ايض الكاربوهيدرات CARBOHYDRATES

تعد الكاربوهيدرات من أكثر المواد العضوية انتشاراً في الطبيعة، حيث تدخل في التركيب الهيكلي للنباتات، والتي تتكون نتيجة لعملية التركيب الضوئي، ويمكن تعريف الكربوهيدرات بأنها مركبات عضوية تتكون من الكربون والهيدروجين والأوكسجين (CHO)، وتعرف كذلك بأنها مشتقات ألدهيدية أو كيتونية لكحولات عديدة الهيدروكسيل، أو بأنها المركبات التي تعطي عند تحللها مائياً مشتقات ألديهايدية أو كيتونية عديدة الهيدروكسيل (OH).

وظائف الكاربوهيدرات :

1. تعد مصدراً لذرات الكاربون والتى تستعمل لتخليق مكونات الخلية الاخرى.
2. تعتبر مصدراً من مصادر الطاقة فمثلا يعد الكلوكوز مصدر رئيسي للطاقة في الخلايا الحيوانية والنباتية.
3. تكون الكاربوهيدرات مخازن كبيرة للطاقة كما هو الحال مع النشأ في النباتات والكلايكوجين في الحيوانات.
4. لها وظائف تركيبية وبنائية في الخلايا والانسجة الحيوية حيث تشارك بعض الكاربوهيدرات في مكونات الخلية الاساسية مثل الرايبوز والدي اوكسي رايبوز المكون الأساسي الموجود في الأحماض النووية RNA، DNA. وكذلك لها وظيفة بنائية فهي وحدات تركيبية لجدار وغشاء الخلية كما هو الحال مع السيليلوز.

تصنيف الكاربوهيدرات Classification of Carbohydrates

تقسم الكاربوهيدرات تبعاً لعدد جزيئات السكريات البسيطة التي تنتج عند تحللها كلياً إلى:

اولاً: السكريات الأحادية Monosaccharides:

هي مركبات لا يمكن أن تتحلل ألى جزيئات أصغر بالتحلل المائي وتكون عادة حلوة المذاق ذائبة بالماء وتوجد بشكل متبلور. وتسمى السكريات التي تحمل مجموعة الالديهايد تسمى بالسكريات الالديهايدية Aldoses مثل الكلوكوز، أما السكريات التي تحمل المجموعة الكيتونية Ketones مثل الفركتوز فتسمى السكريات الكيتونية، من الاثلة عليها Pentose، Ribose، Arabinose، Glucose، Fructose.

ثانياً: السكريات الثنائية Disaccharides:

هي السكريات الناتجة من اتحاد جزيئتين من السكريات الاحادية السداسية. مثل Sucrose، Maltose، Lactose.

ا.د. ثامر عبد الله زهوان
ا.م.د. طه شهاب احمد

ثالثا: سكريات قليلة الوحدات Oligosaccharides:

تتكون من ارتباط 3- ١٠ جزيئات من السكريات الأحادية، مثال: Raffinose.

رابعاً: السكريات العديدة Polysaccharides:

هى عبارة عن سلاسل طويلة مستقيمة أو متفرعة ناتجة عن ترابط نوع واحد من وحدات سكر أحادي متكرر أو أكثر. مثل النشا Starch، Amylose، Amylopectin، Cellulose، Agar.

