الكيمياء الحياتية 2

قسم العلوم

فرع الكيمياء

المرحلة الثالثة

الايض الغذائي Metabolism

الايض الغذائي أو الاستقلاب أو الايض هو نشاط خلوي عالي التناسق لأنظمة متعددة الأنزيمات لمسارات ايضية لغرض:-

1. الحصول على الطاقة الكيميائية بواسطة هدم الأغذية الحاوية على طاقة.
2. تحويل الجزيئات الغذائية إلى مكونات خلوية كما في تكوين جزيئات كبيرة مثل البروتينات والأحماض النووية والسكريات المتعددة.
3. تكوين وهدم الجزيئات الضرورية لتمايز وظائف الخلايا مثل لبيدات الأغشية , الرسل الخلوية والصبغات.

مما سبق نلاحظ إن هنالك نوعان من عمليات الايض **(Metabolism)**

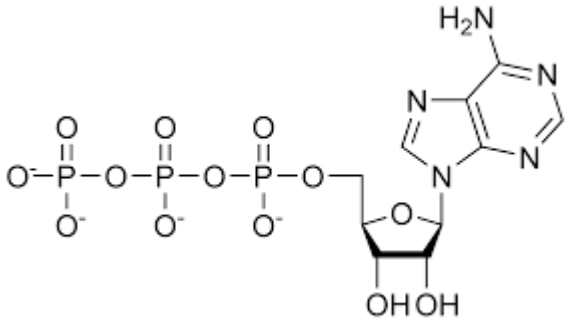
1- الهدم : **(Catabolism)** هي عملية تكسير المواد الغذائية الرئيسية سواء كانت كاربوهيدرات أو بروتينات أو دهون خلال طرق مختلفة من التفاعلات الحيوية إلى جزيئات بسيطة وينتج عن ذلك الحصول على الطاقة.

إن أول خطوات هدم المواد الغذائية تتضمن هدم المواد المركبة وتفكيكها إلى مواد أكثر بساطة بإدخال جزيء ماء في بنيتها بعملية تدعى التحليل المائي hydrolysis وهكذا تتفكك البروتينات إلى أحماض أمينية يصل عدد أنواعها في المواد الغذائية إلى نحو 20 حامضاً ، وتتحول الشحميات إلى الجليسرول وأحماض شحمية يبلغ عدد أنواعها عشرة تقريباً، أما السكريات فتعطي سكريات بسيطة، هي السكريات السداسية (الهكسوزات) التي تحوي 6 ذرات من الكربون كالكلوكوز ، والسكريات الخماسية (البنتوزات) التي تحوي على 5 ذرات كربون . **وتُنْجَزُ هذه المرحلة من الهدم عادة في جهاز الهضمي ، وتتوسطها الأنزيمات الهاضمة التي تفرزها الغدد الهاضمة.**

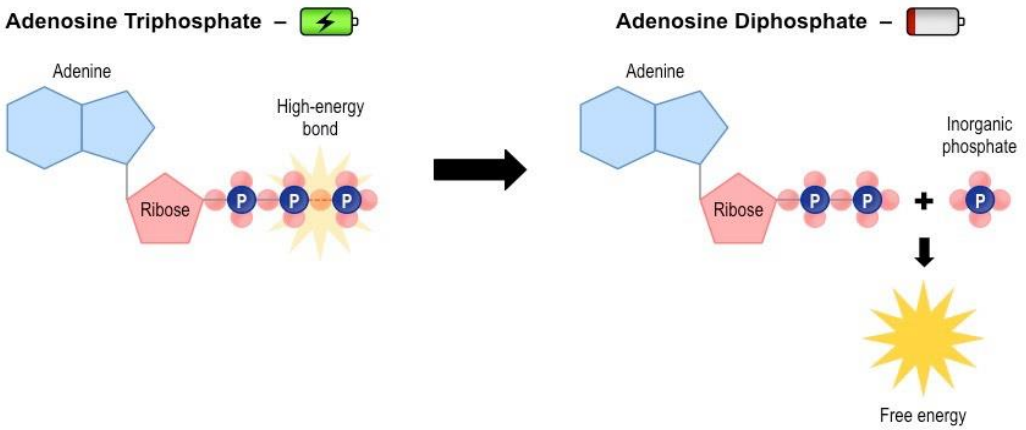
2- البناء :**(Anabolism)** الجزيئات البسيطة الناتجة من عملية الهدم يمكن استخدامها كنواة لبناء مواد أكثر تعقيدا سواء كانت بروتينية أو أحماض نووية من خلال سلسلة من التفاعلات وذلك لبناء الأنسجة وتستهلك طاقة في تلك التفاعلات.

الطاقة الخلوية Cellular Energetic

الجسم له عدة احتياجات للطاقة منها التي يحتاجها للحرارة لحفظ درجة حرارة الجسم وتنتج هذه الحرارة بالحرق المنظم لمركبات في الخلية مثل سكر الكلوكوز وكذلك تحتاج الخلية للطاقة حتى تؤدي عملا مثل تقلص العضلة ونقل النبضات العصبية والتحضير الخلوي , تحتاج الخلية لهذه المهام مركبات عالية الطاقة مثل الادينوسين ثلاثي الفوسفيت (ATP) . إن جزيئة ATP تحوي أصرتين أوكسجين إلى فوسفات التي تدعى أواصر الفوسفات عالية الطاقة وهي عادة تمثل بخطوط متموجة .



جزيئة ATP



وسبب تسمية أواصر الفوسفات عالية الطاقة هو ان التحلل المائي للمركبات مثل ATP هو تفاعل باعث للحرارة كبيرة منتجا حوالي ضعف كمية الطاقة الناتجة من التحلل المائي لمركبات تحوي اواصر فوسفات واطئة الطاقة في التفاعلات المحررة للطاقة ففي الخلية ATP يتحلل مائيا ليكون ADP وفوسفات لاعضوية .

$$ATP + H_2O \longrightarrow ADP + Pi + 7.3 \text{ K cal}$$

علما بان الأكسدة التامة للكلوكوز في الأوكسجين إذا أجريت في المختبر فسوف تنتج 686 Kcal لكل مول من الكلوكوز

$$C_6H_{12}O_6 + 6O_6 \longrightarrow 6CO_2 + 6H_2O + 686\ k\ cal$$

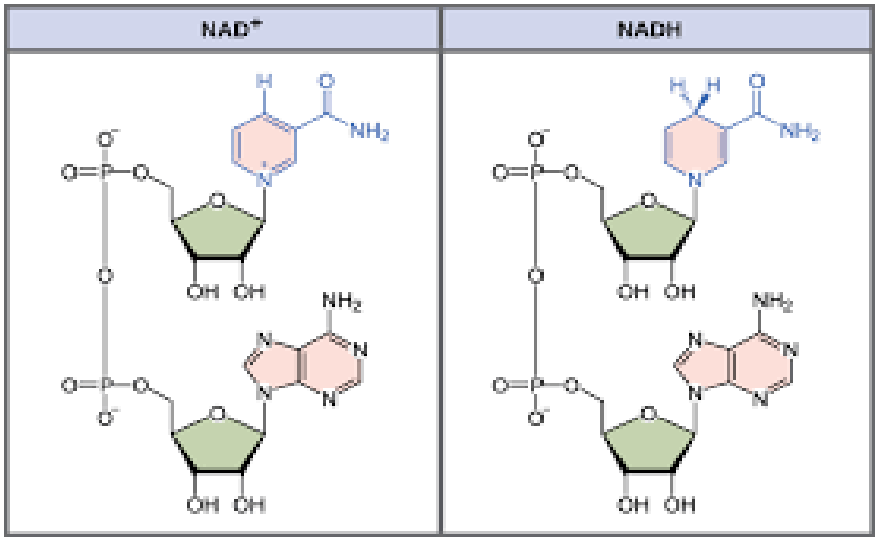
وإذا أجريت داخل الخلية الحية وتحت سيطرة أنزيمية سوف ينتج 38 ATP لكل مول من الكلوكوز

$$C_6H_{12}O_6 + 6O_6 \longrightarrow 6CO_2 + 6H_2O + 38\ ATP$$

تتحلل كل جزيئة ATP واحدة لتنتج 7.3 K cal من الطاقة وبهذا سيكون أكسدة 38 جزيئة ATP تنتج من الأكسدة التامة لمول واحد من الكلوكوز داخل الخلية الحية يعطي حوالي 277 Kcal من طاقة نافعة ويعني ذلك ان العمليات الخلوية للتنفس هي كفؤة بحوالي 40% وان باقي الطاقة تعطى للجسم لتحفظ درجة حرارته .

تحتاج الخلية إلى جزيئات أخرى غير ATP أيضا للمساعدة في العمليات الحيوية هذه الجزيئات هي أعضاء لصنف من المركبات تدعى المساعدات الأنزيمية وهي كل من NAD^+ و FAD وتعمل هذه الجزيئات كناقلات للهيدروجين في التفاعلات الايضية .

فمركب الNAD^+ مشتق لفيتامين نياسين او حامض النيكوتينك ويسمى Nicotine Amide Di Nucleotide NAD

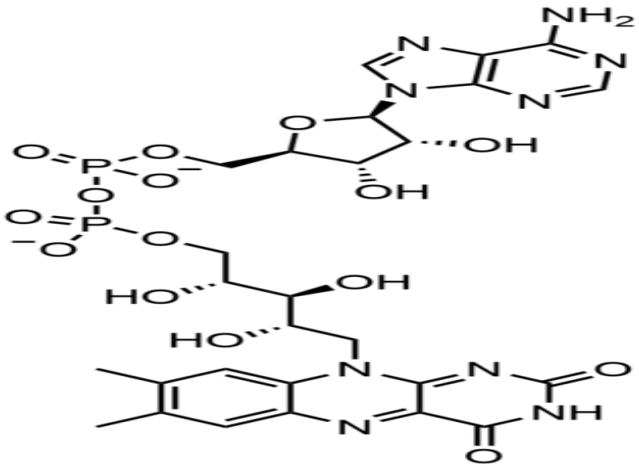


طبقا لاصطلاحات الاتحاد الدولي للكيمياء البحتة والتطبيقية تستخدم الاختصارات

NAD^+ لشكله المتأكسد

NADH لشكله المختزل

المساعد الأنزيمي الأخر هو مشتق من ريبوفلافين او فيتامين B_{12} وهو FAD .



flavin adenine dinucleotide (FAD)

أحد الفروق الرئيسية التي يمكن رؤيتها بين NAD^+ و FAD و ، هو قبول ذرات الهيدروجين حيث يمكن ل FAD أن تستوعب اثنين من الهيدروجين في حين NAD يقبل هيدروجين واحدة فقط . ففيNAD يتم نقل الهيدروجين واحد وزوج الإلكترون، ويتم تحرير الهيدروجين الثاني في الوسط. لهذا يكتب الشكل المختزل NAD ب $NADH + H^+$ بينما يكتب الشكل المختزل FAD ب $FADH_2$

التمثيل الغذائي للكربوهيدرات

في الفم: يتم تحليل النشاء إلى مالتوز وسلاسل من عديدات السكريات بواسطة أنزيم اميليز اللعاب وذلك بكسر الرابطة الكلايكوسيديه **α(1→4)** .

