



مذكرة الترقى  
للوّظائف الإشرافية  
موجه فني  
المرحلة الثانوية  
أحياء  
2024-2025



الموجه الفني العام للعلوم بالتكليف  
أ. دلال المسعود

[www.kuwaitscience.com](http://www.kuwaitscience.com)



# مذكرة الوظائف الإشرافية لموجهه فنى - أحياء

## 2024 - 2025

أعضاء لجنة الوظائف الإشرافية لموجه فنى:

- 1- أ. حسام الجندي موجه فنى أحياء
- 2- أ. عبير العازمي موجه فنى أحياء
- 3- أ. فهده السعيدى موجه فنى أحياء
- 4- أ. علي عيسى حسن موجه فنى أحياء
- 5- د. فواز الشرهان موجه فنى أحياء

المقرر الأول: أ. أسماء الأنصاري موجه فنى أحياء

المقرر العام: أ. هاجر الموسوي موجه فنى أحياء

المقرر النهائي: أ. أمل الصهبي + أ. دليل العجمي

المراجعة النهائية

أ. علي امين علي أ. زهور إبراهيم الحمر

إخراج وتنسيق

أ. علي عيسى حسن

إشراف عام

أ. ناصر حسن العبيدلي



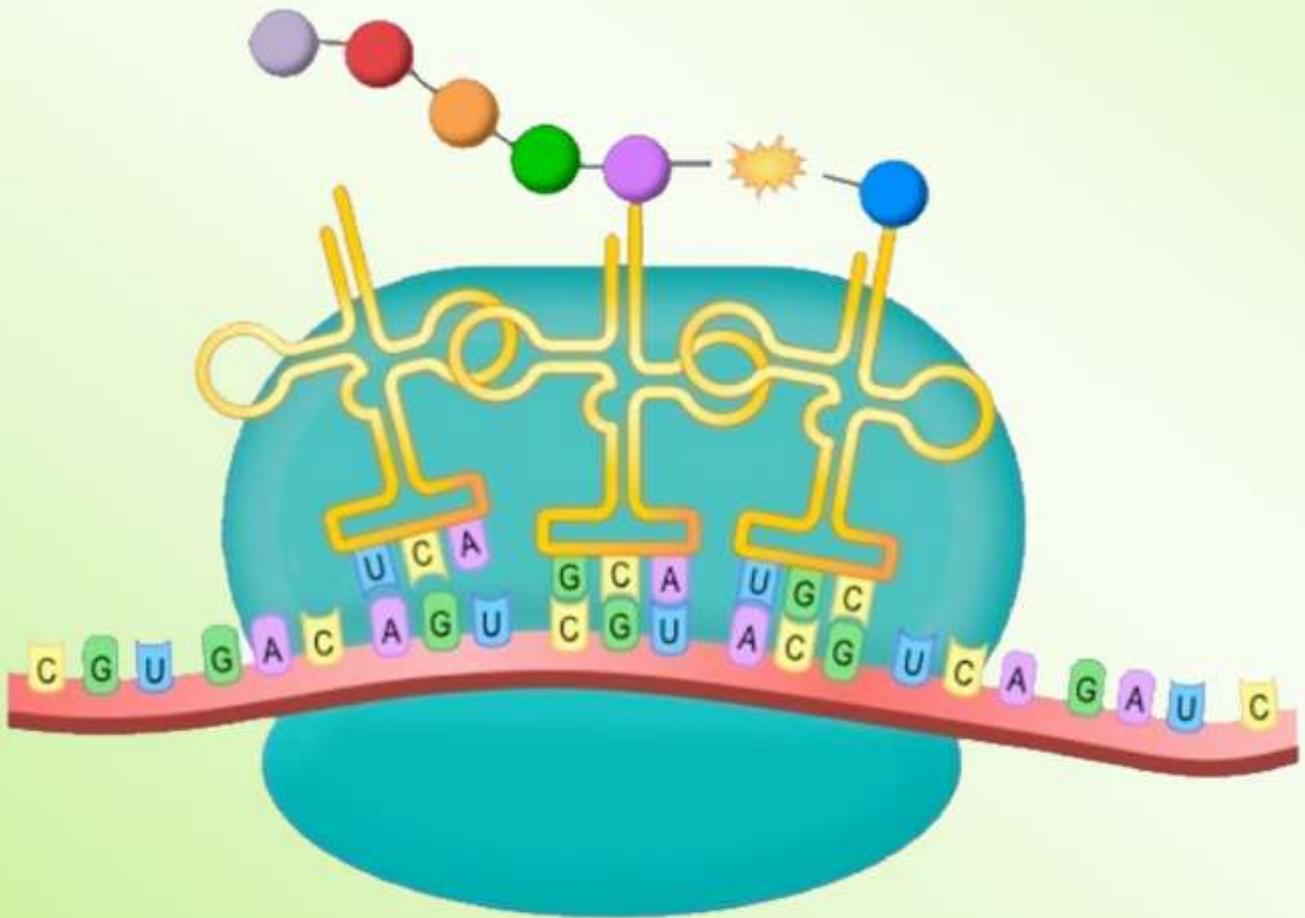
## قائمة المحتويات

6	المادة الوراثية وبناء البروتين
6	1- البروتينات
8	2- الأحماض الامينية
8	3- DNA
16	4. بناء البروتينات
25	5- آلية عمل المضادات الحيوية
30	التقنية الحيوية
30	1- الاستيلاء الانتقائي أو التربية الانتقائية
31	2- التهجين
31	3- التوالد الداخلي
31	4- الهندسة الوراثية: ( Genetic Engineering )
35	5- عملية التطفير
37	6- تعديل DNA
38	7- التهجير الكهربائي في الهلام
38	8- التحول الوراثي بإدخال DNA الغريب إلى بكتيريا القولون E.coli
39	9- الاستنساخ الجزيئي MOLECULAR CLONING :
40	10- مشروع الجينوم البشري Human Genome Project :
48	التنفس Respiration
48	1- التنفس الخلوي
51	2- أكسدة الجلوكوز
53	3- التحلل الجلوكوزي : شطر الجلوكوز
56	4- أكسدة البيروفيت لإنتاج أستيل مرافق الإنزيم (أ)
57	5- دورة كريبس
60	6- سلسلة نقل الإلكترونات والأسموزية الكيميائية
62	7- ناتج الطاقة للتنفس الهوائي
64	8- تنظيم التنفس الهوائي
64	9- التنفس اللاهوائي : الأكسدة دون الأكسجين الجزيئي
65	10- هدم البروتينات والدهون
69	البناء الضوئي Photosynthesis
69	1- مقدمة
69	2- نظرة شاملة على البناء الضوئي
71	3- اكتشاف عمليات البناء الضوئي
72	4- الصبغات :
75	5- تركيب النظام الضوئي
77	6- التفاعلات الضوئية ( المعتمدة على الضوء )

- 82 ..... 7- دورة كالفن - تثبيت الكربون
- 85 ..... 8- العوامل المؤثرة على عملية البناء الضوئي
- 86 ..... 9- دورة الطاقة
- 89 ..... التكاثر في النباتات
- 89 ..... المقدمة:
- 90 ..... 2- التكاثر الجنسي:
- 98 ..... 3. أهمية البذور:
- 99 ..... 4. أنواع وطرق الزراعة:
- 99 ..... 5 - التكاثر الخضري (اللاجسي):
- 107 ..... ٣- التكاثر بالهرمونات:

# الفصل الأول

## المادة الوراثية والبروتين



## الفصل الأول

### المادة الوراثية وبناء البروتين

#### 1- البروتينات

مركبات حيوية من أنواع المركبات الكيميائية العضوية والتي تمتاز بوجود عناصر النيتروجين والاكسيجين والكربون والهيدروجين وكذلك الكبريت والحديد والنحاس والفسفور بنسب تختلف تبعا لنوع البروتين.

#### ولهذه المركبات أهمية كبرى في حياة الانسان والنبات والحيوان وسنذكر بعضها:

- 1- مكون أساسي في بروتوبلازم وكروموسومات الخلية الحية وفي كثير من أنسجة جسم الانسان والحيوان.
- 2- تدخل في تكوين عدد من المركبات ذات القيمة والتأثيرات الحيوية مثل: الانزيمات وبعض الهرمونات والاجسام المضادة وعوامل تخثر الدم وجزينات المناعة.
- 3- لها قيمة صناعية كبيرة حيث تدخل في تركيب الصوف والشعر والحوافر ويصنع منها المنسوجات والبلاستيك.
- 4- تعد الاحماض الامينية هي الوحدة البنائية للبروتين حيث ترتبط في سلاسل طويلة ذات وزن جزيئي كبير.

#### 1-1 طرق فصل البروتينات ودراستها: -

هناك نوعان من الخلايا تستخدم في دراسات البروتين:

-خلايا بكتريا القولون E. COLI -والخلايا الشبكية للحيوانات اللبونة

تمثل الخلايا البكتيرية مصادر مهمة لدراسة بناء وتركيب البروتين وذلك لسهولة الحصول عليها كما يمكن تنميتها أو زراعتها في المختبر وتكون الرايوسومات على البكتريا غيرملتصقة على الأغشية الخلوية الداخلية لذلك يمكن عزلها بسهولة. أما الخلايا الشبكية كخلايا الدم الحمراء غير البالغة هي من أحسن الأمثلة لدراسة بناء وتركيب البروتين في حقيقية النواة حيث أنها تمتلك عدد قليل من الرايوسومات وانزيمات ذائبة وتعد الخلية الشبكية مصدرا مفضلا لدراسة تركيب البروتين أكثر من خلايا البكتريا والسبب في ذلك يعود الى ان الخلية الشبكية لا تحتوي على العضيات الخلوية الا الرايوسومات التي يمكن عزلها بسهولة بواسطة تحليل الخلية ويعود سبب تسميتها بالخلية الشبكية الى ان سيتوبلازمها يأخذ شكل شبكة دقيقة عندما تصبغ ببعض الاصباغ القاعدية مثل صبغة ازرق المثيلين وتتكون بواسطة ترسب RNA السيتوبلازمي والرايوسوم ومن طرق فصل البروتينات لدراستها :

#### - الفصل الكروماتوجرافي على الورق pc:

طريقة بسيطة لفصل الاحماض الامينية والتعرف عليها وتقديرها كميًا ويمكن معرفة الاحماض الامينية وذلك بمقارنة المسافة التي يقطعها كل حمض أميني تم فصله بواسطتها من مزيج الاحماض الامينية في البروتين المتحلل مع المسافات التي قطعها مثيلاتها من عينات معروفة من بعض الاحماض الأمينية.

### - الفصل الكروماتوجرافي على الطبقة الرقيقة TLC

هي طريقة حديثة يتم اجرائها على طبقة رقيقة من السيلكا جيل او السليلوز توضع على لوح زجاجي تحمل المذيبات الاحماض الامينية المفصولة خلال تلك الطبقة الرقيقة لمسافة معينة وهذا الفصل يأخذ وقت أسرع من الفصل على الورق.

### - الفصل الكروماتوجرافي على الاعمدة بالتبادل الايوني:

ويتم فيه استعمال عدة أنواع من الاعمدة معبأة على النشا او السليلوز او الالومينا جيل وتساعد تلك الطريقة في فصل الاحماض الامينية التي لها صفات متشابهة حيث يستخدم مواد راتجية صناعية لا تذوب بالماء او المذيبات الأخرى.

### 1-2 بروتينات مشهورة في حياتنا اليومية:

#### - البروتينات الفوسفاتية:

ويطلق عليها فوسفوبروتينات حيث ترتبط مع حمض الفوسفوريك على حالة الاستر مثل كازين الحليب والفيتلين في صفار البيض وكازين اللبن يسمى كازينوجين ويتحد مع الكالسيوم.

#### - الجلايكوبروتينات:

وهي ترتبط مع جزئ كربوهيدراتي مثل الميوزين الموجود في اللعاب.

#### - البروتينات الملونة:

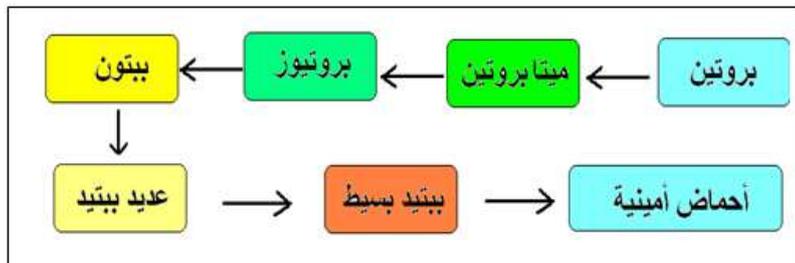
ويطلق عليها الكروموبروتينات ومنها الهيموجلوبين والسايتركرومات وفيها يتحد البروتين مع مركب الهيم.

#### - الليبوبروتينات :

وهي بروتينات متحدة مع ليبيدات مثل الدهون والاحماض الدهنية او الليسيتين والتي توجد في سيرم الدم والمخ والانسجة العصبية .

#### - البروتينات المشتقة :

عندما تتأثر البروتينات البسيطة او المرتبطة ببعض العوامل الطبيعية او الحيوية يتغير تركيبها الطبيعي ولكنها تحتفظ بمعظم الخواص العامة للبروتينات مثل زلال البيض المتجلط بالحرارة وبعض نواتج التحلل المائي غير التام للبروتينات بواسطة الانزيمات فيتحلل البروتين فيها على خطوات كالتالي ( شكل 1):



شكل ١

## 2- الأحماض الامينية

الحمض الاميني يتكون من اتحاد مجموعة الكربوكسيل (COOH -) ومجموعة الأمين القاعدية (NH<sub>2</sub> -) وتختلف تلك الاحماض عن بعضها في موضع مجموعة الأمين بالنسبة لمجموعة الكربوكسيل في الجزيء . فقد ترتبط بالوضع الفا او بيتا او جاما ولكن البروتينات الطبيعية تتميز باحتوائها على النوع الفا ولها صيغة محددة .

وتختلف الاحماض الامينية بحسب نوع المجموعة R التي قد تكون سلسلة هيدروكربونية اليقاتية مستقيمة او متفرعة او حلقيه او عطرية تحتوي على حلقة البنزين .

### ويمكن تصنيف الأحماض الامينية تبعا لعدد مجموعات الكربوكسيل والأمين مثل :

أ- احماض امينية متعادلة مثل : ( التيروسين - الانين - جلايسين ) .

ب- احماض امينية حمضية مثل : ( جلوتاميك - اسبارتيك ) .

ج- احماض امينية قاعدية مثل : ( لايسين - ارجنين ) .

كما تحتوي بعض الاحماض الامينية على عنصر الكبريت الذي يوجد في حالة ثنائي كبريتيد او على مجموعة ( سلفوهيدريل SH - ) كما تحتوي مجاميع قطبية مثل OH .

ويمكن الحصول عليها من التحلل المائي للبروتينات او بالتحضير الكيميائي في المختبر .

وعندما تتحد الاحماض الامينية مع بعضها تتكون السلسلة الببتيدية من ناحية النهاية N ( Terminal N ) في اتجاه النهاية C ( Terminal C ) مع فقد جزئ من الماء وتكوين رابطة جديدة هي الرابطة الببتيدية . وبحسب التركيب الجزيئي تتحدد خواص البروتين .

## 3- DNA

تحتوي النواة على مادة تسمى الكروماتين chromatin تنتظم بشكل شبكة ليفية تعطي خيوط عند الانقسام تعرف بالكروموسومات وتتميز بأن لها عدد ثابت في جميع أنواع الكائنات الحية ولقد تمت العديد من الدراسات لفهم دور وتركيب الكروموسوم ومنها الدراسات التالية :-

أفترض روكس Roux 1880 أنه بالرغم من دخول الكروموسومات في عمليات الانقسام الميوزي والميوزي إلا انها تنتظم بمنتهى الدقة بحيث لا ينتج عنها أي خلل في العدد أو الشكل مما يشير إلى أن هذه الكروموسومات تحمل المادة الوراثية و بإعادة اكتشاف قوانين مندل كان من السهولة ملاحظة ان سلوك الكروموسومات يوازي تفسير مندل لسلوك العوامل الوراثية مما نتج عنه إعلان نظرية الكروموسومات للوراثة في بداية القرن العشرين حيث بدأ التوجه بدراسة الكروموسومات فوجد العالم فريدريك Friedrich 1868م أن الكروموسومات مكونة من مركبات عديدة تشمل البروتينات والاحماض النووية وخاصة حمض DNA والتي ثبت بعد البحوث والدراسات بأنه هو المادة الوراثية في معظم الخلايا الحية عدا قليل من الفيروسات يكون حمض RNA .

### 1-3 الأدلة التجريبية على أن DNA هو المادة الوراثية

#### 1- التحول الوراثي Genetic transformation

أجرى جريفث ومن ثم أعاد أفري Avery ومعاونوه 1944 تجربة للتحويل الوراثي بين سلالتين من البكتيريا المسببة للالتهاب الرئوي في الإنسان من نوع *Pneumococcus* حيث سميت السلالة الأولى بالنوع الأملس S- type ولها القدرة على تكوين كبسولة من عديدات التسكر والتي تعمل على حماية الخلية البكتيريا من المؤثرات الخارجية غير المناسبة والسلالة الأخرى من النوع الخشن R - type وهي سلالة لا تمتلك القدرة على تكوين الكبسولة .

ويوضح شكل 2 تجربة أفري كما يلي :-



شكل ٢

#### 2- الانتقال الوراثي Genetic transduction

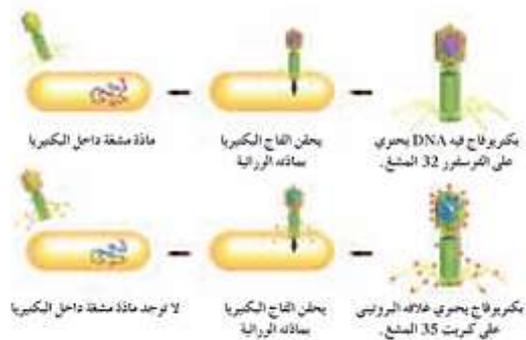
أجرى هيرشي وتشيز Hershey & Chase 1952 تجربة الانتقال بعدوى بكتيريا القولون *E. Coli* بالفاج T2 ويعرف بالفاج البكتيري لإصابته للخلايا البكتيرية حيث استخدم هيرشي المواد المشعة مثل الكبريت المشع  $^{32}S$  لتعليم البروتين الفيروسي وهو احد مكونات الغطاء الخارجي المحيط بالفاج والفسفور المشع  $^{35}P$  احد مكونات المادة الوراثية لتعليم الحمض النووي الداخلي حيث وجد النتائج التالية:

أ- تبين ان معظم DNA المشع قد دخل الخلية البكتيرية ولم تظهر آثار البروتين المشع إلا نادراً وهي البروتينات التي بقيت معلقة على جدار البكتيريا.

ب- جميع النسل الناتج من الفاج بعد تكاثره داخل الخلية والذي خرج بعد انفجار الخلية البكتيرية أحتوى على DNA المشع ولم يحتوي على البروتينات المشعة.

ج- دلت النتائج ان الغطاء البروتيني للفاج لم يكن له أي دور في نقل المادة الوراثية إلى النسل بينما DNA هو المادة الوراثية .

د- اثبتت التجربة ان المادة الوراثية DNA هي المسؤولة عن نقل المعلومات وليس البروتين كما يوضح شكل 3.



شكل 3

### 3-2 ثبات كمية DNA في الكروموسومات:-

بينت الدراسات الخلوية والخلوية الكيميائية في الكائنات حقيقية النواة ان DNA يوجد في النواة بالإضافة إلى الميتوكوندريا و الكلوروبلاست وان كمية المادة الوراثية في الخلية الجسمية يكون ثابتاً دائماً للكائن الواحد ويساوي ضعف كمية المادة الوراثية الموجودة في الجاميطات أحادية الهيئة الكروموسومية. كما ان المادة الوراثية لاتجري لها عملية بناء ثم هدم مثل البروتينات والمركبات الاخرى في الخلية فبمجرد ان يتم بناؤها في الخلية فإن DNA يظل محتفظاً بخواصه طالما ان الخلية تنمو نمواً طبيعياً.

