

التكنولوجيا الغذائية وإنتاج الطاقة

التنفس Respiration

من أهم المواد الكيماوية التي تشكل مصدرا للطاقة من خلال عملية التنفس المواد الكربوهيدراتية والبروتينية والدهنية.

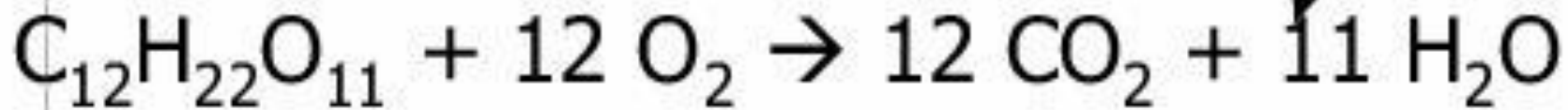
بجانب الطاقة ينتج من هذه المواد مكونات لها أهمية حيوية كبيرة من خلال مسارات أيضية Metabolic pathways.

وتغير المادة الغذائية من صورة إلى أخرى يطلق عليه عملية التحول الغذائية . Metabolism

• ونتيجة لهذه التحولات الغذائية فإن المركبات الغذائية تتغير الي صورة أبسط من صورتها الأولى أي يحدث لها هدم **Catabolism** او تتغير الي صورة اعقد تركيبا أي يحدث لها بناء **Anabolism** والهدم يكون مصحوبا بانطلاق الطاقة أما البناء فيصحبه استهلاك الطاقة.


• وعملية الهدم التي تتم باكسدة المركبات المعقدة في خطوات متتالية إلى مواد أبسط تركيبا مع إطلاق الطاقة التي تحتاج اليها الخلية للقيام بوظائفها الحيوية المختلفة تسمى عملية التنفس **Respiration** ومن اهم ملامح التنفس هو انطلاق الطاقة القابلة للاستعمال.

Aerobic respiration: Overall Reaction



Sucrose

Carbon
dioxide



Energy!

• والمواد الكربوهيدراتية لها الأولوية والأفضلية في الاستخدام حيث أن أكسدة جزئ جلوكوز أو المركبات المشابهة له يترتب عليه تحرر قدر كبير من الطاقة التي تخزن في صورة الروابط الفسفورية الغنية بالطاقة الـ **ATP denosine (Tri Phosphate)**.

• وعموما يتم هدم المواد الغذائية المعقدة للحصول علي الطاقة في ثلاث مراحل هي:-

• المرحلة الأولى: مرحلة التحلل المائي Hydrolysis Stage

- تتكسر الجزيئات الكبيرة الي أصغر منها ويستهلك طاقة
- وتحدث هذه التفاعلات بواسطة إنزيمات التحلل

المائي Hydrolysis

- فالسكريات العديدة polysaccharides كالنشأ تتحلل مائياً الي جلوكوز ويعتبر الجلوكوز من أهم السكريات البسيطة حيث يتحلل مائياً عن طريق مسلك التحلل الجليكولي Glycolysis الي 2 جزئ من pyruvic acid
- واما الدهون lipids فتتحلل بواسطة أنزيم الليباز lipase الي أحماض دهنية وجليسرول.
- اما البروتينات proteins فتتحلل بواسطة انزيم ال-protuase الي ببتيدات Peptides التي تتحلل بواسطة إنزيم الببتيديز Peptidase الي أحماض امينية Amino acids.

• المرحلة الثانية: مرحلة التفاعلات الوسطية Intermediate reactions

- وفيها يتحول نواتج التحليل المائي علي اختلاف أنواعها (حمض البيروفيك, أحماض دهنية, أحماض امينية) إلي (Acetyl CoA) وينتج عن هذه المرحلة كمية ضئيلة من الطاقة.

• المرحلة الثالثة: مرحلة التنفس الهوائي والفسفرة التأكسدية.

• **Aerobic respiration and oxidative phosphorylation stage.**

- وتتكون هذه المرحلة من دورة كربس Kerbs cycle والفسفرة التأكسدية Oxidative phosphorylation وفي هذه المرحلة تدخل Acetyl coA في دورة كربس ليتأكسد كلية الي CO_2
- ولأكسدة كل من مجموعة أسيتايل ينتقل 4 أزواج من الإلكترونات الي الـ FAD, NAD^+ ثم تنطلق جزيئات الطاقة ATP كإلكترونات نتيجة لاختزال الحوامل Carriers الي الأكسجين وهذه هي الفسفرة التأكسدية وعموما فإن معظم الطاقة تنتج من هذه المرحلة.

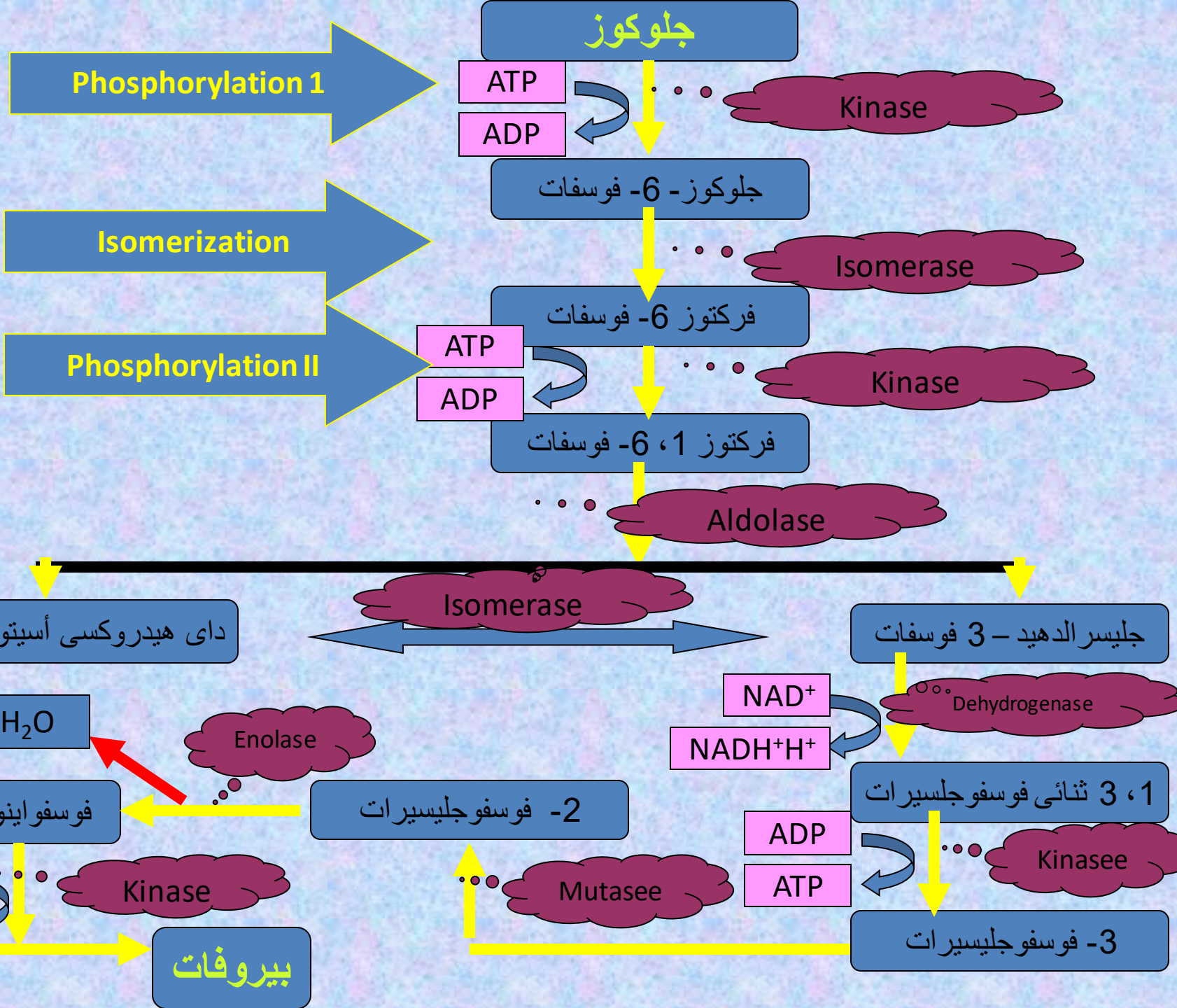
المرحلة الأولى:

التحلل المائي للسكر البسيط او دورة التحلل الجليكولي Glycolysis او مسلك (Embden- Mayerhoff- Parnass Pathway) EMP

- تتكون كلمة Glycolysis من شقين هما glyco وتعني سكر, lysis وتعني تحلل والكلمة كاملة تعني تحلل السكريات.
- ومسلك التحلل الجليكولي عبارة عن سلسلة من التفاعلات المتتالية والتي تحول السكر السداسي البسيط (الجلوكوز) في الأنسجة المختلفة الي مركب البيروفات pyruvate والتي يصحبها إنتاج طاقة في صورة ATP.
- حمض البيروفيك Pyruvic acid يمكن أن يكون في حالة حمض أو في حالة متآنية وكذلك الأحماض العضوية الأخرى.

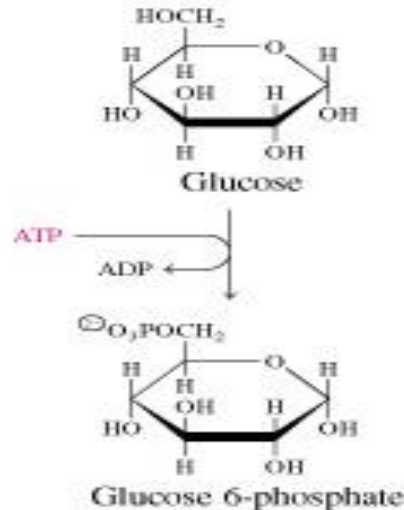
- تفاعلات هذا المسلك تحدث في السيتوبلازم ولا تحتاج الي الأوكسجين لكي تتم.
- وتتم تفاعلات هذا المسلك في خطوتين كبيرتين هما:
- الأولى: فسفرة جزئ الجلوكوز وإنتاج سكر الفركتوز ثنائي الفوسفات.
- الثانية: انشطار او تكسير سكر الفركتوز ثنائي الفوسفات الي مركبين ثلاثيا الكربون يتكون عنهما بعد ذلك وحدتين من البيروفات.

المرحلة الأولى



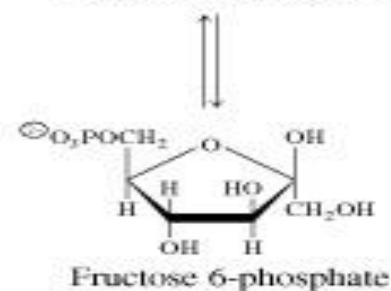
Transfer of a phosphoryl group from ATP to glucose

- ① Hexokinase, glucokinase



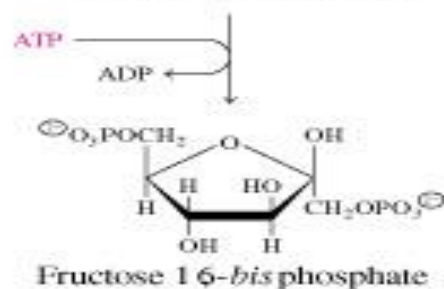
Isomerization

- ② Glucose 6-phosphate isomerase



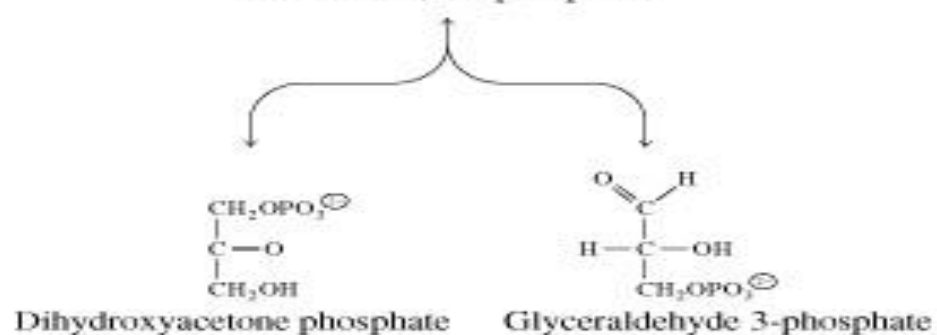
Transfer of a second phosphoryl group from ATP to fructose 6-phosphate

- ③ Phosphofructokinase-1



C-3—C-4 bond cleavage, yielding two triose phosphates

- ④ Aldolase

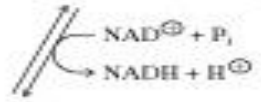




Dihydroxyacetone phosphate Glyceraldehyde 3-phosphate

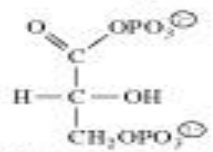
Triose phosphate isomerase (5)

Rapid interconversion of triose phosphates

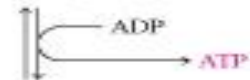


Glyceraldehyde 3-phosphate dehydrogenase (6)