أيض الكاربوهيدرات Metabolism of Carbohydrates

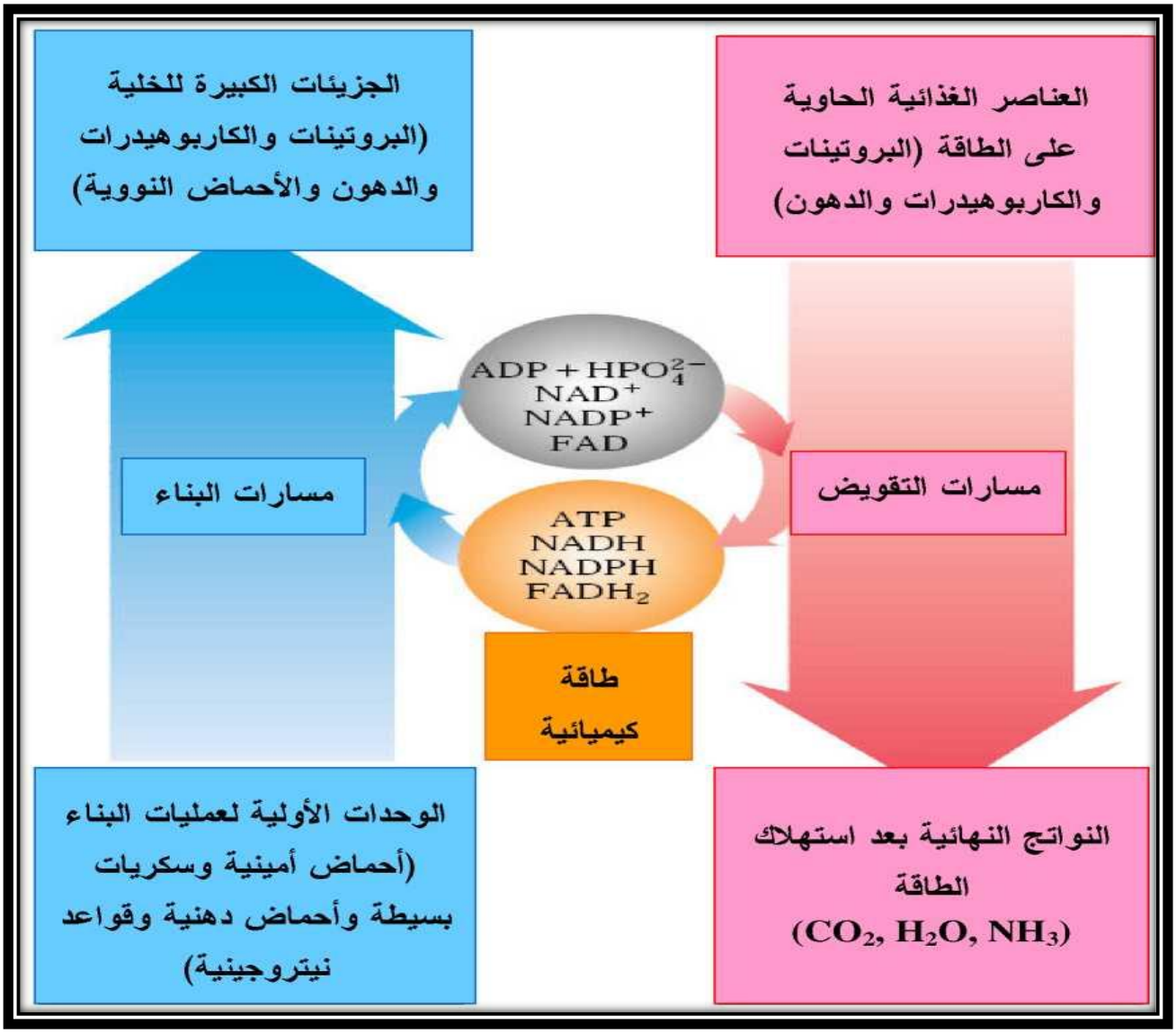
تنتقل العناصر الغذائية بعد عملية الامتصاص الى أنسجة الجسم المختلفة ومن ثم الى داخل الخلايا إذ تدخل عمليات الأيض والتي تعرف بأنها مجموعة التفاعلات الكيميائية التي تتم في خلايا الكائن الحي للعناصر الغذائية الممتصة بهدف تكوين جزيئات بنائية جديدة يستفيد منها جسم الكائن الحي أو هدمها وتحللها لتوليد الطاقة.

أما تعريف المسار الأيضي Metabolism pathway: فهو مجموعة التفاعلات الكيميائية المتعاقبة التي تتم داخل الكائن الحي لإنتاج او تكوين مواد معينة، ولها ثلاثة مسارات كما في الشكل (1):

1- المسارات البنائية Anabolism pathways: والتي تتم من خلالها عمليات بناء جزيئات كبيرة من جزيئات صغيرة على سبيل المثال بناء البروتينات من الأحماض الأمينية أو الكلايكوجين من سكر الكلوكوز وتحتاج هذه المسارات الى طاقة.

2- المسارات الهدمية Catabolism pathways: والتي تضم عمليات تحطيم الجزيئات الكبيرة الى جزيئات صغيرة كالبروتينات الى الأحماض الأمينية للاستفادة منها، في عملية البناء للحصول على طاقة وقوى مختزلة.

3- المسارات البنائية الهدمية Amphibolism pathways: عبارة عن مسارات تشترك فيها العمليات البنائية والهدمية على سبيل المثال دورة حامض الستريك التي تعطي مركبات يمكن استخدامها في البناء وفي نفس الوقت تعطي طاقة لاستخدامها في أداء وظيفة معينة.



الشكل **(1):** مسارات الهدم والبناء والعلاقة بينهما، إذ يلاحظ كيفية استخدام الطاقة والقوى المختزلة الناتجة من مسارات الهدم لاستخدامها في بناء المركيات الحياتية المختلفة للخلية.

