جامعة الملك سعود
كلية العلوم
قسم الكيمياء الحيوية

كيمياء حيوية عامة (١٠١ كيح)

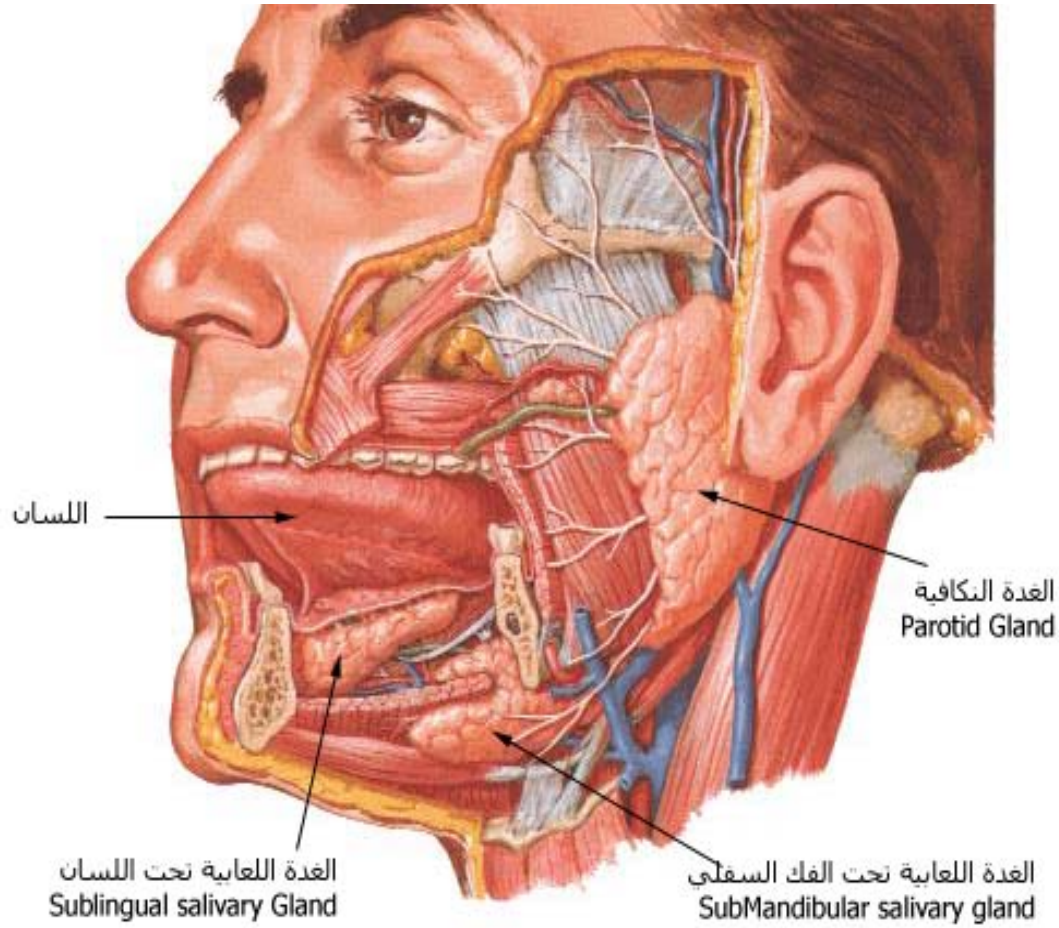
أيض الكربوهيدرات

CARBOHYDRATE METABOLISM

التمثيل الغذائي
(الميتابوليزم)
(الأيض)

بناء
Anabolism

هدم
Catabolism



.شكل (١–٢٠): الغدد اللعابية في الإنسان

نشا ← أميلوبكتينات ← إرثرو دكسترينات ← أكرو دكسترينات ← دكسترينات ← مالتوز

إنزيمات هدم الكربوهيدرات

١- ألفا أميليز أو إندوجلايكوسيديز يكسر الرابطة (α-1→ 4)
٢- بيتا أميليز أو إكسوجلايكوسيديز يكسر الروابط الخارجية أو الطرفية
٣- إنزيم أميلو ١،٦-جلوكوسيديز يكسر التفرعات عند الرابطة (α-1→ 6)
٤- إنزيم السيليوليز أو بيتا جلوكوسيديز تحلل السيليولوز الرابطة (β-1→4)
٥- جلايكوجين فوسفوريليز يحلل الجلايكوجين بواسطة التحلل الفوسفوري
٦- المالتيز يحلل الملتوز إلى ٢ جلوكوز
٧- السكريز يحلل السكروز إلى جلوكوز وفركتوز
٨- 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 ٦- 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 ٦- فوسفات إلى فركتوز ٦- فوسفات ثم إلى سلسلة من التفاعلات تنتهى بحمض البيروفيك