في المعدة: يتوقف عمل الأنزيم عند وصوله مع الطعام إلى المعدة نظرا لأنها شديدة الحموضة و لا يوجد هضم للسكريات.

في الأمعاء :يوجد أنزيم أمليز الأمعاء الذي يكمل ما بدأه أميليز اللعاب ويحطم المزيد من الروابط الكلاكوسيدية . وينتج منها خليط من السكريات الثنائيه.

- تفرز الأنزيمات الخاصة بهضم السكريات الثنائية مثل أنزيم الالكتيز,السكريز, مالتييز.
- لا يمكن هضم السليلوز لعدم وجود الأنزيمات المتخصصة لذلك.
- يكون الناتج سكريات أحادية.

ثم يتم في الأمعاء يتم امتصاص السكريات الأحادية خلال الغشاء الطلائي المبطن للأمعاء الدقيقة وبعد الامتصاص يتم نقلها في الدم إلى الكبد.

مصير الكلوكوز في الدم:

1. يتم نقله بواسطة الدم إلى الأنسجة المختلفة في الجسم ليتم استغلاله في الأنسجة المختلفة بالطرق التالية:

- **أكسدة الكلوكوز** لإنتاج الماء وثاني اوكسيد الكربون والطاقة عن طريق **الكلايكوليسس** ودورة كريبس.
- **تحويل الكلوكوز** إلى مكونات أخرى ذات أهميه بايولوجية مثل: الريبوز والديوكسي رابيوز لتصنيع الأحماض النووية والفركتوز الذي يدخل في تكوين السائل المنوي.
- **تصنيع حامض الكلوكويورونيك** في الكبد وهو هام للتفاعلات التي يتم فيها تحويل المواد السامة إلى مواد غير سامة.
- **تصنيع سكريات أمينيه** لصنع السكريات المخاطية.

2- **التخزين** يتم تخزين الكلوكوز في الكبد والعضلات على هيئة جلايكوجين بواسطة عملية تسمى **الكلايكوجينسيس** ويتم تخزينه في الكبد والنسيج الشحمي على هيئة دهون متعادلة عن طريق عملية تسمى **ليبوجنيسس**.

ايض الكلوكوز

- **التحلل السكري (تحلل الجلوكوز) Glycolysis .**
- **دورة كريبس Krebs Cycle .**
- **سلسلة نقل الالكترونات**
- **بناء الكلايكوجين Glycogenesis .**
- **إستحداث الجلايكوجين(من مصادر غير كربوهيدراتية) Gluconeogenesis .**

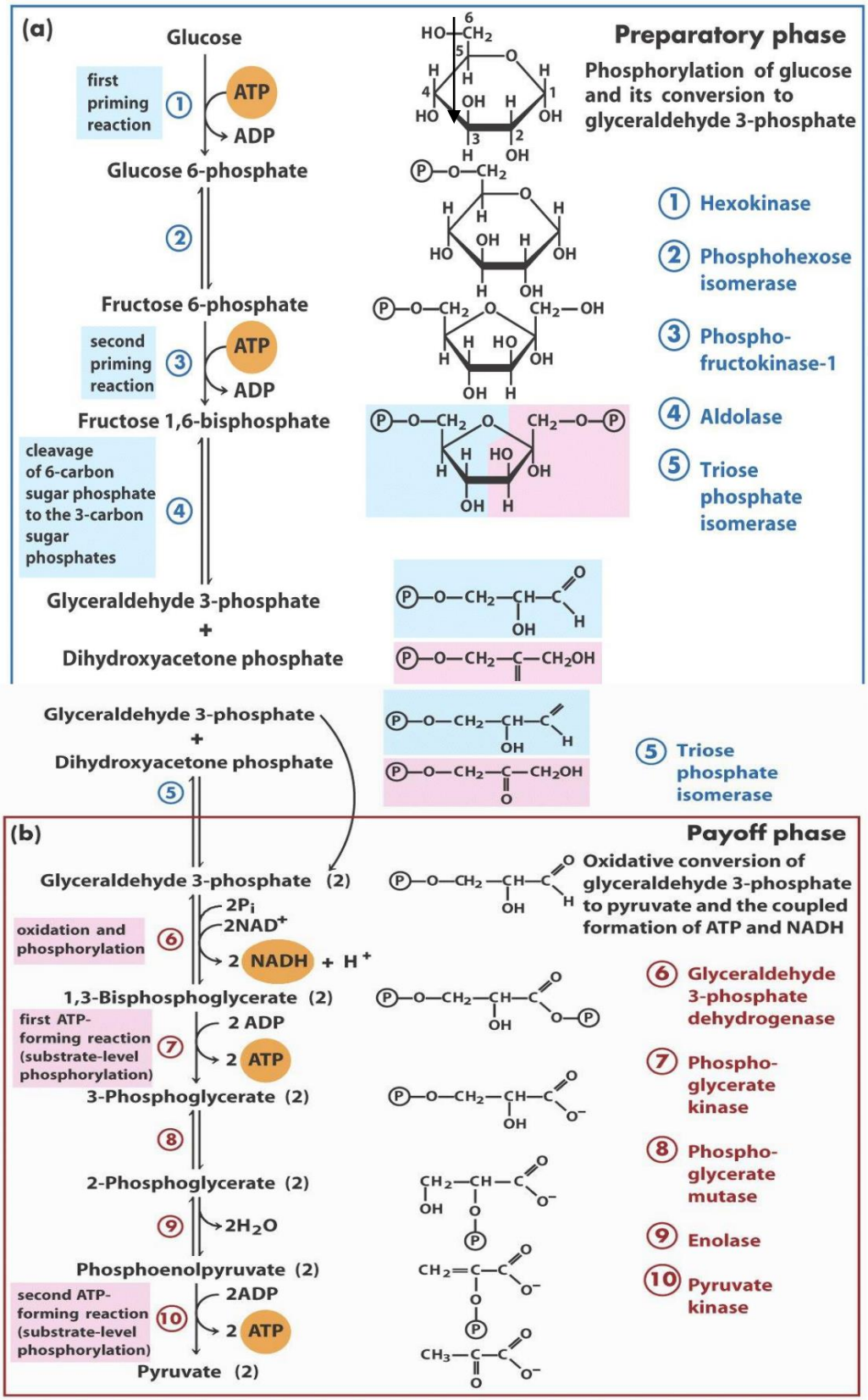
- **تحلل الكلايكوجين Glycogenolysis .**

التحلل السكري (glycolysis) :

الكلايكوليسس كلمة مشتقة من الإغريقية كلايكو بمعنى حلو أو سكر وال ليسس بمعنى انشطار أو تحلل . وهي العملية التي يقوم بها الكائن الحي بتحطيم سكر الكلوكوز وتحويله إلى بايروفيت بواسطة سلسلة من التفاعلات الأنزيمية لغرض الحصول على طاقة. تتم عملية تحلل السكر glycolysis على مرحلتين والتي تتضمن المرحلة الأولى التي تسمى **المرحلة التحضيرية** والمرحلة الثانية **مرحلة ربح الطاقة** وتكون الطاقة أما **ATP** أو **NADH** .

في تفاعلات التحلل السكري المتعاقبة توجد ثلاث أنواع من التحولات الكيميائية :

1. تكسير الهيكل الكاربوني للكلوكوز إلى بايروفيت
2. فسفرة **ADP** إلى **ATP** بواسطة المركبات العالية الطاقة المتكونة أثناء التحلل السكري.
3. نقل ايون الهيدروجين إلى ال **NAD** لتكوين **NADH**


(a)
Glucose
first priming reaction
1
ATP
ADP
Glucose 6-phosphate
2
Fructose 6-phosphate
second priming reaction
3
ATP
ADP
Fructose 1,6-bisphosphate
cleavage of 6-carbon sugar phosphate to the 3-carbon sugar phosphates
4
Glyceraldehyde 3-phosphate
+
Dihydroxyacetone phosphate
Preparatory phase
Phosphorylation of glucose and its conversion to glyceraldehyde 3-phosphate
1 Hexokinase
2 Phosphohexose isomerase
3 Phospho-fructokinase-1
4 Aldolase
5 Triose phosphate isomerase
Glyceraldehyde 3-phosphate
+
Dihydroxyacetone phosphate
5
5 Triose phosphate isomerase
(b)
Payoff phase
Glyceraldehyde 3-phosphate (2)
oxidation and phosphorylation
6
2Pi
2NAD+
2 NADH + H+
1,3-Bisphosphoglycerate (2)
first ATP-forming reaction (substrate-level phosphorylation)
7
2 ADP
2 ATP
3-Phosphoglycerate (2)
8
2-Phosphoglycerate (2)
9
2H2O
Phosphoenolpyruvate (2)
second ATP-forming reaction (substrate-level phosphorylation)
10
2ADP
2 ATP
Pyruvate (2)
Oxidative conversion of glyceraldehyde 3-phosphate to pyruvate and the coupled formation of ATP and NADH
6 Glyceraldehyde 3-phosphate dehydrogenase
7 Phospho-glycerate kinase
8 Phospho-glycerate mutase
9 Enolase
10 Pyruvate kinase

مراحل تحلل الكلايكولي Glycolysis

المرحلة الأولى (المرحلة التحضيرية):

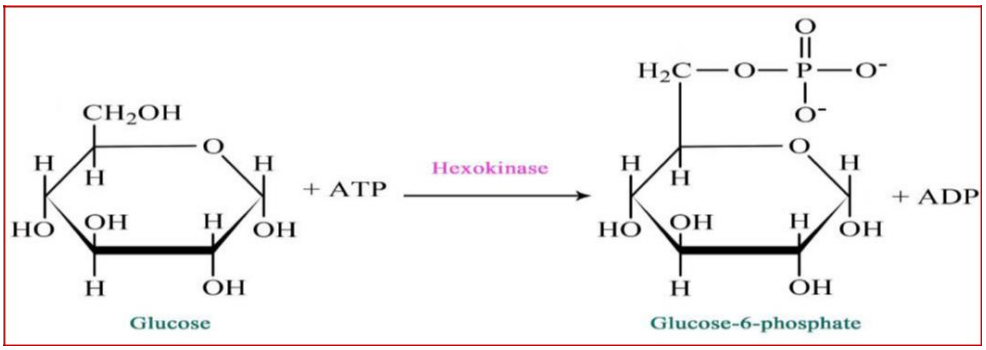
تتكون من خمسة تفاعلات إنزيمية (1 إلى 5) تبدأ بالجلوكوز وتنتهي بالجليسرألدهيد3-فوسفات ويتم في هذه التفاعلات استهلاك للطاقة.

