

منهج 2024

الوحدة السادسة

الطاقة والتنفس

الأساس في الأحياء ثاني عشر

أهداف التعلم

- 1-6 يلخص حاجة الكائنات الحية للطاقة، كما يتضح من خلال النقل النشط والحركة وتفاعلات البناء كتلك التي تحدث في تضاعف DNA وبناء البروتين. يصف
- 2-6 سمات ATP التي تجعله مناسبًا كعملة طاقة عالمية.
- 3-6 يشرح أنه يتم بناء ATP بواسطة :
 - نقل الفوسفات في التفاعلات المرتبطة بالمواد المتفاعلة
 - الأسموزية الكيميائية في أغشية الميتوكوندريا والبلاستيدات الخضراء.
- 4-6 يذكر مكان حدوث كل مرحلة من مراحل التنفس الهوائي الأربع في الخلايا حقيقية النواة:
 - التحلل السكري في السيتوبلازم
 - التفاعل الرابط في حشوة الميتوكوندريا
 - دورة كربس في حشوة الميتوكوندريا
 - الفسفرة التأكسدية على غشاء الميتوكوندريا الداخلي.
- 5-6 يلخص التحلل السكري على أنه فسفرة الجلوكوز والانشطار اللاحق للفركتوز 1 ، 6 - ثنائي الفوسفات (C) إلى جزيئي تريوز فوسفات (C3) اللذين يتأكسدان إلى جزيئي بيروفات (C3)، مع إنتاج ATP و NAD المُختزل.
- 6-6 يشرح أنه عند توافر الأكسجين يدخل جزيء البيروفات إلى الميتوكوندريا للمشاركة في التفاعل الرابط.
- 7-6 يصف التفاعل الرابط، بما في ذلك دور مرافق الإنزيم A في نقل مجموعات الأستيل (C2).
- 8-6 يلخص دورة كربس، شارحًا أن أكسالوأسيتات (C4) يعمل كمستقبل لـ (C2) من أستيل مرافق إنزيم A لتكوين السيترات (C)، والذي سيتحول مرة أخرى في سلسلة من الخطوات الصغيرة إلى أكسالوأسيتات.
- 9-6 يشرح أن التفاعلات في دورة كربس تتضمن:
 - نزع الكربوكسيل
 - نزع الهيدروجين
 - اختزال مرافق الإنزيم NAD و FAD
 - فسفرة ADP.
- ١٠-٦ يصف دور NAD و FAD في نقل الهيدروجين إلى نواقل في غشاء الميتوكوندريا الداخلي.
- ١١-٦ يشرح أنه أثناء الفسفرة التأكسدية:
 - تنشطر ذرات الهيدروجين إلى بروتونات والكاتيونات عالية الطاقة
 - تطلق الإلكترونات عالية الطاقة أثناء مرورها طاقة عبر سلسلة نقل الإلكترون (تفاصيل النواقل ليست مطلوبة).
 - تستخدم الطاقة المنطلقة لنقل البروتونات عبر غشاء الميتوكوندريا الداخلي

الأساس في الأحياء ثاني عشر

- تعود البروتونات إلى حشوة الميتوكوندريا عن طريق الانتشار المسهل من خلال ATP سينثيز الأمر الذي يوفر الطاقة لبناء ATP (تفاصيل ATP سينثيز ليست مطلوبة).
 - يعمل الأكسجين كمستقبل نهائي للإلكترونات لتكوين الماء.
- ١٢-٦ يصف ويفسر الاستقصاءات باستخدام مقاييس تنفس بسيطة لتحديد تأثير درجة الحرارة على معدل التنفس.
- ١٣-٦ يصف العلاقة بين تركيب ووظيفة الميتوكوندريا باستخدام الرسوم التخطيطية والصور المجهرية الإلكترونية.
- ١٤-٦ يلخص التنفس في الظروف اللاهوائية في الثدييات (تخمير اللاكتات وفي خلايا الخميرة وبعض الكائنات الحية الدقيقة الأخرى وبعض خلايا النباتات (تخمير الإيثانول).
- ١٥-٦ يشرح سبب أن كمية الطاقة المنطلقة من التنفس في الظروف الهوائية أعلى بكثير من كمية الطاقة المنطلقة من التنفس في الظروف اللاهوائية (الحساب التفصيلي للناتج الإجمالي من ATP من التنفس الهوائي للجلوكوز ليس مطلوباً).
- ١٦-٦ يشرح كيفية مناسبة تركيب نبات الأرز للنمو مع غمر جذوره في الماء، مقتصرًا على نمو نسيج الإيرنشيما في الجذور، وتخمير الإيثانول في الجذور والنمو السريع في الساق.
- ١٧-٦ يصف ويفسر الاستقصاءات باستخدام كواشف الأكسدة والاختزال بما في ذلك DCPIP وأزرق الميثيلين لتحديد تأثير درجة الحرارة وتركيز المادة المتفاعلة على معدل تنفس الخميرة.

الأساس في الأحياء ثاني عشر

- لماذا تحتاج خلاياك إلى الطاقة؟
- كيف توفر عملية التنفس الطاقة المفيدة للخلايا؟
- في أي خلايا جسمك يحدث التنفس؟

١-٦ حاجة الكائنات الحية إلى الطاقة

تحتاج جميع الكائنات الحية إلى التزود بالطاقة باستمرار للبقاء على قيد الحياة. وهذه الطاقة ضرورية لكل كائن حي وكل خلية حية لعدة أغراض متنوعة وهي:

- يجب نقل المواد عبر الأغشية ضد منحدر تركيزها بالنقل النشط
- تتطلب الحركة طاقة، سواء كانت داخل الخلية، مثل نقل البروتين من مكان بنائه على الرايبوسوم إلى جهاز جولجي، أو على مستوى الخلايا أو الأنسجة أو الأعضاء ككل، مثل انقباض العضلات).
- يتطلب بناء الجزيئات الكبيرة من الجزيئات الأصغر، مثل تضاعف جزيئات DNA، أو بناء البروتينات، الطاقة دائماً (الوحدة الأولى، الأحماض النووية وبناء البروتين). وهذا النوع من التفاعلات الأيضية يسمى تفاعلات البناء Anabolic reactions.

ما المادة التي تعتبر مصدراً للطاقة داخل الكائنات الحية؟

تُستخدم المادة نفسها في جميع الكائنات الحية المعروفة لتوفر الطاقة لهذه العمليات، وذلك على شكل جزيء (ATP أدينوسين ثلاثي الفوسفات).

علل: يعتبر جزيء ATP هو عملة الطاقة العالمية للخلايا

- لأن كل خلية حية تستخدم ATP لنقل الطاقة. وتكوّن كل خلية ATP الخاص بها، ثم تطلق الطاقة من جزيئات ATP لتوفرها للعمليات الحيوية

ما مصدر الطاقة المخزنة في جزيئات ATP؟

تنشأ الطاقة في معظم الكائنات الحية من ضوء الشمس. فالنباتات وغيرها من الكائنات الحية التي تقوم بالتمثيل الضوئي تلتقط الطاقة من ضوء الشمس وتحولها إلى طاقة كيميائية آمنة في الجزيئات العضوية مثل الكربوهيدرات والدهون والبروتينات وهي تقوم بذلك عن طريق التمثيل الضوئي.

- في الوحدة السابعة ستتعرف كيف تنقل الطاقة المحتجزة في الكربوهيدرات والدهون والبروتينات إلى ATP في عملية التنفس Respiration.

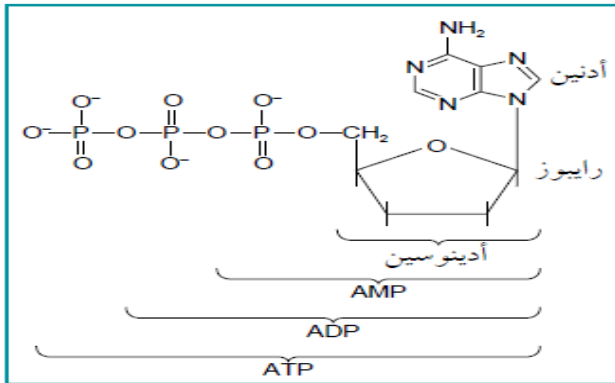
تركيب ATP

عبارة عن نيوكليوتيد مفسفر. يتكوّن جزيء ATP من

- 1- القاعدة أدينين
- 2- سكر رايبوز

3- ثلاث مجموعات فوسفات (الشكل ١-٦).

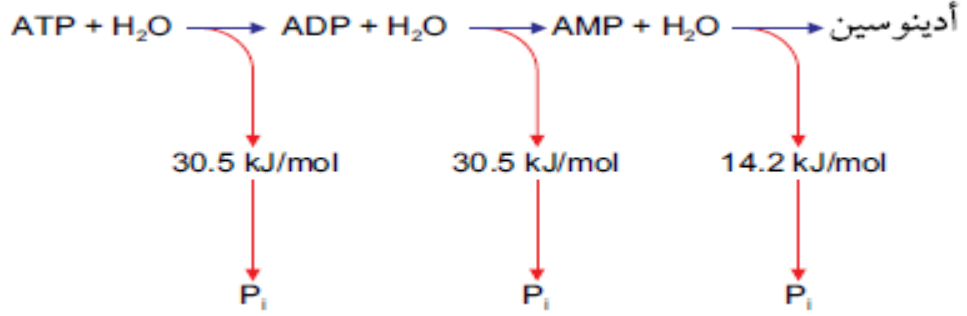
الشكل ١-٦ تركيب جزيء ATP.