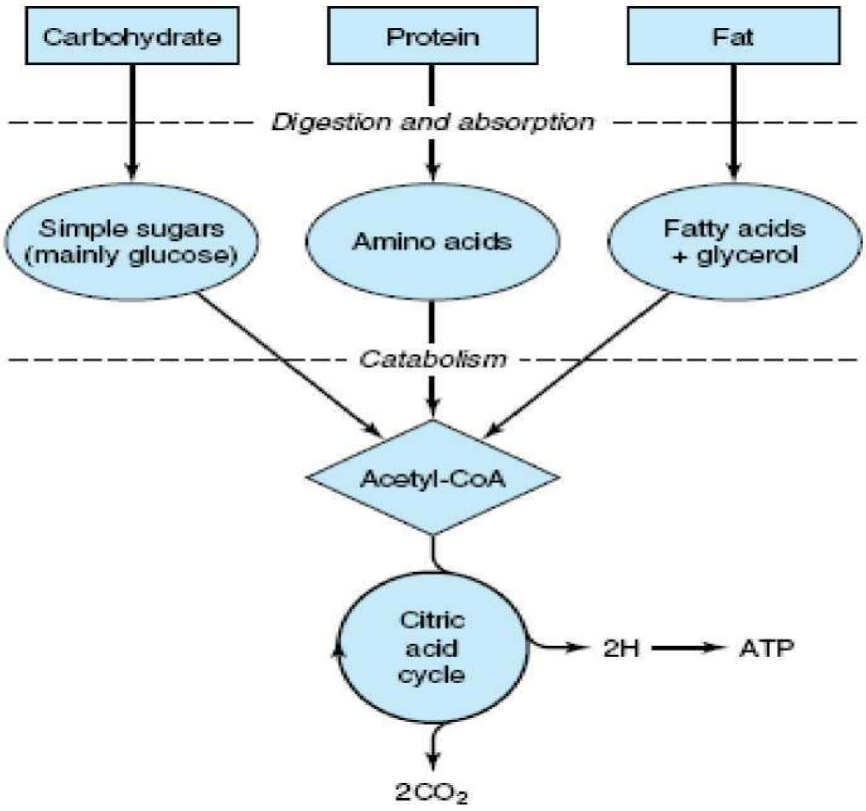
الجدول رقم 1. الفروقات بين المسارات الهدمية والبنائية.

مسار الهدم	مسار البناء
محرر للطاقة على أشكال مختلفة مثل تكّون ATP من ADP .	مستهلك للطاقة اذ تحتاجها في عمليات البناء مثل ATP لتتحول الى ADP .
تتحول الجزيئات الكبيرة الى جزيئات صغيرة فمثلا السكريات العديدة (الكلايكوجين) الى وحدات بسيطة من السكريات (الكلوكوز) في مسار هدم الكلايكوجين (الكلايكوجينولسيس) Glycogenolsis.	تتحول الجزيئات الصغيرة الى جزيئات كبيرة فمثلا يتحول وحدات بسيطة من السكريات (الكلوكوز) الى سكريات متعددة (الكلايكوجين) في مسار بناء الكلايكوجين(الكلايكوجينزيس) Glycogenesis.
تتضمن تفاعلات تأكسدية تحتاج مرافقات انزيمية مؤكسدة مثل NAD^+ وFAD لتحويلها الى مختزلة (NADH و $FADH_2$) .	تتضمن تفاعلات اختزالية تحتاج الى مرافقات انزيمية مختزلة مثل NADH و NADPH لتحولها الى مؤكسدة (NAD^+ و $NADP^+$).
نواتجها يمكن استخدامها بوصفها موادا أولية لعمليات البناء.	نواتجها يمكن استخدامها بوصفها مواداً تعويضية لإنتاج طاقة .
تفاعلاتها تعد باعثة للحرارة Exergonic.	تفاعلاتها تعد ماصة للحرارة Endergonic.
تختلف عن المسار البنائي في الإنزيمات فمثلا لتحول الكلوكوز الى كلوكوز 6- فوسفات يحتاج الى إنزيم كلوكوكاينيز.	تختلف عن المسار الهدمي في الإنزيمات فمثلا لتحول كلوكوز 6- فوسفات الى الكلوكوز يحتاج الى إنزيم كلوكوز 6- فوسفاتيز.

مراحل العمليات الأيضية الأساسية

تتم العمليات الأيضية في ثلاث مراحل رئيسة كما موضح في الشكل (2)، إذ تتحلل الكاربوهيدرات والدهون والبروتينات الى ثلاث خطوات بمساعدة سلسلة من التفاعلات الإنزيمية في العمليات الهدمية، ففي المرحلة الأولى تتحلل السكريات المتعددة الى وحدات بسيطة من السكريات مثل الكلوكوز وتتحلل الدهون الى الأحماض الدهنية والكلسيرول بينما تتحلل البروتينات الى الأحماض الأمينية. اما في المرحلة الثانية تتجمع وتتحول النواتج المختلفة للمرحلة الأولى الى جزيئات أصغر وأبسط. فمثلا تتحول الأحماض الدهنية والأحماض الأمينية والكلوكوز في الغالب الى مركب أسيتايل مرافق الإنزيم A والذي يتأكسد الى ثاني أوكسيد الكاربون والماء في المرحلة الثالثة والأخيرة خلال دورة حامض الستريك لإنتاج طاقة.

أما العمليات البنائية فتتم أيضا بثلاث مراحل والتي تأخذ عكس عمليات الهدم اذ يبدأ البناء بالوحدات البنائية الصغيرة القادمة أصلا من المرحلة الثالثة للعمليات الايضية الهدمية.



الشكل (2): مراحل العمليات الأيضية الهدمية التى يتم من خلالها تحويل الكاربوهيدرات والبروتينات والدهون الى وحدات بنائها (فى المرحلة الأولى)، ثم تتحول الوحدات البنائية الى Acetyl-CoA في المرحلة الثانية، أما في المرحلة الثالثة تتأكسد جزيئات Acetyl-CoA لإنتاج القوى المختزلة في دورة حامض الستريك (دورة كربس) والتي يمكن ان تتحول الى طاقة بشكل ATP.