### 3-3 تحليل مكونات الـ DNA من القواعد النيتروجينية Base Composition Analysis:

أهم المعلومات حول تركيب الحامض النووي منقوص الاكسجين جاءت من الاكتشاف الذي تم من قبل العالم شارجاف Chargaff حيث وضحت النتائج وجود إختلافات واسعة في النسب المولية للقواعد الموجودة في الـ DNA لأنواع مختلفة على الرغم من كون الاحماض النووية منقوصة الاكسجين الرايبوزية في الأعضاء المختلفة والانسجة لأي نوع تكون أساساً نفسها سميت هذه العلاقة المتبادلة بقاعدة شارجاف .  
والمعلومات التي جمعت من عدد كبير من الأنواع المختلفة من الـ DNA أوصلت شارجاف ومن ثم باحثين آخرين إلى النتائج التالية:

1- نماذج الـ DNA المعزولة لنفس النوع تمتلك نفس المكونات من القواعد النيتروجينية.

2- تختلف مكونات الـ DNA من القواعد من نوع إلى آخر.

3- إن مكونات الـ DNA من القواعد لأي نوع لايتغير مع تغير عمر الكائن أو حالته الغذائية أو التغيرات في البيئة المحيطة.

4- ان عدد وحدات الاديئين في جميع الاحماض النووية منقوصة الاكسجين بغير اعتبار للنوع تكون مساوية لعدد وحدات الثايمين بمعنى ( T = A ) وعدد وحدات الجوانين مساوية دائماً لعدد وحدات السايوسين ( C = G ) ومن هذه العلاقة نجد ان مجموع وحدات البيورينات تساوي عدد وحدات البيريميديئات ( T + C = A + G ) تسمى هذه بتكافؤ القواعد في الـ DNA (Base equivalences).

5- ان الـ DNA المستخلص من أنواع ذات علاقة قريبة تمتلك مكونات من القواعد متشابهة بينما تمتلك الأنواع المتباعدة مكونات من القواعد مختلفة .

6- يكون خيطا الحلزون المزدوج متعاكسان بالقطبية ويكونان عدد كبير من اللفات يبلغ طول اللفة الواحدة  $34 \text{ \AA}$  أنكستروم تحتوي كل لفة على 10 أزواج من النيوكليوتيدات او القواعد وتكون المسافة بين نيوكليوتيدة واخرى هي  $3.4 \text{ \AA}$  أنكستروم .

### 3-4 النيوكليوتيدات والنيوكليوسيدات:-

تتميز الأحماض النووية بأنها مركبات ذات أوزان جزيئية عالية و تتكون من وحدات تركيبية تسمى بالنيوكليوتيدات والتي تتميز بأن لها القابلية للتحلل المائي الكامل لينتج ثلاث مكونات هي : ( القاعدة النيتروجينية ، السكر الخماسي ، حمض الفسفور ) بينما عند تحلل النيكلوتيد الأحادي إلى ( قاعدة نيتروجينية مرتبطة بالسكر فقط) ينتج مايسمى بالنيكليوسيد الناتج من ارتباط احدى ذرات النيتروجين للقاعدة النيتروجينية مع ذرة الكربون الجلايكوسيدية للسكر الخماسي حيث تتكون الرابطة بين ذرة النيتروجين رقم (1) للقاعدة مع ذرة الكربون رقم ( 1) للسكر الخماسي لتنتج النيوكليوسيدات منقوصة الاكسجين أما الرابطة بين ذرة النيتروجين رقم (9) للقاعدة مع ذرة الكربون رقم ( 1) للسكر الخماسي تنتج النيوكليوسيدات الرايبوزية

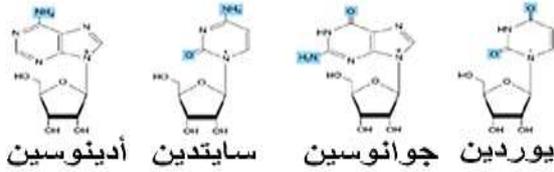
### - تركيب النيوكليوسيد Structure of Nucleosides:

#### -Nucleosides

يتكون النيكليوسيد من قاعدة بيورينية أو بيريميدينية مرتبطة مع السكر الخماسي الرايبوز أو الرايبوز منقوص الاكسجين من خلال ارتباط ذرة نيتروجين في القاعدة النيتروجينية مع ذرة الكربون للسكر الخماسي ونتيجة لذلك ينتج نوعين من النيوكليوسيدات: 1- النيوكليوسيدات الرايبوزية 2- النيوكليوسيدات منقوصة الاكسجين كما في (الشكل 4)

#### Nucleosides

#### النيوكليوسيدات



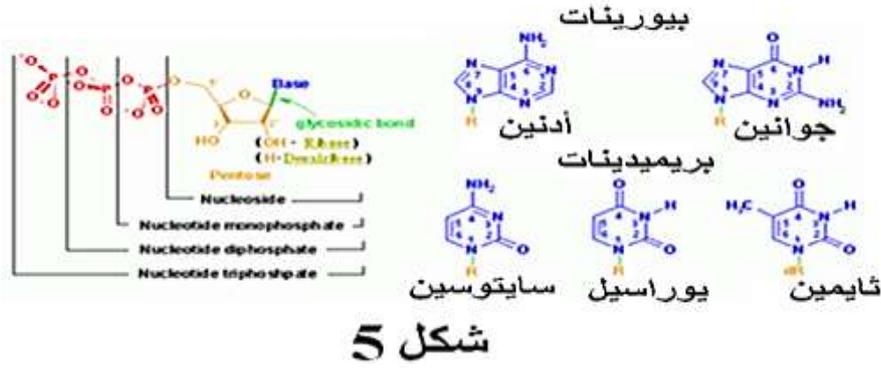
شكل 4

### أسماء النيوكليوسيدات الرئيسية كما بالجدول :-

نيوكليوسيد	سكر	قاعدة
Adenosine 2-deoxyadenosine	رايبوز ديوكسي رايبوز	أدينين
Cytidine 2-Deoxycytidine	رايبوز ديوكسي رايبوز	سايتوسين
Guanosine 2- Deoxyguanosine	رايبوز ديوكسي رايبوز	جوانين
Thmidine	ديوكسي رايبوز	ثايمين
Uridine 2-Deoxyuridine	رايبوز ديوكسي رايبوز	يوراسل

## - تركيب النيوكليوتيد Structure of Nucleotide:

عبارة عن استرات حامض الفوسفوريك للنيكليوتيدات والتي يتفاعل فيها الحامض مع إحدى مجاميع الهيدروكسيل للسكر الخماسي الكربون وكما في النيوكليوسيدات يوجد نوعين من النيوكليوتيدات وهي النيوكليوتيدات الريبوزية والديوكسي ريبوزية كما أن النيوكليوتيدات الموجودة في الحامض النووي هي غالباً النيوكليوتيدات التي يرتبط فيها الفوسفات مع مجموعة الهيدروكسيل في ذرة الكربون رقم ( 5 ) . ( شكل 5 )



أسماء النيوكليوتيدات كما بالجدول :-

الرايبوز	ديوكسي رايبوز
أدينوسين 5 - أحادي الفوسفات Adenosine 5 – monophosphate AMP	ديوكسي أدينوسين 5 - أحادي الفوسفات Deoxyadenosine 5 – monophosphat dAMP
جوانوسين 5 - أحادي الفوسفات Guanosine 5 - monophosphate GMP	ديوكسي جوانوسين 5 - أحادي الفوسفات Deoxyguanosine 5 - monophosphate dGMP
ساييتدين 5 - أحادي الفوسفات Cytidine 5 – monophosphate CMP	ديوكسي ساييتدين 5 - أحادي الفوسفات Deoxycytidine 5 – monophosphate dCMP
يوردين 5- أحادي الفوسفات Uridine 5 – monophosphate UMP	ديوكسي يوردين 5- أحادي الفوسفات Deoxyuridine 5 – monophosphate dUMP

### تواجد النيوكليوتيدات في الخلايا:

- 1- في الخلايا الطبيعية وجد ان أعلى تركيز للنيوكليوتيدات هو نيوكليوتيد الادينوسين ثلاثي الفوسفات ATP.
- 2- النيوكليوتيدات الثنائية تتواجد بهيئة مساعدات انزيمية.
- 3- وجد ان مستوى النيوكليوتيدات منقوصة الأكسجين يتعرض إلى عدم استقرار كبير اثناء دورة الخلية على عكس مستوى النيوكليدات الرايبوزية التي تبقى ثابتة نسبياً.

### الوظائف الأيضية للنيوكليوتيدات :

تحتوي جميع أنواع الخلايا على أنواع عديدة من النيوكليوتيدات والسبب يعود إلى اشتراكها في العديد من العمليات الأيضية الضرورية للنمو الطبيعي للخلايا و لوظائفها . ومن هذه الوظائف:

- 1- دورها في أيض الطاقة: ان الشكل الرئيسي للطاقة الكيميائية في الخلايا هو ATP الذي يستهلك في التفاعلات الأيضية وكمصدر للفوسفات .
- 2- دورها في الأحماض النووية : تتكون الأحماض النووية من وحدات متكررة من النيوكليوتيدات الأحادية.
- 3- دورها كوسائط فسيولوجية: تلعب دورا كمراسل ثانوي وفي توسيع شرايين الدم التاجية وفي عملية تجميع الصفائح الدموية وبالتالي تخثر الدم.
- 4- دورها كمكونات لمساعدة الإنزيم : مثل أدينين ثنائي النيوكليوتيد.

5- دورها كنواتج وسطية نشطة : تستخدم كنواقل لبعض النواتج الوسطية النشطة للعديد من التفاعلات مثل اليوريدين ثنائي الفوسفات – جلوكون وهو من النواتج الوسطية المهمة اثناء صنع الجلايكونين.

6- دورها كمؤثرات تنظيمية: حيث تعد خطوات منظمة في المسارات الحيوية عن طريق تركيزها مثل ATP و ADP .

### **5-3 نموذج واطسون وكريك**

عندما شهد العام 1953 ظهور نموذج الحلزون المزدوج لـ واطسون وكريك لتفسير تركيب جزئ DNA . ظهرت النتائج بعد دراسات مستفيضه بالجوء إلى تقنيات الفيزياء الجزيئية لاستعمال طرق الاشعة الفائقة لتحليل التركيب الثلاثي الابعاد DNA عن طريق حيود أشعة أكس المميزة والتي أظهرت التركيب الحلزوني للمادة الوراثية. كذلك استخدمت تقنيات الكيمياء الحيوية للتحليل الكمي لمكونات البروتينات وايضا لتحليل مكونات الاحماض النووية من القواعد وتركيبها وايضا كان لها دورا حيويا في اقتفاء النظائر المشعة مما أتاح الفرصة للتوصل الى معرفة عملية التركيب الحيوي الانزيمي للأحماض النووية والبروتينات .

### التركيب الحلزوني لمادة DNA منقوص الأكسجين :

- 1- يتكون هذا التركيب من سلسلتين حلزونيتين من النيوكليوتيدات المتعددة ملتقن حول محور واحد لتكوين حلزون مزدوج ويكون اتجاه الحلزون ناحية اليمين حيث يلتف اثنان من سلاسل متعدد النيوكليوتيد بعضها حول بعض.
- 2- يوجد في كل التفافة للحلزون عشرة أزواج من القواعد - للحلزون المزدوج أهدودان أحدهما رئيسي والآخر ثانوي
- 3- السلسلتين غير متوازيتين بمعنى ان الجسر الفوسفاتي ثنائي الرابطة ( 3 - 5 ) يسير باتجاهين متعاكسين
- 4- قواعد البيورينات والبريميدينات لكل سلسلة مرتبة إلى الداخل من الحلزون المزدوج وموازية للسلسلة الاخرى كما انها تكون عمودية على المحور الطولي للحلزون المزدوج
- 5- يستطيع كل زوج من القواعد ان يستدير بمقدار 36 نسبة إلى الزوج الذي يليها وهكذا وجد ان كل لفة من الحلزون المزدوج يتسع لعشرة أزواج من القواعد.
- 6- أظهرت نتائج حيود الأشعة ان طول اللفة الكاملة للحلزون هي حوالي 3.4 نانومتر والمسافة بين كل زوج من القواعد هي حوالي 0.34 نانومتر
- 7- يتم ازدواج القواعد للسلسلتين بحيث تكون بعض الأزواج من القواعد تتلاءم فقط داخل هذا التركيب بحيث تؤدي إلى تكوين روابط هيدروجينية مع بعضها ، الأزواج المسموح بتكوين روابط هيدروجينية مع بعضها البعض هي A – T و C – G وهي الملائمة البيئة للمتماثل التام في الـ DNA .
- وازواج القواعد الأخرى لا تلائم التركيب حيث ان A – G كبير جداً داخل الحلزون والزوج الآخر G – T يكونان بعيدان عن بعضهما لتكوين روابط هيدروجينية ثابتة مع بعضهما البعض كما الروابط الهيدروجينية المتكونة بين هذه الأزواج تكون ضعيفة جداً وارتباط أزواج القواعد في نموذج واطسون وكريك احتوت على الأزواج التي تعطي ثباتاً واستقراراً أكبر.
- 8- تقع القواعد غير المحبة للماء والقليلة الذوبان نسبياً إلى الداخل من الحلزون المزدوج حيث تختبئ من الماء أما وحدات السكر المحبة للماء ومجاميع الفوسفات المشحونة كهربائياً تقع على المحيط الخارجي وتكون معرضة للماء هذا الشكل والترتيب يثبت الحلزون ( قطبي محب للماء ).
- 9- ترتبط القواعد النيتروجينية المتقابلة بين السلسلتين بروابط هيدروجينية بحيث ترتبط G مع C بثلاث روابط هيدروجينية في حين ترتبط A مع T برابطتين فقط.

### ان البناء ثلاثي الابعاد لمادة DNA كمادة وراثية يتميز بالخصائص التالية :

**أولاً :** طبيعة التركيب المزدوج للجزء كـمادة وراثية ضمن في طياته إمكانية التضاعف الذاتي بحيث تعطي جزيئين متماثلين ومماثلين للجزء الأصلي معتمدا على العديد من الانزيمات والبروتينات المساعدة لعملية التضاعف نصف المحافظ .

**ثانياً :** ان ازدواج التركيب بالتكامل بين القواعد النيتروجينية على طول جزئ DNA يتيح حماية المعلومات الوراثية من تأثير التغيرات او الاضرار التي يمكن التعرض لها وتسبب الطفرات . لان شرط التكامل بين ازواج القواعد النيتروجينية السابق الإشارة اليه يسمح لأي ضرر لتتابعات القواعد على أحد الأذرع أن يعاد إصلاحه فوراً بدون تغيير اعتماداً على التتابعات السليمة الموجودة بالفعل على الذراع الآخر .

**ثالثاً :** يتيح التتابع الحر للقواعد النيتروجينية في اذرع الحلزون المزدوج القدرة على تكوين كم هائل من المعلومات الوراثية من خلال التتابعات اللانهائية في العديد من أنواع النيوكليوتيدات الأربعة على طول ذراعي الحلزون .

### جزئ DNA يختلف من كائن الى آخر حسب تعقيده التركيبي و تطوره .

فمثلاً في فيروس SV40 الذي يتطفل على الثدييات لا يزيد عن أربعة آلاف من القواعد النيتروجينية بينما يصل في البكتيريا الى عدة ملايين وفي حشرة الدروسوفيلا يصل طول جزئ DNA الى خمسون مليون تقريبا من أزواج القواعد النيتروجينية في حين أن طول ذلك الجزئ في الانسان يصل لثلاث مليارات من ازواج القواعد النيتروجينية ،

ويعتبر نموذج واطسون وكريك لبناء DNA كمادة وراثية للكائنات الحية نموذج عام ولذا سمي اختصاراً (B- DNA) .

ولا يمنع ذلك من تواجد نماذج أخرى لجزء الـ DNA منها نموذج zigzag الذي وصفه العالم الكسندر ريتش في عام 1979 حيث تبرز القواعد الى الخارج بدلا من الداخل مما يعطي للجزء شكلا متعرجا غني بالقواعد G-C والتي تعتبر قليلة في نموذج واطسون وكريك

ومما هو جدير بالذكر ان التتابعات G-C تكثر في الفيروسات السرطانية المعروفة بالانكوجين، وقد أوضح الباحثون ان هذا النموذج المتعرج قد يوجد في مناطق صغيرة ومحددة على طول جزئ الـ DNA الشائع .

كذلك يوجد نموذج آخر وضعه العالم بيكرسون وتلاميذه في العام 1982 وسمي بالنموذج A- DNA وهو عبارة عن حلزون مزدوج طويل ولكنه اكثر سمكا والقواعد النيتروجينية فيه متداخلة جدا وأكثر التقافا في قلب الجزئ اذا ما قورنت مع نموذج واطسون و كريك .

مما سبق ذكره عن قدرة مادة الوراثة على التضاعف بطريقة غاية في الدقة تهدف لنقل المعلومات الوراثية من جيل لآخر تكمن الوظيفة الثانية لمادة الوراثة وهي التعبير عن المحتوى الجيني لمجموعة العوامل الوراثية المحمولة على DNA ليعطى شكلا مظهريا معيناً حسب نوع التوارث .

ان الشكل المظهري للفرد كنتاج مباشر لتركيبه الوراثي هو عبارة عن انتاج البروتينات طبقا لاوامر وراثية صادرة من DNA الخاص بهذه الخلية خاصة اذا علمنا ان البروتينات تمثل اكثر من نصف الكتلة الجافة للخلية ولهذا يجب ان تخلق باستمرار لتعويض الفاقد منها او لحاجة الخلية لها اثناء التطور او للنمو .

انه لمن المؤكد ان المادة الوراثية من DNA هي المسؤولة عن التركيب الوراثي للفرد في صورة تتابعات من ازواج القواعد النيروجينية للكائنات حقيقية النواة يقبع داخل كروموسوماتها داخل النواة محاطا بالغشاء النووي الذي يفصلها عن السيتوبلازم .

ومن المؤكد ان كل البروتينات المسؤولة عن الشكل الظاهري للفرد تخلق على الرايبوسومات المنتشرة على الشبكة الاندوبلازمية الخشنة داخل السيتوبلازم ويجب ان يكون هناك وسيط ينقل المعلومات الوراثية من النواة إلى الرايبوسومات بالسيتوبلازم لبناء البروتينات المعبرة عن الشكل المظهري .

وقد تأكد من خلال البحث دور RNA كوسيط يقوم بنقل المادة الوراثية من النواة إلى السيتوبلازم من خلال عملية النسخ .

#### 4. بناء البروتينات

ان عملية بناء البروتينات تعتمد على التعاون المثمر بين الأنواع المختلفة من الحمض النووي RNA بما يلزمها من تتابع لعدد من الخطوات المنتظمة أولها بناء حمض RNA الرسول الذي ينسخ على DNA ثم ترجمة هذه المعلومات في السيتوبلازم بوجود عدد كبير من الاحماض الأمينية التي يتكون منها البروتينات على ان تكون تلك الاحماض منشطة ومحمولة بواسطة النواقل المتخصصة من أنواع الحمض RNA - t كذلك ينبغي وجود الوحدات عديدة النيوكليوتيدات المكونة للرايبوسومات والتي تكون r-RNA والتي سيتم تخليق البروتينات عليها محملة بواسطة بروتينات متخصصة بعملية البناء تسمى عوامل البروتين عندما تتجمع كلها يتم بناء البروتين وتتم عملية الترجمة .

