# الفصل الثالث

# الأيض الخلوى

- مفهوم الأيض .
- الإنزيمات .
- الأيض الكربوهيدراتى .
- الأيض النيتروجينى .
- أيض البروتينات .
- أيض الدهن .
- التنفس الخلوى .

## مفهوم الأيض Metabolism concept

الخلايا ليست ساكنة فهى فى حالة ديناميكية ، والفحص الخلوى يعطينا انطباعا بأن الخلايا فى حالة نشاط والحويصلات البلعمية والاحتوائية تتكون باستمرار والعضيات تتحرك . والانقسام الخلوى يحدث والجزء الحيوى فى هذا النشاط الذى يحدث هو التفاعلات الكيميائية التى مجمل عملها يصطلح عليه بكلمة الأيض الخلوى Metabolism وهو مجمل عمليات البناء والهدم فى الخلية .

### * مسارات الأيض Metabolism pathways :

لا تحدث التفاعلات الكيميائية عشوائيًا فى الخلايا بل جزء من مسارات الأيض فإذا بدأ مسار أيضى بـ (A) كتفاعل جزئى أو تفاعلات جزئية تنتهى بمنتج (S) - وبينما أنه من الممكن كتابة كل معادلات تفاعلات مسار الأيض إلا أن المسار الفعلى ينتج بخطوات قصيرة عديدة وكل تفاعل يؤدى إلى تفاعل تالٍ له ، ويمكن أن نمثل المسار الأيضى بالمخطط التالى :

$$A \xrightarrow{1} B \xrightarrow{2} C \xrightarrow{3} D \xrightarrow{4} E \xrightarrow{5} F \xrightarrow{6} G$$

فى هذا المخطط الحروف هى نواتج التفاعل السابق عليها ومادة تفاعل للتفاعل التالى لها فإذا كانت (A) هى مادة البداية ، (S) هى المادة الناتجة النهائية وعدد التفاعلات يعزى إلى مجموعة من الإنزيمات وكل تفاعل منها يحتاج إلى إنزيم متخصص ، والإنزيمات جزيئات بروتينية تسرع من التفاعلات الكيميائية وتركيزها يضبط حدوث التفاعل ولا يحدث أى تفاعل كيميائى فى الخلية إذا لم يتوافر الإنزيم الخاص به ، فإذا فقد الإنزيم رقم 2 فى المخطط فإنه لا يستمر مسار الأيض ولأن الإنزيمات ضرورية للخلايا ، فمن الضرورى دراسة آلية عملها .

**وإجمالاً بما سبق نوضح أن المقصود بالأيض مجموعة** عمليات البناء والهدم التى تحدث فى الخلايا الحية والتى تنشأ عن مجموعة من التفاعلات الكيمائية تؤدى إلى تحويل المواد العضوية البسيطة إلى مواد عضوية معقدة ويعرف ذلك بالأيض البنائى Anabolism ويصاحب ذلك امتصاص الطاقة . وتحدث مجموعة أخرى من التفاعلات

الكيميائية تؤدى إلى تحويل المواد العضوية المعقدة إلى مواد عضوية بسيطة ويعرف ذلك بالأيض الـهدمى Katabolism ويصاحب ذلك انطلاق الطاقة .

وتقود الإنزيمات مجموعة تفاعلات الأيض كما فـى عمليـة البنـاء الضوئـى وعمليـة التنفس فى النبات .

فى الحيوان تتحكم مجموعة هامة من الـهرمونات فى نشاط الأيض ،حيث تتحكم الـهرمونات فى نشاط الإنزيمات فتعمل بذلك على التعجيل أو التثبيط وبذلـك يتوقـف دور الـهرمونات على تغيير معدل نشاط الأيض . وأكثر هرمونـات الأيـض أهميـة هـى هرمونات الغدة الدرقية والجاردرقية والكظرية وجزر لانجرهانز فى البنكرياس .

حيـث تفـرز الغـد الدرقيـة هرمـون الثيروكسـين Thyroxine المسـئول عـن النمـو الطبيعى للجسم ونمو الجهاز العصبى للحيوانات النامية وتحفيز معدل الأيـض وتفـرز الجاردرقيـة هرمـون الباراثـيرويد Parathyroid المختـص بالمحافظـة علـى المسـتوى الطبيعى للكالسيوم والفوسفور فى الدم .

وتفرز الغدد الكظرية هرمونات القشرة مثل الكورتيزون والكورتيكوستيرون ويختصان بتحويل المواد غير السكرية مثل الأحماض الأمينية والدهون إلى جلوكوز والألدوستيرون المسئول عن التوازن الصحيح للمواد المتأينة بالدم ( الصوديوم والبوتاسيوم ) وهرمونـات النخاع ( أدرينالين ـ نور أدرينالين ) التى تحرك جليكوجين الكبـد ومخـازن الدهـون لتحرير الجلوكوز والأحماض الدهنية من أجل الطاقة والزيادة فى استهلاك الأكسجين .

وتفرز جزر لانجرهـانز مـن خلايـا بيتـا هرمـون الأنسـولين Insulin الـذى يسـمح لجلوكـوز الـدم بالانتقـال إلى داخـل خلايـا الجسـم كمـا تفـرز خلايـــا ألفـا هرمـــون الجلوكاجون Glucagon الذى يؤثر على الأيض الكربوهيدراتى والدهنى حيث يعمل على رفع مستوى جلوكوز الدم .

# الإنـزيــمـات Enzymes

كان لدراسة عملية التخمر Fermenation أثر أكيد فى الحصول على معلومـات عن الإنزيمات ، حيث اكتشف أن مستخلصات خلايا الخميرة المطحونة غـير الحيوية . تحدث تخمرًا للمحاليل السكرية ، وأن هذا التخمر يرجع إلى مركبات خاصة تكونـت فى خلايا الخميرة وبكميات قليلة ، وسميت هذه المركبـات باسم الخميرة Ferments وأطلق عليها اسم إنزيم وتعنى ( من داخل الخميرة ) .

وأوضحت الدراسات الكيميائية أن الإنزيم مادة بروتينية تحتوى من ١٠٠ إلى ٤٠٠ حمض أمينى فى الجزىء الواحد ومرتبة ترتيبًا معينًا .

وقد يكون الإنزيم بروتينًا بسيطًا أو مركبًا ، وفى حالة البروتين المركب يشتمـل الإنزيم على مجموعة إضافية وهى مادة غير بروتينية لا تتعدى ١ ٪ مـن الجـزىء البروتينى وتسمى مرافق الإنزيـم . وبعـض المعـادن تعمـل كمجـاميع إضافيـة فـى تركيب الإنزيم ويطلق على الجزء الـبروتينى ( أبـو إنزيـم ) والمجموعـة الإضافيـة ( مرافق الإنزيم ) ويسمى الإنزيم بأكمله ( هولو إنزيم ) والصفـة الحفزيـة للإنزيـم ترجع إلى الجزء البروتينى والمجموعة الإضافية معًا وليـس لكـل منـهما الخاصيـة الحفزية بمفرده حيث يزيـد الـبروتين مـن القـوة الحفزيـة للمجموعـة الإضافيـة ، وتعمل المجموعة الإضافية على استقرار جزىء البروتين ومقاومة العوامل التى تؤثر على صفاته الفيزيائية .

والإنزيمات البسـيطة لا تحتـوى مجموعـات إضافيـة ولكـن توجـد منطقـة فـى الجزىء تسمى المركز الفعال تقوم بوظيفة المجموعة الإضافية وهى الاتصال المباشر مع مادة التفاعل .

( المراكز الفعالة عبارة عن بعض الأحماض الأمينية المرتبة فـى منطقـة مـا مـن جزىء البروتين ، ويعمل الشق الحامضى للحامض الأمينى عمل مرافق الإنزيم فى الإنزيم المركب ) .