المرحلة الثانية (مرحلة حفظ الطاقة) :

تتكون من خمسة تفاعلات إنزيمية (6 إلى10) تبدأ بتحول الجليسر ألدهيد 3-فوسفات وتنتهي بتكوين البيروفيت ويتم فيها إنتاج الطاقة.

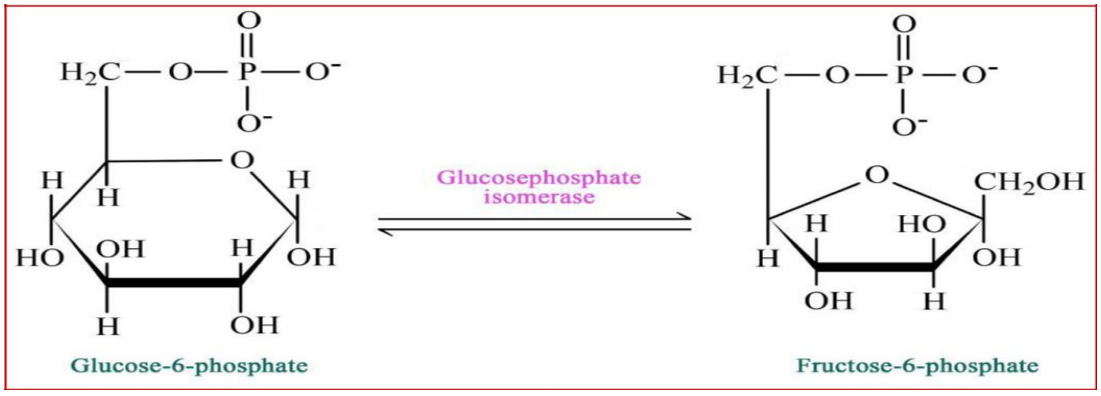
1- تحويل الجلوكوز إلى جلوكوز 6-فوسفات:

يتم إستهلاك جزيء ATP لتحويل جزيء جلوكوز إلى جلوكوز 6-فوسفات بواسطة إنزيم الهكسوكينيز Hexokinase (في تفاعل غير عكسي) في وجود أيون المغنسيوم Mg^{+2} أو المنجنيز Mn^{+2} .إذا زاد تركيز الجلوكوز 6-فوسفات المنتج فإنهُ يثبط عمل إنزيم الهكسوكينيز، لذلك فهوُ يمثل أحد نقاط التحكم في عملية تحلل الجلوكوز.



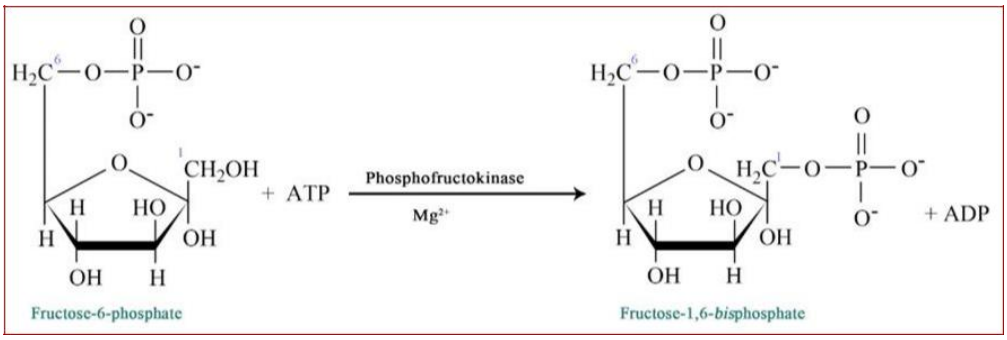
2- تحويل الجلوكوز 6-فوسفات إلى فركتوز 6-فوسفات:

يحفز إنزيم الفوسفوجلوكوزأيسومريز Phosphoglucoseisomerase تحويل الجلوكوز 6-فوسفات إلى فركتوز 6-فوسفات في تفاعل عكسي. يحتاج هذا الإنزيم إلى أيونات المغنسيوم Mg^{+2} أو المنجنيز Mn^{+2} .



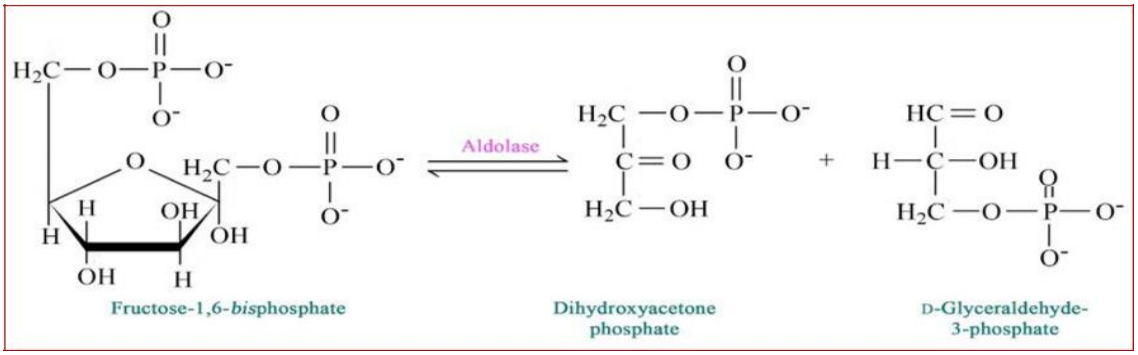
3-تحويل الفركتوز 6-فوسفات إلى فركتوز 6،1 ثنائي الفوسفات:

يحتاج إنزيم الفوسفوفركتو كاينيز إلى أيونات المغنسيوم Mg^{+2} حيثُ يستهلك جزيء واحد من الطاقة ATP لإنتاج الفركتوز 6،1 ثنائي الفوسفات. يعتبر هذا التفاعل تفاعل غير عكسي حيثُ يمثل هذا الإنزيم أحد نقاط التحكم في عملية تحلل الجلوكوز.



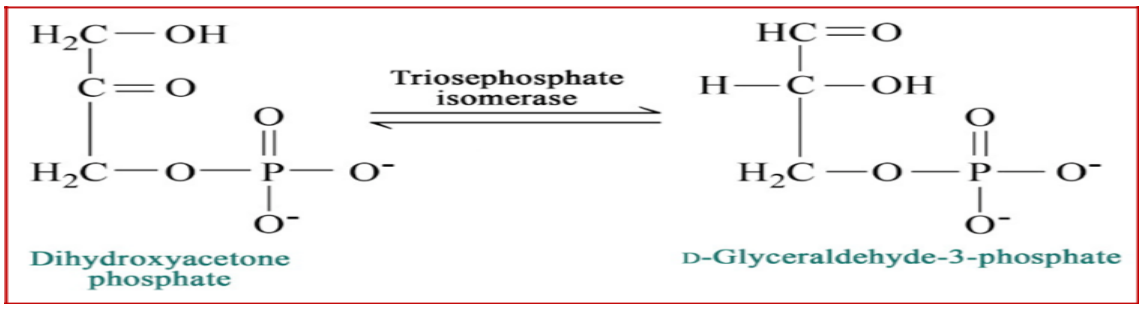
إنشطار مركب الفركتوز 6،1 ثنائي الفوسفات:

ينشطر الفركتوز 6،1 ثنائي الفوسفات (6 ذرات كربون) ليعطي جزيئين سكر ثلاثي وهما ثنائي هيدروكسي أسيتون فوسفات (3 ذرات كربون) وجليسر ألدهيد 3-فوسفات (3 ذرات كربون) بواسطة إنزيم الالدوليز Aldolase .



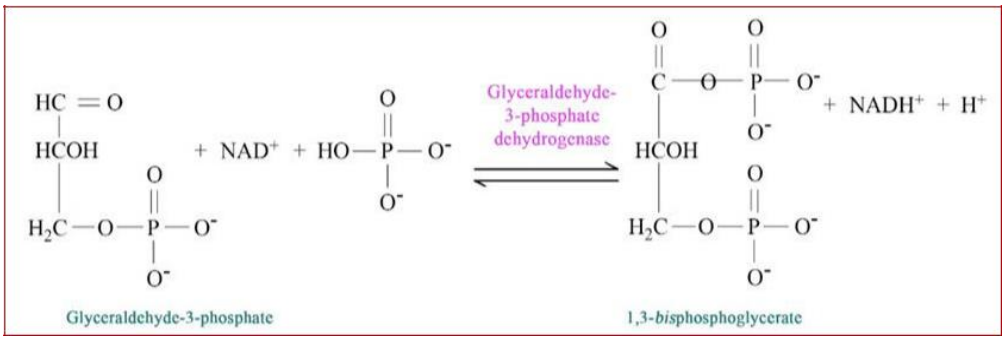
4-تحول السكريات الثلاثية الفوسفاتية:

بواسطة إنزيم الترايوز فوسفات أيزوميراز Triose Phosphate Isomerase يتم تحويل ثنائي هيدروكسي أسيتون فوسفات إلى جليسر ألدهيد 3-فوسفات الذي يقوم بدوره بإكمال عملية تحلل الجلوكوز. وبهذا تكون حصيلة المرحلة التحضيرية هي تحلل جزيء جلوكوز إلى جزيئيين من الجليسر ألدهيد 3-فوسفات وإستهلاك جزيئيين من الطاقة ATP .



