



الجامعة السعودية  
كلية العلوم  
قسم الكيمياء الحيوية

جامعة الملك سعود

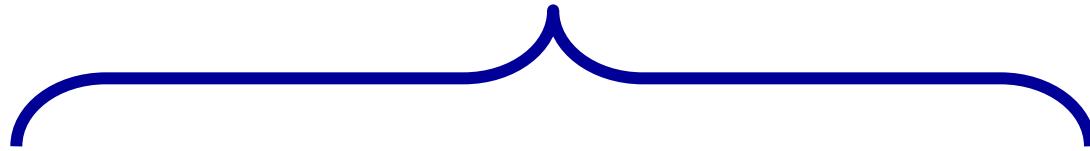
كلية العلوم

قسم الكيمياء الحيوية

# كيمياء حيوية عامة (BCH 101) أيض الكربوهيدرات

## CARBOHYDRATE METABOLISM

# التمثيل الغذائي (الميتابوليزم) (الأيض)

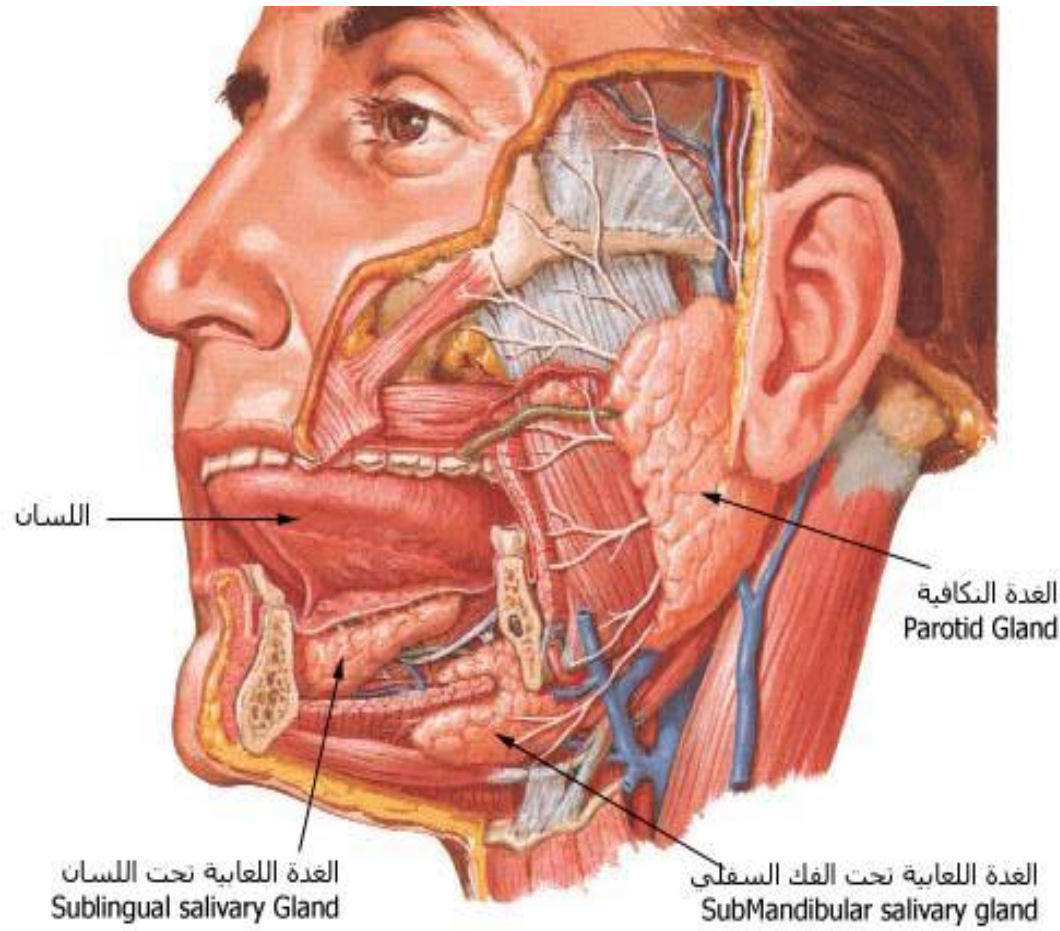


هدم

*Catabolism*

بناء

*Anabolism*

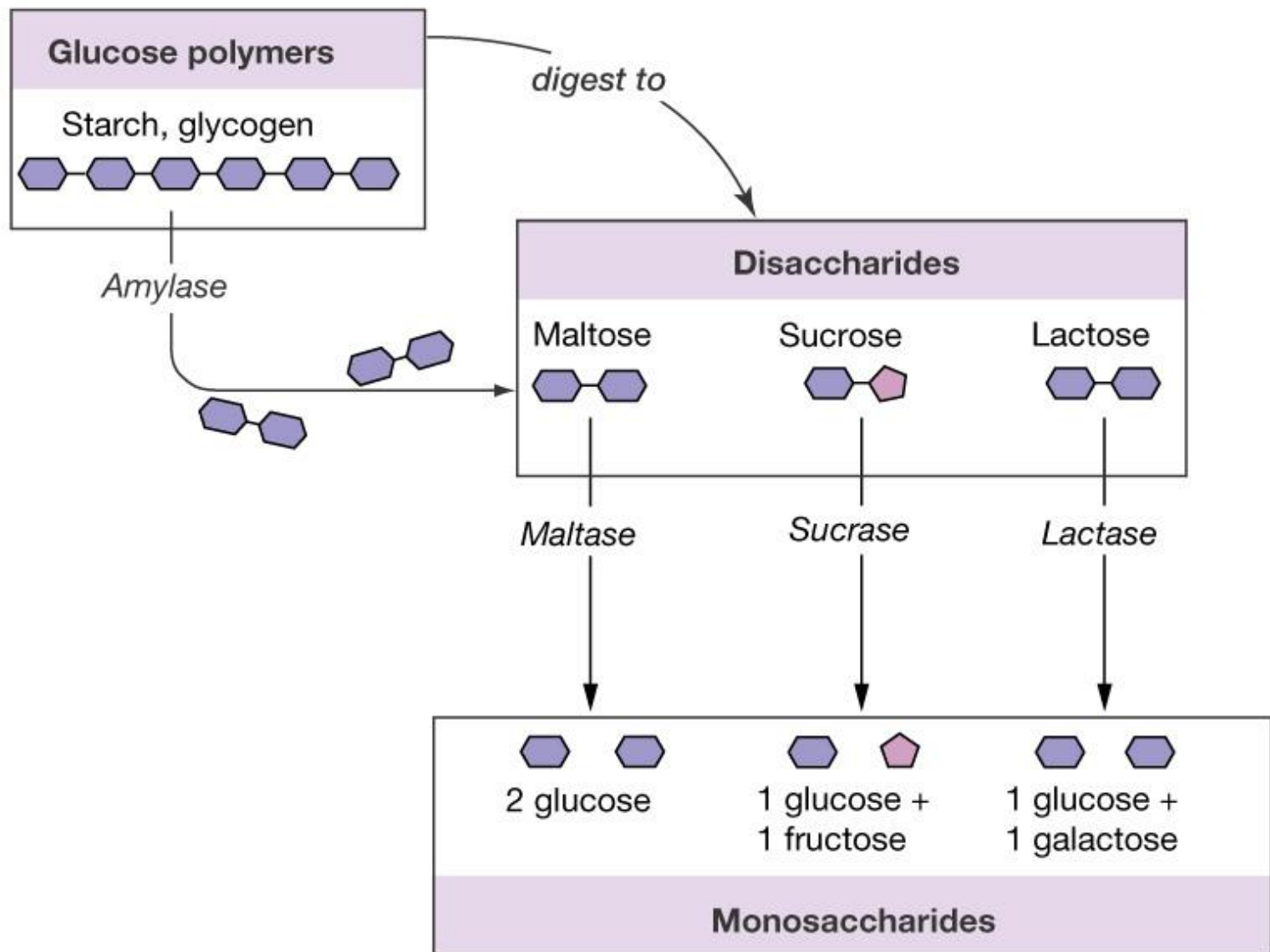


الغدد اللعابية في الإنسان

نشأ ← أميلوبكتينات ← إرثرو دكستريانات ← أكرو دكستريانات ← دكستريانات ← مالتوز

# إنزيمات هدم الكربوهيدرات

- 1- ألفا أميليز أو إندوجلايكوسيديز يكسر الرابطة  $(\alpha-1 \rightarrow 4)$
- 2- بيتا أميليز أو إكسوجلايكوسيديز يكسر الروابط الخارجية أو الطرفية
- 3- إنزيم أميلو 1،6-جلوكوسيديز يكسر التفرعات عند الرابطة  $(\alpha-1 \rightarrow 6)$
- 4- إنزيم السيلوليز أو بيتا جلوكوسيديز تحلل السيلولوز الرابطة  $(\beta-1 \rightarrow 4)$
- 5- جلايكوجين فوسفوريلاز يحلل الجلايكوجين بواسطة التحلل الفوسفوري
- 6- المالتيز يحلل المالتوز إلى 2 جلوكوز
- 7- السكريز يحلل السكروز إلى جلوكوز وفركتوز
- 8- اللاكتيز أو بيتا جلاكتوزيديز يحل اللاكتوز إلى جلوكوز وجلاكتوز





# تحلل السكريات الأحادية

بعد تحلل السكريات العديدة إلى سكريات أحادية تتحول الأحادية إلى جلوكوز أو فركتوز 6- فوسفات اللذان يدخلان في سلسلة من التفاعلات للتحلل:

أولا تفاعلات في السيتوبلازم ولا تحتاج إلى أكسجين، أي أكسدة لا هوائية  
(التحلل الجلايكولي Glycolysis)

يتحول الجلوكوز 6- فوسفات إلى فركتوز 6- فوسفات ثم إلى سلسلة من التفاعلات تنتهي بحمض البيروفيك

ثانياً: تفاعلات داخل الميتوكوندريا تحتاج إلى أكسجين أي أكسدة هوائية  
(دورة كربس أو حمض الستريك أو الأحماض ثلاثية الكربوكسيل)

وفيها يتحلل البيروفيك خلال عدة تفاعلات إلى  $CO_2$  وماء و طاقة

# التمثيل الغذائي للكربوهيدرات

1- تحلل الجلوكوز Glycolysis

2- دورة كريس

3- بناء الجلايكوجين Glycogenesis

4- استحداث الجلايكوجين Gluconeogenesis

5- تحلل الجلايكوجين Glycogenolysis

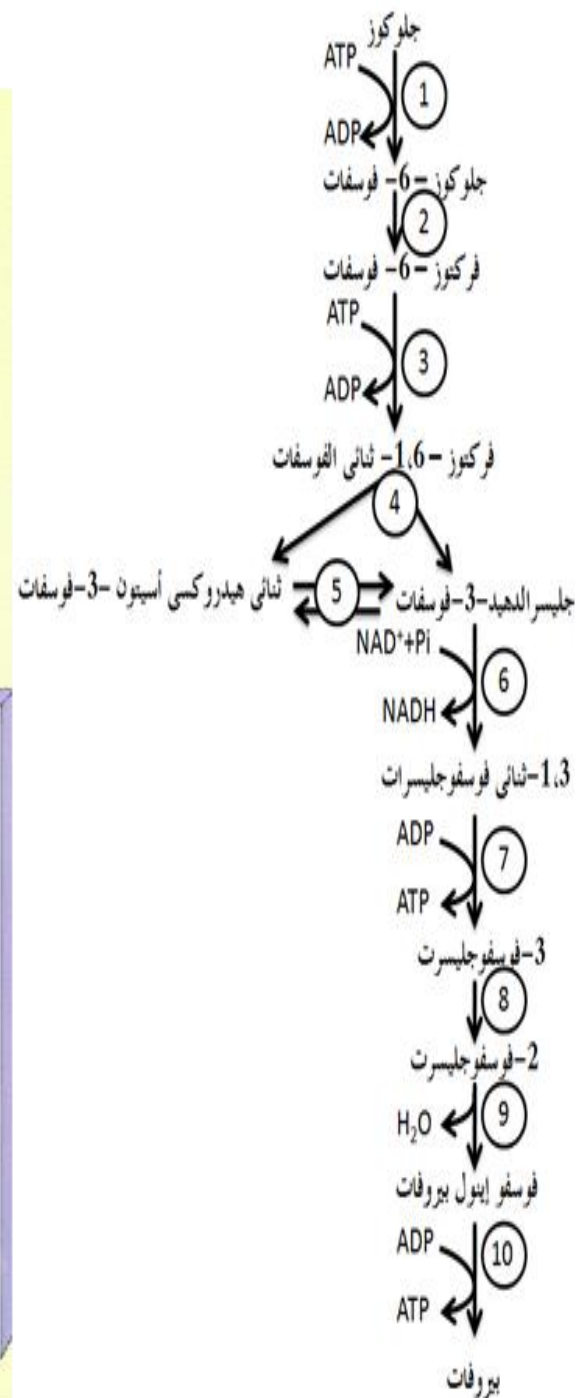
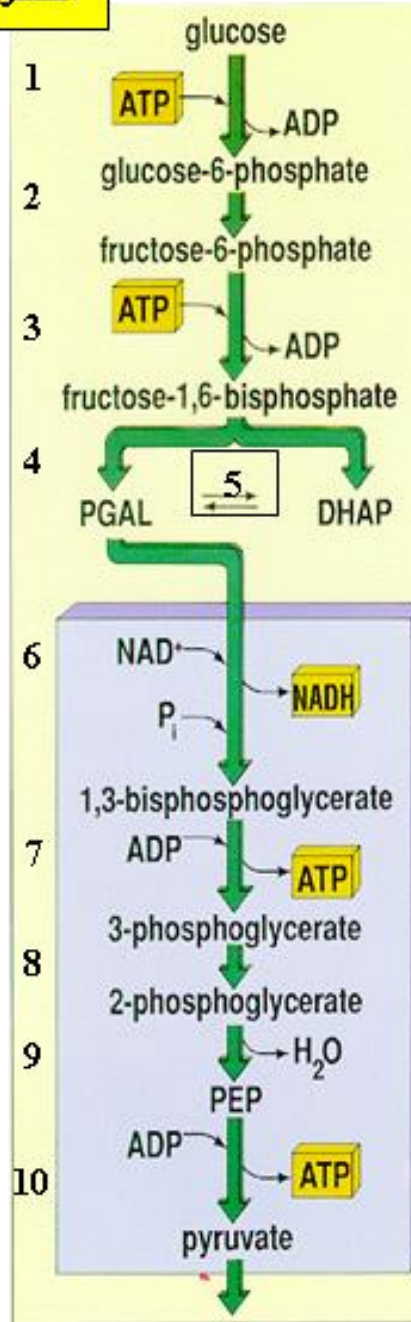
# التحلل الجللايكولي

## Glycolysis

هو تحول الجلوكوز (6 ذرات كربون) إلى جلوكوز  
6- فوسفات ثم إلى بيروفيت Pyruvate أو  
اللاكتات Lactate (2 جزئي  $\times$  3 ذرات كربون)  
من خلال عشرة تفاعلات محفزة إنزيمياً

