيب الغشائية بعضها طويلة تسمى صفائح حشوية، وأخرى صغيرة تسمى كيبيسات او تيلاكويد تتوضع فوق بعضها مشكلة غرانا (بذيرات)، كما تحتوي الحشوة على حبيبات نشوية، ADN، ريبوزومات.
- تمتاز الصانعة الخضراء ببنية حجيرية لأنها مقسمة الى 3حجرات مفصولة بأغشية وهي:

* الفراغ بين الغشاءين: يحدده الغشاءان (الخارجي والداخلي).
* الحشوة: يحددها الغشاء الداخلي للصانعة.
* تجويف التيلاكويد: يحدده غشاء التيلاكويد.

- بنية الصانعة الخضراء: الوثيقة (1) ص 177.

✓ طبيعة تفاعلات عملية التركيب الضوئي:

- يبين التحليل الكيميائي لمكونات الصانعة الخضراء وجود اختلاف في التركيب الكيميائي بين أغشية التيلاكويد والحشوة، مما يدل ان لهما وظائف مختلفة في عملية التركيب الضوئي.

- التركيب الكيميائي لعناصر الصانعة الخضراء: جدول ص177.

- عملية التركيب الضوئي هي تفاعلات أكسدة وإرجاع حيث:

* أكسدة الماء يتم على مستوى غشاء التيلاكويد، ويتطلب وجود ضوء ويخضور ويتم انطلاق O_2 وتسمى المرحلة الكيموضوئية.
* إرجاع CO_2 يتم على مستوى الحشوة، ويتطلب توفرCO_2 ويتم خلاله تركيب مادة عضوية وتسمى المرحلة الكيميوحيوية.

- معادلة التركيب الضوئي ص 179.

تفاعلات المرحلة الكيموضوئية

✓ بنية غشاء التيلاكويد:

يتكون من طبقة فوسفوليبيدية مضاعفة تحتوي على نظامين ضوئيين PSII وPSI وهي عبارة عن معقدات بروتينية تحتوي على عدد كبير من الأصبغة (اليخضور وأشباه الجزرين). كما يتكون من نواقل للإلكترونات وانزيم ATP سنتاز (كرية مذنبة). ويسمى مجموع هذه العناصر بالسلسلة التركيبية الضوئية.

- تموضع مكونات غشاء التيلاكويد: الوثيقة (2) ص 178.

✓ شروط عمل التيلاكويد:

ينتج من عمل التيلاكويد انطلاق O_2 وتتمثل شروطه في:

* وجود الضوء (طاقة ضوئية).
* وجود مستقبل للإلكترونات.
* وجود ADP + Pi.
* وجود CO_2 يعتبر شرط لاستمرار انطلاق O_2.

✓ تأثير ألوان الطيف على عمل التيلاكويد:

- يتكون الضوء الأبيض المرئي من سبعة أطياف تتغير اطوال موجاتها من 400 الى 700 نانو متر وهي على الترتيب: أزرق، بنفسجي، نيلي، أخضر، أصفر، برتقالي، أحمر.
- تمتص جزيئات اليخضور الاطياف بشدات مختلفة، فهي كبيرة في الاطياف الطرفية (ازرق وبنفسجي، أحمر) وقليلة في الاطياف الوسطية (أصفر، برتقالي) وتقريبا منعدمة في الأخضر.
- يكون توافق تام بين نسبة الامتصاص وشدة التركيب الضوئي، مما يدل أن الاطياف الأكثر امتصاصا هي الأكثر فعالية في عملية التركيب الضوئي.

- تأثير ألوان الطيف على عمل التيلاكويد: الوثيقة (2) ص181.

✓ آلية عمل التيلاكويد:

- أكسدة الماء:

أثناء المرحلة الكيموضوئية تتم أكسدة الماء لينتج عنه انطلاق O_2 حسب المعادلة التالية:

$$H_2O \longrightarrow 1/2O_2 + 2H^+ + 2e^-$$

- ارجاع مستقبل الإلكترونات:

يتمثل في NADP+ وهو مرافق انزيمي ينقل الالكترونات والبروتونات ويعتبر المستقبل الأخير للإلكترونات ويتم ارجاعه حسب المعادلة:

$$NADP^+ + 2e^- + 2H^+ \longrightarrow NADPH+H^+$$

✓ دور اليخضور والضوء في عمل التيلاكويد:

- تجربة التفلور (الاستشعاع):

يؤدي تعريض جزيئات يخضور للضوء الى انتقالها من الحالة الاصلية الى حالة التهيج حيث يكتسب الكترون من جزيئة اليخضور طاقة ضوئية فينتقل من مداره الأصلي الى مدار أعلى وتصبح في حالة تهيج، بعد زمن قصير يعود الالكترون الى مداره الأصلي ويحرر الطاقة التي اكتسبها على شكل حرارة واشعاعات حمراء (عودة الى حالة اصلية).