5-تحول الجليسرألدهيد 3-فوسفات إلى 3،1 ثنائي فوسفوجليسيريت:

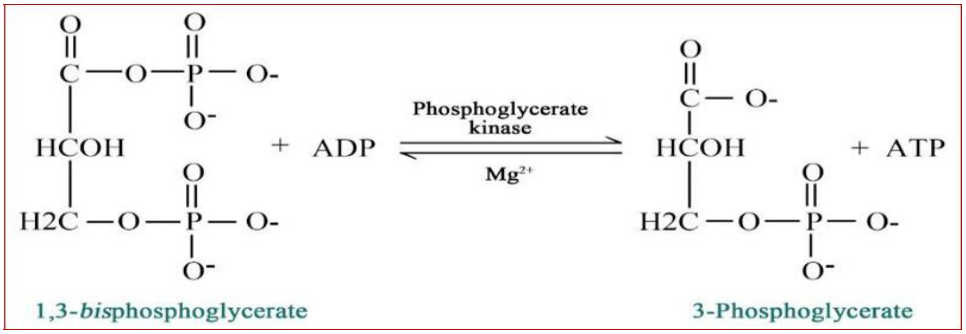
يحفز إنزيم الجليسرألدهايد 3-فوسفيت ديهيدروجينيز تحويل جزيئيين من جليسر ألدهيد-3فوسفات إلى جزيئين من 3،1 ثنائي فوسفوجليسيريت (مركب عالي الطاقة) .هذا التفاعل يتم في وجود العامل المساعد نيكوتين أميد أدينين ثنائي النيوكليوتيد (NAD^+) حيث ينتقل إلكترون من الجليسر ألدهيد 3-فوسفات إلى الـ NAD^+.



6-تحول 3،1 ثنائي فوسفوجليسيريت إلى 3-فوسفوجليسيريت:

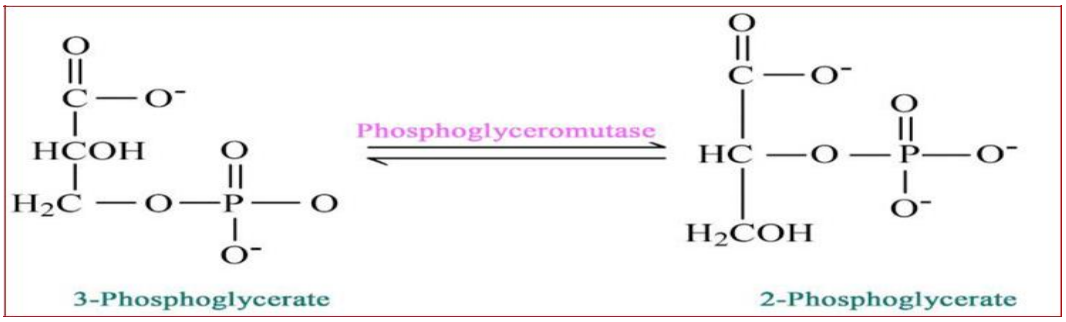
يحفز إنزيم فوسفوجلسيريد كاينيز Phosphoglycerate Kinase تحويل جزيئيين من 3،1 ثنائي فوسفوجليسيريت إلى 3-فوسفوجليسيريت وتكوين جزيئيين من الـ ATP.

ملاحظة: تنتقل مجموعة الفوسفات من المادة الأساس إلى الـ ADP بدون نقل إلكترونات.



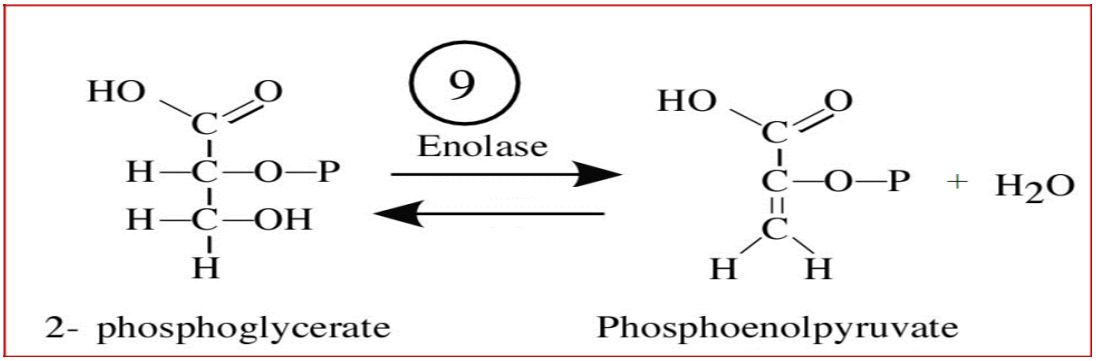
7-تحول 3-فوسفوجليسيريت إلى 2-فوسفوجليسيريت:

يحفز إنزيم فوسفوجليسروميوتيز Phosphoglyceromutase تحويل 3-فوسفو كليسريت إلى 2-فوسفوجليسيريت عن طريق نقل مجموعة الفوسفات من ذرة الكربون رقم 3 إلى رقم 2 في وجود أيونات المغنسيوم.



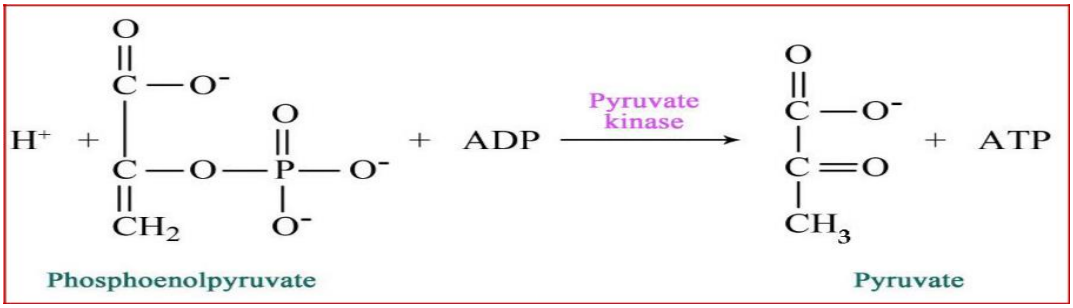
8-إزالة جزيء ماء من 2-فوسفوجليسيريت:

يحفز إنزيم الإنوليز)Enolase(إزالة جزيء ماء من 2-فوسفوجليسيريت وتكوين الفوسفوإينول بايروفيت (مركب عالي الطاقة) يحتاج هذا الإنزيم إلى وجود أيون الماغنسيوم Mg^{+2} أو المنغنيز .



9-تكوين البيروفيت:

يحفز إنزيم البيروفيت كاينيز Pyruvate Kinase إنتقال مجموعة الفوسفات ذات الطاقة العالية من مركب الفوسفوإينول بايروفيت إلى الـ ADP وإنتاج البيروفيت في تفاعل غير عكسي. يحتاج هذا الإنزيم إلى وجود أيون البوتاسيوم K^{+} بالإضافة إلى المغنسيوم Mg^{+2} والمنجنيز . Mn^{+2}



محصلة الطاقة الناتجة من تحلل جزيء من الجلوكوز إلى جزيئيين من البيروفيت:

- **استهلاك** 1 ATP في الخطوة رقم 1.
- **استهلاك** 1 ATP في الخطوة رقم 3.
- **إنتاج** جزيئيين من الـ NADH (باعتبار أن الجلوكوز إنشطر إلى جزئيين) في الخطوة رقم 6. كل جزيء من الـ NADH عند أكسدته يعطي 3 ATP .
- **إنتاج** 2 ATP في الخطوة رقم 7 (باعتبار أن الجلوكوز إنشطر إلى جزئيين من الجليسر ألدهيد 3–فوسفات) وكل جزء يعطي 1 ATP .
- **إنتاج** 2 ATP في الخطوة رقم 10 (باعتبار وجود جزئيين من 3–فوسفو إنول بيروفيت) ليعطي كال منهما 1 ATP .

وبالتالي يكون الناتج: 8ATP =2+2+ 6+1−1−

تنظيم عملية تحلل الكلوكوز

يلاحظ أن جميع المركبات الوسيطة بين الجلوكوز والبيروفيت هي مركبات مفسفرة.أي أنها متأينة عند درجة حموضة الخلية مما يجعلها مشحونة بشحنة سالبة تمنعها من المرور خلال الأغشية الخلوية لتظل في سايتوبلازم الخلية.أما البيروفيت أو الاكتيت المتكون يمكن أن يمر خلال الأغشية الخلوية؛ فنظرا لعدم فسفرة البيروفيت فإنه يمتلك القدرة على الانتقال من السيتوبلازم إلى الميتوكوندريا ليبدأ الأكسدة الهوائية (دورة كربس) .

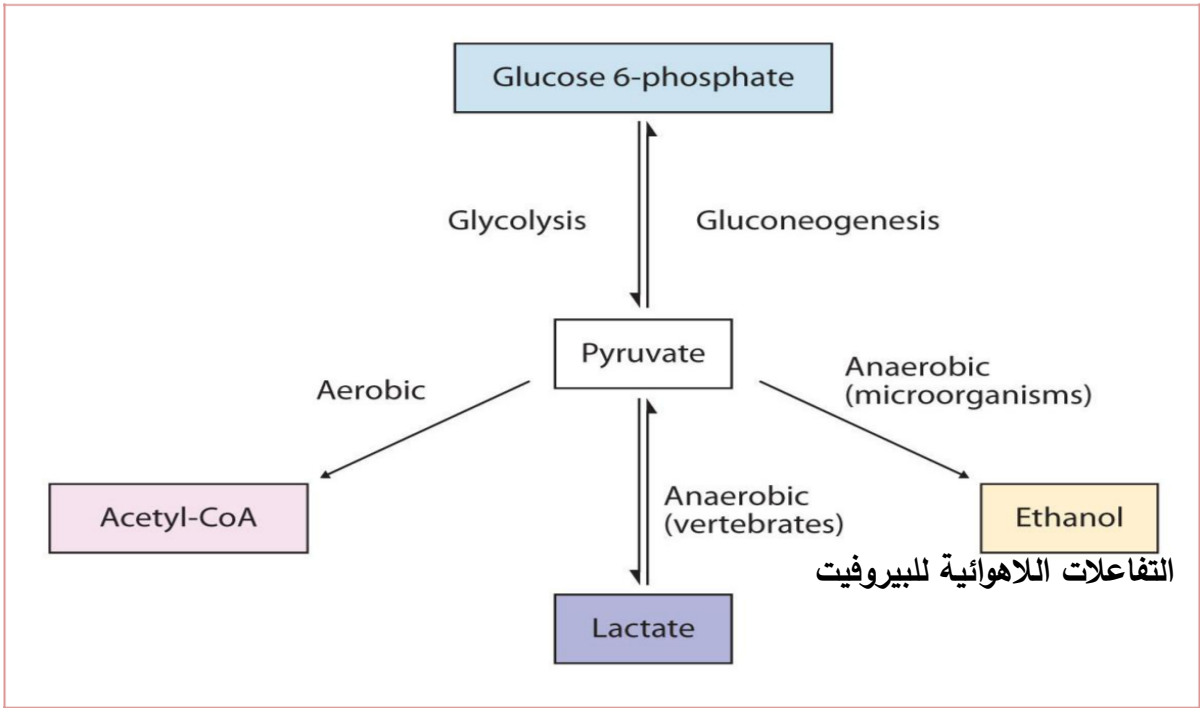
يلاحظ أن جميع التفاعلات الإنزيمية في الجليكوليسيس هي تفاعلات عكسية ماعدا ثلاثة تفاعلات غير عكسية . هذه التفاعلات الثلاث هي تفاعلات منظمة لعملية تحلل الجلوكوز وُتسمى بالتفاعلات المحددة لمعدل التفاعل (Rate-Limitting-Steps).هذه التفاعلات المنظمة تتم بواسطة انزيمات :