الأساس في الأحياء ثاني عشر

كيف تنطلق الطاقة من جزيئات ATP ؟

عند نزع مجموعة فوسفات واحدة من ATP، يتكون ADP (أدينوسين ثنائي الفوسفات)، وتنطلق طاقة مقدارها 30.5 kJ/mol. وينتج من نزع مجموعة فوسفات ثانية AMP (أدينوسين أحادي الفوسفات) وتنطلق طاقة مقدارها 30.5 kJ/mol أيضًا. وبزنع آخر مجموعة فوسفات يبقى الأدينوسين وتنطلق فقط 14.2 kJ/mol (الشكل ٢-٦).



الشكل ٢-٦ - التحلل المائي لـ ATP لإطلاق الطاقة.

P_i هو فوسفات غير عضوي، PO₄³⁻

علل: يُعد ATP العملة المثالية للطاقة..... وذلك لعدة أسباب:

- يمكن أن يحدث التحلل المائي لجزيء ATP بسرعة وسهولة في أي جزء من الخلية يحتاج إلى الطاقة.
- يطلق التحلل المائي لجزيء واحد من ATP كمية كافية لتزويد عملية تتطلب الطاقة في الخلية، وليس كمية كبيرة يتم إهدارها.
- ATP جزيء مستقر نسبيًا في نطاق الرقم الهيدروجيني pH الذي يوجد عادة في الخلايا وهو لا يتفكك إلا عند وجود عامل حفاز على سبيل المثال إنزيم ATPase.

لماذا تكون خلايا الجسم جزيئات ATP ؟

من المحتمل أن يوجد في جسمك في هذه اللحظة ما بين 50-200 g من ATP وسوف تستخدم أكثر من 50 kg من ATP في هذا اليوم (قد يماثل هذا الرقم كتلة جسمك الكلية). لذا، تحتاج خلاياك إلى تكوين ATP باستمرار ؛ وهي لا تبني مخازن كبيرة منه، لكنها تكوّنه عند الحاجة إليه.

كيف تتكون جزيئات ATP داخل الخلايا؟

يتكوّن ATP عند اندماج مجموعة فوسفات مع ADP ، على عكس التفاعل المبين في الشكل ٢-٦ ، ويحدث ذلك بطريقتين رئيسيتين:

- استخدام الطاقة التي يوفرها مباشرة تفاعل كيميائي آخر يسمى التفاعل المرتبط بالمادة المتفاعلة
- عن طريق الأسموزية الكيميائية : وهي عملية تحدث عبر غشاء الميتوكوندريا الداخلي أو البلاستيدة الخضراء، باستخدام الطاقة المنطلقة من حركة أيونات الهيدروجين مع منحدر تركيزها.

ملحوظة: في الإنسان يتكوّن جميع ATP في عملية التنفس، عن طريق التفاعلات المرتبطة بالمادة المتفاعلة، والأسموزية الكيميائية. ستوصف هذه العمليات لاحقًا في هذه الوحدة.

الأساس في الأحياء ثاني عشر

ويتكوّن ATP في النباتات أيضًا في التنفس، وفي التمثيل الضوئي الذي يوصف في الوحدة السابعة. إن حاجة الإنسان إلى التزوّد المستمر بـ ATP تتطلب منه التنفس باستمرار. يوفر التنفس الأكسجين للخلايا التي تستخدمه لأكسدة الجلوكوز وإطلاق الطاقة منه، وتستخدم هذه الطاقة لبناء جزيئات ATP.

مصطلحات علمية

تفاعلات البناء: تفاعلات كيميائية يتم فيها بناء الجزيئات الكبيرة من جزيئات أصغر.

التنفس: عملية إطلاق الطاقة بواسطة الإنزيمات من المركبات العضوية في الخلايا الحية.

التفاعل المرتبط بالمادة المتفاعلة: تفاعل يتم فيه نقل الفوسفات من جزيء المادة المتفاعلة مباشرة إلى ADP لتكوين ATP باستخدام الطاقة التي يوفرها مباشرة تفاعل كيميائي آخر.

الأسموزية الكيميائية: بناء ATP باستخدام الطاقة المنطلقة من حركة أيونات الهيدروجين مع منحدر تركيزها عبر غشاء الميتوكوندريون أو البلاستيدة الخضراء.

أسئلة:

- 1- استفد من الشكل ٦-٢- لكتابة معادلة تكوّن ATP من ADP.
- 2- «العملة» مصطلح يستخدم عادة لوصف النقود. ناقش مع زميلك معنى المصطلح عملة الطاقة، وسبب استخدام هذا المصطلح لوصف ATP. حاول مناقشة أفكارك مع بقية زملائك في الصف.

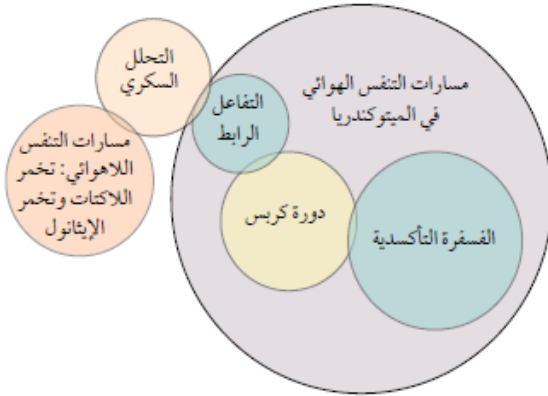
٢-٦ التنفس الهوائي

التنفس : هو العملية التي تتفكك فيها الجزيئات العضوية في سلسلة من المراحل لإطلاق الطاقة الكيميائية الكامنة، التي تستخدم لبناء ATP .

والجزيء العضوي الرئيسي الذي يُستخدم في هذه العملية هو الكربوهيدرات، وعادة ما يكون **الجلوكوز**. يمكن للعديد من الخلايا بما فيها خلايا الدماغ - استخدام الجلوكوز فقط كمادة متفاعلة للتنفس. ومع ذلك، تفكك خلايا أخرى الأحماض الدهنية والجليسرول والأحماض الأمينية للتنفس. فعلى سبيل المثال، تستخدم عضلات القلب **الأحماض الدهنية**.

مراحل التنفس الهوائي (تفكك الجلوكوز)

يمكن تقسيم عملية تفكك الجلوكوز إلى أربع مراحل



1- التحلل السكري في السيتوبلازم

2- التفاعل الرابط داخل الميتوكوندريا

3- دورة كريس داخل الميتوكوندريا

4- الفسفرة التأكسدية داخل الميتوكوندريا (الشكل ٦-٣).

الشكل ٦ - ٣ موقع مسارات عملية التنفس في الخلية.

يتضمن التنفس اللاهوائي مسارات أخرى تحدث في السيتوبلازم.

التحلل السكري

هو انشطار الجلوكوز خلال سلسلة من التفاعلات (الخطوات التي ينشطر في نهايتها جزيء الجلوكوز سداسي الكربون (6C) إلى جزيئين من البيروفات Pyruvate ثلاثي الكربون (3C) .

أين يحدث : يحدث في سيتوبلازم الخلية.

مقدار الطاقة الناتجة: من المدهش أنه في بداية التحلل السكري يتم استخدام الطاقة من ATP بدلا من تكوينه. ولكن، يتم إطلاق الطاقة في الخطوات اللاحقة حيث يمكن استخدامها لبناء ATP . يتم إطلاق كمية من الطاقة أكبر مما يُستخدم، وبشكل عام يتوافر ربح صاف قدره جزيئات ATP من تحلل كل جزيء جلوكوز واحد . يبين الشكل ٦-٤ مخططا انسيابيا مبسطا لسلسلة الخطوات في التحلل السكري .

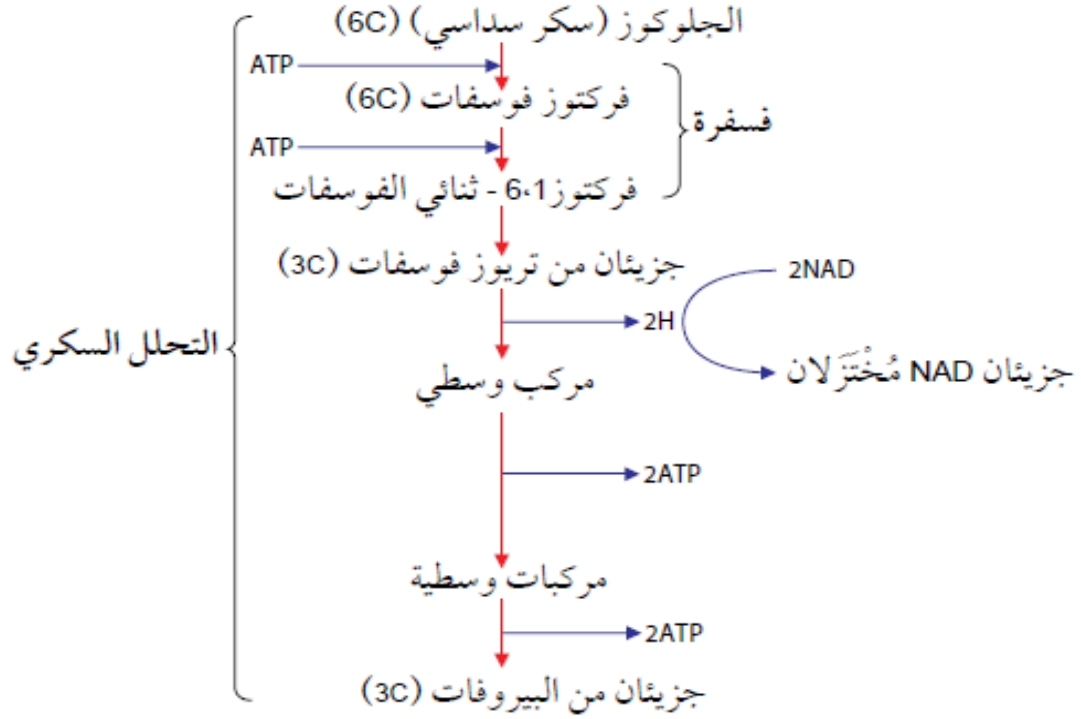
خطوات التفاعل:

الخطوة الأولى: تسمى الفسفرة ويتم فيها منح أول مجموعة فوسفات من جزيئات ATP إلى الجلوكوز لينتج منه **جلوكوز فوسفات** والذي يرفع من مستوى الطاقة لجزيئات الجلوكوز ، ما يسهل عليها التفاعل في الخطوة التالية.

