الطاقة الحيوية

تحرر الطاقة وانتقالها Energy Liberation and Transfer:

أن مصطلح الطاقة الحيوية **Bioenergetics** يعني دراسة التغير في الطاقة التي تصاحب التفاعلات الحياتية. ان قيم الطاقة يعبر عنها عادة بوحدات حرارية، وهي السعرات (Calories).

ان التفاعل الذي يحرر حرارة يسمى Exothermic ويعبر عن الحرارة بالطاقة الداخلية Enthalpy ويرمز لها ΔH، حيث تكون قيمة ΔH لهذا التفاعل سالبة (اقل من الصفر)، اما التفاعل الذي لا يتم فيه تبادل حراري فيدعى Isothermic، وتكون قيمة ΔH له صفراً. وعلى اية حال فان الطاقة الناتجة من تفاعل كيمياوي والتي يستفاد منها لإنجاز عمل مفيد ليست دائماً مكافئة للحرارة المتحررة وإنما يعبر عنها بالطاقة الحرة Free Energy ومختصرها ΔG فالتفاعلات التي تحرر طاقة يطلق عليها خارجة Exergonic، وتكون قيمتها سالبة (اي اقل من الصفر). اما التفاعلات التي تحتاج طاقة فيطلق عليها داخلة Endergonic وتكون قيمتها موجبة (اكثر من الصفر).

ان قيمة ΔG تعطينا انطباعاً عن مسار التفاعل الكيمياوي فيما اذا كان تلقائياً الى اليمين، اما التفاعل الذي يحتاج طاقة Endergonic فيكون تلقائياً في الاتجاه المعاكس. اما اذا كانت قيمة ΔG تعادل صفراً، فان التفاعل يعد في حالة توازن Equilibrium. ان التفاعلات التي تتضمن التقويض (الهدم) Catabolism، تفاعلات محررة للطاقة Exergonic. اما تفاعلات البناء Anabolism، فهي تحتاج الى طاقة Endergonic. فعلى سبيل المثال فان الأكسدة الكاملة Complete oxidation لمول واحد (180 غراماً) من سكر الكلوكوز الى CO_2 و H_2O تحرر طاقة تعادل 686 كيلو سعرة من الحرارة، وبعبارة اخرى فان الطاقة الكامنة في مول واحد من الكلوكوز تعادل 686 كيلو سعرة/ مول. ولو عكس التفاعل لغرض بناء مول واحد من الكلوكوز من CO_2 و H_2O كالذي يحصل في النبات في عملية التركيب الضوئي، فان الطاقة المطلوبة لغرض البناء تعادل 686 كيلو سعرة/ مول ويجب ان يتزود بها النبات من المحيط.

ويمكن ايجاد قيمة ΔG من العلاقة الاتية: $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$

حيث ΔG = الطاقة الحرة Free energy ΔS = التغير في الطاقة او النظام Entropy

ΔH = الطاقة الداخلية او الحرارة Enthalpy T = درجة الحرارة المطلقة

Dr. Hind Shakir Ahmed

فرق الطاقة الحرة القياسية (ΔG°) Standard Free Energy:

وهي الطاقة الناتجة عن قياس الطاقة الحرة عند pH=7.0، ودرجة 25 مئوية وضغط جوي واحد عندما تكون تراكيز المواد المتفاعلة والناتجة= 1 مول/ لتر. وتستخدم ΔG ° لغرض موازنة الطاقة الحرة المتغيرة للتفاعلات البيولوجية. وفي حالة التوازن Equilibrium تكون قيمة فرق الطاقة الحرة ΔG صفراً. اما فرق الطاقة الحرة القياسية، فيمكن ايجادها من العلاقة:

$$\Delta G^\circ = -2.303\ RT \log k_{eq}$$

حيث:

ΔG° = فرق الطاقة الحرة القياسية

R = ثابت الغازات ويساوي 1.987 كيلو سعرة/ مول/ درجة

K_{eq} = ثابت التوازن

ومن ثابت التوازن لأي تفاعل كيمياوي يمكن حساب فرق الطاقة الحرة القياسية ΔG°.

مثال: إيجاد قيمة ΔG° للتفاعل التالي في درجة 25 مئوية و pH=0.7 وضغط جوي واحد، علماً بان نسبة DHAP كانت 95% ونسبة G3-P كانت 5%.

