



## آلية انتاج الطاقة داخل خلايا الكائنات الحية

دراسة في الكيمياء العضوية للعمليات الايضية

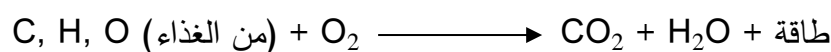


إعداد طالبة الدكتوراه

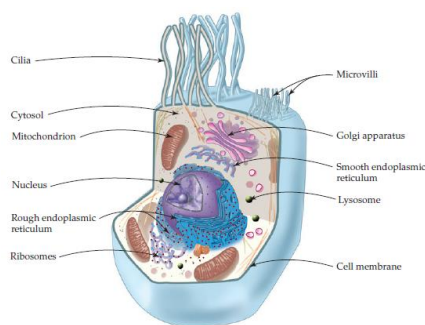
وفا، نصيف جاسم - كلية العلوم / قسم الكيمياء

## مقدمة

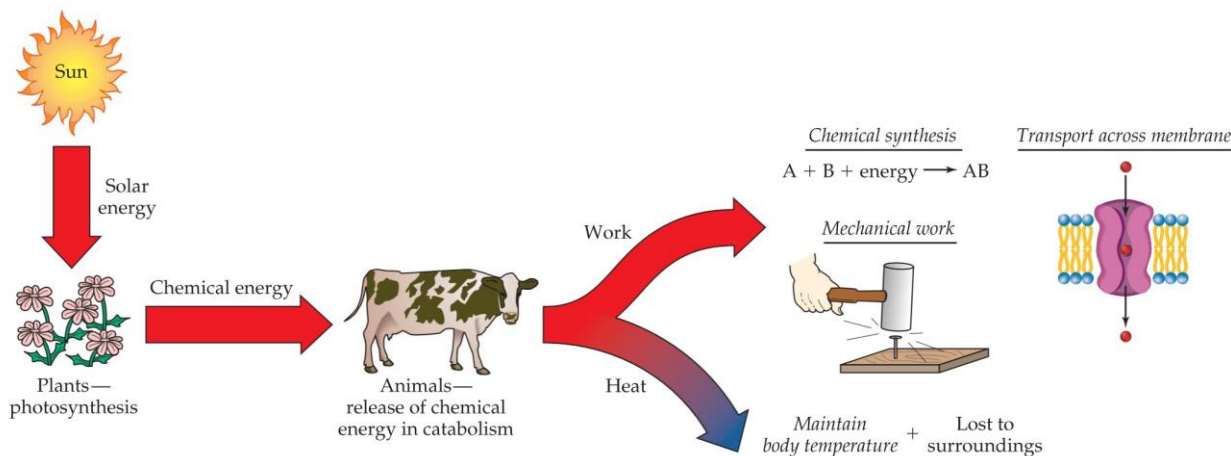
تحصل جميع الكائنات الحية على الطاقة من محيطها للبقاء على قيد الحياة. في الحيوانات يتم الحصول على الطاقة من الغذاء ويتم إطلاقها من خلال التمثيل الغذائي (الأيض). العملية الرئيسية للحصول على الطاقة من الغذاء هي أكسدة المركبات الحيوية والمكوّنة بصورة رئيسية من الكربون، الهيدروجين والاكسجين والنواتج النهائية لهذه العمليات هي ثنائي أكسيد الكربون، الماء والطاقة:



تختلف جزيئات الطعام الرئيسية -الدهون، البروتينات والكربوهيدرات- في البنية التركيبية وكل صنف من هذه الجزيئات يدخل مسارات أيضية مختلفة عن الآخر ولكن الناتج الرئيسي بصورة عامة لهذه المسارات هو استئيل-مساعد الانزيم A والذي بدوره يُنتج الطاقة اللازمة للخلية.



مخطط (1): خلية حقيقية النواة



مخطط (2): مسارات الطاقة في الغلاف الحيوي، الشمس هي المصدر الرئيسي للطاقة إذ يتم تخزينها داخل الاواصر الكيميائية.

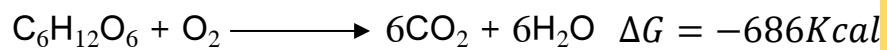
## التفاعلات الكيموحيوية المنتجة للطاقة

التفاعلات الرئيسية في اجسام الكائنات الحية تكون على نوعين، إما منتجة للطاقة او مستهلكة لها. ولكي يكون التفاعل امامي وتلقائي فإنه سيعتمد على الطاقة (المنتجة او المستهلكة) على شكل حرارة (التغير في الانثاليبي  $\Delta H$ ) وعلى العشوائية (التغير في الانتروبي  $\Delta S$ ) المتسبب بها التفاعل. والمحصلة النهائية لهذين المتغيرين هو التغير في الطاقة الحرة  $(\Delta G = \Delta H - T\Delta S)$ .