الأساس في الأحياء ثاني عشر

* ويتم استخدام جزيئين من ATP لتحلل جزيء واحد من الجلوكوز.

الخطوة الثانية: يُعاد ترتيب ذرات الجلوكوز فوسفات لتكوين فركتوز فوسفات ، ويمنح جزيء ATP الثاني مجموعة فوسفات أخرى لتكوين فركتوز 1،6 - ثنائي الفوسفات



الشكل ٤-٦ سلسلة الخطوات في التحلل السكري. تحدث جميع هذه الخطوات في سيتوبلازم الخلية.

الخطوة الثالثة: ينشط الفركتوز 1،6 - ثنائي الفوسفات (6C) مكوناً جزيئين من تريوز فوسفات

الخطوة الرابعة: يتم نزع الهيدروجين والإلكترونات من تريوز فوسفات وينقل إلى المرافق الإنزيمي **نيكوتين أميد أدنين ثنائي النيوكوتيد (NAD)** . ويسمى نزع الهيدروجين أو الإلكترونات **أكسدة** لذا يتأكسد تريوز فوسفات خلال هذه العملية. وتسمى إضافة الهيدروجين أو الإلكترونات للمادة المتفاعلة **اختزال** ويسمى **NAD** الآن **NAD المُختَزَل**. يتم إنتاج جزيئين من NAD المُختَزَل من تحلل جزيء واحد من الجلوكوز، ويمكن نقل الهيدروجين الذي يحمله NAD المُختَزَل بسهولة إلى جزيئات أخرى. وكما ستدرس لاحقاً.

الخطوة الخامسة: يمكن أن يستخدم الهيدروجين الذي يحمله NAD المُختَزَل في الفسفرة التأكسدية لتوليد ATP. ويتم إنتاج ATP خلال الخطوة نفسها (تحويل تريوز فوسفات إلى **بيروفات**، وذلك عن طريق النقل المباشر لمجموعة فوسفات من مادة متفاعلة - في هذه الحالة جزيء مفسفر، وهو أحد المركبات الوسيطة في هذه الخطوة - إلى جزيء ADP . وهذا مثال على **الفسفرة المرتبطة بالمادة المتفاعلة**.

النواتج

1- على الرغم من استخدام جزيئين من ATP لتحلل جزيء واحد من الجلوكوز في البداية، فإن أربع جزيئات من ATP تتكون في النهاية. لذلك يكون الربح الصافي من تحلل جزيء واحد من الجلوكوز جزيئين من ATP

الأساس في الأحياء ثاني عشر

2- والنتائج النهائي لتحلل الجلوكوز هو البيروفات، الذي لا يزال يحتوي على قدر كبير من الطاقة الكيميائية الكامنة وإذا توافر الأكسجين في الخلية، ينتقل البيروفات إلى حشوة الميتوكوندريون، عبر الغشاءين اللذين يكونان غلاف الميتوكوندريون بواسطة النقل النشط لذا تستخدم مرة أخرى كمية صغيرة من (ATP).

مصطلحات علمية

التحلل السكري: Glycolysis انشطار الجلوكوز، وهي المرحلة الأولى من التنفس الهوائي.

الفسفرة Phosphorylation : إضافة مجموعة فوسفات إلى جزيء.

نيكوتين أميد أدنين ثنائي النيوكليوتيد (NAD) : مرافق إنزيمي، يقوم بنقل الهيدروجين ويستخدم في التنفس.

أكسدة Oxidation : إضافة الأكسجين، أو نزع الهيدروجين أو الإلكترونات من المادة.

اختزال Reduction : نزع الأكسجين أو إضافة الهيدروجين أو الإلكترونات إلى المادة.

ثانياً: التفاعل الرابط

1- عند وصول البيروفات إلى حشوة الميتوكوندريون تنزع الإنزيمات ثاني أكسيد الكربون والهيدروجين منه ، تسمى إزالة ثاني أكسيد الكربون **نزع الكربوكسيل** وتسمى إزالة الهيدروجين **نزع الهيدروجين**

2- يرتبط ما تبقى من الجزيء مع مرافق الإنزيم (CoA) لإنتاج أستيل CoA (Acetylco coenzyme A) . تسمى هذه العملية التفاعل الرابط الشكل (5-6)، لأنها تربط التحلل السكري بدورة كربس.

3- ينقل (COA) مجموعات الأستيل الضرورية لتحويل أكسالوأسيتات إلى سترات ينقل الهيدروجين الذي نزع من البيروفات في التفاعل الرابط إلى NAD مكوناً المزيد من NAD المُختزل.

$$\text{NAD المُختزل} + \text{ثاني أكسيد الكربون} + \text{أستيل CoA} \rightarrow \text{CoA} + \text{NAD} + \text{البيروفات}$$

(CoA) (ACoenzyme) : جزيء معقد يتكون من نيوكليوسيد (أدينين ورايبوز مرتبط بفيتامين (حمض البانتوثنيك فيتامين B₅) مرافق الإنزيم هو جزيء ضروري للإنزيم لتحفيز التفاعل، على الرغم من أنه لا يشارك في التفاعل نفسه.

مصطلحات علمية

نزع الكربوكسيل : نزع ثاني أكسيد الكربون من مادة ما .

نزع الهيدروجين : نزع الهيدروجين من مادة ما .

مرافق الإنزيم A (CoA) : جزيء يحمل مجموعات الأستيل اللازمة لدورة كريس .

أستيل CoA : جزيء يتكون من (CoA) ومجموعة أستيل (2C) ، وهو ضروري لدورة كريس .

التفاعل الرابط : عملية نزع الكربوكسيل ونزع الهيدروجين من البيروفات، ما يؤدي إلى تكوين أستيل (COA) وربط التحلل السكري بدورة كربس .

دورة كريس : دورة من تفاعلات التنفس الهوائي تحدث في حشوة الميتوكوندريا حيث تنتقل أيونات

الأساس في الأحياء ثاني عشر

الهيدروجين إلى نواقل الهيدروجين لبناء ATP ، ويبنى بعض ATP مباشرة، وتسمى أيضًا دورة حمض الستريك.