Oxidation and phosphorylation, yielding a high-energy mixed-acid anhydride

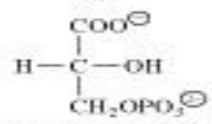


1, 3-Bis phosphoglycerate



Phosphoglycerate kinase (7)

Transfer of a high-energy phosphoryl group to ADP, yielding ATP

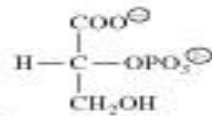


3-Phosphoglycerate

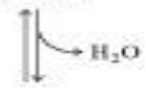


Phosphoglycerate mutase (8)

Intramolecular phosphoryl-group transfer

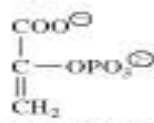


2-Phosphoglycerate

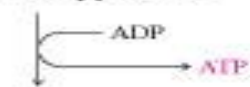


Enolase (9)

Dehydration to an energy-rich enol ester

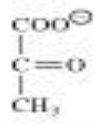


Phosphoenolpyruvate



Pyruvate kinase (10)

Transfer of a high-energy phosphoryl group to ADP, yielding ATP



Pyruvate

• الخطوة الأولى: وتستهلك طاقة لإتمامها وتتم في 3 تفاعلات متدرجة هي:

• (1) تفاعل الفسفرة الأول phosphorylation 1

• حيث يتم أولاً عملية فسفرة لسكر الجلوكوز (Hexose) في وجود جزئ ATP وانزيم الهكسوكينيز Hexokinase الي G-6- p وينتج جزئ ADP.

• (2) تفاعل التشابة Isomerization

• حيث يتم تحويل السكر السداسي من سكر الدهيدي Aldose وهو G-6- p الي سكر كيتوني Ketose وهو F-6- p حيث تتحول الحلقة السداسية pyranose في الجلوكوز الي حلقة خماسية Furanose في الفركتوز بواسطة أنزيم Phosphoglucisomerase.

• (3) تفاعل الفسفرة الثاني Phosphorylation II

• حيث يتم فسفرة ذرة الكربون الأولى في سكر F-6- p في وجود أنزيم فوسفو فركتو كينيز Phosphofructokinase حيث يستهلك جزئ آخر ATP وينتج سكر F-1,6-Bip وجزئ ADP وبذلك ينتهي الخطوة الأولى من تفاعلات التحلل الجليكولي.

الخطوة الثانية

- 1) وفيها يتم تكسير F-1,6-Bip الي مركبين يتركب كل منهم من 3 ذرات كربون هما:
G-3-P و Di(OH)AP وذلك في وجود Aldolase
ويمكن لهذين المركبين ان يتحول كل منهما للآخر والعكس بمساعدة إنزيم التشابه Phosphotriose Isomerase أي أنه إذا قل مركب G3P فإن كميات إضافية منه تتكون عن طريق تحويل مركب Di(OH) A-P عن طريق تفاعل الشابه والخاصة أن جزي واحد من F-1,6-Bip يعطي 2 جزي G3P ولم تتولد طاقة حتي الآن ولكن إستهلاك 2 جزي ATP .
- 2) يتحول G3P إلي مركب 1,3-di PGA في وجود Phosphoglyceraldehyde dehydrogenase .
- 3) يتحول مركب 1,3-di PGA إلى 3-PGA في وجود ADP و Phosphoglycero Kinase ويتكون جزي ATP .
- 4) يتحول مركب 3-PGA إلى 2-PGA بواسطة phsphoglyceromutase
- 5) باستبعاد عناصر الماء dehydration من مركب 2-PGA في وجود enolase يتكون مركب Phosphoenol Pyruvate
- 6) يتحول Phosphoenol Pyruvate إلى Pyruvate في وجود Pyruvate Kinase وجزي ADP. وفي هذا التفاعل ينتقل شق حمض الفوسفوريك من Phosphoenol Pyruvate إلى جزي ADP ليتكون ATP .

في المسلك ككل فإن تحول جزئ واحد من الجلوكوز إلى جزئين من البيروفات يعطي 2 جزئ ATP 2جزئ NADH كمحصلة نهائية وبالتالي فالنتاج النهائي الحقيقي من الطاقة لدورة الجليكولي هو 8 جزيئات ATP.

التفاعل	كمية الطاقة الناتجة
جلوكوز ← جلوكوز - 6 - فوسفات	- جزئ ATP
فركتوز - 6 - فوسفات ← فركتوز 1، 6 - ثنائي الفوسفات	- جزئ ATP
3- فوسفوجليسرالدهيد ← 1، 3 - فوسفوجليسرات	+ 2 جزئ NADH (6 جزيئات ATP)
1، 3 - فوسفوجليسرات ← 3- فوسفوجليسرات	+ 2 جزئ TAP
2 جزئ فوسفواينول بيوفات ← 2 جزئ بيروفات	+ 2 جزء ATP
المجموع	8 جزيئات ATP

• المرحلة الثانية: مرحلة التفاعلات الوسيطة

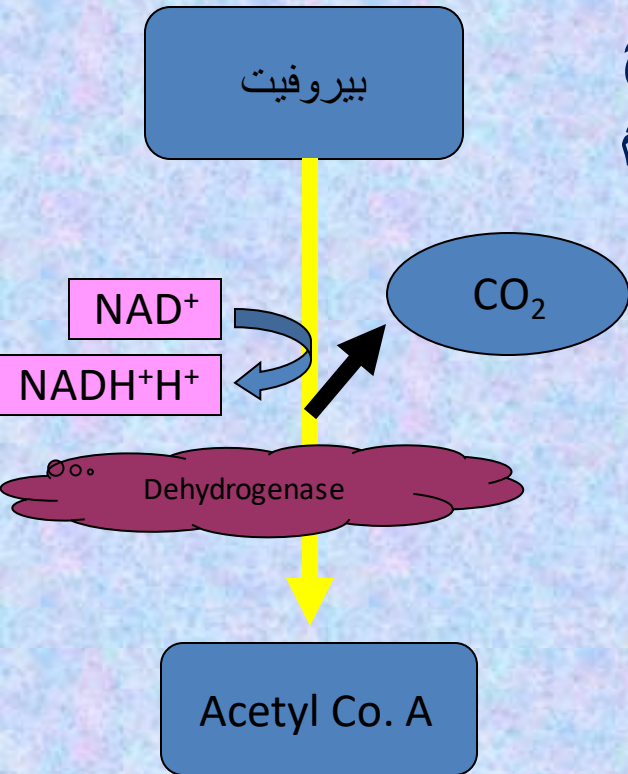
• (أ) تحلل البيروفات الناتجة عن التحلل الجليكولي إلى (Acetyl CoA)

• يتضح مما سبق في مسلك التحلل الجليكولي أن ناتج تحلل سكر الجلوكوز هو حمض البيروفيك والذي يتم في السيتوبلازم في غياب الأكسجين. وفي المرحلة الوسيطة وعند توفر الأكسجين يتم أكسدة حمض البيروفيك بنزع مجموعة الكربوكسيل Oxidative decarboxylation وانطلاق CO_2 ليعطى مركب (Acetyl CoA).