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

وفيها يتحلل البيروفيت خلال عدة تفاعلات إلى CO_2 وماء وطاقة

التمثيل الغذائي للكربوهيدرات

١ـ تحلل الجلوكوز Glycolysis

٢ـ دورة كربس

٣ـ بناء الجلايكوجين Glycogenesis

٤ـ استحداث الجلايكوجين Gluconeogenesis

٥ـ تحلل الجلايكوجين Glycogenolysis

التحلل الجلايكولي
Glycolysis

هو أكسدة الجلوكوز (٦ ذرات كربون) إلى جلوكوز ٦- فوسفات ثم إلى بيروفيت Pyruvate أو اللاكتات Lactate (٢جزيء x ٣ ذرات كربون) من خلال عشرة تفاعلات محفزة إنزيمياً

دورة كربس
Krebs Cycle

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

بناء الجلايكوجين
Glycogenesis

وتتضمن تكوين الجلايكوجين من الجلوكوز

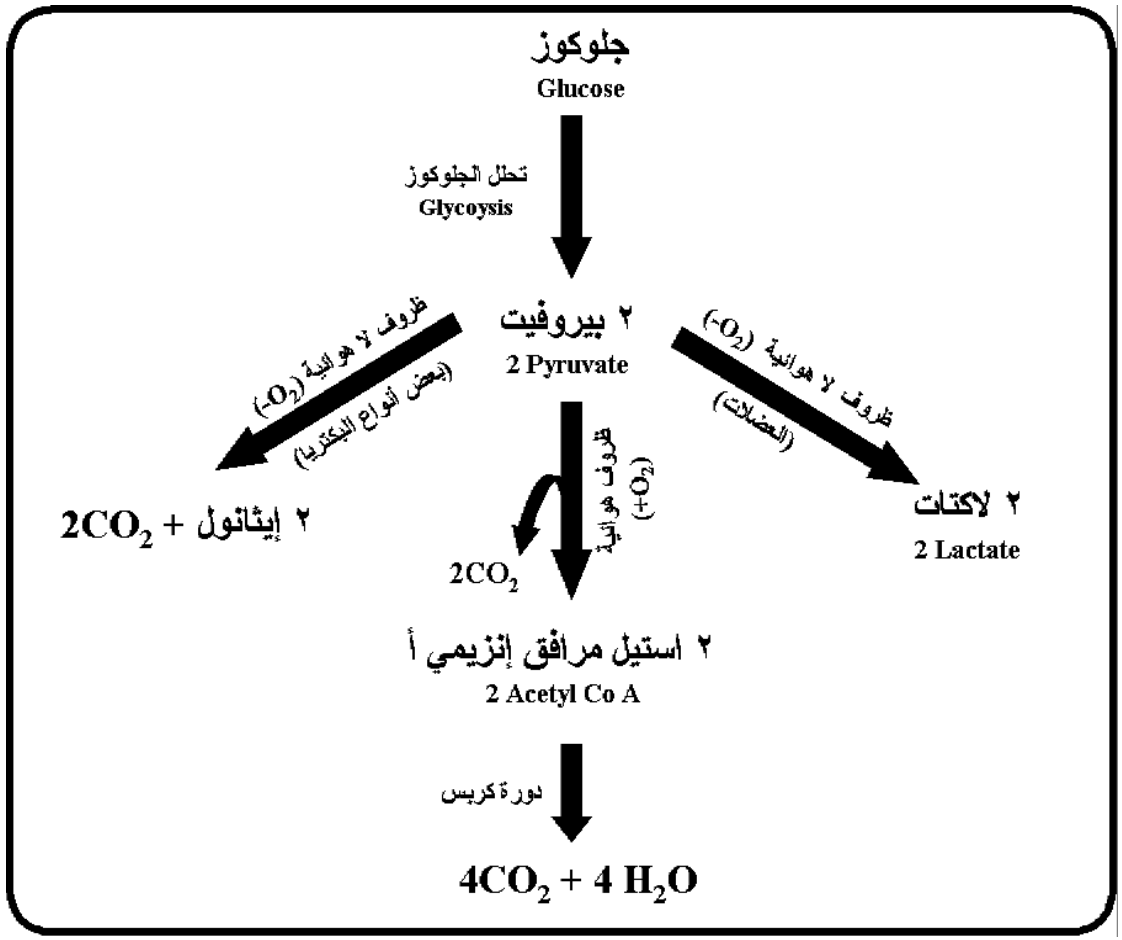
استحداث الجلايكوجين
Gluconeogenesis

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

تحلل الجلايكوجين
Glycogenolysis

تتضمن تفتيت الجلايكوجين إلي جلوكوز في الكبد أو العضلات.

مصير البيروفيت الناتج من تحلل الجلوكوز
Fate of pyruvate produced from glycolysis



شكل (١– ٢١): مسارات أيض البيروفيت الناتج من تحلل الجلوكوز في كائنات مختلفة.