Glyceraldehyde 3-P ⇌ Dihydroxy acetone-P

الحل :-

$$K_{eq} = \frac{95[\text{DHAP}]}{5\ [\text{G3-P}]}$$

$$\Delta G^\circ = -2.303\ RT\ \log K_{eq}$$

$$= -(2.303)(1.987)(298)\log\ 20$$

$$= -1.8\ \text{kCal/mol}$$

اي ان الطاقة القياسية الحرة التي تحول G3-P الى DHAP تعادل 1.8 كيلو سعرة/ مول.

وفي الواقع ان الحالة الموجودة في داخل الخلية لا تطابق الحالة القياسية المذكورة أعلاه، اذ ان اهم اختلاف موجود هو تراكيز المواد المتفاعلة والناتجة. ان فرق الطاقة الحرة تحت ظروف غير قياسية (ΔG) يمكن قياسها من العلاقة الاتية:-

$$\Delta G = \Delta G^\circ + 2.303\ RT \log \frac{[\text{product}]}{[\text{Reactant}]}$$

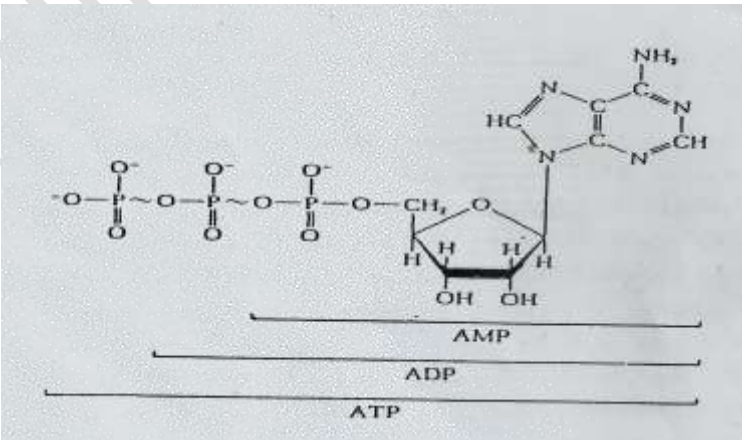
Dr. Hind Shakir Ahmed

وعند استخدام المعادلة اعلاه يمكننا ان نتوقع اتجاه سير التفاعل داخل الجسم In vivo. فالتفاعل الذي تكون قيمة $\Delta G°$ له موجبة وتكون قيمة ΔG سالبة عندما تكون النسبة بين تراكيز المواد الناتجة الى المواد المتفاعلة واطئة. وهذا يعني ان التفاعل لا يتعزز داخل الجسم اذا كانت تراكيز المواد المتفاعلة اعلى من تراكيز المواد الناتجة. وبرغم كون اغلبية التفاعلات الحياتية عكسية، فالتفاعل اما ان يسير بشدة الى امام وكأنه غير عكسي، او يسير في الاتجاه المعاكس. فإذا كانت قيمة $\Delta G°$ قليلة اي تتراوح ما بين ± 1 كيلو سعرة/ مول فهذا يعني ان التفاعل عكسي Reversible. وعلى العموم اذا كانت قيمة $\Delta G°$ اكثر سالبيه من 5 كيلو سعرة/ مول، فالتفاعل غير عكسي Irreversible.

دور الفوسفات العالية الطاقة في الطاقة الحياتية:

Role of High Energy Phosphates in Bioenergetics

ان الطاقة الحرة الناتجة من تقويض المادة الغذائية Catabolism لا تنقل مباشرة الى التفاعلات ذات الحاجة للطاقة فحسب، وإنما تستخدم لبناء مركب حامل للطاقة الحرة، ان هذا المركب هو ادينوسين ثلاثي الفوسفات Adenosine triphosphate ومختصره ATP. ان لهذا المركب اثنين من اواصر الفوسفات غير المهدرجة Phosphoanhydrid، فعند كسر اية اصرة من هذه الاواصر تتولد درجة كبيرة من الطاقة الحرة القياسية. فعلى سبيل المثال، قيمة ΔG عند تحلل ATP الى ADP وPi او تحلل ATP الى AMP و PPi هي 7.3- و 8.6- كيلو سعرة/ مول على التوالي. ان كسر اية اصرة فوسفاتية مصحوب بتوليد انخفاض كبير للطاقة القياسية الحرة، اي اقل من 5- كيلو سعرة/ مول يصطلح عليها باصرة الفوسفات العالية الطاقة High-energy phosphate bond او الفوسفات العالية الطاقة High-energy phosphate، عندما ادخل العالم Lipman هذين المصطلحين عام 1941.