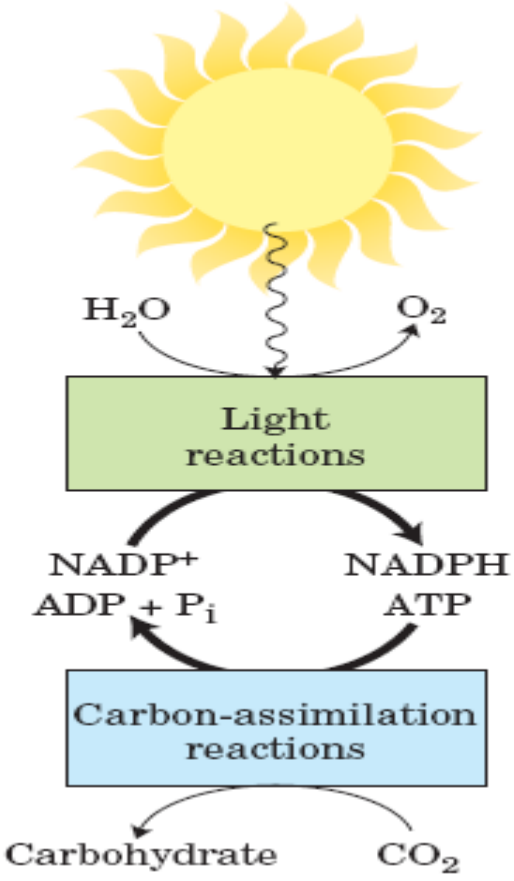
وفيما يأتي عرض لأهم العمليات الأيضية للكاربوهيدرات داخل النباتات:

1. عملية التركيب الضوئي (بناء) Photosynthesis
2. التحلل السكري (هدم) Glycolysis
3. دورة كربس Krebs Cycle

التمثيل الضوئي Photosynthesis

- **التمثيل الضوئي** وهو عملية بناء الكاربوهيدرات في النباتات الخضراء، اذ تستخدم الطاقة الضوئية فتحولها إلى طاقة كيميائية أي تحول الماء وثاني أوكسيد الكاربون إلى أوكسجين وكاربوهيدرات.
- **موقع العملية في الخلية النباتية:** تتم عملية التمثيل الضوئي داخل البلاستيدات الخضراء وتحوي على الصبغة الخضراء (الكلوروفيل) وعلى جميع الإنزيمات الضرورية لعملية التركيب الضوئي.
- **المعادلة الكلية لعملية التركيب الضوئي:**

$$6H_2O + 6CO_2 \xrightarrow[\text{كلوروفيل}]{\text{طاقة ضوئية (ضوء الشمس)}} C_6H_{12}O_6 + 6O_2$$



شكل 3. عملية التمثيل الضوئي

- **الغاية من العملية:** بناء الكاربوهيدرات في النباتات الخضراء.

آلية حدوث عملية التركيب الضوئي تتم في مرحلتين:

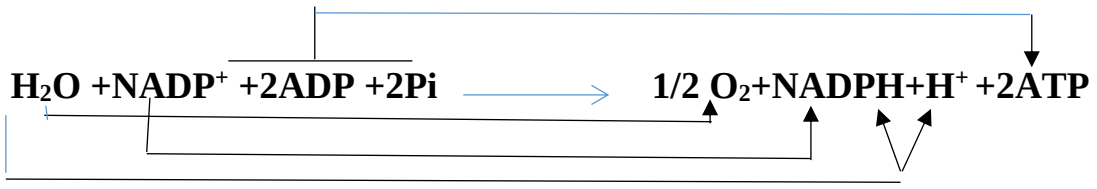
أ- **تفاعلات الضوء Light reaction**

ب- **تفاعلات الظلام Dark reaction**

أ – تفاعلات الضوء: هي التفاعلات التي تشمل تحويل الطاقة الضوئية إلى طاقة كيميائية وتسمى ايضاً بالتفاعلات الكيموضوئية Photochimcal reaction. وتحدث في البلاستيدات الخضراء Thylakoid، وكالاتي:

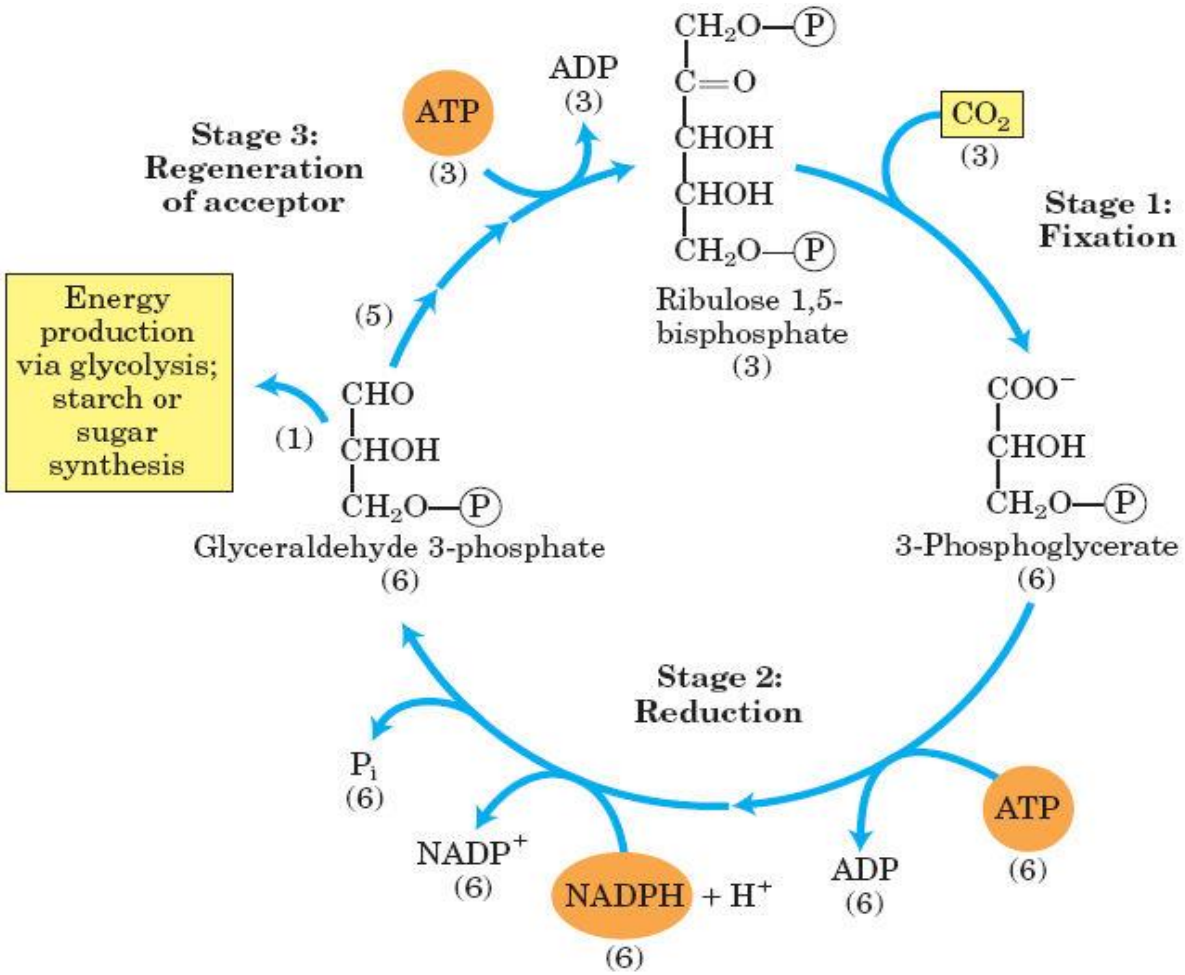
1— تمتص جزيئة الكلوروفيل طاقة ضوئية فتتهيج لترتفع بعض إلكتروناتها إلى أعلي مستوى للطاقة ويكون لها عند ذلك جهد اختزالي أكثر سالبية من **NADPH**.

تنتقل هذه الالكترونات إلى سلسلة النواقل الإلكترونية وتستخدم هذه السلاسل لقيادة هذه الإلكترونات ذات الطاقة العالية في اتجاه منحدر إلى $NADP^+$ مسبباً اختزاله إلى NADPH. تدعى هذه العملية بالفسفرة الضوئية Photophosphorylation. ويمكن تمثيلها بالمعادلة ادناه:



2- بعدها تفقد جزيئة الكلوروفيل الالكترونات ويتم تعويضها عن طريق اكسدة الماء فيتحرر الاوكسجين وبالتعاقب فإن الإلكترونات تعود إلى جزيئات الكلورفيل من خلال مرورها على سلسلة من الحوامل الناقلة ويتم توليد ATP بواسطة عملية الفسفرة الضوئية. ويستخدم كل من الـ NADPH وATP المتولد من تفاعلات الضوء هذه في اختزال (تثبيت) الـ CO_2 لتكوين الكاربوهيدرات في عملية التركيب الضوئي.

ب – تفاعلات الظلام: ان هذه التفاعلات تحدث في حشوة البلاستيدة الخضراء (Stroma) لا تحتاج إلى وجود الضوء في عملها الذي يشمل على تثبيت CO_2 لتكوين المركبات الكاربوهيدراتية (الكلوكوز والنشا) ويستخدم الـ ATP و NADPH لهذا الغرض. وتتم هذه التفاعلات بثلاث مراحل ضمن دورة كلفن Calvin cycle. كما في الشكل (4):



الشكل: (4) مخطط دورة كلفن

المرحلة الأولى: مرحلة تثبيت CO2 على جزيئة رايبيولوز 1،5– ثنائي الفوسفات وتتم كما يأتي:

المرحلة الثانية: مرحلة الاختزال التي تتم فيها تحول3– فوسفوكلسيريت إلى كلسير ألديهايد 3– فوسفات.