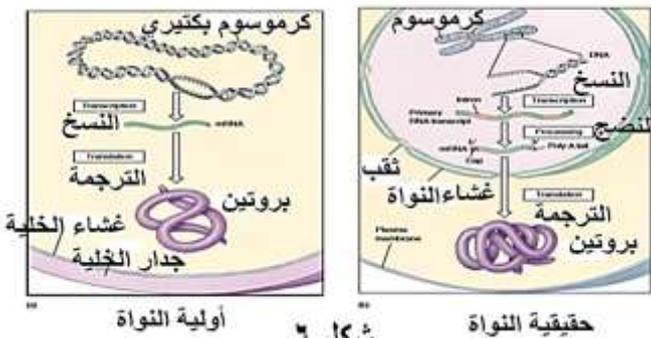
وقد ثبت علميا ان حمض الرسول m-RNA يخضع لعملية مراجعة في النواة تحدث عليه بعض التغيرات خاصة في الكائنات الراقية حقيقية النواة اطلق عليها عملية انضاج الرسول .

بالإضافة إلى أنواع الأحماض الريبوزية الثلاثة السابقة يوجد نوع يعرف بـ snRNA أو الحمض النووي الريبوزي الصغير حيث تتميز بأنها احماض صغيرة الحجم ويحصر نشاطها في النواة فقط وتعمل كمحفز للبدء في عملية تشكيل الـ hnRNA ( herterogeneous nuclear RNA ) الحمض النووي الريبوزي غير الناضج وهو الناتج من عملية النسخ ليأخذ الشكل النهائي له وهو الحمض النووي الريبوزي الرسول .

#### 1-4 خطوات تخليق ( بناء ) البروتينات

يمكننا تلخيص وظيفة DNA وعلاقته بالأنواع الثلاثة من RNA ودور هذه العلاقات في تخليق البروتينات من خلال الخطوات الثلاث التالية : ( كما في شكل 6 )

- 1- النسخ .
- 2- النضج ( التشذيب ) .
- 3- الترجمة .



شكل ٦

### في عملية بناء البروتين يجب مراعاة الأمور التالية : -

- توفير المادة الأولية لصناعة البروتين حيث يشترك أكثر من 100 مركب في هذه العملية وتتضمن :
- حمض m- RNA الرسول : ينقل المعلومات الوراثية من DNA الموجود في الكروموسومات الى سطح الرايبوسوم .
- حمض t-RNA الناقل : يحتوي على القواعد الثلاث المعروفة بالشفرة المقابلة .
- انزيم أمينواسيل ( t-RNA ) : عملية اتحاد الحامض الاميني ب RNA الناقل .
- الرايبوسوم : ينظم عملية بناء البروتين وتحفيزها .
- عامل الابتدء : عبارة عن بروتين يعمل على تجمع معقد الابتدء ويتضمن RNA ورايبوسوم .
- عامل الاستطالة : هو بروتين سيتوبلازمي يعمل على ربط أحماض RNA الناقلة بالرايبوسومات النشطة .
- عامل الانتهاء : إعطاء إشارات من قبل الشفرات الثلاثة الفارغة يوم يقوم عامل الانتهاء بتحرير سلسلة متعددة الببتيد كل من RNA الناقل والرسول من الرايبوسوم .
- ATP- : يزود الطاقة أثناء عملية نقل الحامض الأميني بواسطة الناقل .
- GTP- : يزود الطاقة أثناء بداية التفاعل وأثناء الاستطالة .
- الأحماض الأمينية البروتينية العشرون المعروفة .

### 1. عملية النسخ Transcription

عملية نقل المعلومات الوراثية المحمولة على DNA على صورة جزئ RNA الرسول وفق خطوات عملية متتالية ومنظمة .

ان دور الحمض النووي الرسول كحامل للشفرة الوراثية امكن اثباته من خلال التجارب باستخدام العناصر المشعة على قاعدة اليوراسيل ( U ) حيث يتم تعليمها داخل النواة وتنقل الخلية الى بيئة عادية خالية من الاشعاع حيث يخرج الرسول المشع الى السيتوبلازم حيث الرايبوسومات ما يؤكد ان RNA الرسول قد استنسخ على DNA النواة .

وقد تأكد لدى العالمان فولكن ولاورفس ان اول عمل يقوم به البكتيريوفاج T2 عندما يصيب الخلية البكتيرية من نوع E.COLI هو النهم السريع لانتاج البروتين مستخدما الرايبوسومات البكتيرية والشفرات الوراثية على DNA البكتيريوفاج .

عملية نسخ الشفرة الوراثية من DNA الى حمض RNA الرسول تحتاج الى انزيم متخصص للغاية يسمى ال RNA polymerase من مجموعة انزيمات تقوم بنسخ الشفرة الوراثية على ال DNA الى RNA الرسول ويعد هذا الانزيم معقد البناء يتكون من أربعة تحت وحدات مترابطة معا ومرتبطة بها عددا من جزيئات البروتينات المكملة لتكوين جزئ يسمى Complex of RNA polymerase ، والأربع تحت وحدات هي بالجدول التالي مع اوزانها الجزيئية :

تحت وحدة	الوزن الجزيئي بوحدات الدالتون
Beta	150000
Beta prime	160000
Alfa	40000
Sigma	70000

( الدالتون وحدة كتل صغيرة تستخدم للتعبير عن الكتل الذرية والجزيئية وهي تساوي 1/12 من كتلة ذرة الكربون )  
اثنين من تحت وحدة الالفا من هذه الأربعة تكون ما يعرف بنواة الانزيم ثم تتحد نواة الانزيم مع تحت وحدة  
السجما مكونة ما يعرف هولوانزيم وهو الصورة الفعالة من الانزيم.

هذه الانزيمات تكون حرة بطبيعة الحال داخل النواة بحيث تستطيع وبسهولة وبطريقة مباشرة من التقابل مع  
الكروموسومات ولكنها لا تلتصق إلا بمناطق محددة وعند تتابعات متخصصة من DNA الكروموسومي  
المطلوب نسخه لتخليق بروتين محدد .

لقد وجد في خلايا الكائنات حقيقية النواة ان جزيئات مختلفة من انزيم RNA polymerase تخلق الأنواع  
المختلفة من RNA وذلك عندما يقابل انزيم البلمرة التتابعات المحددة على DNA الكروموسومات يجب عليه  
تعرف مناطق بداية النسخ بمعنى انه ولا بد له من التعرف على موقع بداية تخليق RNA لان هذه المواقع تحتوي  
على إشارات لبداية النسخ من هذه المنطقة فسميت هذه الإشارات sigma factor بعد ذلك يقوم الانزيم بفتح  
الحلزون المزدوج لجزئ DNA النواة ليصبح عبارة عن سلسلتين مستقلتين من اشربة DNA علما بأن ذراع  
واحد فقط من DNA هو الذي يسمح فقط بالنسخ عليه ويسمى ذلك الذراع علميا بالذراع ذو المعنى Brin  
matrice الذي سيتم عليه نسخ RNA ويسمى الذراع الاخر بالذراع المقابل antisens .

وقد ثبت علميا ان بعضا من أجزاء أي ذراع من أذرع الحلزون DNA تعتبر Brin sens وأجزاء أخرى  
تعتبر antisens والمسألة كلها تتوقف على الجين المراد نسخه ، ثم يرتبط الانزيم عند نقطة البداية ويبدأ في  
عملية النسخ بإضافة قواعد نيتروجينية الادينين A يكتمل مع اليوراسيل U والجوانين يكتمل بالسيتوسين وسوف  
يتوقف هذا النسخ عند نقطة معينة هي إشارة النهاية عندها يتحرر الانزيم تاركا حمض الرسول المتكون وكذلك  
DNA المنسوخ عليه .

بصفة عامة يتراوح طول جزئ الرسول ما بين سبعون الى عشرة آلاف من القواعد النيتروجينية ويحدد البادئ  
Site Promotor على DNA المكان الذي يبدأ منه النسخ ويتم في الاتجاه من ( 5 الى 3 ) فإن هذا البادئ سوف  
يحدد أي ذراع من اذرع DNA هو الذي سينسخ ويوجد بروتين يساعد البادئ في التعرف على الذراع  
والمنطقة من DNA التي سوف تنسخ ، ويوجد في خلايا الكائنات حقيقية النواة ثلاث أنواع مختلفة من الانزيمات  
RNA polymerase واحد منهم مخصص لنسخ جميع أنواع الرسول RNA – m من احد ذراعي DNA  
والاثنين الآخرين مخصصان لتخليق t-RNA و r-RNA .

### - الشفرة الوراثية

من المعروف علميا ان الجزيئات التي يمكنها ان تقوم بحمل المعلومات الوراثية يجب ان تتوفر فيها الشروط التالية :

- يجب أن تكون قادرة على حمل معلومات ذات قاعدة بيولوجية وان تحفظ هذه المعلومات بصورة ثابتة .
- لابد ان تكون هذه المعلومات الوراثية قادرة على الانتقال بدقة من خلية الى أخرى ومن جيل الى جيل .
- لابد وان تكون المادة الوراثية القابعة داخل نواة الخلية قادرة على التعبير عن نفسها وذلك عن طريق التحكم في جزيئات بيولوجية أخرى تنتشر في كل أجزاء الخلية نواتها وسيتوبلازمها بحيث تضمن استمرار النوع .
- يجب ان تتميز مادة الوراثة بقدر محدود ومحسوب ومقنن من التغيير يسمح بحدوث التطور المستمر .

First Letter	Second Letter								Third Letter
	U		C		A		G		
U	UUU	Phenylalanine	UCU	Serine	UAU	Tyrosine	UGU	Cysteine	U
	UUC		UCC		UAC		UGC		C
	UUA	UCA	UAA		UGA	A			
	UUG	UCG	UAG		UGG	G			
C	CUU	Leucine	CCU	Proline	CAU	Histidine	CGU	Arginine	U
	CUC		CCC		CAG		CGC		C
	CUA		CCA		CAA		CGA		A
	CUG		CCG		GAG		CGG		G
A	AUU	Isoleucine	ACU	Threonine	AAU	Asparagine	AGU	Serine	U
	AUC		ACC		AAG		AGC		C
	AUA	ACA	AAA		AGA	A			
	AUG	ACG	AAG		AGG	G			
G	GUU	Valine	GCU	Alanine	GAU	Aspartate	GGU	Glycine	U
	GUC		GCC		GAC		GGC		C
	GUA		GCA		GAA		GGA		A
	GUG		GCG		GAG		GGG		G

- وتمتاز مادة DNA بالشروط الأربعة حيث تحمل المادة الوراثية على هيئة شفرات Code وذلك في تتابعات من القواعد النيروجينية على طول السلسلة عديدة النيوكليوتيدات وهذا يعني قراءة السلسلة على صورة AAACCCGGGTTATT لتعبر عن تركيب وراثي معين.

- بينما سلسلة أخرى على صورة CCGGATTAGGCCTAG تعبر عن تركيب وراثي آخر وهكذا في مجموعات لا حصر لها من القواعد النيروجينية يمكن الحصول على تراكيب وراثية .  
- ويمكننا ان نتصور وجود لغتين هما :

**لغة أولى :** يمكن تسميتها لغة النيوكليوتيدات تكتب بأربعة حروف هي G و C و A و T اختصارا للقواعد النيروجينية وهي لغة الشفرة الوراثية سوف نترجم الى لغة ثانية .

**لغة ثانية :** لغة البروتينات المكونة من عشرون حمض أميني هي المكونة لجميع أنواع البروتينات المعروفة . من خلال الشكل من الممكن الربط بين التعبير الجيني للفرد والشكل المظهري له من خلال التناغم بين اللغتين الجينية والبروتينية لكن كيف يمكن التعبير من خلال اربع حروف عن عشرون حمض اميني ؟

### هناك أربعة احتمالات ممكنة لذلك هي :

- أن كل قاعدة نيروجينية من القواعد الأربعة تعبر عن حامض أميني معين ( 4=4 ) وهو احتمال غير مقبول .
- أن كل احتمال من قاعدتين يمكنه ان يعبر عن حمض اميني معين ( 16 ) حمض فقط من العشرين بما يعني وجود أحماض أربعة لا تقع تحت سيطرة التركيب الوراثي للفرد بما لا يتفق مع الحقائق العلمية المؤكدة .
- كل توليفة من ثلاث قواعد تعبر عن حمض أميني محدد ( 64 ) احتمال تتفق مع الاحتمالات والحقائق العلمية وتم تفسير الفرق بين الاحتمالات ال 64 و 20 حمض بوجود أكثر من شفرة لبعض الاحماض .
- وجود توليفة من أربعة قواعد لكل حمض اميني ( 256 ) احتمال وقد رفض هذا الاحتمال .

- وقد أكدت التجارب الوراثية على البكتيريوفاج ان الشفرة الوراثية بالفعل ثلاثية والزيادة فسرت كالتالي :
- أن هناك أكثر من شفرة واحدة تقرأ بعض الاحماض .
  - أن هناك بعض الشفرات ليس لها معنى معروف الى الآن .
  - أن هناك شفرات مخصصة لبدائية ونهاية عمليات النسخ .

#### **وببساطة تتصف الشفرات ب:**

أن نسخ هذه الشفرات من DNA الوراثي يتم بفكرة التكامل بين القواعد النيروجينية الأربعة مع القواعد النيروجينية على الرسول RNA الاولي .

**الشفرة الوراثية** عبارة عن تتابع متتالي من ثلاثة قواعد نيروجينية ( شفرة ثلاثية )

هناك احتمالات ضخمة لعدد الشفرات الوراثية المحتملة من تركيب وراثي معين توفر فرصة للاختلاف بين الافراد على وجه الأرض رغم وجود الحروف الأربعة من القواعد النيروجينية لديهم جميعا .

بعض الاحماض الامينية لها شفرة واحدة ( الميثونين ) والبعض اكثر من شفرة تصل لستة شفرات كما في (الارجنين - ليوسين).

هناك شفرات متخصصة لانهاء عملية بناء البروتين بإنهاء عملية الترجمة UAA و UAG و UGA. الشفرة عامة بجميع الكائنات الحية نباتية وحيوانية وحتى في البكتيريا وتتشابه خطوات بناء البروتين في الكائنات الحية رغم تنوعها الهائل .

#### **في إحدى التجارب العلمية :**

تم سحب عينة دم من ارنب وتم عمل طرد مركزي لها لعزل كرات الدم الحمراء ثم فصل أنواع RNA منها وكذلك تم فصل بويضات من مبيض الضفدعة ثم حقنت هذه البويضات في ظروف محددة ومعقمة بواسطة RNA المعزول من الارنب ووضعت في طبق بتري مع وفرة من الاحماض الامينية المضاف لها عنصر مشع وأظهرت النتائج تكون سلاسل من بروتينات مشعة من بروتينات الارنب وأخرى من بروتينات الضفدعة ما يؤكد وجود شفرات مشتركة وان عملية ترجمة شفرات الدم في الثدييات تم ترجمتها في سيتوبلازم خلية الضفدعة من البرمائيات .

#### **2. انضاج m- RNA (التشذيب):**

حدوث بعض التغيرات على m- RNA بعد نسخه من قبل DNA وقبل خروجه من النواة وذلك بحذف بعض التتابعات غير الضرورية لانتاج بروتينات وظيفية معينة وقد اكدت التجارب ان ذلك لا يحدث في حالة الكائنات غير حقيقية النواة بل يتم ترجمته مباشرة وهو مازال مستمرا في عملية استنساخه على DNA .

وتعود عملية انضاج حمض الرسول الاولي في الكائنات حقيقية النواة الى تعقيد تركيب المادة الوراثية كذلك وجد بالدراسات الجزيئية ان بعض الجينات تكون نشطة وبعضها غير نشط في نفس الخلية ويختلف ذلك من نسيج الى آخر ، كما وجد ان معدل انتاج البروتينات ونوعيتها يتوقف على عدة عوامل منها:

- معدل نسخ الجين المقابل لهذا البروتين وكميته وسرعة انضاج حمض الرسول الحامل لشفرات هذا البروتين وكذلك عملية نقل حمض الرسول الى السيتوبلازم حيث الرايبوسومات ، كذلك معدل هدم الرسول بعد ترجمة الشفرات المعبرة عن البروتين المطلوب .

ان عملية التحكم التي تقوم بها الخلية حقيقية النواة تسبق عمليات النسخ والانضاج حيث ثبت وجود منطقة البادئ قبل الجين وهي تتكون من 300-400 زوج من أزواج القواعد النيروجينية ويسبقها منطقة تختص بارتباط عامل التحكم الجيني للعمل في أنسجة متخصصة كذلك وجد انه قد يسبق تتابعات الجين مباشرة ما يتراوح بين 10-20 قاعدة يطلق عليها اسم القبة cap وظيفتها إضافة عدد من قواعد الجوانين الى الطرف (5) من حمض الرسول .

في أغلب جينات الانسان توجد تتابعات محددة في منطقة البادئ تسمى تتابع TATA يقع على بعد 25-30 قاعدة نيروجينية من بداية الجين تختص بالتحديد الدقيق لبداية النسخ وعلى بعد من 70-80 قاعدة يوجد تتابع آخر يعرف بتتابع CCAAT علما بأن التتابع الأخير أقل شيوعا في الانسان عن التتابع الأول .

كذلك وجد منطقة تسبق البادئ تعرف بمنطقة الحث Enhancer تمتاز بقدرتها على زيادة معدل نسخ الجين الذي تسبقها كما هو الحال في جينات الانسجة المناعية ومنها جين الامينوجلوبين الذي يوجد في الخلايا المناعية البائية ولا يوجد في غيرها .

في هذا الصدد يجب الإشارة الى ان الجينات التي تشفر الى بروتينات تحتاجها الخلية باستمرار وهي ما يعرف بالجينات الفعالة فإنها تخلو من هذه المناطق لعدم احتياجها للتحكم .

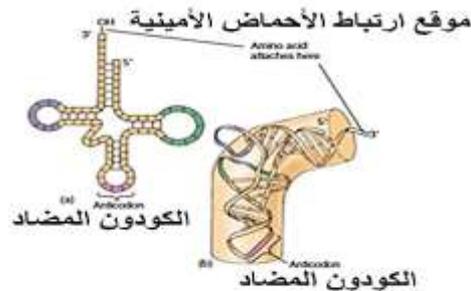
وجد في خلايا الكائنات حقيقية النواة مناطق يتم ترجمتها أطلق عليها الاكسونات وأخرى متداخلة معها لا يتم ترجمتها تسمى الانترونات وفي الغالبية العظمى من مناطق الانترونات تبدأ بالتتابع GT وتنتهي بالتتابع AG حيث تحدد مناطق التخلص من تلك المناطق أثناء الانضاج .

وتتم بكفاءة عالية حتى في حالة تعدد مناطق الانترونات للجين الواحد المطلوب حذفها ، على سبيل المثال وجد ان جين الكولاجين البشري يحتوي على خمسون انترون مطلوب حذفهم من الرسول بعد نسخه ليصبح ناضجا ومهيا للترجمة على الريبوسومات بالسيتوبلازم .

### 3. الترجمة :

#### لحمض t-RNA دور في نقل الأحماض الأمينية أثناء الترجمة :

جميع الخلايا تحتوى على الحمض الناقل في كل الكائنات وهي جزيئات ذات حجم صغير نسبيا اغلبها طوله يتراوح بين 70-90 نيوكليوتيده فقط وهي ذات نهاية تحمل شفرة خاصة من تتابعات القواعد النيروجينية تسمى الشفرة المقابلة أو الشفرة المكملة كما في ( شكل 7 )



شكل 7

### الشفرة المقابلة أو الشفرة المكملة Anticodon :

وسميت بهذا الاسم لأنها تقابل بطريقة التكامل الشفرة على جزئ الرسول وله نهاية أخرى ثلاثية أيضا من التتابعات ACC ودورها في التعرف على الأحماض الأمينية المنشطة التي سيحملها الى الرايبوسومات عند الترجمة – وتتخصص النواقل حيث لكل حمض أميني ناقل خاص به اي انه يجب وجود عشرون حمض ناقل في الخلية ويمكن تسميتها باسم الحمض الأميني الذي تحمله . الا ان البعض من الأحماض الأمينية لها أكثر من ناقل وتسمى النهاية الطرفية من الحمض الناقل والتي ترتبط مع الحمض الأميني بالنهاية الهيدروكسيد رقم3.