## مراكز الإنزيم

| مركز المادة المتفاعلة | المركز الفعال | المركز الألوستريكى |
|---|---|---|
| هو المنطقة المسئولة عن الارتباط بمادة التفاعل التى ستتحول بمساعدة الإنزيم | هو المنطقة التى تتصل بمرافق الإنزيم أو بعض الأحماض الأمينية التى تتصل بالإنزيم | هو مركز تنشيط أو تثبيط عمل الإنزيم وهو منطقة فى الإنزيم تتصل بمادة معينة وزنها الجزيئى منخفض تسبب تغير التركيب البنائى للمركز الفعال . |

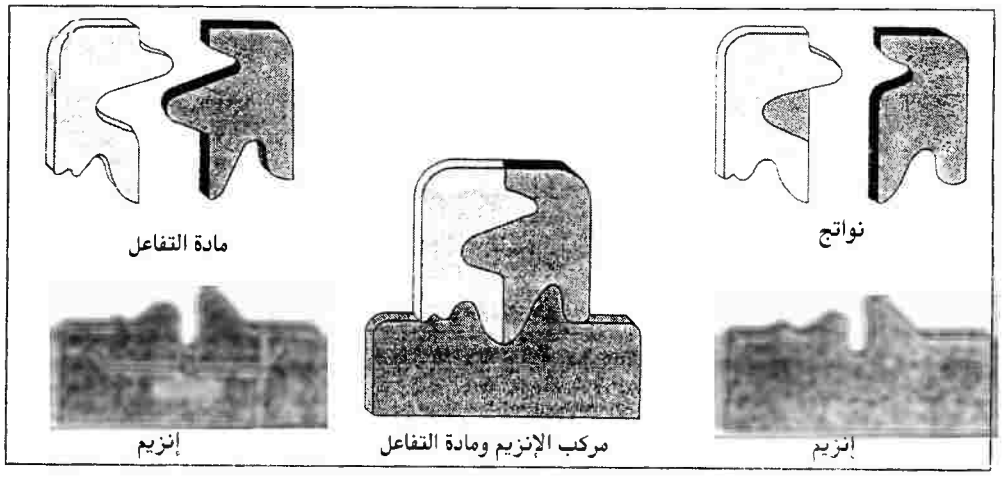
( وقد يحدث تداخل بين المراكز الثلاثة أو يقوم مركز معين بعمل المركز الآخر مثل تطابق المركز الفعال مع مركز المادة المتفاعلة ) .

### * كيف يعمل الإنزيم ؟

١ ـ ارتباط الإنزيم بمادة التفاعل . ويحدث ذلك بقوة فيزيائية مثل قوى فان درفال أو برابطة هيدروجينية أو قوى الجذب الكهرواستاتيكى .

٢ ـ يزداد نشاط المادة المتفاعلة بتأثير الإنزيم ويحدث التفاعل على سطح الإنزيم ويتكون معُقد ( الإنزيم ـ مادة التفاعل ) .

٣ ـ تنطلق نواتج التفاعل عن الإنزيم ويتكون ناتج التفاعل ويظل الإنزيم دون أن يتأثر .



### * ما هى خصائص الإنزيمات ؟

الإنزيمات بروتينات ضرورية لاستمرارية العمليات الحيوية فى الخلية فالإنزيم يزيد من سرعة التفاعل الكيموحيوى زيادة كبيرة . . ومتخصص فى تفاعل معين . . ولأنه عامل مساعد فلا تتأثر به النواتج النهائية ويمكن إيضاح ما تتميز به الإنزيمات فيما يلى :

١ ـ تؤثر بكميات صغيرة فى تحول كميات كبيرة من مادة التفاعل Substate إلى نواتج التفاعل Products .

٢ ـ تحت الظروف المثالية ( درجة الحرارة ، Ph ) تقترب الإنزيمات من خاصية العوامل المساعدة فى أنها لا تتأثر بالتفاعلات التى تحفزها .

٣ ـ تسرع الإنزيمات فى إتمام التفاعل دون أن تؤثر فى حالة اتزان التفاعل فالإنزيم يسرع من التفاعل للوصول إلى حالة الاتزان فى التفاعل العكسى .

٤ ـ الإنزيم متخصص فى التفاعل الذى يحفزه وهذا التخصص قد يكون دقيقًا فى بعض الإنزيمات .

### * الأثر الحفاز للإنزيم Catalytic action :

فى التفاعل غير الإنزيمى تتحول مادة التفاعل بواسطة طاقة التنشيط ( حرارة مثلا ) إلى مركب وسطى غير ثابت يتحول تلقائيًا إلى نواتج التفاعل .

أما فى التفاعل الإنزيمى فإن ارتباط الإنزيم بمادة التفاعل يحدث تغيرًا فى تركيب مادة التفاعل لتصبح فى الصورة الوسطية ويحتاج مُعقد ( الإنزيم ـ الصورة الوسطية ) إلى طاقة تنشيط قليلة لتتحول إلى نواتج التفاعل . والفعل الحفزى للإنزيم يأتى من أن الإنزيم به أماكن نشطة تجمع مادتى التفاعل وتنشأ هذه الأماكن النشطة من المجاميع المرتبطة بالإنزيم والتى تتكامل مع تكوين مادة التفاعل .

### * مركب ( الإنزيم ـ مادة التفاعل ) Enzyme - substate complex :

الإنزيم متخصص حيث يرتبط بمادة تفاعل معينة بسبب بقايا الأحماض الأمينية ( المركز النشط للإنزيم ) والتى توافق مادة التفاعل .

إنزيم اليورييز على درجة عالية من التخصص Urease حيث يحلل مادة اليوريا فقط .

$$urea + H_2O \xrightarrow{urease} CO_2 + Ammonia$$

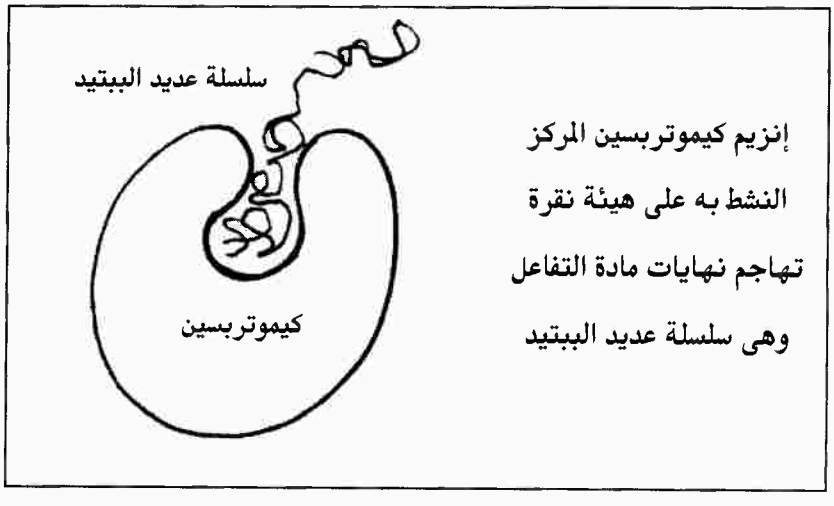
وقد يكون التخصص غير دقيق مثل إنزيم الاستيريز esterase الذى يحلل رابطة الأستر دون غيرها من الروابط ودون تمييز بين روابط الأستر المختلفة .

فالإنزيم E يرتبط مع مادة التفاعل S مكونًا مركبًا مُعقدًا ES يتحول إلى ناتج التفاعل P .

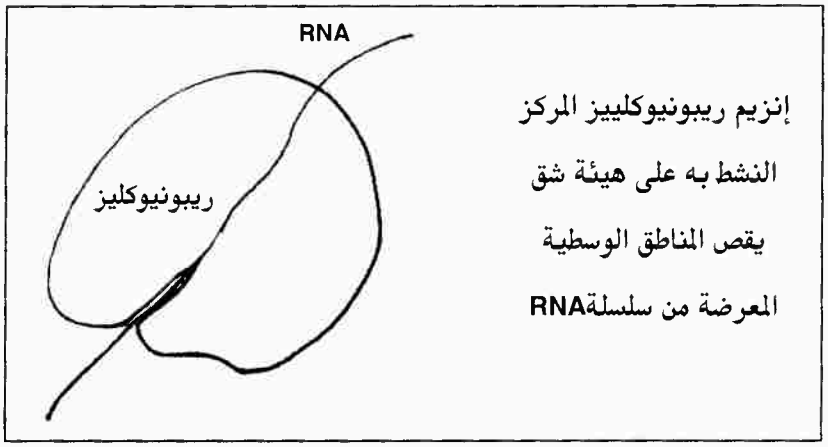
$$E + S \longrightarrow ES \longrightarrow E + P$$

ويتصل عديد من جزيئات مادة التفاعل بمراكز النشاط فى الإنزيم حيث أن جزيئات مادة التفاعل ذات حجم صغير جدًا بالنسبة لمراكز النشاط . وبتوافر العدد الكافى من جزيئات مادة التفاعل تشغل مراكز النشاط بالكامل ويصبح معدل التفاعل فى أقصاه مع حفظ بقية العوامل المؤثرة ثابتة ، وعلى ذلك فعدد قليل نسبيًا من جزيئات الإنزيم يستطيع أن يتعامل مع ملايين من جزيئات مادة التفاعل .