ان التفاعلات التي تحصل في الخلية الحية لا تختلف عن تلك التي تحدث في المختبر، كلاهما يتبع نفس القوانين وله نفس متطلبات الطاقة. لكن الخلية تفضل التفاعلات التلقائية والمنتجة للطاقة.

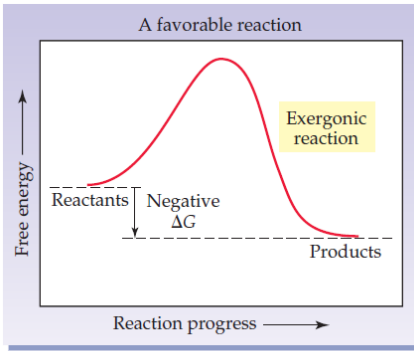
كما موضح في المخطط (3) فإن التفاعلات المفضلة داخل الخلية هي تلك التي تكون طاقة نواتجها اقل من طاقة المتفاعلات حيث تكون النواتج اكثر استقراراً من المتفاعلات وتكون محصلة الطاقة الحرة ذات قيمة سالبة.

تفاعلات الاكسدة -على سبيل المثال- تكون نواتجها أكثر استقراراً وأقل طاقة من المتفاعلات، لذلك فهي تفاعلات مفضلة داخل الخلايا ومنتجة للطاقة حيث المول الواحد من الكلوكوز ينتج طاقة مقدارها 686Kcal من الطاقة الحرة لكل مول منه:

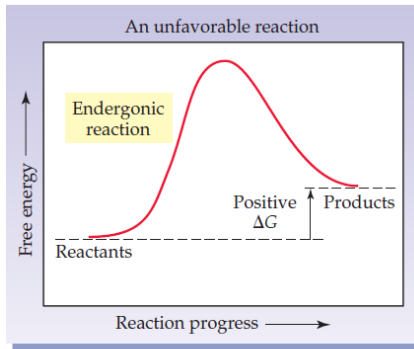


حيث كلما كانت كمية الطاقة المتحررة اكبر، كلما ازدادت سرعة التفاعل الى الامام قبل الوصول الى حالة الاتزان.

ان التفاعلات غير المفضلة تحدث في الخلية بصورة اقل من تلك المفضلة والمنتجة للطاقة لكنها تحتاج الى مصدر طاقة خارجي يغذيها كي تستمر كونها مستهلكة للطاقة. وتكون قيمة الطاقة الحرة لها موجبة.



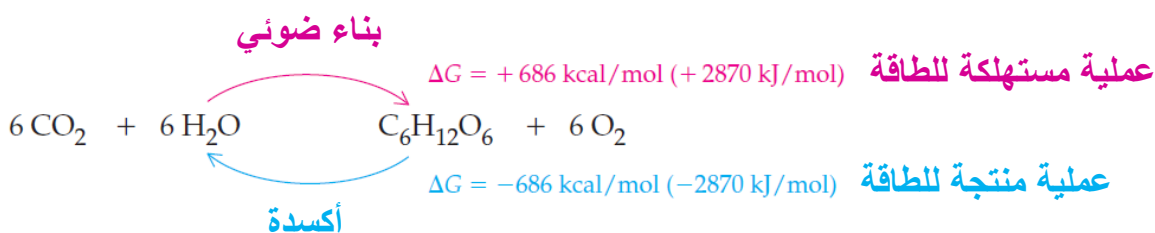
(a)



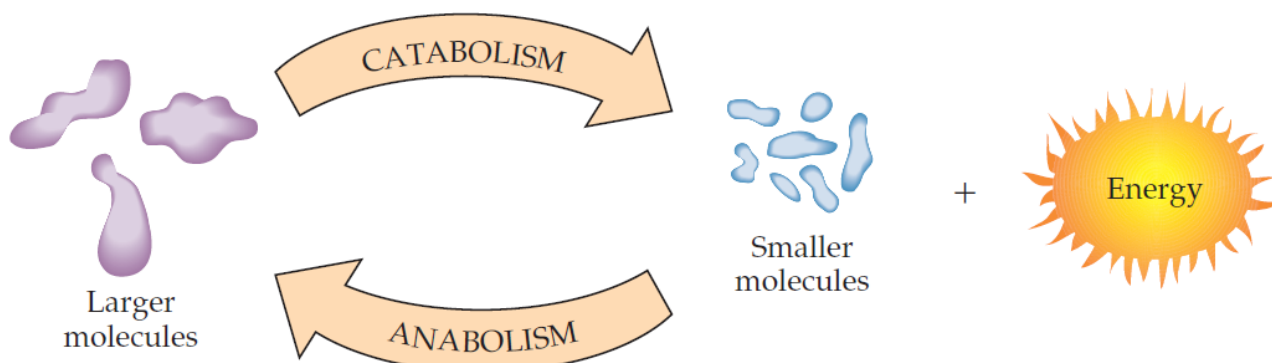
(b)

مخطط (2): التفاعلات المفضلة (a) حيث النواتج اقل طاقة من المتفاعلات والتفاعلات غير المفضلة (b) حيث النواتج اعلی طاقة من المتفاعلات (داخل الخلية).