- تفسير ظاهرة التفلور: الوثيقة (5) ص 184.

- آلية عمل الأنظمة الضوئية:

يتكون النظام الضوئي من نوعين من الاصبغة هي:

* أصبغة هوائية:

تكون بأعداد كبيرة ويرمز لها بـ (P1,P2...Pn) دورها استقبال الطاقة الضوئية فتتهيج مما يسمح بنقل الطاقة المكتسبة من صبغة إلى صبغة مجاورة دون فقدان الإلكترون حتى تصل الى أصبغة مركز التفاعل.

* أصبغة مركز التفاعل:

يتكون من جزئيتين من اليخضور أ فقط ويرمز لها في PSI بـ (P_{700}) وفي PSII بـ (P_{680}) ودورها استقبال الطاقة التي تصل من الأصبغة الهوائية فتتهيج وتصبح (P^*_{700}) و(P^*_{680}) مما يؤدي إلى فقدانها الكترونات غنية بالطاقة وتصبح في حالة مؤكسدة (P^+_{700}) و(P^+_{680}) حسب المعادلات التالية:

$$2P_{680} \xrightarrow{\text{طاقة ضوئية}} 2P^*_{680} \longrightarrow 2P^+_{680} + 2é$$
$$2P_{700} \xrightarrow{\text{طاقة ضوئية}} 2P^*_{700} \longrightarrow 2P^+_{700} + 2é$$

- دور الاصبغة الهوائية وأصبغة مركز التفاعل: الوثيقة (6+7) ص185.

- حالة أصبغة مركز التفاعل في النظام الضوئي: الوثيقة (8+9) ص186.

قلم الجزائر
WWW.DZPEN.COM

✓ تسلسل تفاعلات المرحلة الكيميوضوئية:

- انتقال الالكترونات في السلسلة التركيبية الضوئية:

- في وجود الضوء تتم اكسدة النظامان الضوئيان PSI وPSII ويحرر كل منهما الكترونيين غنيين بالطاقة.

$$2P_{680} \xrightarrow{\text{طاقة ضوئية}} 2P^*_{680} \longrightarrow 2P^+_{680} + 2é$$
$$2P_{700} \xrightarrow{\text{طاقة ضوئية}} 2P^*_{700} \longrightarrow 2P^+_{700} + 2é$$

- اكسدة PSII يحفز الانزيم الذي يعمل على اكسدة الماء لينتج O_2 يطرح، والكترونات يستقبلها PSII المؤكسد (P^+_{680}) ليستعيد حالته الاصلية والبروتونات تبقى في تجويف التيلاكويد.

$$H_2O \longrightarrow 1/2O_2 + 2H^+ + 2é$$
$$2P^+_{680} + 2é \longrightarrow 2P_{680}$$

- الالكترونات التي يفقدها PSII تنتقل عبر نواقل الالكترونات ($T_1.T_2.T_3$) ليستقبلها PSI المؤكسد (P^+_{700}) ليسترجع حالته الاصلية ويعيد نشاطه.

$$2P_{680} \xrightarrow{\text{ضوء}} 2P^*_{680} \longrightarrow 2P^+_{680} + 2é$$
عبر النواقل $T_3.T_2.T_1$
$$2P^+_{700} + 2é \longrightarrow 2P_{700}$$

- الالكترونات التي يفقدها PSI تنتقل عبر نواقل الالكترونات ($T_1`.T_2`$) لتستقبل من المستقبل الأخير للإلكترونات $NADP^+$ ليتم ارجاعه الى $NADPH.H^+$ باستخدام $2H^+$ من الحشوة.

$$2P_{700} \xrightarrow{\text{ضوء}} 2P^*_{700} \longrightarrow 2P^+_{700} + 2é$$
عبر النواقل $T`_2.T`_1$
$$NADP^+ + 2é + 2H^+ \longrightarrow NADPH.H^+$$

