

عمليات تستهلك طاقة

انقباض عضلات

حامض الفيروبيك

دورة كريبس

أكسجين

تبادل غازات

من مواد عضوية إلى طاقة متوافرة - التنفس الخلوي

هـ

بيتوكوندريا

أكسدة كاملة

1. نظرة إلى التنفس الخلوي

2. الـ ATP وسيط في انتقال الطاقة الذي يتم في الخلايا

3. اشتراك الـ ATP في عمليات تستهلك طاقة

4. مسارات لاستخراج الطاقة في التنفس الخلوي

5. عملية التركيب الضوئي ليست تنفس النبات

مواضيع الفصل الأساسية

مصطلحات مهمة في الفصل

عملية مرافقة

جليكوليزا

عمليات تخمر

تحويل طاقة

أكسجين

تنفس خلوي هوائي

بناء مواد

الفصل الخامس: من مواد عضوية إلى طاقة متوافرة – تنفس خلوي

1. نظرة إلى التنفس الخلوي

جميع الكائنات الحية - النباتات، الحيوانات، الفطريات والبكتيريا، تحتاج إلى طاقة لكي تقوم بعمليات الحياة. مصدر الطاقة لجميع الكائنات الحية هو المواد العضوية. رأينا في الفصول السابقة أن الكائنات الحية ذاتية التغذية وغير ذاتية التغذية تختلف عن بعضها بطرق الحصول على المواد العضوية: تستطيع الكائنات الحية ذاتية التغذية أن تُنتج هذه المواد بذاتها، أما غير ذاتية التغذية فهي بحاجة للحصول على مواد عضوية في غذاؤها. تُستعمل المواد العضوية التي تُنتج في الكائنات الحية أو تُستوعب من البيئة المحيطة لنفس الأهداف: استخراج طاقة، مواد بناء أساسية للخلايا والأنسجة ولحدوث عمليات سليمة في الكائنات الحية. ينبع التجانس من التشابه الكبير الموجود في مبنى خلايا جميع الكائنات الحية في الطبيعة، ومن أنواع المواد التي تبنيها والعمليات التي تحدث فيها.

لا يمكن استعمال الطاقة الكيميائية الموجودة في المواد العضوية بشكل مباشر وفوري في الخلايا. لكي تصبح الطاقة الكيميائية الموجودة في المواد العضوية متوافرة لتفعيل عمليات في الخلايا، يجب أن تحدث عمليات من خلالها تنقل الطاقة من هذه المواد إلى مواد أخرى. في هذا الفصل، نَصِف هذه العمليات.

فكرة مركزية

تجانس وتباين:
تجانس في مبنى وأداء
الخلايا.

عملية **استخراج الطاقة** من المواد العضوية وتحويلها إلى متوافرة لاحتياجات الخلايا نسميها **تنفساً خلوياً**. في هذه العملية التي تتم في كل خلية، يمر قسم من مواد البناء الأساسية العضوية تحليلاً بطيئاً ومتعدد المراحل حتى تتحول إلى مواد أبسط (مثل: حامض الحليب، ثاني أكسيد الكربون وماء)، من خلال إطلاق طاقة. مستوى الطاقة للنواتج النهائية (مثل: ثاني أكسيد الكربون وماء) أقل من المواد المتفاعلة، وهذا يعني، تُطلق كمية طاقة كبيرة جداً أثناء العملية كلها.

نبيّن فيما بعد أن قسماً من الطاقة التي تنطلق تُستعمل في الخلايا لبناء الـ ATP الذي هو مصدر الطاقة المتوافرة لتنفيذ عمليات تستهلك طاقة في الخلايا. أما الطاقة المتبقية، تتحول إلى طاقة حرارية - شكل من أشكال الطاقة التي لا تستطيع الخلية استغلالها لتنفيذ عمليات تحدث فيها. تؤثر الطاقة الحرارية المنبعثة من الخلية على درجة حرارة الكائن الحي كله. المادة العضوية الشائعة التي تُستعمل كمصدر لاستخراج الطاقة هي أحادي السكر جلوكوز.

على الرغم من ذلك، مواد عضوية أخرى، يمكن أن تُستعمل كمصدر للطاقة، مثل: مواد أحادية سكر أخرى، حوامض أمينية (مواد بناء أساسية للبروتينات)، أو حوامض دهنية (مواد بناء أساسية للبيدات). تشمل عمليات استخراج الطاقة في الخلايا على مراحل كثيرة، وفي كل مرحلة، يشترك إنزيم خاص ينشطها. في كل مرحلة من المراحل المختلفة، تتفكك روابط كيميائية وتُبنى روابط كيميائية.

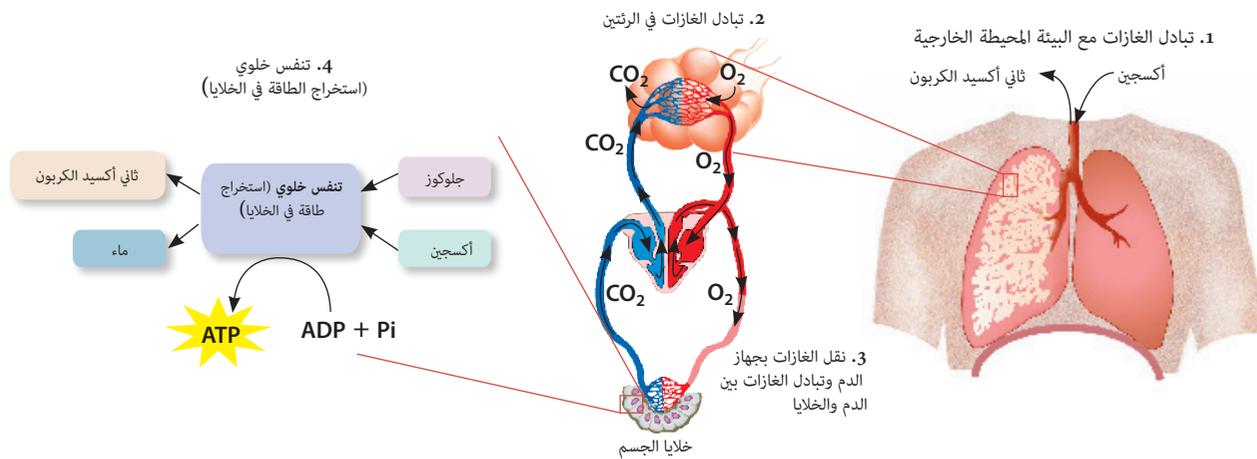
علاقة بموضوع

بيولوجيا الإنسان:
تستخدم الطاقة المنبعثة
كحرارة في التنفس الخلوي،
للحفاظ على درجة حرارة
الجسم.

ما هي العلاقة بين التنفس وبين التنفس الخلوي؟!

يجب أن نميّز الفرق بين "التنفس" وبين "التنفس الخلوي"، كما يجب فهم العلاقة بينهما. العملية التي نسميها في حياتنا اليومية "تنفساً" هي عملية **تبادل غازات** تتم بواسطة جهاز التنفس (عند الإنسان في الرئتين)، حيث يتم استيعاب الأكسجين من البيئة المحيطة وينطلق CO₂ إلى الهواء. ينتقل الأكسجين من الهواء إلى الدم الذي ينقله بواسطة الخلايا. وينتقل CO₂ من الخلايا إلى الدم ويُنقل إلى الرئتين التي منها ينطلق إلى الهواء الموجود في البيئة المحيطة.

التنفس الخلوي عبارة عن عملية استخراج طاقة داخل الخلايا. أهميته استغلال الطاقة المنبعثة عندما تتحلل المواد العضوية وتتأكسد **لبناء جزيئات ATP** متوافرة لنشاطات الحياة. تبادل الغازات يخدم التنفس الخلوي: فهو يزود الأكسجين الذي يُستهلك في العملية ويُبعد CO_2 الذي يَنْتُج فيها (نبيّن فيما بعد أن الأكسجين يُستهلك فقط في التنفس الخلوي الهوائي، لكن هناك عمليات استخراج طاقة دون اشتراك الأكسجين فيها). تصف الرسمة هـ - 1 العلاقة بين تبادل الغازات وبين التنفس الخلوي الهوائي.



الرسمة هـ - 1: وصف تخطيطي للعلاقة بين تبادل الغازات في مستوى الكائن الحي الكامل وبين التنفس الخلوي الهوائي.

هـ. 2. الـ ATP وسيط في انتقال الطاقة الذي يتم في الخلايا

لا تنتج طاقة من لا شيء. في كل نظام، يمكن أن تتم **عمليات تستهلك طاقة**، فقط إذا رافقتها عمليات تُطلق طاقة. هذه الظاهرة نسميها مبدأ **المرافقة**.

كما ذكرنا، الجلوكوز هو مصدر الطاقة الشائع في الخلايا. كمية الطاقة التي تنطلق في التحليل والتأكسد **الكامل** للجلوكوز إلى CO_2 وماء هو هائل نسبة لكمية الطاقة المطلوبة لحدوث العمليات الشائعة في الخلية. لو استعملت الخلايا الطاقة المنطلقة من تحليل وتأكسد الجلوكوز (هذه الطريقة غير موجودة) بشكل مباشر لإنتاج فائض كبير جداً من الطاقة. بما أنه لا توجد آلية في الخلايا تستطيع أن تستعمل فائض الطاقة، فإن فائض الطاقة ينطلق كحرارة. من هنا نستنتج أن الاستعمال المباشر للجلوكوز كمصدر طاقة يؤدي إلى تبذير كمية طاقة كبيرة وإلى ارتفاع درجة حرارة الخلايا ونتيجة لذلك يحدث خللاً في بروتينات الخلايا وادائها. إضافة إلى ذلك، إطلاق الطاقة من الجلوكوز في الخلية، لا يتم بالضرورة في المكان الذي تحدث فيه عمليات تستهلك طاقة. يتم إطلاق الطاقة من الجلوكوز في التنفس الخلوي بالأساس في الميتوكوندريا، والعمليات التي تستهلك طاقة، تحدث في أماكن مختلفة في الخلية.

نحتاج إذن **مادة وسيطة** قادرة على نقل كمية الطاقة الموجودة في المجال المناسب لمعظم التفاعلات التي تحدث في الخلية، من مكان إطلاق الطاقة إلى مكان آخر في الخلية، فيه تُستهلك الطاقة. يفي جزيء الـ ATP بهذه "المتطلبات" وهو يُستخدم كوسيط بين عمليات تُطلق طاقة وبين عمليات تستهلك طاقة.

فكرة مركزية

تجانس وتباين:
الـ ATP وسيط في انتقال
الطاقة في جميع الخلايا وفي
كل الكائنات الحية.

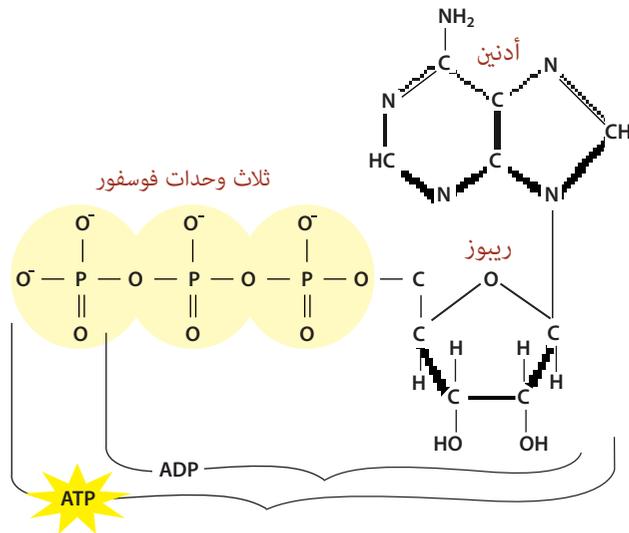
هناك من يشبّه جزيئات الـ ATP على أنها "قطعة نقدية" للطاقة. يمكن استعمال هذا التشبيه عندما نقيس قيمة الطاقة للتفاعلات المختلفة في الخلية: نقيس قيم الطاقة للتفاعل بعدد جزيئات الـ ATP التي تُبنى أو تتحلل عند حدوث تفاعل معين.

كما يساعدنا هذا التشبيه أيضاً على فهم أهمية جزيئات الـ ATP كجزيء وسيط. وجود "قطعة نقدية صغيرة"، يمنع من تبذير الطاقة (عندما يكون مطلوب دفع مبلغ صغير و لا يمكن الحصول على باقي "فمن الأفضل أن ندفع بقطعة نقدية صغيرة). إضافةً إلى ذلك، بما أن "فائض" الطاقة يتحول إلى طاقة حرارية، فإن وجود "قطعة نقدية صغيرة" يمنع من تسخين زائد للخلية. ليس كما هو الأمر مع القطع النقدية المعروفة لنا من حياتنا اليومية والتي يمكن تخزينها (في البنك أو المحفظة)، ففي الخلية، لا يوجد مخازن للـ ATP ولا يوجد نقل للـ ATP من خلية إلى أخرى. في كل خلية يُنتج ATP بكمية مناسبة وبزمن مناسب لتنفيذ النشاطات المختلفة في الخلية وفقاً لاحتياجات الخلايا.



مبنى جزيء الـ ATP ووظيفته

جزيء الـ ATP مبني من أدنين (قاعدة نيتروجينية)، ريبوز (أحادي السكر) و 3 وحدات فوسفور، كما نلاحظ ذلك في الرسم هـ - 2.



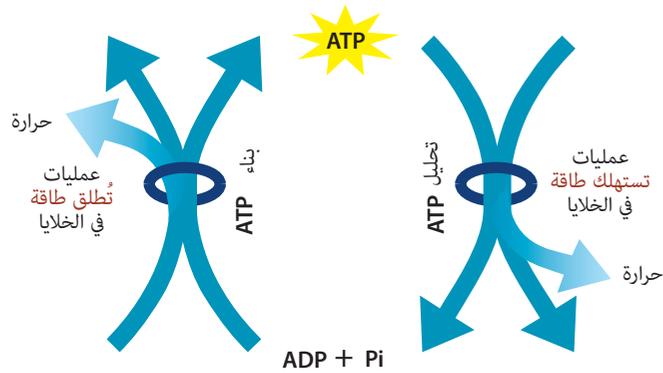
الرسم هـ - 2: مبنى تخطيطي لجزيء الـ ATP.

يتم بناء الـ ATP من جزيئات ADP ومن مجموعة فوسفور (Pi) بشكل مرافق لعمليات التحليل وأكسدة المواد العضوية في الخلايا، من خلال استغلال الطاقة المنطلقة في هذه العمليات.