-هكسوكاينيز

-فوسفوفركتوكاينيز

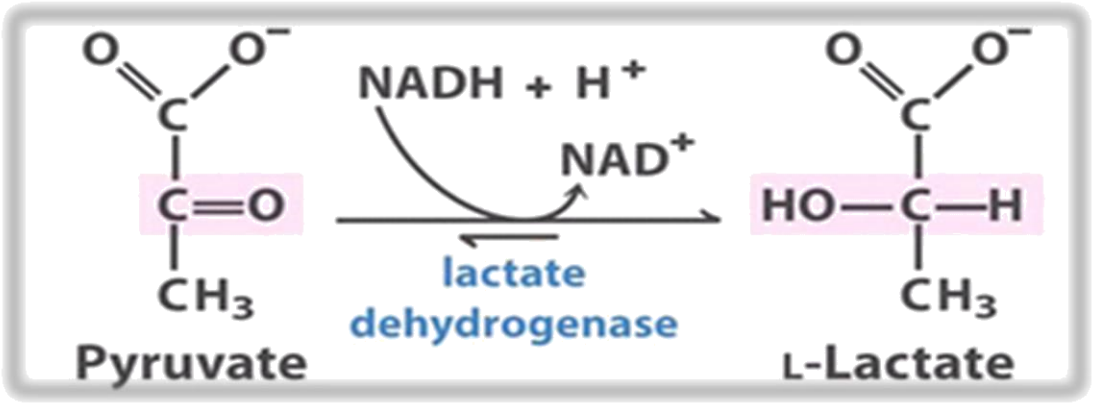
-بيروفيت كاينيز

مصير البيروفيت الناتج من تحلل الجلوكوز



التفاعلات اللاهوائية للبيروفيت

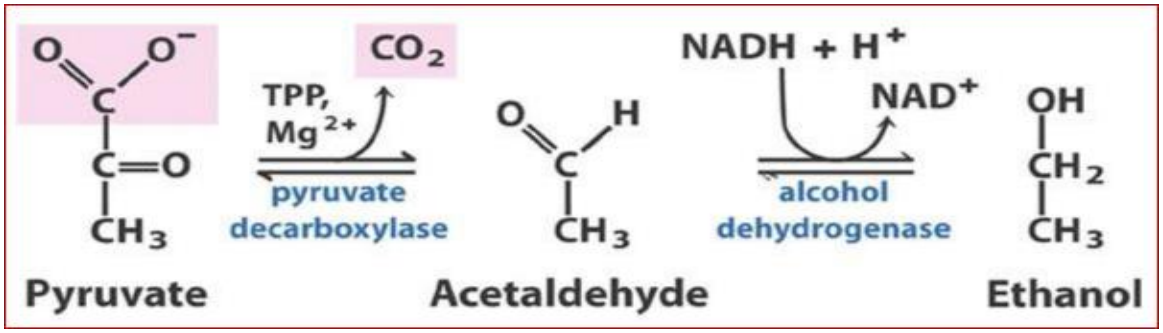
يحول إلى البيوفيت , وعند غياب الأكسجين (ظروف لا هوائية), في كل من العضلات أو في البكتيريا إلى حامض اللاكتيك Lactic acid بواسطة إنزيم الاكتيت ديهيدروجينيز LDH

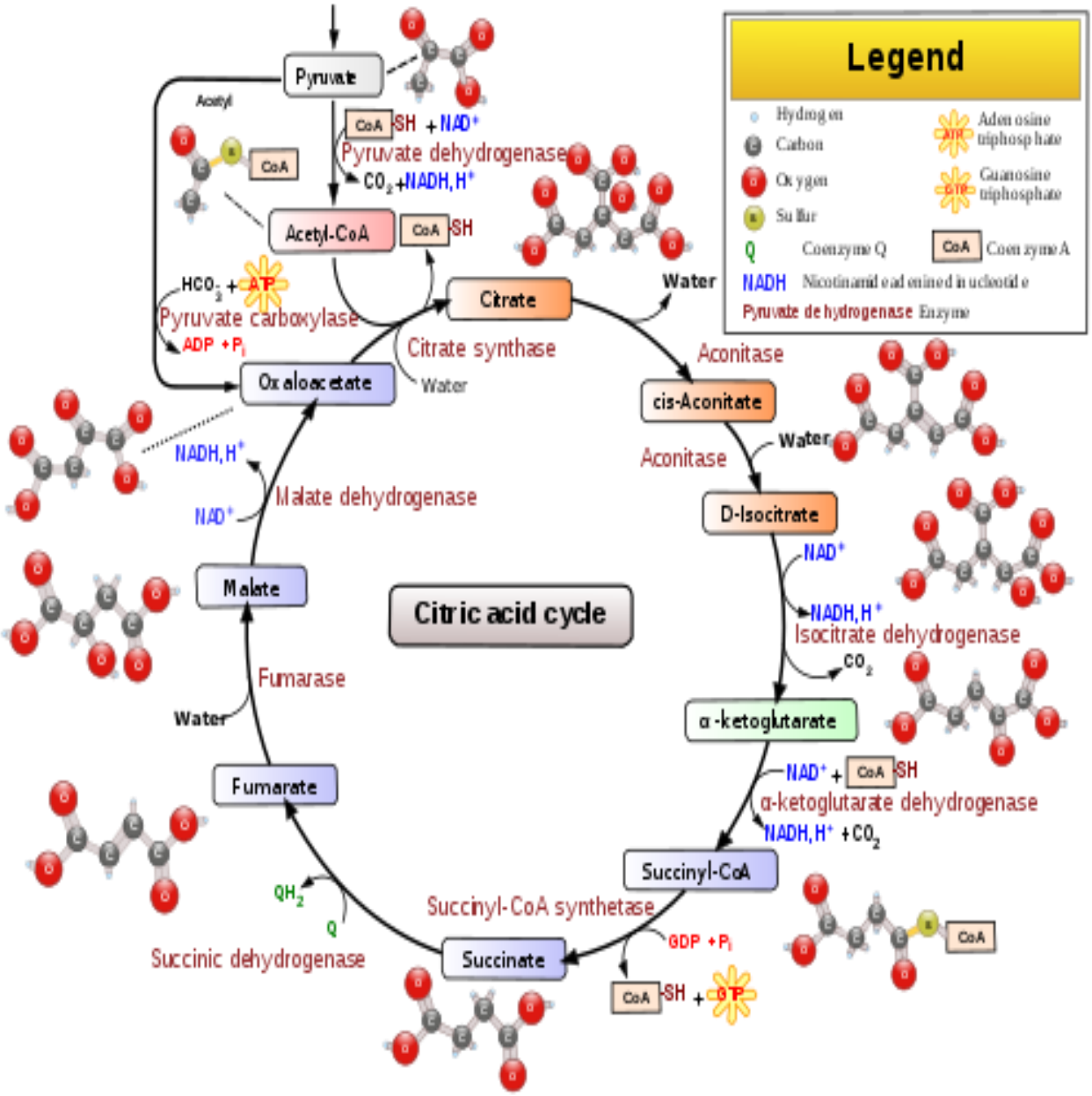


يحول إلى إيثانول: يتم في بعض الكائنات الدقيقة مثل الخميرة وفي غياب الأكسجين تحويل أي (تخمُر) البيروفيت إلى كحول الايثانول في خطوتين:

1- تحويل البيروفيت إلى أسيتلدهيد بفقد ثاني أكسيد الكربون بواسطة إنزيم بيروفيت ديكربوكسيليز في وجود أيونات المغنيسيوم.

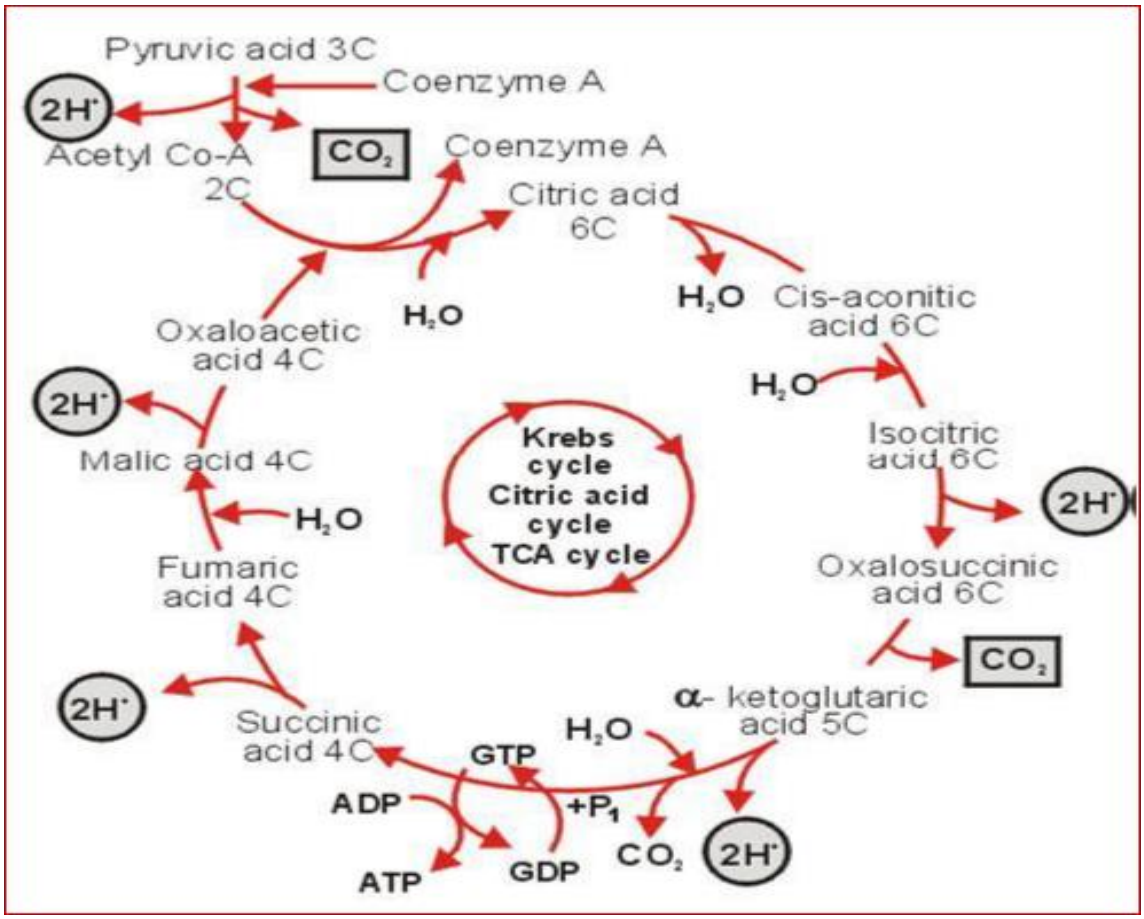
2- إختزال الاسيتلدهيد إلى كحول إيثيلي مع أكسدة الـ NADH إلى NAD^+.