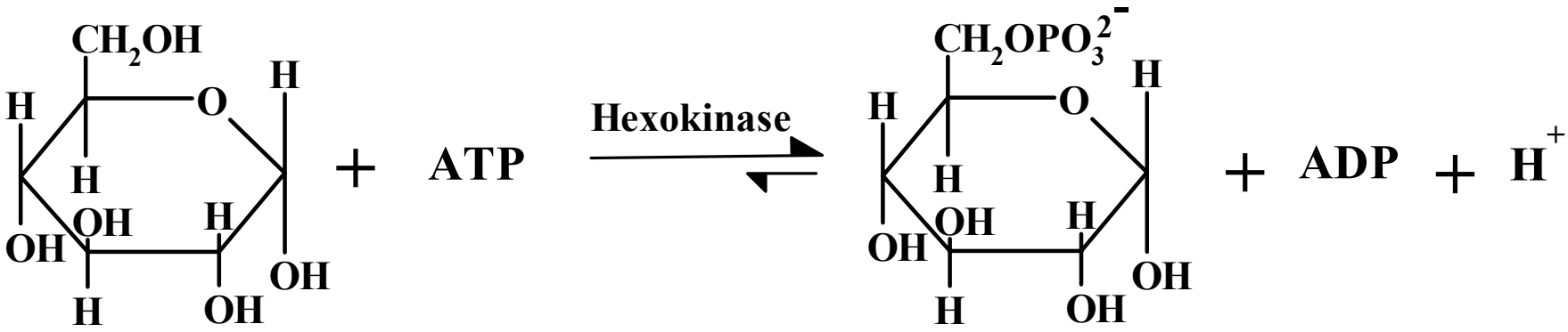
Glucose + 2 Pi + 2 ADP ⟶ 2 Pyruvate + 2 ATP

يتم التحلل الجلايكولي في مرحلتين:

المرحلة الأولي : تتكون من خمسة تفاعلات (١-٥) تبدأ بالجلوكوز وتنتهي بالجليسيرالدهايد ٣- فوسفات ويتم فيها استهلاك طاقة

المرحلة الثانية : تتكون من خمسة تفاعلات (٦-١٠) تبدأ بتحول بالجليسيرالدهايد ٣- فوسفات وتنتهي بتكوين البيروفيت ويتم فيها إنتاج طاقة

١- تحول الجلوكوز إلى جلوكوز ٦- فوسفات. داخل سيتوزول الخلية بواسطة إنزيم الهكسوكينيز Hexokinase في وجود أيون الماغنسيوم Mg^{2+} أو المنجنيز Mn^{2+} . ويتم استهلاك جزئ ATP

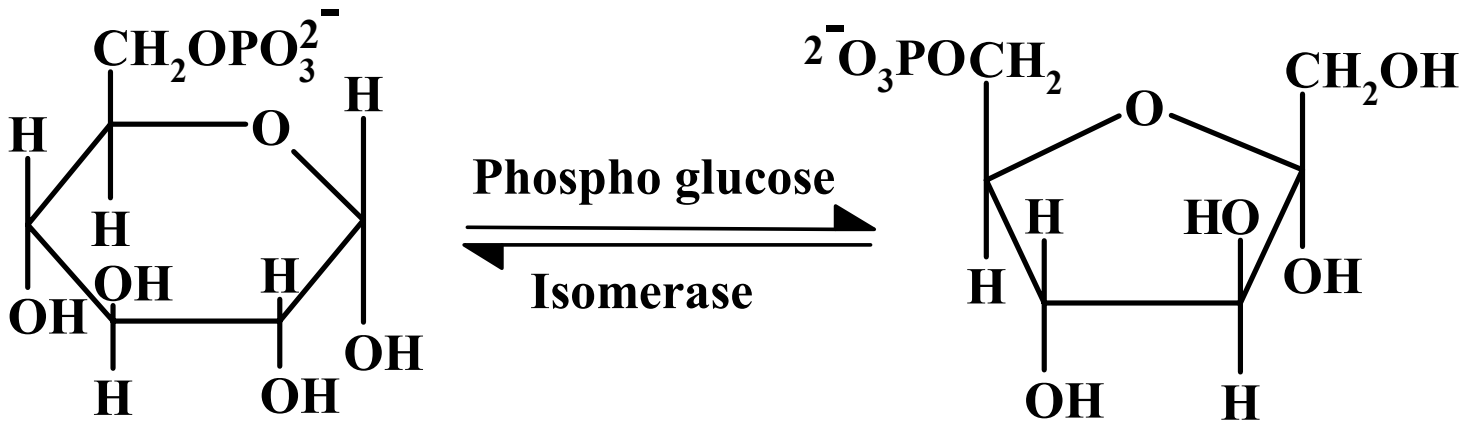


Glucose

Glucose 6- Phosphate

إذا زاد تركيز جلوكوز ٦- فوسفات المنتج فإنه يثبط انزيم الهكسوكينيز . لذلك فهو يمثل أحد نقاط التحكم في التحلل الجلايكولي

٢- تحول الجلوكوز ٦- فوسفات إلى فركتوز ٦- فوسفات بواسطة إنزيم فوسفو جلوكوز أيزوميريز Phosphoglucose Isomerase.