إن الطاقة الحرة (وكذلك انثالبي التفاعل) عند عكس التفاعل تبقى قيمتها ثابتة رقماً فقط تتغير إشارة القيمة. مثل عملية البناء الضوئي والتي يتحول فيها ثنائي أكسيد الكربون والماء الى كلوكوز وأوكسجين وهي عملية عكسية لأكسدة الكلوكوز لذلك تكون الطاقة الحرة لها قيمة موجبة كون التفاعل غير تلقائي ويحتاج الى كمية من الطاقة والتي بطبيعة الحال يتم توفيرها عن طريق ضوء الشمس.



بشكل عام ان العمليات المستهلكة للطاقة تعمل على بناء جزيئات كبيرة من جزيئات اصغر منها وتسمى بعمليات البناء (ANABOLISM)، وعلى العكس فإن العمليات المنتجة للطاقة تعمل على هدم الجزيئات الكبيرة وإنتاج جزيئات اصغر حجماً وتسمى بعمليات الهدم (CATABOLISM).



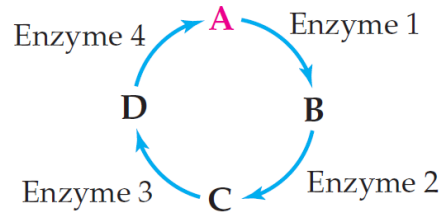
مخطط (3): مساري الهدم والبناء داخل الخلايا الحية.

## نظرة عامة على التمثيل الغذائي وإنتاج الطاقة

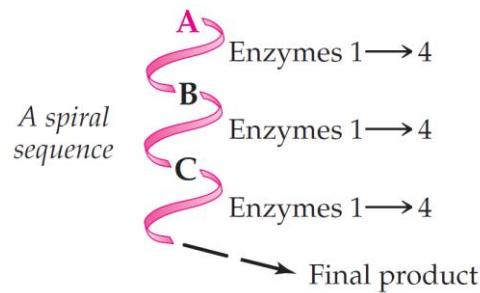
جميع التفاعلات التي تحدث في خلايا الكائنات الحية يطلق عليها اسم العمليات الأيضية (التمثيل الغذائي metabolism). سواء كانت عمليات هدم أو بناء من خلال مسارات أيضية. إن هذه المسارات تكون على ثلاثة أنواع، إما أن تكون خطية (أي أن المسار يبدأ بمادة واحدة فقط ولا يمكن تصنيع هذه المادة خلال نفس المسار):



أو دائرية (سلسلة تفاعلات تؤدي إلى تكوين المادة الأولية التي بدأ منها التفاعل):

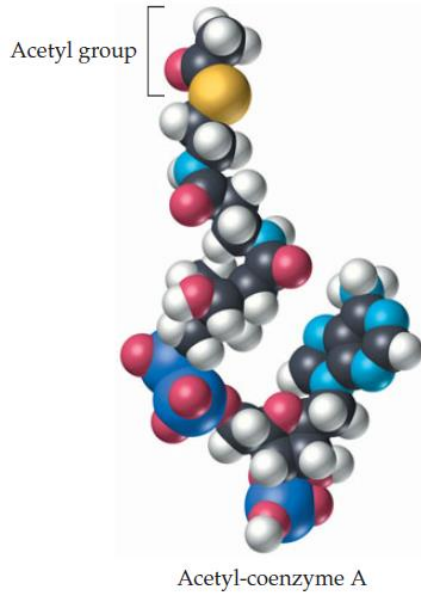


أو حلزونية (أي إنزيم وخلال أي مرحلة من مراحل التفاعل قد يهدم المادة الأولية أو الوسيطة ويُنتج المادة النهائية أو المادة التي تليها في المسار):



إن الصورة العامة للهضم والهدم وإنتاج الطاقة بسيطة:

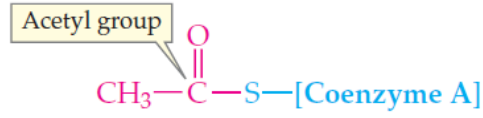
الأكل يوفر الوقود، التنفس يوفر الأوكسجين، وخلايا الجسم تؤكسد الوقود لإنتاج الطاقة. ويمكن تقسيم هذه العملية بصورة تقريبية إلى أربعة مراحل يوضحها المخطط (5).



مخطط (4): استيل - مساعد الإنزيم A

**المرحلة الأولى:** تعمل إنزيمات الهضم في اللعاب والمعدة والأمعاء الدقيقة على تحويل الجزيئات الكبيرة من الكربوهيدرات والبروتينات والدهون الى جزيئات اصغر. حيث الكربوهيدرات يتم تكسيدها الى كوكوز وجزيئات سكرية اصغر حجماً. والبروتينات الى احماض امينية والكلسيرول الثلاثي والمعروف باسم الدهون او الزيوت يتم هدمه الى الكليسرين وأحماض كربوكسيلية طويلة السلسلة. حيث يتم نقل هذه المواد الى الدم الذي بدوره ينقلها الى خلايا الجسم المختلفة.