المرحلة الثالثة: مرحلة إعادة تكوين رايبيولوز 1،5– ثنائي الفوسفات التي تؤدي الى تحورات مختلفة. يمكن كتابة المعادلة العامة لتفاعلات الظلام كالأتي:

$$6CO2 + 12NADPH + 12H^{+} + 18ATP + H2O \longrightarrow C_6H_{12}O_6 + 12NADP^{+} + 18ADP + 18Pi$$

التحلل السكري (هدم) الكلايكولسيس Glycolysis

هو عملية هدم السكريات الأحادية كالكلوكوز والفركتوز والكالكتوز والمانوز. والذي يعد المسار الرئيس والأول لهدم الكاربوهيدرات كلوكوز الى بايروفيت، يحدث في جميع أنسجة الجسم تحتوي على إنزيمات الكلايكولسيس وهي قادرة على أكسدة الكلوكوز، موقعه في السايتوبلازم (السايتوسول Cytosol). ويمكن التعبير عنها بالمعادلة الاتية:

$$Glucose + 2NAD^{+} + 2ADP + 2Pi \longrightarrow 2Pyruvate + 2NADH + 2H^{+} + 2ATP + 2H_2O$$

إن الغايه من الكلايكولسيس تكمن فيما يأتي:

أ- توليد جزيئتين من جزيئات ATP وجزيئتين من القوى المختزلة على شكل NADH.

ب- إنتاج جزيئتين من حامض البايروفيت البالغة الأهمية.

ج_ تكوين مركبات وسطية تستخدم لأغراض بناء مركبات كيميائية أخرى مهمة.

6 - مخطط مسار الكلايكولسيس:

يمكن تقسيم مسار الكلايكولسيس العام إلى مرحلتين:

المرحلة الأولى: يتم فيها استهلاك جزيئتين من جزيئات ATP من خلال استخدامها في :

أ— فسفرة الكلوكوز وتحوله إلى كلوكوز 6- فوسفات.

ب— فسفرة فركتوز 6- فوسفات وتحولها إلى فركتوز 1،6- ثنائي الفوسفات.

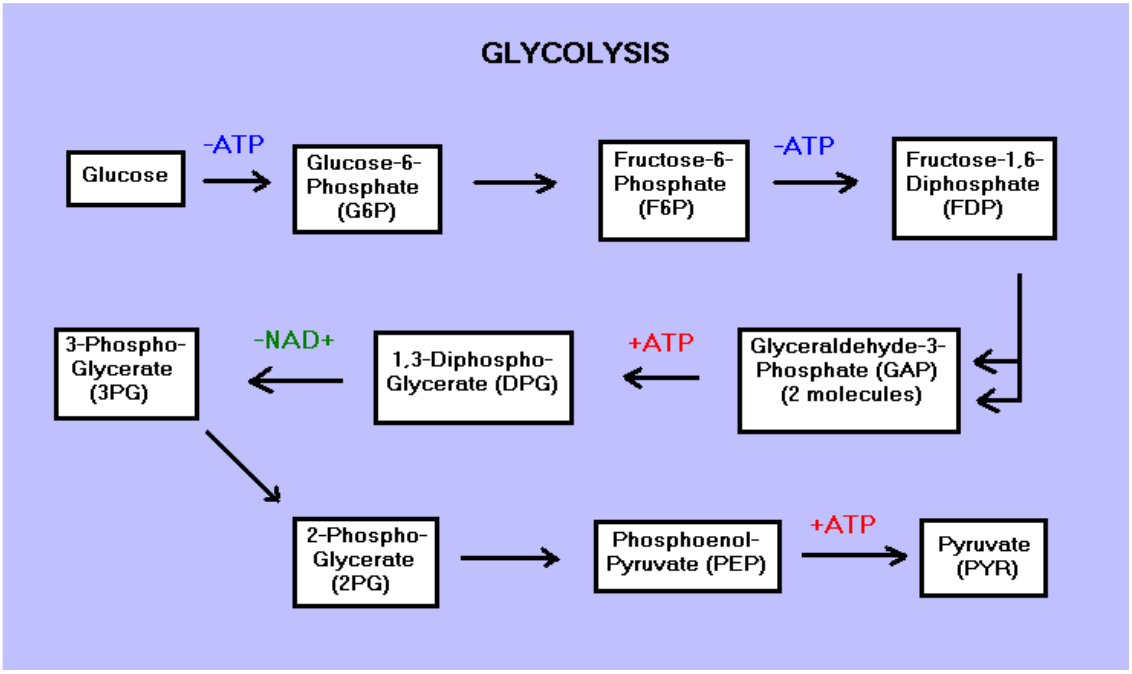
المرحلة الثانية: يتم فيها توليد وجزيئتين من NADH وأربع جزيئات من ATP خلال:

أ— تحول كليسيراليهايد 3- فوسفيت الى 1،3- ثنائي فوسفوكلسيريت

ب _ تحول 1،3- ثنائي فوسفوكلسيريت إلى 3- فوسفوكلسيريت.

ج — تحول فوسفوإينول بايروفيت إلى البايروفيت.