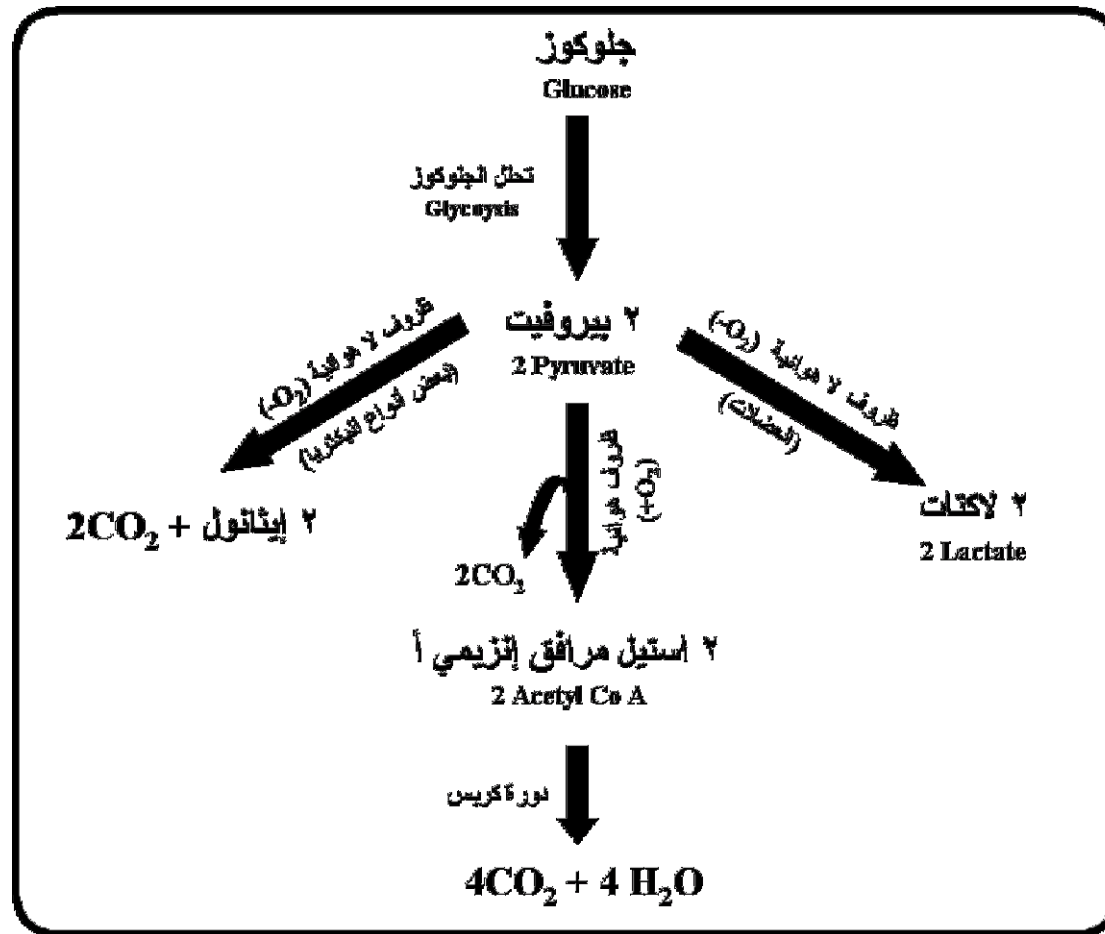


رقم  
الخطوة



# مصير البيروفيت الناتج من تحلل الجلوكوز

## Fate of pyruvate produced from glycolysis



شكل (□-□): مسارات أيض البيروفيت الناتج من تحلل الجلوكوز في كائنات مختلفة

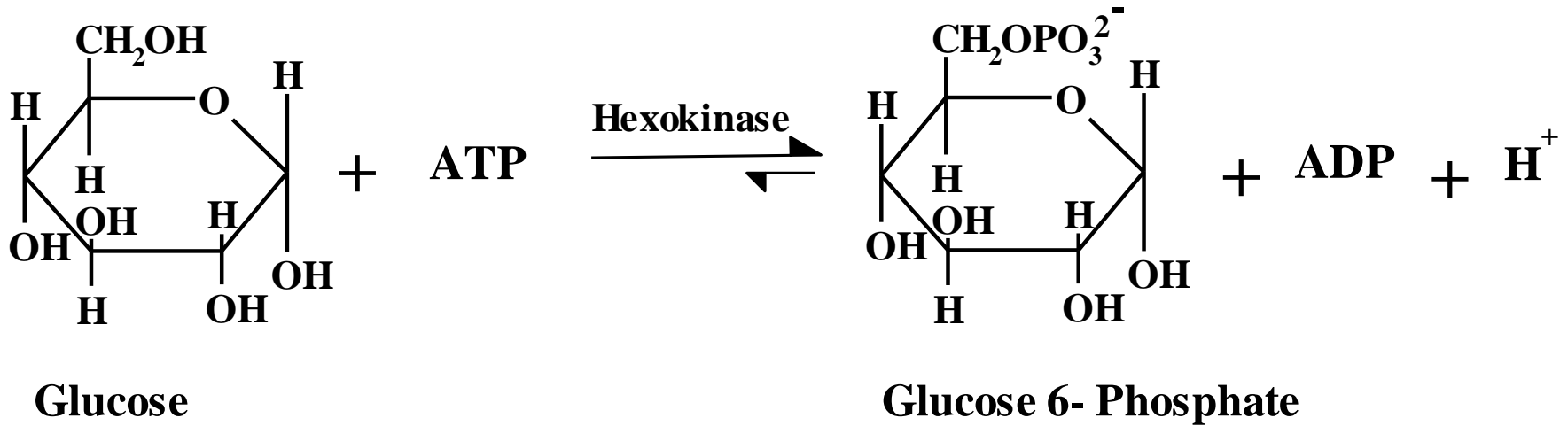


يتم التحلل الجلايكولي في مرحلتين:

المرحلة الأولى: تتكون من خمسة تفاعلات (1-5) تبدأ بالجلوكوز وتنتهي بالجليسيرالدهايد 3- فوسفات ويتم فيها استهلاك طاقة

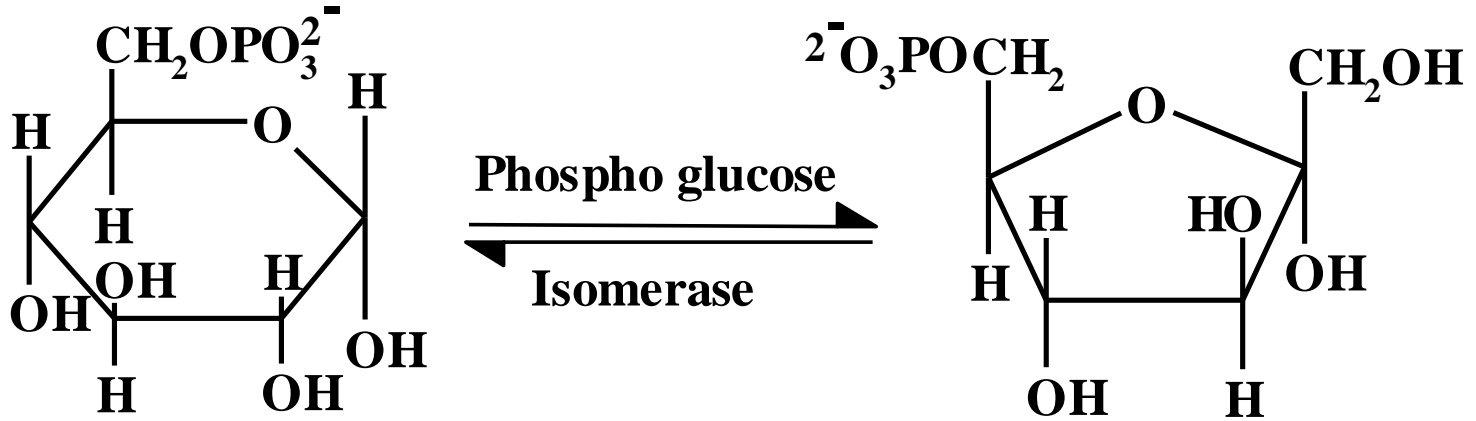
المرحلة الثانية: تتكون من خمسة تفاعلات (6-10) تبدأ بتحول بالجليسيرالدهايد 3- فوسفات وتنتهي بتكوين البيروفيت ويتم فيها إنتاج طاقة

1- تحول الجلوكوز إلى جلوكوز 6- فوسفات. داخل سيتوزول الخلية بواسطة إنزيم الهكسوكينيز Hexokinase في وجود أيون الماغنسيوم  $Mg^{2+}$  أو المنجنيز  $Mn^{2+}$  . ويتم استهلاك جزء ATP .



إذا زاد تركيز جلوكوز 6- فوسفات المنتج فإنه يثبط انزيم الهكسوكينيز . لذلك فهو يمثل أحد نقاط التحكم في التحلل الجلايكولي

## 2- تحول الجلوكوز 6- فوسفات إلى فركتوز 6- فوسفات بواسطة إنزيم فوسفو جلوكوز أيزوميريز Phosphoglucose Isomerase.

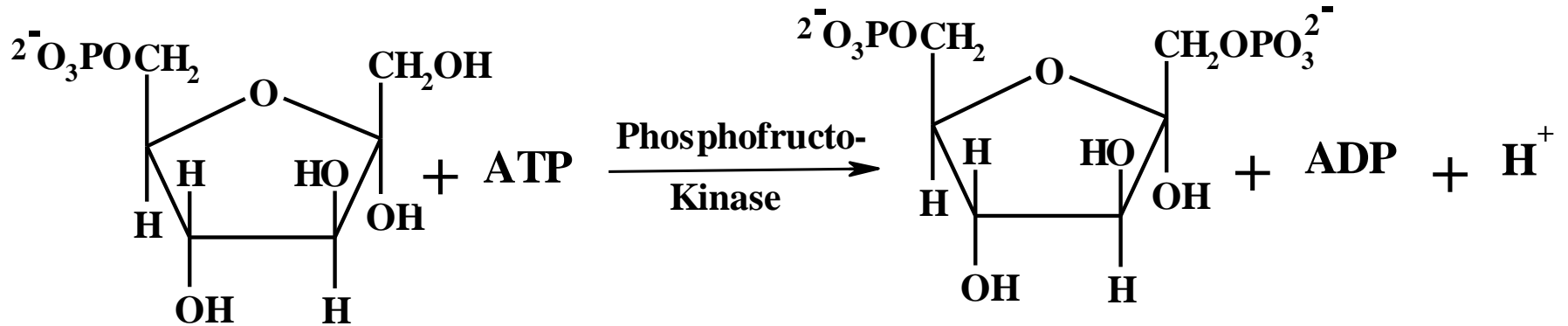


Glucose 6- Phosphate

Fructose 6- Phosphate

يعتبر الجلوكوز 6- فوسفات والفركتوز 6- فوسفات من المركبات التي تصل العديد من مسارات الأيض ولكن بعد تحول الفركتوز 6- فوسفات في الخطوة القادمة إلى فركتوز 6،1 ثنائي الفوسفات فإنه ليس له طريق إلا أن يكمل التحلل الجلايكولي

3- تحول فركتوز 6- فوسفات إلى فركتوز 6.1- ثنائي الفوسفات بواسطة إنزيم فوسفو فركتو كينيز **Phosphofructo Kinase** ويتم استهلاك جزيء آخر من **ATP**.

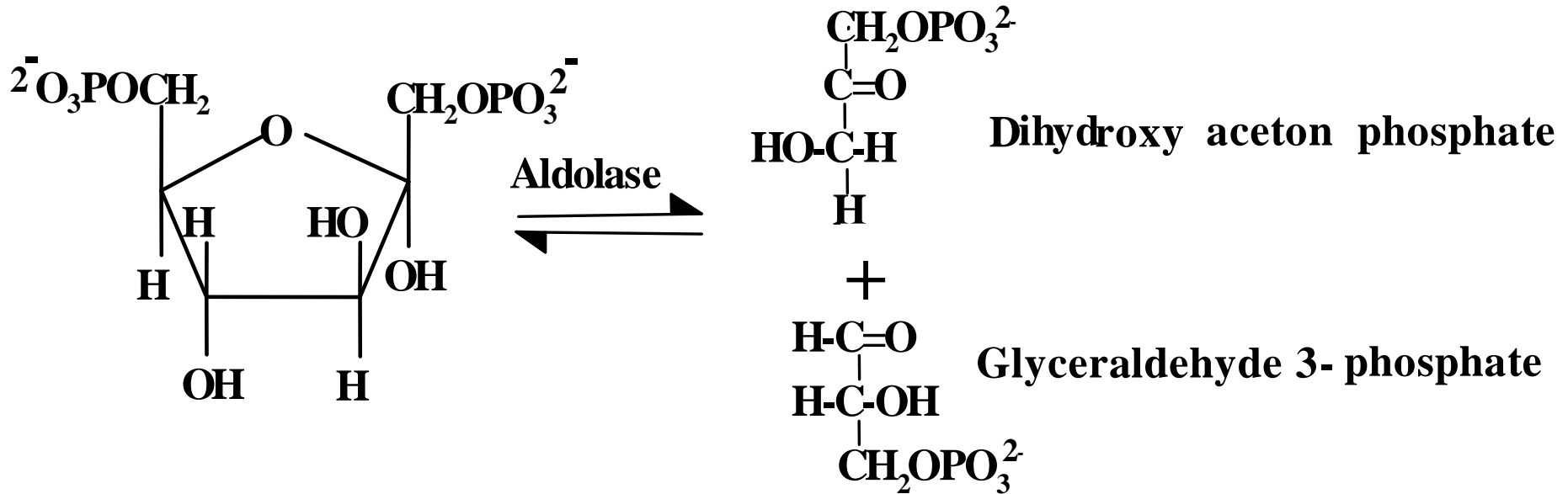


Fructose 6- Phosphate

Fructose 1,6- diphosphate



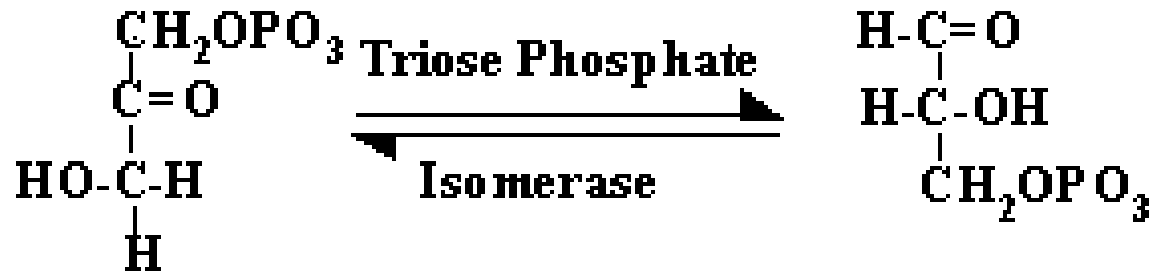
4- إنشطار الفركتوز 6.1- ثنائي الفوسفات (مركب يحتوي على 6 ذرات كربون) إلى ثنائي هيدروكسي أسيتون فوسفات (مركب يحتوي على 3 ذرات كربون) و جليسرالدهايد 3- فوسفات (مركب يحتوي على 3 ذرات كربون) بواسطة إنزيم الألدوليز Aldolase.