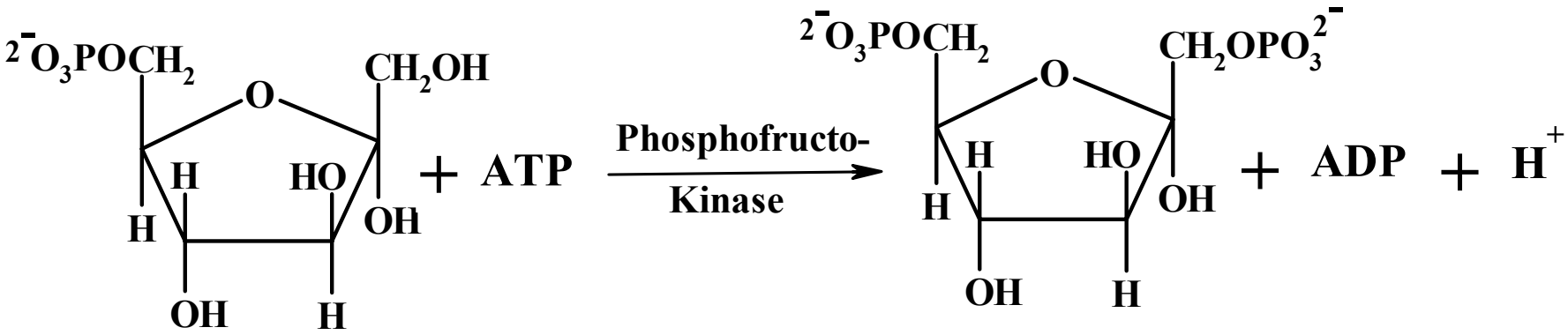


Glucose 6- Phosphate

Fructose 6- Phosphate

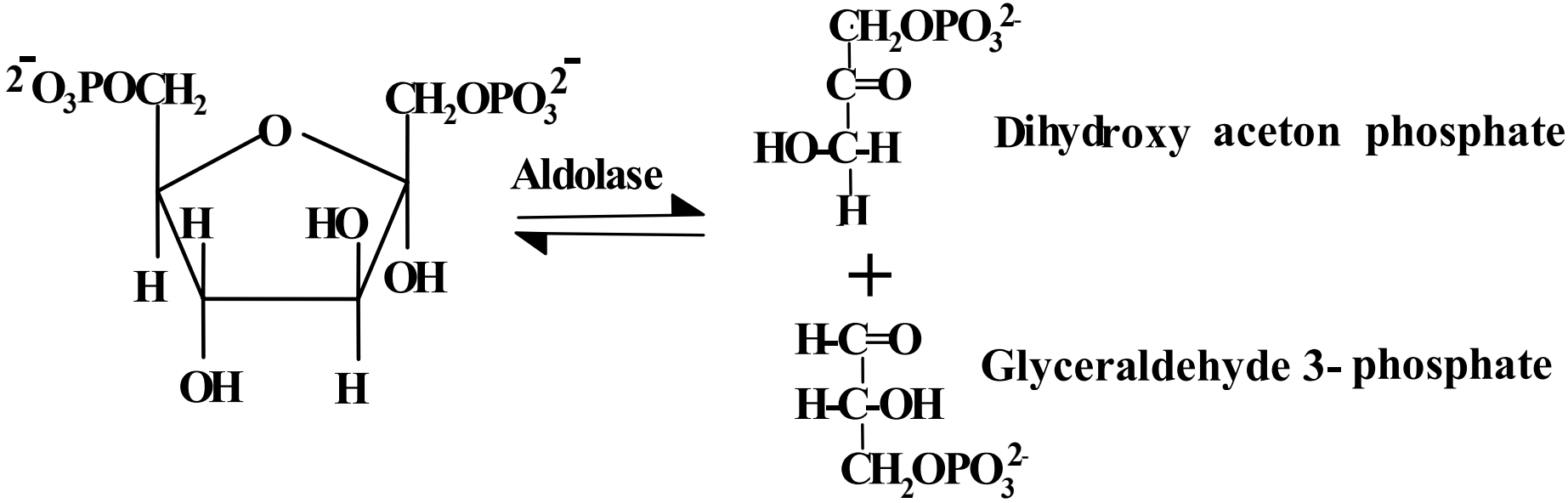
يعتبر الجلوكوز ٦- فوسفات والفركتوز ٦- فوسفات من المركبات التي تصل العديد من مسارات الأيض ولكن بعد تحول الفركتوز ٦- فوسفات في الخطوة القادمة إلى فركتوز ٦،١ ثنائي الفوسفات فإنه ليس له طريق إلا أن يكمل التحلل الجلايكولي

٣- تحول فركتوز ٦- فوسفات إلى فركتوز ١,٦- ثنائي الفوسفات بواسطة إنزيم فوسفو فركتو كينيز Phosphofructo Kinase ويتم استهلاك جزيء آخر من ATP.



Fructose 6- Phosphate **Fructose 1,6- diphosphate**

٤- إنشطار الفركتوز ٦,١- ثنائي الفوسفات (مركب يحتوي على ٦ ذرات كربون) إلى ثنائي هيدروكسي أسيتون فوسفات (مركب يحتوي على ٣ ذرات كربون) و جليسرالدهايد ٣- فوسفات (مركب يحتوي على ٣ ذرات كربون) بواسطة إنزيم الألدوليز Aldolase.