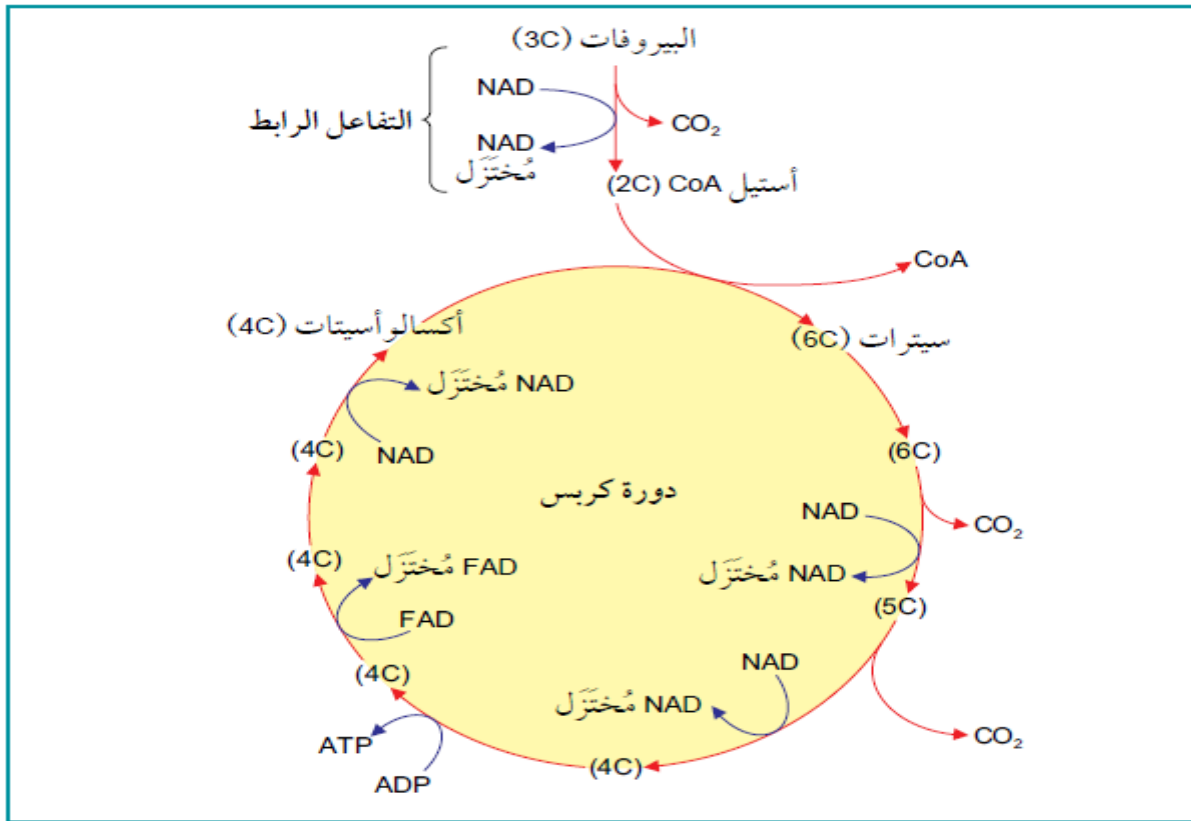
الثالث: دورة كريس

سُميت دورة كريس على اسم السير هانز كريس ، الذي حاز جائزة نوبل لاكتشافه في عام 1937م تسلسل التفاعلات التي تحدث في هذه الدورة. وتسمى أيضًا **دورة حمض الستريك**، ويبين الشكل ٥-٦ هذه الدورة. دورة كريس هي مسار حلقي للتفاعلات التي تحدث في حشوة الميتوكوندريا وتتحكم بها الإنزيمات.

- 1- يرتبط أستيل CoA (2C) مع أكسالوأسيتات (4C) لتكوين السيترات (6C)
- 2- يُنزع الكربوكسيل والهيدروجين من السيترات في سلسلة من الخطوات، ما يؤدي إلى إطلاق ثاني أكسيد الكربون، والذي ينبعث على شكل غاز عادم. كما يطلق الهيدروجين الذي تستقبله النواقل NAD و FAD .
- 3- يعاد تكوين الأكسالوأسيتات ليرتبط مع أستيل CoA آخر.

النواتج

- 1- ينتج من كل دورة من دورات كريس جزيئان من ثاني أكسيد الكربون ويتم اختزال جزيء FAD وثلاثة جزيئات من NAD ويتولد جزيء واحد من ATP . ويتكوّن ATP هذا من النقل المباشر لمجموعة فوسفات من إحدى المواد المتفاعلة إلى جزيء ADP، وهذا يسمى **التفاعل المرتبط بالمادة المتفاعلة**.



الشكل ٥-٦ التفاعل الرابط ودورة كريس.

الأساس في الأحياء ثاني عشر

أسئلة:

- 1- انظر إلى الرسم التخطيطي للتفاعل الرابط ودورة كريس في الشكل 6-5 ، ولخص كيف ينتقل ثاني أكسيد الكربون الناتج من حشوة الميتوكوندريون إلى الهواء المحيط بالكائن الحي.
- 2- اشرح كيف تكون أحداث دورة كريس في مسار حلقي .

رابعاً: الفسفرة التأكسدية وسلسلة نقل الإلكترون

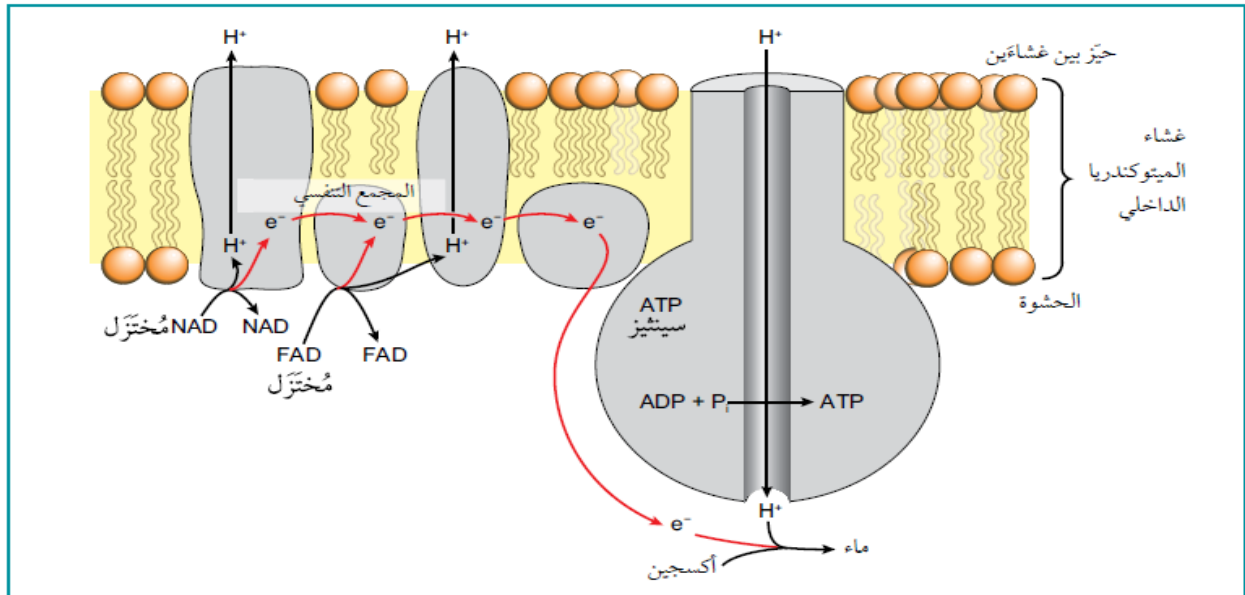
تمثل الفسفرة التأكسدية المرحلة الأخيرة من التنفس الهوائي، (الشكل 6-6) .

اين تحدث؟ تحدث في غشاء الميتوكوندريا الداخلي

سلسلة نقل الإلكترون هي سلسلة بروتينات غشائية تسمى ناقلات الإلكترون تثبت في موضعها في غشاء الميتوكوندريون الداخلي (الأعراف)، وهي مرتبة بعضها بجوار بعض ما يسمح بانتقال الإلكترونات بسهولة على طول السلسلة من بروتين إلى البروتين التالي. وكل ناقل يُخترَل أولاً (عندما يضاف إليه إلكترون) ثم يتأكسد (عندما يغادره الإلكترون)، وهذه التفاعلات هي تفاعلات أكسدة واختزال .

ماذا يحدث خلال هذه المرحلة؟

1- NAD المُخترَل الناتج من التحلل السكري في السيتوبلازم، يمكنه دخول الحشوة بمروره عبر غلاف الميتوكوندريا . ، وكلا من NAD المُخترَل و FAD المُخترَل المتكوّنان في دورة كريس . وتنتقل جميع جزيئات NAD المُخترَل و FAD المُخترَل من حشوة الميتوكوندريا إلى الغشاء الداخلي ويتم هنا نزع الهيدروجين الذي تم نقله في تلك الجزيئات تتكوّن كل ذرة هيدروجين من بروتون وإلكترون، ينفصل الآن أحدهما عن الآخر. يمكن أيضاً الإشارة إلى البروتون باسم أيون الهيدروجين H^+ . يُنقل الإلكترون - إلى الناقل الأول في سلسلة نقل الإلكترون.



الشكل 6 - 6 الفسفرة التأكسدية: سلسلة نقل الإلكترون.

الأساس في الأحياء ثاني عشر

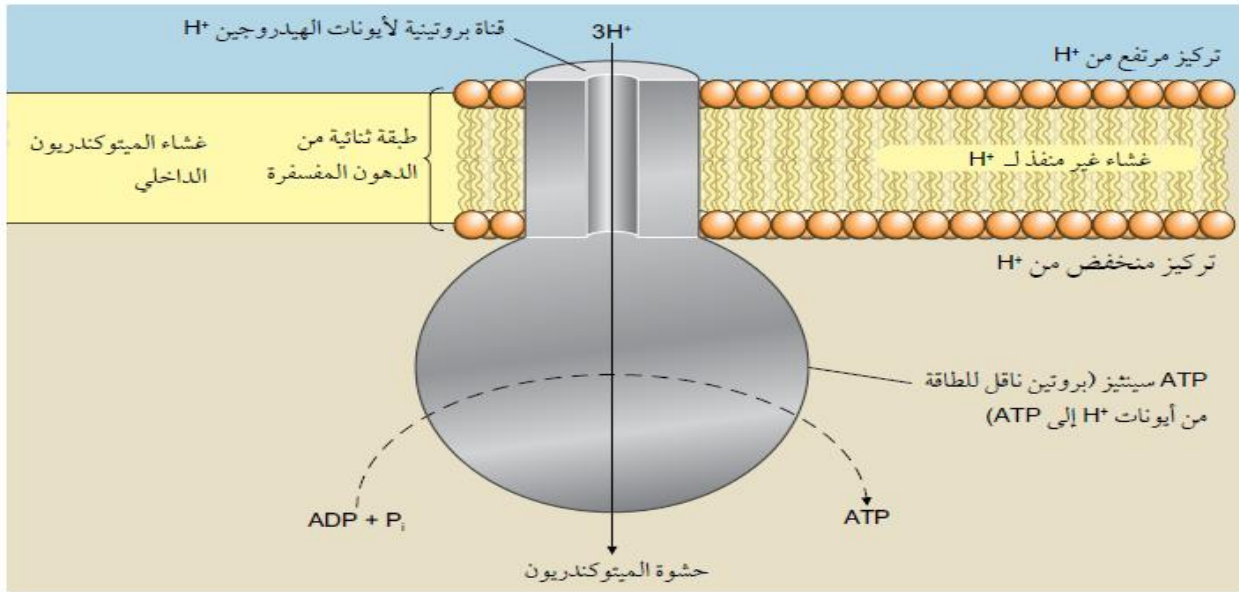
2- يحتوي هذا الإلكترون على طاقة بدأت على شكل طاقة كيميائية كامنة في جزيء الجلوكوز من بداية التحلل السكري. ومع انتقال الإلكترون من ناقل إلى الناقل التالي، يتم إطلاق بعض طاقته.