ولكون ان كل جزيئة من جزيئات التحول (ATP و NADH) هي عبارة عن جزيئتين ناتجة من انشطار جزيئة فركتوز 1،6- ثنائي الفوسفات وبالتالي فكل عملية ينتج عنها جزيئتين من ATP و NADH ويكون مجموع جزيئات ATP الناتجة هي **أربع** جزيئات (بشكل مباشر) و ست جزيئات (بشكل غير مباشر من تحول NADH)، وعند إجراء عملية طرح جزيئتان منATP المستهلكة في المرحلة الأولى تكون المحصلة النهائية هي إنتاج **ثمان جزيئات** من ATP في مسار الكلايكولسيس و الموضحة في الشكل (6):



الشكل: (6) مسار الكلايكولسيس

إن جزيئة البايروفيت الناتجة من مسار الكلايكولسيس لها تحولات واتجاهات مختلفة وهي كالأتي:

1— تحول البايروفيت إلى الإيثانول بمعزل عن الهواء Anaerobic وتتم بخطوتين، في الخطوة الأولى يتحول البايروفيت الى استلديهايد بواسطة إنزيم بايروفيت ديكاربوكسليز Pyruvate decarboxylase، أما في الخطوة الثانية يتحول الاستلديهايد الى ايثانول بواسطة إنزيم ألكحول ديهيدروجنيز Alcohol dehydrogensae .

2– تحول البايروفيت إلى Acetyl-CoA الذي يتكون داخل المايتوكوندريا بعملية الأكسدة بوجود الاوكسجين (Aerobic) بواسطة إنزيم بايروفيت ديهيدروجنيز Pyruvate dehydrogenase (PHD)

$$Pyruvate + CoA\text{-}SH + NAD^{+} \xrightarrow{PDH} Acetyl\text{-}CoA + NADH + CO_2$$

إن عملية التحول هذه لها أهميتها من خلال دخولها دورة كربس (دورة حامض الستريك) وبالتالي إنتاج طاقة وقوى مختزلة (NADH و $FADH_2$). ويمكن كتابة المعادلة العامة لتحول الكلوكوز إلى الأسيتايل CoA كما يأتي:

$$Glucose + 3NAD^{+} + 2ADP + 2Pi + 2CoA\text{-}SH \longrightarrow 2Acetyl\ CoA + 3NADH + 3H^{+} + 2ATP + 2CO_2$$

دورة كربس Krebs cycle

سميت دورة كريس (نسبةً إلى العالم كربس الذي أفترض ميكانيكية هذه الدورة عام 1937) وتسمى أيضاً بدورة حامض الستريك Citric acid cycle (نسبة الى نواتج الدورة).

1— تعريف الدورة:

هي المسار النهائي لأكسدة الكاربوهيدرات والأحماض الدهنية والأحماض الامينية وتتم بوجود الأوكسجين لخلايا الحيوانات والنباتات الراقية ومعظم الإحياء المجهرية. والتي تحدت فيها أكسدة مرافق الانزيم Acetyl CoA الى CO_2 و H_2O ويصحب ذلك انطلاق طاقة.

2— موقع الدورة في الجسم: تحدت في جميع خلايا أنسجة الجسم .

3— موقع الدورة في الخلية: المايتوكوندريا.

4— المعادلة الكلية للدورة:

$$Acetyl\ CoA+3NAD^{+}+FAD+GDP+Pi+2H_2O \longrightarrow CoA\text{-}SH+3NADH+3H^{+}+FADH_2+GTP+2CO_2$$

5— الغاية من الدورة:

أ- تعد الدورة مصدرا جيدا لتوليد القوى المختزلة في المايتوكوندريا على شكل مرافقات الإنزيم NADH (ثلاث جزيئات) و $FADH_2$ (جزيئة واحدة) والتي تستخدم لإنتاج الطاقة في سلسلة نقل الإلكترونات.

ب-تعد الدورة مصدرا لتوليد الطاقة على شكل جزيئة GTP والتي تتحول إلى جزيئة ATP .

ت-تستخدم المواد الوسطية الناتجة من الدورة لأغراض بنائية، كالأحماض الدهنية والأحماض الأمينية وغيرها.

6_ خطوات دورة كربس

أ- يدخل جزئ استيل CO-A الى دورة كربس حيث ينفصل عنه مساعد الانزيم CO-A ليحمل مجموعة استيل اخرى الى دورة كربس.

ب- تتحد مجموعة الاستيل(C2) مع حامض الاوكزالواسيتيت(C4) لتكوين حامض الستريت(C6).