الشكل (1): الاواصر ذات الطاقة العالية في ATP،ADP،AMP عند الرقم الهيدروجيني 7

Dr Hind Shakir Ahmed

وهناك صفتان في جزيئة ATP تجعله من المركبات العالية الطاقة وهما:-
1- عند الرقم الهيدروجيني 7.0 تكون جزيئة ATP حاملة لأربع شحنات سالبة متقاربة ATP كما في الشكل اعلاه. فتتنافر مع بعضها بقوة، وعندما تتفكك اصرة الفوسفات النهائية فان بعضاً من الجهد الكهربائي يرفع عن جزيئة ATP. ان المواد الناتجة ADP و HPO_3^- تحمل كذلك شحنات سالبة، ولا يكون لها ميل للوصول الى بعضها البعض بسبب التنافر بين شحناتها، وهكذا فان ADP والفوسفات لا يرتبطان بسهولة لتكوين ATP.
2- ان كل من النواتج ADP و HPO_3^- يشكل رنينا هجينياً hybrid Resonance بحيث تستطيع الكتروناته الانخفاض الى اقل المستويات، واقل بكثير من جزيئة ATP غير المتحلل.
تلعب جزيئة ATP دوراً رئيسياً في نقل الطاقة الحرة من التفاعلات المولدة للطاقة Exergonic الى التفاعلات المستقبلة للطاقة Endergonic. ان الطريقة الوحيدة لنقل هذه الطاقة هي ربط تفاعلين انزيمياً من خلال جزيئة ATP التي تعد هنا ناتجاً وسطياً مشتركاً ومن الامثلة على التفاعل الانزيمي المشترك Coupled reaction استخدام فوسفو اينول بايروفيت Phosphoenolpyruvate (PEP) في تكوين كلوكوز -6- فوسفيت (G6-P) من الكلوكوز والذي يتضمن خطوتين، الأولى هي:-

$$\text{Phosphoenol pyruvate} + \text{ADP} \xrightarrow{\text{Pyruvate Kinase}} \text{ATP} + \text{Pyruvate}$$

قيمة ΔG لهذا التفاعل 7.500- كيلو سعرة/ مول
اما الخطوة الثانية فهي استخدام ATP الناتج:

$$\text{Glucose} + \text{ATP} \xrightarrow{\text{Hexokinase}} \text{Glucose 6-p} + \text{ADP}$$

ان قيمة ΔG للتفاعل الثاني تعادل 4.000- كيلو سعرة / مول.
وعند جمع المعادلتين تصبح قيمة ΔG لتكوين كلوكوز 6- فوسفيت من فوسفو اينول بايروفيت معادلة ل 11.500 – كيلو سعرة/ مول.

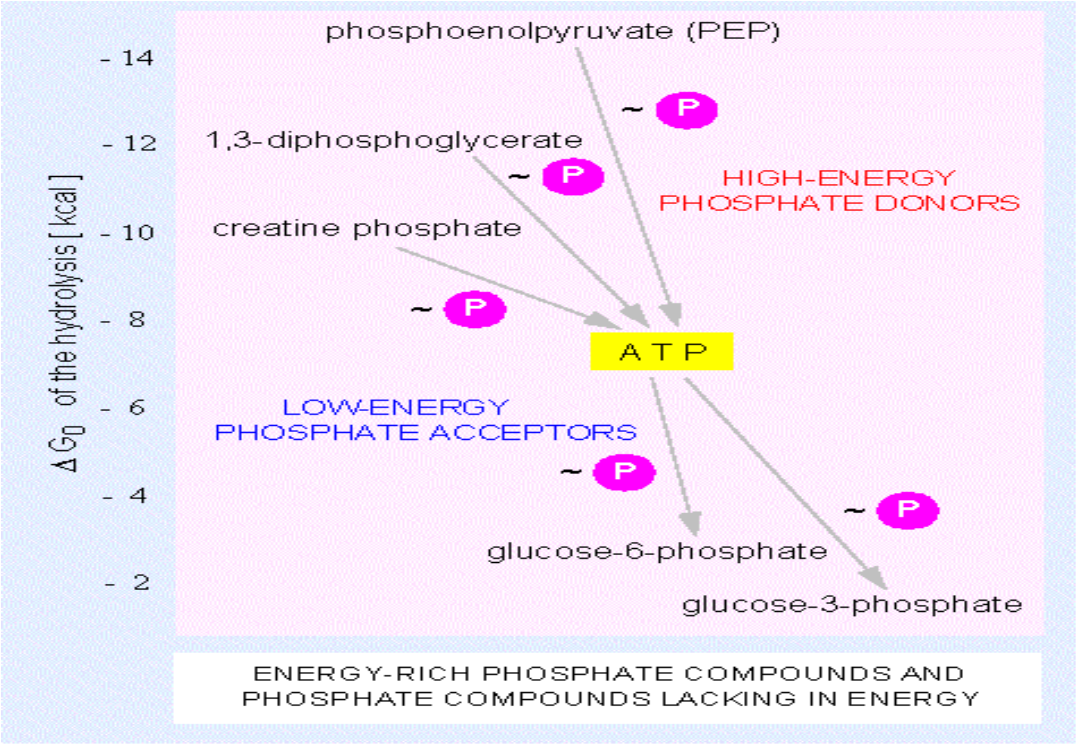
$$\text{Phosphoenol pyruvate} + \text{Glucose} \rightleftharpoons \text{Pyruvate} + \text{Glucose 6-p}$$