3- تستخدم بعض طاقة الإلكترون لضخ البروتونات من حشوة الميتوكوندريون الشكل (٦-٦) إلى الحيز بين غشائي غلاف الميتوكوندريا الداخلي والخارجي. وينتج من ذلك تركيز من البروتونات في الحيز بين الغشائيين أعلى منه في الحشوة. لذلك، يوجد الآن منحدر تركيز للبروتونات عبر غشاء الميتوكوندريا الداخلي.

4- تعود البروتونات الآن إلى حشوة الميتوكوندريا بالانتشار المسهل، مع منحدر تركيزها عبر قناة جزيء بروتين كبير هو إنزيم **ATP سينتيز**، وتلك القناة تجعله مرتبطاً بغشاء الميتوكوندريون الداخلي. ومع مرور البروتون عبر القناة، يتم استخدام طاقته لبناء ATP في عملية تسمى **الأسموزية الكيميائية** (الشكل ٦-٧).

والتي تستخدم طاقة البروتونات لإضافة مجموعات الفوسفات إلى ADP لتكوين ATP.

ملحوظة: يوجد ATP سينتيز أيضاً في أغشية الثايلاكويد في البلاستيدات الخضراء.



الشكل ٦-٧- بناء ATP بالأسموزية الكيميائية في غشاء الميتوكوندريا الداخلي.

5- وأخيراً، يدخل الأكسجين في هذه العملية. فالأكسجين يعمل كمستقبل نهائي للإلكترونات وذلك بدمجها عندما تصل إلى نهاية سلسلة نقل الإلكترون، إذ تتحد أربعة إلكترونات مع أربعة بروتونات وجزيء أكسجين لتكوين الماء.



علل: تحدث التفاعلات (التفاعل الرابط، ودورة كربس، والفسفرة التأكسدية) داخل الميتوكوندريون

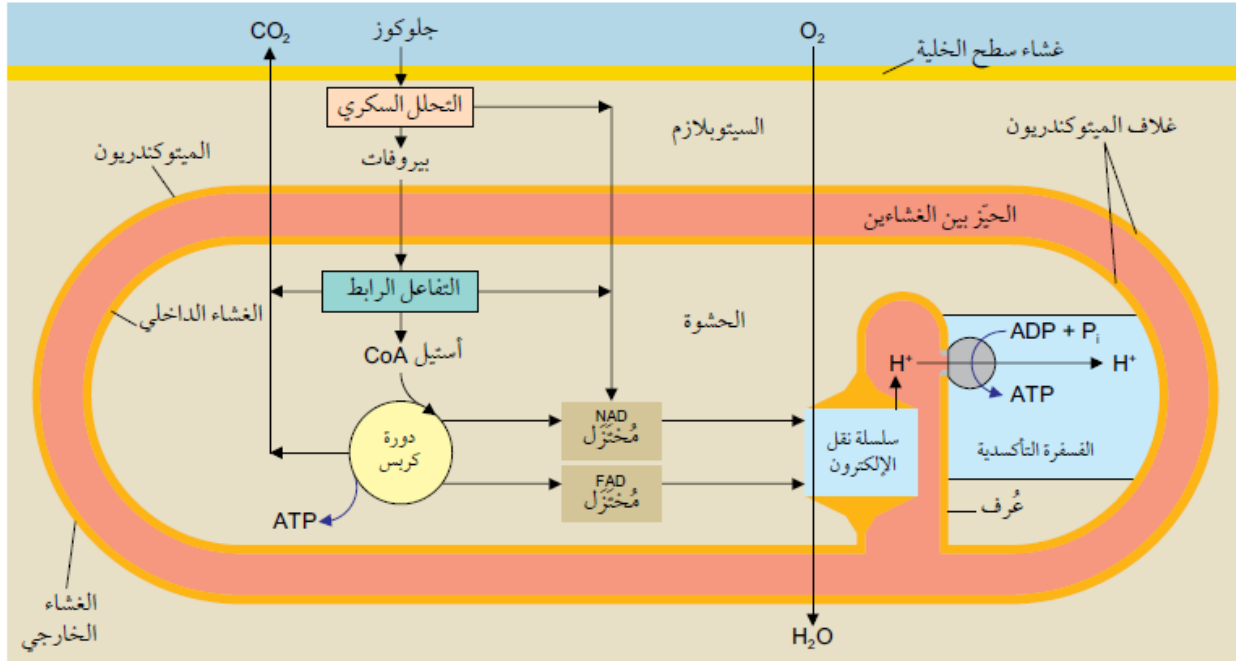
- لتوافر الأكسجين كمستقبل نهائي للإلكترونات هذه المراحل، بخاصة الفسفرة التأكسدية، تُنتج ATP أكثر بكثير مما ينتجه التحلل السكري الذي يطلق كمية صغيرة فقط من الطاقة الكيميائية الكامنة من الجلوكوز، لأن الجلوكوز يتأكسد جزئياً فقط، حيث تكمل تفاعلات الأكسدة في الميتوكوندريون مطلقة المزيد من الطاقة.

الأساس في الأحياء ثاني عشر

لا تحتاج إلى معرفة تفاصيل العائد الإجمالي من ATP، لكن، إذا كنت مهتمًا، فهي موضحة في الجدول 6-1. يبين الشكل 6-8 ملخصًا لمراحل عملية التنفس الهوائي ومكان حدوثها.

المرحلة	ATP المستخدم	ATP المتكوّن	صافي الربح من ATP
التحلل السكري	2	4	2
التفاعل الرابط	0	0	0
دورة كريس	0	2	2
الفسفرة التأكسدية	0	28	28
المجموع	2	34	32

الجدول 6-1 بيانات لـ ATP المستخدم والمتكوّن في المراحل المختلفة أثناء التنفس الهوائي.



الشكل 6-8 مواقع المراحل المختلفة للتنفس الهوائي في الخلية.

مصطلحات علمية

الفسفرة التأكسدية: بناء ATP من ADP و Pi باستخدام الطاقة المنطلقة من تفاعلات الأكسدة في التنفس الهوائي.

سلسلة نقل الإلكترون: سلسلة متجاورة من جزيئات ناقلة مرتبة في غشاء الميتوكوندريا الداخلي وتتم من خلالها الإلكترونات في تفاعلات الأكسدة والاختزال.

تفاعل الأكسدة والاختزال: تفاعل كيميائي تُخترَل فيه مادة وتُؤكسد مادة أخرى.

ATP سينثيز: الإنزيم الذي يحفز فسفرة ADP لتكوين ATP.

الأساس في الأحياء ثاني عشر

أسئلة:

1- حدد أدوار كل مما يأتي في عملية التنفس

أ. NAD ب. مرافق الإنزيم A ج. الأكسجين.

2- فكّر، من خلال العمل في مجموعة ، كيف يمكن الاستفادة من لعب الأدوار في تبيان الأحداث التي تحصل أثناء الفسفرة التأكسدية. على سبيل المثال، يمكن لطالب محاكاة جزيء NAD ، ويمكن لطالبين محاكاة الهيدروجين الذي ينقله (يتكوّن من بروتون وإلكترون)، وهكذا . في حالة وجود وجود عدد كاف في الصف (قد تحتاج إلى 12 طالبًا على الأقل)، يمكن التوسع في العمل. وفي حالة عدم توافر عدد كاف من الطلبة، يمكنك كتابة أفكارك على شكل نص مسرحية قصيرة.

مهارات عملية 6 - 1: قياس امتصاص الأكسجين

الهدف: قياس معدل امتصاص الأكسجين أثناء التنفس

الجهاز المستخدم: مقياس التنفس يبين الشكل 6-9 مقياس تنفس مناسب لقياس معدل استهلاك الأكسجين لبذور نبات أو لافقاريات صغيرة تعيش في اليابسة في درجات حرارة مختلفة.

الأساس العلمي: عندما تتنفس الكائنات الحية تمتص الأكسجين من الهواء المحيط بها، ما يقلل من حجم الهواء. ويتم امتصاص ثاني أكسيد الكربون الناتج من عملية التنفس بواسطة مادة كيميائية مناسبة مثل جير الصودا أو محلول مركز من هيدروكسيد البوتاسيوم (KOH) أو هيدروكسيد الصوديوم (NaOH) . وهكذا، فإن ثاني أكسيد الكربون الناتج لن يزيد من حجم الهواء.

النتيجة: أي تغيير في حجم الهواء المحيط بالكائنات الحية ينتج من استهلاك هذه الكائنات الحية للأكسجين فقط .