Legend
Hydrogen
Carbon
Oxygen
Sulfur
Coenzyme Q
NADH
Pyruvate dehydrogenase
Adenosine triphosphate
Guanosine triphosphate
Coenzyme A
Nicotinamid ead enined inucleotid e
Enzyme
Citric acid cycle
Pyruvate
Acetyl
CoA
SH + NAD+
Pyruvate dehydrogenase
CO2 + NADH, H+
Acetyl-CoA
HCO3 + ATP
Pyruvate carboxylase
ADP + Pi
Oxaloacetate
Citrate synthase
Water
Citrate
Aconitase
cis-Aconitate
Water
Aconitase
D-Isocitrate
NAD+
NADH, H+
Isocitrate dehydrogenase
CO2
α-ketoglutarate
NAD+ + CoA SH
α-ketoglutarate dehydrogenase
NADH, H+ + CO2
Succinyl-CoA
Succinyl-CoA synthetase
GDP + Pi
CoA SH + GTP
Succinate
QH2
Q
Succinic dehydrogenase
Fumarate
Water
Fumarase
Malate
NADH, H+
NAD+
Malate dehydrogenase

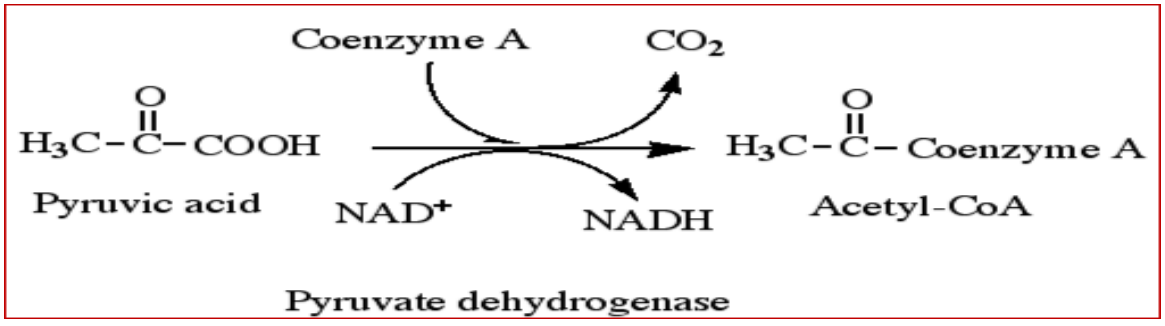
التفاعلات الهوائية للبيروفيت

ملخص دورة كربس



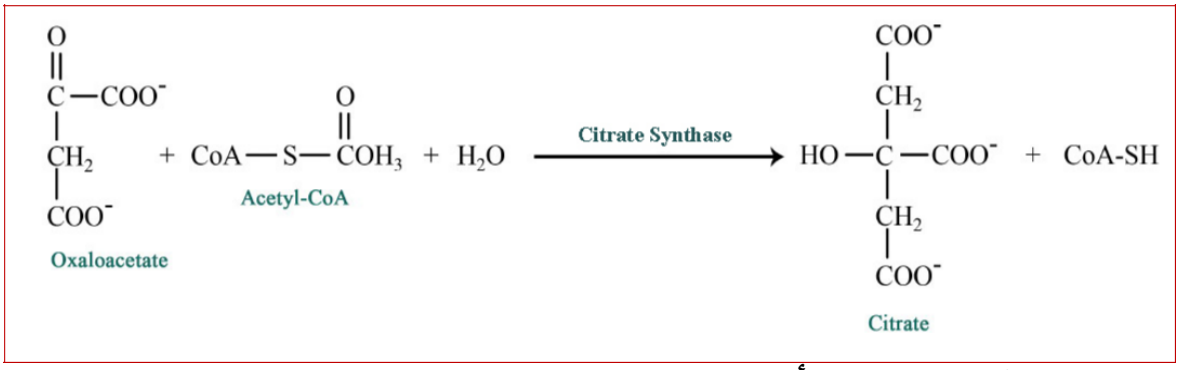
دورة كريبس Krebs Cycle

تمثل دورة كربس المسار الأخير في أكسدة الكربوهيدرات، الليبيدات، والبروتينات حيث يتم فيها أكسدة أستيل المرفق الإنزيمي A (**Acetyl Co A**) إلى ثاني أكسيد الكربون + ماء + إنتاج طاقة. ففي وجود الأكسجين، ينتقل البيروفيت إلى الميتوكوندريا ليتحول إلى أستيل المرفق الإنزيمي A الذي بدوره يبدأ سلسة تفاعلات دورة كربس.



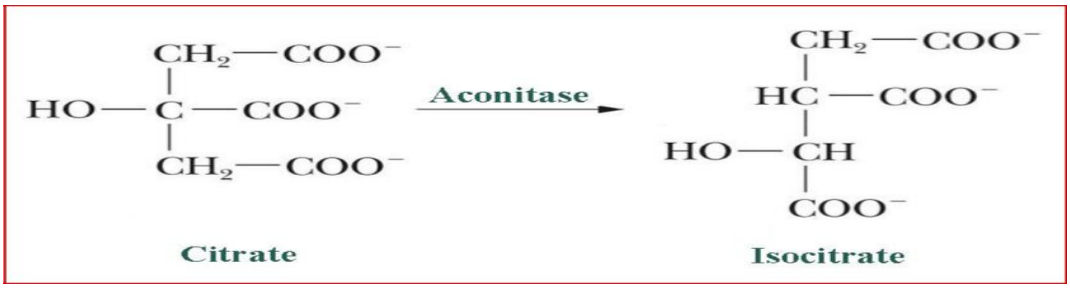
1-تفاعل الاستيل مرفق الإنزيمي A لتكوين السترات:

يحفز إنزيم سترات سينثيز Citrate Synthase تفاعل الاستيل مرفق الإنزيمي A مع أوكسالو أسيتات لتكوين السترات. يثبط هذا الإنزيم بواسطة الـ NADH أو الـ ATP.



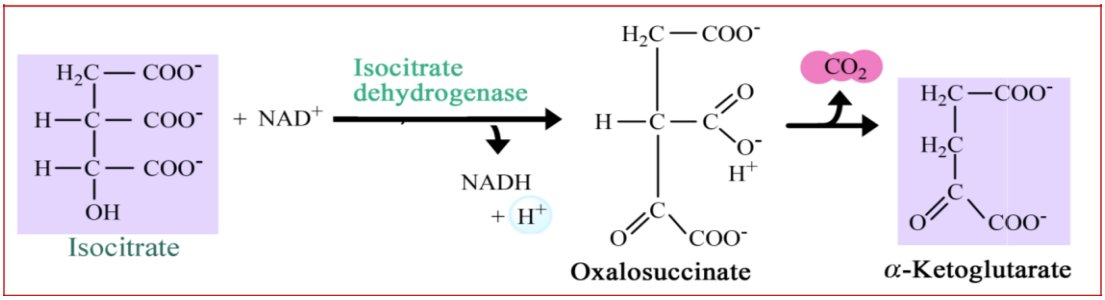
2- تحول السترات إلى أيزوسيترات:

يحفز إنزيم أكونيتيز Aconitase تحول السترات إلى أيزوسيترات عن طريق إزاحة جزيء ماء. يحتاج هذا الإنزيم إلى أيونات الحديد كعامل مساعد.



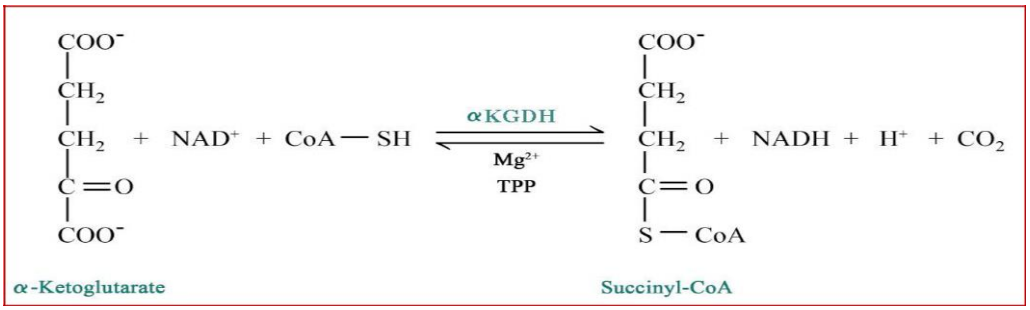
3- نزع مجموعة كربوكسيل من اللايزوسيترات:

يحفز إنزيم الايزوسيترات ديهيدروجينيز Isocitrate Dehydrogenase نزع مجموعة الكربوكسيل من اللايزوسيترات (6 ذرات كربون) ليكون α- كيتوجلوتاريت (5 ذرات كربون). أثناء التفاعل يتكون مركب وسيط وهو أوكسالوسكسنيت الذي يتحلل بسرعة ليعطي α- كيتوجلوتاريت.