وقد أوضحت الدراسات بالأشعة السينية ان شكل جزئ الحمض الناقل يشبه الورقة الثلاثية وان هناك ثلاثة حلقات والمناطق التي تقع بين هذه الحلقات الثلاثة تكون أذرع مزدوجة نتيجة ان هناك تكامل ما بين القواعد النيتروجينية على خيوط الحمض الناقل فيما بين الحلقات مما مكن الحمض من القيام بوظيفته وتعطى الجزيء الشكل العام لحرف ( L ) حيث توجد الشفرة المقابلة عند قاعدة الحلقة الثانية اسفل حرف ( L ) بينما ترتبط الأحماض المنشطة عند النهاية العلوية ذات الخيط الفردي من الحمض الناقل اعلى الحرف ( L ) ولقد وجد ان جزئ الحمض الناقل هو الذي يرتبط بالحمض الأميني وليس العكس حيث يختار الحمض الأميني الذي يتفق والشفرة المقابلة لينقله ويضيفه الى السلسلة عديدة الببتيد.

ويعتمد تعرف الحمض النووي الناقل بالحمض الأميني على انزيم خاص يسمى Aminoacyl-tRAN syntheses هو المسؤول عن التزاوج بين كل حمض أميني والحمض الناقل بما يعني وجود عشرون نوع من تلك الانزيمات المتخصصة في الخلية وتتم عملية الربط على مرحلتين وبوجود جزيئات من ATP لاننتاج طاقة تساعد في هذا الارتباط .

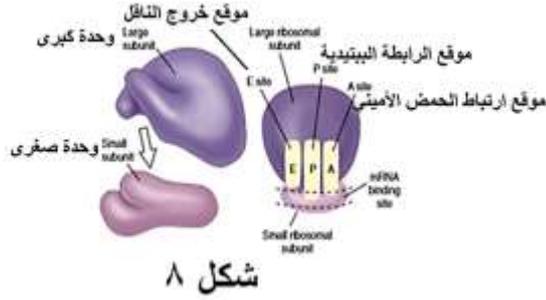
وعلى ذلك فإن جزئ الحمض الناقل يخدم كAdaptor للربط بين تتابعات النيوكليوتيد وتتابعات الأحماض الأمينية وكذلك انزيم Aminoacyl- RANt syntheses يعتبر موفق هام لربط الحمض الناقل مع الحمض الأميني الخاص به وعلى ذلك فإن الشفرة الوراثية تترجم عن طريق نوعين الموقوفات كل منهما له سطح جزئ ذات خاصية غاية في التميز والتخصص وتفاعلاتهما تهدف الى ربط كل شفرة من الثلاثيات الموجودة على الرسول مع الحمض الأميني الخاص .

### 2.4 بناء البروتين ودور حمض RNA الرايبوسومي

الحمض النووي الرايبوسومي تركيب غاية في التعقيد كبير الحجم يتكون من جزيئات الحمض النووي وجزيئات بروتينية متعددة داخل الرايبوسوم يلعب دور كبير في التوافق بين الشفرات على حمض الرسول والشفرات المقابلة لها على الحمض الناقل .

ويتكون الرايبوسوم من تحت وحدتين واحدة كبيرة الحجم وأخرى صغيرة الحجم مترابطتين ليكونا معا المعقد الرايبوسومي وعلى الوحدة الصغيرة يرتبط كلا من الرسول والناقل بينما تتكون الرابطة الببتيدية على الوحدة الكبرى بين الأحماض الأمينية المتتالية ويعد أكثر من نصف التركيب الكيميائي للرايبوسوم من الحمض النووي الرايبوسومي . ولقد وجد ان هناك اختلافات في حجم الوحدة الصغرى من نوع لآخر بالكائنات الحية.

### الرايبوسوم :



شكل ٨

بدراسة التركيب الدقيق للرايبوسوم ( شكل 8 ) اتضح ان كل رايبوسوم يحمل ثلاثة مواقع متميزة لارتباط جزيئات RNA المختلفة به وهم : ( Site m- RNA ) يختص بحمض الرسول.

واثنين مخصصان معا للارتباط بجزيئ t-RNA وهما :

( Site Amino Acid = الموقع A ) المخصص لارتباط الاحماض الامينية و ( الموقع P = Peptide site ) المخصص لارتباط الاحماض الامينية مع بعضها لتكوين السلسلة عديدة الببتيد وبينما يرتبط الرسول بقوة في موقعه يرتبط الناقل بقوة أقل بالموقع A او P بعد التأكد من تكامل الشفرة بين الشفرة على الرسول والشفرة المقابلة على الناقل .

كما لوحظ تجاور الموقعين A و P بحيث تكون هناك فواصل بينهم .

وعلى هذا الأساس يمكن اعتبار ان ميكانيكية الاستطالة لسلسلة البروتين المكونة من عديدات الببتيد على الرايبوسوم عبارة عن حلقة متصلة مكونة من ثلاثة خطوات متتالية بدون توقف وبدون فواصل .

### الخطوة الأولى :

جزئ من الناقل والحمض الاميني المنشط يضع نفسه على الموقع P Site على جسم الرايبوسوم وذلك حسب ما يحمله من مقابل للشفرة على حلقة الثانية بحيث تتقابل بالضبط بطريقة التكامل مع الشفرة المتواجدة على حمض الرسول الذي يكون قد أخذ موقعه بالفعل على موقعه المخصص من الرايبوسوم .

### الخطوة الثانية :

ستتكون رابطة جديدة بببتيدية بين الحمض الاميني الذي يحمله الناقل والذي وضع نفسه في هذه اللحظة بالفعل على الموقع P و حمض أميني آخر قد وضع في السلسلة على الموقع A و في لحظة تكوين الرابطة الببتيدية هي اللحظة التي ينفصل فيها الناقل للحمض الاميني عند الموقع P بذلك سوف يتحول الناقل من صورة Aminoacyl-t-RNA الى صورة t- RNA وسوف يخرج مباشرة من موقعه على الرايبوسوم حرا في السيتوبلازم .

ورغم حقيقة الخطوة الثانية من حركة واحدة للرايبوسوم على الرسول مقدارها شفرة واحدة الا ان نتائجها :

- تؤدي لتغير حالة الناقل من حالة الارتباط مع الحمض الاميني المختص بحمله الى حالة حرة يعود بعدها قادرا على حمل جزيئات جديدة لنفس الحمض الاميني يعود بها للرايبوسوم طالما هناك حاجة لذلك .

- تغير موقع الحمض من الموقع ( P ) الى الموقع ( A ) .

- تكوين رابطة بببتيدية بين الحمض الاميني الحالي والسابق في السلسلة الببتيدية .

- تحتاج تلك الخطوة لطاقة توفرها مركبات GTP الجوانوزين ثلاثي الفوسفات الذي يتحلل مائيا ليتكون GDP وتنتج الطاقة المطلوبة .

### الخطوة الثالثة والأخيرة :

مع تحرر الناقل وعودته للـسيتوبلازم يدخل ناقل جديد مرتبط بالحمض الأميني المختص بحمله بشكل يتفق وتركيب الشفرة والشفرة المقابلة لها

لقد وجد أن هذه الدورة بمراحلها الثلاث تتم بسرعة جدا بحيث انها تأخذ في المتوسط وقت لايزيد عن 20/1 من الثانية فقط .

تستهلك عملية بناء البروتين من أي عملية حيوية أخرى تقوم بها الخلية حيث تستهلك على الأقل اربع روابط فوسفاتية غنية بالطاقة لتكوين رابطة ببتيدية واحدة بين اثنين من الاحماض الامينية واثنين حتى يتمكن الناقل من الارتباط وحمل الحامض الاميني الخاص به وربطتين آخريتين حتى تتم التفاعلات بالصورة السابق شرحها واحدة منها لوضع Aminoacyl- RNAt في الخطوة الأولى وواحدة لحركة الرايبوسوم على الرسول .

### توقف الترجمة على الرايبوسومات :

تعد الشفرات ( UAA وUGA وUAG ) هي شفرات التوقف المسؤولة عن توقف الترجمة وانهاء سلسلة بناء البروتين عندها ينفصل الرسول عن الرايبوسوم ويستلزم ذلك وجود مركب بروتيني يسمى عامل التحرر يتصل بشفرة النهاية وعند وصولها للموقع ( A ) على الرايبوسوم حيث يضاف جزئ ماء بدلا من حمض أميني جديد يؤدي لتحرر النهاية الكربوكسيلية لسلسلة عديد الببتيد وتعبر السلسلة عديدا الببتيد كاملة فتتفصل حرة في السيتوبلازم كنوع من البروتين تم تنفيذه حسب الطلب وينفصل الرايبوسوم ويصبح حرا هو الآخر.

### 3-4 مثبطات بناء البروتين

هناك عدد من المضادات الحيوية كما بالجدول التالي تثبط بصورة نوعية بناء البروتين في خلايا حقيقية النواة ان بعض هذه المثبطات يملك تركيب مشابه لتركيب وحدة AMP النهائية الامينية للامينواسيل مثل بيورمايسي tyrosyl-tRNA يتولد احباط في بناء البروتين الحاوي على التايروسين كما ان قسما من المضادات الحيوية لا تملك بالضرورة تركيبا متشابها ولكنه يعد مثبطا لبناء البروتين وقد يؤثر التثبيط في مرحلة واحدة أو أكثر من مراحل بناء البروتين.

المثبطات التي تؤثر في خطوات بناء البروتين

الخطوة المثبطة	المثبط	اسلوب عمل المثبط	بدائية النواة	حقيقية النواة
الابتداء	Aurintricarboxylic acid	يمنع تزامن الوحدات الثانوية للرايبوسوم مع الرسوا RNA	+	+
	Streptomycin	يحرر أصرة -met Ik )tRNA hglur hb(f)hzd	+	-
	Cycloheximide	يمنع تكوين معقد الابداء	-	+
الاستطالة	Streptomycin	يثبط انتقال tRNA بالرايبوسوم و يثبط الانتقال على الرايبوسوم	+	-
	Chloramphenicol	يمنع اتحاد الحامض الاميني بمتعدد الببتيدات وذلك بتثبيط ترانسفيراز الببتيد	+	+
	Fusidicacid	يثبط انتقال gtagase	+	+
	Cycloheximide	يثبط وبصورة عامة حركة tRNA على الرايبوسوم	-	+
الانتهاء	Various drugs	يثبط عوامل التحرر و يثبط تحرر الرايبوسوم عن الرسول RNA	+	+

## 5- آلية عمل المضادات الحيوية

لكي يعمل المضاد الحيوي يجب أن يحصل تماس مباشر بين المضاد والموقع المخصص له داخل الخلية البكتيرية بحيث لا يؤثر على الخلية المضيفة ، وعموما لتوضيح الآلية تم تصنيف المضادات إلى مجاميع نسبة إلى موقع العمل وكما يلي :

### 1. المضادات التي تعمل على الجدار الخلوي

الجدار الخلوي Cell Wall هو الطبقة الخارجية الصلبة القوية التي تعطي البكتيريا شكلها العام ، وتعزى الصلابة إلى طبقة Peptidoglycan وتسمى أيضا بطبقة Murein وتكون مسؤولة عن حماية الخلية البكتيرية من الضغوط الأسموزية . تتكون هذه الطبقة من جزئين هما :

جزء من الأحماض الامينية Amino acids Protein ، وجزء Glycan والذي يكون العمود الفقري للجزيئة ويتكون من وحدات متكررة من الأحماض السكرية وهي N-acetyl glucosamic acid و N-acetyl muramic acid مرتبطين مع بعضهما البعض بواسطة رابطة كلايكوسيدية من نوع ( B1-1-4 ) 4glycosidic bonds B تتصل معظم وحدات N-acetyl muramic acid بببتيدات قصيرة غالبا تكون رباعية Tetra peptides وغالبا تحتوي على الأحماض الامينية L-alanine ، D-glutamic ، L-lysine ، D-alanine الببتيدات الرباعية ترتبط داخليا ( من الداخل ) بجسور ببتيديية بين مجموعة الكاربوكسيل لحامض أميني في ببتيدي رباعي مع مجموعة الأمين NH<sub>2</sub> لببتيدي آخر .

مضادات البيتا لاكتام تعمل بشكل غير عكسي من خلال ارتباطها مع بعض البروتينات في الغشاء السايبتوبلازمي تسمى Penicillin Binding Proteins البروتينات المرتبطة بالبنسلين ، ( PBPs ) هذه البروتينات ( أنزيمات ) مسؤولة عن بعض التفاعلات في عملية تخليق طبقة البيتا يدوكلايكان ، لذلك ارتباط مضادات البيتا لاكتام لهذه الأنزيمات مكونة رابطة تساهمية مع الإنزيم لينتج معقد يسمى Acyl-enzyme Complex ولذلك يؤدي إلى تعطيل عمل إنزيم PBPs وبالتالي إلى وقف عملية تصنيع جدار الخلية لينتج جدار خلوي ناقص غير متماسك مما يجعل البكتيريا حساسة للضغط الأسموزي ومن ثم موت البكتيريا .

بالإضافة إلى أنزيمات PBPs التي تدخل في عملية تصنيع الجدار الخلوي هنالك مجموعة اخرى من الإنزيمات غالبا " ما تكون موجودة في جدار الخلية تسمى Autolysins وظيفتها هذه الإنزيمات إعادة بناء أو إعادة شكل جدار الخلية من خلال كسر روابط خاصة في طبقة البيتا يدوكلايكان ، لذلك بوجود مضاد البنسلين يتوقف أو يمنع آلية التخليق الحيوي لطبقة البيتا يدوكلايكان في الوقت الذي تستمر فيه الإنزيمات الحالة في تحلل الجدار مما يؤدي إلى موت الخلية ، والمضادات التي تعمل على الجدار الخلوي هي البنسلينات Penicillins والسيفالوسبورينات Cephalosporines ومشتقاتها حيث تعمل على منع تكوين الجسور الببتيديية في طبقة البيتا يدوكلايكان . لذلك فان الخلية البكتيرية التي تتعرض لمثل هذه المضادات لا تتأثر إذا كانت هذه الجسور متكونة أساسا وتتأثر الخلايا البكتيرية التي تكون في طور الانقسام حيث يمنع المضاد تكوين الجسور الببتيديية .

والإنزيم الحال Lysozyme يعمل على كسر الروابط لطبقة الكلايكان في جزيئة البيتايدوكلايكان حيث يكسر الرابطة ( 1-4 ) B بين N-acetyl glucosamic acid و N-acetyl muramic acid يستطيع الإنزيم تكسير كل أو جزء من تركيب الجدار الخلوي ، تسمى الخلية البكتيرية في حالة بقاء جزء من جدارها الخلوي بعد المعاملة بالإنزيم الحال — Spheroplast معاملة البكتيريا السالبة بالإنزيم الحال يعطي غالبا تركيب Spheroplast عند إزالة جدار البكتيريا بشكل تام تسمى البكتيريا Protoplast ويمكن الحصول على هذا النوع بشكل أسهل من البكتيريا الموجبة ، تركيب Spheroplast وكذلك Protoplast تستطيع أن تعيش (تبقى) في وسط يحتوي على تركيز عالي من محلول السكر مثل M sucrose solution 0.5 حيث الضغط الأسموزي يحمي البكتيريا من التحلل .

## 2. المضادات التي تعمل على الغشاء السيتوبلازمي :

مثال ( Polymyxin , Colistin ) Antibacterium )

( Antifungal ) Amphotericin B , Polyenes )

يحاط السيتوبلازم لكل الخلايا الحية بالغشاء السيتوبلازمي ويمتاز بنفاذية اختيارية للمواد الغذائية ومن خلاله تحصل عملية النقل الفعال Active Transport وبذلك يسيطر على عملية انتقال المواد من وإلى الخلية ويحتوي الغشاء أيضا على مجموعة كبيرة من الإنزيمات المسؤولة عن عملية النقل .

المضادات القادرة على إحداث خلل في الأغشية ستؤدي إلى موت الخلية مثل Polymyxin بسبب ثقب بيولوجية من خلال تداخله بين جزيئات الغشاء وبالتحديد بين طبقة البروتين و Phospholipid وعموما تأثيره على هذا الغشاء أما من خلال تداخله مع جزيئات الغشاء السيتوبلازمي أو التأثير على الإنزيمات الناقلة عبر الأغشية وتثبيطها أو من خلال تأثيره في عملية التبادل الأيوني بين المواد الداخلة والخارجة وهو Bacteriocidal

المضادات التي تعمل على أغشية الفطريات لا تعمل على أغشية البكتيريا والعكس صحيح ككون أغشية الفطريات تحتوي على طبقة Sterol ولا يوجد في خلايا اللبائن والبكتيريا هذه الطبقة ، ولكن توجد فيها طبقة Cholesterol في اللبائن .

## 3. المضادات الحيوية التي تعمل على مواقع تصنيع البروتينات :

هنالك مجموعة كبيرة من المضادات تعمل من مواقع تصنيع البروتينات مثل مضادات مجموعة Tetracycline ، Chloramphenicol ، Macrolides ، Aminoglycosides ، البروتينات في الخلية البكتيرية قسم من هذه المضادات يعمل على منع تكوين سلسلة الأحماض الأمينية والقسم الآخر يعمل في مواقع ترجمة الحامض النووي الرايبوزي الرسولي . ( mRNA ) تعتبر هذه المضادات مثبطة Bacteriostatic إذا كان تأثيرها على تخليق البروتينات الوظيفية وتعتبر المضادات قاتلة Bacteriocidal إذا كان تأثيرها على تخليق البروتينات التركيبية .

## 4. المضادات التي تعمل على الأحماض النووية :

تتكاثر الخلايا البكتيرية ( الانقسام ) بعد أن تتضاعف مادتها الوراثية DNA وكما هو معروف أن أي اختلاف يحصل في ترتيب القواعد النيتروجينية في جزيء DNA أثناء عملية تضاعف الـ DNA تؤدي إلى تغيير في المعلومات الوراثية وبالتالي ترجمة هذه المعلومات الوراثية تؤدي إلى تخليق بروتينات ناقصة أو غير مطلوبة أو غير فعالة .

وكما هو معروف أيضا بان تضاعف DNA يكون بطريقة التضاعف نصف المحافظ Semi-conservative Replication أي أن الشريط الواحد من الحلزون المزدوج بعد انفصال الشريطين الأصليين يستعمل كقالب لبناء الشريط المتمم ( الجديد ) ، يمكن تقسيم المضادات التي تؤثر على الأحماض النووية إلى ما يلي : تتداخل جزيئات المضاد الحيوي مع الروابط الهيدروجينية التي تربط القواعد النيتروجينية المتقابلة لسلسلتي الحلزون المزدوج مما يؤدي إلى إيقاف عملية التضاعف حيث يعيق المضاد عملية انفصال شريطي DNA . بعض المضادات تعمل على إحداث تغيرات جوهريّة في السلسلة الواحدة للحلزون حيث تدخل المضادات بين القواعد النيتروجينية مما يؤدي إلى تغيير في تسلسل القواعد النيتروجينية وبالتالي تثبيط الـ DNA إضافة إلى إيقاف عملية التضاعف .

لبعض المضادات القابلة على الارتباط في DNA ( الحلزون المزدوج ) ويكون الارتباط بشكل روابط حيث تتكون هذه الروابط بين حلقات الحلزون مما يؤدي إلى عملية فك الحلزونة والتي تعتبر خطوة أساسية في عملية تضاعف الحامض النووي الرايبوزي منقوص الأوكسجين .

بعض المضادات تؤثر على عملية الاستنساخ تصنيع حامض RNA من خلال الارتباط مع إنزيم بلمرة ( RNA-Polymerase ) مثل مضاد الـ Rifamycin بعض المضادات تؤثر على إنزيم DNA gyrase المسؤول عن فتح الحلزون المزدوج مما يعيق من عملية فك الحلزونة مثل عقارات الكيتولونات .