- آلية انتقال الالكترونات في السلسلة التركيبية الضوئية:

- تنتقل الإلكترونات في السلسلة التركيبية الضوئية تلقائيا وفق تدرج متزايد في كمون أكسدة/ارجاع أي من ناقل ذو كمون منخفض الى ناقل ذو كمون مرتفع ويؤدي هذا الى فقدان تدريجي لطاقة الالكترون.
- يستقبل PSII وPSI الطاقة الضوئية التي تؤدي الى التهيج وانخفاض كمون أكسدة/إرجاع لكل منهما مما يسمح بتحرير الكترونات واكسدتهما الى $PSII^+$ وPSI^+ ويرتفع كمون اكسدة/ارجاع لكل منهما من اجل استرجاع الالكترونات المفقودة.
- يستعيد $PSII^+$ المؤكسد الكتروناته من جزيئة الماء ذات كمون منخفض بعد أكسدتها.
- يستعيد PSI^+ المؤكسد الكتروناته من PSII بعد مرورها عبر النواقل $T_3.T_2.T_1$ من كمون منخفض الى كمون مرتفع.
- الالكترونات المحررة من PSI تنتقل عبر $T_2`.T_1`$ من كمون منخفض الى كمون مرتفع لتستقبل من طرف $NADP^+$.

- آلية انتقال الالكترونات في السلسلة التركيبية الضوئية:

الوثيقة (10) ص188.

- ملاحظة:

- يمكن للناقل T_1 نقل الالكترونات é والبروتونات H^+ بينما باقي النواقل تنقل الالكترونات فقط.

- يقوم الناقل T_2 بنقل الالكترونات كما يقوم بدور مضخة لإدخال البروتونات H^+ التي تأتي عبر T_1 من الحشوة الى تجويف التيلاكويد باستخدام الطاقة التي تحرر من الالكترونات اثناء انتقالها عبر النواقل.

✓ الفسفرة الضوئية (تركيب ATP):

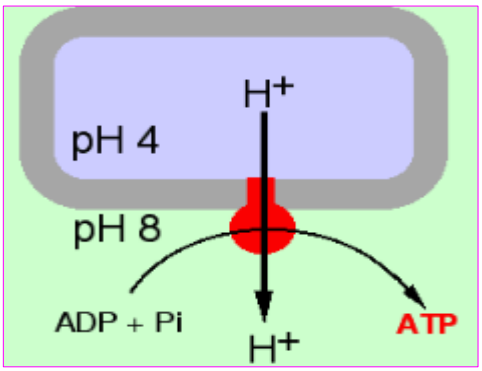
- يصاحب نقل الإلكترونات في السلسلة التركيبية الضوئية تراكم البروتونات في تجويف التيلاكويد الناتجة من اكسدة الماء بالإضافة الى البروتونات التي يتم ضخها عبر T_2، فيتولد فرق في تركيز البروتونات بين التجويف والحشوة (تركيز H^+ في التجويف أكبر من الحشوة).

- وجود فرق في تركيز H^+ يؤدي الى خروجها من التجويف الأعلى تركيز الى الحشوة الأقل تركيز عبر الكرية المذنبة مؤدية الى تحفيز الانزيم الذي يقوم بفسفرة ADP الى ATP باستخدام Pi وتسمى هذه العملية بالفسفرة الضوئية.

$$ADP + Pi \longrightarrow ATP$$

- شروط تركيب الـ ATP:

- وجود فرق في تركيز البروتونات بين تجويف التيلاكويد والحشوة حيث يكون تجويف التيلاكويد أكثر تركيز من الحشوة.
- وجود وسلامة الكرية المذنبة (ATP Synthase).
- توفر ADP و Pi.



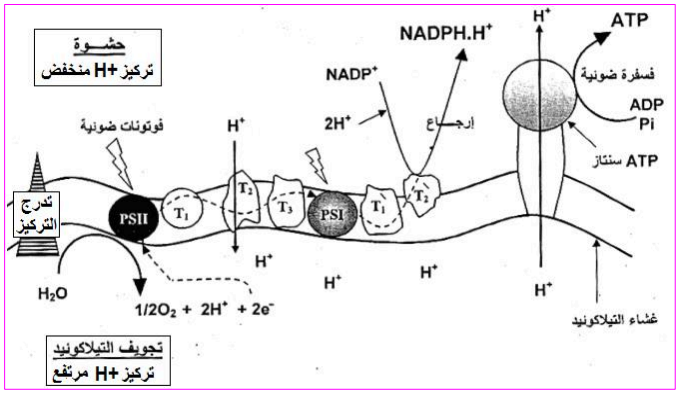
- ملاحظة:

- قيمة (PH) تعبر عن تركيز البروتونات حيث أن سلم pH يتناسب عكسيا مع تركيز البروتونات أي أن أنه كلما زاد تركيز H^+ انخفضت قيمة الـ PH والعكس صحيح.