بعض الإنزيمات لها القدرة على التعامل مع مجموعة خاصة من الجزيئات بدلا من تعاملها مع مركب واحد فإنزيم التربسين Trypsin وإنزيم الكيموتربسين Chemotrypsin يعملا على تمزيق الروابط الببتيدية فى العديد من البروتينات إلا أن كل إنزيم يؤثر فى مكان محدد ويشطر رابطة خاصة فقط اعتمادا على السلاسل الجانبية التى تبرز من هيكل عديد الببتيد حيث يعمل الكيموتربسين على الروابط الببتيدية التى يتبعها سلاسل جانبية كبيرة كارهة للماء مثل الفينيل الانين ، وبذلك يتضح تخصص الإنزيم فى احتواء المركز النشط للإنزيم على المجموعات الوظيفية المحددة التى ترتبط بجزء من مادة التفاعل .



وبعض الإنزيمات ذات مركز نشط على صورة شـق فـى الجـزىء حيـث تدخـل سلسلة مادة التفاعل فى هذا الشق مثل إنزيم ريبونيوكلييز الذى يقص المناطق الوسطية المعرضة من سلسلة RNA .




وبعض الإنزيمات يكون المركز النشط فـى نقـرة أو انخفـاض حيـث تسـمح بتطـابق الإنزيم مع جزئ مادة التفاعل حيث يكسر الرابطة القريبة من نهايـة سلسـلة جـزىء مادة التفاعل مثل إنزيم الكيموتربسين الـذى يتفـاعل مـع النـهايات المتاحـة لسلسـلة عديد الببتيد .

ومما سبق يتضح أن آلية عمل الإنزيم تشبه العلاقة بين القفل والمفتاح حيث تفـرق الإنزيمات بين مواد التفاعل فى تخصص يشبه تخصص المفتاح لقفل معين وفى تطابق يشبه تطابق المفتاح مع القفل .

### * المرافق الإنزيمى Co-enzyme :

العديد من الإنزيمات بالإضافة إلى التركيب البروتينى يرتبط البروتين بمجاميع غير بروتينية أى يتكون الإنزيم من جزئين :

**الأول** : الإنزيم المجرد Apoenzyme وهو أحماض أمينية فقط .

**الثانى** : المجموعة المرتبطة أو الفعالة .

وقد تكون معدن ويسـمى بالعـامل المرافـق أو المنشـط Activator ، ولقـد ثبـت أن فصل الإنزيم عن المكون المعدنى يؤدى إلى فقد نشاط الإنزيم وبعض المعادن مثل الزنـك

والنحاس والحديد والمنجنيز والكالسيوم والبوتاسيوم والكوبلت تعتبر عوامل مساعدة لكثير من النظم الإنزيمية .

وبعض الإنزيمات يرافقها مواد عضوية محددة حتى يبدأ نشاطها وبعض مجموعات هذه المواد العضوية تعتبر جزءًا مكملاً للإنزيم ولا تنفصل عنه وبعضها الآخر ينفصل وتتصرف كمجموعة عمل يكسوها الإنزيم المجرد وتسمى هذه المجاميع المرتبطة بالمرافق الإنزيمى Co-enzyme .

ويعمل المرافق الإنزيمى كمستقبل أو مانح للذرات التى تضاف أو تزال من مادة التفاعل .

**ومن أمثلة المرافقات الإنزيمية :**

١ ـ نيكوتين أميد أدينين ثنائى النيوكليوتيد NAD .
Nicotinamide adenine dinucleotide

٢ ـ فلافين أحادى النيوكليوتيد FAD . Flavin mononucleotide .

٣ ـ الفيتامينات .

٤ ـ المرافق الإنزيمى ( أ ) Co-enzyme A .

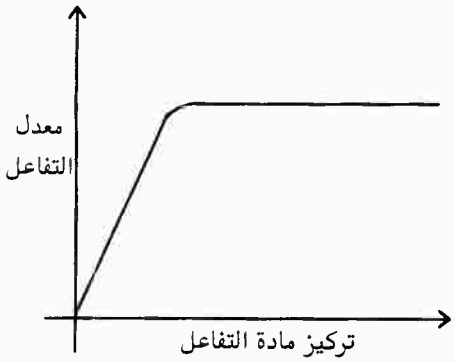
٥ ـ نيكوتيد أميد أدينين ثنائى النيوكليوتيد ـ فوسفات NADP .
Nicotinamide adenine diuncleotide phosphate

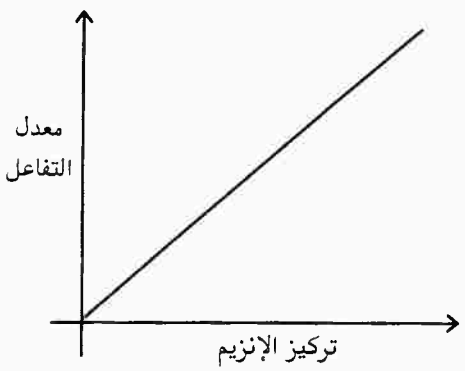
## * العوامل المؤثرة على النشاط الإنزيمى :

يؤثر على معدل التفاعل الإنزيمى . . كل من تركيز مادة التفاعل وتركيز الإنزيم ودرجة الحرارة وتركيز أيون الهيدروجين PH . . نتيجة تأثر المركز النشط للإنزيم بهذه العوامل فيتأثر تكون مُعقد ( الإنزيم ـ مادة التفاعل ) .

### (١) تركيز مادة التفاعل Substrate concentration :

يجب أن يكون تركيز مادة التفاعل كافيا لشغل المركز النشط للإنزيم بالكامل ؛ لأنه إذا قل التركيز يقل نشاط الإنزيم ، وبزيادة تركيز مادة التفاعل يزداد نشاط الإنزيم حيث درجة التشبع ( تشبع المركز النشط الإنزيم ) فيعمل الإنزيم بكفاءته القصوى وزيادة تركيز مادة التفاعل أكثر من ذلك لا يؤثر على معدل التفاعل .



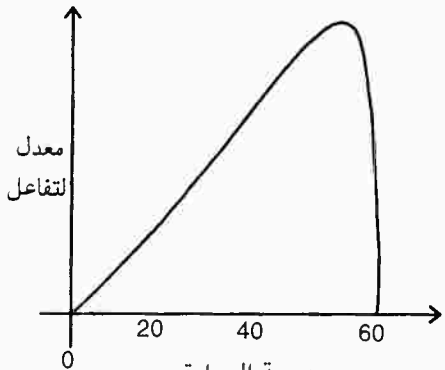

## (٢) تركيز الإنزيم Enzyme concentration :

طالما أن زيادة تركيز مادة التفاعل أكثر من درجة التشبع لا يؤثر على معدل التفاعل فإن زيادة تركيز الإنزيم تزيد من معدل التفاعل لأن ذلك يعطى فرصة أكبر لعدة مراكز نشطة من الاتصال بمادة التفاعل .

بمعنى أن معدل النشاط الإنزيمى يكون فى أقصاه مهما كان تركيز الإنزيم طالما أن هذا التركيز منخفض بدرجة تسمح بالاتصال المستمر للمراكز النشطة بجزيئات مادة التفاعل .

وكذلك إذا كان تركيز مادة التفاعل منخفضا فإن معدل التفاعل يظل ثابتًا مهما زاد تركيز الإنزيم .