المضادات الحيوية التي توقف تضاعف DNA أو تحدث تغييرات في تسلسل القواعد النيتروجينية لا تستعمل بشكل شائع في علاج الإصابات البكتيرية والسبب في ذلك يعود إلى أن تركيب الحامض النووي DNA في جميع الخلايا متشابه حيث كلها تتكون من أربع قواعد نيتروجينية وهي A , G , C , T إلا أن هذه المضادات يمكن أن تستعمل تحت إشراف أطباء مختصين في علاج بعض أنواع الأورام السرطانية للحد من تضاعف الخلايا في المنطقة المصابة ولا تزال البحوث جارية وبصورة مكثفة للتحري عن مضادات حيوية تكون لها تأثيرا فعالا على الحامض النووي DNA للبكتيريا فقط دون أن يؤثر على حامض النووي DNA لخلايا الإنسان. أمثلة على المضادات الحيوية , rifamycin , Actinomycin , الكيتولونات .

**المراجع :**

**المراجع الأجنبية :**

Molecular Cell Biology -  
(LODISH.BERK.MATSUDAIRA.KAISER.KRIEGER.SCOTT.ZIPURSKY.DARN  
FIFTH EDITION.- FREEMAN 2015 ELL)  
-Biology ( eleven edition) Mader Windelspecht. Mc GRAW- HILL 2016

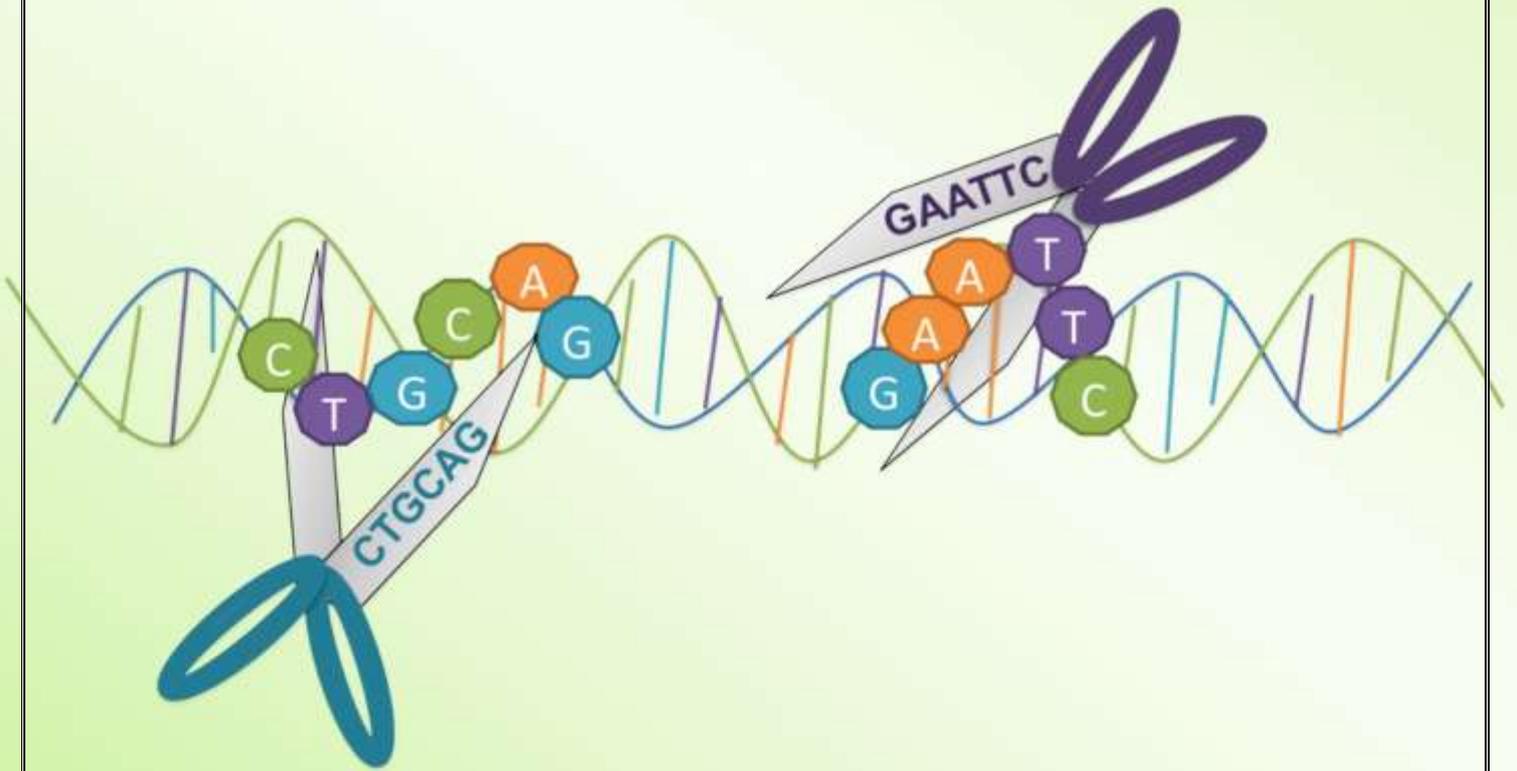
**المراجع العربية :**

علم الوراثة ( أسس وقواعد ) - د/ يحي عبد السميع جامعة الإسكندرية - الجزء الثاني 2016.  
مكونات الاحماض النووية وأصلها التكويني - د / منى الاحمدي 1337 هـ .  
مدخل الى علم الوراثة د.عباس حسين مغير الربيعي January 2016



# الفصل الثاني

## التقنية الحيوية



## الفصل الثاني التقنية الحيوية

### - مقدمة

أدى تطوير تقنيات جديدة ومؤثرة عبر العقود الماضية في دراسة المادة الوراثية وتحويلها وتعديلها الى ثروة في علوم الحياة فالمعلومات التي تم الحصول عليها خلال 25 سنة الماضية أكبر من تلك التي حصل عليها في تاريخ علوم الحياة كاملا، وقد أثر علم التقنية الحيوية أيضا في كثير من نواحي الحياة اليومية بما يفوق أي حقل من علوم الحياة.

ظهرت القدرة على عزل قطع محددة من DNA، فوفر ذلك امكانية دراسة واستعمال جزيئات صغيرة منه موجودة في خلايا البكتيريا. في هذا الفصل سنستقصي هذه التقنيات وننظر كيف يمكن أن تطبق وتنتج من خلالها الى الهندسة الوراثية والجينوم البشري.

تعتبر التقنية الحيوية أحد العلوم التي نكتسب إهتماماً متزايداً في مجال البحث والتطوير في عديد من دول العالم. إن التقنية الحيوية هي أحد علوم المستقبل التي بلا شك سوف تسهم بشكل كبير في التنمية البشرية وتحسين حياة البشر في جوانب عديدة. للتقنية الحيوية تطبيقات واعدة في الصناعة، الزراعة، الطب والبيئة. وأهم ما يميز التقنية الحيوية أنها آمنة على البيئة مقارنة بالتقنيات التقليدية.

**ويمكن تعريف التقنية الحيوية:** هي أي تقنية تستخدم الكائنات الحية أو مواد منها لصنع أو تعديل منتج أو لتحسين النباتات أو الحيوانات أو لتطوير أحياء دقيقة لاستخدامات معينة. وذلك بكفاءه عاليه وسهوله في عمليات التحويل الوراثي للجينات بالإضافة لذلك تكاثر الكائنات وأن يكون ذلك بطرق تقنيه حديثه.

### 1- الاستيلاء الانتقائي أو التربية الانتقائية

هي عملية تهجين الحيوانات أو النباتات للحصول على صفات معينة أو لمزيج من الصفات. تم استعمال هذا المصطلح من قبل تشارلز داروين أثناء مقارنته بالاصطفاء الطبيعي، والذي يرتبط فيه التكاثر المتباين للكائنات ذات الصفات المعينة بالظروف المعيشية المحسنة أو القابلية التكاثرية (التكيف الدارويني). وبشكل متعارضٍ للانتخاب الصناعي حيث يتدخل فيه الإنسان لصالح تكاثر صفات معينة، تلعب البيئة في الانتخاب الطبيعي دور المصفاة التي تسمح لصفات معينة فقط بالمرور. لقد أصبح الإستغلال المتعمد للانتخاب الصناعي شائعاً جداً في الأحياء التطبيقية، كما في اكتشاف عقاقير جديدة. بلور تشارلز داروين مصطلح الاستيلاء الانتقائي كشرح لكامل نظريته المقترحة حول الاصطفاء الطبيعي. حيث أشار إلى أنّ العديد من الحيوانات المنزلية والنباتات التي كانت تمتلك مواصفات مميزة تمّ تطوير خصائصها بطريقة تربوية ممنهجة للأفراد النباتية والحيوانية التي أظهرت الخصائص المرغوبة، مستثنياً الأفراد التي أظهرت خصائص أقل طلباً. بشكل مغاير للإصطفاء الطبيعي. على أية حال، يبقى من المهم التمييز بين ذلك الاستيلاء الانتقائي غير المتعمد (أو المتعمد ولكن من خلال التلاعب بالبيئة الخارجية للكائن فقط) ، والاستيلاء الانتقائي المتعمد والذي يتضمن التغيير في سلسلة المادة الوراثية الداخلية للكائن الحي من خلال التقنيات المخبرية الحديثة.

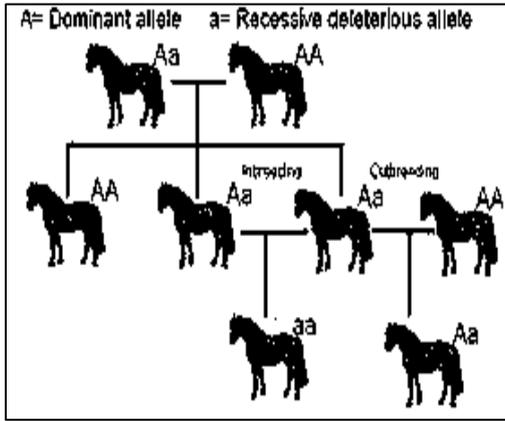
## 2- التهجين

هو عبارة عن إلقاء بين أفراد سلالتين نقيتين متشابهتان بصفة واحدة أو عدة صفات ، والغرض منه هو الحصول على جيل أو فرد جديد يجمع بين صفات الأبوين معا ، أو للحصول على فرد يزيد بصفاته على أبويه حيث كلما كان الفرق أكبر في الصفات كانت نتائج التهجين أكثر قوة و وضوحا، على شرط أن يكونا من صنف واحد .

يلجأ المربي أحيانا إلى التهجين أو التلقيح الخلطي بين نباتين أو حيوانين من سلالتين مختلفتين ليجمع الصفات ويمكن القيام بتهجين مقصود مثل تهجين البغال، مثلاً: بين الفرس والحمار ينتج هجين وهو البغل. في هذه الحالة الهجين ليس خصباً ولا ينجب نسلأ. ومن المعروف أنه. يوجد بالحصان 64 كروموسوم بينما يوجد في الحمار 62 فقط، اما البغال فيوجد بها 63 كروموسوم. وتهجين الكاما وهو هجين مقصود من ( جمل ) و ( لاما ) ينتمي لفصيلة الجمليات .

## 3- التوالد الداخلي

في علم الوراثة هو توالد حيوانين أبوين متشابهين ومُرتبطين وراثياً، كأخ وأخت، أو ابن وأم، أو غير ذلك. بما أن جميع الحيوانات ذات الدماء الصافية يرجع أصلها إلى عدد ضئيل ومحدود من الأسلاف (أي أن صفاتها يجب أن تكون متشابهة بالنتيجة) ، فتوالد جميع الحيوانات خالصة النسل هو بالنتيجة توالد داخلي ، وذلك مع أن هذا المصطلح لا يُستخدم عموماً إلا للإشارة إلى التوالد الذي يحدث ضمن نطاق ضئيل من الأفراد المنحدرين من سلف واحد قريب. يُفيد التوالد الداخلي بزيادته لاحتمالية ظهور نسختين متطابقتين ( من المورث الذي ورثه عن أمه والآخر الذي ورثه عن أبيه) لتنتجا مورثاً ما عند سليل حيوانين، وبهذا فبالإمكان تحسين النسل باستخدام هذه الخاصية، فعند وجود حيوانين بصفات



شكل 1

جيدة يُمكن تزويجهما لإعطاء ابن ذو صفات قريبة من صفاتهما ومن ثم فيحمل نفس الصفات الحسنة. والشكل (1) يوضح عملية تحسين النسل باستخدام التوالد الداخلي عند الحيوانات، فحرف "a" يُشير إلى مورثات الأم الجيدة المتنحية و "A" إلى مورثات الأب السيئة السائدة، وعند تزاوجهما ظهر في الجيل الأول فردان يحملان جزءاً من مورثات الأم المتنحية، وعند تزويج هذين الفردين معاً بالتوالد الداخلي ظهر في الجيل الثاني فرد كلا مورثيه متنحيان وآخر ذو مورثين مختلطين.

## 4- الهندسة الوراثية: ( Genetic Engineering )

الهندسة الوراثية عبارة عن تعديل مجموعة المورثات (الجينوم) الطبيعية للكائن الحي من خلال إضافة قطع من الحمض النووي الريبوزي منقوص الأكسجين ( DNA ) والذي يُعدّ مادة الحياة نفسها، وتسمى أيضاً بالتعديل الوراثي وهي تلاعب إنساني مباشر بالمادة الوراثية للكائن الحي بطريقة لا تحدث في الظروف الطبيعية وتتضمن استخدام ( DNA ) المؤشب غير أنها لا تشمل التربية التقليدية للنباتات والحيوانات والتطفير، ويعتبر أي كائن حي يتم إنتاجه باستخدام هذه التقنيات كائننا معدلاً وراثياً. كانت البكتيريا هي أول الكائنات التي تمت هندستها وراثياً في عام 1973 ومن ثم تليها الفئران في عام 1974، وقد تم بيع الإنسولين الذي تنتجه البكتيريا في العام 1982 بينما بدأ بيع الغذاء المعدل وراثياً منذ العام 1994.

إن الهندسة الوراثية هي التقنية التي تتعامل مع الجينات البشرية منها والحيوانية بالإضافة إلى جينات الأحياء الدقيقة، أو الوحدات الوراثية المتواجدة على الكروموسومات فصلاً ووصلاً وإدخالاً لأجزاء منها من كائن إلى آخر بغرض إحداث حالة تمكن من معرفة وظيفة (الجين) أو بهدف زيادة كمية المواد الناتجة عن التعبير عنه أو بهدف استكمال ما نقص منه في خلية مستهدفة. يتطلب الشكل الأكثر شيوعاً من الهندسة الوراثية إدخال مادة وراثية جديدة في موقع غير محدد من جين العائل. يمكن تحقيق ذلك عن طريق عزل ونسخ المادة الوراثية ذات العلاقة، وتوليد بناء يتضمن كل العناصر الجينية بغرض الحصول على تعبير وراثي صحيح ومن ثم إدخال هذا البناء في الكائن العائل. تحتوي الأشكال الأخرى من الهندسة الوراثية استهداف الجين وضرب جينات محددة باستخدام النيوكلييز (Nucleases) مثل نكلياز أصبع الزنك (Zinc-Finger Nuclease) أو أنزيمات التوجيه (Homing Endonucleases) المعدلة وراثياً.

طبقت تقنيات الهندسة الوراثية في مجالات عدة تتضمن البحث والتقنيات الحيوية والطب ولقد تم تطوير نباتات وحيوانات مهندسة وراثياً قادرة على إنتاج عقاقير أقل تكلفة من الطرق الحالية باستخدام طريقة التقنيات الحيوية (وتدعى بالصيدلة البيولوجية أو الحيوانية)، وفي عام 2009 قامت إدارة الأغذية والعقاقير بالموافقة على بيع البروتين الدوائي الذي يدعى مضاد الثرومبين (Antithrombin) والذي يتم إنتاجه في حليب الماعز المهندس وراثياً. وتقوم الهندسة الوراثية بتعديل التركيب الوراثي لكائن حي باستخدام تقنيات تُقدم المادة الوراثية التي تحضر خارج الكائن الحي إما مباشرة داخل العائل أو داخل خلية تدمج أو تهجن مع العائل. تتطلب هذه العملية استخدام تقنيات الحمض النووي المؤشب (DNA أو RNA) لتشكيل تركيبات جديدة من المادة الجينية الموروثة متبوعة باختلاط هذه المادة إما بطريقة غير مباشرة باستخدام نظام ناقل أو مباشرة عبر تقنيات التلقيح المجهري وحقن الماكرو والكبسلة الدقيقة. لا تتضمن الهندسة الوراثية التربية التقليدية للنباتات والحيوانات والتخصيب في المختبر وتقديم تعدد الصيغ الصبغية والطفرات وتقنيات دمج الخلايا التي لا تستخدم الأحماض النووية المؤشبة أو الكائنات الحية المعدلة وراثياً في العملية. ويمكن استخدام الهندسة الوراثية ضمن أبحاث الاستنساخ والخلايا الجذعية مع أنها لا تعتبر هندسة وراثية إلا أنها وثيقة الصلة بها.

إذا ما أضيفت مادة وراثية من أنواع أخرى إلى العائل؛ فإن الكائنات الناتجة تدعى بالمعدلة وراثياً، أما إن كانت المادة الوراثية التي استخدمت هي من نفس النوع أو من نوع يمكن له أن يتناسل طبيعياً مع العائل فإن الكائن الناتج يدعى بالكائن ذي الصلة (Cisgenesis) يمكن استخدام الهندسة الوراثية أيضاً في إزالة المادة الوراثية من الكائن الهدف، مما يخلق كائناً معطلاً، يعتبر التعديل الجيني في أوروبا مرادفاً للهندسة الوراثية.

#### 4-1 كيفية إجراء الهندسة الوراثية

تتم الهندسة الوراثية بعدة طرق تكون بشكل أساسي مؤلفة من 4 خطوات:

1- عزل الجين المرغوب: يتم العزل من خلال تحديد الجين المرغوب إدخاله إلى الخلايا من خلال معلومات مسبقة عن الموروثات والتي يتم الحصول عليها إما من خلال عمل مكتبات من DNA متمم أ gDNA ومن ثم تتم مضاعفة هذه الجينات باستخدام تفاعل سلسلة البوليميرز.

2- إدخال أو تحميل الجين المرغوب في حامل مناسب مثل بلازميد. كما يمكن استخدام حوامل أخرى مثل الحوامل الفيروسية أو الليبوزوم.

3- إدخال الحامل في خلايا المتعضية المراد تعديلها، وتتم بعدة طرق .

4- عزل وفصل الخلايا أو المتعضيات التي تعدلت وراثياً بنجاح عن الطبيعية. ويتم ذلك بعدة طرق منها: استخدام مسبار الدنا للتحري عن الجين المدخل أو باستخدام العلامات التمييزية (Selectable Marker) للتحري عن صفة مقاومة موجودة مع الحامل وتكون مميزة بمقاومتها لصفة معينة كالمعلومات التمييزية التي تكسب مقاومة لمضاد حيوي معين.