تعلمتم في الماضي أن تحليل الـ ATP يُطلق طاقة تساعد على حدوث عمليات في الخلايا، لكن في معظم الحالات تكون هذه الصياغة شاملة. نتطرق الآن بشكل مفصّل إلى الطريقة الشائعة التي يتحلل فيها الـ ATP الذي يُتيح حدوث عمليات في الخلية:

في عملية تحليل الـ ATP التي تشترك فيها جزيئات ماء أيضاً، يتفكك الرابط بين مجموعة الفوسفات الثالثة والثانية وينتج ADP ومجموعة فوسفات. تنتقل مجموعة الفوسفات إلى جزيء آخر في الخلية ونتيجة لذلك يرتفع مستوى الطاقة للجزيء الذي يحصل على الفوسفات ويتحول لفعال أكثر - تنشيط. يساعد التنشيط الجزيء الذي حصل على الفوسفات، على الاشتراك في عمليات تستهلك طاقة في الخلية. بكلمات أخرى، تتم عمليات تستهلك طاقة في الخلية بشكل مرافق لتحليل جزيئات الـ ATP .

يؤدي انتقال الطاقة الكيميائية بواسطة نقل مجموعة فوسفات (فسفرة) من جزيئات الـ ATP إلى تنشيط مئات الجزيئات المختلفة ويفعل مئات العمليات في الخلايا. يقوم جزيء الـ ATP بواسطة بين عمليات تُطلق طاقة في الخلايا وبين عمليات تستهلك طاقة في الخلايا. تصف الرسمة هـ - 3 وساطة الـ ATP. يوجد ترافق بين بناء الـ ATP (عملية تستهلك طاقة) وبين عمليات تنطلق فيها طاقة وبين تحليل الـ ATP (عملية تُطلق طاقة) وبين عمليات تستهلك طاقة.



الرسمة هـ - 3: الـ ATP وسيط بين عمليات تُطلق طاقة (من مواد عضوية) وبين عمليات تستهلك طاقة في الخلايا. تشير الأسهم المتجاورة والحلقة إلى الترافق الذي يتم بين بناء الـ ATP أو تحليله وبين عمليات تُطلق طاقة أو عمليات تستهلك طاقة في الخلية.

جزيء الـ ATP هو "وسيط طاقة" عام في جميع خلايا الكائنات الحية، ابتداءً من خلايا غير حقيقية النواة حتى خلايا الثدييات المتطورة. تشير هذه الحقيقة إلى أن جزيء الـ ATP استُخدم وسيطاً في أزمان قديمة جداً أثناء النشوء والارتقاء.

قليل من المعلومات ...



قليل من الأعداد حول الـ ATP

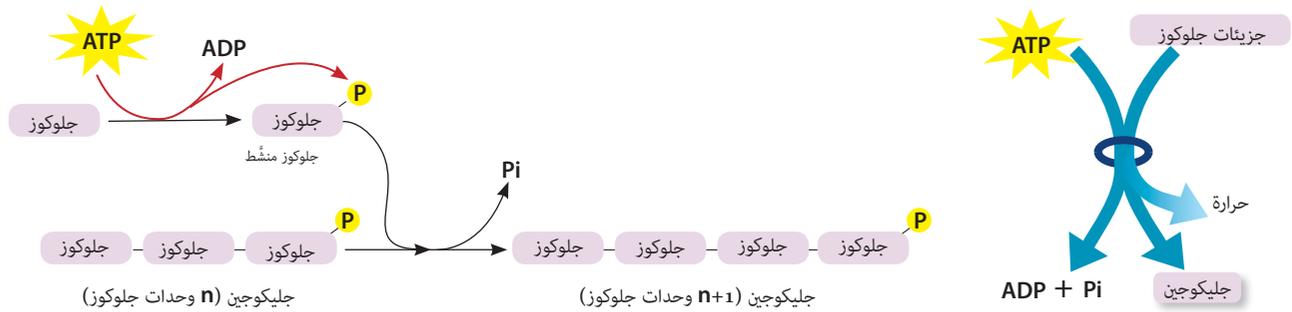
لا تتراكم جزيئات الـ ATP في الخلية، ولا يوجد مخزن للطاقة في الخلية. في كل لحظة معطاة، كمية الـ ATP في الجسم لا تزيد عن 50 غم وكميات المواد التي يُنتج منها، مثل: الـ ADP والفوسفات تكون قليلة نسبياً. تتحلل وتُبنى جزيئات الـ ATP (تمر مدورة $ADP \leftrightarrow ATP$) كل الوقت بحسب احتياجات الخلية: الشخص الذي وزنه 70 كغم يُنتج ويحلل، في حالة الراحة، حوالي 40 كغم (!) الـ ATP خلال يوم واحد. لا تستطيع جزيئات الـ ATP أن تمر عبر غشاء الخلية، لذا تُستغل في الخلايا التي تنتج فيها دائماً. في الكائن الحي الكامل، نجد مخازن طاقة على شكل مواد إدارية: متعددة السكريات (نشا في النبات وجليكوجين في الحيوانات) وليبيدات (دهن في الحيوان وزيت في النبات).

3. اشتراك الـ ATP في عمليات تستهلك طاقة

كما ذكرنا، العمليات الحياتية الضرورية لبقاء الكائن الحي هي عمليات تحتاج طاقة (عمليات بيوطاقة) وتتم (في معظم الحالات) بفضل انتقال مجموعة فوسفور من جزيء الـ ATP. نَصَف في هذا البند بإيجاز قسم من العمليات التي تستهلك طاقة وتتم في الخلايا، كما نعرض ترافقها مع تحليل الـ ATP. يجب أن نتذكر أنه في جميع العمليات التي يحدث فيها ترافق، لا تُستغل كل الطاقة بشكل كامل وقسم منها ينطلق كطاقة حرارية.

أ. عمليات بناء مواد معقدة

نعرض بناء الجليكوجين كمثال **لبناء مادة** مكونة من مادة بسيطة. **الجليكوجين** هو مادة إدارية في خلايا العضلات وفي خلايا كبد الإنسان، وهو مبني من وحدات جلوكوز مرتبطة ببعضها ويشكل مخزناً متوافراً للجلوكوز. لكي تستطيع جزيئات الجلوكوز أن ترتبط ببعضها، يجب عليها أن تمر تغييراً يحتاج إلى طاقة. في هذه العملية، تنتقل مجموعة فوسفور من جزيء الـ ATP إلى جزيء الجلوكوز، يرتفع مستوى طاقة جزيء الجلوكوز وهو يتحول إلى فَعَالٍ - منشَّط (الرسمه ه - 4). الآن، تستطيع جزيئات الجلوكوز المنشَّطة أن ترتبط بسلسلة الجليكوجين التي تطول. وهكذا يتم ترافق بين تحليل جزيء الـ ATP وبين إنتاج الجليكوجين. تحدث عملية شبيهة عند بناء جزيئات النشا في أعضاء تخزين النبات (مثلاً في درنة البطاطا). تصل نواتج عملية التركيب الضوئي - الكربوهيدرات - إلى أعضاء التخزين وهناك تمر عملية تنشيط من خلال حصولها على مجموعة فوسفات. وبهذه الطريقة فقط، ترتبط ببعضها لإنتاج النشا.



الرسمه ه-4: ترافق بين تحليل الـ ATP ونقل مجموعة فوسفات إلى جزيء جلوكوز وبين بناء الجليكوجين (عملية تستهلك طاقة). **انتبهوا!** جزيء الجليكوجين الذي يطول مرتبطة به مجموعة فوسفات أيضاً. وهكذا يكون الجزيئين المرتبطتين في حالة تنشيط. بعد الارتباط، تطلق وحدة فوسفات واحدة والثانية تبقى، لكي ترتبط بوحدة الجلوكوز القادمة.

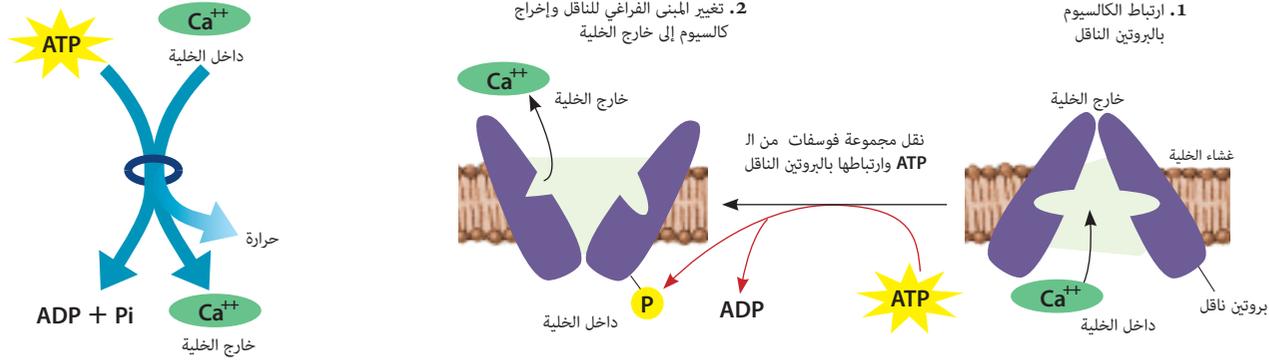
ب. نقل مواد في الخلية عكس منحدر التركيز

أغشية الخلايا ذات نفاذية اختيارية ولا تمر جميع المواد عبرها من البيئة المحيطة للخلية إلى داخلها. إضافةً إلى ذلك، انتقال المواد التي تركيزها في الخلية يختلف عن تركيزها في البيئة المحيطة، لا يتم بشكل تلقائي وهو يحتاج إلى بذل طاقة. نقل المواد عكس منحدر التركيز نسميه **نقلاً فَعَالاً** وهو يتم بواسطة ناقلات بروتينية موجودة في غشاء الخلية من نوع مضخة. يتم النقل الفَعَال، على سبيل المثال، عند امتصاص الأملاح المعدنية بواسطة الشعيرات الماصة الموجودة في جذور النباتات (انظروا الفصل الثالث صفحة 84). مُتَمَتص معظم الأملاح المعدنية التي يحتاجها النبات على الرغم من أن تركيزها في محلول التربة قليل نسبياً للبيئة المحيطة الداخلية في الجذر. يوجد مضخة خاصة لكل ملح معدني يُمتص بنقل فَعَال.

علاقة بموضوع

الخلية — مبني ونشاط:
نقل فَعَال عكس منحدر
التركيز عبر أغشية الخلايا.

يتم تفعيل المضخة بواسطة نقل مجموعة فوسفات من جزيء الـ ATP إلى بروتين المضخة (الرسمه ه-5). وهكذا يتم الترافق بين تحليل جزيء الـ ATP وبين النقل الفعّال بواسطة المضخة. تعرض الرسمه 5 مثلاً لمضخة تُخرج أيونات الكالسيوم من الخلية إلى خارجها.



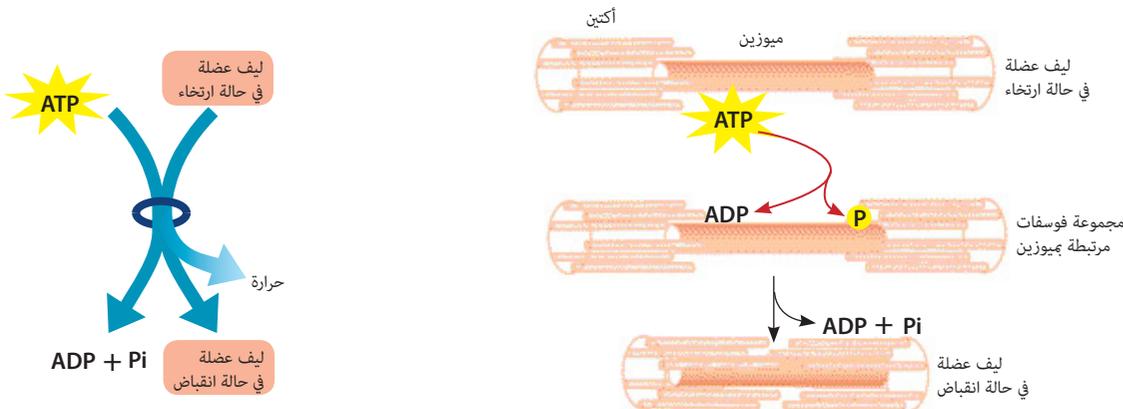
الرسمه ه-5: تحليل جزيء الـ ATP يرافق إخراج أيونات الكالسيوم (بواسطة مضخة) إلى خارج الخلية عكس منحدر التركيز.

ج. حركة وانقباض العضلات

تتميز الأجسام الحية والجماد بقدرتها على تغيير المكان والحركة وهي تستهلك طاقة دائماً. تستهلك حركة السيارة طاقة مصدرها من الوقود، تغبّر الخلية والعضيات الموجودة داخلها مكانها بمساعدة حركة الهيكل الداخلي للخلية الذي يستهلك طاقة مصدرها من جزيئات الـ ATP. عندما يقود شخص دراجته، فإن مصدر حركة دراجته هو نشاط عضلاته. **انقباض العضلات** هو عبارة عن حركة مكونات الخلايا التي تستهلك طاقة. العضلات مبنية من مجموعة ألياف دقيقة. الألياف مكونة من نوعين من البروتينات: أكتين وميوزين. تنقبض الألياف نتيجةً لحركة البروتينين الواحد على الثاني. وتتم حركة البروتينات بفضل تفعيل جزيء الميوزين بواسطة نقل مجموعة فوسفات من جزيء الـ ATP إليها. في هذه الحالة، يرتبط جزيء الـ ADP أيضاً. يرتبط الميوزين الفعّال ببروتين أكتين مجاور له وهو يشده بقوة، ونتيجةً لذلك تنزلق البروتينات على بعضها. يؤدي هذا العمل إلى انقباض (تقصير) ليف العضلة، من خلال إطلاق مجموعة فوسفات (الرسمه ه-6). وهكذا يتم ترافق بين تحليل جزيء الـ ATP وبين انقباض ليف العضلات. انقباض العضلات هو مثال لتحويل طاقة كيميائية إلى طاقة حركة.

علاقة بموضوع

الخلية — مبنى وأداء:
هيكل داخل الخلية.



الرسمه ه-6: ترافق بين تحليل جزيئات الـ ATP وبين انقباض ليف في العضلة.

قليل من المعلومات...