Fructose 1,6 diphosphate

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

٥- تحول ثنائي هيدروكسي أسيتون فوسفات إلى جليسرالدهايد ٣- 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 ٣ فوسفات واستهلاك جزئيئين من ATP.

Dihydroxyacetone Phosphate

Glyceraldehyde 3- Phosphate

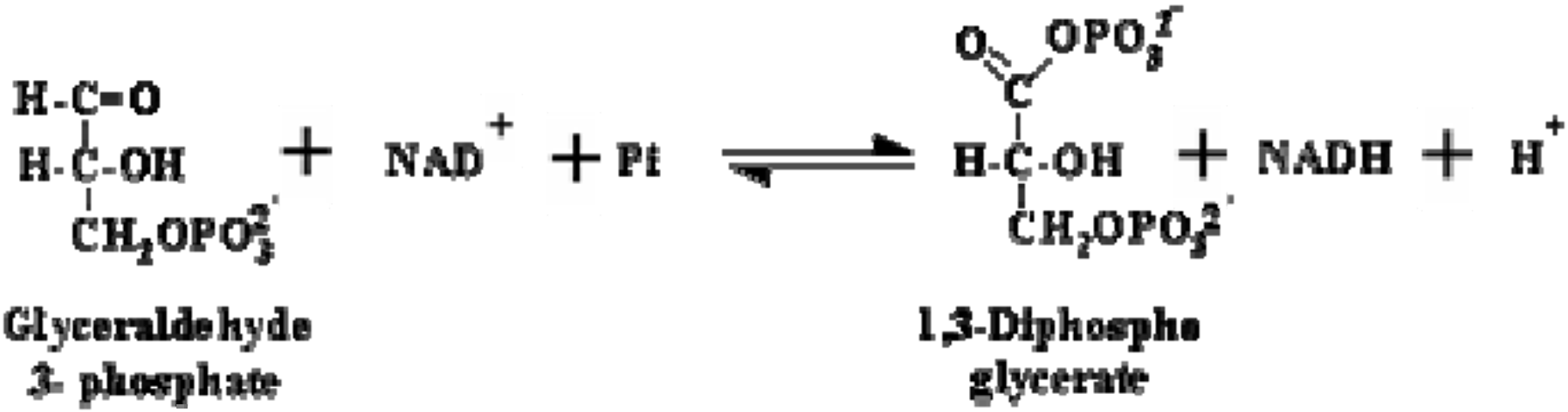
التفاعلات من ١-٥ تفاعلات استهلاك طاقة

يتكون جزيئين من جليسيرالدهايد ٣- فوسفات

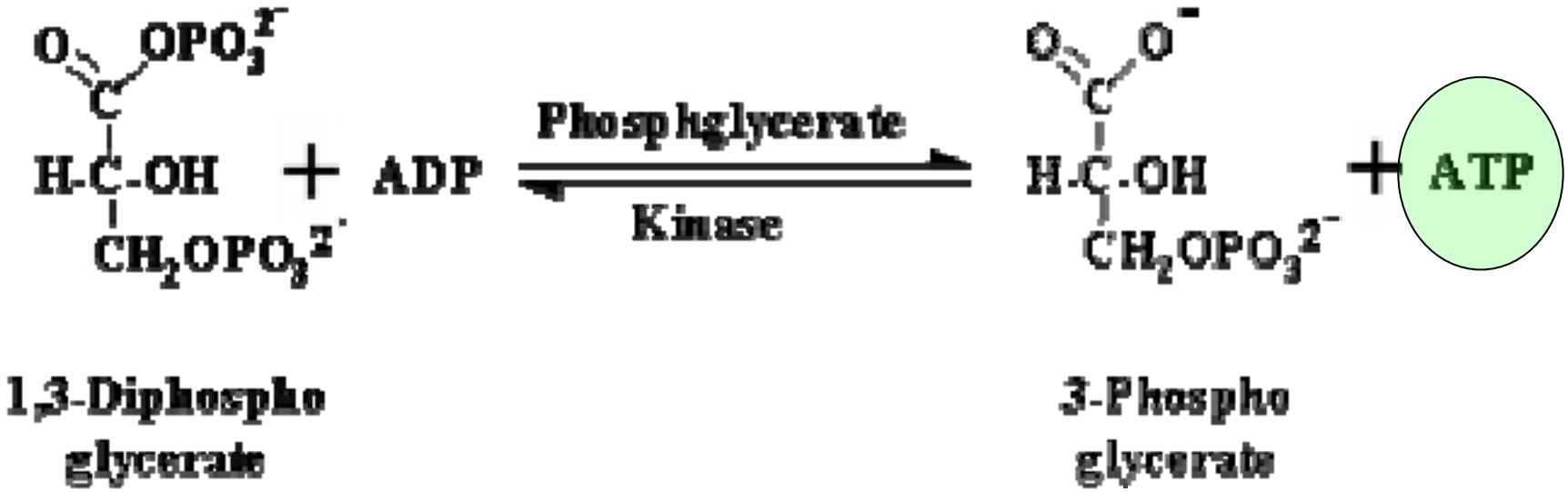
يؤثر تركيز الجليسيرالدهايد على اتجاه التفاعل فلو كان التركيز منخفضاً يكون التفاعل في اتجاه اليمين