#### 4-2 تطبيقات الهندسة الوراثية

للهندسة الجينية تطبيقات في الطب والأبحاث والصناعة والزراعة ويمكن أن تستخدم على نطاق واسع من النباتات والحيوانات والكائنات الدقيقة. نذكر منها:

##### 1- في مجال الطب :

يمكن استخدام الهندسة الوراثية في الطب لإنتاج الإنسولين وهرمونات النمو البشري وعقار الفولليستيم ( Follistim ) (الذي يستخدم في معالجة الخصوبة) والألبومين البشري والأضداد وحيدة النسيلة والعامل المضاد للهيوموفيليا واللقاحات وغيرها من العقاقير الكثير. يتطلب التلقيح عادة حقن أشكال مضعفة أو مقتولة أو غير فعالة من الفيروسات أو السميات في الشخص الذي يجري تمنيعه. يجري تطوير الفيروسات المهندسة جينياً بحيث تظل تمنح المناعة ولكنها تفتقر إلى التسلسل المعدي. تدمج الخلايا سوية في الفئران المهجنة بغرض صنع الأضداد وحيدة النسيلة ويجري أسنتها من خلال الهندسة الوراثية لصنع أضداد وحيدة النسيلة. وتستخدم الهندسة الوراثية لصنع نماذج حيوانية للأمراض التي تصيب الإنسان وتعتبر الفئران المعدلة وراثياً هي أكثر النماذج شيوعاً فيما يخص الحيوانات المعدلة جينياً حيث تم استخدامها لدراسة وتمثيل السرطان ( فأر الأورام ) والسمنة وأمراض القلب والسكري والتهاب المفاصل وتعاطي المخدرات والقلق والشيخوخة ومرض باركنسون ويمكن اختبار العلاجات المحتملة مقابل نماذج الفئران هذه ، كما وتتم تربية الخنازير المعدلة جينياً بغرض زيادة نجاح عمليات نقل الأعضاء من الخنزير إلى الإنسان. إن العلاج الجيني ما هو إلا عبارة عن هندسة وراثية للبشر عن طريق استبدال جينات الإنسان المعيبة بنسخ تعمل بكفاءة ويمكن أن يحصل هذا في الأنسجة الجسمية أو أنسجة الخط الجرثومي ، إذا ما تم إدخال الجين إلى نسيج الخط الجرثومي فيمكن عندها تمريره إلى أحفاد ذلك الشخص ، تم استخدام العلاج الجيني لعلاج مرضى يعانون من أوجه القصور المناعي (عوز مناعي بشكل ملحوظ) فيما استمرت المحاولات لعلاج اضطرابات جينية أخرى. ونذكر أيضاً من أهميتها بالطب مايلي: إنتاج لقاحات ضدّ بعض أنواع الأمراض: مثل التهاب الكبد الفيروسيّ ، ومرض الهربس البسيط، ومرض الحمى القلاعية في الحيوانات. إنتاج هرمون الإنسولين البشريّ من البكتيريا .

- **إنتاج الليفوكينات:** هي بروتينات تُنظّم عمل الجهاز المناعيّ في جسم الإنسان، ومنها: بروتين إنترفيرون ألفا؛ الذي يُستخدم لمكافحة الأمراض الفيروسيّة، مثل: نزلات البرد، والتهاب الكبد، والهربس، وكذلك السرطان، بالإضافة إلى إنترلوكين 2؛ وهي مادة تُعزّز إنتاج الخلايا الليمفاويّة، ويجري حالياً اختبارها على مرضى الإيدز.

- **إنتاج السوماتوستاتين:** هو هرمون تُفرزه غدة تحت المهاد في مُخ الإنسان، يُنظّم عمل هرمون النمو، سابقاً كان يتم الحصول على السوماتوستاتين من الجُثث البشريّة، ولكنّ تقنية الهندسة الوراثيّة زوّدت العالم بكميّات كافية من هذا الهرمون الذي يُستخدم لعلاج المُصابين بشذوذ النمو. وإنتاج هرمون إريثروبويتين؛ الذي يُحفّز إنتاج خلايا الدّم الحمراء لدى المُصابين بفقر الدّم الشديد. وإنتاج موادّ تُذيب الجلطات الدّمويّة، وتمنع انسداد الشرايين؛ للوقاية من النوبات القلبيّة.

##### 2- في مجال الصناعة:

من الممكن اختراع مصنع بيولوجي يمكنه إنتاج بروتينات وإنزيمات عن طريق هندسة الجينات إلى بلازميدات بكتيرية. بعض الجينات لا تعمل جيداً في البكتيريا ولذا يمكن استخدام الخميرة حقيفة النواة.. تم استغلال مصانع البكتيريا والخميرة لإنتاج الدوائيات والمساعدة في إنتاج الطعام (الكيموسين في إنتاج الجبن) والوقود. ويذكر أيضاً منها:

-تحسين القيمة الغذائية لكثير من النباتات مثل فول الصويا والذرة وزيادة إنتاج البروتينات المرغوبة .

- تحسين خواص حفظ الطماطم وجودة البطاطس وإنتاج شبس لا يستهلك كمية زيت كبيرة .
- تحسين خواص الزيت في المستردة وإنتاج زيت الكانولا وإنتاج زيت قليل في نسبة الدهون المشبعة .
- إنتاج الصبغات الطبيعية ومكسبات الطعم والرائحة وعمليات التخمير للصناعات الغذائية.
- استخدام البكتيريا والنبات والحيوان كمصانع حيوية لإنتاج الادوية والبروتينات والانزيمات .
- إنتاج نباتات تتحمل الجفاف والملوحة والظروف القاسية وامكانية استخدام الاراضي الهامشية في الزراعة .
- إنتاج كائنات حيّة مُعدّلة وراثياً، يُمكنها تحويل سكر السّكروز إلى سكر الجلوكوز.
- إنتاج أسمدة زراعيّة رخيصة الثمن من الأمونيا التي تُنتجها البكتيريا، والبكتيريا الزّرقاء المُعدّلة وراثياً.
- مراقبة كفاءة تحلّل القمامة، والمنتجات النَّفطيّة، والنّفثالين، والنّفثالات الصّناعيّة الأخرى باستخدام بكتيريا مُعدّلة وراثياً، تُنتج ضوءاً يتناسب مع كميّة النّفثالات التي تمّ تحليلها.
- إنتاج الطّاقة الحيويّة والوقود الحيويّ: حيث يُمكن تحويل هذا الوقود الحيويّ إلى كحول، أو ديزل، أو نפט، أو منتجات طاقةٍ أخرى.

### 3- في مجال الزراعة :

صناعة الطعام المعدّل وراثيا هي واحدة من أكثر التطبيقات المعروفة جيدا والمثيرة للجدل في الهندسة الوراثية وتوجد ثلاثة أنواع من المحاصيل المعدلة جينيا. تم تسويق محاصيل الجيل الأول ومعظمها يمنح الحماية من الحشرات و/أو المقاومة من مبيدات الأعشاب. هناك محاصيل مقاومة للفيروسات والفطرية تتطور أثناء النمو ويتم تطويرها لصنع الحشرات وجعل غريلة إدارة المحاصيل أسهل ويمكنها أيضا زيادة إنتاجية المحصول بشكل غير مباشر.

يهدف الجيل المطور الثاني من المحاصيل المعدلة وراثيا إلى تحسين الإنتاجية مباشرة عن طريق تحسين سماحية الملح والبرد أو سماحية الجفاف وإلى زيادة القيمة التغذوية للمحاصيل. يتكون الجيل الثالث من المحاصيل الدوائية، والمحاصيل التي تحوي لقاحات صالحة للأكل وغيرها من العقاقير تم تعديل بعض الحيوانات المهمة للزراعة جينيا مع هرمونات النمو لزيادة حجمها بينما تمت هندسة الأخرى لتعبير العقاقير والبروتينات في حليبها.

أثيرت مخاوف أخلاقية خاصة بالسلامة حول استخدام الطعام المعدل جينيا. يتصل جزء كبير من القلق الخاص بالسلامة بالآثار المترتبة على صحة الإنسان جراء تناول الطعام المعدل جينيا وخصوصا عند حدوث ردادات فعل سامة أو حساسية. يعتبر انسياب الجينات (Gene Flow) داخل المحاصيل غير المعدلة وراثيا ذات العلاقة التأثيرات البعيدة عن المرمى على الكائنات النافعة والتأثير على التنوع الحيوي مسائل بيئية مهمة وتتضمن المخاوف الأخلاقية المسائل الدينية وسيطرة الشركات على مخزون الغذاء وحقوق الملكية الفكرية ومستوى التصنيف ذي الحاجة في المنتجات المعدلة وراثيا. ويذكر أيضا :

- زيادة إنتاجية المحاصيل الزراعيّة، وزيادة مُقاومتها للأمراض، والحرارة، والرطوبة، وتقليل حاجتها للأسمدة.
- إنتاج محاصيل قادرة على تثبيت نيتروجين الجوّ، وبهذا لا تحتاج إلى تزيدها بالأسمدة.
- إنتاج محاصيل زراعيّة قادرة على إنتاج بروتينات سامّة للحشرات والديدان، مثل: ديدان الطّماطم، وديدان النَّبغ.
- إنتاج محاصيل زراعيّة لا تتأثر بمبيدات الأعشاب الضارّة، مثل: الغليفوسات، ممّا يُمكن المزارع من رشّ الحقل كاملاً بالغليفوسات، دون أن يتضرّر المحصول.
- إنتاج عدّة أنواع من الكائنات الحيّة الدّقيقة التي تُحلّل الموادّ الكيميائيّة السّامة، ويمكن استخدامها للتخلّص من الآفات الحشريّة، والكائنات الحيّة المُسبّبة للأمراض.
- تحسين نوعيّة محتوى البذور من البروتينات، وكميّته.
- نقل جين إنتاج البروتينات الحيوانيّة إلى النّباتات.
- تحسين قدرة النّباتات على البناء الضوئيّ .
- وإنتاج نباتات مقاومة للحشرات Bt مثل دودة ورق القطن وديدان اللوز وثاقبات الذرة .

ويمكن تقسيم التقنية الحيوية لعدة فروع أيضا (كتصنيف آخر لمجالات التكنولوجيا الحيوية):

### 1-تقنية حيوية حمراء ( Red Biotechnology ):

التكنولوجيا الحيوية في المجال الطبي، من أمثلتها إنتاج المضادات الحيوية من الكائنات الحية واستخدام الهندسة الوراثية لمعالجة الأمراض وفي منابله الجينات وكذلك إمكانية إنتاج أدوية خاصة بالمحتوى الجيني لفرد ما.

### 2-تقنية حيوية خضراء ( Green Biotechnology ):

وهي التكنولوجيا الحيوية في المجال الزراعي، من أمثلتها إنتاج النباتات المعدلة وراثيًا ذات الفوائد العدة كما أخبرنا من قبل باستخدام زراعة الأنسجة أو غيرها، المبيدات الحشرية غير الكيميائية، الاسمدة الحيوية.

### 3-تقنية حيوية بيضاء ( White Biotechnology ):

من أكثر المجالات انتشارا وقد ادخلت العديد من التعديلات على صناعات قديمة (كالورق والبلاستيك) وهي المعروفة أيضًا بالتكنولوجيا في المجال الصناعي، من أمثلتها استخدام الكائنات الحية لإنتاج مواد كيميائية مطلوبة للاستخدام التجاري حيويًا بدلاً من إنتاجها صناعيًا وتشمل أيضًا التصنيع الدوائي وإنتاج الفيتامينات هناك أيضًا المعالجة الخاصة للأنسجة والجلود، إنتاج البلاستيك القابل للتحلل العضوي.

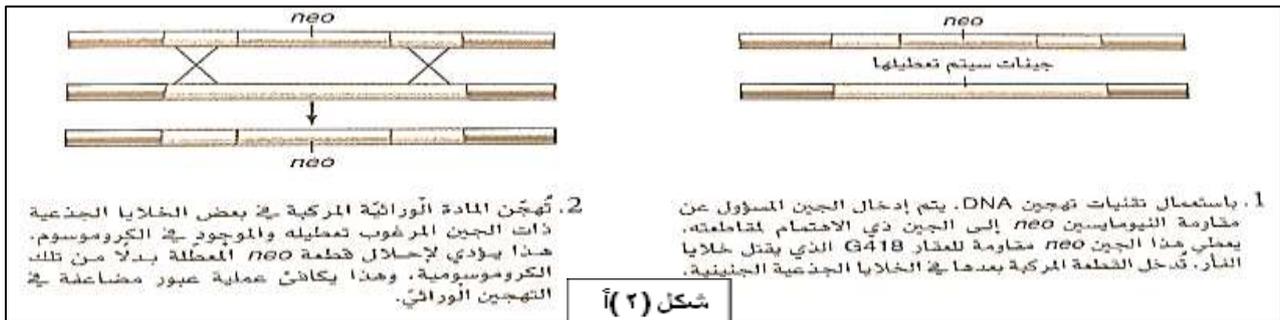
### 4-تقنية حيوية زرقاء ( Blue Biotechnology ):

هذا المجال هو التكنولوجيا الحيوية التي تتعامل مع عالم البحار والكائنات البحرية، وليس في هذا الفرع الوليد على الساحة العربية تطبيقات رائدة تُذكر حتى الآن .

### 5- عملية التطفير

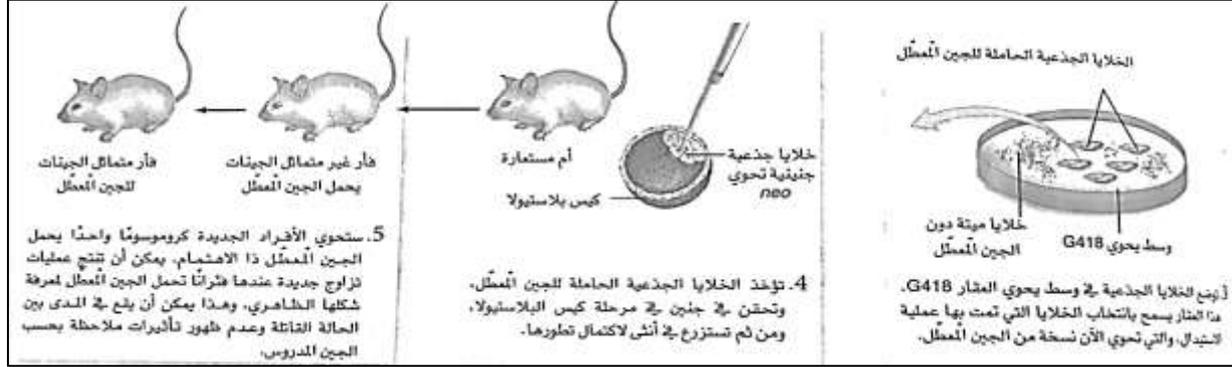
من التقنيات ذات الأهمية الفائقة للأهداف البحثية عملية التطفير في المختبر وهي القدرة على أحداث طفرات في أي موقع في جين مستنسل لمعرفة تأثير ذلك في وظيفته وبدلاً من الاعتماد على طفرات تم أحداثها عن طريق عوامل كيميائية أو إشعاعية ، حيث نحتاج إلى مزيد من الوقت والجهد ، فإن من الأفضل ان يتم تعديل DNA مباشرة . والاستعمال النهائي لهذا الوجه يمكن من استبدال جين مطفر ليحل محل الجين البري لفحص وظيفة هذا الجين المطفر وقد أمكن تطوير هذه التقنية أولاً في الخميرة إلا انه تم توسعها الان لاستعمالها في الفأر .

ففي الفئران مكنت هذه التقنية من انتاج فئران عطل بعض جيناتها ، حيث أمكن تعطيل جين بعينه ، ومن ثم قدر أثر فقد هذه الوظيفة في الفئران مكتملة النمو او معرفة فيما إذا كانت الطفرة قاتلة وامكن ايضا تحديد مرحلة التكوين الجيني المؤدية لفشل وظيفة ذلك الجين والفكرة بسيطة إلا أن التقنية بالغة التعقيد وسنجد أدناه تفصيلاً للخطوات في هذا النوع من التجارب وتخطيطاً موضحاً شكل (2 أ- ب).



1- تتم مقاطعة الجين المستنسل من خلال استبدال جين مؤشر ( علامة ) بدلاً منه عن طريق استعمال تقنيات DNA الهجين التي وصفت سابقاً، هذا الجين المؤشر مسؤول عن مقاومة المضاد الحيوي نيومايسين في البكتريا وهو يمكن خلايا الفأر من النمو عند زراعتها في وسط غذائي يحتوي العقار G418 ويتم البناء بطريقة تضمن ان يكون الجين المؤشر محاطاً من طرفيه بالحمض النووي DNA الذي يحيط عادة بالجين الذي نهتم به في الكروموسوم .

2- يدخل الجين الذي تمت مقاطعته إلى خليه جينية جذعية، تشتق هذه الخلايا من اجنة بدائية ويمكنها إنتاج انسجة مختلفة كاملة النضج في هذه الخلايا، يمكن للجين الاتحاد بنسخة الجين الكروموسومية اعتمادا على DNA المحيط بطرفيه وهذا هو النوع من الخلط الوراثي ( التهجين ) نفسه المستعمل لرسم الخرائط الجينية ، لا يحمل الجين الذي تم تعطيله ذو المقاومة للمضاد الحيوي أصلا للتضاعف وهكذا فسيفقد إذا لم يحدث أي خلط وراثي، تنمي الخلايا في الوسط الغذائي المحتوى على g418 لانتخاب احدث الخلط الوراثي ( حيث تنمو فقط الخلايا المحتوية على الجين المؤشر بوجود G418).



شكل (2) ب

3- تحقن الخلايا الجذعية الجينية الحاملة للجين المعطل في جين في مرحلة البلاستولة، ومن ثم تزرع في انثى حمل كاذب ( وهي الانثى التي تم تزواجها مع ذكر قطعت او عيته الناقله للمنى ، واصبح رحمها قابلاً لاستقبال البلاستولة ) تحمل المواليد من هذه الانثى نسخة واحدة من الجين ذي الاهتمام، وقد تم تعطيلها بعدئذ ويمكن مزوجة الحيوانات عابرة الجينات لإنتاج سلالات متماثلة الجينات ومن ثم يمكن تحليل طرزها المظهرية، يعتمد تعريف الجينات في الوراثة التقليدية على طفرات تبين شكلاً ظاهرياً محدداً لاحقاً وتستهمل تقنيات الوراثة الجزيئية لإيجاد الجين ، وعزل مستنسل جزئي من أجل التحليل .

أن استعمال الفأر الذي تم تعطيل بعض جيناته مثال على الوراثة العكسية REVERSE GENETICS حيث نقوم بأخذ جين مستنسل غير معروف الوظيفة ومن ثم نستعمله لإنتاج طفرة فاقدة لهذا الجين، يقدر الباحث في علم الوراثة بعدها اثر حذف الجين على مجمل المخلوق يؤدي هذا التوجه أحيانا الى مفاجئات كما حدث عندما عطل الجين المسؤول عن ايقاف مانع الورم P33 وبسبب وجود هذا البروتين بشكل مطفر في كثير من السرطانات الانسانية ودوره الاساسي في تنظيم دورة حياة الخلية فقد كان الاعتقاد بضرورته واعتقد ان تعطيله سوف يكون مميتاً، وبدلاً من كل ذلك فإن الفئران ولدت عادية اي انها نمت وتطورت بصورة عادية على الرغم من تمايزها ظاهرياً وذلك بظهور اورام كثيرة في انسجتها المختلفة مع تقدم العمر .

تمكن عوامل التفعيل المحتوية على جينات مستنسله انتاج بروتينات معروفة في خلايا مختلفة ويمكن عمل هذا لإنتاج مواد صيدلانية او لأغراض بحثية ويمكن ادخال الجينات عبر حواجز الانواع ففي الفأر يمكن هندسة الطفرات في جينات مستنسله ومن ثم اعادة إدخالها للحيوان لإنتاج فئران عطلت جينات محددة بها. سنجد في النهاية أنفسنا أمام تطبيقات لا نهائية للهندسة الوراثية في جميع المجالات كتطوير الأدوية والعقاقير وإنتاج الأمصال والمضادات الحيوية، أو إنتاج أفراد يستطيعون مقاومة الأمراض أو حتى بعيداً عن المجالات الطبية، كإنتاج الوقود والمحاصيل المقاومة للأمراض والطعام المعدل وراثياً بألوانٍ أكثر بريقاً وطعم ألذ بكميات كبيرة.

## 6- تعديل DNA

لقد كانت القدرة على العزل المباشر للمادة الوراثية وتعديلها من أهم التغيرات العميقة في ميدان علوم الحياة في أواخر القرن العشرين ، لقد ابتداءً بناءً DNA الهجين Recombinant DNA ( أي أن جزئياً منه مصنوع من مصدرين مختلفين ) في منتصف السبعينيات من القرن الماضي ، إن تطور هذه التقنية – التي أدت كليا لعلم التقنيات الحيوية – مبني أساسا على انزيمات يمكن استعمالها لتعديل DNA.