ويلاحظ من التفاعل أعلاه ان جزيئة ATP وسيط لنقل الفوسفات من مركب عضوي الى اخر من دون ان يتحول الى فوسفات لاعضوية ويوضح الشكل الاتي دور جزيئة ATP كناقل وسطي لمجاميع الفوسفات الناتجة عن المركبات العالية الطاقة الواهبة الى مستقبلات واطئة الطاقة. ان جزيئة ATP متميزة عن غيرها من المركبات الفوسفاتية العضوية لان لها قيمة وسطية في التدرج الثرموديناميكي برغم كونها مركباً فوسفاتياً عالي الطاقة (الجدول1).

Dr. Hind Shakir Ahmed

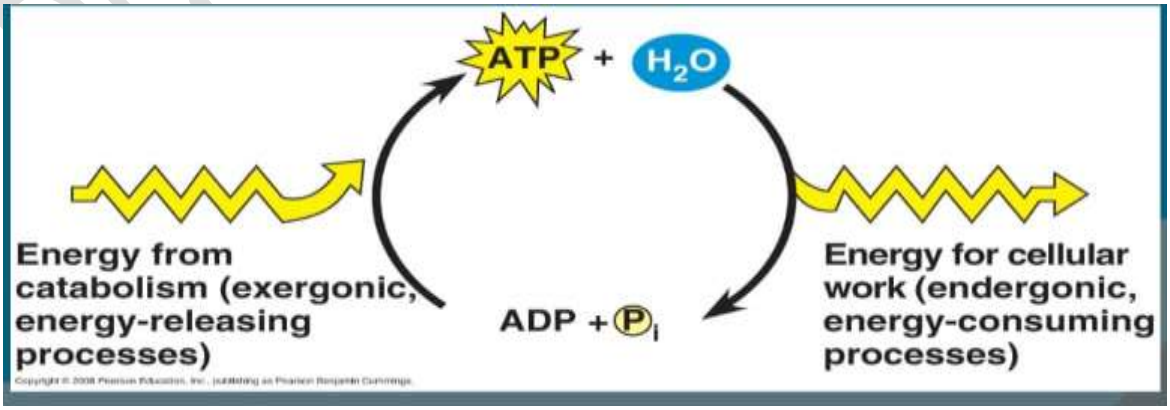
دورة ATP/ADP في نقل طاقة الفوسفات:

أصبح من المعلوم ان جزيئة ATP لها القابلية على وهب طاقة الفوسفات العالية الى المركبات التي هي اقل منها طاقة (الجدول 1). وبالمقابل فان ADP له القابلية على استقبال طاقة الفوسفات العالية من المركبات الغنية بالطاقة ليكون ATP.



الشكل (2): انسياب مجاميع الفوسفيت من واهبات فوسفيت ذات طاقة عالية الى مستقبلات واطئة الطاقة عن طريق نظام ATP/ADP

وعليه فان دورة ADP/ATP تربط المركبات التي تولد طاقة عالية الفوسفات بالمركبات التي تحتاجها والممثلة في الشكل التالي. ان دور الATP البايولوجي هو مركب وسطي يربط بين عمليه منتجه للطاقة واخرى مستهلكه لها كما في الشكل (3).