## (٣) درجة الحرارة Temperature :



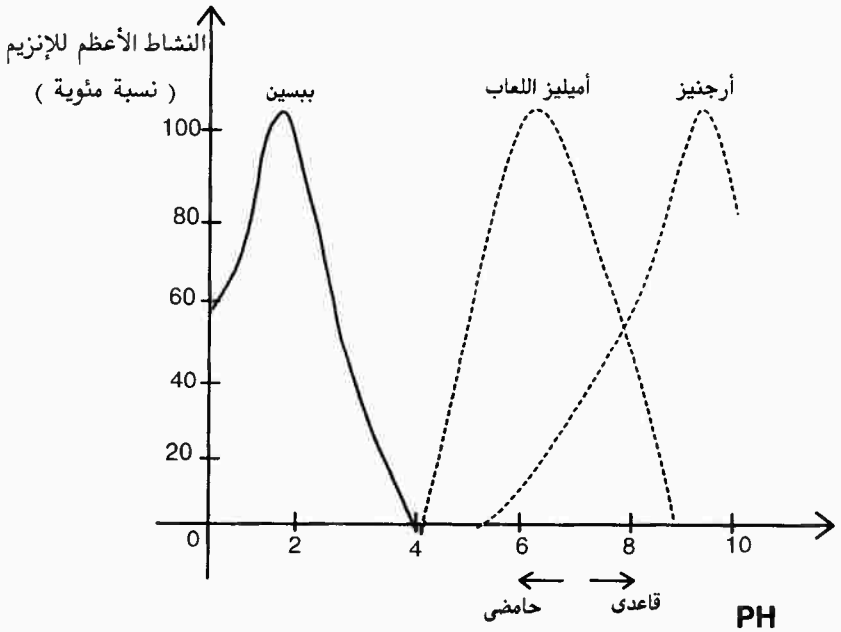

الطبيعة البروتينية للإنزيم تجعلها حساسة للتغيرات الحرارية . يزداد معدل التفاعل بارتفاع درجة الحرارة حتى درجة ٢٥°م نتيجة زيادة الطاقة الحركية الذاتية لكل من الإنزيم ومادة التفاعل وزيادة فرص التصادم بين الإنزيم ومادة التفاعل نتيجة زيادة الإثارة برفع درجة الحرارة ، وفقد الخواص الحفزية للإنزيم يكون حادا وفى الأحوال النموذجية يبدأ الفقد عند ٣٠°م ويكتمل فى ٦٠°م وذلك نتيجة كسر الروابط الهيدروجينية ويصل معدل التفاعل الإنزيمى أقصاه فى ٤٥°م وإذا أدخلنا فى الاعتبار عامل الزمن عند مناقشة أثر الحرارة نجد أن التفاعل الإنزيمى إذا ترك عند ٤٥°م فترة من الوقت

يحدث هبوط تدريجى للنشاط الإنزيمى ومعظم الإنزيمات يحدث لـها تغير سريع عند درجة حرارة ٥٥°م وما فوقها .

## (٤) تركيز أيون الـهيدروجين Hydrogen ion concentration PH :

الإنزيمـات مركبـات بروتينيـة تحتـوى مجـاميع أيونيـة عديـدة تكتسـب أو تفقـد شحنات تبعا لتركيز أيون الـهيدروجين .

فإذا كانت هذه المجاميع الأيونية مجاميع فعالة أى تشكل جزء من المركـز النشـط للإنزيم فيتأثر بذلك تكوين معُقد ( الإنزيـم ـ مـادة التفـاعل ) هـذا إلى جـانب الحالـة الأيونية لمادة التفاعل والتى تتأثر بتركيز أيـون الـهيدروجين خاصـة لـو كـانت هـذه الحالة الأيونية لمادة التفاعل عاملاً مهمًا لحدوث التفـاعل ، وعلـى أسـاس ذلـك فـإن الإنزيمات المختلفة لـها مستويات مختلفة على درجة Ph التى تكون عندها أكبر عدد من جزيئات مادة التفاعل على الحالة الأيونية .




## (٥) المثبطات Inhibitors :

الإنزيمات بروتينات ذات مجاميع فعالة لـها القدرة على التفاعل مـع العديـد مـن المركبات خلاف مادة التفاعل وتفاعل الإنزيم مع أى مادة خلاف مادة التفاعل يسبب توقف النشاط الإنزيمى أو تناقصه .

ـ **المثبطات التنافسية** : مركبات تتشابه من الوجهة التركيبية مع جزيئات مادة التفاعل وتحتل مراكز الإنزيم النشطة مما يثبط التفاعل .

ويتم التغلب على هذه المثبطات بزيادة تركيز مادة التفاعل حتى تحتل المراكز النشطة كلها .

ـ **المثبطات اللاتنافسية** : مركبات تتفاعل مع جزء من الإنزيم لا يشترك فى النشاط الحفزى أو تتفاعل مع مُعقد ( الإنزيم ـ مادة التفاعل ) مكونة مركبًا من الإنزيم والمثبط يوقف التفاعل أو من الإنزيم ومادة التفاعل والمثبط يوقف التفاعل .

$E + I \longrightarrow EI$ ( الإنزيم ــ المثبط )

$E + I + S \longrightarrow EIS$ ( الإنزيم ـ المثبط ـ مادة التفاعل )

**(٦) المنشطات :**

عند تفاعل الإنزيم مع المنشط الالوستريكى يكتسب مركز المادة المتفاعلة الشكل المطابق تمامًا لهذه المادة ويتكون مركب ( الإنزيم المادة المتفاعلة ) ويكون الحفز فى أقصى درجة . والمنشطات مركبات كيميائية مثل أيونات بعض المعادن كالماغنسيوم والبوتاسيوم والمنجنيز والكوبلت وبعض الأنيونات مثل الكلوريد .

*** تقسيم الإنزيمات :**

تقسم الإنزيمات حسب اتجاهات مختلفة :

١ ـ حسب مساعدة الإنزيم للتحليل المائى (Hydrolase) أو التحليل الفيزيائى ( غير المائى ) (Desmolase) وهى إنزيمات الهدم .

٢ ـ حسب عدد المواد المتفاعلة والتى تساهم فى التفاعل من حيث أنها تحفز مادة متفاعلة واحدة فى الاتجاهين أو تحفز تحويل مادتين فى آن واحد فى اتجاهين أو تحفز تحويل مادتين من اتجاه بينما تحفز واحدة فى الاتجاه العكسى .

$A + B \rightleftharpoons C + D$

$A + B \rightleftharpoons C$ $\qquad$ $A \rightleftharpoons B$

٣ ـ حسب نوع التفاعل التأثيرى الحفزى ( طبيعة التفاعلات ) إلى إنزيمات تحلل مائى ـ إنزيمات نازعة لمجاميع ذرية معينة ـ إنزيمات ناقلة لمجاميع ذرية معينة ـ

إنزيمات الأكسدة والاختزال ـ إنزيمات الأيزوميريز تحفز التحول داخل الجزىء ـ إنزيمات الربط تحفز تفاعلات التخليق .

*** أمثلة لعمل بعض الإنزيمات :**

(١) إنزيمات التحلل المائى Hydrolases وهى تقوم بإضافة الماء إلى روابط خاصة فى مادة التفاعل :

ـ تشمل الإنزيمات التى تؤثر على الكربوهيدرات (Carbohydrases) .

ـ والإنزيمات التى تؤثر على رابطة الأستر كالدهن (Esterases) .

ـ والإنزيمات التى تعمل على تحليل رابطة الببتيد (Proteolytic enzymes) .

ـ والإنزيمات التى تحلل الأحماض الأمينية (Amidases) .

ومعظم تفاعلات التحلل المائى عكسية .

مالتوز + ماء $\xrightleftharpoons{\text{مالتيز}}$ ٢ جلوكوز

سكروز + ماء $\xrightleftharpoons{\text{انفرتيز}}$ جلوكوز + فركتوز

دهن + ماء $\xrightarrow{\text{ليبيز}}$ أحماض دهنية + جلسرين

بروتين + ماء $\xrightarrow{\text{ببسين}}$ بيتونات

يوريا + ماء $\xrightarrow{\text{يوريز}}$ نشادر + ثانى أكسيد الكربون

**(٢) إنزيمات التحلل الفوسفورى Phosphoralysic :**

تشبه إنزيمات التحلل المائى ألا أنها تستخدم فى تفاعلاتها حمض الفوسفوريك مثل إنزيم فوسفوريليز النشا فى بذور البسلة ودرنات البطاطس .