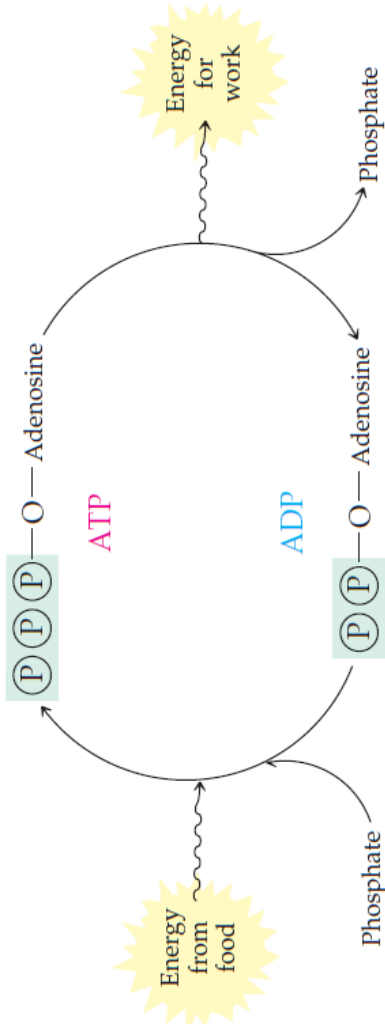
**المرحلة الثانية:** يقوم مساعد الانزيم A بالاتحاد مع مجموعة الاستيل عن طريق الارتباط بواسطة آصرة تتشأ بين ذرة كبريت مساعد الانزيم مع كربونيل مجموعة الاستيل ليكون استيل-مساعد الانزيم A:



وهذا المركب هو وسطي يعمل على تكسير جميع أنواع الجزيئات وكل جزيئة يُدخلها بمسار خاص بها.

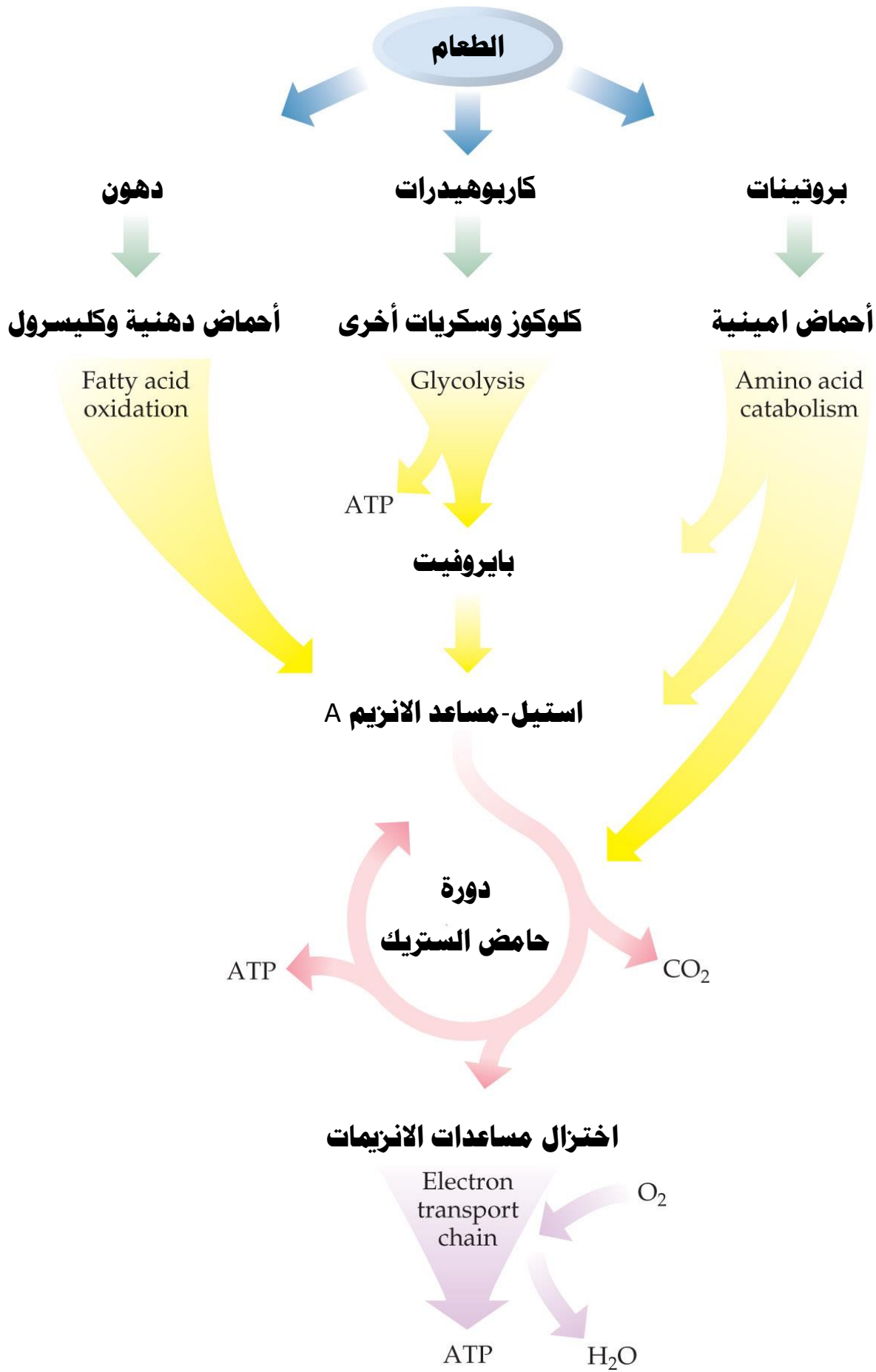
**المرحلة الثالثة:** دورة حامض الستريك، وتحدث داخل الماييتوكوندريا حيث ان ذرة كربون مجموعة الاستيل يتم اكسدها الى ثنائي أوكسيد الكربون والتي تتخلص منه الخلية اثناء عملية الزفير. معظم الطاقة المتحررة خلال هذه المرحلة تخرج من دورة حامض الستريك وتُخزن في أواصر كيميائية في مركبات (NADH, FADH<sub>2</sub>) وخلال هذه المرحلة يُنتج كميات صغيرة الطاقة يتم تخزينه في اواصر الكيميائية أخرى على شكل مركب ادينوسين ثلاثي الفوسفات (ATP).