Fructose 1,6 diphosphate

في البكتريا والفطريات يحتاج الألدوليز إلى أيون الزنك بينما الحيوانات لا تحتاج له

5- تحول ثنائي هيدروكسي أسيتون فوسفات إلى جليسرالدهايد 3- فوسفات بواسطة إنزيم ترايوز فوسفات أيزوميريز **Triose Phosphate Isomerase** الذي يعيد تشكيل أحد المركبين إلى الآخر. وبهذا يكون حصيلة التفاعلات الخمسة هي تحلل جزيء واحد من الجلوكوز والحصول على جزيئين من جليسرالدهايد 3 فوسفات واستهلاك جزيئين من **ATP**.

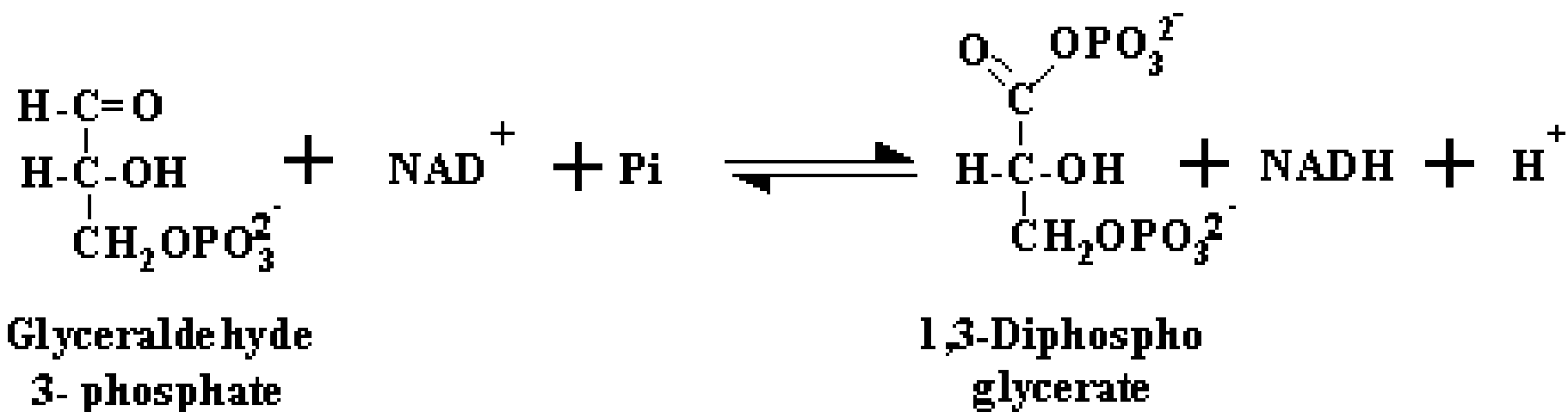


**Dihydroxyacetone Phosphate**

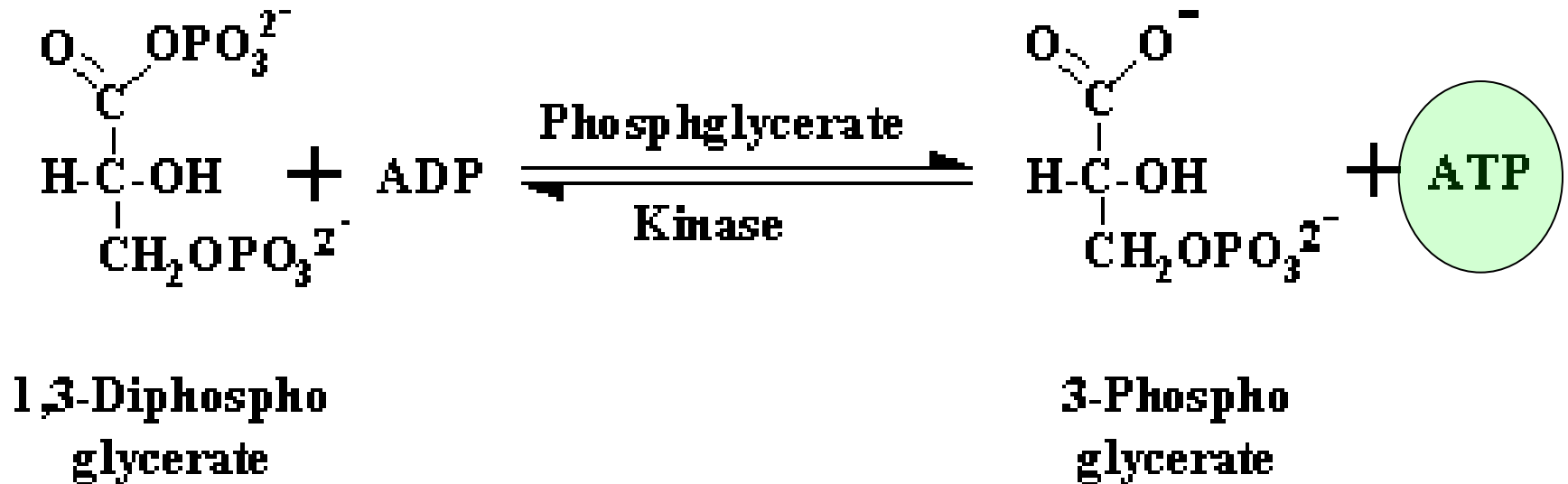
**Glyceraldehyde 3- Phosphate**

التفاعلات من 1-5 تفاعلات استهلاك طاقة  
يتكون جزيئين من جليسيرالدهايد 3- فوسفات  
يؤثر تركيز الجليسيرالدهايد على اتجاه التفاعل فلو كان التركيز منخفضاً يكون التفاعل في اتجاه اليمين

6- تحول جزيئان من جليسرالدهايد 3- فوسفات إلى جزيئين من 3.1 – ثنائي فوسفو جليسرات (مركب عالي الطاقة) بواسطة إنزيم **جليسرالدهايد 3- فوسفات دي هيدروجينيز** في وجود المرافق الإنزيمي نيكوتين أميد أدنين ثنائي النيوكليوتيد. ويتم كذلك انتقال الكترون من جليسيرالدهايد 3- فوسفات إلى  $\text{NAD}^+$  وهذا التفاعل ماص للطاقة

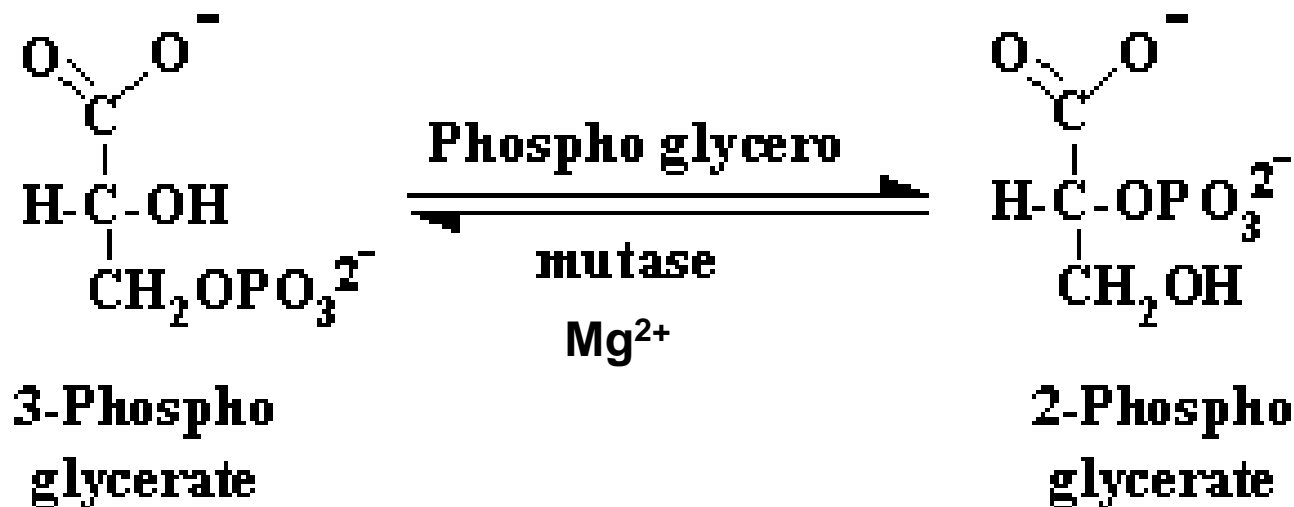


7- تحول جزيئان من 3.1- ثنائي فوسفو جليسرات إلى جزيئين 3 - فوسفو جليسرات وتكوين 2ATP من 2ADP بمساعدة إنزيم فوسفو جليسرات كينيز

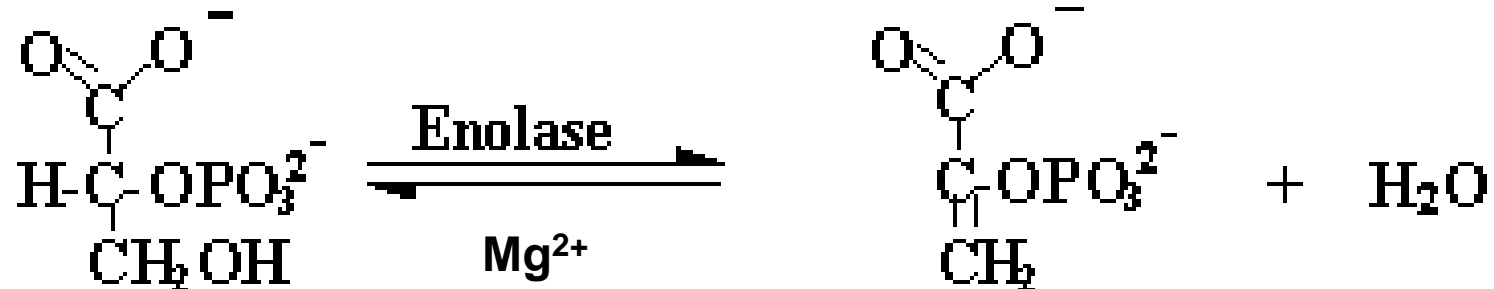


تسمى هذا النوع من الفسفرة أنه على مستوى مادة التفاعل أي تنتقل الفوسفات إلى ADP دون نقل الإلكترونات (على خلاف الفسفرة التأكسدية oxidative phosphorylation)

8- تحول جزيئان من 3- فوسفو جليسرات إلى جزيئين من 2- فوسفو جليسرات عن طريق نقل مجموعة الفوسفات من الموقع 3 إلى 2 بمساعدة إنزيم فوسفو جليسر ميو تيز Phospho glycerol mutase ووجود أيون الماغنسيوم  $Mg^{2+}$ .



9- تكوين جزيئان من فوسفو إينول بيروفيت (مركب غنى بالطاقة) من جزيئين 2- فوسفو جليسرates بمساعدة إنزيم إينوليز Enolase ووجود أيون الماغنسيوم أو المنجنيز.

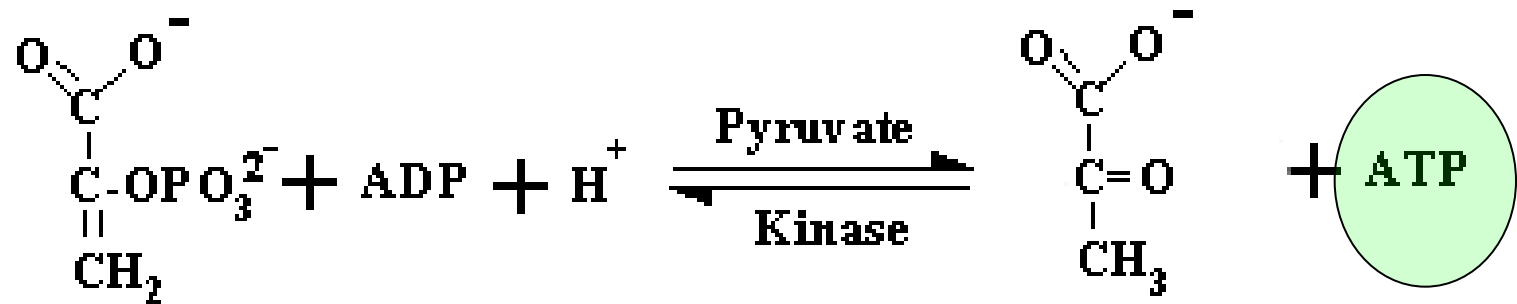


2-Phospho  
glycerate

Phospho enol  
pyruvate



10- تكوين جزيئان من البيروفيت و ATP من جزيئين فوسفو إينول بيروفيت و ADP بواسطة إنزيم فوسفو إينول بيروفيت كينيز Phospho enol pyruvate Kinase في وجود أيونات البوتاسيوم  $K^+$ .