المزيد من الأعداد عن الـ ATP

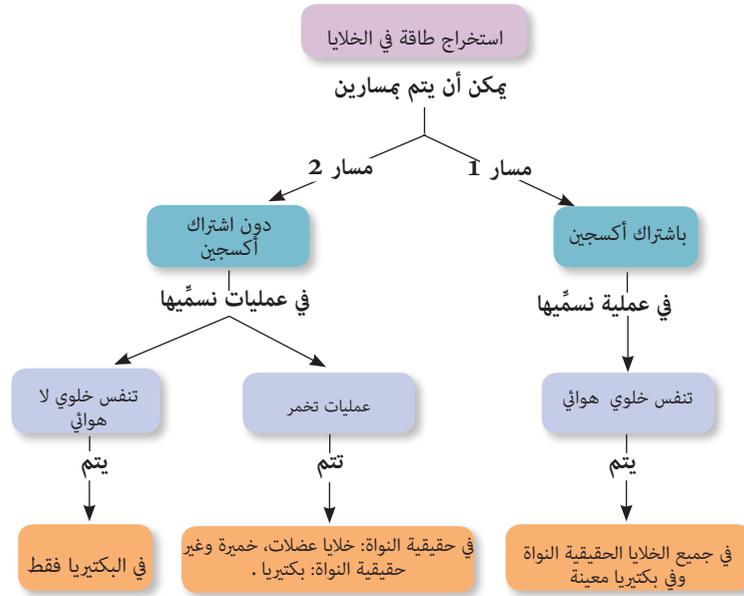
كما ذكرنا، في جسم الإنسان البالغ، في حالة الراحة، تنتج وتتحلل خلال اليوم الواحد حوالي 40 كغم من الـ ATP. عندما تبذل العضلات جهداً، فإنها تحتاج إلى كمية كبيرة من الطاقة، لذا كمية الـ ATP التي تنتج وتتحلل يمكن أن تصل حوالي 70 كغم في اليوم الواحد، وهذه الكمية قريبة من وزن الجسم!!!

الفكرة مركزية

التنظيم والالتزان البدن:
يمكن تنظيم ومراقبة كمية
الـ ATP في الخلايا وفقاً
للاحتياجات.

4. مسارات لإنتاج الطاقة في التنفس الخلوي

يوجد مساران لاستخراج الطاقة في الخلايا:
المسار الأول: باشتراك الأكسجين. يتم هذا المسار في معظم الكائنات الحية وهو الأكثر نجاعةً. يتم استخراج الطاقة في هذا المسار بعملية نسميها **تنفساً خلوياً هوائياً**.
المسار الثاني: دون اشتراك الأكسجين. يتم هذا المسار في قسم من البكتيريا، الخميرة وخلايا الحيوانات في حالة نقص في الأكسجين. نلاحظ في الرسم هـ - 7 استخراج الطاقة من خلال عمليات **تخمير** أو من خلال **التنفس الخلوي اللاهوائي**.



الرسم هـ - 7: مسارات لاستخراج الطاقة (إنتاج ATP) في الخلايا: باشتراك أكسجين ودون اشتراك أكسجين.

المرحلة الأولى في استخراج الطاقة، في كل مسار من المسارين، باشتراك أو دون اشتراك الأكسجين، هي عملية نسميها **"جلوكوليزا"**. هذه العملية شاملة وهي تتم في جميع الكائنات الحية (بكتيريا، فطريات، خلايا أحادية الخلية، نباتات وحيوانات).

فكرة مركزية

التجانس والتباين:
يُشير تجانس مرحلة الجليكوليزا في جميع مجموعات الكائنات الحية في الطبيعة إلى أن هناك مصدر نشوء وارتقاء مشترك، كما يُشير إلى التطور المبكر لعملية الجليكوليزا أثناء النشوء والارتقاء.

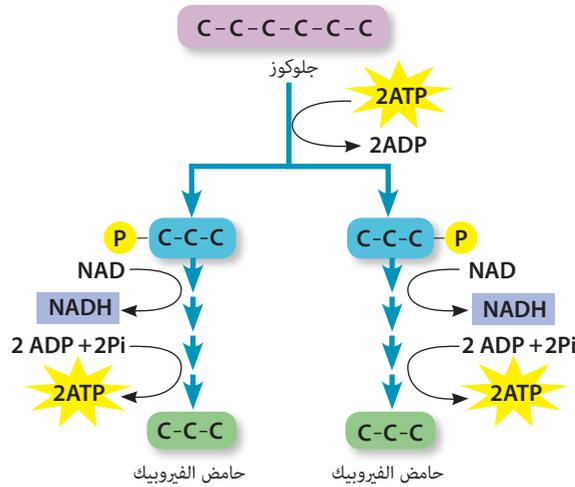
للمزيد عن

التأكسد - الاختزال وحاملات الهيدروجين:
انظروا الفصل الثالث، صفحة 61.

هـ. 1.4 الجليكوليزا - تحليل الجلوكوز إلى حامض الفيروبيك

الجليكوليزا (باللاتينية: *glycos*=سكر، *lysis*=تحليل) هي المرحلة الأولى في مساري استخراج الطاقة من الجلوكوز. تتم الجليكوليزا في سيتوبلازم خلايا جميع الكائنات الحية وهي مثال للتجانس في عالم الأحياء. لا يشترك أكسجين في عملية الجليكوليزا. أثناء الجليكوليزا، يتحلل جزيء الجلوكوز المبنى من هيكل مكون من 6 كربونات إلى جزيئين، كل واحد منهما مكون من 3 كربونات نسميه **حامض الفيروبيك** (الرسمه ه-8). يتم تحليل الجلوكوز بعدة مراحل، حيث ينشط كل واحد منها بواسطة إنزيم خاص. أثناء تحليل جزيئات الجلوكوز، تنتقل ذراتا هيدروجين من جزيء الجلوكوز إلى جزيئات **حاملات هيدروجين (NAD)**، وهكذا نحصل على حاملات هيدروجين مختزلة (**NADH**). عملية تحليل الجلوكوز ونقل الهيدروجين إلى حاملات الهيدروجين يرافقهما إطلاق طاقة، حيث يُستعمل قسم منها لبناء 4 جزيئات **ATP** من جزيئات **ADP** وفوسفات. بما أنه يُبدل في بداية العملية جزيئان من الـ **ATP** عند تحليل جزيء جلوكوز واحد، فإن ربح الطاقة خلال عملية الجليكوليزا هو جزيئان **ATP** فقط.

من المهم إبراز الحقيقة أن تحليل الجلوكوز في الجليكوليزا هو جزئي، و فقط قسم من طاقة الجلوكوز تنطلق في هذه المرحلة. تبقى معظم الطاقة في حامض الفيروبيك وفي حاملات الهيدروجين. كما أن قسما من الطاقة المنطلقة في مرحلة الجليكوليزا يتحول إلى طاقة متوافرة للخلية على شكل **ATP**، أما باقي لطاقة، فإنها تنطلق كطاقة حرارية.



الرسمه ه-8: تلخيص مرحلة الجليكوليزا التي تتم في سيتوبلازما الخلية. انتبهوا! من هنا فصاعداً، نعرض فقط كربونات الجلوكوز وكربونات جميع نواتج التحليل. في الواقع، هذه الجزيئات عضوية وهي تحتوي على ذرات هيدروجين وأكسجين أيضاً.

ماذا يحدث لنواتج الجليكوليزا!؟

حامض الفيروبيك وحاملات الهيدروجين المختزلة التي تنتج في الجليكوليزا، لا تتراكم في الخلية، بل تمر في تغييرات إضافية متعلقة بالمسار الذي يحدث داخل الخلايا.

سؤال هـ-1:

أ. لأي أشكال طاقة نُقلت الطاقة الكيميائية التي كانت في جزيء الجلوكوز في عملية الجليكوليزا.
ب. اذكروا نواتج الجليكوليزا التي نُقلت إليها معظم الطاقة التي كانت في جزيء الجلوكوز. اشرحوا إجاباتكم.

سؤال هـ-2:

هل تتم عملية الجليكوليزا في بيئة محيطة دون أكسجين؟ علّوا.

هـ 2.4 المسار الأول: استخراج الطاقة باشتراك الأكسجين - تنفس خلوي هوائي

خلال السبات الشتوي الطويل للدب الجريزي الذي يستمر 6 أشهر، يفقد الدب حوالي ثلث (!) وزن جسمه. وذلك على الرغم من انخفاض وتيرة العمليات الأيضية في جسمه بشكل كبير جداً خلال السبات: فهو لا يأكل، لا يشرب ولا يفرز فضلات. وتنخفض وتيرة دقات قلبه إلى حوالي رُبع التوتيرة العادية. يُشير الانخفاض الكبير في وزن الدب إلى أنه يستغل الطاقة من الدهون الموجودة في جسمه. لماذا يحتاج الدب إلى كل هذه الطاقة التي يستخرجها من دهنيات جسمه على الرغم من أنه يكون في حالة نوم فقط؟
قبل أن نجيب عن هذا السؤال، يجب علينا أن نفهم، ما الذي يؤدي إلى الانخفاض الكبير في وزن جسم الدب الجريزي؟ لهذا الغرض، يجب علينا أن نتعرف على عملية التنفس الخلوي الهوائي.

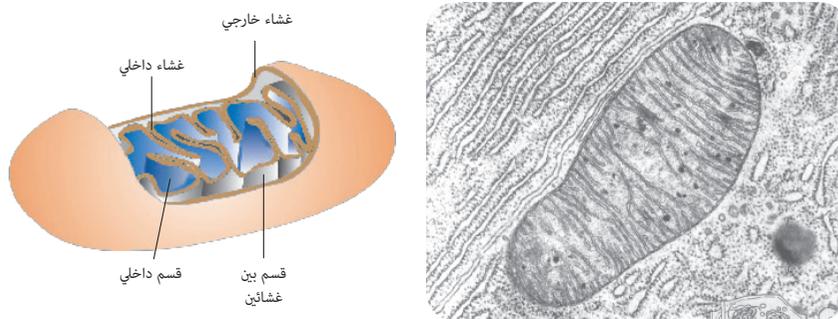
التنفس الخلوي الهوائي هو العملية الأساسية التي يتم بها استخراج الطاقة في خلايا الكائنات الحية الحقيقية النواة. وهذا هو المسار الناجح لاستخراج الطاقة، حيث تُستخرج فيه جزيئات ATP أكثر من كل مسار آخر، وبفضل ذلك تتم نشاطات حياة معقدة.
يوجد عدة مراحل لعملية التنفس الخلوي الهوائي. المرحلة الأولى، الجليكوليزا التي تتم في السيتوبلازم، أما المراحل الثلاث الأخرى فهي تتم في الميتوكوندريا.

التنفس الخلوي الهوائي والميتوكوندريا

كما ذكرنا، في الخلايا الحقيقية النواة وبوجود الأكسجين، تنتقل نواتج الجليكوليزا، حامض الفيروبيك، وحاملات الهيدروجين المختزلة إلى داخل الميتوكوندريا، وهناك تستمر بعملية التنفس الخلوي الهوائي. عندما نتمتعن في الميتوكوندريا بواسطة ميكروسكوب إلكتروني (الرسم هـ - 9)، فإننا نرى هناك عُضي يشبه الأسطوانة، طوله 1 - 3 ميكرومتر (ميكرومتر = واحد على ألف من المليمتر) وهو مُقسَّم إلى أقسام. لكل ميتوكوندريا يوجد غشاءان (كل غشاء مبني من طبقتين من الفوسفوليبيدات): غشاء خارجي يحيط العضي، وغشاء داخلي مكون من طيات كثيرة تُحيط الفراغ الداخلي الذي يحتوي على المحلول. الطيات الكثيرة للغشاء الداخلي، تزيد من مساحة السطح الخارجي الداخلي بشكل كبير جداً نسبة لحجم الميتوكوندريا.

علاقة بموضوع

الخلية - مبني وأداء:
ميتوكوندريا - عُضي داخل الخلية.



الرسم هـ 9- مقطع في الميتوكوندريا. على اليمين: تصوير ميكروسكوبي إلكتروني (تكبير مقداره حوالي 30,000 مرة). على اليسار: رسم تخطيطي.

فكرة مركزية

ملاءمة بين المبنى والأداء:
يتم التعبير عنه بعدد
عضيات الميتوكوندريا في
الخلايا المختلفة ومكانها.

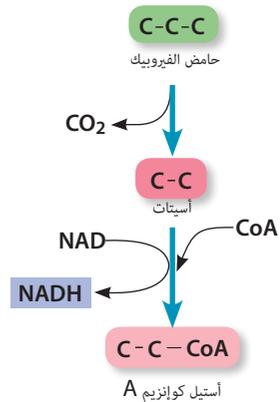
يوجد ملاءمة بين كمية الميتوكوندريا في الخلية وبين مستوى استهلاك الطاقة فيها. مثلاً: الخلية التي تخزن الدهون في جسم الإنسان، يوجد فيها عدد قليل من الميتوكوندريا، أما في خلية الكبد التي تحدث فيها عمليات أيضية كثيرة، يوجد فيها حوالي 500 إلى 2,000 ميتوكوندريا في كل خلية وهي تشكل خمس حجم الخلية. في الخلايا التي نشاطها عالٍ جداً، مثل: خلايا العضلات والخلايا المنوية، نجد عدداً كبيراً جداً من عضيات الميتوكوندريا. في النباتات، يوجد وضع شبيهه في خلايا جذور حديثة السن، على سبيل المثال، يوجد عدد كبير جداً من عضيات الميتوكوندريا بالمقارنة مع خلايا النبات الأخرى. وأيضاً مكان الميتوكوندريا في الخلية مُتعلق بأداء المناطق المختلفة في الخلية. مثلاً: في خلايا العضلات، تتركز الميتوكوندريا في أسطر بين الألياف التي تنقبض، وفي الخلايا المنوية، تتركز الميتوكوندريا حول الذنب الذي بواسطته تتحرك الخلية، لأنه في هذه المناطق يوجد استهلاك كبير جداً لجزيئات الـ **ATP**.
وأيضاً مساحة سطح الغشاء الداخلي للميتوكوندريا تختلف في الخلايا المختلفة وفقاً لاستهلاك الطاقة فيها. مثلاً: مساحة سطح الغشاء الداخلي للميتوكوندريا في خلايا القلب أكبر بثلاثة أضعاف من مساحة سطح الغشاء الداخلي للميتوكوندريا في خلايا الكبد.

فيما يلي المراحل الثلاث لعملية التنفس الخلوي الهوائي التي تتم في الميتوكوندريا:

- تأكسد حامض الفيروبيك الناتج في عملية الجليكوليزا.
 - "دورة كريس".
 - نقل الهيدروجين بعملية ترافق عملية بناء الـ **ATP** في عملية فسفرة التأكسد.
- تتم المرحلتان الأولى والثانية في القسم الداخلي للميتوكوندريا. أما المرحلة الثالثة فهي تتم على سطح الغشاء الداخلي للميتوكوندريا.