**المرحلة الرابعة:** وهي مرحلة تصنيع الطاقة على شكل جزيئات (ATP) حيث ان الالكترونات المتحررة من عملية اختزال مساعدات الانزيم تمر من جزيئة الى أخرى عبر سلسلة طويلة من المركبات وتُنتج المزيد من (ATP) وفي النهاية تتحد مع ايون الهيدروجين الناتج والاكسجين الداخل عن طريق التنفس ليكون جزيء الماء. ويوضح المخطط (6) هذه المراحل.



مخطط (5): مراحل تحويل الطعام الى طاقة داخل الجسم.



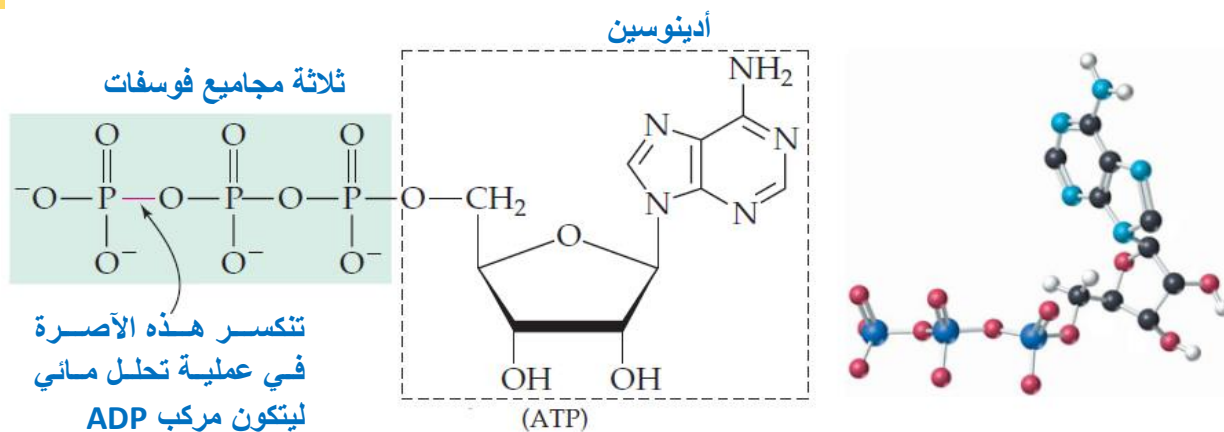


مخطط (6): مسارات هضم الطعام وإنتاج الطاقة

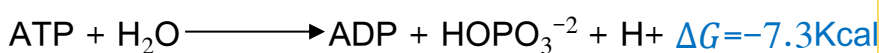
## مركب ATP وإنتاج الطاقة

الآن بعد ان حصلنا على مركب ATP، ما الذي يعنيه هذا الامر؟ وكيف يتحول هذا المركب الى طاقة داخل الجسم؟