نشا + حمض فوسفوريك $\xrightarrow{\text{فوسفوريليز}}$ جلوكوز – ١ – فوسفات

**(٣) الإنزيمات الهادمة Desmolases :**

تعمل على تفكيك الروابط الكربونية فى المواد العضوية دون الحاجة إلى الماء مثل إنزيم الزيميز فى فطر الخميرة وأنسجة النبات والمسئول عن التخمر الكحولى والتنفس اللاهوائى .

سكر جلوكوز $\xrightarrow{\text{زيميز}}$ كحول إيثيلى + ثانى أكسيد كربون + طاقة

وقد ثبت أن الزيميز عدة إنزيمات ( مُعقد الزيميز ) كل منها يؤثر فى خطوة معينة فى عملية تكسير السكر .

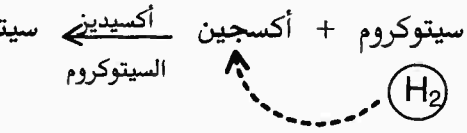
**(٤) الإنزيمات المؤكسدة Oxidizing enzymes :**

فى الخلايا الحية تتلازم عمليات التأكسد والاختزال وأثناء عملية التنفس يتم تأكسد المواد العضوية بنزع الأيدروجين وقد وجدت فى الخلايا الحية إنزيمات مؤكسدة بعضها ينشط الأكسجين ( أكسيديز Oxidases ) حتى ينتقل إليه أيدروجين مادة التفاعل وبعض الإنزيمات ينشط الإيدروجين (Dehydrogenases) حتى ينتزع من مادة التفاعل وتستقبله مادة أخرى .

* **مثال : إنزيم أكسيديز السيتوكروم Cytochrome oxidase :**

ينتشر فى أنسجة النبات والحيوان ويؤكسد السيتوكروم المختزل فى وجود الأكسجين الجوى حيث يتحد الأكسجين مع أيونات الأيدروجين فى السيتوكروم المختزل مكونًا الماء وينطلق السيتوكروم فى حالته المؤكسدة .

ويحتوى السيتوكروم على الحديد ومركبات السيتوكروم تقوم بدور كبير فى عمليات التأكسد والاختزال فهى تنقل الأيدروجين من بعض المركبات إلى الأكسجين الجوى فى وجود إنزيم أكسيديز السيتوكروم .




**(٥) الديهيدروجينيزات Dehydrogenases :**

إنزيمات تعمل فى وجود مادتين أحداهما تتأكسد بنزع الأيدروجين الذى تستقبله المادة الأخرى وتختزل وتسمى المادة الأولى مانحة الأيدروجين Hydrogen doner وتسمى المادة الثانية مستقبلة الأيدروجين Hydrogen accepter .

* **مثال** : إنزيم شاردنجر الموجود فى اللبن Schardinger enzyme . هذا الإنزيم يساعد على تأكسد الفورمالدهيد إلى حمض الفورميك فى وجود أزرق الميثلين الذى يُختزل بدوره ويتحول إلى أزرق الميثلين عديم اللون .

فورماليدهيد + ماء + أزرق ميثلين ←الانزيم— حمض فورميك + أزرق ميثلين مختزل

لون أزرق عديم اللون

ويتم هذا التفاعل فى ظروف لاهوائية حيث أن أزرق الميثلين المختزل يتأكسد مباشرة بأكسيجن الهواء الجوى .

وأزرق الميثلين الذى يستقبل الأيدروجين فى التفاعل السابق لا وجود له فى الخلايا الحية ولذلك تقوم بدوره مركبات أخرى مثل مركب السيتوكروم حيث يعمل كمستقبل للهيدروجين ويتحول إلى سيتوكروم مختزل ثم يتأكسد ويعود إلى حالته بإنزيم أكسيديز السيتوكروم .

## * توزيع الإنزيمات فى الخلايا :

النظم الفسيولوجية للعضيات الخلوية دليل على وجود الإنزيمات داخل الخلية

- الريبوسومات وهى عضيات تخليق البروتين تحتوى على أسطحها أو بالقرب منها إنزيمات عملية الترجمة .

- الميتوكوندريا تحتوى على جميع إنزيمات دورة كريبس .

- البلاستيدات تحتوى على الإنزيمات اللازمة لتفاعلات تثبيت ثانى أكسيد الكربون فى البناء الضوئى وإنزيمات تخليق الصبغات ويعتبر نشاط السيتوكرومات مهمًا لإنتاج جزيئات A.T.P .

- النواة تحتوى إنزيم ديؤكسى ريبونيوكلييز Deoxyribinuclease .

- ينتشر فى سيتوبلازم الخلايا عديد من إنزيمات التحلل المائى وإنزيمات الفوسفوريليزات .

- خارج الخلية تعمل إنزيمات الهضم وإنزيمات نقل المغذيات إلى داخل الخلية .

## الأيض الكربوهيدراتى

يعتبر سكر الجلوكوز المتكون فى عملية البناء الضوئى مصدرا لكل أنواع الكربوهيدرات ويتحول الجلوكوز والفركتوز كل منهما للآخر فى النبات بسهولة وسرعة ، ويتم بناء السكروز منهما بمساعدة إنزيم الفوسفوريليز والجلوكوز والفركتوز مادتا استهلاك أساسية لعملية التنفس .

ويتكون جزىء عديد التسكر مثل النشا والسليلوز بتكاثف عدد كبير من جزيئات السكر أحادى التسكر .

وسواء تكون النشا فى البلاستيدات الخضراء فى الأنسجة النباتية المعرضة للضوء أو فى البلاستيدات عديمة اللون فى الأنسجة البعيدة عن الضوء فإنه يتكون على شكل حبيبات مجهرية تتفاوت شكلا وحجما فى النباتات المختلفة .

وكذلك السليلوز وهو المركب الأساسى فى جدر خلايا النباتات الراقية .

ـ ويتم تمثيل السكروز فى النباتات الراقية بواسطة إنزيم تمثيل السكروز Sucrose synthetase بتحويل الجلوكوز من جلوكوز يوريدين ثنائى الفوسفات (UDPG) إلى سكر الفركتوز ، وفى أحوال أخرى يحدث تفاعل مماثل وهو نقل سكر الجلوكوز (UDPG) إلى سكر الفركتوز ـ ٦ ـ فوسفات بواسطة إنزيم تمثيل السكروز المفسفر Sucrose phosphate synthetase وبذلك يصبح جزىء جلوكوز يوريدين ثنائى الفوسفات (UDPG) أحد ضروريات التمثيل الحيوى للسكروز فى النبات الراقى .

ويتم تحلل السكروز بواسطة إنزيم الانفرتيز Invertase معطيًا سكر جلوكوز وفركتوز فى تفاعل ذى اتجاه واحد .

$$\text{sucrose} + H_2O \xrightarrow{\text{Invertase}} \text{glucose} + \text{fructose}$$

$$C_{12}H_{22}O_{11} + H.OH \longrightarrow C_6H_{12}O_6 + C_6H_{12}O_6$$

ويشجع تخليق إنزيم الأنفرتيز أحد منظمات النمو النباتية وهو حمض الجبريليك gibberellic acid .

## * هدم الجلوكوز Glycolysis :

- التخمر Fermentation .

مجموعة من التفاعلات الكيميائية المتتابعة والتى تحدث فى غياب الأكسجين وهناك عدة إنزيمات مختلفة ( احد عشر إنزيمًا ) كل منها يساعد أحد التفاعلات المتتابعة والتى تبدأ بسكر الجلوكوز وتنتهى بتكوين حمض اللاكتيك .

$$C_6H_{12}O_6 \longrightarrow 2\ CH_3.CHOH.COOH$$

glucose — lactic acid

وتعتبر عملية قليلة الكفاءة بمقارنتها بهدم الجلوكوز فى وجود الأكسجين وذلك لانطلاق كمية أقل من الطاقة الحرة تقدر بـ (- ٤٧,٤ سعر كبير / مول) .