Phospho enol  
pyruvate

Pyruvate

التركيز العالي من ATP يشبط التفاعل

## حصيلة الطاقة الممثلة في ATP من الجلوكوز إلى البيروفيت هي كالتالى:

- استهلاك 1ATP في الخطوة 1
- استهلاك 1ATP في الخطوة 3
- إنتاج 2NADH في الخطوة 6 (باعتبار أن الجلوكوز انشطر إلى جزيئين) عند أكسدة جليسرالدهيد 3- فوسفات حيث يعطي كل جزيء NADH 3 جزيئات ATP.
- إنتاج 2ATP في الخطوة 7 (باعتبار أن الجلوكوز انشطر إلى جزيئين من جليسرالدهايد 3 فوسفات وكل جزيء جليسرالدهايد يعطي 1ATP)
- إنتاج 2ATP في الخطوة 10 (باعتبار وجود جزيئان من 3 فوسفو إينول بيروفيت يعطي كل منهما 1ATP)
- وبالتالي يكون الناتج  $8 = 2+2+6+1-1$

- يلاحظ أن جميع المركبات الوسطية التسعة بين الجلوكوز والبيروفيت مفسفرة (لماذا؟)
- أي أنها متأينة عند pH الفسيولوجية وتحمل شحنة سالبة تمنعها من المرور خلال الأغشية الخلوية لتظل في السيتوسول
- أما البيروفيت أو اللاكتات يمكن أن يمرأ فمثلاً ينتقل البيروفيت من السيتوسول إلى الميتوكوندريا نظراً لأنه غير مفسفر ليبدأ الأكسدة الهوائية (دورة كربس)

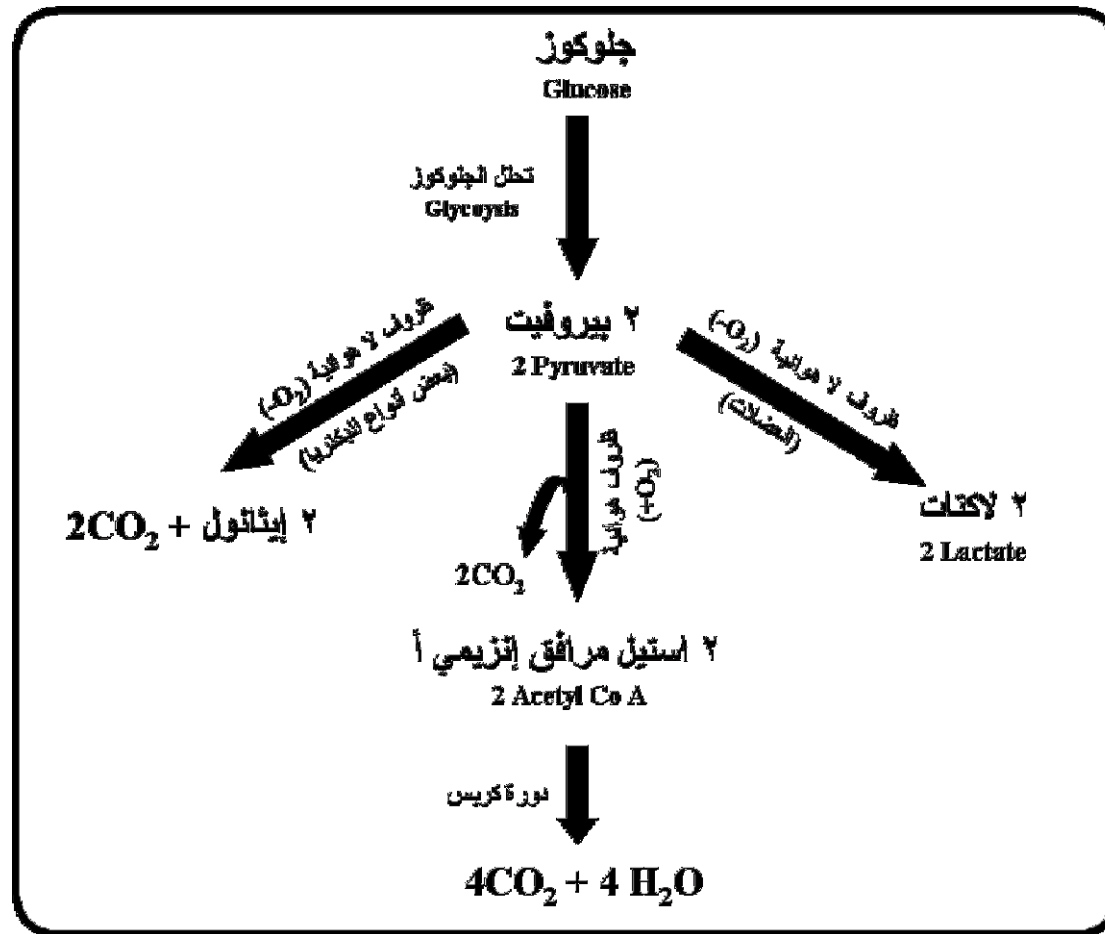
# نقاط التحكم في مسار التحلل الجلايكولي

• توجد ثلاثة نقاط يتم التحكم من خلالها بمسار التحلل الجلايكولي حسب احتياج الخلية للطاقة:

- تحول الجلوكوز إلى جلوكوز 6- فوسفات (الخطوة 1)
- تحول الفركتوز 6- فوسفات إلى فركتوز 1-6 ثنائي الفوسفات (الخطوة 3)
- تحول الفوسفو إينول بيروفيت إلى بيروفيت (الخطوة 10)

# مصير البيروفيت الناتج من تحلل الجلوكوز

## Fate of pyruvate produced from glycolysis

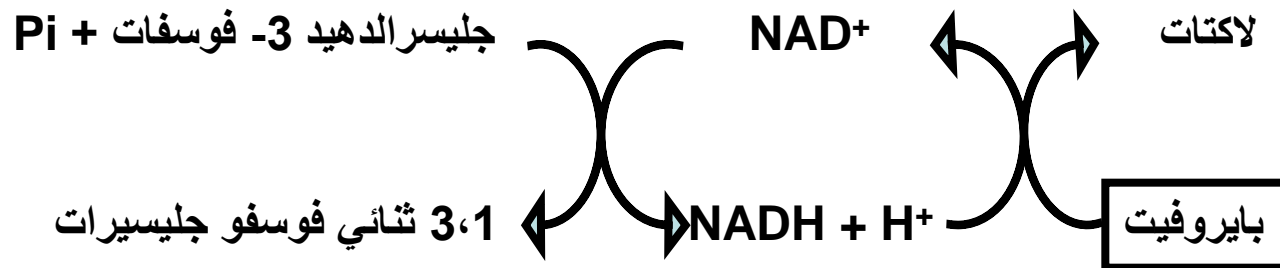
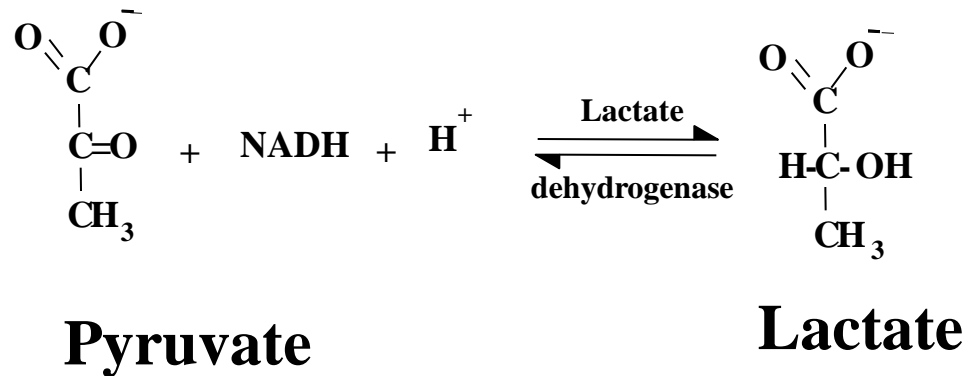


مسارات أيض البيروفيت الناتج من تحلل الجلوكوز في كائنات مختلفة

# التفاعلات اللاهوائية للبيروفيت

## 1- تحويله إلى لاكتات في العضلات

- في غياب الأكسجين في العضلات أو في بكتيريا حمض اللاكتيك يتحول البيروفيت إلى لاكتات بواسطة إنزيم لاكتات ديهيدروجيناز LDH





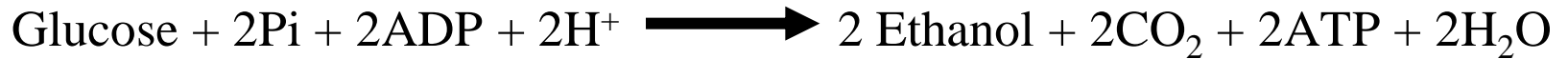
# التفاعلات اللاهوائية للبيروفيت

## 2- تحويله إلى كحول إيثيلي في الخمائر

• يتم ذلك في بعض الكائنات الدقيقة ويتم على خطوتين:

1- تحول البيروفيت إلى أسيتالدهيد بفقد ثاني أكسيد الكربون ويحفز هذا التفاعل إنزيم بايروفيت ديكربوكسيليز في وجود المرافق الإنزيمي ثيامين بايروفوسفات TPP وأيونات المغنسيوم

2- إختزال الأسيتالدهيد إلى كحول إيثيلي مع أكسدة NADH إلى  $\text{NAD}^+$ .



# التفاعلات الهوائية للبيروفيت (الأكسدة الهوائية – دورة كريس)

- في وجود الأكسجين ينتقل البيروفيت إلى الميتوكوندريا ليبدأ سلسلة من تفاعلات الأكسدة تنتهي بتحويله إلى  $\text{CO}_2$  +  $\text{H}_2\text{O}$  وطاقة.

# دورة كريس

## Krebs Cycle

تمثل الخطوة النهائية في أكسدة الكربوهيدرات والليبيدات و البروتينات ويتم فيها أكسدة إنزيم أسيتيل أ المرافق (Acetyl Co A) إلى ثاني أكسيد الكربون والماء ويصحب ذلك انطلاق طاقة.

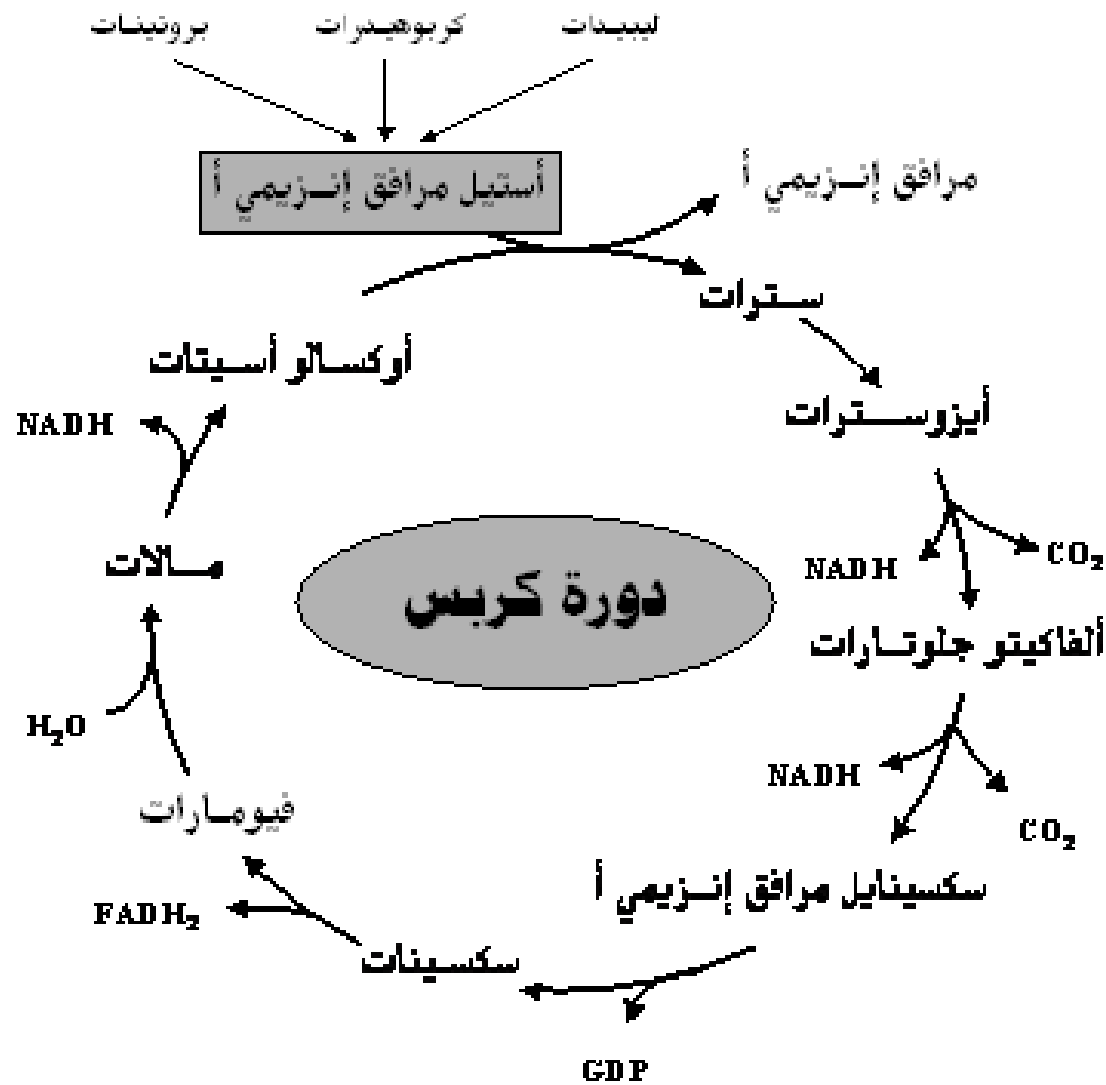
# التفاعلات الهوائية للبيروفيت

## دورة كريس Krebs Cycle

- في وجود الأكسجين ينتقل البيروفيت إلى الميتوكوندريا ليبدأ سلسلة من تفاعلات الأكسدة تنتهي بتحويله إلى  $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$  وطاقة.

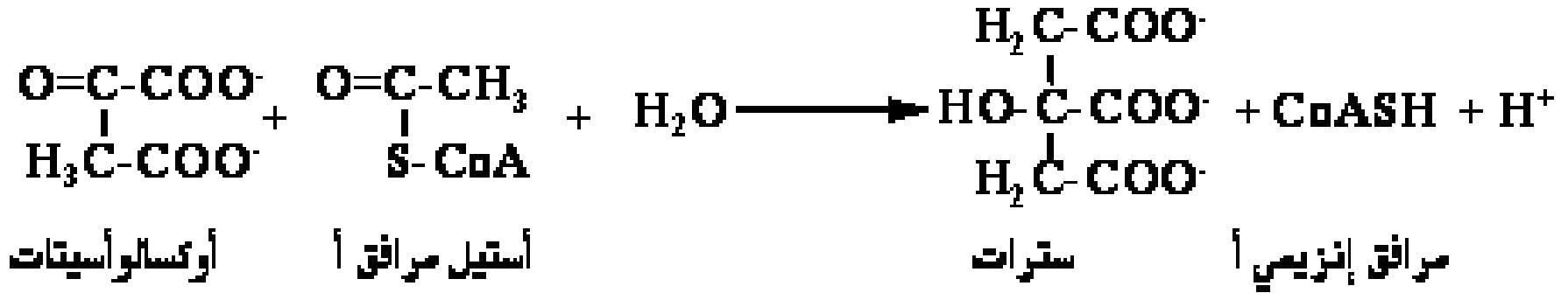


وجود المرافق الإنزيمي ثيامين بايروفوسفات TPP وأيونات المغنسيوم  $\text{Mg}^{2+}$



شكل (22): دورة الحمض ثلاثي الكربوكسيل (دورة كربس أو دورة حمض الستريك).