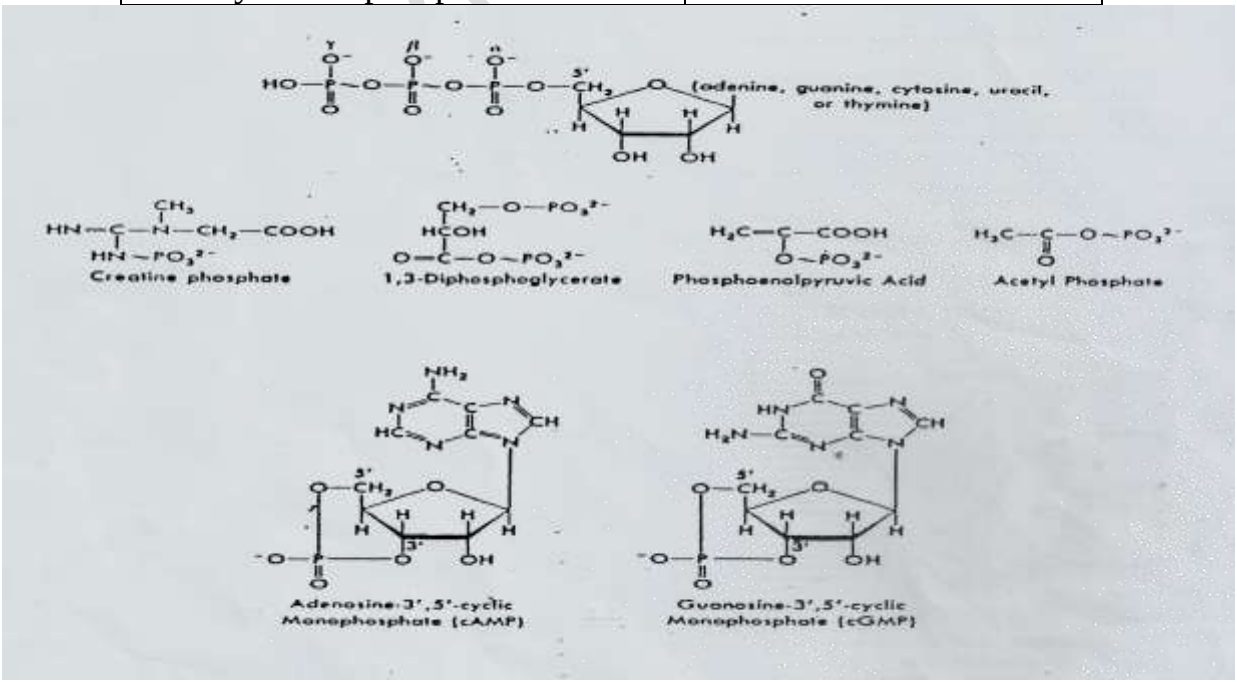
الشكل (3): الدور البايولوجي للمركب ATP

دور مركبات الفوسفات عالية الطاقة Role of high–energy phosphates compounds:

تحتوي المركبات ادناه على فوسفات عالية الطاقة، وذلك لان قيمة ΔG° الناتجة عن تحلل اصرة الفوسفات غير المهدرجة (~ p) anhydride اكثر سالبية من الاواصر الفوسفاتية المؤسترة البسيطة كما موضح في جدول (1) وشكل (4).

الجدول (1): الطاقة الحرة القياسية لبعض المركبات المهمة بيولوجيا

المركب	ΔG at pH 7.0 (cal/mole)
Phosphoneolpyruvate	-14.800
Cyclic .AMP	-12.000
1.3Diphosphoglycerate	- 11.800
Phosphocreatine	-10.300
Acetyl phosphate	-10.100
S.adenosylmethionine	-10.000
Pyrophosphate	-8.000
Acetyl.CoA	-7.500
ATP to ADP and Pi	-7.300
ATP to AMP and pyrophosphate	-8.600
ADP	-6.500
UDP.glucose to UDP and glucose	-8.000
Glucose .1.phosphate	-5.000
Fructose.6.phosphate	-3.800
Glucose.6.phosphate	-3.300
sn . Glycerol.3.phosphate	-2.200



الشكل (4): المركبات الفوسفاتية عالية الطاقة

Shakir Ahmed

ان الادوار المهمة التي تلعبها هذه المركبات الغنية بطاقة الفوسفات يمكن حصرها بما يأتي:-