✓ نواتج المرحلة الكيموضوئية:

- اكسدة الماء وانطلاق O2.
- ارجاع المستقبل $NADP^+$ وتشكل $NADPH.H^+$.
- فسفرة ADP وتركيب ATP.

* رسم تخطيطي للظواهر الفيزيولوجية التي تظهر على مستوى التيلاكويد خلال المرحلة الكيميوضوئية: - وثيقة ص199 -



قلم الجزائر
WWW.DZPEN.COM

تفاعلات المرحلة الكيموحيوية

تتم في الحشوة وتسمح بتثبيت CO_2 وإنتاج جزيئات عضوية.

✓ تثبيت غاز CO_2:

تتمثل شروط دمج غاز CO_2: في:

* توفر CO_2.
* نواتج المرحلة الكيميوضوئية.
* يعتبر الضوء شرط لاستمرار تثبيت CO_2.

✓ آلية دمج (إرجاع) غاز CO_2:

- يُثبت الـ CO_2 على جزيئة خماسية الكربون (5C) الريبولوز ثنائي الفوسفات (Rudip) لينتج جزيئتين من مركب ثلاثي الكربون (3C) هو حمض الفوسفو غليسريك (APG).
- يتم دمج الـ CO_2 بتدخل إنزيم الريبولوز ثنائي الفوسفات كربوكسيلاز (Rubisco).
- يتم فسفرة APG الى مركب ثلاثي الكربون (3C) هو حمض ثنائي فوسفوغليسريك (ADPG) بإماهة ATP الى ADP.
- يتم ارجاع وإزالة فسفرة لـ ADPG لينتج مركب ثلاثي الكربون (3C) هو فوسفوغليسرالدهيد (PGal) مع اكسدة $NADPH.H^+$ الى $NADP^+$.
- يستخدم جزء من PGal في تركيب السكريات والجزء الأخر يستعمل لتجديد RuDP ويتم خلاله اماهة ATP الى ADP.
- تتم تفاعلات المرحلة الكيموحيوية في شكل سلسة حلقية لذلك تسمى حلقة كلفن نسبة الى العالم الذي اكتشفها.

- مراحل حلقة كلفن: الوثيقة (4) ص 195.

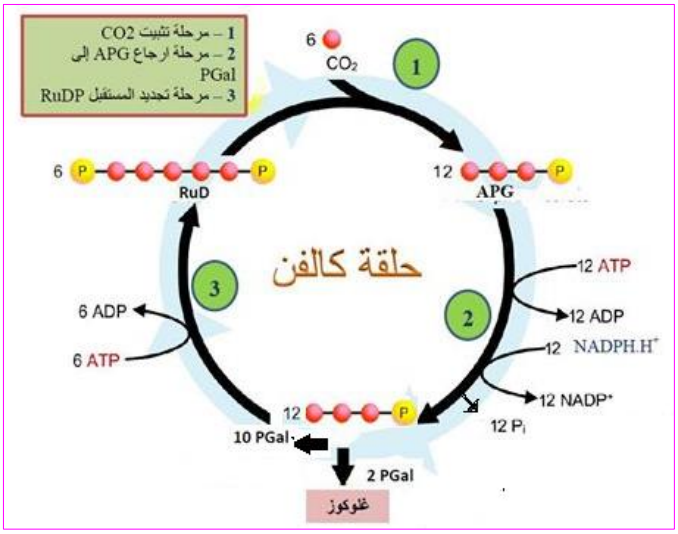
-العلاقة بين APG و RuDP:

إن المركبين يتحولان إلى بعضهما ضمن حلقة يتطلب استمرارها توفر CO_2 والضوء بحيث RuDP يتحول إلى APG بعد تثبيته للـ CO_2 وAPG يجدد RuDP باستعمال نواتج المرحلة الكيميوضوئية.