٦- تحول جزيئان من جليسرالدهايد ٣- فوسفات إلى جزيئين من ٣,١ – ثنائي فوسفو جليسرات بواسطة إنزيم جليسرالدهايد ٣- فوسفات دي هيدروجينيز في وجود المرافق الإنزيمي نيكوتين أميد أدنين ثنائي النيوكليوتيد وفي هذا التفاعل يتكون ٣,١- ثنائي فوسفو جليسرات العالي الطاقة

ويتم كذلك انتقال الكترون من جليسيرالدهايد ٣- فوسفات إلى NAD^+ وهذا التفاعل ماص للطاقة

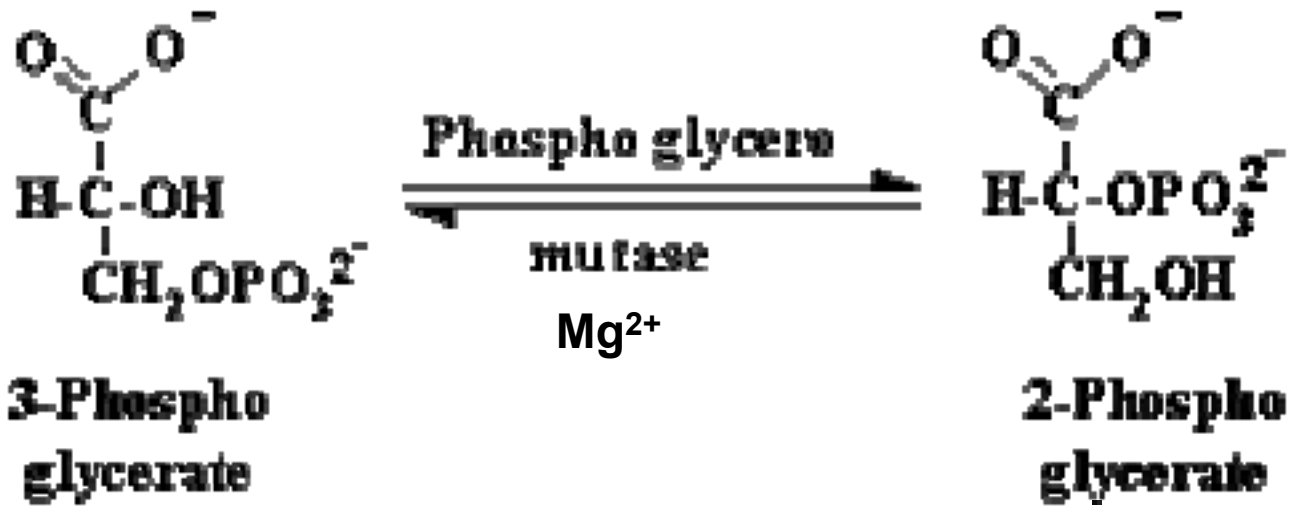


٧- تحول جزيئان ٣,١– ثنائي فوسفو جليسرات إلى جزيئين ٣ - فوسفو جليسرات وتكوين 2ATP من 2ADP بمساعدة إنزيم فوسفو جليسرات كينيز