• وخطوات هذه المرحلة تتم في ظروف هوائية (O_2) في حشوة الميتوكوندريا

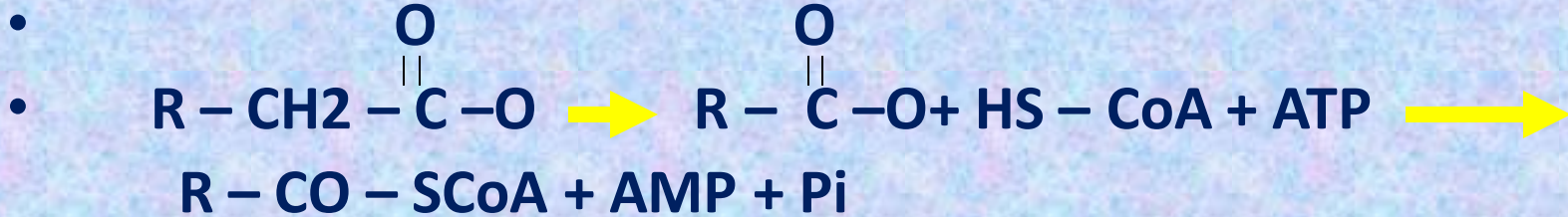
• والإنزيم المحفز لهذا التفاعل هو بيروفات ديهيدروجينيز

• Pyruvate dehydrogenase



• (ب) تحلل الأحماض الدهنية:

تحلل الأحماض الدهنية بالأكسدة في الموضع بيتا B .



• والنتج النهائي هو مركب خلاات المرافق الإنزيمي - أ (Acetyl CoA) والذي يدخل في تفاعل التنفس الهوائى (دورة كربس) بعد ذلك.

ج تحلل الأحماض الأمينية:

تتحلل على مرحلتين كالآتى:-

ينم فيها نزع مجموعة الأمين (-NH₂) بتفاعل يسمى deamination فيتحول الحامض الأمينى إلى حامض كيتونى.



(2) وفيها قد تتحول الأحماض الكيتونية إلى خلاات المرافق الإنزيمي - أ ولكن من المحتمل أن تتحول بعض الأحماض الكيتونية إلى أحماض عضوية ثلاثية الكربوكسيل والتي تشكل مركبات وسيطة فى دوره كربس.

المرحلة الثالثة: مرحلة التنفس الهوائي (دورة كربس Krebs cycle) ونظام نقل الإلكترون ETS.

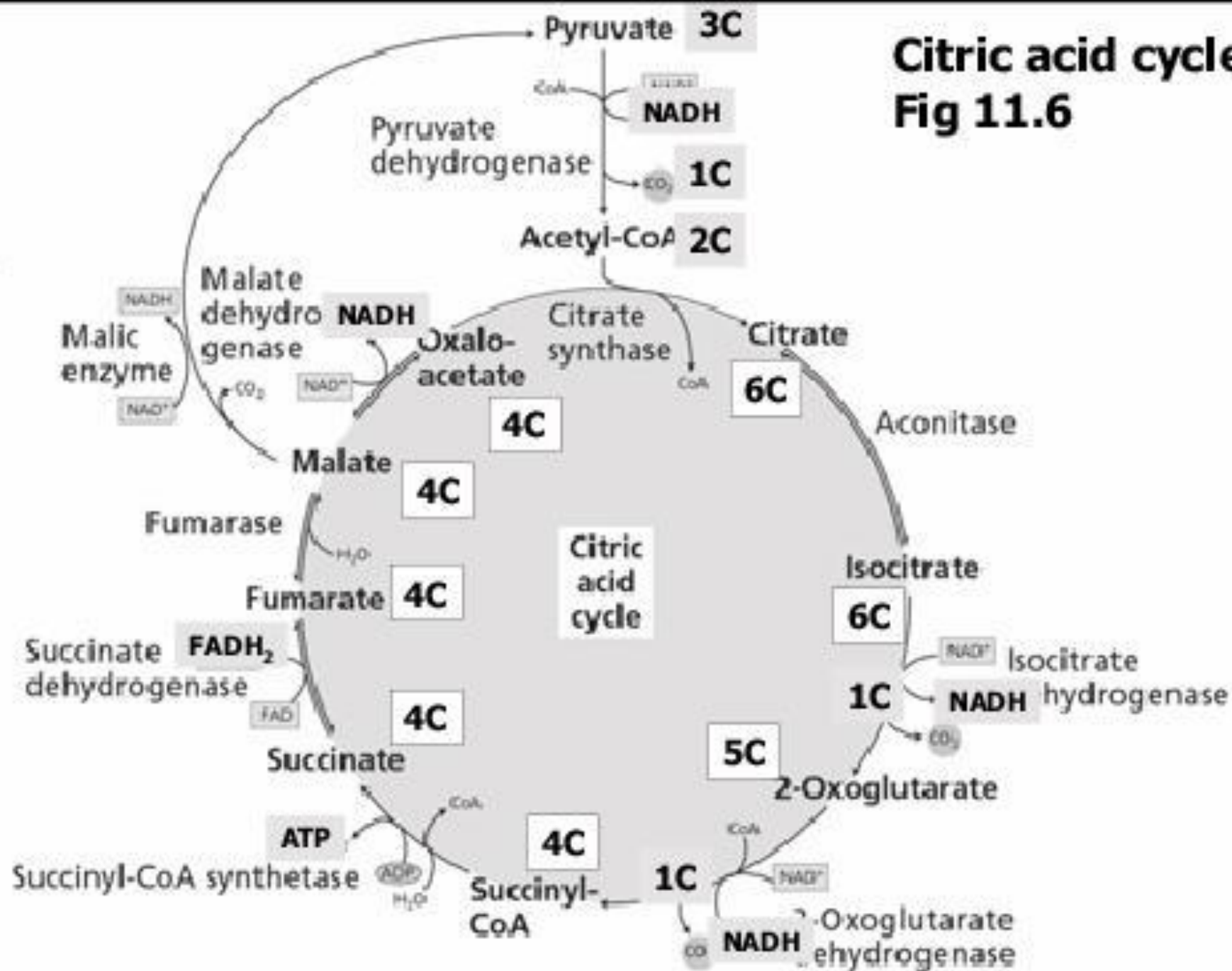
- عدم فاعلية دورة التحلل الجليكولي من حيث إنتاج الطاقة
- خلاص المرافق الإنزيمي – أ (Acetyl CoA) تعتبر حلقة الوصل بين التحلل الجليكولي ودورة كربس
- وهي دورة دائرية يتجدد فيها تكوين أيون الأوكسالوخلات Oxaloacetate.
- وعموما عن طريق دورة كربس ونظام نقل لإلكترون يتم أكسدة البيروفات أكسدة تامة إلى CO_2 ، H_2O .
- ومن خلال ارتباط دورة كربس مع نظام نقل الإلكترون (المرحلة الثالثة) نحصل 24 جزئ ATP لذلك يعتبر دورة كربس فعالة جدا في إنتاج الطاقة بالمقارن بالتحلل الجليكولي. وعموما فإن تفاعلات دورة كربس ونظام نقل الإلكترون يحتاج إلى توفر الأكسجين وتحدث هذه التفاعلات في الميتوكوندريا.