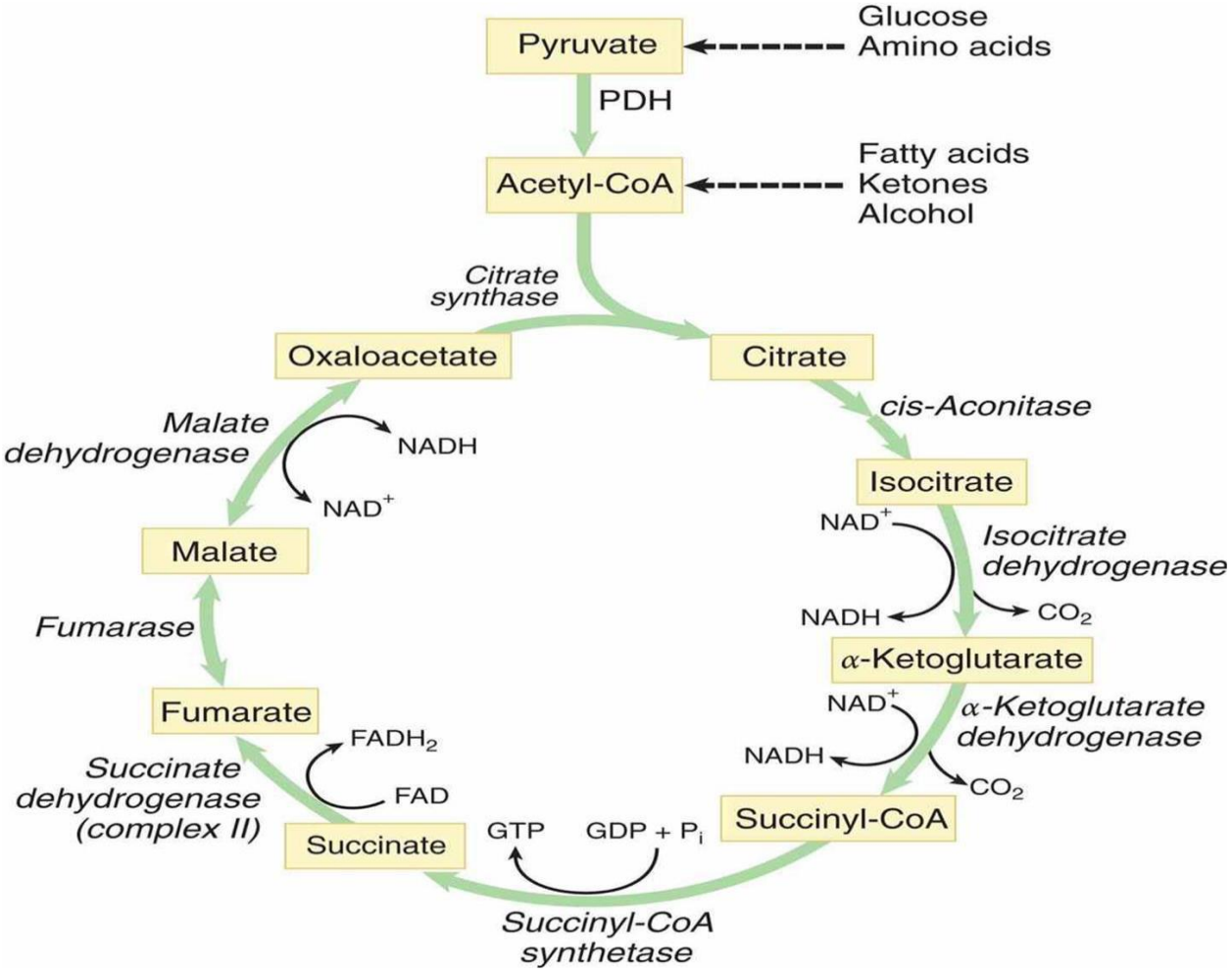
ت- يمر حامض الستريت بعدد من المركبات الوسطية هي حامض الكيتوكلوتاريت ثم حامض

الساكسينت ثم حامض الفيوماريت ثم حامض الماليك لتنتهي التفاعلات بحامض الاوكسالواسيتك الذي يرتبط مع مجوعة أسيتل جديدة مكوناً حامض الستريك مرةً أخرى.

ث- تتكرر دورة كربس مرتين لكل جزئ من الكلوكوز حيث يعطي جزئ الكلوكوز جزيئتين من مجموعة الـ أسيتل .

ج- يتحرر أثناء دورة كربس : $2CO_2 + GTP + 3NADH + FADH_2$.

والموضحة في الشكل (7).



الشكل: (7) دورة كربس

يوضح الجدول (2) المحصلة النهائية للطاقة المنتجة (ATP) من العمليات الايضية لتحلل جزيئة كلوكوز

جدول رقم (2) المحصلة النهائية من الطاقة الناتجة من تحلل جزيئة كلوكوز واحدة

المرحلة	موقع الحدوث	الطاقة المنتجة (ATP)
مسار الكلايكولسس(التحلل السكري)	السايتوبلازم	8
تحول البايروفيت الى Acetyl CoA	المايتوكوندريا	6
دورة كربس	المايتوكوندريا	24
المحصلة النهائية		38

المصادر العربية :

1. احمد، طارق يونس، لؤي عبدعلي الهلالي، (2010)، الكيمياء الحياتية الجزء الثاني. وزارة التعليم العالي والبحث العلمي، جامعة الموصل، العراق.
2. ياسين، بسام طه، (2001)، أساسيات فسيولوجيا النبات، كلية العلوم، جامعة قطر، قطر.
3. آل فليح، خولة احمد، (2000)، مدخل الى الكيمياء الحياتية. دار الكتب للطباعة والنشر، الموصل، العراق.
4. المظفر، سامي عبدالمهدي، (1999)، أساسيات الكيمياء الحياتية. دار المسيرة للنشر والتوزيع والطباعة. عمان، الاردن.
5. دلالي، باسل كامل، (1994)، اساسيات الكيمياء الحيوية. دار الكتب للطباعة والنشر، الموصل، العراق.