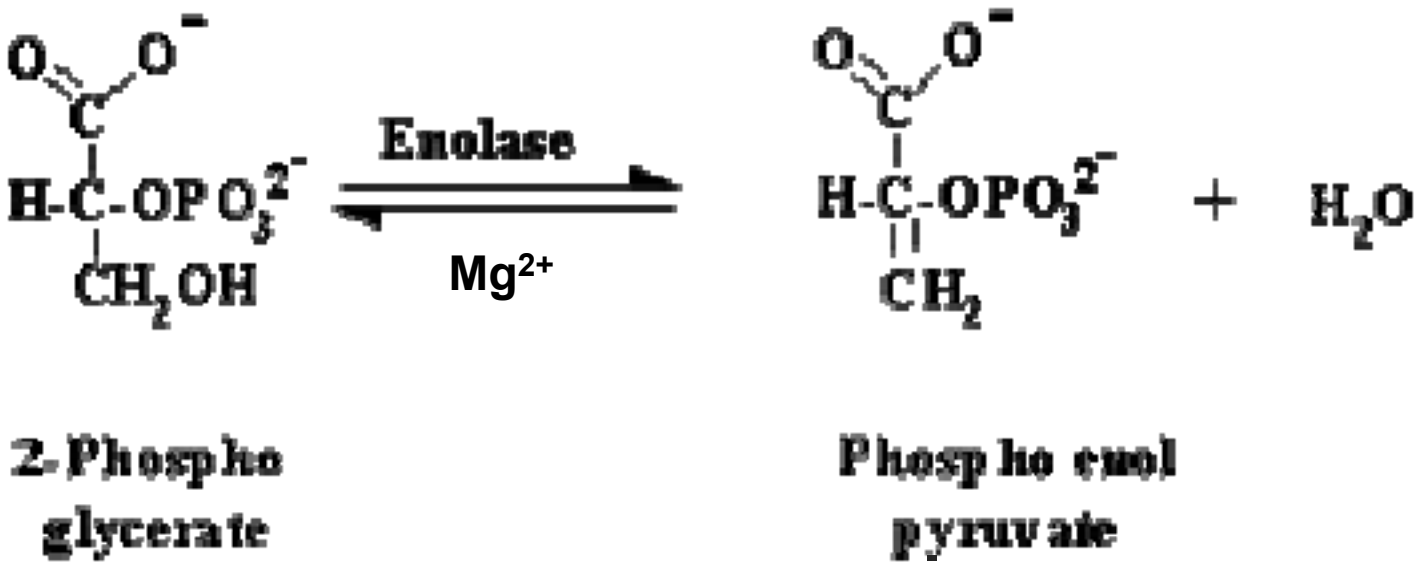


تسمى هذا النوع من الفسفرة أنه على مستوى مادة التفاعل أي تنتقل الفوسفات إلى ADP دون نقل الكترونات (على خلاف الفسفرة التأكسدية oxidative phosphorylation)

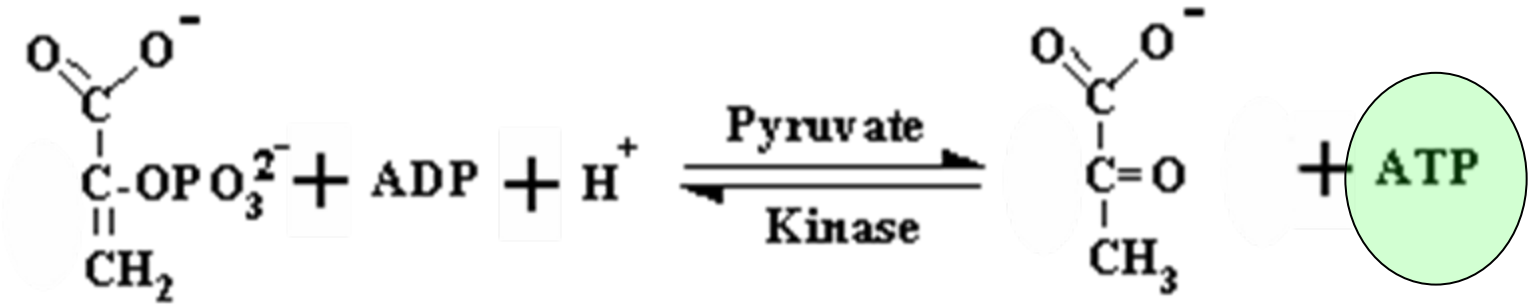
٨- تحول ٣- فوسفو جليسرات إلى ٢- فوسفو جليسرات عن طريق نقل مجموعة الفوسفات من الموقع ٣ إلى ٢ بمساعدة إنزيم فوسفو جليسرو ميوتيز Phospho glycero mutase ووجود أيون الماغنسيوم Mg^{2+}.



٩- تكون فوسفو إينول بيروفيت (مركب غنى بالطاقة) من ٢- فوسفو جليسرات بمساعدة إنزيم إينوليز Enolase ووجود أيون الماغنسيوم أو المنجنيز.



١٠- تكون البيروفيت و ATP من 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 يثبط التفاعل

حصيلة الطاقة الممثلة فى ATP هى كالتالى:

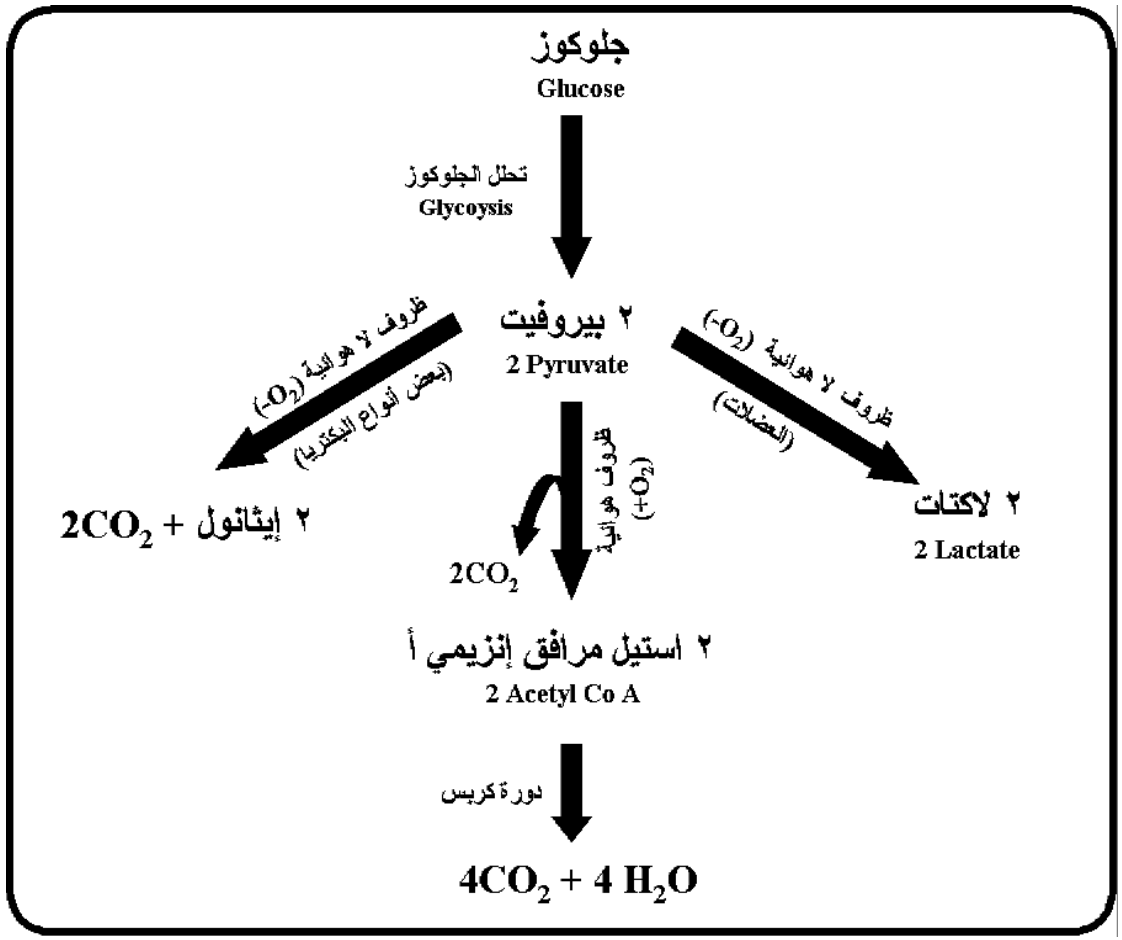
- استهلاك 1ATP في الخطوة ١
- استهلاك 1ATP في الخطوة ٣
- إنتاج 2ATP في الخطوة ٧ (باعتبار أن الجلوكوز انشطر إلى جزيئين من جليسرالدهايد ٣ فوسفات وكل جزيء جليسرالدهايد يعطي 1ATP)
- إنتاج 2ATP في الخطوة ١٠ (باعتبار وجود جزيئان من ٣ فوسفو إينول بيروفيت يعطي كل منهما 1ATP)
- وبالتالي يكون الناتج ٤ - ٢ = ٢

- يلاحظ أن جميع المركبات الوسطية التسعة بين الجلوكوز والبيروفيت مفسفرة (لماذا؟)
- أي أنها متأينة عن pH الفسيولوجية وتحمل شحنة سالبة تمنعها من المرور خلال الأغشية الخلوية لتظل في السيتوسول
- اما البيروفيت أو اللاكتات يمكن أن يمرا 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 خلالهم بمسار التحلل الجلايكولي حسب احتياج الخلية للطاقة:**
  - تحول الجلوكوز إلى جلوكوز ٦- فوسفات (الخطوة ١)
  - تحول الفركتوز ٦- فوسفات إلى فركتوز ١-٦ ثنائي الفوسفات (الخطوة ٣)
  - تحول الفوسفو إينول بيروفيت إلى بيروفيت (الخطوة ١٠)

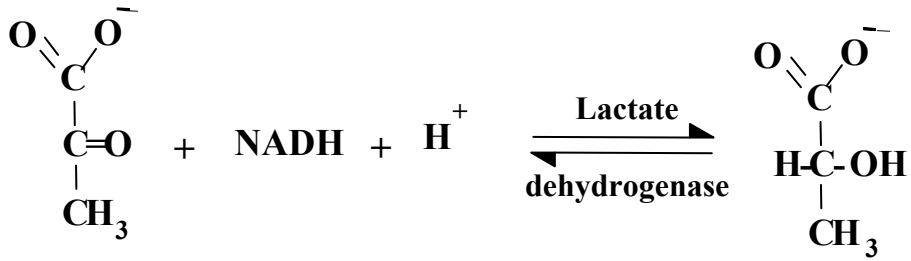
مصير البيروفيت الناتج من تحلل الجلوكوز
Fate of pyruvate produced from glycolysis



شكل (١– ٢١): مسارات أيض البيروفيت الناتج من تحلل الجلوكوز في كائنات مختلفة.

التفاعلات اللاهوائية للبيروفيت وتحويله إلى لاكتات في العضلات

- في غياب الأكسجين في العضلات أو في بكتريا حمض اللاكتيك يتحول البيروفيت إلى لاكتات بواسطة إنزيم لاكتات ديهيدروجينيز LDH



Pyruvate **Lactate**