وفى الخلايا اللاهوائية التى تعتمد على عملية التخمر فإن قدرًا أكبر من الجلوكوز يستهلك فى وحدة الزمن بالنسبة لوحدة الوزن منه فى الخلايا الهوائية وقد تستهلك الخلايا كمية من الجلوكوز تعادل عشر مرات تلك الكمية التى تستهلكها الخلايا الهوائية للحصول على نفس الكمية من الشغل الخلوى .

وفى المرحلة الأولى لعملية التخمر ينشطر سكر الجلوكوز عن طريق الفسفرة على حساب جزيئان ATP ليكون جزيئين من مركب جلسرالدهيد - ٣ - فوسفات ويتحول الأخير إلى حمض اللاكتيك فى المرحلة الثانية مع اكتساب جزيئين ATP لكل جزء من سكر الجلوكوز ( ينتج أربعة جزيئات من ATP وتم استهلاك جزيئين من ATP فى المرحلة الأولى فتصبح النتيجة جزيئين ATP .

## * تحلل النشا :

يتم بواسطة الأميليزات وهى إنزيمات تحليلية مائية تحفز إضافة عناصر الماء إلى الرابطة الجليكوسيدية . وتعتبر إنزيمات ألفا وبيتا أميليز $\alpha$ and $\beta$ amylase ذات أهمية أساسية لتحليل النشا ويوجد إنزيم بيتا أميليز بوفرة فى البذور ويبدأ عمله التحليلى من الطرف غير المختزل لجزىء الأميلوز الذى به عدد زوجى من وحدات الجلوكوز ويزيل الإنزيم من هذا الطرف وحدات من المالتوز بالتتابع حتى يتم تحليل جزئ الأميلوز إلى سكر المالتوز ، ويختلف فى ذلك إنزيم ألفا أميليز الذى يهاجم أى

رابطة جليكوسيدية من نوع ألفا بطريقة عشوائية على جزىء النشا وتكون نواتج نشاط إنزيم ألفا ـ أميليز على النشا هى أنواع مختلفة من دكستريّنات وسكرات أوليجو .

هذا بالإضافة إلى إنزيم فوسفوريليز النشا يمكنه أيضا تحليل النشا عن طريق كسر الرابطة الجليكوسيدية مع دخول وحدة حمض فوسفوريك للرابطة الجليكوسيدية ألفا .

وبذلك فإن أبسط مركب تحليلى ينتج كنتيجة لنشاط الإنزيمات فى تحليل النشا هو سكر المالتوز الذى يتأثر بإنزيم المالتيز maltase ويقوم بتحفيز تحليل الرابطة الجليكوسيدية لسكر المالتوز منتجًا جزيئين من سكر الجلوكوز وتصبح الصورة الكلية لتخليق وتحليل النشا وتبدأ وتنتهى بالجلوكوز .

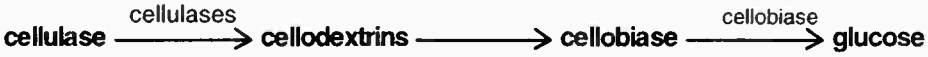
### * بناء وتحلل السليلوز :

المعلومات عن بناء السليلوز جاءت نتيجة دراسات أجريت على البكتيريا المنتجة للسليلوز ( أسيتوباكتر Actobacter ) وعندما غذيت مزارعها بجلوكوز يحتوى على كربون مشع فإن الكربون المشع وجد فى السليلوز ويفسر العلماء ذلك بأن جزىء الجلوكوز تتم فسفرته قبل اندماجه فى جزىء السليلوز وأن جزىء جلوكوز يوريدين ثنائى الفوسفات UDPG يشارك فى بناء السليلوز .

وبذلك يبدو تخليق السليلوز مشابها لبناء النشا .

### * تحلل السليلوز :

يتحلل السليلوز تدريجيا إلى سللودكسترين الذى يتحول إلى السكر الثنائى ( سللوبيوز Cellobiose الذى يتكون من وحدتين من الجلوكوز ) والإنزيمات المشتركة فى هذا التحليل جمعت تحت اسم سللوليز Cellulase ) .



## الأيض النيتروجينى

وصور النيتروجين الميسورة للنبات هى النيتروجين النتراتى Nitrate nitrogen والنيتروجين الأمونيومى Ammonia nitrogen والنيتروجين الجزيئى molecules nitrogen .

وتنحصر الاستفادة من **النيتروجين الجزيئى** على الكائنات الأولية من البكتيريا الحرة مثل الأزتوباكتر Aztobactar والكلستريديم Clostridium والطحالب الخضراء المزرقة مثل النوستوك Nostoc ويعرف ذلك بتثبيت النيتروجين . وقد أجمع الباحثون على أن عناصر الموليبدنيوم والحديد والكالسيوم ضرورية لعملية تثبيت النيتروجين وقد ثبت تأثير التركيزات المختلفة لهذه العناصر على نمو بكتيريا الأزتوباكتر ، وأن عملية تثبيت النيتروجين أكثر حساسية لسُمية أول أكسيد الكربون وأن أول أكسيد الكربون يثبط من عملية تثبيت النيتروجين .

وتقوم مجموعة كبيرة من النباتات خاصة البقوليات بالحصول على النيتروجين المثبت تكافليا بواسطة بكتيريا التربة من جنس الرايزوبيوم Rhizobium ولا يتم تثبيت النيتروجين إلا نتيجة اعتماد كل من النبات والبكتيريا على الآخر ويتم ذلك فى العقد التى تتكون فى جذور البقوليات نتيجة لاختراق الريزوبيا ، وفى تلك العقد يمد الكائن الدقيق النبات بالنيتروجين المثبت ( المختزل ) أما النبات فيمد الكائن الدقيق بالكربوهيدرات الذائبة ولقد ثبت أن خلايا العقدة تحتوى على ضعف العدد الكروموسومى لخلايا النبات وأن هذه الخلايا تنبه إلى النشاط المرستيمى نتيجة لغزو البكتيريا وتكون العقدة ، وإذا لم توجد هذه الخلايا لا تتكون العقدة . ومن ناحية أخرى فإن قدرة البكتيريا على تكوين العقدة فى جذور البقوليات ترجع إلى قدرتها على إفراز الهرمون النباتى ( أندول حمض الخليك ) Indol acetic acid .

وتحتوى العقد الجذرية على صبغة حمراء تشبه فى صفاتها هيموجلوبين خلايا الدم الحمراء وتسمى هذه الصبغة Leghemoglobin ( ليجيموجلوبين ) .

وتتكون هذه الصبغة من معقد الريزوبيم وأنسجة النبات البقولى وهذه الصبغة حاملة للأكسجين ، والأكسجين ضرورة لسلسلة انتقال الإلكترون فى العقد البكتيرية لتوليد الطاقة ATP ويتم اختزال النيتروجين إلى الأمونيا بواسطة إنزيم النيتروجيينيز Nitrogenase .

## * النيتروجين النتراتى والأمونيومى :

تمتص معظم جذور النباتات النيتروجين فى صورة نتراتية $NO_3^-$ يتم اختزالها إلى الأمونيا بواسطة طاقة التنفس ( لذلك فإن الكربوهيدرات تتحلل أثناء التنفس لانطلاق الطاقة اللازمة لاختزال النترات ) .

ويتم اختزال النترات أولا إلى نيتريت بواسطة إنزيم نيترات ريدكتيز Nitrate reductase ثم يختزل النيتريت إلى الأمونيا بواسطة إنزيم نيتريت ريدكتيز Nitrite reductase .

$$NO_3^- \xrightarrow[\text{Nitrate reductase}]{2e^-} NO_2^- \xrightarrow[\text{Nitrite reductase}]{6e^-} NH_3 \quad \text{Ammonia}$$

وحيث أن النترات لابد أن تختزل إلى الأمونيا قبل دخول النيتروجين فى النظام الأيضى فإنه عندما تحل الأمونيا كمصدر للنيتروجين محل النترات يصبح تمثيل الأمونيا سريعًا بالمقارنة بتمثيل النترات ويتوقف ذلك على الإمداد الكربوهيدراتى لتلك النباتات حيث تمثل الكربوهيدرات مصدرًا للطاقة ومصدرًا للهيكل الكربونى ، كما يتوقف التمثيل على وجود الضوء وبعض العناصر ـ مثل الكالسيوم ـ التى لها دور فى تكوين إنزيم اختزال النترات ، وقد تم التأكد من وجود إنزيم اختزال النترات فى السيتوبلازم وإنزيم اختزال النتريت فى البلاستيدات .