* في الحالة العادية في وجود CO_2 والضوء تكون سرعة التحول مساوية لسرعة التركيب لكل منهما.
* في غياب CO_2 ووجود الضوء يحدث تراكم RuDP بسبب توقف تحويله واستمرار تركيبه، وانخفاض APG بسبب توقف تركيبه واستمرار تحويله.
* في وجود CO_2 وغياب الضوء يحدث انخفاض RuDP بسبب توقف تركيبه واستمرار تحويله، وارتفاع APG بسبب توقف تحويله واستمرار تركيبه.

- العلاقة بين APG وRuDP: الوثيقة (3) ص 194.

- مخطط يبين مراحل تفاعلات حلقة كلفن -



التكامل بين المرحلة الكيميوضوئية والمرحلة الكيميوحيوية

- اثناء حدوث عملية التركيب الضوئي في الصانعة الخضراء يتم الجمع والتكامل بصورة منظمة بين تفاعلات المرحلة الكيموضوئية وتفاعلات المرحلة الكيموحيوية حيث:

* المرحلة الكيموضوئية: توفر ATP و$NADPH.H^+$ اللذان يعتبران من شروط حدوث المرحلة الكيموحيوية.
* المرحلة الكيموحيوية: توفر (تجديد) المواد الأولية $ADP+Pi$ و$NADP^+$ اللذان يعتبران من شروط المرحلة الكيموضوئية.

* وهكذا تحدث المرحلتان معا بشكل متكامل لكي يتم انتاج المواد العضوية التي تحمل طاقة كيميائية كامنة.

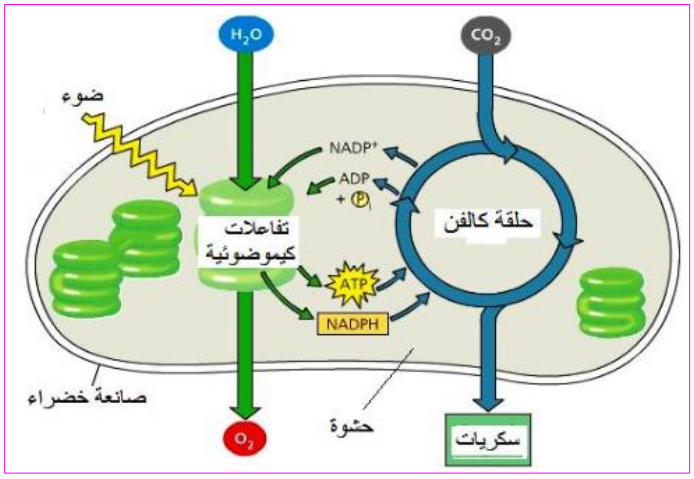
- رسم تخطيطي يوضح التكامل بين المرحلتين الكيموضوئية والكيموحيوية: الوثيقة (5) ص 196.

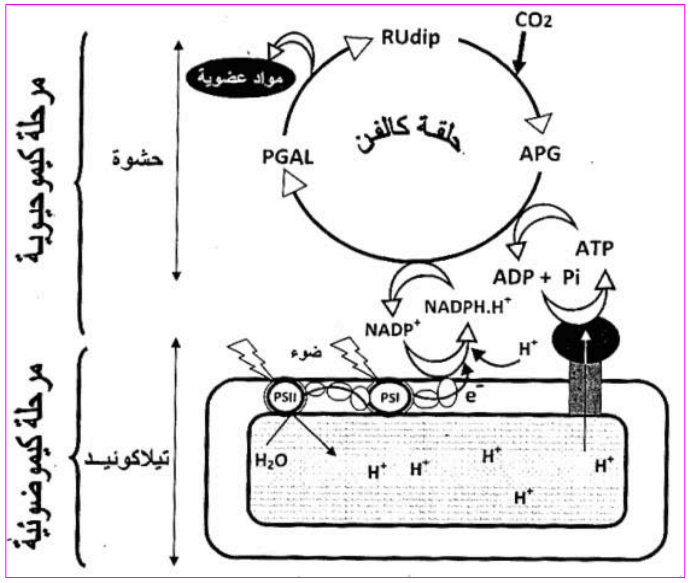
المرحلة الكيموضوئية

$12H_2O + 12NADP^+ + 18ADP + 18Pi \xrightarrow{\text{ضوء}} 6O_2 + 12NADPH^+.H^+ + 18ATP$:تيلاكويد