كيفية القياس: يمكن أن يقاس استهلاك الأكسجين بقراءة مستوى عمود سائل المانومتر مقابل التدرج، ويمكن قياس معدل استهلاك الأكسجين بقسمة حجم الأكسجين المستخدم على الزمن المستغرق.

العامل الثابت: أي تغيرات في درجة الحرارة أو الضغط ستغير أيضًا من حجم الهواء في الجهاز. لذا، من المهم الحفاظ على ثبات درجة حرارة البيئة المحيطة أثناء أخذ القراءات.

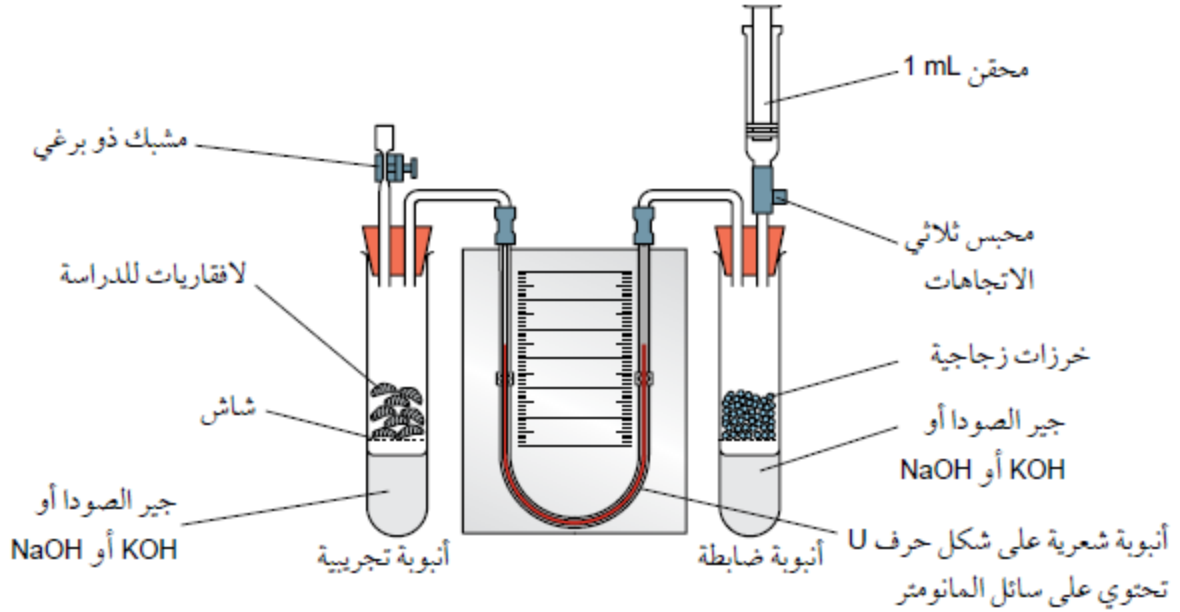
كيف يمكن الحفاظ علي ثبات درجة الحرارة والضغط؟

- باستخدام حمام مائي يتم التحكم في درجة حرارته.
- لا يمكنك التحكم بالضغط، لكن ستكون التغيرات فيه هي نفسها في كلتا الأنبوبتين عند استخدام أنبوبة ثانية لا تحتوي على كائنات حية، وبالتالي لن تكون هناك أي حركة لسائل المانومتر. يساعد وجود أنبوبة ضابطة تحتوي على حجم من المادة الخاملة يماثل حجم الكائنات الحية المستخدمة على موازنة التغيرات في الضغط الجوي.

الأساس في الأحياء ثاني عشر

كيف يمكن استقصاء تأثير درجة الحرارة على معدل التنفس ؟

- عن طريق وضع الجهاز في حمامات مائية بدرجات حرارة مختلفة، وقياس معدل استهلاك الأكسجين عند كل درجة حرارة .
- ويجب إجراء عدة قياسات متكررة على درجة الحرارة نفسها وحساب متوسط قيم استهلاك الأكسجين.
- يمكن بعد ذلك، رسم تمثيل بياني لمتوسط معدل استهلاك الأكسجين مقابل درجة الحرارة.



الشكل ٩-٦ مقياس التنفس.

مصطلحات علمية

مقياس التنفس Respirometer : جهاز يستخدم لقياس معدل امتصاص الكائنات الحية للأكسجين أثناء التنفس.

٣-٦ تركيب الميتوكوندريا ووظيفتها

الميتوكوندريا عضيات عصوية الشكل أو خيطية، يبلغ قطرها (0.5 – 1 μm) تقريبًا، ويبيّن التصوير الفوتوغرافي بفواصل زمنية أن لها شكلًا غير ثابت، إذ يمكن أن يتغير باستمرار.

علل: إختلاف أعداد الميتوكوندريا في الخلايا

- يعتمد عدد الميتوكوندريا في الخلية على نشاط الخلية. على سبيل المثال، خلايا الكبد النشيطة جدًا تحتوي ما بين 1000 و 2000 ميتوكوندريا، وتحتل 20% من حجم الخلية.

تركيب الميتوكوندريا

الأساس في الأحياء ثاني عشر

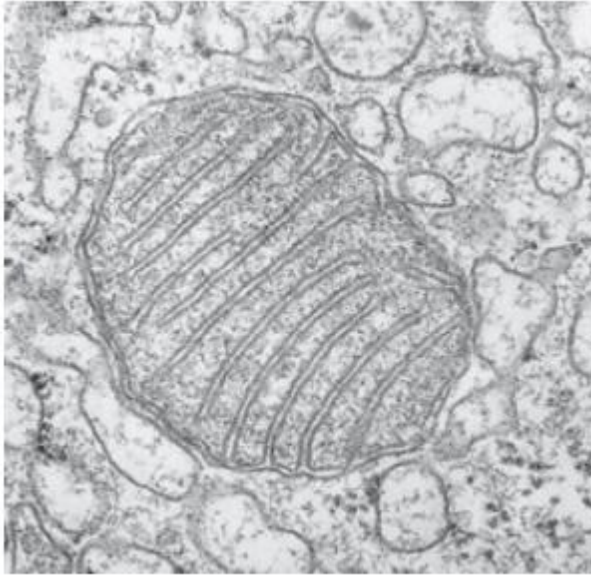
يبين الشكل 10-6 والصورة 6-2 تركيب الميتوكوندريون .

1- غشاء مزدوج: تحاط الميتوكوندريون، كما البلاستيدة الخضراء، بغلاف من غشاءين من الدهون المفسفرة الغشاء

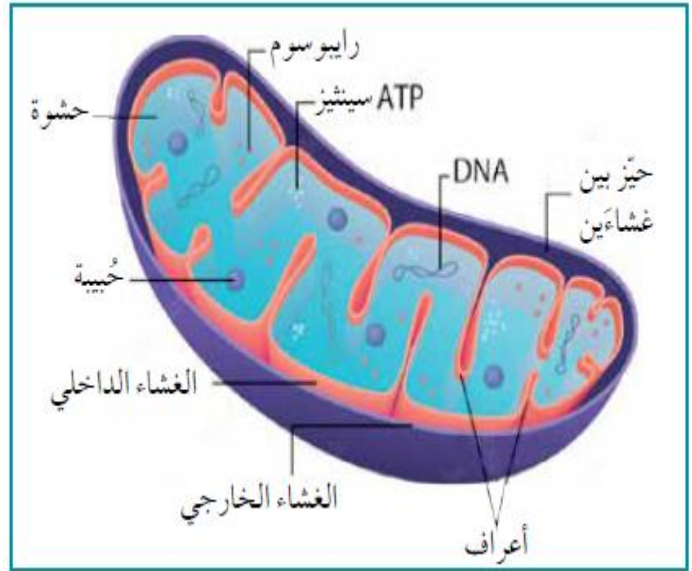
فسر: إختلاف أعراف الميتوكوندريا في الأنواع المختلفة من الخلايا.

- حيث يكون لدى ميتوكوندريا الخلايا النشطة أعراف أطول وأكثر كثافة مقارنة بميتوكوندريا الخلايا الأقل نشاطا.

وجه المقارنة	الغشاء الخارجي	الغشاء الداخلي
الوصف	أملس	ينثني نحو الداخل مكونا طيات كثيرة تسمى الأعراف التي توفر للغشاء الداخلي في الإجمالي مساحة سطح كبيرة.
الخصائص	منفذ نسبياً للجزيئات الصغيرة	أقل نفاذية.
الوظيفة	يسمح بمرور المواد اللازمة والناجمة من التفاعل الرابط ودورة كريس والفسفرة التأكسدية، مثل الأكسجين وثنائي أكسيد الكربون و ATP و ADP و P_i .	مكان وجود سلسلة نقل الإلكترون، ويحتوي على البروتينات اللازمة لذلك لا تُشاهد في الصورة المجهرية الإلكترونية.



الصورة 6-2 صورة مجهرية إلكترونية (النافذ) للميتوكوندريون (x15000).



الشكل 10-6 رسم تخطيطي (3D) لميتوكوندريون.