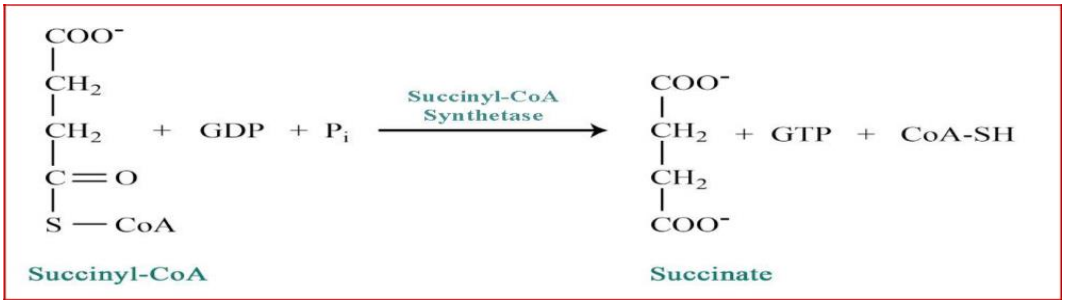
4- نزع مجموعة كربوكسيل من α- كيتوجلوتاريت:

يحفز إنزيم α- كيتوجلوتاريت ديهيدروجينيز Alpha ketoglutarate Dehydrogenase نزع مجموعة الكربوكسيل من α- كيتوجلوتاريت **(5** ذرات كربون**)** ليتحول إلى ساكسينيل مرفق إنزيمي A (4 ذرات كربون) . هذا التفاعلُ ينتج طاقة في شكل NADH.



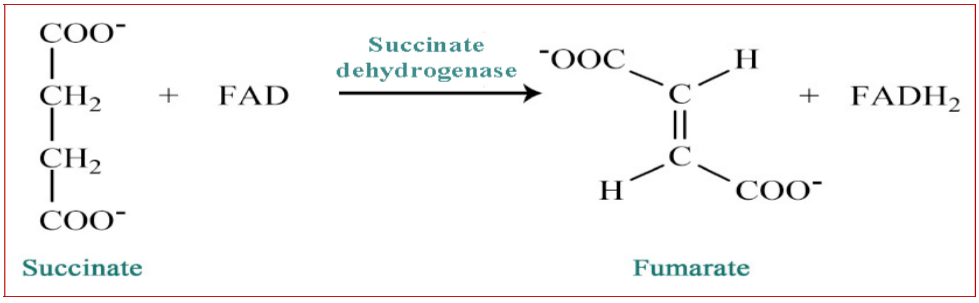
5- تكوين مركب الساكسينات وتوليد جزيء طاقة GTP

يحفز إنزيم الساكسينات ثايوكينيز Succinate Thiokinase كسر رابطة الثايواستر عالية الطاقة في مركب الساكسينيل مرفق إنزيمي A ليعطي مركب الساكسينات وتوليد طاقة بصورة الـ GTP.



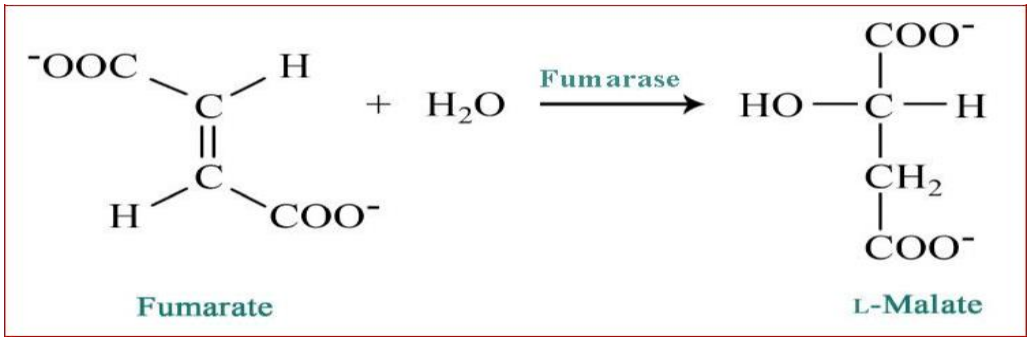
6- أكسدة الساكسينات إلى فيومارات:

يحفز إنزيم الساكسينات ديهيدروجينيز Succinate Dehydrogenase أكسدة الساكسينات وتحويله إلى فيومارات. يحتاج هذا الإنزيم للـ FAD كعامل مساعد والذي يستقبل جزيء من الهيدروجين المزاح من مركب الساكسينات ليُختزل ويعطي الـ $FADH_2$.



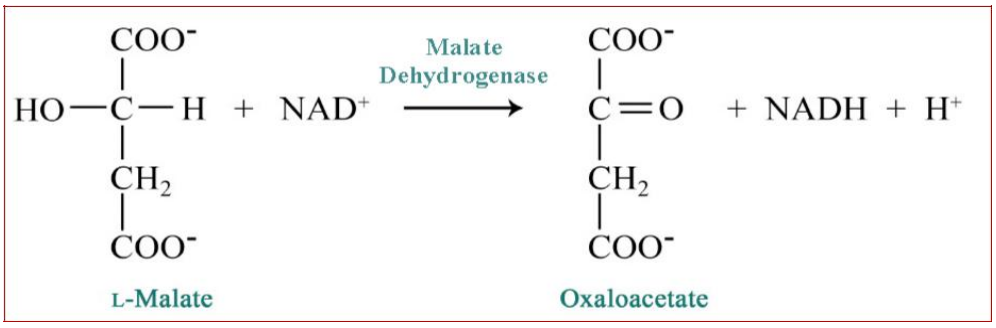
7- إنتاج المالت:

يحفز إنزيم الفيومارات هيدريتز Fumarate Hydratase ويُطلق عليه الفيوماريز Fumarase إضافة جزيء ماء للفيومارات ليعطي المماكب اليساري للماليت L-malate .



8- أكسدة الماليت إلى أوكسالوأسيتات:

يحفز إنزيم المالت ديهيدروجينيز Malate Dehydrogenase أكسدة جزيء من المالت ليعطي أوكسالوأسيتات. يستخدم هذا الإنزيم العامل المساعد الـ NAD^+ كمستقبل للهيدروجين ليتحول بدوره إلى NADH.



محصلة الطاقة الناتجة من دورة كريبس

- إنتاج جزيء واحد من الـ NADH في الخطوة رقم 3 ليعطي 3 ATP.
- إنتاج جزيء واحد من الـ NADH في الخطوة رقم 4 ليعطي 3 ATP.
- إنتاج جزيء واحد من الـ GTP في الخطوة رقم 5 والذي يتحول إلى جزيء واحد من الـ ATP
- إنتاج جزيء واحد من الـ $FADH_2$ في الخطوة رقم 6 ليعطي 2 ATP.
- إنتاج جزيء واحد من الـ NADH في الخطوة رقم 8 ليعطي 3 ATP.

وبالتالي يكون ناتج تحول جزيء واحد من البيروفيت إلى ثاني أكسيد الكربون وماء تساوي:

3 + 3 + 1 +2 +3 = 12 ATP

خطوت تحول جزيئين من البيروفيت إلى جزيئين من الاستيل المرفق الإنزيمي A تنتج 6 ATP

ويكون ناتج تحول جزيء الجلوكوز إلى 2 جزيء بيروفيت يساوي 8 ATP.

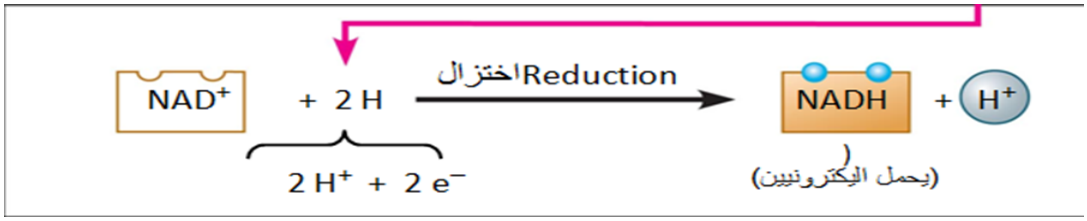
وبالتالي تحلل جزيء من جلوكوز إلى ثاني أكسيد الكربون وماء تساوي:

8 + 6 + (12x2) = 38 ATP

سلسلة نقل الإلكترون وتكوين جزيئات ATP (الفسفرة التأكسدية)

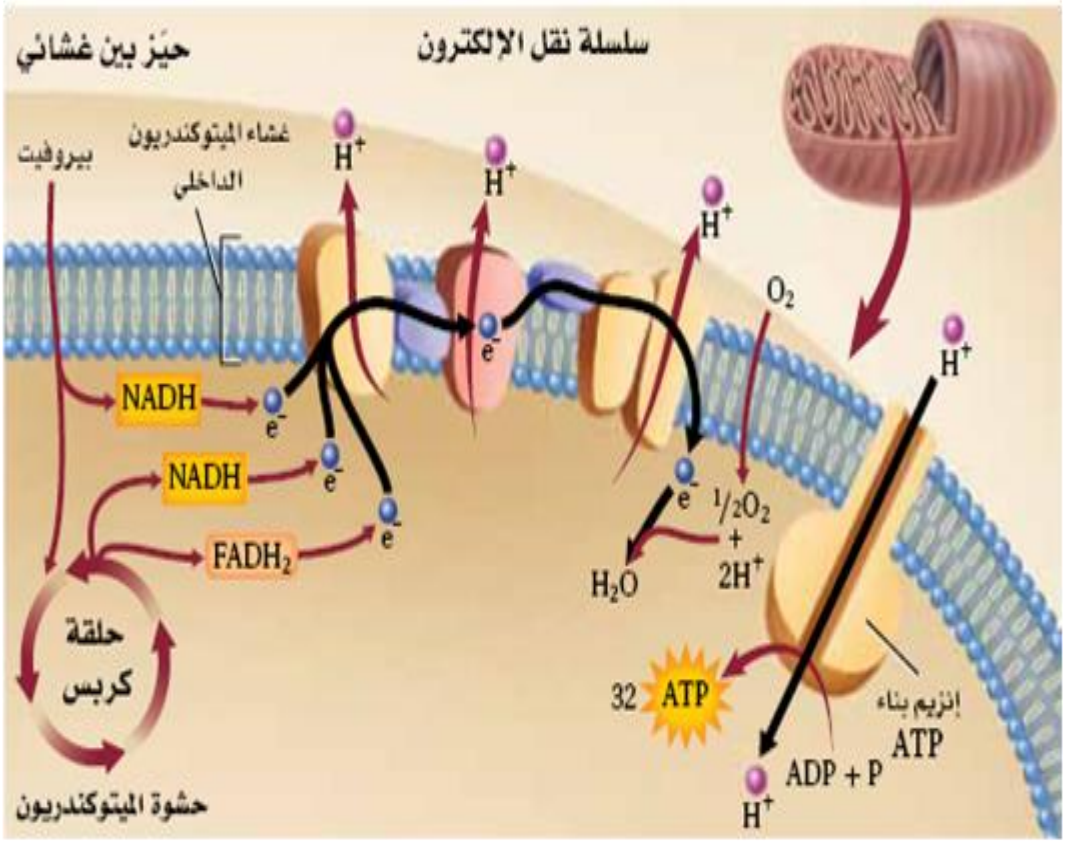
الفسفرة التأكسدية هي المرحلة الأخيرة في عملية التنفس الخلوي , العملية المستخدمة لإنتاج الطاقة في الكائنات الهوائية **Aerobic organism**. تحدث الفسفرة التأكسدية دائما بعد التحلل السكري ودورة كريبس **Krebs Cycle**, هي المرحلة الحاسمة , الأهم والأكثر فعالية في التنفس الخلوي . مقارنة بالمرحلتين السابقتين , واللتين تنتج من خلالهما جزيئات **ATP** محدودة , تنتج في عملية الفسفرة التأكسدية **30–36** جزيئة **ATP** لكل جزيئة كلوكوز مستهلكة.