■ تأكسد حامض الفيروبيك

نواتج مرحلة الجليكوليزا — حامض الفيروبيك وحاملات الهيدروجين المختزلة (**NADH**) — تنتقل من السيتوبلازم إلى داخل الميتوكوندريا. حامض الفيروبيك المكون من 3 كربونات، يتحلل في البداية وينتج جزيئاً واحداً من ثاني أكسيد الكربون (الذي ينطلق من الخلية إلى الدم) وجزيئاً واحداً مكوناً من كربونين نسميه أسيتات (انظروا الرسمة هـ - 10). يرتبط الأسيتت بمادة نسميها كواينزيم **A** (في الرسمة **CoA**) (كواينزيم هو جزيء يعمل بالتعاون مع إنزيم)، وتنتج مادة اسمها استيل كواينزيم **A**. أثناء إنتاج استيل كواينزيم **A**، تنتقل ذرات هيدروجين من حامض الفيروبيك إلى حامل الهيدروجين (**NAD**) ونحصل على حامل هيدروجين مختزل (**NADH**) إضافي.



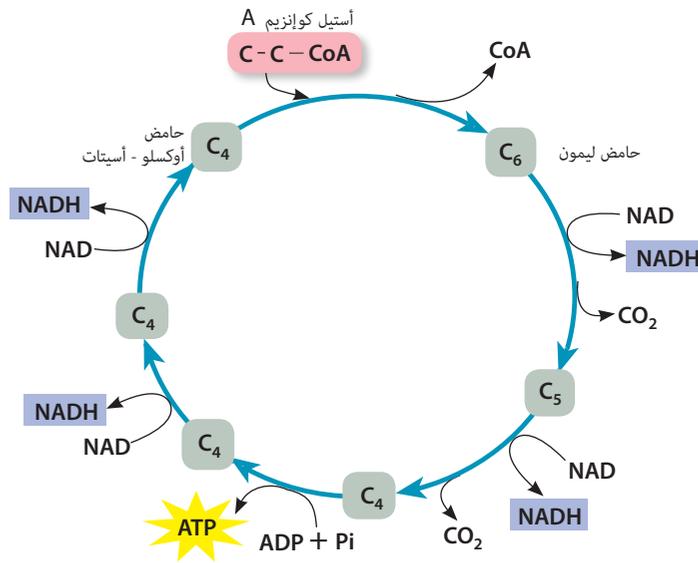
الرسمة هـ-10: عملية تحليل جزيء
حامض الفيروبيك وتأكسده الذي يحدث في
الميتوكوندريا.

سؤال هـ-3:

صنّفوا الجزيئات الآتية التي تشترك في مرحلة تأكسد حامض الفيروبيك إلى مواد متفاعلة وإلى نواتج: **NAD**, **CO₂**, حامض الفيروبيك, **NADH**, استيل كواينزيم **A**, كواينزيم **A**.

■ دورة كريبس

يتم تحليل جزيء أستيل كواينزيم A في عملية دائرية متعددة المراحل نسميها دورة كريبس على اسم مكتشفها هينس كريبس (1981-1900 Hans Krebs). عند الانتقال من مادة معينة إلى مادة أخرى في سلسلة عمليات دورة كريبس، فإنه يحدث تغيير في الهيكل الكربوني بمركبات الكربون ويتم انتقال طاقة. نلاحظ في الرسمة هـ - 11 أن الدورة تبدأ بالارتباط بين أستيل كواينزيم A وبين جزيء مكون من 4 كربونات (حامض أوكلسو أسيتات). يَنْتُج من هذا الترابط جزيء مكون من 6 كربونات (حامض الليمون). في المراحل التالية، ينطلق جزيئان CO_2 من حامض الليمون ويبقى مركب مكون من 4 كربونات. بعد عدة مراحل، يستعد هذا المركب للارتباط مرة أخرى باستيل كواينزيم A، لكي يبدأ "دورة" جديدة من جديد. أثناء تغيير الهيكل الكربوني من حامض الليمون وحتى حامض الأوكسلو أسيتات، ينتقل هيدروجين من مواد وسطية في الدورة إلى حاملات الهيدروجين. تُستغل طاقة حاملات الهيدروجين المختزلة في المرحلة القادمة لبناء ATP. إضافة لذلك، يُبنى في دورة كريبس جزيء ATP واحد على كل جزيء حامض فيروبيك (والمجموع هو جزيئان ATP على كل جزيء جلوكونز). كما هو الامر في كل عملية بيوكيميائية، فإن عمليات دورة كريبس يرافقها انطلاق حرارة.



الرسمة هـ - 11: رسم تخطيطي عام لعمليات دورة كريبس. انتبهوا! عرضنا قسم من المواد الوسطية في الدورة، من خلال عدد كربونات المركب فقط.

■ نقل هيدروجين وبناء ATP — فسفرة مؤكسدة

تتم هذه المرحلة في الميتوكوندريا وفيها نحصل على معظم جزيئات الـ ATP. في هذه المرحلة، حاملات الهيدروجين المختزلة (NADH) التي نتجت في المراحل السابقة، تصل الغشاء الداخلي للميتوكوندريا وتعطي الهيدروجين إلى حاملات خاصة موجودة في الغشاء. سلسلة العمليات التي تحدث في الغشاء الداخلي للميتوكوندريا، والتي ستقرأون عنها بتوسع فيما بعد، تُتيح بناء جزيئات ATP من خلال هيئة إنزيمات خاصة موجودة في الغشاء الداخلي أيضاً. تُبنى خلال هذه العملية حوالي 26 - 28 جزيء ATP.

ماذا يحدث للهيدروجينات في نهاية عملية التنفس الخلوي الهوائي؟!

في نهاية العملية، يرتبط الهيدروجين بالأكسجين (نعم، نفس الأكسجين الذي وصل من البيئة المحيطة إلى الخلايا عبر الدم) وينتج ماءً.

علاقة بموضوع

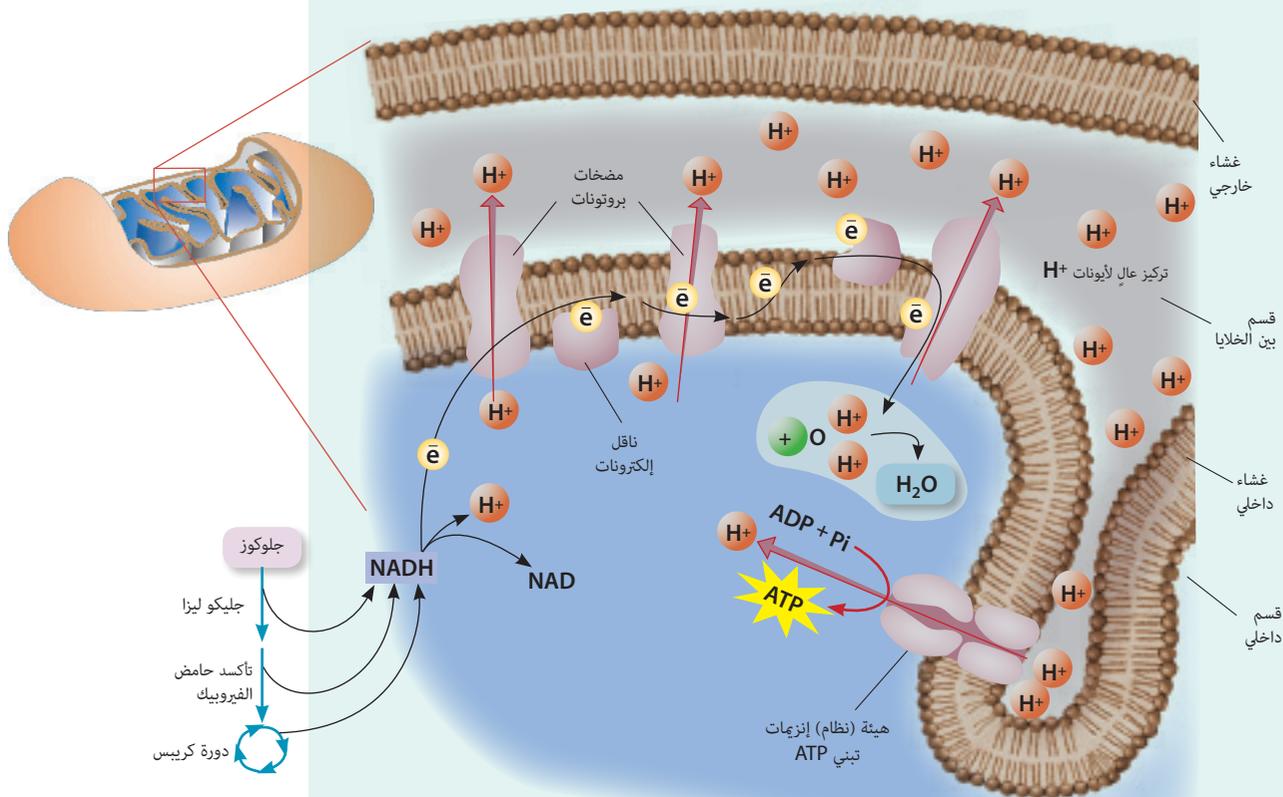
علم البيئة:
مياه أبيضية.

استيعاب الهيدروجين من حاملات الهيدروجين المختزلة (الـ NADH) بواسطة الأكسجين ضروري لـ "مدورة" حاملات الهيدروجين. لأن كمية جزيئات الـ NAD في الخلايا محدودة، ولو كانت جميع جزيئات الـ NAD مختزلة (NADH)، لتوقفت عملية التنفس الخلوي الهوائي.

توسع

الفسفرة المؤكسدة في الميتوكوندريا — ترفاق بين عمليات تأكسد - واختزال وبين بناء الـ ATP

كما ذكرنا أعلاه، حاملات الهيدروجين المختزلة (NADH) التي تنتج في الجليكوليزا وفي المراحل الأولى من التنفس الخلوي الهوائي، تخسر الهيدروجين إلى سلسلة حاملات خاصة موجودة في الغشاء الداخلي للميتوكوندريا. في هذه العملية، تنفصل ذرات الهيدروجين إلى الكاتيونات (H^+) وبروتونات (e^-). تنتقل البروتونات وتدخل بين الأغشية، والإلكترونات هي التي تنتقل من ناقل إلى آخر في سلسلة نسميها "سلسلة انتقال الإلكترونات". هذا الانتقال هو سلسلة عمليات تأكسد - اختزال (انظروا الصفحة 61)، عندما يحصل كل حامل بدوره على إلكترون (يُختزل) وعندئذ يخسره (يتأكسد). تنتظم جزيئات الناقلات في الغشاء الداخلي للميتوكوندريا في تسلسل يكون فيه كل ناقل مؤكسد أقوى من السابق له، لذا فهو يستطيع أن يجذب الإلكترون من الناقل السابق له في السلسلة. تُستغل الطاقة المنطلقة أثناء انتقال الإلكترونات لنقل أيونات الهيدروجين (H^+) إلى القسم الذي يقع بين الأغشية وبواسطة ذلك ينتج منحدر تراكيز لأيونات الهيدروجين في كلا طرفي الغشاء الداخلي (الرسم ه - 12).



الرسم ه - 12: فسفرة تأكسد في الغشاء الداخلي للميتوكوندريا: سلسلة انتقال الإلكترونات ونظام بناء الـ ATP المرافق له. ملاحظة: مضخات البروتونات هي جزء من سلسلة انتقال الإلكترونات.

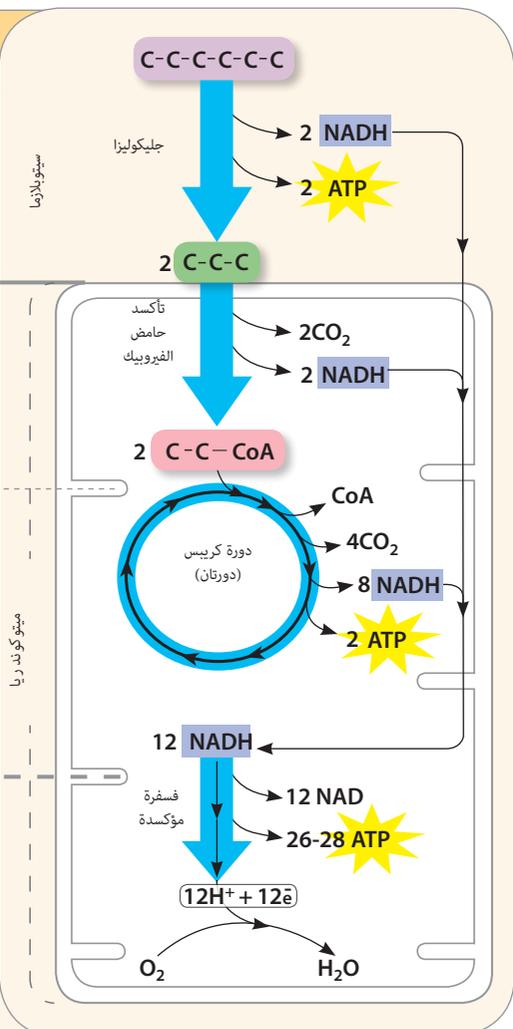
التركيز العالي للبروتونات في القسم الذي يقع بين الأغشية هو مخزن الطاقة الوضعية الكامنة (كما هو الامر مع الماء المخزون خلف سد). تنتقل البروتونات من القسم الذي يقع بين الأغشية إلى القسم الداخلي للميتوكوندريا، وذلك وفقاً لمنحدر التراكيز عبر نظام (هيئة) إنزيمات موجودة في الغشاء الداخلي للميتوكوندريا لبناء الـ ATP. تيار البروتونات هو الذي يزود الطاقة المطلوبة لهذا النظام لبناء الـ ATP.

الأخير الذي يحصل على الإلكترونات في السلسلة هو أكسجين جزيئي، وهو مؤكسد أقوى من جميع الناقلات الأخرى في السلسلة. يرتبط الأكسجين بأيونات الهيدروجين الموجودة في القسم الداخلي وبالإلكترونات من خلال إنتاج جزيئات الماء. سُميت العملية فسفرة مؤكسدة، لأنه يُضاف خلالها فوسفور (فوسفات) إلى جزيء الـ ADP من خلال تأكسد حاملات الهيدروجين المختزلة.

يلخص الجدول هـ-1 والرسمه التي في داخله مسار استخراج الطاقة في وجود الأكسجين.

جدول هـ-1: تلخيص عملية التنفس الخلوي الهوائي — من جلوكوز وأكسجين إلى ATP, CO₂ وماء انتبهوا! قسما من المواد المتفاعلة التي تظهر في الجدول، لا تظهر في الرسمه.