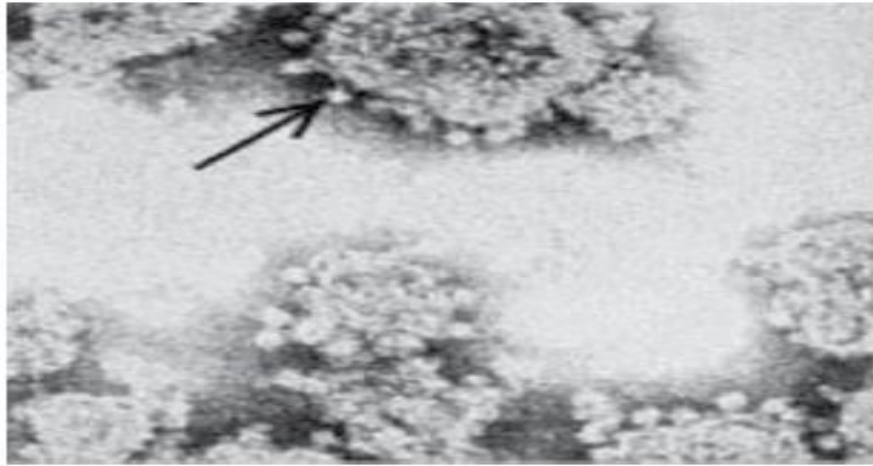
الأساس في الأحياء ثاني عشر

2- الحشوة:

قد تحتوي الحبيبات الموجودة في الحشوة على أيونات أو بروتينات للمساعدة في العمليات المتنوعة في الميتوكوندريون. ويظهر في الصورة المجهرية الإلكترونية (للحجم الكبير لهذا الجزيء البروتيني) كرات صغيرة بقطر 9 nm منتشرة في الحشوة ومتصلة بالغشاء الداخلي للميتوكوندريون بواسطة سيقان ضيقة الصورة (3-6)، لتشكل إنزيم ATP سينثيز.

فسر: يكون الرقم الهيدروجيني PH للحيز بين الغشاءين أقل مما هو في حشوة الميتوكوندريون.
- يعود ذلك إلى انتقال البروتونات عبر الغشاء الداخلي من الحشوة، لإنشاء منحدر التركيز اللازم لتكوين ATP. تذكر أن التركيز المرتفع للبروتونات - وتسمى أيضًا أيونات الهيدروجين - تعني حامضية مرتفعة (رقم هيدروجيني منخفض).

وظيفة حشوة الميتوكوندريون: هي موقع التفاعل الرابط ودورة كربس. وهي تحتوي على الإنزيمات اللازمة لهذه التفاعلات وتحتوي أيضًا على رايبوسومات صغيرة (70S) وعدة نسخ متطابقة من DNA الميتوكوندريا الحلقي، تستخدم لبناء بعض البروتينات اللازمة لعمل الميتوكوندريا.



الصورة ٦ - ٣ صورة مجهرية إلكترونية (النافذ). يشير السهم إلى ارتباط ATP سينثيز بالغشاء الداخلي بواسطة سيقان ضيقة (x300000).

سؤال

ارسم رسماً تخطيطياً كبيراً للميتوكوندريون. أضف إلى الرسم التخطيطي المسميات والشروح لتوضح كيف يتناسب تركيب الميتوكوندريون مع وظيفته.

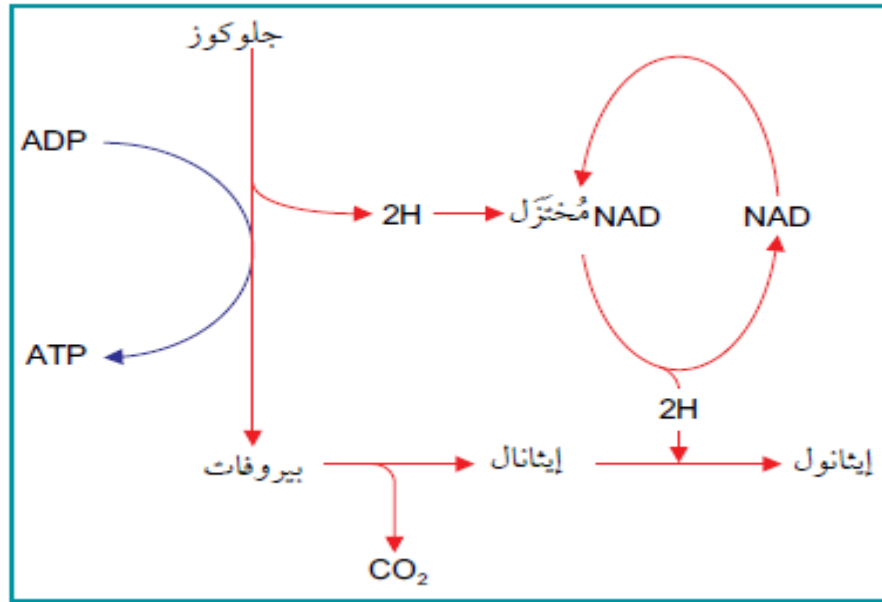
الأساس في الأحياء ثاني عشر

٤-٦ التنفس من دون الأكسجين

متي يحدث: عند غياب الأكسجين - أو توافره بكمية قليلة - داخل الميتوكوندريون.

فسر: حدوث التنفس اللاهوائي في الخلايا

- لعدم وجود مستقبل للإلكترونات في نهاية السلسلة فتتوقف سلسلة نقل الإلكترون ولا يتكوّن المزيد من ATP بالفسفرة التأكسدية. لذلك لا يوجد ناقل حر في السلسلة لاستقبال الهيدروجين من NAD المُختزل و FAD المُختزل، فتبقى هذه النواقل مختزلة، وبالتالي يتوقف عمل دورة كريس لعدم وجود NAD مؤكسدة أو FAD مؤكسدة لتحدث خطوات نزع الهيدروجين.



الشكل ٦ - ١١ تخمر الإيثانول.

مقدار الطاقة الناتجة: تبقى الخلية قادرة على إنتاج كمية صغيرة من ATP حتى في الظروف اللاهوائية ، أي عندما لا يتوافر الأكسجين إذا أمكن أكسدة NAD المُختزل الناتج من التحلل السكري مرة أخرى بطريقة ما، فسيستمر حدوث التحلل السكري. للخلايا مساران لتحقيق ذلك.

أين يحدث: يحدث في سيتوبلازم الخلية.

في الخميرة وبعض الكائنات الحية الدقيقة الأخرى، وفي بعض أنسجة النبات

يمر الهيدروجين من NAD المُختزل إلى الإيثانال (CH₃CHO). يبين الشكل ٦ - ١١ هذا المسار. حيث يتم أولاً نزع الكربوكسيل من البيروفات ليتحول إلى إيثانال، ثم يُختزل الإيثانال إلى إيثانول (C₂H₅OH) بواسطة إنزيم الكحول ديهيدروجينيز تعرف هذه العملية باسم تخمر الإيثانول.

في الكائنات الحية الدقيقة الأخرى، وفي عضلات الثدييات

الأساس في الأحياء ثاني عشر

عند فقدان الأكسجين يعمل البيروفات كمستقبل للهيدروجين، ويتحول في هذه العملية إلى لاکتات بواسطة إنزيم **لاكتات ديهيدروجينيز** (سمي على اسم التفاعل العكسي، الذي يحفزها أيضًا. يعرف هذا المسار باسم **تخمير اللاكتات** وهو ما يبينه الشكل 6-12.

- مقارنة بين تخمر الأيثانول وتخمر اللاكتات

وجه المقارنة	تخمير الأيثانول	تخمير اللاكتات
متي يحدث	عند غياب الأكسجين - أو توافره بكمية قليلة	
نوع الخلايا	في الخميرة وبعض الكائنات الحية الدقيقة ، وفي بعض أنسجة النبات	في الكائنات الحية الدقيقة ، وفي عضلات الثدييات
اين يحدث	في سيتوبلازم الخلية	
الإنزيم المستخدم	الكحول ديهيدروجينيز	إنزيم لاکتات ديهيدروجينيز
النواتج	إيثانول (C_2H_5OH) و CO_2	اللاكتات
الاختلافات	لا يمكن الاستمرار في أيض الإيثانول لأنه ببساطة عبارة عن فضلات .	يمكن أن يتأكسد اللاكتات ويتحول مرة أخرى إلى بيروفات

الاختلاف المهم بين تخمر الإيثانول وتخمر اللاكتات

- هو ما يمكن أن يحدث للمواد الناتجة إذ يمكن أن يتأكسد اللاكتات ويتحول مرة أخرى إلى بيروفات والذي يمكن أن يدخل بعد ذلك في دورة كريس لإنتاج ATP .
- كما يمكنه بدلا من ذلك، أن يتحول إلى عديد التسكر الجلايكوجين، فيُخزّن. تحدث هذه العمليات في خلايا كبد الثدييات.

ما المقصود بـ«دين الأكسجين» أو EPOC (فرط استهلاك الأكسجين الزائد بعد التمارين الرياضية)؟

تتطلب أكسدة اللاكتات أكسجينًا إضافيًا. وهذا هو السبب في استمرار التنفس بعمق وبسرعة أكثر من المعتاد بعد انتهاء التمارين. في حين لا يمكن الاستمرار في أيض الإيثانول لأنه ببساطة عبارة عن فضلات .

يعيد كل من تخمر الإيثانول وتخمر اللاكتات NAD المُختزل إلى حالته المؤكسدة (NAD)، ويكون جاهزا لقبول المزيد من الهيدروجين. ويتيح ذلك إمكانية استمرار التحلل السكري في العمل، على الرغم من عدم توافر الأكسجين ومع ذلك، تكون الطاقة المنطلقة من التنفس الهوائي أكبر بكثير من الطاقة المنطلقة من أي من المسارين للتنفس اللاهوائي. يتيح استمرار العمليات بعد التحلل السكري في التنفس الهوائي أكسدة كاملة لجزيء الجلوكوز، بينما تتوقف العملية في التنفس اللاهوائي بعد التحلل السكري، ما يؤدي إلى أكسدة غير كاملة لجزيء الجلوكوز، وينتج جزيئين من ATP لكل جزيء جلوكوز (انظر الجدول (6-1)).