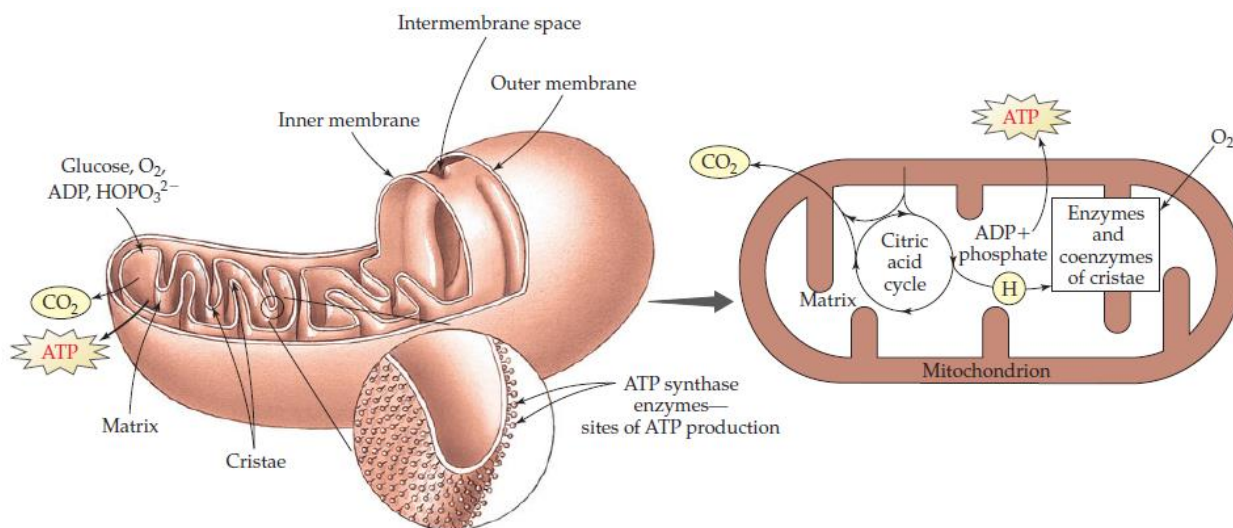
للجواب على هذا السؤال، لا بد من معرفة تركيب هذا الجزيء. حيث يحتوي هذا المركب على ثلاثة مجاميع فوسفات ( $PO_3$ ):



ان إزالة مجموعة فوسفات واحدة بواسطة عملية التحلل المائي (Hydrolysis) من الـ ATP تُحوّله الى الـ ADP وهذه العملية مُنتجة للطاقة:



جميع هذه العمليات المشار اليها سابقاً تحدث داخل بيوت الطاقة (Mitochondria) حسب المخطط (7):



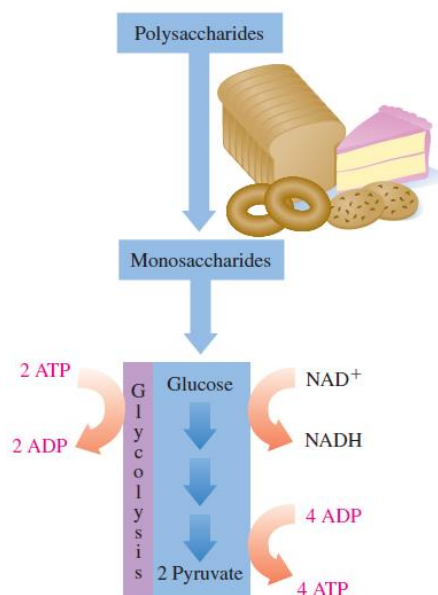
مخطط (7): عمليات الهدم وإنتاج الطاقة داخل الميتوكوندريا



## بعض الميكانيكيات المتعلقة بمسارات انتاج الطاقة

أولاً: ميكانيكية اكسدة الكحول بواسطة مركب  $NAD^+$ 

تحدث التفاعلات داخل الخلايا الحية بمساعدة الإنزيمات، وهي عوامل مساعدة تجعل التفاعل اكثر كفاءة وأقل وقتاً. ومن هذه التفاعلات هو تفاعل اكسدة الكحول الذي يتم بمساعدة مركب  $NAD^+$  وتتم هذه العملية بأربع خطوات:

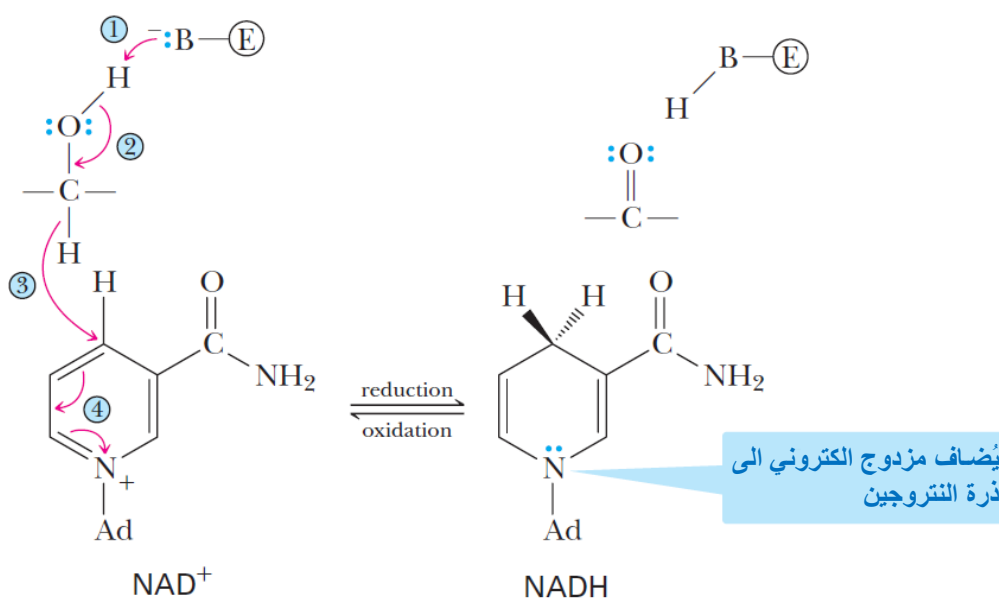


**الخطوة 1:** القاعدة الموجودة على سطح الانزيم ( $B:$ ) تعمل على سحب البروتون من مجموعة الهيدروكسيل للكحول.

**الخطوة 2:** المزدوج الالكتروني المتخلف نتيجة سحب البروتون يعمل على تكوين آصرة باي  $\pi$  بين ذرتي الاوكسجين والكاربون.

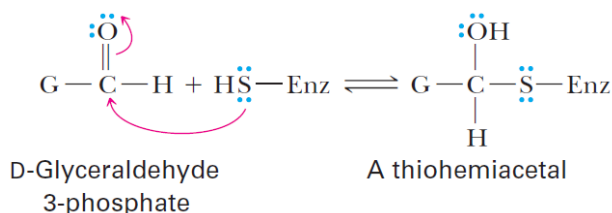
**الخطوة 3:** انتقال ايون هيدريد من الكاربون الى  $NAD^+$  لتكوين آصرة جديدة (C-H).

**الخطوة 4:** انتقال مزدوج الكتروني داخل الحلقة الى الاوربيتال الفارغ في ذرة النتروجين.

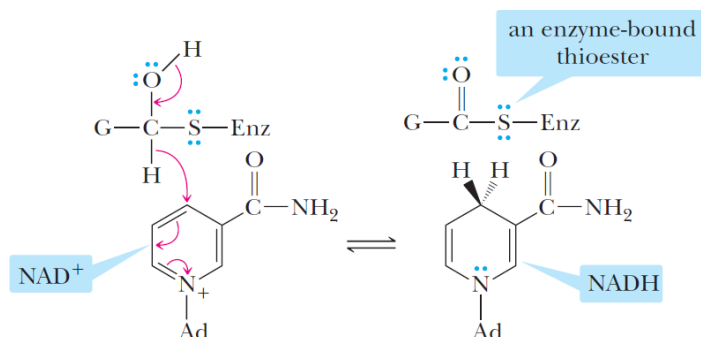


ثانياً: ميكانيكية أكسدة D-كليسرالديهيد-3-فوسفات الى 3،1-بس فوسفوكليسريت

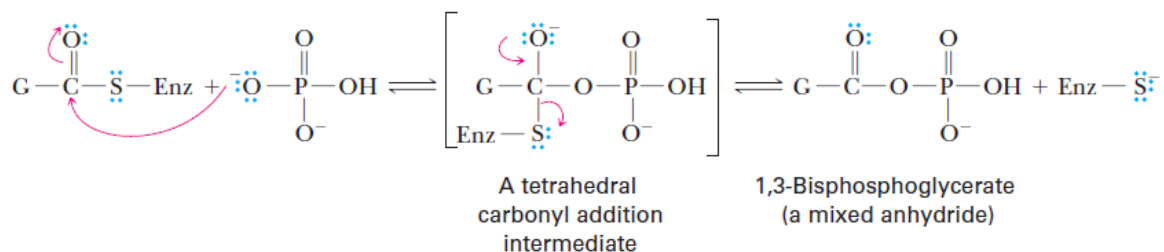
الخطوة 1: التفاعل بين D-كليسرالديهيد-3-فوسفات ومجموعة السلفوهيدريل الانزيم ليعطي ثايوهيمي اسيتال:

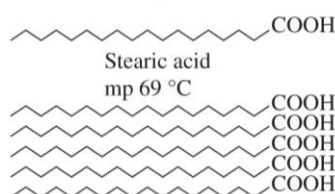
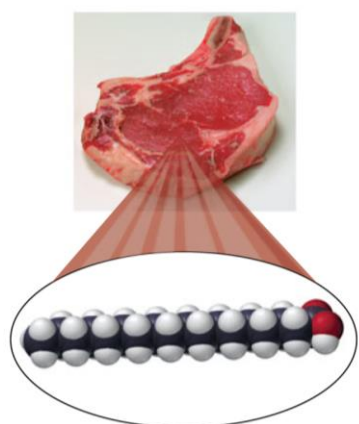