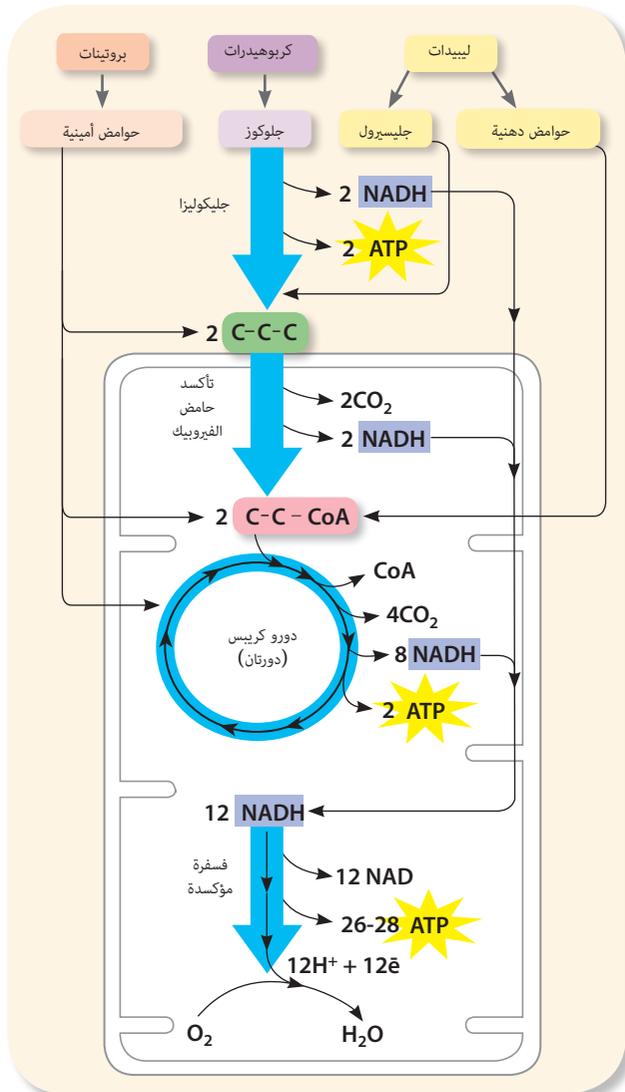
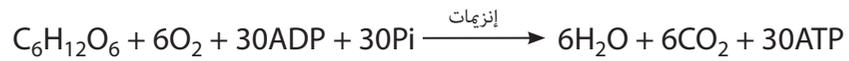
المرحلة	مكان الحدوث	مواد متفاعلة	نواتج
جليكوليزا	سيتوبلازما	جلوكوز (6 كربون)	2 حامض فيرويك (3 كربون)
		حامل هيدروجين دون هيدروجين (NAD)	حامل هيدروجين مختزل (NADH)
		Pi + ADP	ATP
تأكسد حامض الفيرويك	قسم داخلي في الميتوكوندريا	حامض الفيرويك	أستيل (2 كربون) كوايزيم A
		حامل هيدروجين دون هيدروجين (NAD)	حامل هيدروجين مختزل (NADH)
		Pi + ADP	ATP
دورة كريس	قسم داخلي في الميتوكوندريا	أستيل (2 كربون) كوايزيم A	أستيل (2 كربون) كوايزيم A
		حامل هيدروجين دون هيدروجين (NAD)	حامل هيدروجين مختزل (NADH)
		Pi + ADP	ATP
فسفرة مؤكسدة	الغشاء الداخلي للميتوكوندريا	حامل هيدروجين مختزل (NADH)	حامل هيدروجين دون هيدروجين (NAD)
		أكسجين	ماء
		Pi + ADP	ATP



سؤال ه-4:

نرى في التلخيص المعروض في جدول ه-1 أن نواتج مرحلة معينة هي مواد متفاعلة لمرحلة أخرى. أعطوا ثلاثة أمثلة لمواد هي نواتج في مرحلة معينة لكنها مواد متفاعلة في مرحلة أخرى.

تلخيص: في المرحلتين اللتين تتم بعد الجليكوليزا، يتحلل الهيكل الكربوني لحمض الفيروبيك تمامًا إلى جزيئات ثاني أكسيد الكربون. كمية الـ ATP الناتجة المباشرة في هذه المراحل بكمية ليست كبيرة. المرحلة الأخيرة في هذا المسار هي التي تُنتج جزيئات ATP كثيرة، عندما يرتبط الهيدروجين من حامل الهيدروجين المختزل (NADH) (الذي نَتَج خلال المراحل السابقة) بالأكسجين وينتج ماء. عدد جزيئات الـ ATP الذي يُنتج من تأكسد كامل لجزيء الجلوكوز حوالي 30 جزيء (2 في الجليكوليزا، 2 في دورة كريبس وحوالي 26-28 في الفسفرة المؤكسدة). العدد الدقيق لجزيئات الـ ATP متعلق بعوامل مختلفة، لا نستطيع أن نتطرق إليها هنا. الصيغة العامة (الموزونة) لاستخراج الطاقة في عملية التنفس الخلوي الهوائي هي:



على الرغم من أن نجاعة استخراج الطاقة في مسار التنفس الخلوي الهوائي هو عال جدًا في الخلية الحية، إلا أن حوالي 40% من الطاقة المنطلقة من تأكسد الجلوكوز مستغلة لبناء جزيئات الـ ATP. أما القسم الآخر من الطاقة، يتحول إلى حرارية وينبعث من الخلية. قد تفكرون أن ذلك تمييزًا، للمقارنة - نجاعة استخراج الطاقة من وقود السيارة حوالي 25%.

هل مواد عضوية أخرى باستثناء الجلوكوز يمكن أن تُستعمل لاستخراج الطاقة في الخلية؟

حتى الآن، ركزنا على وصف عمليات استخراج الطاقة التي يكون فيها المتفاعل الأول هو جلوكوز. من المهم أن نعرف أن نواتج تحليل الليبيدات والبروتينات تُستغل في مراحل مختلفة من العمليات وتُستعمل كمواد متفاعلة وكمصدر للطاقة، كما نرى ذلك في الرسم ه-13.

الليبيدات التي يستهلكها الجسم، تتحلل في الجهاز الهضمي، وتصل الخلايا نواتج التحليل، بالأساس حموض دهنية وجليسيرول. يُنتج أستيل كواينزيم A من الحموض الدهنية وهو يشترك في دورة كريبس، ويشترك الجليسيرول في عملية الجليكوليزا.

كمية الطاقة (ATP) التي تستخرجها الخلية من الحموض الدهنية حوالي ضعف الكمية المستخرجة من الجلوكوز. بين الوجبات وأثناء النشاط الرياضي المستمر، يزودنا تحليل الدهون بحوالي نصف كمية الـ ATP المطلوبة لخلايا العضلات، الكبد والكليتين. تُستغل الدهون لاستخراج الطاقة في حالة نقص في الجلوكوز أيضًا، مثلًا: في السبات الشتوي، أو أثناء ترحال الطيور.

تُستغل البروتينات كمصدر للطاقة في الخلايا عندما تنتهي مصادر الكربوهيدرات والدهنيات، مثلًا: أثناء الصوم أو الجوع المستمر. هذا الوضع غير مرغوب، لأن تحليل البروتين قد يضر الأداء السليم في الجسم. تتحلل البروتينات إلى حوامض أمينية تشترك كمادة وسطية في دورة كريبس وفي مراحل سابقة لها. كمية الطاقة (ATP) التي تستخرجها الخلية من الحوامض الأمينية مماثلة لكمية الطاقة المستخرجة من الجلوكوز. يوجد في الكبد مسار تتحول فيه حوامض أمينية أثناء الحاجة إلى جلوكوز (مصدر الطاقة الوحيد لخلايا الجهاز العصبي).

من الجدير بالمعرفة أن مواد وسطية في عملية التنفس الخلوي، قد تُستعمل مواد بناء أساسية لبناء مواد عضوية معقدة. مثلًا: تُستعمل مواد وسطية من دورة كريبس كمادة بناء أساسية لحوامض أمينية أو حوامض دهنية. تشكل دورة كريبس وأستيل كواينزيم A مفترق طرق أضي مهم في الخلية، لأنها تربط بين عمليات التحليل وعمليات البناء. عمليات استخراج الطاقة في الخلية وعمليات البناء متعلقة ببعضها ويتم تنظيمها بحسب الحاجة إلى الطاقة وبناء المواد.

سؤال هـ-5:

عند احتراق مادة عضوية، تتحلل المادة مباشرةً إلى CO_2 وماء. أما في عملية التنفس الخلوي الهوائي، تمر المادة العضوية بعملية تحليل متعددة المراحل. ما هي الأفضلية للخلايا من عملية التحليل المتعددة المراحل؟

سؤال هـ-6:

في عملية التخمر، تنتج كل الطاقة (ATP) في مرحلة الجليكوليزا. اشرحوا، لماذا نواتج الجليكوليزا (حامض الفيروبيك وحامل الهيدروجين المختزل) لا تستطيع أن تكون نواتج نهائية في عملية التخمر؟

سؤال هـ-7:

ما هي الوظيفة الضرورية للأكسجين في عملية التنفس الخلوي الهوائي؟

سؤال هـ-8:

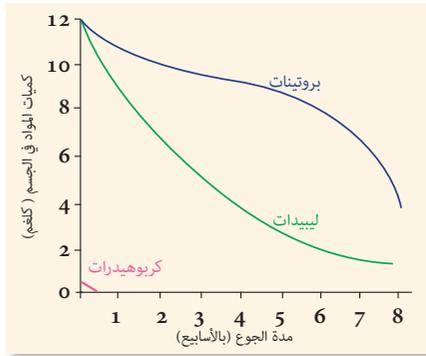
يُنْتَج NAD من فيتامين نيئاتسين (B_3)، لكن على الرغم من وظيفته المركزية في عملية التنفس الخلوي الهوائي، لا تحتاج الحيوانات إلى كميات كبيرة من النيئاتسين. اشرحوا.

سؤال هـ-9:

لماذا يجب الحفاظ على تهوية التربة في منطقة جذور النبتة؟

سؤال هـ-10:

لماذا لا نحتاج عادةً إلى تسخين قاعات الرياضة عندما تتم فيها نشاطات رياضية؟



سؤال هـ - 11: تصف الرسمة هـ - 14 تأثير الجوع المتواصل على كمية المواد في جسم الإنسان. ماذا يمكن أن نتعلم من هذه الرسمة عن كميات المواد في جسم الإنسان وعن ترتيب استغلالها أثناء الجوع.

الرسمة هـ - 14: تأثير الجوع المتواصل على كميات المواد في الجسم .

نافذة البحث

أُجريت تجربة لفحص استهلاك الأكسجين في أقسام الخلية المختلفة، وقد أُضيف جلوكوز وتمّ فحص استهلاك الأكسجين في عيّنتين:

1. نسيج مهروس (يشمل جميع مكونات الخلية).
2. ميتوكوندريا فقط.

يعرض الجدول هـ - 2 نتائج التجربة.

جدول هـ - 2: معدل وتيرة استهلاك الأكسجين في أقسام الخلية المختلفة بوجود جلوكوز.

معدل وتيرة استهلاك الأكسجين (وحدات عشوائية)	العينة التي فُحصت
100	نسيج مهروس
3	ميتوكوندريا (كاملة) فقط

سؤال هـ - 12

أ. اشرحوا الفرق في استهلاك الأكسجين بين العيّنتين.
ب. ما هي المادة التي يجب إضافتها إلى العينة التي تحتوي على ميتوكوندريا فقط، لكي نرفع من استهلاك الأكسجين فيها؟ اشرحوا إجاباتكم.

سُببات الدب وال ATP

نعود إلى السؤال الذي طرحناه في بداية النقاش حول استخراج الطاقة باشتراك الأكسجين (صفحة 142): لماذا يحتاج الدب إلى استخراج طاقة كثيرة من الدهون الموجودة في جسمه أثناء السبات الشتوي؟ كما رأينا في هذا الفصل، يُستعمل عادةً قسمًا كبيرًا من الطاقة الناتجة من تحليل المواد العضوية لبناء جزيئات الـ ATP تُستخدم كمصدر طاقة متوافر لنشاطات الحياة. يوجد ترافق بين عمليات تحليل وتأكسد المواد العضوية وبناء الـ ATP.

أثناء السبات الشتوي، في حالة نقص غذاء كربوني، مصدر الطاقة للدب هو الدهون الموجودة في جسمه. في خلايا دهن الدب، يوجد بروتينات غير فعّالة نسبيًا بروتينات تمنع الترافق بين العمليات. في درجة حرارة منخفضة، تصبح هذه البروتينات فعّالة ووظيفتها أن تمنع الترافق بين عمليات نقل الهيدروجين في التنفس الخلوي وبين بناء جزيئات الـ ATP. نتيجة لعدم ترافق العمليات، لا تُستغل معظم الطاقة المنطلقة في عملية

فكرة مركزية

تنظيم وازن بدني: يحدث كل الوقت في الكائنات الحية وأثناء السبات أيضًا.

التنفس الخلوي الهوائي لبناء الـ ATP بل تتبعثر كحرارة. الحرارة المنطلقة من تحليل الدهون، تساعد الدب في الحفاظ على درجة حرارة جسمه في أيام الشتاء الصعبة، ويُتيح نشاط الإنزيمات في المستوى الأدنى المطلوب للحفاظ على اتزان بدني أثناء السبات الشتوي أيضًا.



قليل من المعلومات ...

مستحضرات خطيرة

في سنة 1986، وصلت المستشفى في الولايات المتحدة طفلة عمرها ثلاث سنوات ونصف دون دقائق قلب ودون تنفس. قالت الأم: قبل ساعتين قامت بتنظيف كلبها بمادة لمكافحة البراغيث، وبعد ذلك بدأت بالتقيؤ والنعاس. بعد مرور عشرة دقائق، أصبح تنفسها سريعًا وقد فقدت وعيها وماتت. تبين في الفحص الذي أجري، بعد الموت، في خلايا أنسجة مختلفة، أن هناك إصابة بميتوكوندريا الخلايا ويوجد مستوى منخفض جدًا للـ ATP في الميتوكوندريا. قد تُشير هذه المكتشفات إلى وجود مادة معينة في المستحضر المعد لمكافحة البراغيث الذي أصاب التنفس الهوائي في خلايا البنت وأدى إلى موتها. من المهم أن نذكر أنه من المعروف أن هذا هو الموت الوحيد الذي حدث بسبب استعمال هذا المستحضر، وقد نبع ذلك على ما يبدو من أن البنت تعرضت لهذه المادة بشكل مكثف في أعقاب استنشاقه وابتلاعه.

تساعد معرفة عملية التنفس الخلوي الهوائي على فهم أسباب موت الطفلة.

سؤال هـ-13:

وُجد في الفحص أن مستوى الـ ATP في الميتوكوندريا كان منخفضًا جدًا بالمقارنةً مع المستوى المتوقع، لكن مستوى الـ ATP في السيتوبلازم كان سليمًا. إضافةً إلى ذلك، كان مستوى أستيل كولينزيم A سليمًا.