والعديد من النباتات قادرة على استخدام النتروجين العضوى ( المستخلص من الأحماض الأمينية والأميدات ) وتعتبر اليوريا مصدرًا جيدًا للنتروجين العضوى . ومعظم نتروجين التربة يكون فى حالة عضوية كبروتين ينتج عن انحلاله أحماض أمينية تتأكسد مكونة الأمونيا والتى تتأكسد مكونة النترات حيث يتم امتصاصها بواسطة النبات .

كما أن بعض الكائنات الدقيقة فى التربة يمكنها تمثيل الأحماض الأمينية وتنافس النباتات الراقية على هذا المصدر من النتروجين .

وقد ثبت أن رش اليوريا على الأوراق هو الطريقة الفعالة لعلاج نقص النتروجين فى العديد من النباتات حيث يحدث لها تحلل مائى سريع بواسطة إنزيم اليوريز Urase لتنتج الأمونيا وثانى أكسيد الكربون .

## أيض البروتينات Metabolism of proteins

تتكون البروتينات من الأحماض الأمينية ( ٢٠ حمضًا أمينيًا ) وأيض الأحماض الأمينية معقد حيث أن كل حمض أمينى له مسار منفصل للتخليق الحيوى والتكسير وكذلك فإن الأحماض الأمينية طلائع الوحدات البنائية لبروتينات الأنسجة والإنزيمات والأحماض النووية . والهدف من أكسدة الدهون والكربوهيدرات هو الإمداد بالطاقة لبناء هذه الجزيئات الحيوية والبروتينات التى يأكلها الحيوان تهضم إلى أحماض أمينية تمتص كما أن بروتينات الأنسجة تتحلل إلى أحماض أمينية أيضا تدخل فى رصيد الأحماض الأمينية الذى يستخدم جزء منه فى إعادة بناء الأنسجة ولكن نظرًا لارتفاع رصيد الأحماض الأمينية نتيجة تناول بروتين أكثر من الاحتياج فيتم التخلص منها بتمثيلها خلال مسارات الأكسدة لتنتج الطاقة مثل الكربوهيدرات أو الدهون ـ وعملية تكسير الأحماض الأمينية ينتج عنها ( الأمونيا ) العالية السمية والتى تطرد من جسم الحيوان أو تتحول إلى مركبين هما اليوريا ( بولينا ) وحمض البوليك .

## أيـض الدهــن

يتركز الدهن فى أجنة أو اندوسبرم البذور فـى صـورة زيـوت وقـد يصـل محتـوى الدهن إلى ٥٠ ٪ من وزن البذور ، وحيث أن الدهون لا تذوب فى الماء فهى توجد فى السيتوبلازم على صـورة مسـتحلب . وتشـاهد كقطـرات فـى سـيتوبلازم الخلايـا عنـد فحصها مجهريا والزيوت النباتية التى تحتوى نسبة أعلى من الأحماض الدهنية غـير المشبعة مثل زيت بذرة القطن .

### * بناء الدهـن :

من الكربوهيدرات حيث يتم :

**أولا : بناء الجليسرول :**

من السكر فى عملية التخمر حيث يتكـون مـن السـكر ثنـائى هيدروكسـى اسـيتون الفوسفات الذى يتفاعل مع إنزيم NADH مكونًا مركب فوسفات الجليسرول ثم تنطلق مجموعة الفوسفات من هذا المركب ليتكون الجليسرول . كـل جـزىء مـن السـكر يعطـى جزيئين من الجليسرول .

**ثانيا : بناء الأحماض الدهنية :**

من السكر فى عملية التخمر حيث يتم تكوين حمض البيروفيك الذى يعطـى مركـب آستيل كو A بتفاعله مع المرافق الإنزيمى كوانزيم A وبدلا من دخول اسيتيل كوأنزيم A فى دورة حمض الستريك فإن جزيئين منه يتفاعلان معًا لتكوين مركـب اسيتواسـيتيل كو A وجزىء كوانزيم A الذى يدخل فـى سلسـلة تفـاعلات اخـتزال بالـهيدروجين لبناء أحماض دهنية غير مشبعة .

**ثالثًا : التفاعل بين الجليسرول والأحماض الدهنية :**

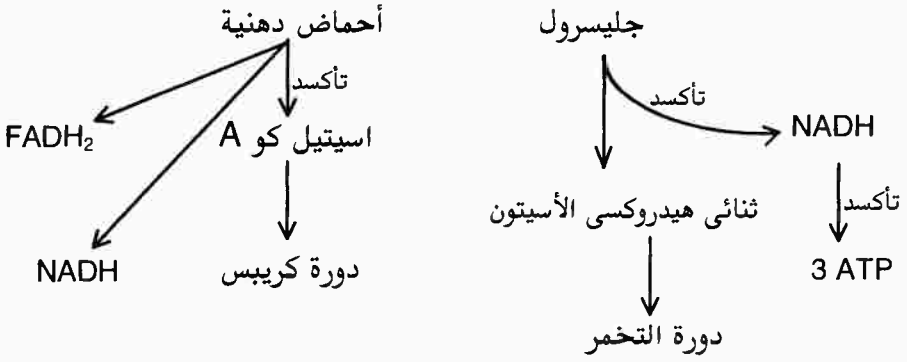
لتكوين روابط الاستر حيث تتحد ثلاثة أحماض دهنية مع الجليسرول وغالبا ما تكون الأحماض الدهنية مختلفة النوع وبذلـك يمكـن بنـاء أعـداد كثـيرة جـدًا مـن الدهون المختلفة .

وبذلك تصبح الزيوت النباتية عادة خليطًا من دهون مختلفة ، هذا مع ملاحظة أن هناك ثباتًا فى بناء دهون معينة بنسب معينة فى كل نوع نباتى وبذلك يصبح لكل دهن نباتى ما يميزه من خصائص .

### * هدم الدهون :

يبدأ هدم الدهن بالتحليل المائى للدهن إلى الجليسرول والأحماض الدهنية فى وجود إنزيم الليبيز ثم أكسدة الجليسرول والأحماض الدهنية والتى ينشأ عنها اختزال مستقبلات الأيدروجين التى تستغل بعد ذلك فى بناء ATP وتعتبر هذه التفاعلات جزءًا من عملية التنفس فى حالة أن الدهون هى مادة التفاعل .

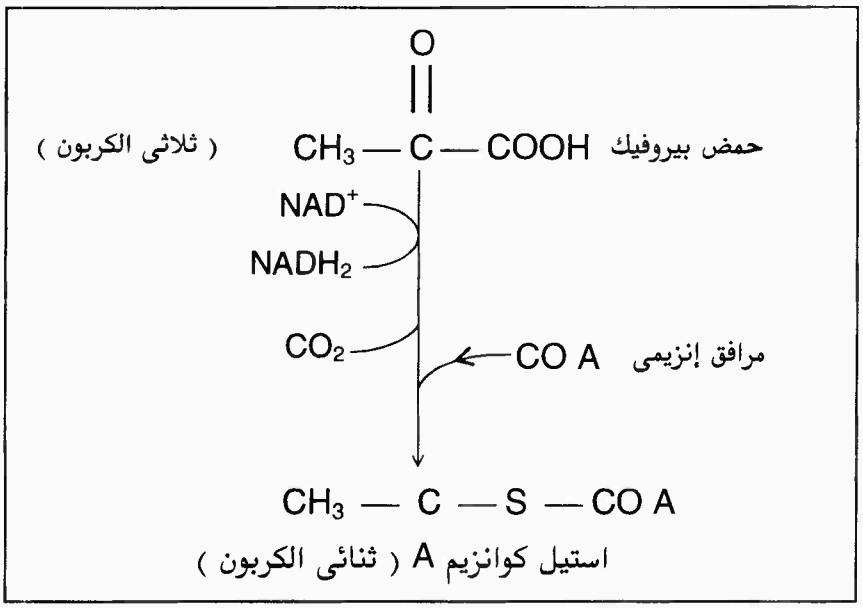
والكمية الكبيرة من الطاقة والتى تنتج من أكسدة الدهون تستهلك مرة أخرى فى عملية تثبيت الدهن .