1. يمر الهيدروجين والالكترونات العالية الطاقة والمحمولة على **FADH2** , **NADH** كما في الشكل.



تمر خلال تتابع من مساعدات الأنزيمات في الغشاء الداخلي للميتوكوندريا (تسمى السايتوكرومات) أو حاملات الالكترونات وتحمل الالكترونات على مستويات طاقة مختلفة وبمرور الالكترونات من جزئ لآخر من السايتوكرومات تنطلق طاقة لتكون جزيئات **ATP** من جزيئات **ADP** وتعرف بالفسفرة التأكسدية.

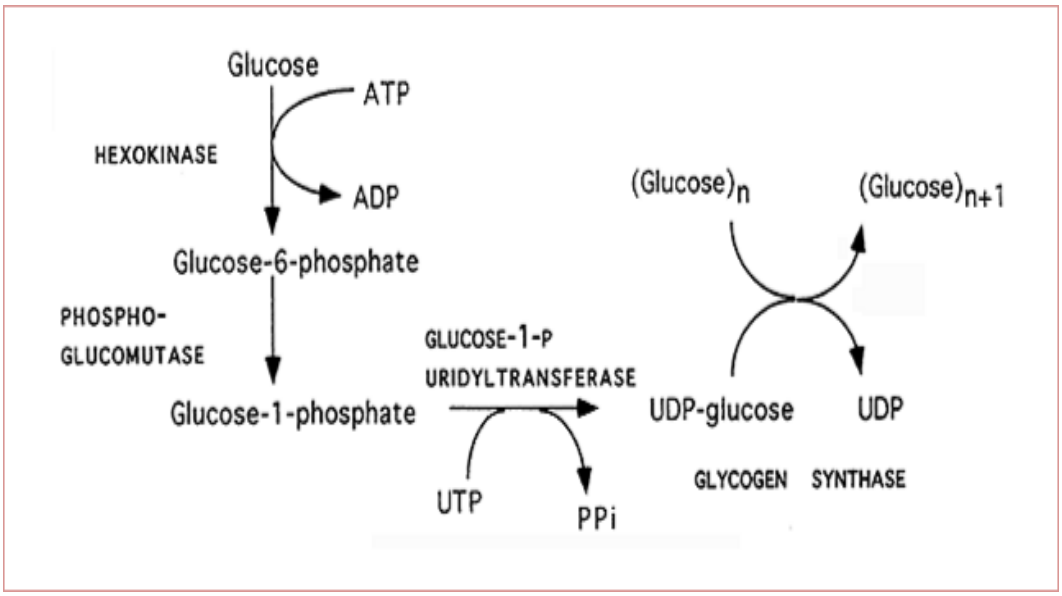
2. يعتبر الأوكسجين هو المستقبل الأخير في سلسلة نقل الالكترونات حيث يتحد كل إلكترونين مع بروتينين مع ذرة أكسجين لتكوين الماء.



بناء الجلايكوجين Glycogenesis

خطوات بناء الكلايكوجين

- يتم تحويل الجلوكوز إلى جلوكوز-6-فوسفات بواسطة إنزيم الجلوكوكينيز Glucokinase أو إنزيم الهكسوكينيز Hexokinase .
- يتحول الجلوكوز-6-فوسفات إلى جلوكوز-1-فوسفات عن طريق إنزيم فوسفوجلوكوميوتيز . Phosphoglucomutase
- يحول إنزيم اليوريديل ترانسفسريز Uridyl Transferase الجلوكوز-1-فوسفات إلى يوريدين ثنائي فوسفات الجلوكوز UDP-Glucose .
- يقوم الإنزيم الصانع للجاليكوجين Glycogen Synthase بتجميع جزيئات الجلوكوز على شكل سلاسل (روابط $\alpha-1\rightarrow4$) .
- تتفرع السلسلة بواسطة إنزيم الـ $\alpha-1\rightarrow6$ Transglycosylase والذي يقطع 6 وحدات من الجلوكوز ونقلها في سلسلة طرفية برابطة $\alpha-1\rightarrow6$.


Glucose
ATP
HEXOKINASE
ADP
Glucose-6-phosphate
PHOSPHO-
GLUCOMUTASE
Glucose-1-phosphate
GLUCOSE-1-P
URIDYLTRANSFERASE
UTP
PPi
UDP-glucose
UDP
GLYCOGEN SYNTHASE
(Glucose)n
(Glucose)n+1

α-1,4-glycosidic linkage
CORE
UDP-glucose + glycogen synthase
CORE
Glycogen branching enzyme
α-1,6-glycosidic linkage
CORE

إستحداث الجاليكوجين Gluconeogenesis

هي عملية تكوين الجلوكوز أو الجلايكوجين من مصادر غير كربوهيدراتية مثل الأحماض الامينية، حمض الاكتيك، البيروفيت، والجليسرول.تحدث في السيتوبالزم وليس في الميتوكوندريا، ويحدث 90% من هذه العملية في الكبد و10% في الكليتان.

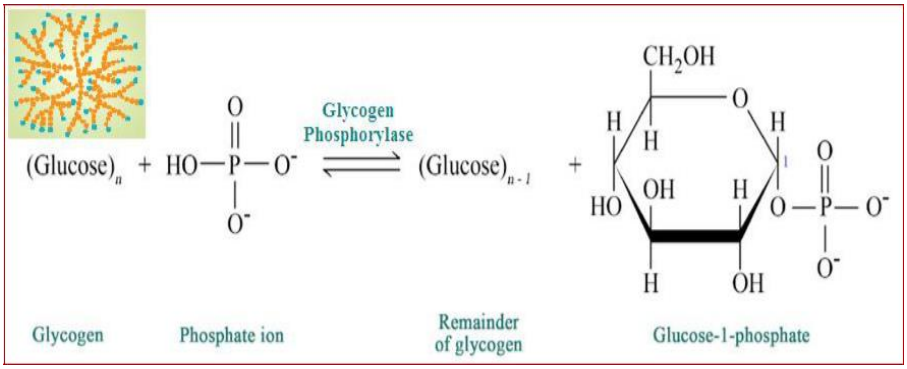
تحليل الجلايكوجين Glycogenolysis

- في هذه العملية يتم تكسير الجلايكوجين إلى وحدات متكررة من الجلوكوز والتي تدخل بدورها في عملية تحلل الجلوكوز Glycolysis لإنتاج الطاقة.
- الجلايكوجين الموجود في الكبد والعضلات يتم تكسيره بواسطة إنزيم جلايكوجين فوسفوريليز في الحالات التالية:

- في حالات الجوع الشديد والصيام حيث يقل الجلوكوز الذي يؤخذ من الطعام.
- في حالة داء السكري حيث لا يتم الاستفادة من الجلوكوز الموجود في الغذاء.

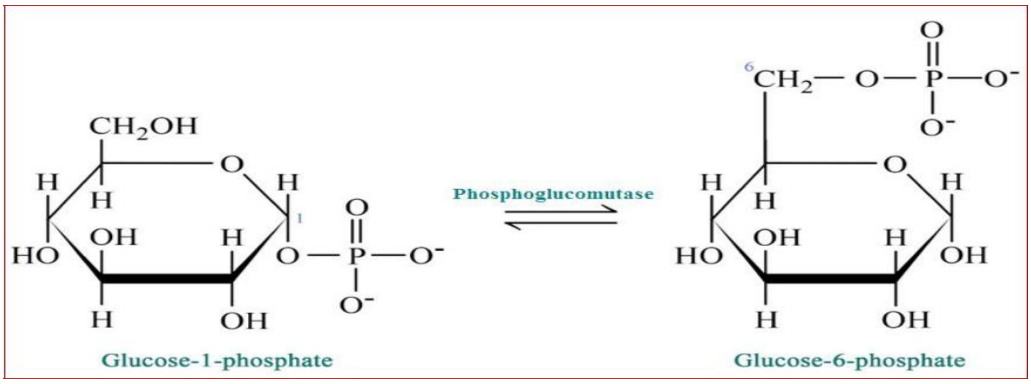
يعتبر إنزيم جلايكوجين فوسفوريليز منظم ومُتحكم بعملية تحلل الجلوكوز حيث أن هذا الإنزيم يحدد كمية جزيئات الجلوكوز الناتجة من تحلل الجلايكوجين والداخلة في عملية إنتاج الطاقة Glycolysis.

يتم تحلل الجلايكوجين بفعل إنزيم الجلايكوجين فوسفوريليز Glycogen Phosphorylase والذي يزيح جزيء جلوكوز من طرف السلسلة عن طريق ربطه بمجموعة فوسفات عند ذرة الكربون رقم 1 حتى يتبقى 4 جزيئات من الجلوكوز قبل نقطة التفرع.



- يقوم إنزيم جلوكوز ترانسفيريز Glucose transferase بنقل وحدات السكر الثلاثة المتبقية قبل موضع التفرع إلى سلسلة أخرى تاركا جزيء جلوكوز واحد مرتبط برابطة $\alpha-1\rightarrow6$ (موضع التفرع).

- يتم تحليل جزيء الجلوكوز في موضع التفرع بواسطة إنزيم أميلو-ألفا 6→1 جلوكوسيداز . Amylo-α-1 →6 Glucosidase
- يتم تحويل جميع وحدات الجلوكوز-1 فوسفات الناتجة من عملية تحلل الجلايكوجين إلى جلوكوز-6 فوسفات عن طريق إنزيم الفوسفوجلوكوميوتيز Phosphoglucomutase .



- تحول وحدات جلوكوز-6 فوسفات إلى جلوكوز عن طريق إنزيم الجلوكوز-6 فوسفاتيز Glucose-6-phosphatase والذي له القدرة على الخروج من الخلية إلى مجرى الدم.