أ. اعتمادًا على هذه المكتشفات، أي مرحلة في التنفس الخلوي الهوائي أصيبت جراء استعمال المستحضر لمكافحة البراغيث؟

ب. هل كان من الممكن أن يساعد التنفس الاصطناعي هذه الطفلة؟ كيف توصلتم إلى إجاباتكم؟

3.4هـ المسار الثاني: استخراج الطاقة دون اشتراك أكسجين — عمليات تخمر وتنفس خلوي لا هوائي

يتم استخراج الطاقة دون اشتراك الأكسجين في عمليات تخمر أو في عملية نَسْمِيها تنفس خلوي لا هوائي. تتم عمليات التخمر في كائنات حية غير حقيقية النواة مثل البكتيريا، وأيضًا في كائنات حية حقيقية النواة في ظروف نقص في الأكسجين، على سبيل المثال، في الخميرة وخلايا عضلات تبذل جهدًا. التنفس الخلوي اللاهوائي كوسيلة لاستخراج الطاقة موجود فقط في كائنات حية غير حقيقية النواة وهي عملية نادرة نسبيًا. انتبهوا، أحيانًا نستعمل خطأ التخمر والتنفس الخلوي اللاهوائي، الواحد بدل الآخر. في هاتين العمليتين، تُستخرج الطاقة دون اشتراك الأكسجين، لكن على الرغم من ذلك، نبيّن في هذا البند أن العمليتين مختلفتين بالعملية البيوكيميائية التي تحدث في الخلايا، وبمستوعب الهيدروجين النهائي وبعده جزيئات الـ ATP التي تُنتج في كل عملية.

عملية التخمر

ما هو المشترك للخيار المخلل الحامض، النبيذ، خميرة الخبز، البيرة و والآلام في العضلات؟!؟

جميعها نتجت خلال عملية التخمر.

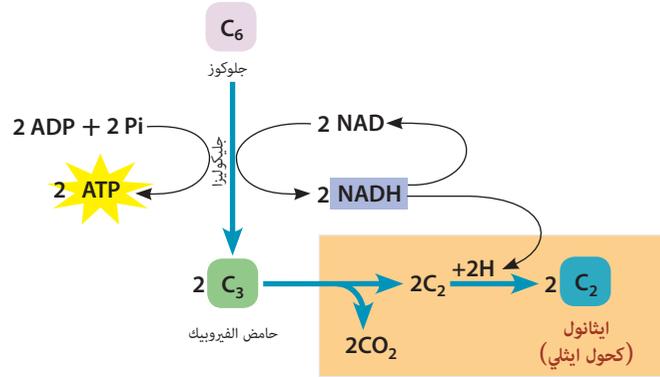
عمليات التخمر مكونة من مرحلتين: أ. الجليكوليزا. ب. نقل الهيدروجين من خلال مدورة الحاملات. يتم استخراج الطاقة (إنتاج ATP) من الجلوكوز في عملية التخمر في مرحلة الجليكوليزا فقط، حيث نحصل على جزيئين ATP من كل جزيء جلوكوز. هذا العدد قليل جداً بالمقارنة مع عدد جزيئات الـ ATP التي تُستخرج خلال التنفس الخلوي الهوائي.

في المرحلة الثانية من عملية التخمر، ينطلق الهيدروجين من حاملات الهيدروجين وينتقل إلى مستوعبات الهيدروجين، وهكذا تتم مدورة الحاملات. مدورة حاملات الهيدروجين ضرورية لحدوث دورات إضافية من الجليكوليزا.

توجد عدة عمليات تخمر تختلف عن بعضها بمستوعبات الهيدروجين وبنواتجها النهائية. نبحث هنا عمليتا تخمر لهما أهمية في صناعة الغذاء: تخمر كحولي وتخمر حامض الحليب (تخمر لاكتي).

التخمر الكحولي

في التخمر الكحولي، يتحلل في البداية حامض الفيروبيك الذي ننتج في الجليكوليزا إلى CO_2 وإلى مادة وسطية مكونة من كربونين. المادة المكونة من كربونين تستوعب الهيدروجين من حامل الهيدروجين، وهكذا ينتج الإيثانول (الرسمه ه - 15). ينطلق الإيثانول المكون من كربونين و CO_2 من الخلية. مصدر الاسم تخمر من اسم الكائن الحي "خميرة" الذي اكتُشفت فيه هذه العملية لأول مرة. يتم التخمر الكحولي في الخميرة وفي أنواع بكتيريا معينة، ويستغله الإنسان لتخمير العجينة ولإنتاج الإيثانول الذي نسميه في حياتنا اليومية كحولا.



الرسمه ه -15: عملية التخمر الكحولي

التخمر الكحولي في خدمة الإنسان

تُستخدم الخميرة لتخمير العجين وفي تحضير مُنتجات خبز مختلفة. الخميرة هي فطريات أحادية الخلية، وهي تستطيع أن تنفذ تنفساً خلويًا هوائيًا وتخمر. في بداية عملية تخمر العجين، تستخرج الخميرة طاقة خلال التنفس الخلوي الهوائي، عندما يكون في بيئتها المحيطة كمية أكسجين كافية ومواد غذائية متوافرة مثل الجلوكوز. في هذه الظروف، تتكاثر بوتيرة سريعة وتُطلق كمية كبيرة من غاز الـ CO_2 الذي يُحتجز في العجين. فيما بعد، في عملية التخمر، تتغير الظروف في العجين، حيث تصبح كمية الجلوكوز والأكسجين قليلة (اللدان "احتل" مكانيهما الـ CO_2). في هذه الظروف، تنتقل الخميرة إلى استخراج الطاقة بعملية التخمر الكحولي ويتباطئ تكاثرها. وفي عملية التخمر الكحولي، يُنتج كحولا وحوامض مختلفة تُكسب العجين مذاق ورائحة مرغوبة.

يُستخدم التخمير الكحولي في صناعة النبيذ أيضاً. في الطبيعة، تتطور على العنب أصناف كثيرة من الخميرة التي يمكن تمييزها كمسحوق أبيض على العنب. هذه الخميرة تسمىها "خميرة برية". في إنتاج النبيذ الحديث، الطريقة الأفضل، هي إبادة الخميرة البرية، وبعد ذلك، إضافة خميرة طوّرت في المختبر بالكمية المطلوبة وبرقابة. الخميرة الموجودة بشكل طبيعي على سطح العنب أو التي أضيفت، تؤدي إلى تحويل عصير العنب إلى نبيذ بواسطة التخمير الكحولي. سكر العنب (جلوكوز) هو غذاء هذه الخميرة. يؤدي معس العنب إلى تلامس بين الخميرة وعصير العنب.

قليل من المعلومات ...

التخمير بحسب طلبك — إنتاج مشروبات كحولية مختلفة

نوع المشروب الكحولي الذي يُنتج متعلق بصنف العنب، بنوع الخميرة، بكميتها، بمدة التخمير وبالمادة التي تتخمّر. إذا توقف التخمير، على سبيل المثال، في مرحلة مبكرة وبقيت كمية كبيرة من السكر الذي لم يتخمّر، فإننا نحصل على نبيذ مذاقه حلو قليل ونسميه نصف جاف، وهو يحتوي على نسبة مئوية قليلة من الكحول (6% - 9%). إذا استمر التخمير مدة زمنية أطول، فإننا نحصل على نبيذ "جاف" فيه نسبة مئوية عالية من الكحول (11% - 12.5% كحول).

يُنتج "نبيذ التسلية" على الأغلب من عنب قُطف متأخراً، لذا تكون فيه نسبة عالية جداً من السكر الطبيعي. عندما تتوقف عملية التخمير، فإننا نحصل على نبيذ حلو فيه نسبة مئوية عالية من الكحول. تتبع الحلاوة العالية والنسبة المئوية العالية للكحول في "نبيذ القداس" بسبب إضافة سكر وكحول أثناء عملية الإنتاج.

نحصل على النبيذ الأحمر من تخمير العنب كله (بما في ذلك قشرة العنب)، أما النبيذ الأبيض فنحصل عليه من تخمير العصير فقط. في نهاية التخمير، نفصل السائل عن المواد الصلبة ويُنقل النبيذ للتخزين في حاويات كبيرة. يُنتج اللون الأحمر للنبيذ من قشرة العنب وليس من لون العصير.

اتضح من ذلك أنه من العنب الأحمر أو الأسود، يمكن أن تُنتج نبيذاً أحمر أو أبيض (عند فصل وإبعاد قشرة العنب). يتم إنتاج النبيذ الغازي والشمبانيا بواسطة تخمير إضافي للنبيذ الذي حُضّر، حيث يتم إدخال النبيذ الذي تمّ تحضيره إلى قنّان ويُضاف إليه سكر وخميرة. الآن، يحدث تخمير إضافي في قنينة مغلقة. وبما أن القنينة مغلقة، لا يستطيع CO_2 الخروج منها، وهكذا تُنتج الفقاعات التي تميّز هذا النبيذ.

عمليات التخمير التي تنفذها الخميرة، هي الأساس لإنتاج مشروبات روحية إضافية. العوامل التي تحدد المذاق الخاص هي: نوع الخميرة ونوع الخضروات، أو الثمر الذي يُستخدم كوسط لعملية التخمير، مثل: الشعير (لتحضير البيرة)، البطاطا (لتحضير الفودكا)، الأرز (لتحضير ساكي) وثمار أخرى مختلفة (لتحضير أنواع نبيذ مختلفة).

من الجدير بالذكر أن الليكر هو مشروب كحولي لا نحصل عليه من عمليات التخمير، بل من خلال نقع مواد غذائية مختلفة (ثمار، أعشاب بهارات، قهوة وغير ذلك) في إيثانول نقي.



سؤال هـ-14:

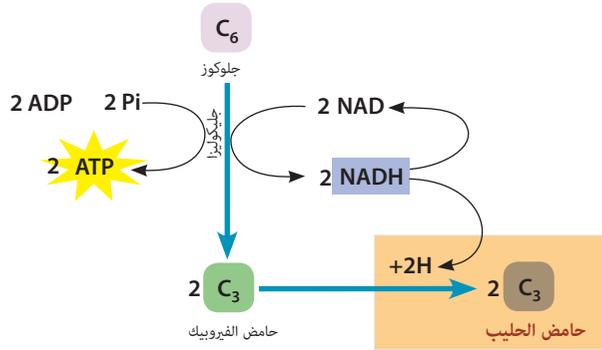
في تجربة معينة، نمّ الباحثون خميرة للخبز في صحنين فطرين. في كل واحد منهما، كان عدداً متساوياً من الخميرة وكمية الجلوكوز متساوية في وسط التنمية أيضاً. وُضع الصحن الأول مع وجود أكسجين والصحن الثاني في نقص أكسجين. حَمّن الباحثون أن مخزون الجلوكوز في أحد الصحنين سينتهي بشكل أسرع بالمقارنة مع الصحن الثاني.

أ. ما هي القاعدة البيولوجية لتخمير الباحثون؟

ب. في أي صحن ينتهي مخزون الجلوكوز بشكل أسرع؟ اشرحوا إجاباتكم.

تخمير حامض الحليب (حامض اللاكتيك)

على الرغم من أنه لا ينطلق غاز في هذه العملية، إلا أننا نسميها تخميراً أيضاً. في تخمير حامض الحليب، يُستخدم حامض الفيروبيك لاستيعاب الهيدروجين وأثناء التخمير يتحول إلى حامض الحليب (الرسم هـ - 16). حامض الحليب له مذاق حامض ورائحة مميزة. تتم هذه العملية في بكتيريا الحليب ويوجد لها استعمالات كثيرة في إنتاج معلبات (مخللات) الخضروات وفي إنتاج مُنتجات الحليب، مثل: اليوجورت، الجبن واللبن.



الرسم هـ-16: تخمير حامض الحليب

تخمير حامض الحليب في خدمة الإنسان

إحدى طرق الحفاظ على الغذاء هي تحميضه. لذا نضع الغذاء الذي نريد تحميضه (خيار، بندورة، ملفوف، زيتون، باذنجان) في وعاء مغلق ونضيف له ماء وملح. يُنتج الملح ظروف اسموزا تؤدي إلى موت عشارير بكتيريا لا تستطيع أن تعيش في هذا الضغط الأسموزي. أما بكتيريا حامض الحليب الموجودة بشكل طبيعي على قشرة الثمار والخضروات، فإنها تستطيع أن تعيش في الضغط الأسموزي الذي ننتج، ومع مرور الوقت، يزداد تعداد عشارير بكتيريا الحليب. تخمّر بكتيريا حامض الحليب السكريات الموجودة في قشر الثمار أو الخضروات. ناتج عملية التخمير هو حامض الحليب الذي يؤدي إلى انخفاض الـ pH في السائل. يؤدي انخفاض الـ pH إلى احمضاض الخيار وإلى موت كائنات حية دقيقة أخرى، وهكذا يتم الحفاظ على الثمار والخضروات لمدة زمنية طويلة. إضافة إلى ذلك، ونتيجة لانخفاض الـ pH، تموت بكتيريا حامض الحليب أيضاً، وفي النهاية، تتوقف عملية التحميض أيضاً.



سؤال هـ - 15:

- لماذا يؤدي انخفاض الـ pH في عملية التعليب إلى إصابة البكتيريا؟
- ما هو تأثير انخفاض الـ pH على مُنتجات الحليب؟ أعطوا مثلاً.

قصة اكتشاف

لويس باستر في خدمة صناعة النبيذ والغذاء

لويس باستر (1822-1895)، فرنسي الأصل، كيميائي وعالم كائنات حية دقيقة، بحث كائنات حية دقيقة مختلفة، وقد كان ذلك، في إطار محاولاته للإجابة عن السؤال الآتي: هل مصدر الحي من الحي؟ أثناء عمله كباحث، طلب منه أن يساعد في حل مشكلة أصحاب معامل تقطير في منطقة يحضرون فيها مشروبات روحية من شمندر السكر. وقد كانت مشكلتهم أن السائل في براميل التخمير أصبح حامضاً ولم يُنتج كحولاً كنتاج نهائي. فحص لويس باستور السائل الذي كان في البراميل بمساعدة ميكروسكوب، وقد اكتشف كائنات حية دقيقة تشبه العصي بدل الخميرة التي وُجدت عادةً في البراميل

وأدت إلى إنتاج مشروب كحولي (عرفه جيداً من تجاربه السابقة)، وقد خَمَّن لويس أن الكائنات الحية الجديدة هي التي أدت إلى تجميع السائل.