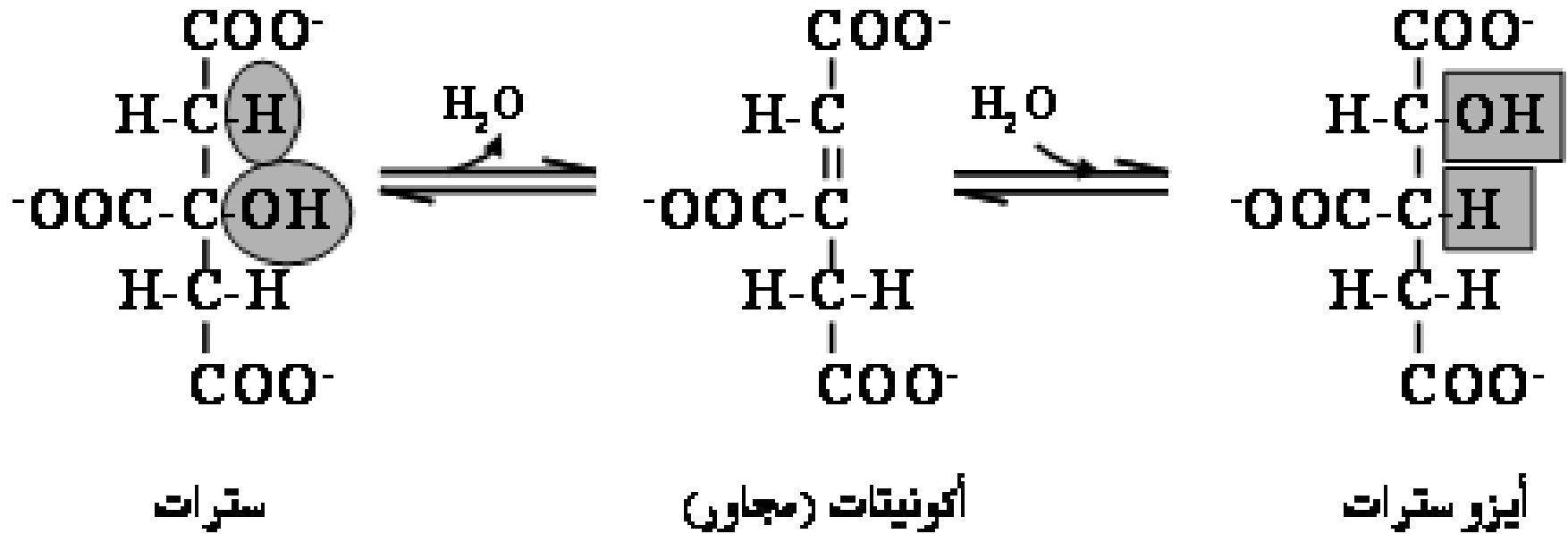
# 1- تكوين السترات من تفاعل أستيل كو أ مع أوكسالو أسيتات ويحفز ذلك إنزيم سترات سنثاز Citrate synthase



ينتج من هذا التفاعل طاقة نتيجة تحلل الثيو إستر (أستيل كو أ)  
ويثبط الإنزيم بواسطة ATP , NADH



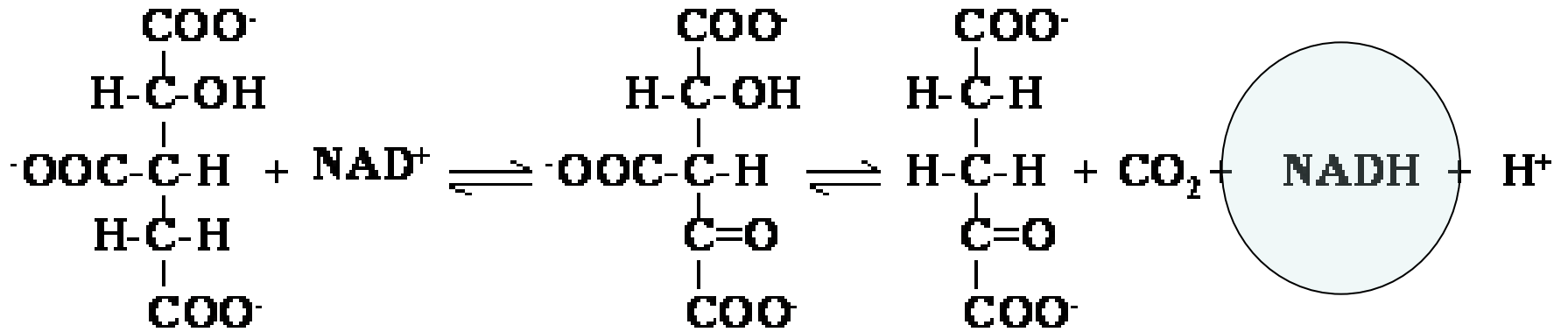
## 2- تحول السترات إلى آيزوسترات بواسطة إنزيم أكونيتيز Aconitase في وجود أيون الحديدوز $Fe^{2+}$ ويتم بحذف ثم إضافة جزيء ماء.



3- نزع مجموعة كربوكسيل من أيزو سترات (يحتوي على 6 ذرات كربون) وتكوين ألفا كيتو جلوتارات (يحتوي على 5 ذرات كربون) و ثاني أكسيد الكربون بواسطة إنزيم أيزو

سترات ديهيدروجينيز **Isocitrate dehydrogenase**.

يتكون مركب وسيط أثناء التفاعل هو أكسالو سكسينات الذي يتحلل بسرعة ليعطي الناتج النهائي. يسمى هذا التفاعل نزع الكربوكسيل تأكسدياً **Oxidative decarboxylation**

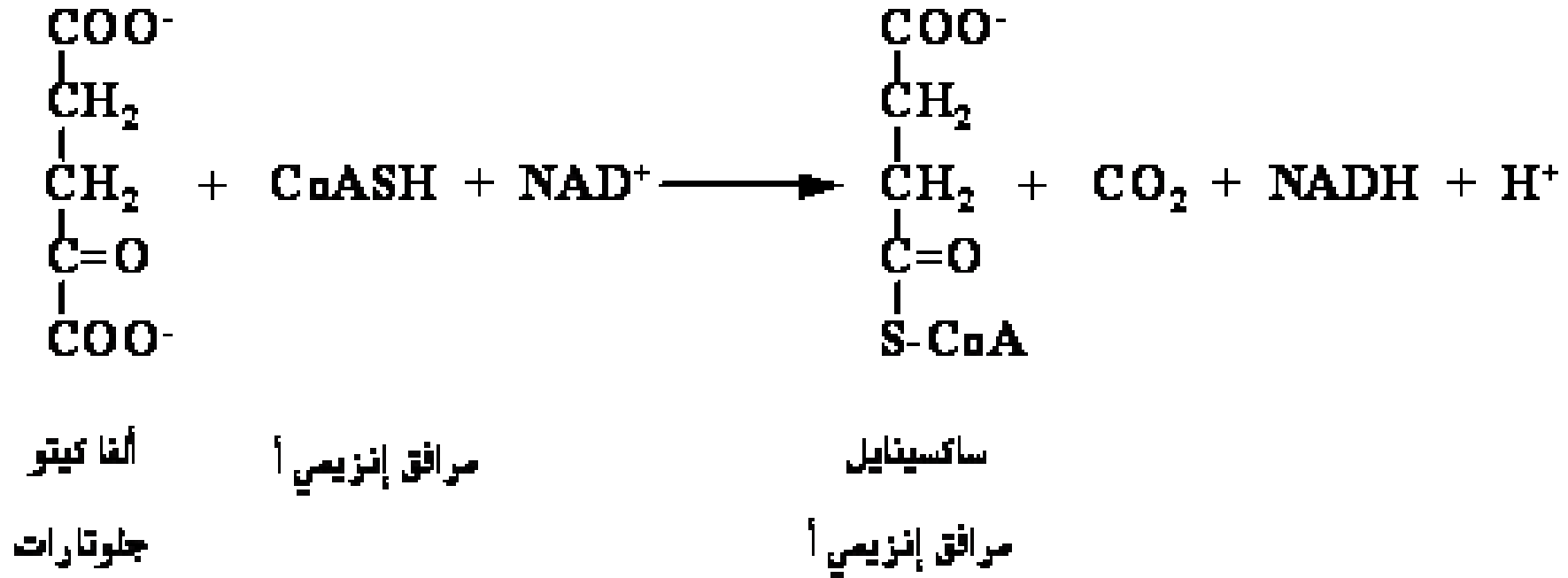


أيزو سترات

أوكسالو سكسينات

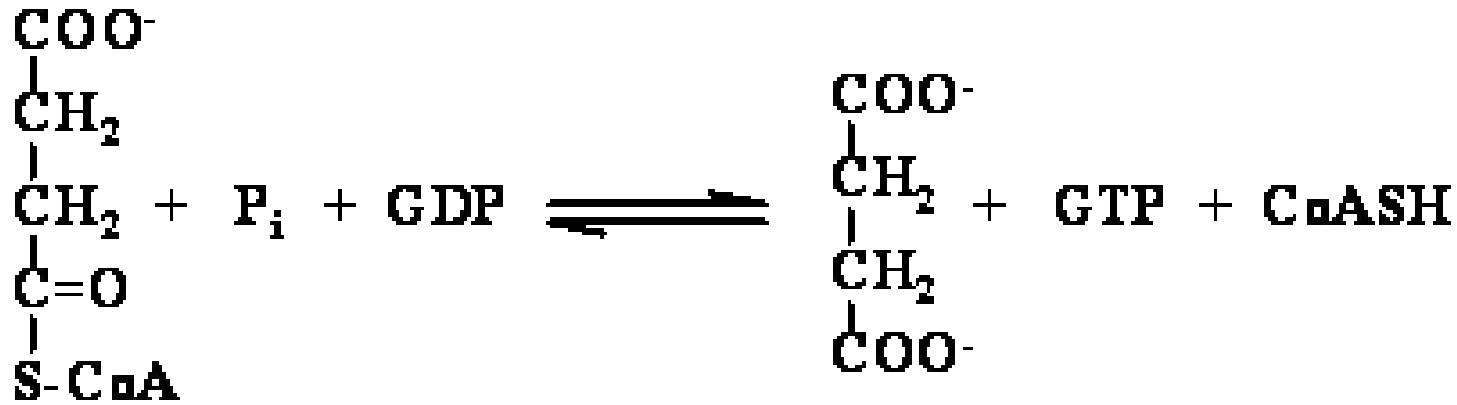
ألفا كيتو جلوتارات

**4- أكسدة ألفا كيتو جلوتارات ونزع جزئ من ثاني أكسيد الكربون (الأكسدة الثانية).**  
 تنزع ذرة كربون أخرى في صورة ثاني أكسيد الكربون من ألفا كيتو جلوتارات المحتوي على خمسة ذرات كربون ليتحول إلى ساكسينيل مرافق إنزيمي أ في تفاعل مشابه لتحول البيروفيت إلى أستيل مرافق إنزيمي أ. يحفز هذا التفاعل معقد إنزيمي يسمى ألفا كيتو جلوتارات دي هيدروجينيز يتكون من ثلاثة إنزيمات ويحتاج لنفس المرافقات الإنزيمية التي يستخدمها إنزيم بيروفيت دي هيدروجينيز.



**ينتج من هذا التفاعل طاقة**

5- تحول سكسينايل مرافق إنزيمي أ إلى سكسينات وتولد طاقة في صورة ATP. تنكسر رابطة الثيو إستر عالية الطاقة التي تربط المرافق الإنزيمي بالسكسينات بواسطة إنزيم سكسينات ثيوكينيز Succinate Thiokinase أو سكسينايل مرافق إنزيمي أ سينثتيز Succinyl CoA Synthetase وتحتزن الطاقة في صورة جوانوزين ثلاثي الفوسفات GTP نتيجة اتحاد جوانوزين ثنائي الفوسفات GDP مع مجموعة فوسفات غير عضوية  $P_i$ .



سكسينايل

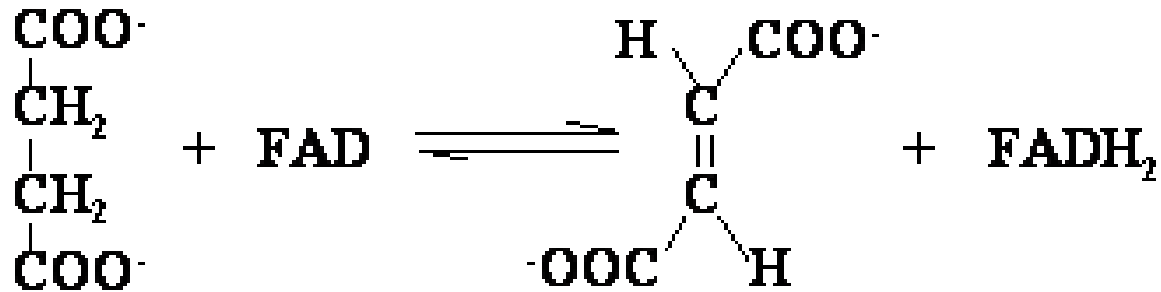
سكسينات

مرافق إنزيمي أ



**6- أكسدة السكسينات إلى فيوماترات.** في الثلاث تفاعلات الآتية تتحول السكسينات إلى أوكسالوأسيتات مروراً بنواتج وسيطة والهدف منها إعادة تكوين أوكسالوأسيتات الذي تبدأ به دورة كربس في الخطوة الأولى.

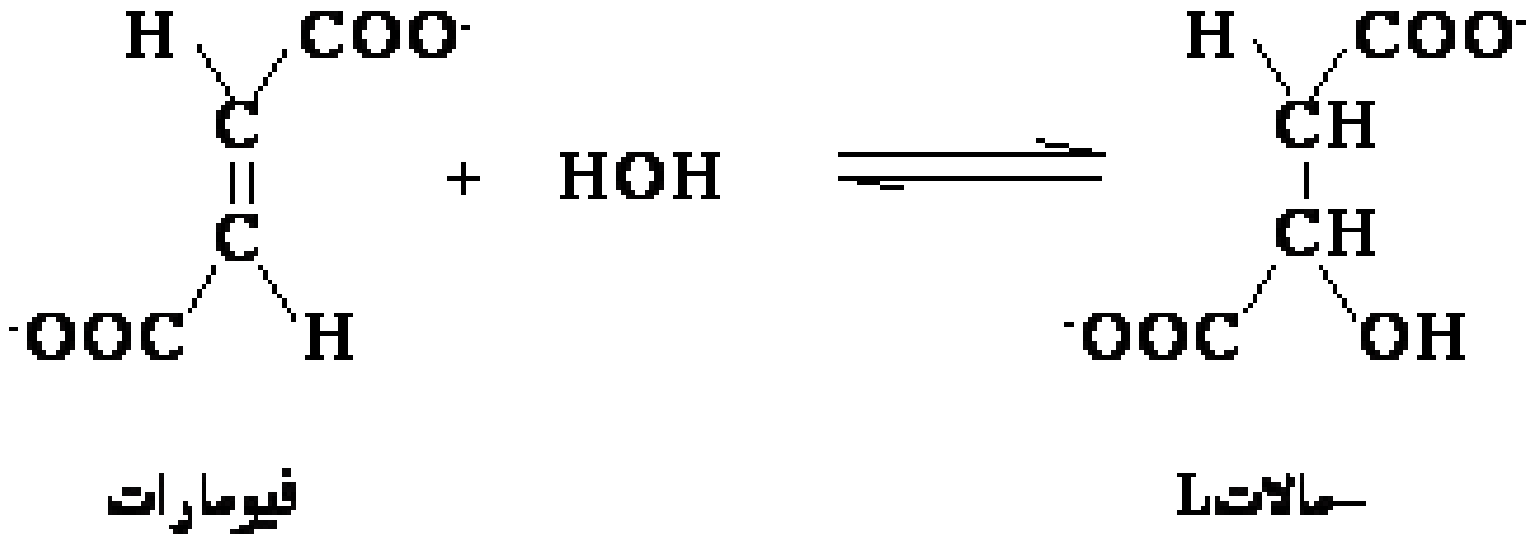
في التفاعل الأول تتحول السكسينات إلى فيوماترات Fumarate عن طريق الأكسدة بواسطة إنزيم سكسينات دي هيدروجينيز Succinate dehydrogenase الموجود ملتصقاً على الجدار الداخلي للميتوكوندريا (على عكس باقي إنزيمات الدورة) ويستقبل الهيدروجين جزئاً من FAD الموجود كمرافق للإنزيم