أولاً: دورة كريبس: Krebs cycle
أو دورة حمض الستريك Citric acid cycle
أو دورة الأحماض ثلاثية الكربوكسيل Tricarboxylic acid cycle

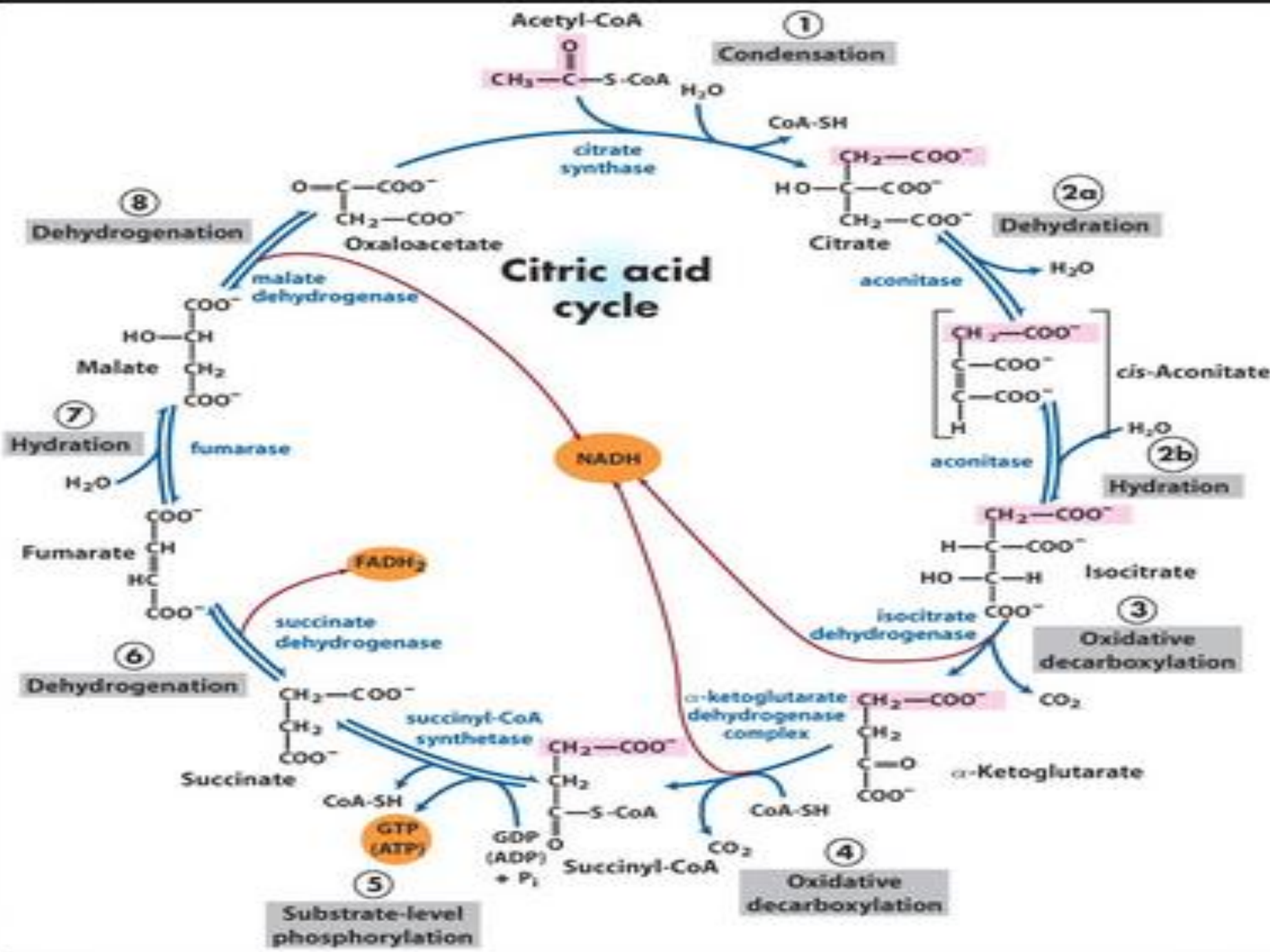
- التفاعل العام للدورة هو:
- $\text{Acetyl CoA} + 3 \text{NAD}^+ + \text{FAD} + \text{GDP} + \text{P I} + 2\text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{Co}_2 + 3\text{NADH} + \text{FADH}_2 + \text{GTP} + 2 \text{H}^+ + \text{COA}$
- وتتم الدورة في خطوتين رئيسيتين هما:
- الخطوة الأولى:
- وتمثل التفاعل الأول في دورة كريبس ويتضمن تكثيف Oxaloacetate (وهو مركب رباعي الكربون) ويتكون مركب يحتوى على 6 ذرات كربون هو Citrate
- ويجب أن يلاحظ أن أحماض دورة كريبس على الصورة الأيونية (R - CoO⁻) لذلك تسمى Citrate و Oxaloacetate وهكذا.