1- فسفرة الجزيئات العضوية وذلك بنقل مجموعة الفوسفات اليها مباشرة، بحيث تصبح حاملة للطاقة من غير ان تفقد المواد المتفاعلة طاقة حرارية. ان المواد الناتجة المفسفرة قد تكون حاملة او غير حاملة للآصرة الفوسفاتية عالية الطاقة anhydride (~p). ان ذلك يتوقف على التركيب الكيمياوي للمركب. ومن الجدير بالذكر ان المركب المفسفر الناتج قد يكون حاملاً للطاقة او لا يكون، وعلى اية حال فأن المركب الناتج المفسفر يكون في كلتا الحالتين اعلى طاقة مما كان عليه قبل التفاعل ومن الامثلة على ذلك:

$$\text{Glucose} + \text{ATP} \longrightarrow \text{Glucose 6-P} + \text{ADP}$$

$$\text{ATP} + \text{AMP} \longrightarrow 2\text{ADP}$$

2- لنفترض ان جميع مسارات التقويض Catabolic pathways اجريت في انبوبة اختبار in vitro مثلاً، فان الطاقة المتحررة من هذه التفاعلات بأكملها تتبدد على شكل حرارة. غير ان هذه الطاقة الناتجة عن التقويض داخل الجسم تستخدم لغرض بناء مركبات غنية بالطاقة مثل ATP (الشكل 3). ان ميكانيكية تكوين المركبات الغنية بالطاقة تتم بتحويل المركبات ذات الطاقة الواطئة الى مركبات أعلى طاقة. وهذا بدوره يعمل على تحويل وفسفرة ADP ليحوله الى ATP . فعلى سبيل المثال عند اجراء التفاعل الاتي داخل المختبر فأنه يحرر طاقة على شكل حرارة، ولكن عندما يتم إجراءه داخل الجسم In vivo تتولد عنه طاقة تستخدم لبناء جزيئة ATP .

$$\text{Glyceraldehydes 3-P} \xrightarrow[\text{NAD}\quad\text{NADH}]{\text{Pi}} \text{1,3-Diphosphoglycerate}$$

$$\text{1,3-Diphosphoglycerate} \xrightarrow[\text{ADP}\quad\text{ATP}]{} \text{3-Phosphoglycerate}$$

3- تعد المركبات الغنية بالطاقة بالنسبة للخلية المصدر الوحيد الذي تستخدمه بصورة مباشرة. فالخلية تستفاد من المركبات الغنية بالطاقة للأغراض الأتية:-

أ- بناء المركبات ذات الجزيئات الكبيرة Macromolecules.

ب- القيام بأعمال وظيفية كتقلص العضلات Muscular contraction والافرازات Secretion.

ج- تحرر طاقة حرارية عند تحللها للمحافظة على درجة حرارة الجسم بصورة ثابتة.

Dr. Hind Shakir Ahmed

مركب الأدينوسين ثلاثي الفوسفات (ATP):

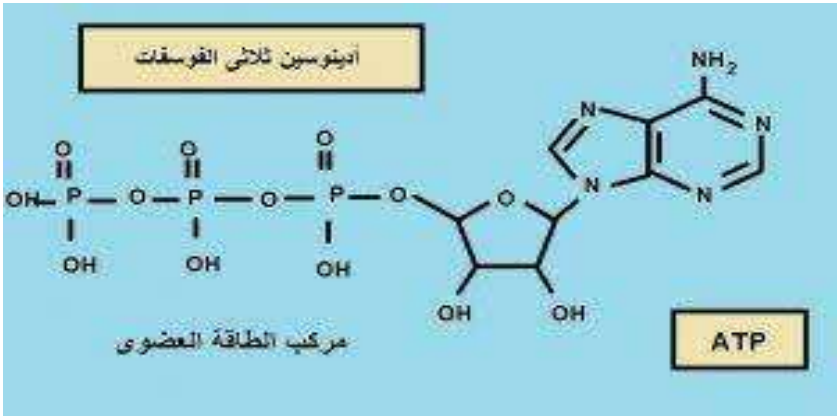
مركب الأدينوسين ثلاثي الفوسفات أو Adenosine 5′-triphosphate يرمز له ATP، يعرف بأنه أهم المركبات الناقلة للطاقة في الخلايا على الإطلاق، فهو العملة التي تستبدلها مكونات الخلية لإجراء التفاعلات التي تحتاج إلى الطاقة.

هذا المركب هو الناتج النهائي للفسفرة الضوئية -عملية إضافة مجموعة فوسفات إلى مركب معين باستخدام الطاقة الضوئية- وللتنفس الخلوي وللتخمر. تستخدم جميع الكائنات الحية مركب الأدينوسين ثلاثي الفوسفات.