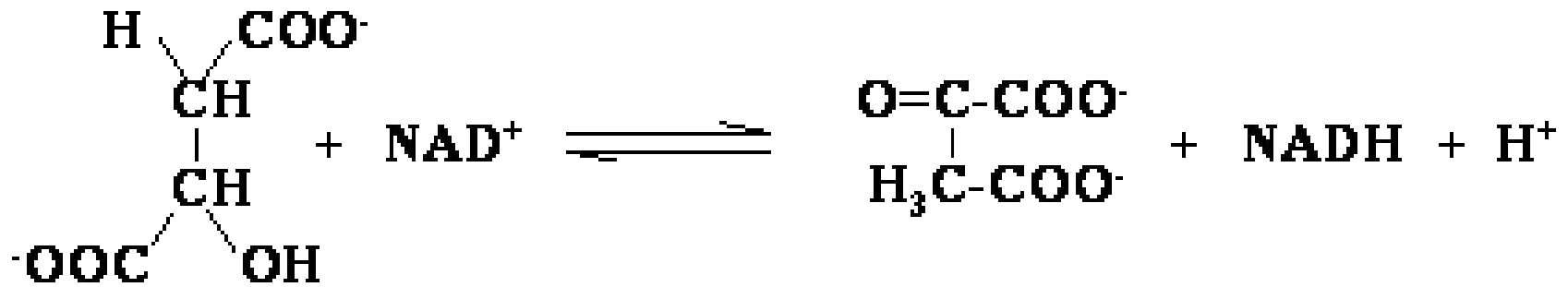
سكسينات

فيوماترات

7- إضافة جزئ ماء إلى الفيومارات لإنتاج المالات بواسطة إنزيم فيومارات هيدراتيز Fumarate hydratase أو فيوماريز Fumarase المتخصص في إضافة مجموعتي الهيدروكسيل والهيدروجين المكونين للماء في الوضع المقابل ليتكون المالكب L-مالات (L-malate).

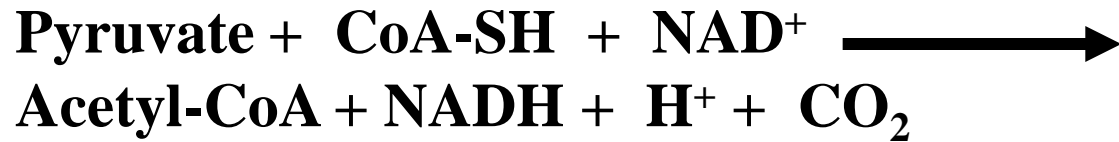


8- أكسدة المالات إلى أوكسالوأسيتات. يحفز هذا التفاعل إنزيم مالات دي هيدروجينيز ويستخدم  $\text{NAD}^+$  كمستقبل للهيدروجين ليتكون جزيء آخر من  $\text{NADH}$ .



—مالات

أوكسالو أسيتات



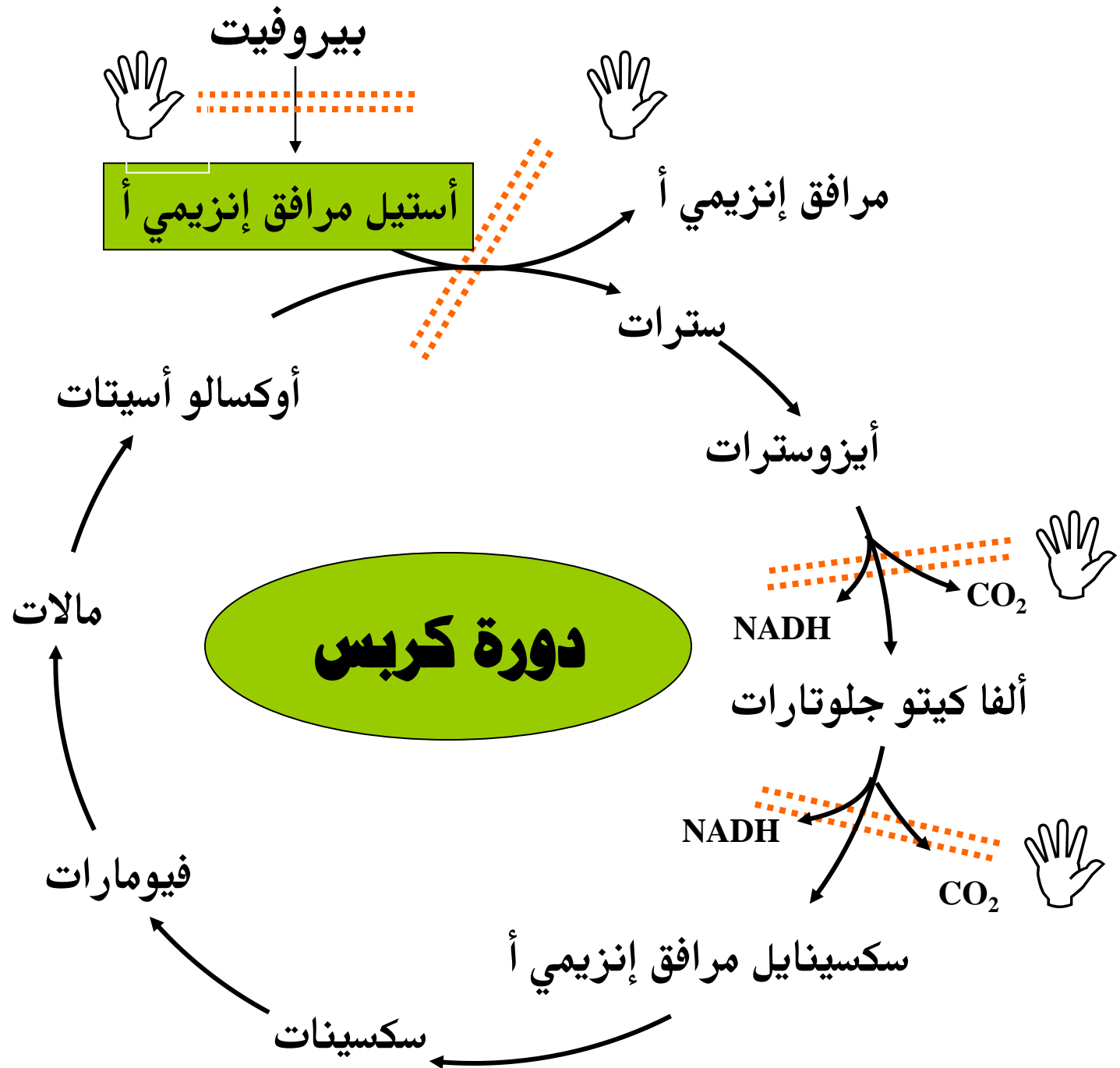


## حصيلة الطاقة الممثلة في ATP من الجلوكوز إلى $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ هي كالتالي:

- إنتاج 1NADH عند تكوين أسيتيل كوا يعطي 3 جزئ ATP.
- إنتاج 1NADH في الخطوة 3 عند أكسدة أيزو سترات إلى ألفا كيتو جلوتارات بواسطة إنزيم أيزو سترات دي هيدروجينيز يعطي 3 جزئ ATP.
- إنتاج 1NADH في الخطوة 4 عند أكسدة ألفا كيتو جلوتارات إلى ساكسينيل مرافق إنزيمي بواسطة ألفا كيتو جلوتارات دي هيدروجينيز يعطي 3 جزئ ATP.
- إنتاج 1ATP في الخطوة 5 عند تحول سكسينايل مرافق إنزيمي أ إلى سكسينات وتولد طاقة في صورة ATP بواسطة إنزيم سكسينات ثيوكينيز Succinate Thiokinase
- إنتاج  $1\text{FADH}_2$  في الخطوة 6 عند أكسدة السكسينات إلى فيومارات Fumarate بواسطة إنزيم سكسينات دي هيدروجينيز Succinate dehydrogenase يعطي 2 جزئ ATP.
- إنتاج 1NADH في الخطوة 8 عند أكسدة المالات إلى أوكسالوأسيتات بواسطة إنزيم مالات دي هيدروجينيز يعطي 3 جزئ ATP.
- وبالتالي يكون ناتج تحول الكامل البيروفيت إلى ثاني أكسيد كربون وماء هو
- $15 = 3 + 2 + 1 + 3 + 3 + 3$  جزئ ATP.
- ويكون ناتج تحول الجلوكوز إلى البيروفيت  $8 = \text{ATP}$ .
- وبالتالي تحول الجلوكوز كلياً إلى ثاني أكسيد كربون وماء يعطي  $38 = 8 + (15)2$  ATP

# نقاط التحكم في دورة حمض الستريك

- توجد نقطة تحكم قبل الدخول في دورة كربس:
  - أكسدة البيروفيت إلى أستيل كو أ حيث الزيادة في  $ATP, NADH$  وأستيل كو أ يثبط إنزيم بايروفيت ديهيدروجينيز
- توجد ثلاثة نقاط يتم التحكم من خلالها داخل دورة كربس:
  - الزيادة في  $ATP, NADH$  وسكسnil كو أ الناتج من الخطوة 1 يثبط إنزيم ستريت سينثيز
  - الزيادة في  $ATP, NADH$  الناتج من الخطوة 3 يثبط إنزيم آيزوستريت ديهيدروجينيز
  - الزيادة في  $ATP, NADH$  الناتج من الخطوة 4 يثبط إنزيم ألفا كيتو جلوتارات ديهيدروجينيز



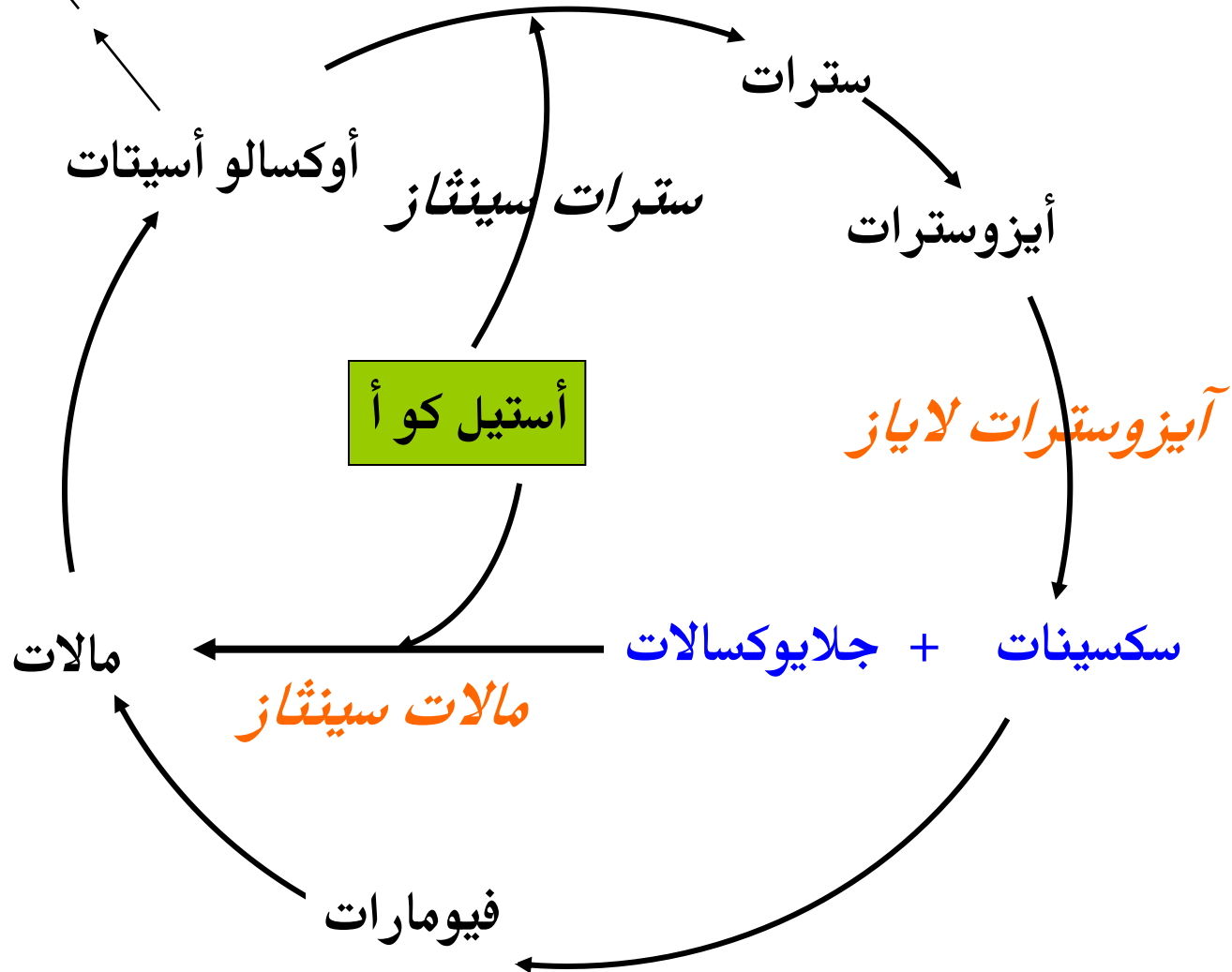
# دورة الجلايوكسالات Glyoxalate cycle

- تحدث في النباتات فقط وليس في الحيوانات
- يتم فيها التصنيع الحيوي للجلوكوز
- يميز هذه الدورة إنزيمان هما:

– 1- أيزوسترات لاياز Isocitrate lyase

– 2- مالات سينثاز Malate synthase

**جلو کوز**

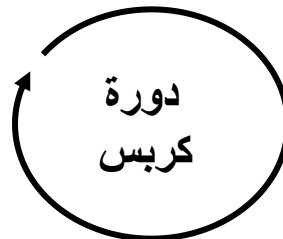
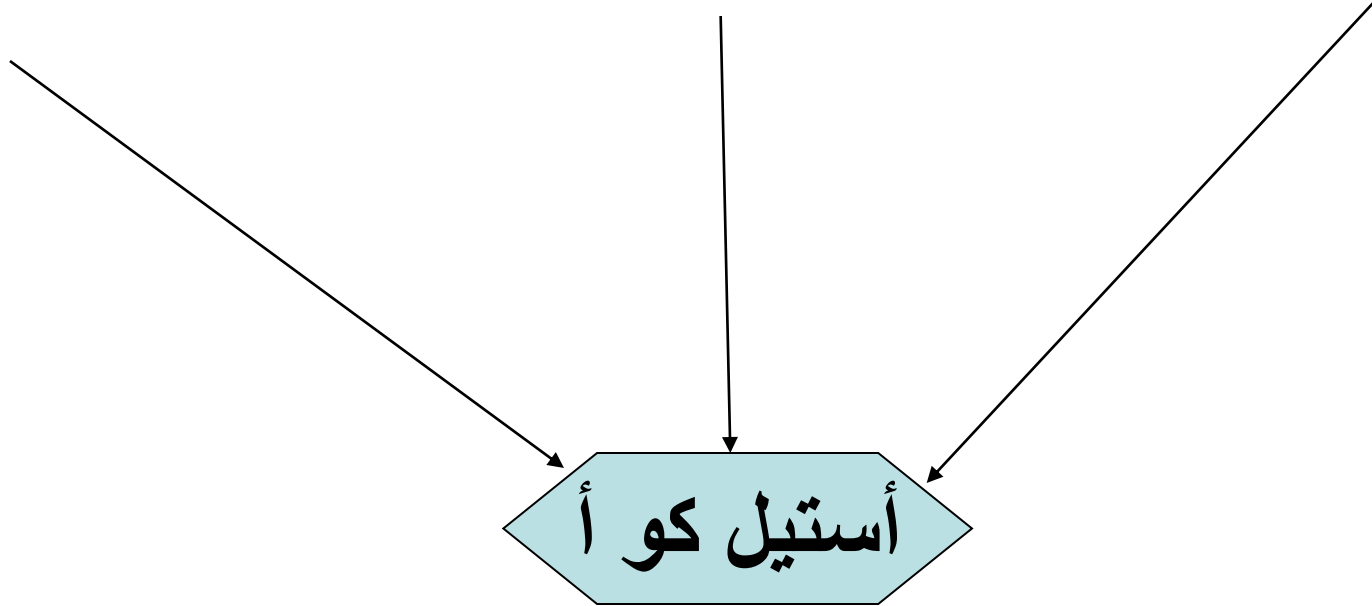


# دورة كريس ملتقى هدم المواد الغذائية

كربوهيدرات

ليبيدات

بروتينات



# دورة كربس ودورها في عملية البناء

هل مصدر الطاقة الوحيد في الثدييات هو الكربوهيدرات؟

هل مصدر الكربون الوحيد في الثدييات هو الكربوهيدرات؟

هل يمكن للبيروفيت أن يتحول إلى أوكسالو أسيتات في الثدييات؟ نعم

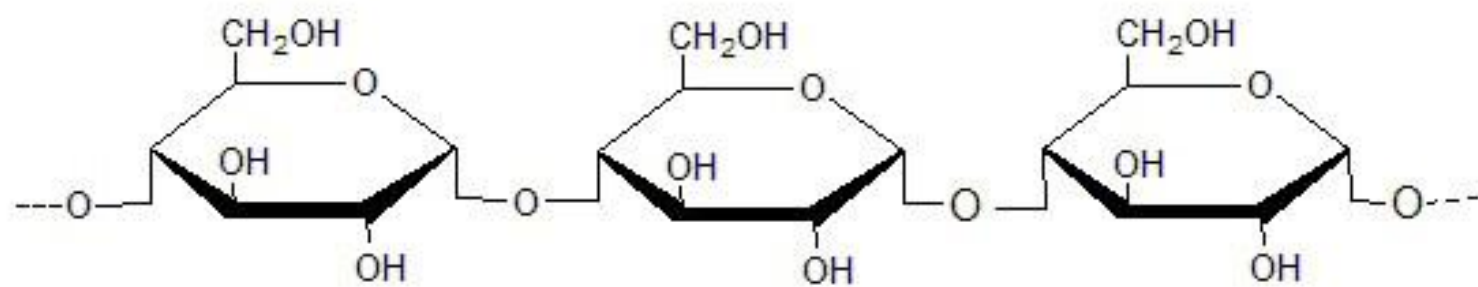
هل يمكن لأسيتيل كو أ أن يتحول إلى أوكسالو أسيتات في الثدييات؟ لا

هل يمكن لأسيتيل كو أ أن يتحول إلى بيروفيت في الثدييات؟ لا

# بناء الجلايكوجين Glycogenesis

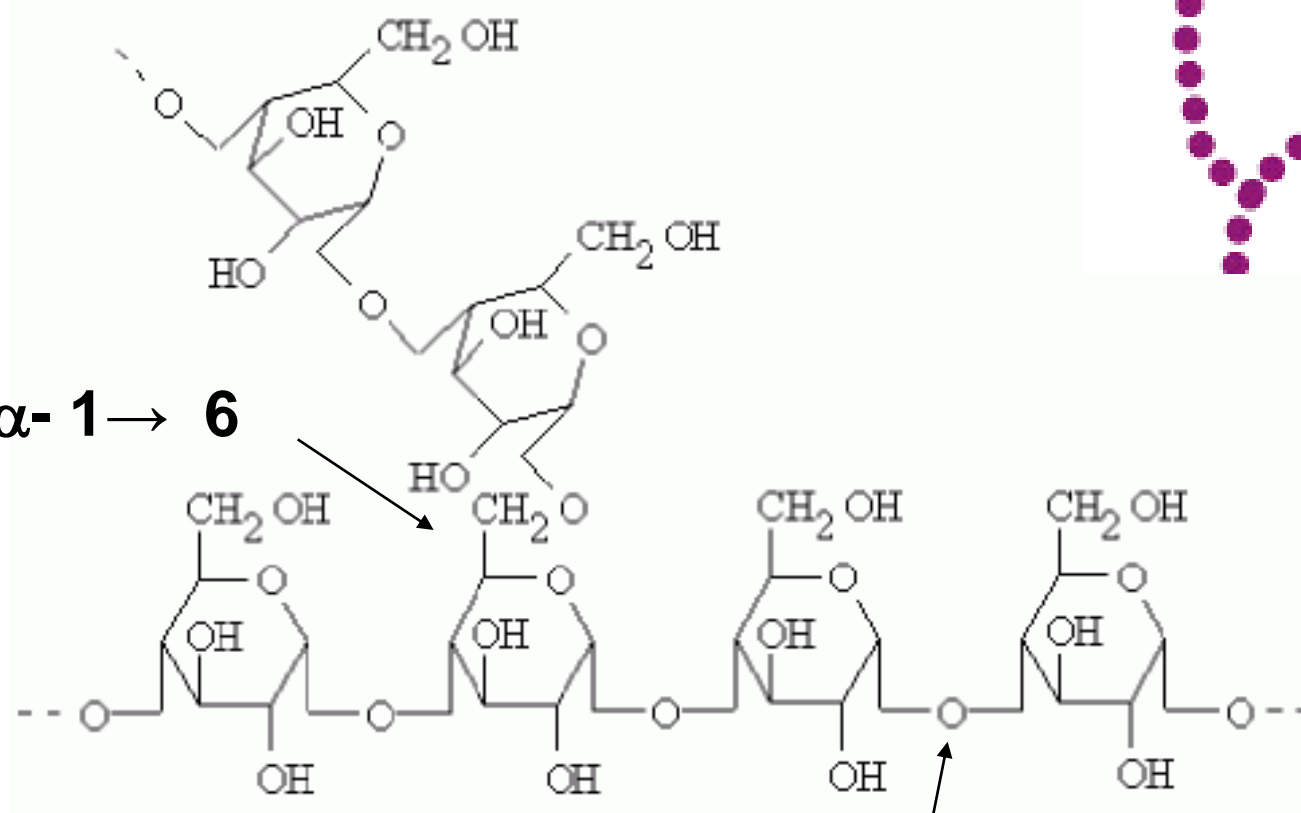
يتضمن تكوين الجلايكوجين من الجلوكوز  
ويُستهلك 2 جزيء ATP لإضافة جزيء  
جلوكوز واحد إلى الجلايكوجين



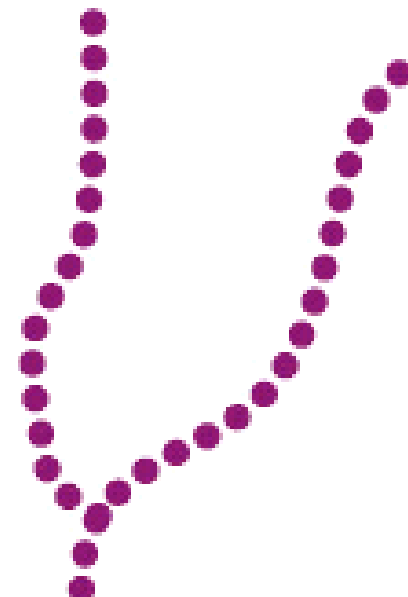


$\alpha$ -1,4 glucosidic bonds

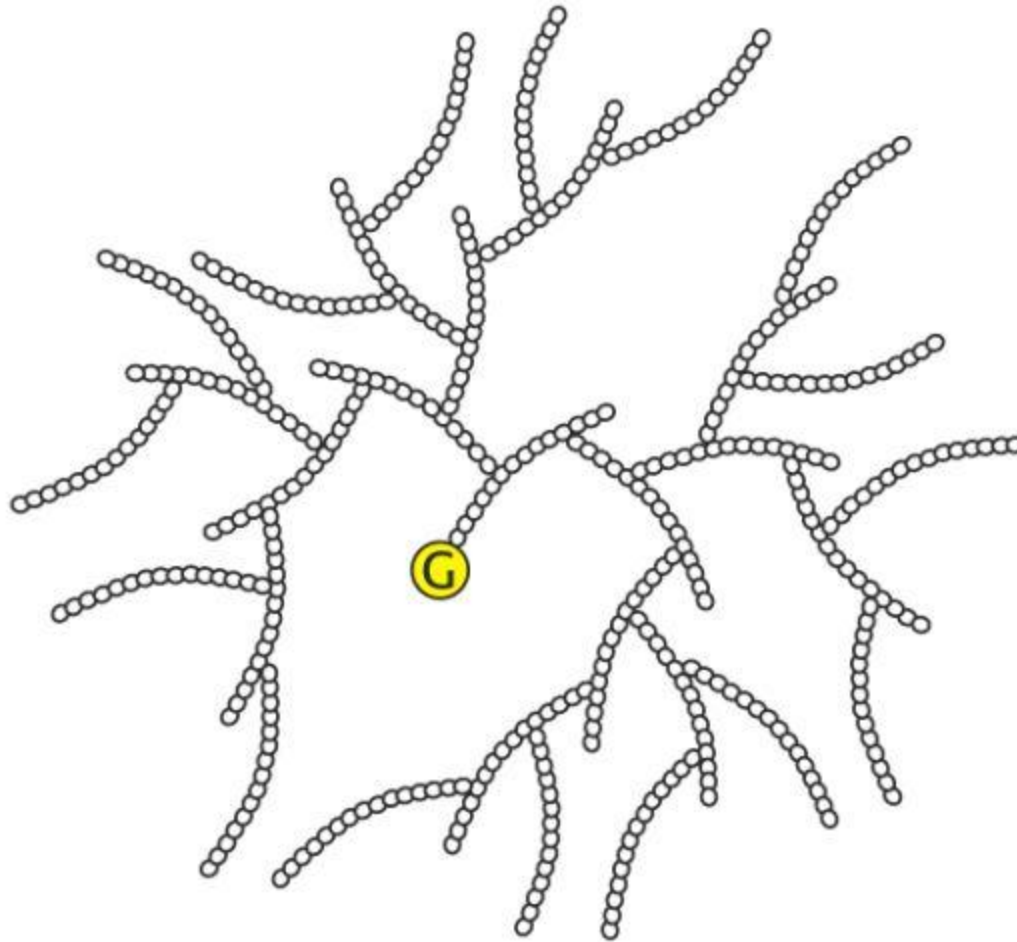
$\alpha\text{-}1 \rightarrow 6$



$\alpha\text{-}1 \rightarrow 4$



# الجلايكوجين



جلوكوز + ATP  $\xrightarrow[\text{أو جلوكوكينيز (الكبد)}]{\text{هكسوكينيز (العضلات)}}$  جلوكوز 6- فوسفات + ADP

جلوكوز 6- فوسفات  $\xrightarrow{\text{فوسفوجلوكوز ميوتيز}}$  جلوكوز 1- فوسفات

جلوكوز 1- فوسفات + UTP  $\xrightarrow{\text{بايروفوسفوريلاز}}$  يوريدين ثنائي فوسفات جلوكوز

UDP + جلايكو جين (n)  $\xrightarrow{\text{جلاكو جين سينثاز}}$  جلايكو جين (n+1) + UDP

- لبداية تكوين سلسلة من الجلايكوجين ينبغي وجود بادئ لهذه العملية
- لا يمكن أن يكون الجلوكوز بادئ لذا تعتمد الخلية على وجود إنزيم يسمى جلايكوجينين كبادئ وهو مكون من 332 حمضاً أمينياً.
- يرتبط الجلايكوجينين بـ UDPGle عن طريق التايروسين وهكذا يكون إنزيم الجلايكوجينين المرتبط بالجلوكوز (glycosylated glycogen) هو نواة لبداية تكوين الجلايكوجين.
- يتم اضافة جزيئات جلوكوز برابطة 4  $\rightarrow$  1- $\alpha$  حتى يصل العدد إلى 11 جزيء تقريباً
- تتفرع السلسلة برابطة 6  $\rightarrow$  1- $\alpha$  بواسطة إنزيم
- (4 $\rightarrow$ 1- $\alpha$ )  $\leftarrow$  (6 $\rightarrow$ 1- $\alpha$ ) ترانس جلوكوسيديز الذي يقطع 6 جزيئات على الأقل وينقلها إلى سلسلة طرفية برابطة 6 $\rightarrow$ 1- $\alpha$

# تحلل الجلايكوجين Glycogenolysis

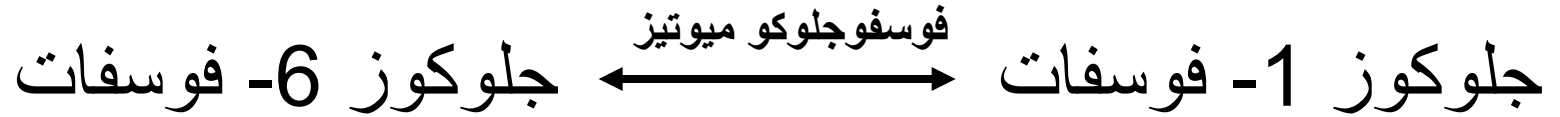
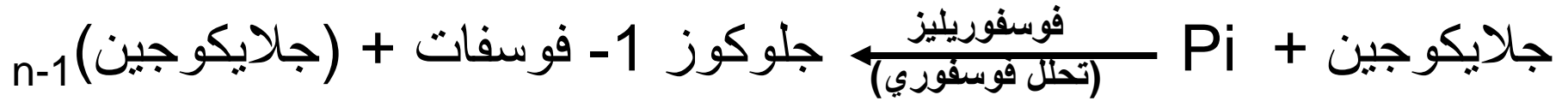
تتضمن تفتيت الجلايكوجين إلى  
جلوكوز في الكبد أو العضلات.