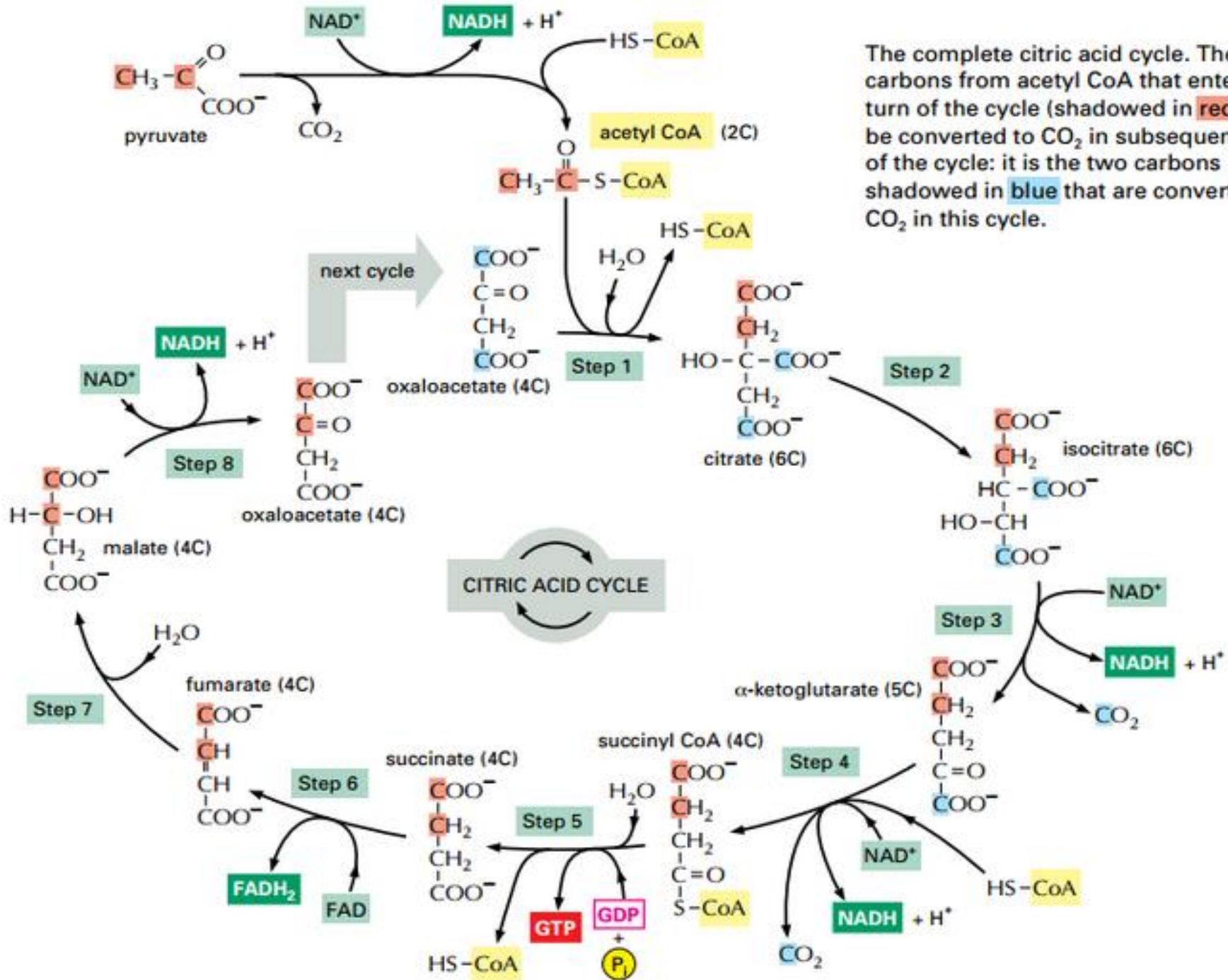
Citric acid cycle

Fig 11.6



Citric acid cycle





The complete citric acid cycle. The two carbons from acetyl CoA that enter this turn of the cycle (shaded in red) will be converted to CO₂ in subsequent turns of the cycle: it is the two carbons shaded in blue that are converted to CO₂ in this cycle.

• الخطوة الثانية:

• وتمثل تفاعلات تجديد Oxaloacetate من حمض الستريك Citric acid.

• التفاعل الأول:

• تحويل السترات Citrate إلى مشابهه Isocitrate ويتم في هذا التفاعل نزع الماء dehydration من السترات ليتكون cis-acontate في وجود إنزيم acontase ثم إضافة الماء مرة أخرى إلى cis-acontate ليتكون Isocitrate. والغرض من هذه العملية هو تبادل مواضع ال H ، OH للسماح للمركب بالدخول في تفاعل أكسدة بنزع مجموعة الكربوكسيل.

• التفاعل الثاني:

• أكسدة الايزوسترات إلى α -Ketoglutarate وهو أول تفاعل أكسدة في الدورة ويتم في وجود إنزيم Isocitrate dehydrpgenase والمرافق الإنزيمي NAD^+ حيث تحدث أكسدة لمشابه السترات بنزع مجموعة الكربوكسيل فيتحول الأيزوسترات إلى ألفا كيتوجلوتاريت.

• ويعتبر α -Ketoglutarate مركب أساسي ورئيسي لاغنى عنه لأيض النبات لأنه يلعب دورا في أيض الكربوهيدرات والدهون وكذلك في بناء وتكسير الأحماض الأمينية.

• التفاعل الثالث:

- أكسدة α -Ketoglutarate إلى Succinyl CoA ثم Succinate. وهو ثاني تفاعل أكسدة في دورة كربس ويتم في وجود انزيم Ketoglutarate dehydrogenase.
- والطاقة المخزنة من Succinyl CoA تتحرر في التفاعل التالي لتكون رابطة فوسفاتية غنية بالطاقة ويتم ذلك في وجود GDP والفوسفور الغير عضوى (pi) حيث يتحول Succinyl CoA إلى Succinate وفي نفس الوقت يتحول إلى GDP إلى ATP 0
- وهذا هو التفاعل الوحيد في الدورة الذي يعطى مباشرة مركب فوسفاتي غني بالطاقة

- التفاعل الرابع:
- أكسدة Succinate إلى Fumarate ثم إضافة الماء لإنتاج Malate. تعتبر الخطوة التأكسدية الثالثة في دورة كربس
- حيث تتم الأكسدة بنزع الهيدروجين عن طريق Succinate dehydrogenase حيث يتم إزاحة زوج من الإلكترونات وزوج من ذرات الهيدروجين من Succinate ويستعملون لاختزال مركب (FAD) الخاصة بإنزيم سكسينات ديهيدروجينيز.
- ونواتج تفاعل Succinate هي Fumarate والتي تحدث لها إضافة عناصر الماء Hydration في وجود إنزيم Fumarase ليعطي Malate.