اكتشف باستر أن هذه البكتيريا الموجودة في الحليب أيضاً هي التي تؤدي إلى إحماضه وتلفه. باستر هو الأول الذي أثبت أن عمليات التخمر تتم بواسطة كائنات حية دقيقة. في أبحاث أخرى لعمليات التخمر، وجد باستر أنه في كائنات حية دقيقة مختلفة، تتم عمليات تخمر خاصة، ولكل واحدة منها ناتج خاص.

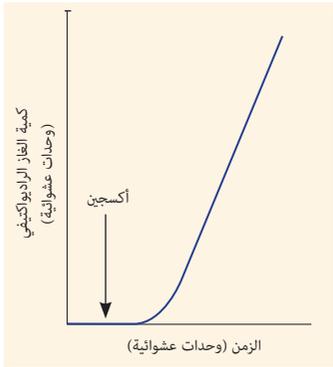
انتبه باستور أيضاً أن عمليات التخمر هي المصدر الوحيد للطاقة في أنواع كائنات حية معينة. كائنات حية مختلفة مثل الخميرة، تستعمل مسارات مختلفة لاستخراج الطاقة وفقاً لظروف البيئة المحيطة، مثل: وجود أو عدم وجود أكسجين.

كان باستور الأول الذي أثبت أن تسخين السوائل المختلفة، مثل: النيذ والحليب، يمنع تطور بكتيريا تؤدي إلى تجميعها. عملية "البسترة" التي تُستخدم لتعقيم المواد الغذائية المختلفة (الحليب، عصائر الثمار، البيرة وغير ذلك) من الكائنات الحية الدقيقة، سُميت على اسم باستور. فيما بعد، انتقل باستور إلى بحث كائنات حية تؤدي إلى أمراض تلوثية في الإنسان وإلى تطوير تطعيمات.

يُنْتَج حامض الحليب، أيضاً، في خلايا عضلات أجسامنا أثناء بذل جهد العضلات. في هذه الحالة، عندما لا تزود وتيرة تدفق الدم أكسجيناً للنشاط المبذول، تَنْتُج في خلايا العضلات ظروف لا هوائية لمدة زمنية قصيرة، وخلال فترة زمنية قصيرة، تُستخرج طاقة دون وجود أكسجين. في هذه الظروف يكون تأكسد الجلوكوز جزئياً واستخراج الـ ATP قليل. إضافة إلى ذلك، يتراكم في الخلايا حامض الحليب الذي يؤدي إلى الشعور في الآلام في العضلة التي تبذل جهداً (انظروا التوسع). ينتقل حامض الحليب، الذي تراكم في العضلات، مع تيار الدم إلى الكبد، حيث يُستعمل هناك لبناء الجلوكوز من جديد. وهو يُستعمل في عضلة القلب لاستخراج الـ ATP. عندما يتجدد تزويد الأكسجين، يتحول حامض الحليب إلى حامض الفيروبيك ويُستغل في دورة كريبس.



سؤال هـ -16:



في تجربة معينة، نُميت خلايا عضلات حيوان في وعاء فيه وسط غذائي يحتوي على الجلوكوز الذي قسم من ذرات كربونه هي ذرات راديواكتيفية مُشعة (C^{14}). في بداية التجربة، كانت ظروف لا هوائية، وبعد مرور مدة زمنية معينة، بدأوا بعملية تزويد الأكسجين. في أعقاب ذلك، بدأ انطلاق غاز راديواكتيفي كما هو موصوف في الرسم الآتية:

أ. ما هي العمليات التي حدثت في الوعاء؟ وما هو الغاز المنبعث؟

ب. ماذا يمكنكم القول عن كمية الجلوكوز الذي استُغل في مرحلة من مراحل التجربة؟ عللوا.

ج. اكتبوا عنواناً للرسم.

سؤال هـ -17:

في عملية التنفس الخلوي الهوائي وفي عملية التخمر، تتم عملية انتقال هيدروجين من الـ NADH. لأي مواد ينتقل الهيدروجين في كل عملية؟

توسع

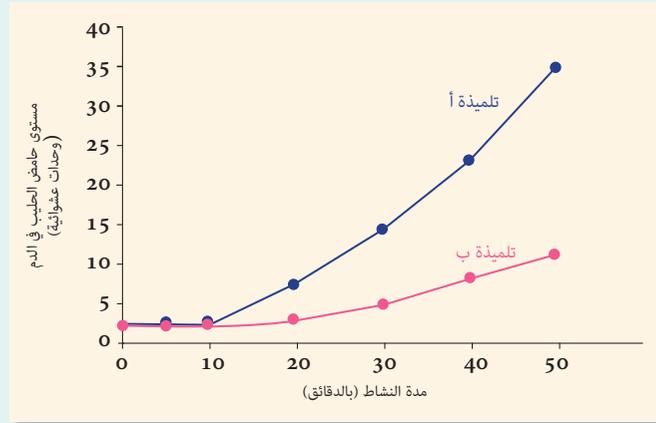
ما هو مصدر الآلام في العضلات الذي نشعره عندما نبذل جهدًا جسمانيًا؟ أثناء الجهد، عندما لا يتم تزويد العضلات الفعالة بكمية كافية من الأكسجين لاستخراج الطاقة في مسار التنفس الخلوي الهوائي، فإن خلايا العضلات تنتقل لاستخراج الطاقة بواسطة التخمر. يتراكم حامض الحليب الذي ينتج في عملية التخمر ويؤدي إلى انخفاض الـ pH. تحفز البيئة المحيطة الحامضية مستقبلات الآلام العصبية الموجودة حول خلايا العضلات وتؤدي هذه العملية إلى الشعور بالآلام في العضلات. نشعر بهذه الآلام عند بذل الجهد الجسماني وبعده بقليل (وهو يختلف عن الآلام الناتجة في أعقاب انقباض العضلات). كلما كانت الحامضية عالية (pH أكثر انخفاضًا)، فإن آلام العضلات تكون عالية. درجة الحامضية متعلقة أيضًا بقدرة العضلات على نقل حامض الحليب إلى الدم. كلما كانت اللياقة البدنية للشخص أعلى، فإن وتيرة نقل حامض الحليب إلى الدم يكون أسرع وأكثر نجاعةً والآلام قليلة.

فكرة مركزية

تنظيم واتزان بدني: أثناء الجهد الجسماني، يتغير مسار استخراج الطاقة في خلايا العضلات وفقًا للظروف.

سؤال هـ -18:

في تجربة معينة، أُجريت مقارنة في مستوى حامض الحليب في دم تلميذتين أثناء إجراء نفس النشاط الرياضي. وُصفت النتائج في الرسم هـ -17.



الرسم هـ -17: تأثير المدة الزمنية للجهد الجسماني على مستوى حامض الحليب في الدم

أ. صفوا الفروق بين نتائج فحص التلميذتين.
ب. أي تلميذة، بحسب رأيكم، لياقتها البدنية أفضل؟ كيف حدّدتم إجاباتكم؟

كما ذكرنا في الفصل الرابع، الكائنات الحية الدقيقة الموجودة في كرش الحيوانات المجترة، تعيش في بيئة محيطية ينقصها أكسجين، وهي تستخرج الطاقة من الجلوكوز خلال عملية التخمر. كما تعرفون، في عملية التخمر لا يتحلل الجلوكوز بشكل كامل، ونواتج تحليل الكائنات الحية الدقيقة هي حوامض دهنية متطايرة، حيث يمكن استخراج طاقة إضافية منها.

تُمتص الحوامض الدهنية عبر جدار الكرش إلى تيار الدم وتُنقل بواسطته إلى خلايا الحيوان المجتر، وهناك تُستعمل مصدر طاقة أساسي في عملية التنفس الخلوي. أثناء عملية التخمر، تُطلق إلى الكرش نواتج مرافقة، مثل: الغازان CH_4 و CO_2 . تتخلص الحيوانات المجترة من الغازات بواسطة الشهيق .

تنفس خلوي لا هوائي

التنفس الخلوي اللا هوائي هو اسم لعملية نادرة لإستخراج الطاقة دون أكسجين. تتم هذه العملية في أنواع بكتيريا تعيش في بيئة محيطة ينقصها أكسجين، مثلا: المستنقعات. كما هو الأمر في التنفس الخلوي الهوائي، تتم العملية بأربعة مراحل: جليكوليزا، أكسدة حامض الفيروبيك، دورة كريبس وفسفرة تأكسد، لكن يوجد عدة فروق كبيرة:

1. المادة التي تستوعب الهيدروجين في النهاية، ليست أكسجينًا، بل مادة غير عضوية أخرى. في قسم من البكتيريا مستوعب النيتروجين هو النترات (NO_3^-)، وفي بكتيريا أخرى السلفات (SO_4^{2-})، وفي قسم آخر من البكتيريا مستوعب الهيدروجين هو CO_2 .
2. الناتج النهائي ليس ماءً وهو يتغير وفقًا لمستوعب الهيدروجين.
3. في عمليات التنفس الخلوي اللاهوائي، تنتج كمية الـ **ATP** بحسب مستوعب الهيدروجين. نحصل من كل جزيء جلوكوز على جزيئين من الـ **ATP** (عدد الجزيئات الناتجة في عمليات التخمر)، لكن أقل من عدد الجزيئات الناتجة في التنفس الخلوي الهوائي.

من هنا واضح التشابه والاختلاف بين عمليات التخمر وبين التنفس الخلوي اللا هوائي.

التشابه: أعدت العمليتان لاستخراج الطاقة دون اشتراك الأكسجين. الاختلاف: مستوعب الهيدروجين الأخير في عمليات التخمر هو مادة عضوية وفي التنفس اللا هوائي هو مادة غير عضوية. عمليات التخمر أقل نجاعة من التنفس الخلوي اللاهوائي. في عمليات التخمر، ينتج الـ **ATP** في عملية الجليكوليزا فقط، أما في التنفس الخلوي اللاهوائي، تنتج جزيئات **ATP** إضافية في دورة كريبس أيضا وفي مرحلة فسفرة التأكسد.

قليل من المعلومات ...

استعمال بكتيريا لا هوائية لتطهير مياه المجاري

في عملية تطهير مياه المجاري، يمكن تحويل المادة العضوية إلى غاز للاستعمال. نُدخل إلى وعاء مغلق مادة عضوية، رسبت في بركة التطهير، نسميها حمأة، ثم نخلقه بإحكام. بعد ذلك، نرفع درجة حرارة الوعاء إلى $55^\circ C$ لعدة ساعات. في هذه الظروف، تعمل بكتيريا لا هوائية قادرة على الصمود وهي تقوم بتنفس خلوي لا هوائي. من بين نواتج العملية، ينتج مخلوط غازات يشتمل على حوالي 60% CH_4 والباقي CO_2 . هذا المخلوط من الغازات نسميه "بيوغاز"، حيث يمكن استعماله كمصدر طاقة لتدفئة البيوت، للطهي ولتحريك السيارات. تُستعمل المياه المطهرة لري مزروعات زراعية معينة (ولا تُستعمل للشرب).

سؤال ه-19:

تتم عملية استخراج البيوغاز في أوعية مُحكمة الاغلاق. ما هو السبب لذلك؟

سؤال ه-20:

من المعروف أن سرعة التفاعلات الكيميائية تزداد مع ارتفاع درجة الحرارة. هل من الأفضل تسخين الحاويات إلى درجة حرارة $100^\circ C$ لتقصير زمن العملية؟

في عملية التنفس الخلوي الهوائي (الذي يشتمل على الجليكوليزا)، ومرافقة تحليل وأكسدة الجلوكوز حتى ثاني أكسيد الكربون، يُنتج حوالي 30 جزيء ATP من كل جزيء جلوكوز. في عملية التخمر، يتم بناء جزيئين من الـ ATP فقط، المستخرجة في عملية الجليكوليزا. يوجد لنواتج التخمر (مثل: حامض الحليب والإيثانول) ولنواتج التنفس الخلوي اللا هوائي (مثل الميثان) مستوى طاقة عالٍ، لكنها تُفرز من الخلية دون أن تُستغل الطاقة الكامنة الموجودة فيها. ولهذا السبب يشتعل الكحول والبيوغاز ويمكن استعمالها كمصادر طاقة في الصناعة.

سؤال هـ-21:



لتلخيص عمليات استخراج الطاقة في الخلايا (تنفس خلوي هوائي، تخمر كحولي، تخمر حامض الحليب وتنفس لا هوائي)، ابنوا جدولاً واكتبوا لكل عبارة من العبارات الآتية ما إذا هي صحيحة أو غير صحيحة.

- تتم في الكائنات الحية اللا هوائية فقط.
 - تتم في الكائنات الحية فقط.
 - تتم بوجود أكسجين فقط.
 - تتم في السيتوبلازم فقط.
 - تتم في السيتوبلازم والميتوكوندريا.
 - يُنتج CO_2 في العملية.
 - يُنتج ماء في العملية.
- درجوا العمليات بحسب كمية الطاقة المستخرجة من كل جزيء جلوكوز.

هـ.5. عملية التركيب الضوئي هي ليست عملية تنفس عند النبات

يلخبط قسم من الناس بين حدوث عمليتين في النباتات: عملية التركيب الضوئي والتنفس الخلوي. هناك من يدعي أن "التركيب الضوئي هو تنفس النباتات". يقول آخرون: "يتنفس النبات في الليل وفي النهار يقوم بعملية التركيب الضوئي" (وبحسب ادعائهم، يجب أن نُخرج في الليل النباتات من غرف النوم، لأنها "تستغل" الأكسجين خلال عملية التنفس، وهكذا تؤدي إلى ارتفاع ثاني أكسيد الكربون في الغرفة).

هل ادعاهم صحيح؟

قبل الإجابة عن ذلك، نلخص باختصار المعلومات التي نعرفها عن هاتين العمليتين في النبات.

النبات كسائر الكائنات الحية الأخرى، يتنفس تنفساً خلويّاً بشكل متواصل في كل ساعات اليوم، وهو يستوعب الأكسجين من البيئة المحيطة ويُطلق ثاني أكسيد الكربون إلى البيئة المحيطة. أما في الأقسام الخضراء في النبات، تتم عملية التركيب الضوئي في ساعات الإضاءة، حيث يستوعب النبات، في هذه العملية، ثاني أكسيد الكربون ويُطلق أكسجين. يُنتج من ذلك أنه في خلايا النبات (في الأقسام الخضراء)، تحدث في حالة الإضاءة عمليتان - عملية التنفس الخلوي وعملية التركيب الضوئي، أم في الليل تتم عملية التنفس الخلوي فقط. يعرض الجدول 2 مقارنة بين العمليتين.