جلايكوجين + Pi  $\xleftarrow[\text{(تحلل فوسفوري)}]{\text{جلايكوجين فوسفوريلاز}}$  جلوكوز 1- فوسفات + (جلايكوجين)<sub>n-1</sub>

يتم تحلل السلاسل حتى يتبقى 4 جزيئات بالسلسلة ثم يقوم إنزيم آخر يسمى  $(\alpha-1 \rightarrow 4) \leftarrow (\alpha-1 \rightarrow 6)$  جلوكان ترانسفيريز بنقل وحدات السكريات الثلاثية إلى تفرع آخر تاركاً جزيء جلوكوز واحد (المرتبط برابطة  $(\alpha-1 \rightarrow 6)$ )

يتم تحلل جزيء الجلوكوز موضع التفرع بواسطة إنزيم أميلو  $(6 \rightarrow 1)$  جلوكوزيديز

يقوم إنزيم فوسفوجلوكوميوايز بتحويل جلوكوز 1- فوسفات إلى جلوكوز 6- فوسفات الذي يتحول في الكبد والكلى إلى جلوكوز بفعل إنزيم جلوكوز 6- فوسفاتيز يمكنه المرور خارج الخلية إلى مجرى الدم



ماذا يحدث في العضلات؟



# نقاط التحكم في أيض الجلايكوجين

- جلايكوجين فوسفوريلاز (فوسفوريلاز a المفسفر النشط وفوسفوليز b الغير مفسفر غير نشط). تتم الفسفرة لهيدروكسيل السيرين الموجودة بالإنزيم بواسطة فوسفوريلاز كينيز.
- جلايكوجين سينثاز (المفسفر غير نشط)
- تحكم هرموني (الجلوكاجون والإبينفرين)

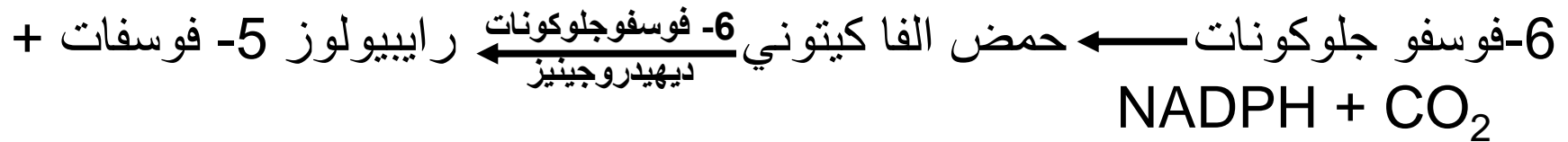
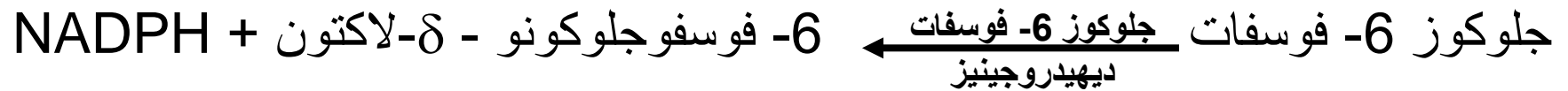
# مسار فوسفات البنتوز

## Pentose Phosphate Pathway (PPP)

في الحيوانات والنباتات يتم إنتاج NADPH بدلاً من NADH وكذلك إنتاج السكريات الخماسية (البنتوز) اللازمة لتكوين النيوكليوتيدات في الأحماض النووية. وفي النباتات فقط يسمح بتصنيع السكريات من  $\text{CO}_2$ . تتم جميع تفاعلات المسار في السيتوسول.

# التفاعلات التأكسدية لمسار فوسفات البنطوز

- 1- يتأكسد جلوكوز 6- فوسفات إلى 6- فوسفوجلوكونو -  $\delta$ -لاكتون
- 2- تكون 6 فوسفو جلوكونات بواسطة التحلل المائي
- 3- أكسدة وفقد مجموعة كربوكسيل في شكل  $\text{CO}_2$  ويتكون السكر الخماسي ريبولوز 5- فوسفات و  $\text{NADPH}$ .



# التفاعلات غير التأكسدية لمسار فوسفات البنتوز

1- تحول الريبولوز 5 فوسفات إلى المماكب الكيتوني زايلولوز 5 - فوسفات بواسطة إنزيم فوسفو بنتوز 3- أيزوميريز

2- تحول زايلولوز 5 - فوسفات إلى المماكب رايبوز 5- فوسفات بواسطة إنزيم فوسفو بنتوز أيزوميريز يحدث في هذا المسار إعادة تنظيم ثلاث جزيئات من السكريات الخماسية (2 جزيء زايلولوز 5- فوسفات وجزيء رايبوز 5- فوسفات) ليتكون 2 جزيء فركتوز 5- فوسفات (سكر سداسي) وجزيء جليسرالدهيد 3- فوسفات (3 ذرات كربون)

**ومن هنا نجد ارتباط بين مسار فوسفات البنتوز ومسار التحلل الجلايكولي**

أكسدة 6 جزيئات من جلوكوز 6- فوسفات خلال دورة واحدة من مسار فوسفات البنتوز يعطي 12 جزيء NADPH و 6 جزيئات  $\text{CO}_2$  و 6 جزيئات رايبولوز 5- فوسفات يتم تحويلهم إلى 5 جزيئات من جلوكوز 6- فوسفات.

مع ملاحظة أن  $\text{CO}_2$  لا ينتجوا من جزيء واحد من الجلوكوز ولكن من 6 جزيئات جلوكوز.



↳ 5 glucose 6-phosphate

## حصول الطاقة الممثلة في ATP من الجلوكوز في مسار فوسفات البنتوز:

- استهلاك ATP في تحول الجلوكوز إلى جلوكوز 6- فوسفات.
- إنتاج 12NADPH في خطوات المسار ينتجوا (3 x 12) = 36ATP
- وبالتالي تحول الجلوكوز في مسار فوسفات البنتوز يعطي ثاني أكسيد كربون وريبوز 5- فوسفات و 1- 36 = 35 ATP
- لا يهدف هذا المسار لإنتاج الطاقة لأنه لا يحدث في العضلات ولكن يحدث في الأنسجة الخاصة بتصنيع المواد مثل الكبد والأنسجة الدهنية والغدد اللبنية والكلية والكريات الدموية.

# أهمية مسار فوسفات البنتوز

- 1- المصدر الوحيد لـ NADPH في كرات الدم الحمراء. فنقص إنزيم جلوكوز-6-فوسفات ديهيدروجينيز يؤدي لنقص NADPH مما يتسبب في مرض تحلل كرات الدم الحمراء Hemolytic anemia وحدوث أنيميا.
- 2- وجود NADPH يمنع الأحماض الدهنية الغير مشبعة من التفاعل مع الأكسجين وبالتالي يمنع تكون مواد مؤكسدة.
- 3- وجود NADPH يحافظ على الحديد في الهيموجلوبين بشكل حديدوز ( $Fe^{+2}$ ).
- 4- مصدر للسكريات الخماسية التي تدخل في تركيب النيوكليوتيدات ثم الأحماض النووية.
- 5- مصدر غير مباشر للطاقة.
- 6- في النباتات تستقبل البنتوزات المفسفرة ثاني أكسيد الكربون وتتحول إلى سكريات سداسية.

# نقاط التحكم في مسار فوسفات البنتوز

- إذا كانت حاجة الخلية لـ **NADPH** أكثر من حاجتها للرايبوز 5- فوسفات فإن المسار يتم إلى نهايته.
- إذا كانت حاجة الخلية للرايبوز 5- فوسفات أكثر من حاجتها لـ **NADPH** فإن الفرقكوز 6- فوسفات والجليسرالدهيد 3 فوسفات يمكن أن يزيدا من إنتاج الرايبوز 5- فوسفات عن طريق إنزيمي ترانس كيتولاز وترانس ألدولاز دون المرور بالجزء التأكسدي للمسار. وتفاعلات هذان الإنزيمان عكسية وتستخدم لتنظيم العمليات الأيضية للكائن الحي حسب الظروف.



# المسار الثانوي للجلوكوز

## 1- إنتاج حمض الجلوكويورونيك

جلوكوز 1- فوسفات + UTP  $\xleftarrow{\text{بايروفوسفوريليز}}$  يوريدين ثنائي فوسفات جلوكوز

$2\text{H}_2\text{O} + 2\text{NAD}^+ + \text{UDPGle}$   $\xleftarrow{\text{دي هيدروجينيز}}$

يوريدين ثنائي فوسفات جلوكورونات +  $2\text{NADH} + 2\text{H}^+$

يوريدين ثنائي فوسفات جلوكورونات +  $\text{H}_2\text{O}$   $\xleftarrow{\hspace{1cm}}$   
جلوكورونات + UDP

يرتبط يوريدين ثنائي فوسفات جلوكورونات بالمواد الغريبة مثل الفينولات والعقاقير فيزيد من إفرازها عن طريق الكلى ويستخدم في بناء السكريات العديدة الحمضية مثل حمض الهيالورونيك والهيبارين

# المسار الثانوي للجلوكوز

## 2- إنتاج حمض الأسكويك (فيتامين C)

جلوكورونات ← جلوكونات ← جلوكونولاكتون  $\xleftarrow[\text{أكسيديز}]{\text{جلوكونولاكتون}}$  أسكوريك

يتم تصنيع حمض الأسكوريك بهذه الطريقة في النباتات وبعض الحيوانات ولكن لا يستطيع الإنسان تكوينه بهذه الطريقة ويجب تناوله في الغذاء وذلك لغياب إنزيم جلوكونولاكتون أكسيديز في أنسجته.

# إعادة اصطناع الجلوكوز أو استحداث الجلايكوجين Gluconeogenesis

هي عملية تكوين الجلوكوز أو الجلايكوجين من مصادر غير كربوهيدراتية مثل الأحماض الأمينية وحمض اللاكتيك Lactic والبيروفيت و الجليسرين.

تحدث في سيتوسول الكبد (90% منها) والكلية (10%) وليس في الميتوكوندريا.

# نقاط التحكم في مسار التحلل الجلايكولي

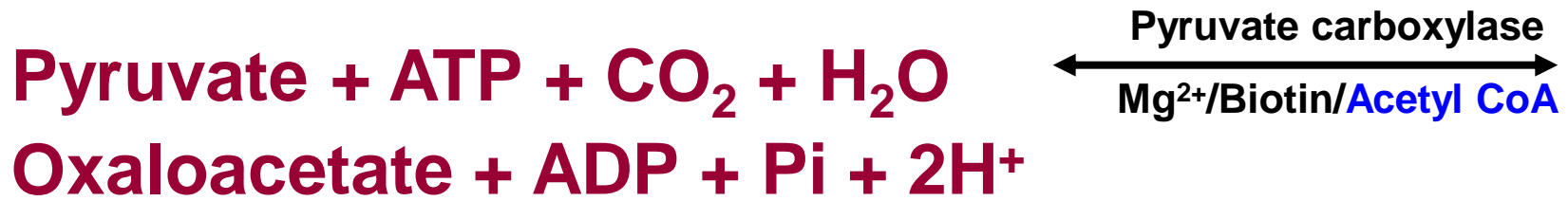
• توجد ثلاثة نقاط يتم التحكم من خلالها بمسار التحلل الجلايكولي حسب احتياج الخلية للطاقة:

- تحول الجلوكوز إلى جلوكوز 6- فوسفات (الخطوة 1)
- تحول الفركتوز 6- فوسفات إلى فركتوز 1-6 ثنائي الفوسفات (الخطوة 3)
- تحول الفوسفو إينول بيروفيت إلى بيروفيت (الخطوة 10)

هذه التفاعلات غير عكسية بمعنى لا يمكن إعادة تصنيع الجلوكوز عن طريق تلك التفاعلات ولكن يجب أن تسلك الخلية مساراً آخر يسمى دورة كوري (Cori cycle)

# 1- تحويل البايروفيت إلى فوسفو إينول بايروفيت عن طريق خطوتين مروراً بأكسالو أسيتات

أ- إضافة  $\text{CO}_2$  إلى بايروفيت لتكوين أكسالو أسيتات ويتم استهلاك جزيء  $\text{ATP}$ . إذا كان مستوى أستيل كوا فائض عن حاجة كربس فإنه يزيد من تحول البايروفيت إلى أكسالو أسيتات.



ب- تحول أكسالو أسيتات إلى فوسفو إينول بايروفيت ويتم استهلاك جزيء  $\text{GTP}$ .



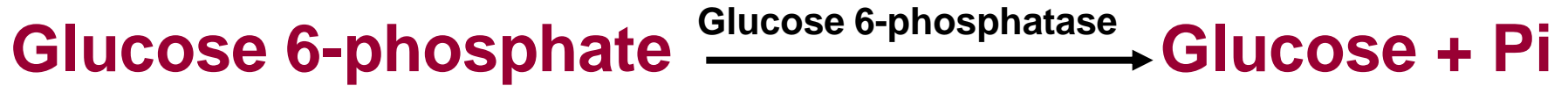
## 2- تكوين فركتوز 6- فوسفات من فركتوز 1،6- ثنائي الفوسفات

يحفز هذا التفاعل إنزيم فركتوز 1 و6- داي فوسفاتيز الذي ينشط عن وجود فائض في الطاقة (ATP) ويثبط عند وجود AMP

Fructose 1,6-di phosphate  
Fructose 6- phosphate + Pi

Fructose 1,6- diphosphatase  
→

### 3- تكوين الجلوكوز من جلوكوز 6- فوسفات بواسطة الفوسفاتيز



وهكذا يمكن إعادة تصنيع الجلوكوز من البيروفيت أو اللاكتات عند وجود  
فائض في الطاقة المتمثلة في **ATP , NADH, NADPH**

تستهلك 6 جزيئات **ATP** عند تحول اللاكتات إلى جلوكوز  
تستهلك 4 جزيئات **ATP** عند تحول البيروفيت إلى جلوكوز

# تكوين الجلوكوز من الأحماض الأمينية والليبيدات

يتم نزع مجموعة الأمين من الأحماض الأمينية المولدة للجلوكوز (الأنين – جلوتاميك – اسبارتيك) فيتكون بيروفيت وألفا كيتو جلوتارات و أكسالو أسيتات التي تدخل دورة كربس وتعطي مالات ثم فوسفو أينول بيروفيت وبيروفيت ثم جلوكوز.

وبالمثل المركبات الوسيطة من أيض الدهون التي تدخل دورة كربس ويمكن أن تكون جلوكوز بنفس الطريقة.



# البناء الحيوي للسكريات الأخرى

يستخدم الجلوكوز لتصنيع سكريات أخرى في الخلية ولتكوين سكريات ثنائية وعديدة التسكر. يتم ذلك بتحويل الجلوكوز إلى مركب عالي الطاقة UDPGle ثم ينتقل الجلوكوز بواسطة ترانس جلايكوزيلاز إلى مركب آخر.