• التفاعل الخامس:

- أكسدة Malate لتكوين Oxaloacetate
- وهذه هي الخطوة التأكسدية الرابعة لدورة كربس
- حيث تتحول Malate إلى Oxaloacetate في وجود إنزيم Malate NAD-dehydrogenase حيث يتم اختزال ال- NAD^+ إلى $NADH + H^+$ وهكذا يتم تجديد الأوكسالوخلات وتتم الدورة.
- وكما سبق فإن دورة كربس بها 4 خطوات تأكسدية
- وتعتبر المرافقات المختزلة ($NADH, FADH$) قوة اختزالية تستعمل لإنتاج ATP من خلال تفاعلات الأكسدة – الاختزال لنظام نقل الإلكترون وفي وجود O_2 حيث أن النظام يرتبط ارتباطاً خاصاً مع أغشية الميتوكوندريا ودورة كربس.

- ودورة كربس تشبه الطاحونة فإذا توافرت الظروف الهوائية وتوفر في الخلية Acetyl Co-A (من الكربوهيدرات أو الدهون أو البروتينات) فإن Acetyl Co-A يظل يتحد مع Oxaloacetate ويفقد علي صورة CO_2 محررا Oxalate مرة أخرى يتحد مع جزئ جديد من Acetyl Co-A وتعاد الدورة مرات ومرات

- ويتضح من الدورة ان محصول الطاقة النهائي لكل جزئ pyruvate هو 12 جزئ ATP (3NADH, 1GTP, 2FADH₂)

- أي أنها تساوي $12 = 2 \times 1 + 1 + 3 \times 3$ جزئ ATP وحيث أنه ينتج 2 جزئ بيروفيت من اكسدة جزئ جلوكوز إذن ينتج $24 = 12 \times 2$ جزئ ATP

نظام نقل الإلكترون (ETS) Electron transport system . الفسفرة التأكسدية (Oxidative phosphorylation)

- يرتبط نظام نقل الإلكترون بأغشية الميتوكوندريا فالمركبات المكونة له تكون منغمسة في مادة الغشاء الداخلي المتعرج وكذلك يرتبط بالزوائد المقبضية Crist المسئولة عن تخليق الـ ADP كما ترتبط النواتج المختزلة لدورة كريس وهي $NADH + H^+$, $FADH_2$ مع نظام نقل الإلكترون ومن خلال هذا الارتباط يعاد أكسدة المرافقات الأنزيمية المختزلة $NADH$, $FADH_2$ وتستغل الطاقة المتحررة من عملية الأكسدة في تخليق جزيئات الـ ATP .

• ويتم تخليق الـ ATP بواسطة سريان الإلكترونات خلال نظام ETS مع استعمال الأكسجين (O_2) كمستقبل نهائي للإلكترونات حيث يتحول إلى ماء وتسمى هذه العملية بالفسفرة التأكسدية .

• ويتركب نظام نقل الإلكترونات من سلسلة من المركبات الحاملة Carriers مثل FAD و FMN والمرافق الإنزيمي CO-Q و عدد من السيوكروومات cytochromes مثل

cyt . B, C , a and a3

- **ومن ملامح هذه السلسلة** أن كل خطوة من خطواتها تقل في مستوي الطاقة عن الخطوة السابقة لها بمعنى أن الإلكترون يسري من مستوي طاقة عالي إلى مستوي طاقة أقل وبالتالي فإن فرق الطاقة المترتب على نقله يستخدم لإضافة رابطة فوسفورية إلى مركب ADP فيتحول الي ثلاثي ATP.
- كل زوج من الإلكترونات (زوج من ذرات الهيدروجين يستخدم في الأكسدة والاختزال) يمر في نظام نقل الإلكترون ابتداءً NADH حتى نهاية السلسلة يترتب عليه إنتاج 3 وحدات من مركب ATP بينما يترتب على نقل الإلكترون من FADH إلى نهاية النظام إنتاج جزئين فقط من ATP
- وعندما تنتقل هذه الإلكترونات إلى جزئ الأكسجين تتحرر منها كمية كبيرة من الطاقة والتي تستخدم في تكوين ATP، ويتم هذا الانتقال عن طريق سلسلة حوامل الإلكترونات السابق الإشارة إليها .
- وبذلك ينشط الأكسجين ويستقبل أيونات الهيدروجين الحرة ليكون الماء.

حساب الطاقة الكلية الناتجة من أكسدة جزئ جلوكوز

(1) دورة التحلل الجليكولي (مسلك EMP):

التكسير الكامل لجزئ الجلوكوز يعطي 2 جزئ حمض بيروفيك حيث ينتج جزئين ATP وجزئ NADH لكل جزئ واحد من حمض البيروفيك ويلاحظ استهلاك جزئان ATP أثناء الدورة.

عموما التحليل الكامل لجزئ الجلوكوز إلي 2 جزئ بيروفيك هو 4 جزئيات ATP وجزئان NADH (= 6 جزئيات ATP) وإستهلاك 2 جزئ ATP. إذن الناتج النهائي من الطاقة = 10 جزئيات ATP مطروحا منهم 2 جزئ ATP يساوي 8 جزئيات ATP.

(2) المرحلة الوسيطة:

عند تحول جزئ واحد من حمض البيروفيك إلي خلات المرافق الإنزيمي-أ ينتج جزئ NADH أما تحلل جزئين من حمض البيروفيك يعطي 2 جزئ NADH أي ما يساوي 6 جزئيات ATP لكل جزئ جلوكوز.

(3) دورة كربس:

عند دخول خلات المرافق الإنزيمي-أ في الدورة واتحادهما مع السيكسينات لأنتاج ك 2 والطاقة نجد أنه ينتج 3 جزئيات 1 NADH, جزئ GTP الذي يتحول الي جزئ ATP بالإتحاد مع ADP وجزئ واحد من ال-FAD. إذن المحصلة النهائية للطاقة الناتجة من جزئ واحد حمض بيروفيك هي

: 2 جزئ (= 9) = NADH جزئيات 1 + ATP جزئ GTP

(= 1 جزئ 1 + ATP جزئ 2) = FADH جزئ ATP أي ما يساوي 12 جزئ ATP وبالتالي فإن

الكمية الكلية من الطاقة (ATP) لكل جزئ سكر = 2 جزئ بيروفيك × 12 = 24 جزئ ATP. ومما

سبق يتضح أن الطاقة الكلية (ATP) الناتجة من هدم جزئ جلوكوز هي: 8 جزئيات من التحلل

الجيلوجي + 6 جزئيات عند تكوين خلات المرافق الإنزيمي-أ + 24 جزئ من دورة كربس وتساوي