الخطوة 2: أكسدة ناتج الخطوة الأولى بواسطة نقل ايون هيدريد من الثايوهيمي اسيتال الى  $\text{NAD}^+$ :



الخطوة 3: تفاعل الثايو استر مع ايون الفوسفين ليعطي وسطي الكربون رباعي السطوح والذي بدوره سيتفكك ليعطي مزيج من انهيدريد حامض الفسفوريك وحامض الكلسريك:





ثالثاً: ميكانيكية تكاثف كلايزن الانعكاسي (أكسدة بيتا) للأحماض الدهنية

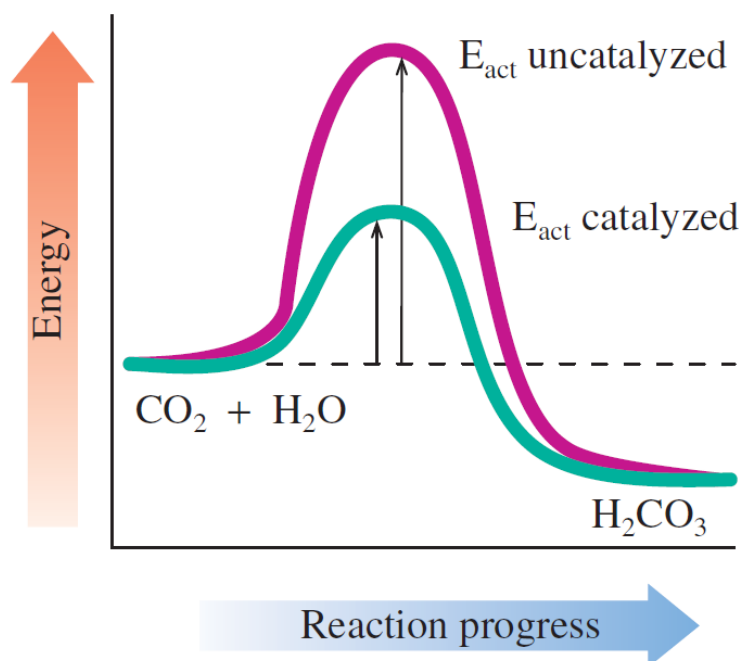
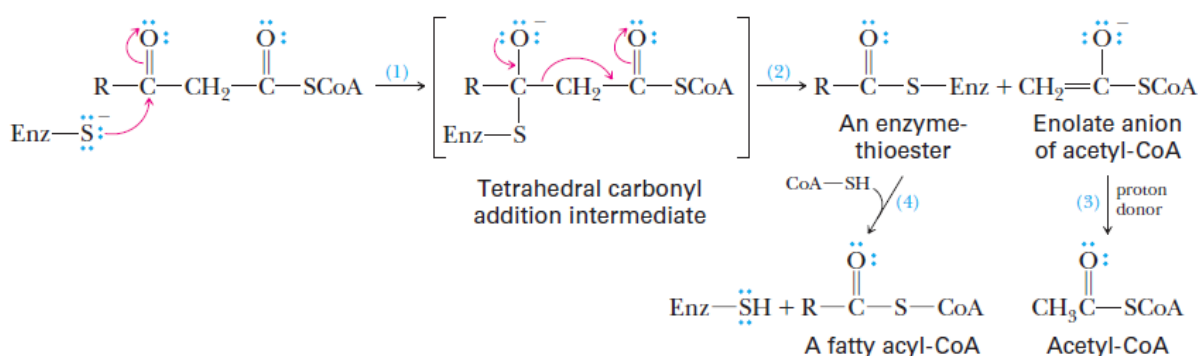
لتكوين استيل- مساعد الانزيم A

**الخطوة 1:** مجموعة السلفاهايدريل في الانزيم تهاجم ذرة كربون مجموعة الكربونيل للكيتون وسطي إضافة رباعي السطوح.

**الخطوة 2:** تفكك المركب الوسطي لإعطاء استيل مساعد الانزيم A وانزيم مرتبط بالتايو استر.

**الخطوة 3:** ايون الاينوليت يتفاعل مع واهب بروتون ليعطي استيل-مساعد الانزيم A.

**الخطوة 4:** الانزيم-ثايواستر يتفاعل مع مساعد الانزيم A ليُعيد توليد مجموعة السلفاهايدريل على سطح الانزيم ويُحرر المركب الدهني اسيل-كوA:



1. William H., Thomas P., **“Introduction to Organic Chemistry”**, 5<sup>th</sup> ed., 2014.
2. Karen C., **“CHEMISTRY, An Introduction to General, Organic, and Biological Chemistry”**, 11<sup>th</sup> ed., 2012.
3. John M., **“Organic Chemistry with Biological Application”**, 3<sup>rd</sup> ed., 2015.
4. John M., David S., Carl A., Virginia E., **“Fundamentals of General, Organic and Biological Chemistry”**, 7<sup>th</sup> ed., 2013.
5. Paula Y., **“Essential Organic Chemistry”**, 2<sup>nd</sup> ed , 2014.