### أ- الأنزيمات القاطعة لـ DNA في مواقع محددة :

إن الأنزيمات التي ساعدت على إحداث الثورة في البيولوجيا الجزيئية هي تلك القادرة على تقطيع DNA في مواقع محددة وهذه هي التي يطلق عليها الأنزيمات المحددة الداخلية، وإن الأنزيمات المحللة لـ DNA هي أنزيمات تفتت DNA الى قطع وكان كثير منها معروفاً قبل عزل أول أنزيم منها إلا أن هذه الأنزيمات مختلفة، لأنها قادرة على تقطيع DNA في مواقع خاصة ولو كان الحمض النووي الرايبوزي حبلأ فستكون هذه الأنزيمات التي تقطع الحبل بأطوال محددة.

### – اكتشاف الأنزيمات المحددة وأهميتها

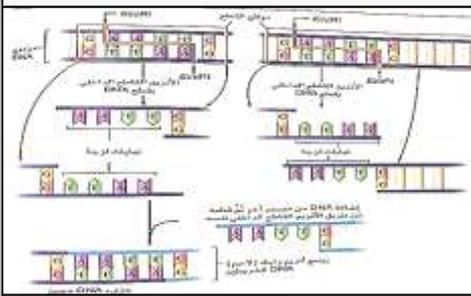
إن فعالية التقطيع المحددة لهذه الأنزيمات التي طالما تم البحث عنها من قبل علماء الحياة نجمت عن بحوث أساسية للإجابة عن السؤال لماذا تستطيع بعض الفيروسات البكتيرية إصابة بعض الخلايا وليس كلها؟ وقد اطلق على هذه الظاهرة اسم محدودية العائل Host restriction تنتج البكتيريا انزيمات قادرة على تقطيع DNA الخاص بالفيروس في أماكن وتسلسلات محددة وتقوم خلايا بالعائل بحماية حمضها النووي من التقطيع من خلال تعديل هذا الحمض في مواقع التقطيع حيث لا تقوم هذه الانزيمات بتقطيع الجزيئات المعدلة من DNA ، ومنذ الوهلة الأولى لاكتشاف هذه الأنزيمات القاطعة فإن المئات قد عزلت وكانت قادرة على التعرف الى كثير من مواقع التقطيع Restriction sites وقطعها .

إن القدرة على قطع DNA في أماكن محددة ذات أهمية من ناحيتين الأولى انها تسمح ببناء نمط من الخريطة الفيزيائية وهو ما كان مستحيلاً قبل ذلك، يمكن بناء الخريطة الفيزيائية اعتماداً على تحديد أماكن التقطيع لهذه الأنزيمات القاطعة وتوفر هذه الخرائط المحددة معلومات مهمة للتعرف الى جزيئات DNA والعمل بها ، ومن ناحية ثانية يؤدي التقطيع الناتج عن الانزيمات القاطعة هذه الى ظهور جزيئات هجينة ( خليطة أو معادة التكوين) من DNA . إن بناء الجزيئات الهجينة هذه ذات اثر مهم في البحوث و ان كثيراً من الخطوات في عملية استئصال DNA وتعديله تحتاج الى القدرة على خلط جزيئات من مصادر مختلفة .

### – كيف تعمل الأنزيمات القاطعة ؟

هناك نوعان من الأنزيمات القاطعة الأول I والثاني II يعمل النوع الأول I قطعاً بسيطاً عبر كل من شريطي DNA وليس على موقع التعرف وحيث أنه لا يقطع على مواقع محددة بعينها فإنه لا يستعمل غالباً في عمليات استئصال DNA وتعديله، أما النوع الثاني II فإنه يستطيع إنتاج جزيئات هجينة حيث إن هذه الأنزيمات قادرة على التعرف الى تسلسل معين من DNA مكون من 4 – 12 قاعدة وتقطع الحمض النووي عند قاعدة معينة

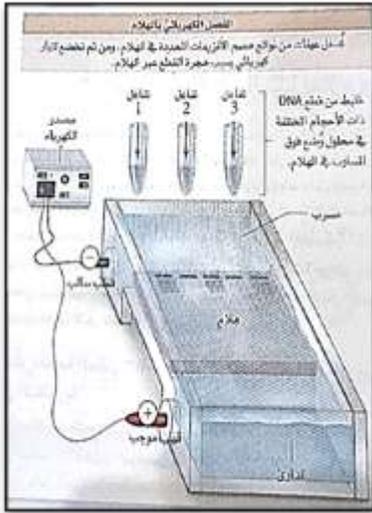
بذاتها في التسلسل ( شكل 3 ) ، ان مواقع تعرف النوع الثاني II من هذه الأنزيمات يمكن قراءته بالصورة العادية أو بالاتجاه المعاكس دون تغيير ترتيب الأحرف كما هو الحال في كلمة RADR يدعى هذا النهج باليندروم ، وبالأخذ في الحسبان هذا النوع من التسلسل فإن قطع DNA عند القاعدة نفسها في أي من الشريطين يمكن أن يؤدي لقطع DNA بطريقة ماهرة تؤدي لإنتاج اطراف لزجة STICKY ENDS وستكون هذه التسلسلات القصيرة غير المزدوجة هي نفسها لأي حمض نووي قطع بذلك الانزيم ، وهكذا فإن هذه النهايات اللزجة تسمح لأحماض نووية من مصادر مختلفة بالارتباط ببعضها بسهولة .



شكل 3

## ب : الأنزيمات الرابطة لـ DNA ودورها في بناء جزيئات هجينة :

كما وصفنا أيضاً فإن نهايتي DNA اللتين تم قطعها بأنزيمات النوع الثاني II تمتلك تسلسلات مكملة لبعضها وهكذا فبإمكانها أن تكون مزدوجاً ولكن لربط هذه الجزيئات يساعد الانزيم الرابط DNA ligase على تكوين رابطة ثنائية الإستر مفسفرة بين مجموعتي الهيدروكسيل والفوسفات المتجاورتين في نيوكليوتيدات DNA ،يسبب الأنزيم الرابط هذا التحام الكسر في أحد الشريطين أو كليهما و يعد فعل الأنزيم الرابط ضروري لإنتاج جزيئات هجينة مستقرة من قطع وفرتها الأنزيمات المحددة (القطع).



شكل 4

### 7- التهجير الكهربائي في الهلام

لا فائدة من القطع الناتجة عن عمل الأنزيمات القاطعة إن لم يكن بالإمكان فصلها بسهولة لتحليلها أكثر طرق الفصل شيوعاً هي استخدام التهجير الكهربائي في الهلام ، تعتمد هذه التقنية على الاستفادة من الشحنات السالبة على جزيء DNA باستعمال حقل كهربائي لتوفير القوة اللازمة لفصل جزيئات DNA بناءً على حجمها .

فالهلام المصنوع من الأجرور أو ميلمر أكريلاميد المنتشر على هيئة طبقة رقيقة على مادة داعمة يوفر وسطاً ثلاثي الأبعاد يفصل الجزيئات اعتماداً على حجمها. يتم غمر الهلام المحلول الدائري ( المنظم ) BUFFER المحتوي على أيونات يمكنها أن تحمل تياراً خاضعاً لحقل كهربائي . تسبب الشحنات السالبة القوية من مجموعات الفوسفات المكونة للعمود

الفقري للحمض النووي DNA هجرة الجزيء نحو القطب الموجب ويعمل الهلام على شكل غربال لفصل جزيئات DNA اعتماداً على حجمها حيث كلما كبر حجم الجزيء كانت هجرته في الهلام أكثر بطئاً وعلى مدى زمني محدد للهجرة الكهربائية فإن الجزيئات الصغيرة سوف تهاجر مسافات أكبر من الجزيئات

الكبيرة ويمكن التعرف إلى DNA في الهلام باستعمال صبغة ترتبط به . انظر شكل ( 4 ) .

ويعد التهجير الكهربائي من أهم الطرق في البيولوجيا الجزيئية باستعمالاته في مجالات تمتد من تحليل بصمات DNA الى تحليل انماط تسلسله.

### 8- التحول الوراثي بإدخال DNA الغريب إلى بكتيريا القولون E.coli .

إن الخطوة الأولى في الهندسة الوراثية هي بناء جزيئات هجينة من الضروري أيضاً أن نكون قادرين على إعادة إدخال هذه الجزيئات الى الخلايا ، إن المادة الوراثية يمكن انتقالها بين خلايا البكتيريا كما أوضح فردريك جريفت وهذه العملية المسماة بالتحويل الوراثي transformation عملية طبيعية في الخلايا التي كان يدرسها جريفت ، فبكتيريا القولون E.coli المستعملة بشكل روتيني في مختبرات البيولوجيا الجزيئية غير قادرة على اتمام عملية التحويل الوراثي طبيعياً إلا بعمليات اصطناعية تم تطويرها لتسمح بإدخال المادة الوراثية في خلايا بكتيريا القولون هذه ، وبهذه الطريقة يمكن إكثار جزيئات هجينة في خلية قادرة على عمل كثير من النسخ من هذا الجزيء الجديد الهجين .

وبصورة عامة تدعى عملية إدخال جزيء المادة الوراثية من أصل غريب في خلية أخرى بعملية التحويل الوراثي وهي مهمة جدا في حالة بكتيريا القولون من أجل الاستئصال الجزيئي ، ومن أجل تكاثر DNA المستنسل يرغب الباحثون أيضاً أن يكونوا قادرين على إعادة المادة الوراثية في الخلايا الأصلية التي عزلت منها أصلاً وفي هذه الحالة إذا أمكن استعمال الخلية المتحولة لتكوين كل أو جزء من مخلوق فإننا نسمى هذا المخلوق عابر الجينات ( متحول ) .

## 9- الاستنساخ الجزيئي MOLECULAR CLONING :

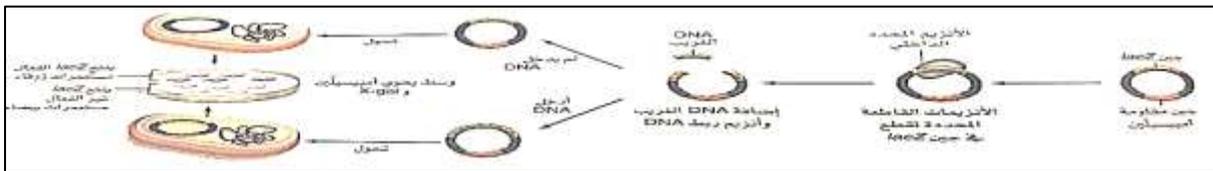
يشير مصطلح سلالة أو نسيلة ( CLONE ) إلى نسخ متشابهة تماماً وراثياً ، إن عملية تكثير النباتات من خلال قطع عقلة من نبات معين وتنميتها للحصول على نبات معين وتنميتها للحصول على نبات جديد هي طريقة بدائية مبكرة للاستنسال استعملت بشكل واسع في التطبيقات الزراعية وعلم البستنة ونكتفي هنا بالتحدث عن فكرة الاستنسال الجزيئية التي تشمل عملية عزل تسلسل محدد من المادة الوراثية وهو تسلسل يترجم في العادة الى بروتين خاص يسمى هذا أحياناً الاستنسال الجيني Gene cloning إلا أن الاستنسال الجزيئي أكثر دقة ، وتمكن أنظمة العائل – الحامل تكثير المادة الوراثية الغريبة في البكتيريا .

مع أنه بالإمكان إنتاج تسلسلات قصيرة من DNA في خارج الخلية in vitro فإن استنسال تسلسلات كبيرة غير معروفة يحتاج الى تكثير جزئيات DNA الهجين داخل الخلية ، حيث تمكن الانزيمات والطرق التي وصفها سابقاً علماء الأحياء من إنتاج المادة الوراثية الغريبة وفصلها ومن ثم إدخالها إلى الخلايا ، إن عملية تكثير المادة الوراثية في الخلية العائل تحتاج الى حامل Vector ( شئ لحمل جزئ المادة الوراثية الهجين ) يمكنه التضاعف في العائل عند إدخاله ، وأن هذه الأنظمة للعائل – والحامل مهمة جداً لعلوم البيولوجيا الجزيئية . أكثر العوائل شيوعاً ومرونة عند الاستعمال في عمليات الاستنسال الجزيئية هي بكتيريا القولون E.coli إلا أنه يتوافر في الوقت الحاضر الكثير من هذه العوائل ، ويعد الباحثون خلايا الأنسجة من الثدييات أو خلايا الخميرة وخلايا الحشرات بوصفها عوائل وكل نظام من أنظمة العائل – الحامل يتيح استعمالاً للمادة الوراثية المستنسلة . تمثل البلازميد والفيروسات البكتيرية أكثر اثنين من الحوامل المستعملة بالبلازميدات plasmids مادة وراثية صغيرة ودائرية تقع خارج الكروموسوم وهي غير ضرورية للخلية البكتيرية اما الفيروسات البكتيرية فهي فيروسات تصيب خلايا البكتيريا .

### أ- البلازميدات بوصفها حوامل plasmid vectors :

1- الحوامل البلازميدية ( كروموسومات صغيرة دائرية الشكل ) تستعمل عادة لاستنسال قطع صغيرة نسبياً من المادة الوراثية تصل في أقصاها إلى ما يقارب 10 كيلو قاعدة ( 10.000 قاعدة ) ولا بد للحامل البلازميدي من أن يحوي مكونين هما : أصل ( منشأ ) التضاعف Origin of replication الذي يسمح للبلازميدة بالتضاعف في بكتيريا القولون بصورة مستقلة عن الكروموسوم.

2- مؤشر قابل للاختيار Selectable marker وغالباً ما يكون هذا المؤشر مقاوماً للمضاد الحيوي، ويضمن مؤشر الاختبار هذا التعرف بسهولة الى وجود البلازميدة خلال الاختبار الوراثي وعلى سبيل المثال فإن الخلايا المحتوية على البلازميدة الحاملة لجين مقاومة المضاد الحيوي تتمكن من العيش عند زراعتها على وسط غذائي يحوي ذلك المضاد الحيوي في حين أن الخلايا المفترقة لتلك البلازميدة سوف تموت بفعل هذا المضاد .



شكل 5- أ

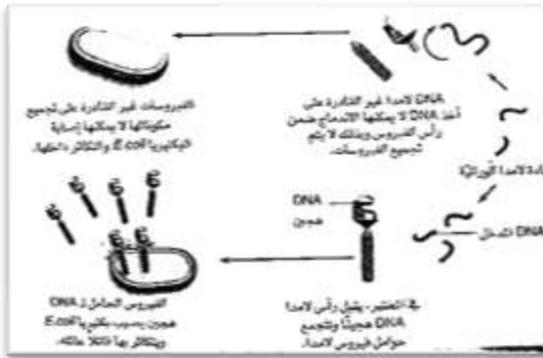
3- وتدخل قطعة من DNA بالطرق التي وصفت إلى منطقة من البلازميدة تسمى موقع الاستنساخ المتعدد ( MCS= MULTIPLE CLONING SITE ) تحوي هذه المنطقة عدداً من المواقع المحددة الخاصة بحيث إنه عند قطع البلازميدة بإحد الأنزيمات المحددة لهذه المواقع تكون النتيجة بلازميدة خيطية وعند قطع المادة الوراثية قيد الدراسة بالإنزيم القاطع نفسه يمكن عندها ربط القطعة في ذلك الموقع وبعدها تدخل البلازميدة الى الخلايا عن طريق التحول الوراثي شكل (5-أ).

وغالبا ما تكون هذه المنطقة من الحامل قد تم هندستها لكي تحتوي على جين آخر تم تعطيله لأنه قطع بالمادة الوراثية التي دخلت توا وهذا ما يسمى التعطيل الإدخالي insertional inactivation.

وأحد من عوائل حوامل الاستنساخ هو pbr322 استعمل جيناً آخر مقاوماً للمضاد الحيوي للتنشيط الإدخالي، وهكذا فإن المقاومة لمضاد حيوي والحساسية لمضاد حيوي آخر تشير الى وجود المادة الوراثية المدخلة . وهناك حوامل حديثة تستعمل جين أنزيم محلل بيتا - جلاكتوسايد وهو الأنزيم الذي يقطع السكريات الجلاكتوسايدية مثل اللاكتوز فعندما يقطع الأنزيم المادة الصناعية X-gal ينتج لون أزرق في البلازميدات يؤدي إدخال المادة الوراثية الغريبة الى مقاطعة جين الانزيم المحلل لبيتا جلاكتوسايد فلا يتم إنتاج انزيم فعال وعند زراعة الخلايا المتحولة وراثياً على وسط يحوي المضاد الحيوي ومادة X-gal ( لكي نختر الخلايا المحتوية على البلازميدة ) فإنها تبقى ذات لون أبيض في حين أن الخلايا المتحولة وراثياً وغير المحتوية على المادة الوراثية المدخلة تبقى ذات لون أزرق .

### ب- الفيروسات البكتيرية بوصفها حوامل phage vectors :

إن الفيروسات البكتيرية أكبر من البلازميدات بوصفها حوامل أو بوصفها عوامل نقل ويمكنها أن تحمل قطع DNA تصل الى 40 كيلو قاعدة، ان معظم الحوامل الفيروسية الناقلة مبنية على دراسة الفيروس البكتيري لامدا



الشكل 5 - ب

phage lambda (λ)، مبدئياً تستخدم حوامل الفيروس لامدا هذه الايام لأجل بناء مكتبات DNA المكمل وهي عبارة عن مجموعات من قطع DNA أنتجت من الحمض النووي الريبوزي الرسول m DNA ومع ان فيروس لامدا الحامل مفيد لاستنسال قطع كبيرة من DNA إلا أن له متطلبين لا تشاركه بهما البلازميدات بوصفها حوامل هما :

1- كل من البلازميدات والفيروسات البكتيرية تحتاج الى خلايا حية للتضاعف إلا أن الفيروسات تقتل هذه الخلايا حيث تؤدي في النهاية الى مجموعات فيروسية وليس خلايا بكتيريا .

2- المادة الوراثية للفيروس خيطية فبدلاً من كسر دائرة كما هي الحال في البلازميدة يزال الجزء الأوسط من المادة الوراثية لفيروس لامدا لتحل محله المادة الوراثية المدخلة.

بعد ربط هذه المادة المدخلة لذراعي فيروس لامدا يجب عندها تغليف بكتيريا القولون E.COLI، ويلاحظ ان ذراعي الفيروس لامدا المفترقين الى اي مادة وراثية مدخلة لا يمكن تغليفها بصورة فعالة برأس الفيروس ويؤدي هذا الاختلاف الى درجة من الانتخاب للفيروسات الهجينة حيث ان الاذرع وحدها لا تضاعف . (شكل (5-ب)

### 10- مشروع الجينوم البشري Human Genome Project :

لقد بدأ علماء البيولوجيا الجزيئية منذ أواسط الثمانينات من القرن العشرين الميلادي مشروعاً طموحاً أطلقوا عليه اسم دراسة الصبغيات البشرية، ومعرفة خصائص كل منها، وتحديد المورثات المتعلقة ببعض الأمراض. وفي السادس والعشرين من يونيو عام 2004 أعلن الرئيس الأمريكي الأسبق بيل كلينتون ، في تصريح مشترك مع رئيس الوزراء البريطاني الأسبق توني بليير عن الانتهاء من فك رموز وجدولة كامل المخزون الوراثي البشري تقريباً، وقد تم هذا الاكتشاف من خلال دراسات مكثفة وتعاون استمر عشر سنوات بين عشرة من أكبر المراكز العلمية في العالم، ووصف العلماء هذا الاكتشاف بأنه أكثر أهمية من هبوط الإنسان على سطح القمر، وأنه الإنجاز العلمي الأضخم الذي يستقبل به العالم الألفية الجديدة.

ويهدف مشروع الجينوم البشري إلى التعرف على التركيب الوراثي الكامل والشفرة الجينية للإنسان، ويشمل ذلك نحو ثمانين ألف جين، تضمها ثلاثة مليارات وحدة في كل من خلايا الجسم البشري التي يبلغ عددها تقريبا مائة تريليون خلية، والتريليون يساوي ألف مليار.