38 جزئ ATP

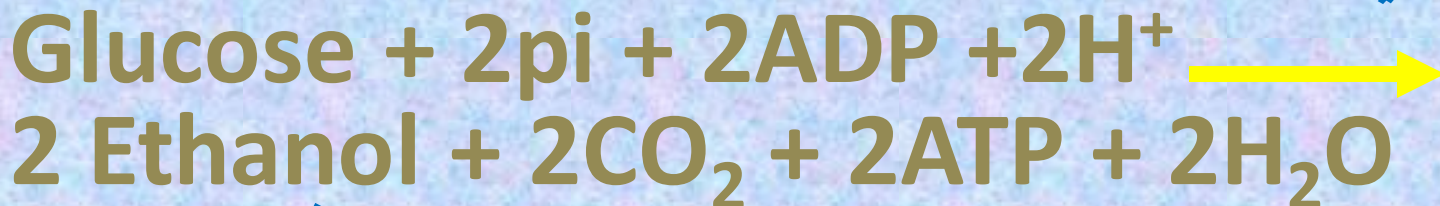
جدول يوضح محصول الطاقة الناتجة من الأكسدة الكاملة لجزئ واحد من الجلوكوز في وجود 2

المسلك	NADH (3ATP)	FADH (2ATP)	ATP	الكمية الكلية من ATP
التحلل الجليكولي	2(6)	صفر	2	8
تكوين خلات المرافق الأنزيمي أ من حمض البيروفيك	2(6)	صفر	صفر	6
دورة كربس	6(18)	2(4)	2	24
المجموع	3 x 10 30 =	4 = 2 x 2	4	ATP 38

التخمير Fermentation

تلجأ بعض النباتات الراقية عند غياب الأوكسجين إلى التنفس اللاهوائي لمدة معينة حيث تتراكم نواتج التفاعل الضارة مما يؤدي إلى موت النبات ولكن بعض الكائنات الدقيقة خاصة المائية منها أن تتنفس بهذه الطريقة أي التنفس اللاهوائي Anaerobic respiration أو التخمير Fermentation.

ويمكن تمثيل التفاعل الكلي لعملية التنفس في غياب الأوكسجين بالتفاعل التالي:



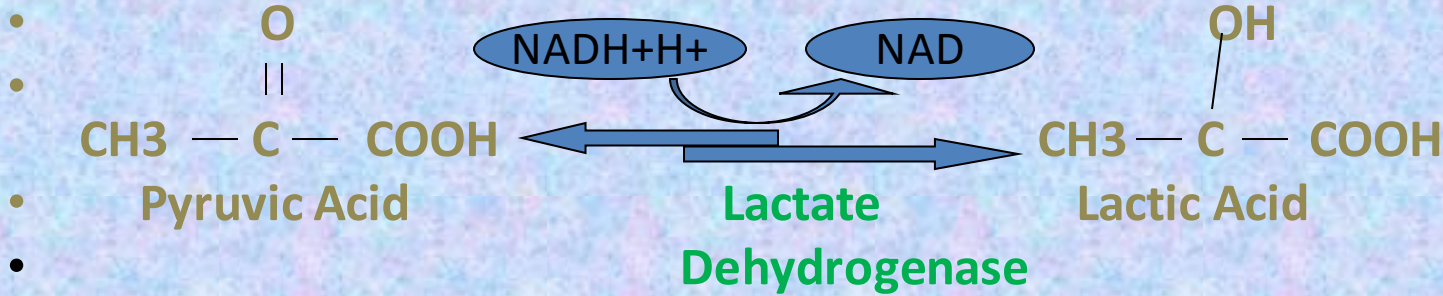
أي أن جزء واحد من الجلوكوز يتحول إلى 2 جزء كحول إيثانول ويتصاعد 2 جزء من غاز CO_2 حيث يتكون التخمير من سلسلة متتالية من التفاعلات تحدث في غياب O_2 .

• والآن نرى اللذان يحفزان هاتين الخطوتين هما إنزيم الكاربوكسيليز Carboxylase وإنزيم الكحول ديهيدروجينيز alcohol dehydrogenase, ولا ينتج أي جزيئات ATP في هاتين الخطوتين

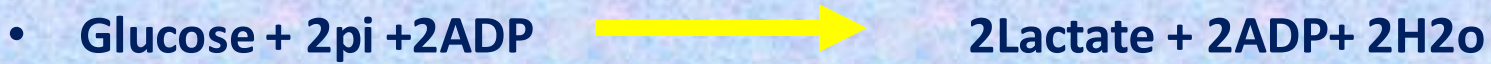
• ولذلك فإن صافي الطاقة للتخمر هي 2 جزيء ATP من خطوات التحلل الجليكولي فقط .

• ولا يشكل التخمر الصورة الطبيعية لتنفس النباتات الراقية لكنه يمثل الوسيلة الكبرى لإنتاج ATP في عديد من الكائنات الدقيقة والتي تسمى كائنات لاهوائية تكسير المركبات العضوية في غياب O_2 وأحسن الكائنات التخمرية المعروفة هي فطر الخميرة Yeast

• ويمكن أن ينتج حمض اللاكتيك من تخمر سكر الجلوكوز بيكتريا حمض اللاكتيك خاصة في اللبن حيث يتكون حمض اللاكتيك من حمض البيروفيك بدلا من الكحول الإيثانول ويحفز هذا التفاعل إنزيم ديهيدروجينيز حمض اللاكتيك



• والمعادلة العامة هي:



• وتحتوي نواتج التخمر السابقة مثل الإيثانول وحمض اللاكتيك علي كمية كبيرة من الطاقة لكن لا تستطيع النباتات ان تستفيد من هذه الطاقة الغير ميسورة

• وهذا يعتبر دليلا علي ان التنفس اللاهوائي عملية غير فعالة نسبياً.

علاقة أيض المواد الكربوهيدراتية بالنسبة للمركبات الأخرى:

- تعتبر المواد الكربوهيدراتية ذات أهمية ايضية كبيرة للنبات حيث تستخدم كمواد بادئة لإنتاج ATP والقوة الإختزالية في صورة المرافق الإنزيمي المختزل NADH عن طريق عملية التنفس



- وخلال عمليات الأيض لا تتكسر المواد الكربوهيدراتية في العادة تكسيرا كاملاً ولكنها تستخدم كأصول Precursors لبناء المواد الأخرى بجانب عنلية التنفس ويؤدي هذا الي بناء مواد الجدار الخلوي والأحماض النووية والبروتينات والدهون والهرمونات النباتية والصبغات ومن هذا يتضح أن هناك علاقة ديناميكية بين تفاعلات البناء والتفاعلات المنتجة للطاقة وبين تفاعلات التحولات الكيموحيوية للمواد التي ينتج عنها العدد من المنتجات النباتية كما بالشكل.