الأساس في الأحياء ثاني عشر

سؤال

يمكن استخدام الجلوكوز لإنتاج ATP من دون استهلاك الأكسجين

جلوكوز $\leftarrow x \leftarrow Y$ في الثدييات

↓

Z في الخميرة

أي من الاختيارات الآتية يمثل المركبات المرمزة بالأحرف، X و Y و Z؟

	Z	Y	X	
أ	لاكتات	بيروفات	إيثانول	
ب	بيروفات	إيثانول	لاكتات	
ج	لاكتات	إيثانول	بيروفات	
د	إيثانول	لاكتات	بيروفات	

- قارن بين التنفس الهوائي والتنفس اللاهوائي

وجه المقارنة	التنفس الهوائي	التنفس اللاهوائي
متي يحدث	في وجود الأكسجين	في غياب الأكسجين أو ندرته
اين يحدث	في سيتوبلازم الخلية والميتوكوندريا	في سيتوبلازم الخلية
المراحل	أربع مراحل 1- التحلل السكري 2- التفاعل الرابط 3- دورة كريبس 4- الفسفرة التأكسدية	مرحلتين 1- التحلل السكري 2- التخمر
الناتج	1- ماء 2- ثاني أكسيد الكربون 3- طاقة كبيرة	- في الخميرة إيثانول وثاني أكسيد الكربون وطاقة ضئيلة - في عضلات الثدييات اللاكتات وطاقة ضئيلة

تخمير الإيثانول في الأرز

الأرز محصول غذائي أساسي في أجزاء كثيرة من العالم. يمكن لمعظم أنواع الأرز أن تنمو في البيئات الجافة، لكن ينمى الأرز غالباً في الحقول التي غمرت بالمياه لإنتاج أقصى قدر منه ، ويمكن أن يتحمل النمو في الماء، في حين لا تكون معظم الحشائش الضارة التي تتنافس معه قادرة على ذلك . ويزيد هذا الانخفاض في مستوى التنافس على الضوء والأملاح المعدنية من الإنتاجية.

فسر: معظم النباتات لا تستطيع النمو في المياه العميقة

- لأن جذورها لا تحصل على ما يكفي من الأكسجين للتنفس الهوائي.
 - لا يمكن أن يحدث التمثيل الضوئي إذا كانت الأوراق مغمورة في الماء، لعدم توافر ما يكفي من ثاني أكسيد الكربون
 - ويحدث ذلك لأن الغازات تنتشر في الماء بشكل أبطأ بكثير من انتشارها في الهواء.
 - بالإضافة إلى ذلك، تكون تراكيز الأكسجين وثنائي أكسيد الكربون الذائبين في الماء أقل بكثير مما هي عليه في الهواء.
- وهذا ينطبق بشكل خاص على حقول الأرز المغمورة بالمياه، حيث يحتوي الطين الذي تزرع فيه جذور الأرز على أعداد كبيرة من جماعات الكائنات الحية الدقيقة، والعديد منها يتنفس هوائياً ويحصل على الأكسجين من الماء.

اشرح كيف تكيفت أصناف الأرز مع النمو في الحقول المغمورة بالماء؟

- تستجيب بعض أصناف الأرز للفيضانات بالنمو في الطول بسرعة. وهي تستمر في النمو طويلاً مع ارتفاع المياه بسرعة حولها.
- 1- حيث تكون الأجزاء العلوية من أوراقها وأزهارها فوق سطح الماء، الأمر الذي يتيح إمكانية تبادل الأكسجين وثنائي أكسيد الكربون من خلال الثغور على الأوراق.
 - 2- تحتوي سيقان نباتات الأرز وجذورها على خلايا غير مترابطة تكون نسيجاً يسمى **إيرنشيميا** **Aerenchyma** (الصورة 6-5). وتكون الغازات، بما في ذلك الأكسجين، قادرة على الانتشار عبر نسيج الإيرنشيميا إلى أجزاء أخرى من النبات، بما فيها تلك الموجودة تحت الماء. ويضمن ذلك أن تحتوي الخلايا في الجذور على بعض الأكسجين، فتتمكن بالتالي من التنفس هوائياً.
 - 3- إن إمداد الأكسجين هذا لا يكفي عادة لتوفير كل الطاقة التي تحتاج إليها الخلايا للتنفس الهوائي. لذلك، تستخدم خلايا جذور الأرز المغمورة **تخمير الإيثانول**. لبعض الوقت. يمكن للإيثانول أن يتركب في الأنسجة، وهو سام.
 - 4- خلايا جذور الأرز تستطيع تحمل مستويات من الإيثانول أعلى بكثير من معظم النباتات. وهي تنتج أيضاً المزيد من **إنزيم إيثانول ديهيدروجينيز**، والذي يفك الإيثانول باستخدام ATP الناتج من تخمر

الأساس في الأحياء ثاني عشر

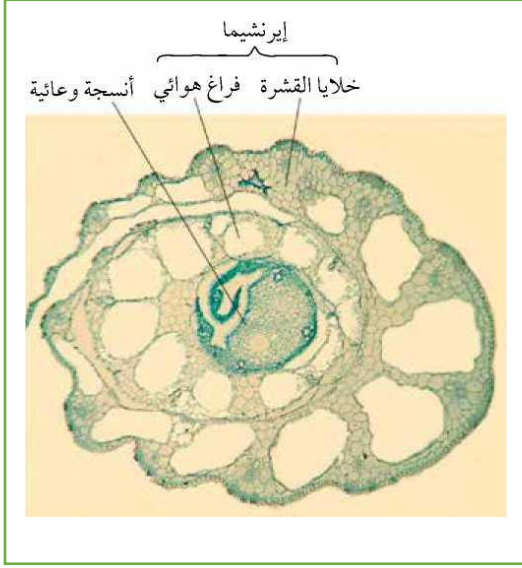
الإيثانول، وهذا يسمح بنمو النباتات بنشاط حتى عندما يندرج الأكسجين.

- هل يمكن أن تنجح زراعة الأرز في عمان؟

وقد نجح مزارع عماني في زراعة الأرز بمزرعته الخاصة،
متمكنا من حصاد ما يقارب 8 كيلوجرامات من خلال
تجربته الأولى بالرغم من التحديات التي واجهها
والمعلقة بنوعية التربة ونوع الأسمدة المستخدمة
(الصورة ٦-٦). ومع الاهتمام الكبير الذي أولاه
لجودة التربة والري وإزالة الأعشاب الضارة بشكل
مستمر، فإن نجاحه في عام 2022 م يثبت إمكانية
زراعة مجموعة متنوعة من المحاصيل الجديدة في سلطنة عمان

سؤال:

كون جدولاً يلخص ميزات نبات الأرز التي ساعدته لينمو مع غمر جذوره بالمياه، موضحاً كيف تساهم كل
ميزة في ذلك.



الأساس في الأحياء ثاني عشر

مهارات عملية ٦-٢

قياس معدل التنفس باستخدام كواشف الأكسدة والاختزال

تتمثل إحدى طرائق استقصاء معدل التنفس في الخميرة باستخدام صبغة مثل محلول ديكلوروفينول إندو فينول ((DCPIP، أو محلول أزرق الميثيلين. (علل)
- لا تتلف هاتان الصبغتان الخلايا، وبالتالي يمكن إضافتهما إلى معلق خلايا الخميرة الحية.
- فكلتا الصبغتين زرقاء اللون، لكنهما تصبحان عديمتي اللون عندما تختزلان. وهما مثالان على **كواشف الأكسدة والاختزال**.

الأساس العلمي لعمل هذه الكواشف

تعرفت أن نزع الهيدروجين من المواد المتفاعلة جزء مهم من التنفس. عادة، يلتقط NAD و FAD هذا الهيدروجين، ومع ذلك، يمكن أيضا لصبغة DCPIP أو أزرق الميثيلين في حال وجودهما التقاط الهيدروجين لتصبح مختزلة. وكلما زادت سرعة التنفس، أطلق المزيد من الهيدروجين لكل وحدة زمنية، واختزلت الصبغتان بشكل أسرع. ويتمثل قياس معدل التنفس في الخميرة بمعدل التغير من اللون الأزرق إلى فقدان اللون.

ملحوظة: يمكن استخدام هذه التقنية لاستقصاء تأثير عوامل مختلفة على تنفس الخميرة، مثل درجة الحرارة أو تركيز المادة المتفاعلة أو المواد المتفاعلة المختلفة.

مصطلحات علمية

تخمير الإيثانول Ethanol: fermentation : تنفس لاهوائي يتحول فيه البيروفات إلى إيثانول.

تخمير اللاكتات Lactate fermentation : تنفس لاهوائي يتحول فيه البيروفات إلى لاكتات.

إيرنشيميا Aerenchyma: نسيج نباتي يحتوي على فراغات هوائية.

كاشف الأكسدة والاختزال Redox indicator: مادة يتغير لونها عند تأكسدها أو اختزالها.

ترقبوا الجزء الخاص بالأسئلة