## التنفس الخلوى Cellular respiration

تبدأ عملية التنفس الخلوى بتحلل الجلوكوز وهو مسار عام فى خلايا جميع الكائنات الحية وفيه يتم تحول الجلوكوز إلى جزيئين من حمض البيروفيك فى سلسلة تفاعلات تنقسم فيها جزيئات الجلوكوز أو جزيئات السكريات الأحادية الأخرى ذات الست ذرات كربون إلى جزيئات بها ثلاث ذرات كربون من حمض البيروفيك الذى يفقد بمساعدة الإنزيمات ذرة كربون تتحول إلى ثانى أكسيد كربون ويتحول هو إلى أسيتيل .

وهذه الأكسدة التى تحدث أثناء تحلل جزىء الجلوكوز ينتج عنها جزيئان من ATP ويتم ذلك بدخول حمض البيروفيك إلى الميتوكوندريا ويتأكسد جزىء حمض البيروفيك ويكتسب إنزيم $NAD^+$ إلكترونين ويتحول إلى $NADH_2$ والجزء المتبقى من حمض البيروفيك بعد الأكسدة وهو الأسيتيل يتحد مع المرافق الإنزيمى CO A مكونا اسيتيل كوانزيم A .



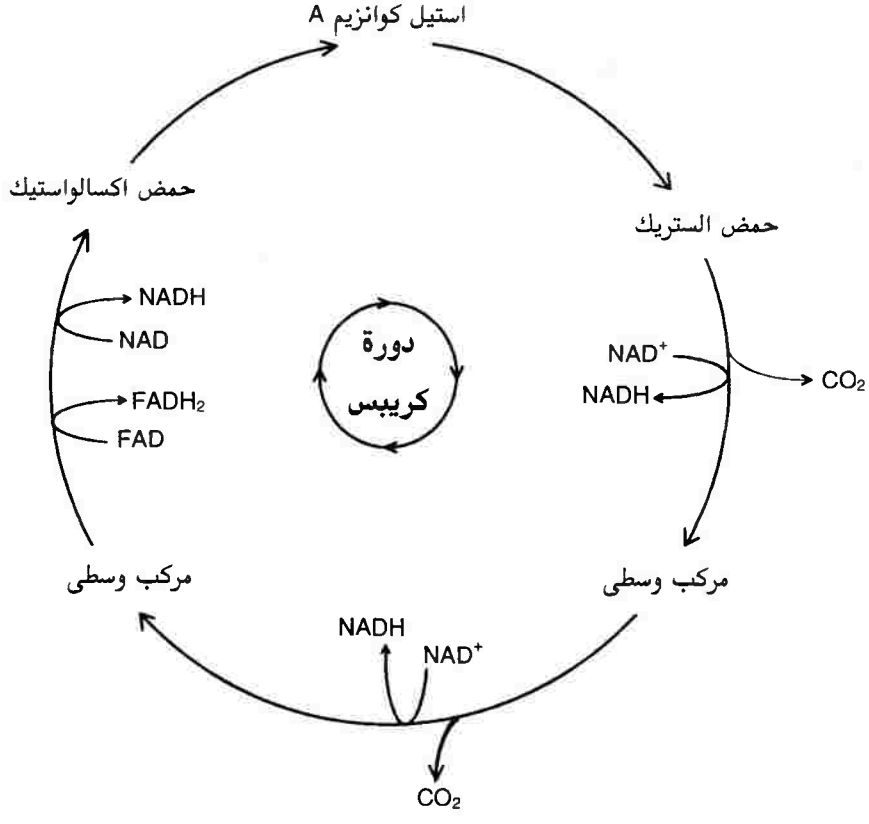

واستيل كوانزيم A مركب هام تحدث له أكسدة ينتج عنها فقد إلكترونات منشطة لتجديد ATP .

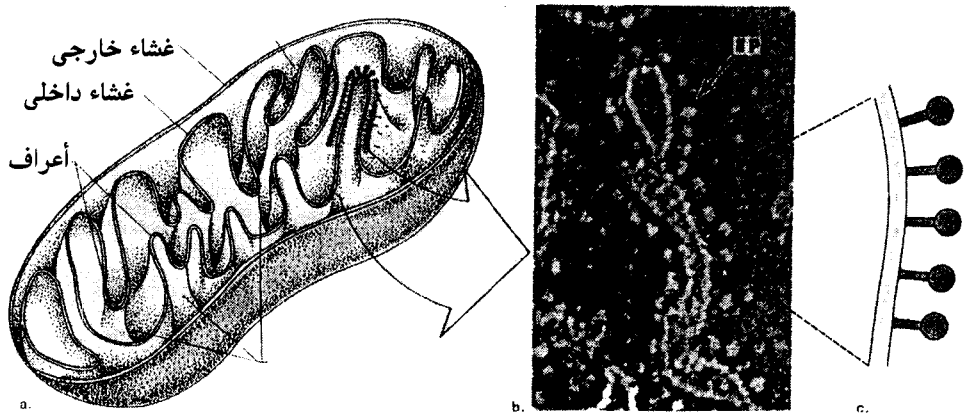
**يحتوى شق من كوانزيم A على فيتامين حمض البانتوثونيك ويوضح ذلك كيف أن الفيتامينات تلعب دورًا مهمًا في وظائف خلوية حرجة**

يتم أكسدة مجموعة الأستيل فى دورة كريبس ( نسبة إلى سير هانس كريبس الـذى استنتج هذا التتابع ) حيث يتحد استيل كوانزيم A مع حمض الأوكسالواستيك ( ربـاعى الكربون ) ويتكون حمض الستريك ( سداسى الكربون ) ويتحرر مرافق الإنزيم CO A ليعيد الدورة ويتحد مع الأستيل ثم يتحد أستيل كوانزيم A مع حمض الأكسالوأستيك مكونا حمض الستريك ويتحرر مرافق الإنزيم Coefficient ويتكرر ذلك ...

أما حمض الستريك المتكون فإنه يحدث له تكسـير خـلال سلسـلة مـن التفـاعلات تنتهى بتجديد حمض الاكسالواستيك ويتكرر ذلك ، وفى كل دورة يتحرر جزيئان من ثانى أكسيد الكربون .

وتتحرر ثلاثة أزواج من الإلكترونات إلى $NAD^+$ وزوج إلكترونات إلى FAD ( وهو حامل آخر للإلكترونات ) .






قطاع الميتوكوندريون بالميكرسكوب الإلكترونى يوضح الأجزاء على الغشاء الداخلى

## * سلسلة نقل الإلكترون :

سلسلة من الجزيئات تمرر الإلكترونات من واحد إلى الآخر والإلكترونات فى البداية جزء من ذرات الهيدروجين اتحدت مع NAD أو FAD .

$$H \longrightarrow H^+ + e^-$$

وذرات الهيدروجين هذه هى التى تحركت من الجزيئات فى عملية تحلل الجلوكوز glycolysis ودورة كريبس Krebs cycle وعندما تدخل الإلكترونات إلى السلسلة التى تقع على أعراف الميتوكوندريا تكون ذات طاقة عالية ( High-energy level ) .

ولكنها تمر كمن يهبط التل من جزىء إلى جزىء آخر وخلال ذلك تفقد الطاقة وتكتسب السيتوكرومات طاقة الإلكترونات وتضخ أيونات الهيدروجين خلال فراغ أغشية الميتوكوندريون ، وعندما تصبح الإلكترونات حاملة لطاقة مناسبة لذرة الأكسجين تتحول إلى أيونات أكسجين تتحد مع أيونات الهيدروجين لتكوين الماء .

والطاقة التى تكتسبها السيتوكرومات تستغل فى تحويل ADP إلى ATP وكمية الطاقة الناتجة عن NAD تكفى لتكوين ثلاثة جزيئات ATP وكمية الطاقة الناتجة عن FAD تكفى لتكوين جزيئان ATP .

**السيتوكرومات عبارة عن بروتينات محتوية على مجموعة هيم تشبه تركيبها تركيب هيموجلوبين كريات الدم الحمراء وآخر حامل إلكترونى فى السلسلة هو سيتوكروم أكسيديز الذى ينقل الإلكترونات إلى الأكسجين .**