جدول هـ - 2: مقارنة بين عملية التركيب الضوئي وبين عملية التنفس

مميزات المقارنة	التركيب الضوئي	التنفس الخلوي الهوائي
ماهية العملية	بناء مادة عضوية من مادة غير عضوية من خلال استغلال طاقة ضوئية.	تحليل مادة عضوية إلى مواد غير عضوية من خلال استخراج الطاقة.
مادة المصدر	CO ₂ وماء.	عادةً كربوهيدرات (جلوكوز) وأكسجين.
النواتج	كربوهيدرات وأكسجين.	CO ₂ وماء.
مكان الحدوث	كلوروبلاستيدات.	الستوبلازم والميتوكوندريا.
زمن الحدوث	بوجود ضوء فقط (في ساعات النهار).	في النهار والليل أيضًا.
انتقال الطاقة في العملية	تتحول طاقة الضوء التي يستوعبها النبات إلى طاقة كيميائية.	تتحول الطاقة الكيميائية (من الجلوكوز) إلى طاقة كيميائية في الـ ATP ويتحول قسمًا منها إلى حرارة.

يعرض الجدول فروق كثيرة بين عملية التركيب الضوئي وبين عملية التنفس. كما يوجد فروق إضافية تبرز أن هاتين العمليتين مختلفتين بتاتا: يتم تنشيط العمليتين بوساطة إنزيمات مختلفة، المراحل الوسيطة مختلفة في العمليتين وتختلف العوامل التي تؤثر عليها. للتلخيص، يجب علينا التذكر أن عملية التركيب الضوئي هي عملية تغذية النبات وليست عملية تنفسه.

وماذا بالنسبة لفكرة إخراج الأزهار من الغرفة في الليل؟!؟

لا تتم عملية التركيب الضوئي في الظلام، لذا لا تُطلق النباتات أكسجين في الليل. أما عملية التنفس فهي تتم في النهار والليل وهذا يعني أن النبات يستهلك أكسجين ويطلق CO₂. لكن كمية الأكسجين التي يستهلكها النبات في عملية التنفس تكون منخفضة نسبةً لكمية الأكسجين الموجودة في هواء الغرفة وأيضًا مساهمة الأزهار لتكيز CO₂ في الغرفة تكون منخفضة نسبيًا. أما إذا وُجد شخص في الغرفة، فإنه يستهلك كمية أكسجين أكثر من الأزهار ويساهم في ارتفاع كمية الـ CO₂ في الغرفة أكثر من الأزهار أيضًا، لذا من الأفضل إخراج هذا الشخص
نسبة التنفس الخلوي ووتيرة العملية الأيضية في النبات أقل من الإنسان، لأنه لا توجد في النبات حركة كبيرة، لا يوجد تنظيم لدرجة الحرارة، لا يوجد هضم وبذل الجهد في النقل قليل.

سؤال هـ -22:

- أ. في أي خلايا من خلايا النبات، وفي أي ظروف تتم عملية التركيب الضوئي وعملية التنفس الخلوي الهوائي أيضًا؟
ب. في أي ظروف تتم في خلايا النبات إحدى العمليتين فقط؟ اشرحوا.

سؤال هـ -23:

وُضع نبات في الضوء لعدة ثوان، وقد زُوّد بثاني أكسيد كربون راديوأكتيفي (له نشاط إشعاعي)، ونُقل مباشرةً إلى بيئة محيطة منعزلة مضاءة فيها ثاني أكسيد كربون غير راديوأكتيفي. بعد مرور عدة أيام، فُحص الهواء الموجود في البيئة المحيطة للنبات، ووجدوا أنه يحتوي على ثاني أكسيد كربون راديوأكتيفي. ما هي العمليات المعروضة بهذه التجربة؟ اشرحوا ادعاءاتكم.

سؤال هـ -24:

ادعى أحد التلاميذ أن عملية التركيب الضوئي وعملية التنفس هما عمليتان متعاكستان. ماذا تجيبون هذا التلميذ؟ علّلوا ادعاءاتكم.

نافذة البحث



تجسّد التجربة الآتية العلاقات بين عملية التنفس الخلوي وعملية التركيب الضوئي اللتين تحدثان في النبات وبين عملية التنفس التي تحدث في الحيوان. فُحص في التجربة وجود CO_2 في بيئة محيطية مائية فيها كائنات حية مختلفة (نباتات وحيوانات). أجريت التجربة في 8 أنابيب فيها كميات ماء متساوية وكاشف يغيّر لونه في وجود CO_2 . يغيّر الكاشف لونه عندما ينخفض الـ pH في البيئة المحيطة المائية. المستوى الحامضي موجود بنسبة طردية مع كمية الـ CO_2 في المحلول المائي (كلما انبعث أكثر CO_2 ، يَنْتُج حامض الكربونيك بكمية أكبر، لذا ينخفض الـ pH). لون أزرق — لا يوجد CO_2 (بيئة محيطية متعادلة). لون أحمر — كمية قليلة من الـ CO_2 (بيئة محيطية حامضية). لون أصفر — كمية كثيرة من الـ CO_2 (بيئة محيطية حامضية جداً). فُحص لون السائل في الأنابيب بعد حوالي ساعتين. يلخص الجدول هـ - 3 نتائج التجربة.

جدول هـ-3: تأثير عمليتي التنفس والتركيب الضوئي على كمية CO_2 في أنابيب تحتوي على كائنات حية مختلفة

رقم الأنبوبة	وُضعت في:	المحتوى	اللون في بداية التجربة	اللون في نهاية التجربة	تغيّر في كمية الـ CO_2 أثناء التجربة
1	الضوء	ماء	أزرق	أزرق	بقي نفس الشيء
2	الضوء	ماء+حلزونات	أزرق	أصفر	ارتفع
3	الضوء	ماء+حلزونات+طحالب	أزرق	أحمر	
4	الضوء	ماء+طحالب	أزرق	أزرق	
5	الظلام	ماء	أزرق	أزرق	
6	الظلام	ماء+حلزونات	أزرق	أصفر	
7	الظلام	ماء+حلزونات+طحالب	أزرق	أصفر	
8	الظلام	ماء+طحالب	أزرق	أصفر	

سؤال هـ -25:



- أ. في العمود المناسب في جدول هـ - 3، اذكروا التغيّر الذي طرأ في كمية الـ CO_2 خلال التجربة (ارتفعت الكمية/انخفضت/بقيت نفس الشيء) وفقاً لتغيّرات لون الكاشف.
- ب. قارنوا بين نتائج مجموعات الأنابيب الآتية، ثم اشرحوا التغيّر الذي طرأ في كمية الـ CO_2 من خلال التطرق إلى العمليات التي حدثت (تنفس خلوي، تركيب ضوئي):
- في الأنابيب 2، 3 و 4؟
 - في الأنبوب 4 بالمقارنة مع الأنبوب رقم 8؟
 - في الأنبوب 3 بالمقارنة مع الأنبوب رقم 7؟
- ج. لماذا شملت التجربة الأنبوبين 1 و 5؟ اشرحوا.
- د. ما هي العوامل التي يجب أن نحافظ عليها ثابتة في التجربة، لكي تكون مصداقية للنتائج؟
- هـ. هل التجربة الموصوفة هي تجربة نوعية (كيفية) أم كمية؟ لماذا؟

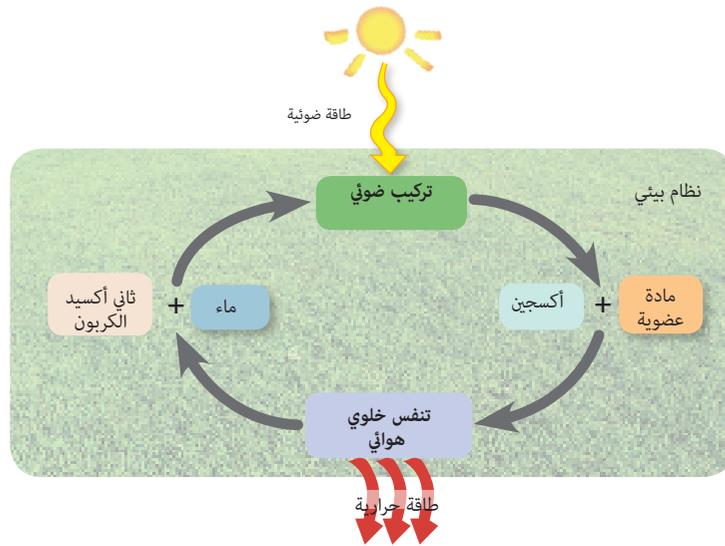
عملية التركيب الضوئي والتنفس في المستوى البيئي

في مستوى النظام البيئي (الرسمه هـ - 18)، عملية التركيب الضوئي والتنفس الخلوي هما عمليتان مركزيتان في دورات ومدورة المواد وفي انتقال الطاقة في الطبيعة. المواد التي تشترك فيها - الأكسجين، الهيدروجين والكربون، وهي تنتقل في دائرة مغلقة عبر كائنات حية متعلقة ببعضها في الشبكة الغذائية.

يوجد علاقة وطيدة بين المواد التي تنتقل في الدورة: المواد التي تنتج في عملية التركيب الضوئي هي مواد خام لعملية التنفس الخلوي، أما المواد التي تُطلق في التنفس الخلوي هي مواد خام لعملية التركيب الضوئي. من ناحية الطاقة، لا توجد دورة، بل يوجد استيعاب وخسارة مستمرة للطاقة. يستمر النظام في الحياة بفضل تدفق الطاقة المستمر إليه. تستوعب النباتات الطاقة الضوئية التي تصلها وتحولها إلى طاقة كيميائية، حيث تنتقل بين الكائنات الحية في الشبكة الغذائية وتستهلكها. ويتحول قسم منها إلى طاقة حرارية تنبعث من النظام دون استغلال.

علاقة بموضوع

علم البيئة:
الغلاف الحيوي هو نظام بيئي مغلق للمواد ومفتوح للطاقة.



الرسمه هـ - 18: تنفس خلوي هوائي وعملية التركيب الضوئي من وجهة نظر النظام البيئي.

المواضيع الأساسية في الفصل

- في عملية التنفس الخلوي، تستخرج جميع الكائنات الحية طاقة كيميائية متوافرة لاحتياجاتها بواسطة تأكسد مواد عضوية.
- قسم من الطاقة المنبعثة من تحليل وتأكسد نواتج الهضم، يُستغل لإنتاج الـ ATP الذي يُتيح حدوث عمليات تستهلك طاقة في الخلايا. أما باقي الطاقة، فهي تتحول إلى طاقة حرارية.
- فيما يلي أمثلة لعمليات تستهلك طاقة: تنشيط مواد بسيطة لبناء مواد معقدة، نقل مواد عكس منحدر التراكيز، انقباض عضلات.
- تُستخرج الطاقة في الخلايا بأحد المسارين: باشتراك أكسجين ودون اشتراك أكسجين. المرحلة الأولى في المسارين متماثلة وهي الجليكوليزا.
- في ظروف هوائية، تتم عملية التنفس الخلوي الهوائي التي تشتمل أربع مراحل: جليكوليزا، أكسدة حامض الفيرويك، دورة كريبس وفسفرة تأكسد. تتم الجليكوليزا وأكسدة حامض الفيرويك في السيتوبلازم. تحدث دورة كريبس في القسم الداخلي في الميتوكوندريا، وفسفرة التأكسد على الغشاء الداخلي للميتوكوندريا.

- تقسيم الميتوكوندريا إلى أقسام والطيات الكثيرة على الغشاء الداخلي لها، هو مثال للملاءمة بين المبنى والأداء. وأيضًا عدد الميتوكوندريا ومكانها في الخلايا المختلفة ملائم لأداء نفس الخلايا.
- في عملية الجليكوليزا، يتحلل جزيء جلوكوز (6 كربونات) إلى جزيئين لحامض الفيروبيك (3 كربونات). ينتقل هيدروجين من الجلوكوز إلى حاملات الهيدروجين ويُنْتَجُ جزيئات ATP.
- عند تأكسد حامض الفيروبيك، يتحلل حامض الفيروبيك إلى CO_2 وأسيئات. يرتبط الأسيئات بكواينزيم A ويُنْتَجُ أستيل كواينزيم A الذي يدخل الميتوكوندريا.
- في دورة كريبس، يَنْتُجُ أستيل كواينزيم A، يرتبط أستيل كواينزيم A بجزيء مكون من 4 كربونات ويُنْتَجُ حامض الليمون. يمر الهيكل الكربوني لحامض الليمون في دورة كريبس تَعْبُرَات خلالها ينتقل هيدروجين إلى حاملات الهيدروجين ويُنَى جزيء ATP من كل جزيء حامض فيروبيك. يعود الهيكل الكربوني ليصبح 4 كربونات وهو مستعد لدورة إضافية.
- في عملية فسفرة التأكسد، ينتقل الهيدروجين من حاملات الهيدروجين إلى سلسلة ناقلات موجودة في الميتوكوندريا. المادة النهائية التي تستوعب الهيدروجين هي أكسجين. تُسْتَغَل الطاقة المنبعثة أثناء الانتقال لبناء جزيئات الـ ATP. عدد جزيئات الـ ATP الناتجة من تأكسد كامل لجزيء جلوكوز حوالي 30.
- في المسار الذي لا يشترك فيه أكسجين، يتم استخراج الطاقة في إحدى العمليتين: تخمر وتنفس خلوي لا هوائي.
- عمليتا التخمر الأساسيتان هما: تخمر كحولي وتخمر حامض الحليب. في الحالتين، تأكسد الجلوكوز غير كامل.
- في عملية التخمر، يَنْتُجُ جزيئات ATP من كل جزيء جلوكوز. وهما ينتجان في مرحلة الجليكوليزا.
- عملية التنفس الخلوي اللاهوائي هي عملية نادرة نسبيًا. تشتمل العملية على مراحل تشبه تلك العمليات التي تحدث في التنفس الخلوي الهوائي. الفرق الأساسي بين العمليتين أن مستوعب الهيدروجين النهائي ليس أكسجينًا، بل مادة غير عضوية أخرى (CO_2, SO_4^{-2}, NO_3^-). عدد جزيئات الـ ATP الناتجة في العملية متعلق بمستوعب الهيدروجين النهائي. استخراج الطاقة في التنفس الخلوي اللاهوائي أقل نجاعة من التنفس الخوي الهوائي.
- تقوم النباتات بعملية التنفس الخلوي الهوائي بشكل متواصل خلال كل ساعات اليوم.

مصطلحات مهمة في الفصل



ATP	أكسجين
بناء مواد	ميتوكوندريا
جليكوليزا	دورة كريبس
تحويل طاقة	حامل هيدروجين (NAD)
نقل فعّال	تنفس خلوي
استخراج طاقة	تنفس خلوي هوائي
انقباض عضلات	تنفس خلوي لا هوائي
حامض الفيروبيك	عملية ترافق
تبادل غازات	عمليات تخمر
تأكسد	عمليات تستهلك طاقة (عمليات بيوطاقة)