بالإضافة إلى كونه مصدرًا للطاقة، فهو يعمل كمركب ناقل للإشارة في سبل التواصل بين عضيات الخلية وكمركب بنيوي فهو يدخل في تركيب الحامض النووي الرايبي منزوع الأوكسجينDNA.

بنية الأدينوسين ثلاثي الفوسفات:

هذا المخطط يعرض بنية الأدينوسين ثلاثي الفوسفات، حيث يتألف من الأدينوسين وهو الأدنين المرتبط بسكر الريبوز و3 مجموعات من الفوسفات. وعليه، لدينا القاعدة (الأدنين) ذات الحلقتين، حلقة الفيورانوز السكرية الخماسية، وسلسلة من 3 مجموعات فوسفات. الأدينوسين ثلاثي الفوسفات منحل بالماء ويحتوي على كمية كبيرة من الطاقة لامتلاكه رابطتين فوسفاتيتين تشكلتا بنزع الماء من المجموعات الفوسفاتية الثلاثة.



الشكل (5): المركبات ATP عالي الطاقة

وظائف الأدينوسين ثلاثي الفوسفات:

للأدينوسين ثلاثي الفوسفات أهمية عالية ولا يمكن الاستغناء عنه ضمن الخلية، فهو يدخل في كل عمليات نقل الطاقة، ويعمل مساعدًا لإنزيمات مهمة، مثل الإنزيم النازع للفوسفات الثلاثية من الأدينوسين ثلاثي الفوسفات، أو ما يسمى ATP triphosphatase ، الذي ينقل

الطاقة الموجودة في الرابطة الفوسفاتية إلى الأوساط الخلوية مقدمًا طاقةً كافيةً لبدء تفاعلاتٍ معينة وله دور أساسي في تقلص العضلات ونقل النبضات العصبية وتخليق البروتينات.
عندما تُجرى عملية التحلل المائي على الأدينوسين ثلاثي الفوسفات فإنه يتحول إلى الأدينوسين ثنائي الفوسفات وتنتج عن هذا التحول كمية من الطاقة.
توجد عدة طرق لإنتاج الأدينوسين ثلاثي الفوسفات:
1/ الفسفرة الضوئية
2/ عملية التنفس الخلوي التي تحدث في الميتوكوندريا داخل الخلية.
3/ التخمر وهي لا تحتاج إلى الأوكسجين، وتختلف عن التنفس الخلوي اللاهوائي بأنها لا تتضمن إنتاج مركبات تدخل في سلسلة نقل الإلكترون، كما هو الحال في التنفس الخلوي.

يوصف الأدينوسين ثلاثي الفوسفات بأنه مركب إشاري أي أنه يستخدم للتواصل وتنسيق العمليات الحيوية ضمن الخلية. يستخدم الأدينوسين ثلاثي الفوسفات من قبل إنزيمات الكيناز للحصول على مجموعة فوسفات، كونها الإنزيمات التي تضيف مجموعة الفوسفات إلى الجزيئات الحيوية. تأتي أهمية إنزيمات الكيناز من دورها في نقل الإشارة، فتنقل الإشارات الكيميائية من المستقبلات خارج الخلية إلى الداخل. وبعد وصول الإشارة تستجيب الخلية بما يتوافق معها. الإشارات الخلوية مهمة، فالخلايا تتلقى إشارات للنمو والأيض والتمايز وقد تتلقى إشارات للموت.

مركبات مشتقة من الأدينوسين ثلاثي الفوسفات:

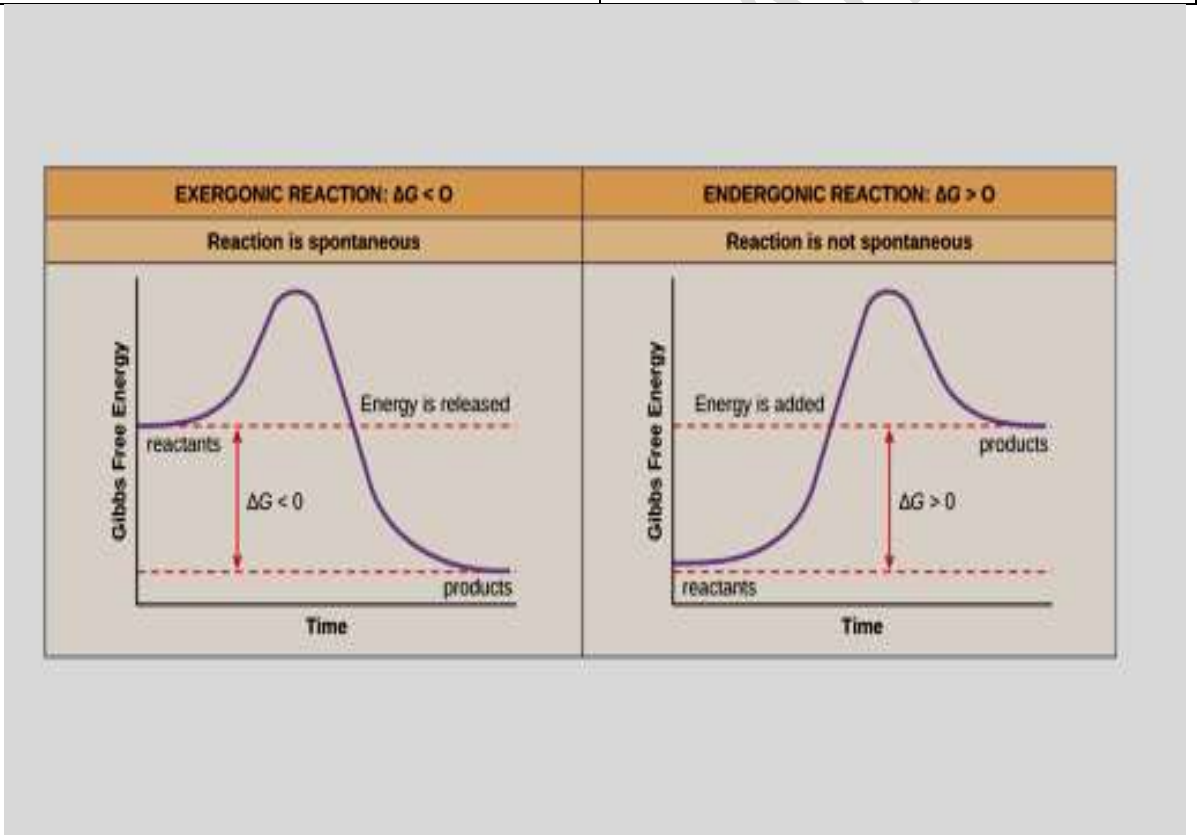
1- الأدينوسين ثنائي الفوسفات (ADP)
2- الأدينوسين أحادي الفوسفات (AMP)
3- الأدينوسين أحادي الفوسفات الحلقي (cAMP)

الفرق بين ΔG° و ΔG:-

ΔG°	ΔG
1- هي فرق الطاقة الحرة القياسية.	1- هي فرق الطاقة الحرة.
2- يكون فرق الطاقة الحرة القياسية لأي تفاعل اما سالب او موجب او صفر. اذ ان القيمة تتوقف على ثابت توازن التفاعل.	2- يكون فرق الطاقة الحرة سالباً. ويصبح اقل سالبية عندما يقرب التفاعل من مرحلة التوازن ويصبح صفراً عند مرحلة التوازن مشيراً الى توقف الشغل من التفاعل.
3- تعطي مؤشراً لاتجاه التفاعل ومداه في الظروف القياسية اي عند تراكيز1 مولاري و pH= 7.0 ودرجة 25 مئوية.	3- تعتمد ΔG في اي تفاعل على التركيز والأس الهيدروجيني ودرجة الحرارة. وليست بالضرورة ان تكون هذه العوامل الثلاثة قياسية.

Differentiation between exergonic and endergonic reactions

Exergonic reaction	Endergonic reaction
The exergonic reaction is a type of reaction in which free energy is released	Endergonic reactions are the type of reaction in which free energy is absorbed
Here Gibbs free energy is negative	Here Gibbs free energy is positive
Exergonic reactions indicate that the energy is released in the system	Endergonic reactions indicate that the energy is absorbed by the system
All the exothermic reactions are exergonic.	All endothermic reactions are endothermic
Exergonic reactions do not require energy to begin	Endothermic reactions always require energy to begin.
It is a downhill reaction	It is an uphill reaction
Fatty acid catabolism, glycolysis، cellular respiration	DNA/RNA synthesis, protein synthesis, fatty acid synthesis



الشكل (6): تفاعلات Exergonic،Endergonic