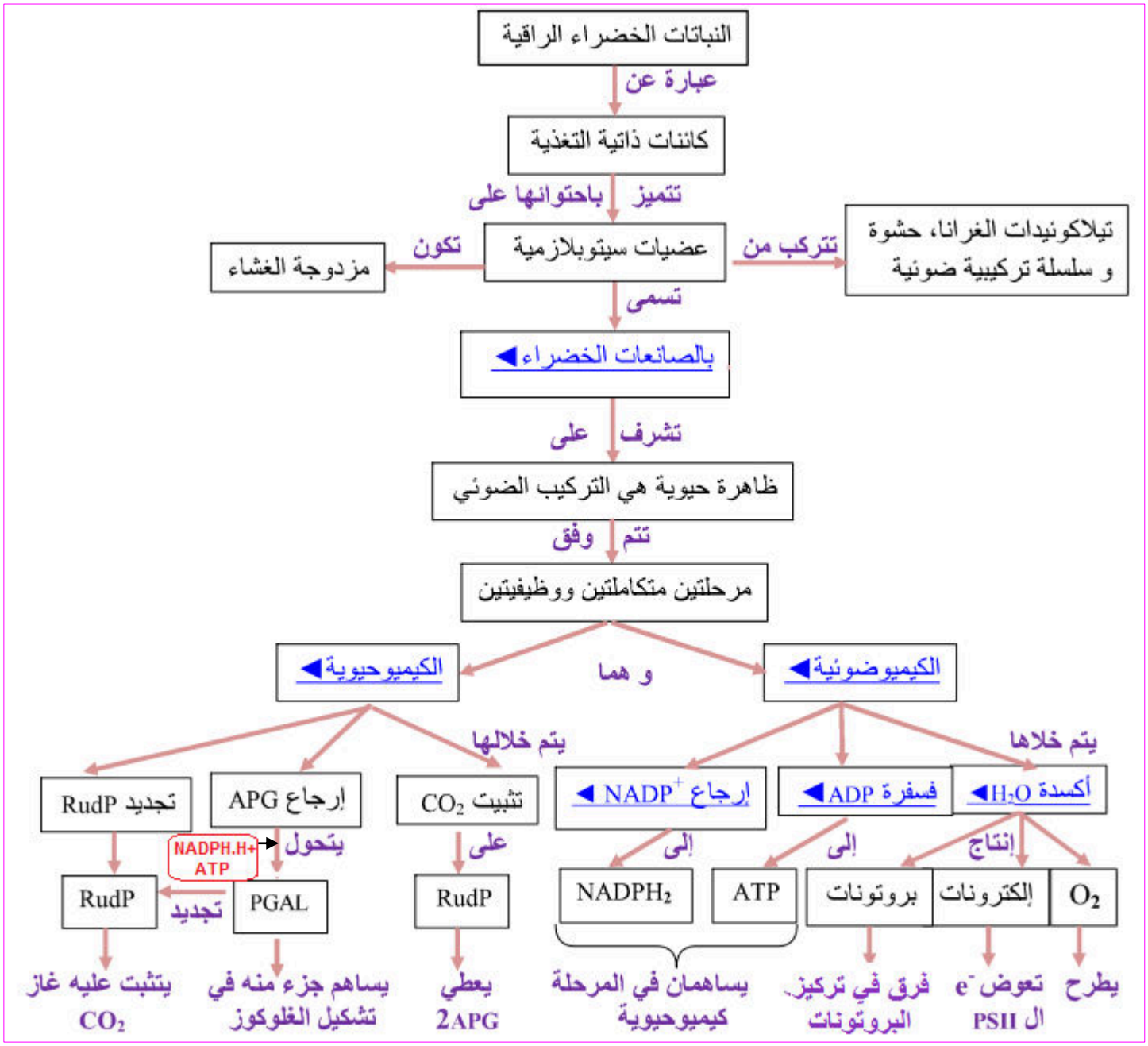
المرحلة الكيموحيوية (حلقة كالفن)

$6CO_2 + 12NADPH^+.H^+ + 18ATP \longrightarrow$ غلوكوز $+ 12NADP^+ + 18ADP + 18Pi$:الحشوة





- مخطط تحصيلي يوضح آليات تحويل الطاقة الضوئية الى طاقة كيميائية كامنة (التركيب الضوئي) -



قلم الجزائر WWW.DZPEN.COM