وقد أنجز المشروع حتى الآن دراسة التركيب الوراثي لعدد كبير من الفيروسات والجراثيم كذلك المسببة للسّل، وانتقل إلى تفكيك شفرة كائنات أكبر مثل الخميرة وذبابة الفاكهة.

قد كشف العلماء حتى الآن الكثير من أسرار الشفرة الوراثية Genetic Code في الحيوان والنبات والإنسان، وأصبحوا قادرين على إحداث القليل من التغيير في الصفات الوراثية، كما تمكنوا من إنتاج أعضاء حية بالاعتماد على تقنية الهندسة الوراثية، وتمكنوا باستخدام طريقة الاستنساخ (التنسيل: Cloning) من إنتاج نُسخ Copies من المخلوقات الحية انطلاقا من خلايا غير جنسية أخذوها من المخلوق الأصلي.

ويأمل العلماء من تقنية الهندسة الوراثية أن تحلّ لهم الكثير من المشكلات الطبية الراهنة التي لا يمكن حلّها بغير هذه التقنية، ومن ذلك مثلا إنتاج أعضاء بديلة Substitute Organs لاستخدامها في زراعة الأعضاء Organ Transplantation بدلا عن الأعضاء التالفة أو المريضة، وذلك بأن يُنتج العضو المطلوب انطلاقا من خلية حية تؤخذ من جسم المريض نفسه فتزرع في مزارع خاصة أو في جسم أحد الحيوانات، ثم تحرّض على التكاثر من أجل تشكيل العضو المطلوب الذي سيُزرع في جسم المريض، وهي طريقة أفضل من الطريقة المتبعة اليوم، والتي يُؤخذ فيها العضو من أحد الأشخاص المتبرعين ويُزرع في جسم الشخص المريض المحتاج لهذا العضو. ومن المعروف طبيا أن هذه الطريقة الأخيرة تسبب ارتباكا شديدا في جسم المريض، وهو ما يعرف بظاهرة الرفض Rejection للعضو المزروع، مما يؤدي إلى فشل عملية الزرع في كثير من الحالات. كما يأمل العلماء في المستقبل القريب أن يتمكنوا من تسخير علم الهندسة الوراثية في الوقاية من الأمراض الوراثية، ومعالجة الكثير من التشوهات الخلقية التي مازالت إلى اليوم تشكل عبئا اجتماعيا ونفسيا وماليا ثقيلا على المجتمع. وهم يهدفون من ورائه إلى حلّ رموز الشفرة الوراثية للإنسان، ووضع الخريطة الوراثية التي تحدد مواقع الجينات ( المورثات: Genes ) على الكروموسومات.

### - خرائط الجينومات:

تستخدم الخرائط للاستدلال علي المواقع ، وبقدر الدقه التي نرغب في الوصل اليها ، فاننا قد نستخدم عددا من الخرائط ذات تفاصيل مختلفة . نستطيع عن طريق علم الجينومات ان نستدل علي موقع جين معين في جزء من الكروموسوم ، ثم في تحت – منطقة في الكروموسوم ، وفي النهاية نستدل علي موقع هذا الجين بدقة في تعاقب معين علي الكروموسوم ، ولمعرفة تعاقب الحين ، علينا ان نعرف تعاقب الجينوم كاملا ، وقد كان ذلك صعبا ، وفي غير متناولنا في وقت من الأوقات لاسباب تقنية ، ان معرفة تعاقب الجينوم كاملا غير مجد اذا لم يتوافر لدينا انواع خرائط اخرى لذا فان ايجاد جين معين داخل الجينوم يشبه محاولة العثور علي بيتك في خرائط العالم . للتغلب علي هذه الصعوبة فان الخرائط الجينومية تبني علي مستويات مختلفة من التفاصيل . وتستخدم انواعا مختلفة من المعلومات ، يمكننا ان نفرق بين الخرائط الجينية genetic maps والخرائط الطبيعية physical maps فالخرائط الجينية ، هي خرائط مجردة تحدد المواقع النسبية للجينات علي الكروموسومات بناء علي تكرار اعادة الاتحاد اما الخرائط الطبيعية فإنها تستخدم معالم محددة في تعاقب DNA وتتراوح بين مواقع القطع ( التحديد ) وأقصى مستوى من التفصيل .

### - انتاج أنواع مختلفة من الخرائط الطبيعية :

لكي نفهم الخرائط الجينومية ، من المهم ان يكون لدينا معالم طبيعة تكون علي مستوى اقل وضوحا من مستوى التعاقب الكامل وفي الحقيقة حتى قبل التفكير في مشروع جينوم الانسان ، كانت هناك حاجة الي معرفة المعالم علي الخرائط الطبيعية لـ DNA السلالة، هناك ثلاثة انواع من الخرائط الطبيعية : هي الخرائط المحددة التي تبني عن طريق الانزيمات المحددة ( القاطعة ) ، ونمط اشربة الكروموسوم ، وينتج عن طريق طرق الصبغات الخلوية ، وخرائط الهجينات المشعة ، التي تنتج باستخدام الاشعاعات لتقطيع الكروموسومات.

### 1- الخرائط المحددة .

تقاس المسافات بين المعالم علي الخرائط الطبيعية بالأزواج القاعدية (1000 زوج قاعدي bp يساوي 1 كيلو قاعدة kh ) ، ليس من الضروري معرفة تعاقب DNA لقطعة DNA ما من اجل انشاء خريطة طبيعة أو ما إذا كان DNA يحتوي علي معلومات لجين معين .

كانت أول خريطة طبيعية بقطع DNA جينومي بإنزيمات محددة مختلفة باستعمالها منفردة ، او بتوليفات من انزيمات مختلفة ، ثم استخدم تحليل نمط القطع الناتجة لتكوين خريطة .

وبالنظر الى القطع الكبيرة من DNA فان هذه الطريقة تكرر ، ثم تستعمل القطعة الناتجة ويعاد لصقها مستفيدين من المناطق المتداخلة بين القطع ، ووضعها بوصفها قطعاً كاملة متصلة ومتلاصقة تسمى السلسلة المتصلة contig ومثال علي المصادفة البيولوجية ، فقد جاءت اول انزيمات محددة يتم عزلها من hacmophilus الذي كان اول جينوم يحدد تعاقبه بشكل كامل لمخلوق حر .

### 2- نمط أشرطة الكروموسومات.

وجد علماء الخلية الذين يدرسون الكروموسومات بالمجهر الضوئي انه عند استخدام صبغات مختلفة يمكن الحصول علي نمط متكرر من الاشرطة علي الكروموسومات ، بهذا الطريقة يمكنهم التعرف الي الكروموسومات وتقسيمها الي تحت مناطق بناء علي نمط الاشرطة .

يسمح استخدام صبغات مختلفة ببناء خرائط خلوية لكامل الجينوم ، وباستخدام هذه الخرائط الطبيعية علي نطاق واسع ، فكأنما تقوم بالنظر الي خريطة بلد كامل ، فهي تضم كامل الجينوم ، ولكن بدرجة منخفضة من التفاصيل.

استخدمت الخرائط الخلوية لوصف الكروموسومات غير الطبيعية وربطها بأمراض الانسان ، مثل مرض اللوكيميا النخاعية المزمن ، يحدث هذا المرض بسبب انتقال متبادل بين الكروموسوم 9 والكروموسوم 22 ، ما يؤدي الي حدوث تغير في انزيم مفسفر التايروسين ، فيجعله نشطاً بشكل دائم ، وينتج عنه تكاثر خلايا الدم البيضاء . لقد اضاف استخدام التهجين مع DNA المستنسل الي استخدام تحليل اشرطة الكروموسوم في هذه الحالة ، ولان التهجين يستخدم الكروموسوم كاملاً فقد سمى التهجين في الموقع in situ bybridization ولأننا نستخدم مسباراً معلماً بالصبغ ( اللعان او الاضاءة ) فقد سميت العملية برمتها التهجين اللامع في الموقع (fish)fluorescent in situ hybridization .

### 3- خرائط التهجين الاشعاعي :

تستخدم خرائط التهجين الاشعاعي الاشعاعات لتقطيع وتجزئ الكروموسوم بشكل عشوائي ، ثم تسترجع القطع بدمج الخلية التي تعرضت للإشعاع مع خلية اخرى ولبناء خراط التهجين الاشعاعي لجينوم الانسان ، تعرض خلية موضوعة في مستنبت زراعي الي كمية كبيرة وقاتلة من الاشعاعات ، ثم تدمج مع خلية مأخوذة من جرذ تصبح الكروموسومات المتقطعة الناتجة عن الاشعاعات مندمجة مع كروموسومات خلية الجرذ ويمكن التعرف الي هذه القطع بناء علي نمط الاشرطة ، وباستخدام جينات معروفة في التهجين اللامع في الموقع fish .

ولأغراض بناء الخريطة بنيت سلسلة من هذه الخلايا الهجينة التي لها قطع متداخلة من كروموسومات الانسان ، وتمثل كامل الجينوم وسوف نتناول استخدام الهجينات الاشعاعية في الخرائط بصورة مفصلة لاحقاً.

### ربط الخرائط الطبيعية منطقيا مع الخرائط الجينية :

نحتاج الى ان نكون قادرين على ربط الخرائط الطبية بالخرائط الجينية خصوصا تعاقبات الجينوم ، لكي نساعد علي ايجاد التعاقبات الطبيعية للجينات التي حددت خريطتها الوراثية .

تكمن المشكلة في العثور على الجينات في دقة تفاصيل الخرائط الوراثية التي لا ترتقي الى مستوى وضوح تعاقب الجينوم ، فالعلامات التي تتباعد عن بعضها بمقدار 1CM قد تتباعد حقا بمقدار مليون زوج قاعدي . لان العلامات التي تستخدم في بناء الخرائط الوراثية علامات جزئية بشكل اساسي فان بالإمكان تحديد مواقعها بيسر ضمن تعاقب الجينوم وبالمثل فان بالإمكان وضع اي جين تم استنساله في تعاقب الجينوم ويمكن تحديد خريطته الوراثية ايضا يؤدي هذا الامر مباشرة الى ربط تلقائي بين نوعي الخرائط وتكمن المشكلة المتعلقة في العثور على جينات تم تحديد خريطتها الوراثية ايضا ، ولكن لم يتم عزلها كسلالة جزئية في طبيعة الخرائط الوراثية فالمسافات بين الجينات في الخرائط الجينية ليست متشابه بسبب الاختلافات في تكرار اعادة الاتحاد على طول الكروموسوم . لذا فان 1CM من المسافات الجينية سوف يترجم الى اعداد مختلفة من الأزواج القاعدية في المناطق المختلفة . تزودنا خرائط الهجين الاشعاعي بالبدليل عن الخرائط الوراثية وهي سهلة الربط مع الخرائط الطبيعية .

### معرفة تعاقب كامل الجينوم

ان ذروة الخريطة الطبيعية هي تعاقب ازواج القواعد لكامل الجينوم وفي المراحل الاولي للبيولوجيا الجزيئية كانت تتم عملية التعاقب يدويا وقد كانت عملية تستنزف الوقت والجهد كما ذكرنا سابقا زاد تطوير آلات لإجراء هذه العملية اليا من معدل معرفة التعاقب .

تتطلب معرفة تعاقب الجينوم على نطاق واسع معرف تعاقب آلية ذات انتاجية عالية اضافة إلى تحليل حاسوبي تعدد معرفة تعاقب الجينوم حالة فيها قادت التكنولوجيا العلم بدلا من العكس خلال ساعات قليلة يمكن لمسلسل الى ان يسلسل ازواج القواعد التي يقوم بها فني مختبر خلال سنة كاملة بما يقارب 50.000 زوج قاعدي، ودون معرفة التعاقب الآلية فسوف يكون مستحيلا معرفة تعاقب جينوم كبير كالموجود عند الانسان .

تتطلب معرفة تعاقب الجينوم سلالات ( مسلسلات) جزئية كبيرة على الرغم من كونه مثاليا ان تقوم بعزل DNA من المخلوق ثم تضعه في جهاز التعقيم ليعود بعد اسبوع او اسبوعين فتجد الحاسوب قد اعطاك نسخة مطبوعة من الجينوم لذلك المخلوق فان الحياة العلمية ليست بهذه السهولة فأجهزة التعاقب تزودنا بتعاقبات دقيقة لقطعة DNA لا يتجاوز طولها 800 زوج قاعدي ومع هذا فان احتمالات حدوث اخطاء واردة لذا فانه يتم تعاقب 10 نسخ من الجينوم لتقليل الاخطاء .

حتى بيانات تعاقب موثوق بها بين ايدينا فان كل جولة تعاقب تقوم بإنتاج كمية نسبية من التعاقب لذا يجب تجزئة الجينوم ثم عزل السلالات للقيام بمعرفة ما فيها .

ومشروع جينوم الانسان عام 1990 عندما قامت مجموعة من العلماء الامريكان بتشكيل الائتلاف الدولي لتحديد تعاقب جينوم الانسان كان الهدف من هذا النوع الذي مول من قبل العامة هو استخدام طريقة سلالة إثر سلالة لتحديد تعاقب جينوم الانسان ولقد تم نشر الخريطة الطبيعية والخريطة الوراثية في التسعينيات من القرن الماضي ، واستخدمت بوصفها منصة لتحديد تعاقب كل كروموسوم .

في ايار 1998 ، اعلن كريج فينتر ، وهو من سلسلة HAEMOPBIHUS INFLUENZAE عن شركة خاصة تحدد تعاقب جينوم الانسان ، واقترح استخدام الطريقة العشوائية لتعاقب 3.2 بلايين قاعدة في سنتين وقد قبل الائتلاف ذلك التحدي وبدا السباق نحو تحديد تعاقب جينوم الانسان .

وكانت النتيجة هي التعادل ففي 26 حزيران عام 2000 أعلنت المجموعتان عن النجاح ، ونشرت كل منهما نتائجها بالتزامن عام 2001 وقد احتوت النشرة التي أصدرها الائتلاف علي 248 مؤلفا وهؤلاء بعض من القائمة الكاملة للمؤلفين .

إن إخراج مسودة التعاقب الخاصة بجينوم الانسان كان فقط البداية . ومازالت الفجوات في التعاقب قيد التعبئة والخريطة يعدل عليها باستمرار . عام 2004 صدرت النسخة النهائية من التعاقب وتم اعطاؤها اسم التعاقب المرجعي (SEF.SEQ) في قاعدة البيانات واصبح عدد الفجوات 314 بانخفاض مقداره 400 مرة في الفجوات ، وهي تضم الان 99% من تعاقب الكروماتين الحقيقي ، بازدياد بعد ان كان 95% لدى التعاقب المرجعي معدل خطأ مقداره 1 الي كل 100.000 قاعدة .

الامر الالم من هذا هو ان البحث المتعلق بالجينوم الكامل يمكن ان يمضي قدما ، فوجود الخريطة الطبيعية النهائية التي تتكامل مع الخريطة الجينية ، فان الامراض الناتجة عن الاعطاب التي تحدث في اكثر من جين مثل مرض السكري يمكن ان تدرس ان المقارنة مع الجينومات الاخرى تغير مفهومنا عن تطور الجينوم . يتطلب تعاقب كامل الجينوم اجهزة آلية تحدد تعاقب الجينات في عينات عدة بشكل متواتر ، هناك حاجة الى قطع كبيرة من DNA للقيام بتحديد التعاقب.

### تطبيقات علم الجينوم

يمكننا استعراض العناوين الرئيسية للتطبيقات المختلفة للجينوم من اجل ابراز الإمكانيات القائمة وتمثل الادوات المطورة ثورة حقيقة في العلوم الحياتية سيبقى اثرها طاغيا في نمط تفكيرنا في الانظمة الحية :

- يستطيع علم الجينوم المساعد التعرف الى الامراض المعدية.

أنتجت ثورة علم الجينوم ملايين الجينات الجيدة التي هي قيد البحث والدراسة ، ان قدرة علم الجينوم على تحسين صحة الانسان كبيرة فالطفرات في جين معين يمكنها تفسير بعض الامراض الوراثية ، وليس معظمها ووجود الجينومات المتكاملة فان احتمال الكشف عن امراض في الانسان والحيوان والنبات قد تحسنت الى حد كبير .

- علم الجينوم يظهر تأثير مباشر في نواحي التشخيص حيث أن التقنيات المحسنة واكتشاف الجينات يحسن عملية تشخيص الاضطرابات الوراثية . وتستخدم وسائل التشخيص ايضا للتعرف الى الافراد فمثلا التكرارات الترادفية القصيرة هي ادوات تشخيصية جنائية تستخدم للتعرف الى بقايا ضحايا الحادي عشر من سبتمبر 2001 اي الهجوم الارهابي على مبنى التجارة العالمي في مدينة نيويورك .

ان هجمات الحادي عشر من سبتمبر قد زادت من الوعي العام حول الأسلحة البيولوجية ، فعندما بدأت حالات الجمرة الخبيثة في الظهور في خريف عام 2001 ، ساعد تعاقب الجينوم على اكتشاف مصادر هذه البكتيريا القاتلة وفيما اذا تم هندستها وراثيا لتصبح اكثر فتكا .

- يستطيع علم الجينوم المساعد على تحسين المحاصيل الزراعية .

بالنظر علي مستوى العالم نجد ان الغذاء هو المعوق الوحيد لصحة الانسان معظم الحماس المصاحب للعمل في جينوم الارز مبنى على امكانية تحسين المحصول ونوعية المادة الغذائية في الارز والحبوب الاخرى في العالم ويعد الارز الذهبي مثلا على تحسين الغذاء من خلال مقاربات وراثية يأخذ ثلث سكان العالم نصف سعراتهم الحرارية من الارز، وفي بعض المناطق يستهلك بعض الافراد لغاية 1.5 كجم من الارز يوميا اكثر من 500 مليون طن من الارز يتم انتاجها سنويا غير ان هذه الكمية قد تصبح غير كافية في المستقبل .

وبسبب التقدم العلمي الكبير الذي حدث في مجال الانتاج والتقنيات الزراعي فقد تضاعف انتاج العالم من الحبوب خلال الخمسين سنة السابقة وبزيادة 1% من الاراضي الزراعية فالعالم الان يزرع في أرض مساحتها تعادل مساحة امريكا الجنوبية ودون التقدم العلمي في السنوات الخمسين الماضية كان على الانسان زراعة نصف الكرة الارضية الشمالي حتي ينتج ما يكفي العالم .

مع الاسف فان استهلاك الماء بسبب المحاصيل قد ازداد ثلاثة اضعاف في تلك المدة وبدأت نوعية الاراضي الزراعية في التناقص بسبب تعرية التربة ، يعاني العلماء ايضا من أثر التغير المناخي على الزراعة في العالم ، فزيادة المحاصيل ونوعيتها خصوصا في الارض الزراعية الهامشية سوف تعتمد على كثير من العوامل ، الا ان الهندسة الوراثية المبنية على الاكتشافات عن طريق مشروعات علم الجينوم يمكن ان تسهم بشكل كبير في الحل . تنتج معظم المحاصيل الزراعية في الولايات المتحدة اقل من نصف امكاناته الجينية بسبب الاجهاد البيئي (الملوحة ، الماء ، الحرارة) واكالات الاعشاب والامراض ، ان التعرف الى الجينات التي تمنح المقاومة للإجهاد البيئي والابوئة هو مركز اهتمام كثير من مشروعات الابحاث الجينومية . وسيحسن سهولة الوصول الى تعاقبات الجينومات جميعها من فرص التعرف الى الجينات الاساسية والمهمة .

- يثير علم الجينوم موضوعات اخلاقية تتعلق بملكية المعلومات الوراثية .

إن علم الجينوم قد يكون مصدرا لتحد أخلاقي ومأزق أحدهما هو براءة اختراع الجين ، في الحقيقة ان استخدام الجين وليس الجين نفسه هو الخاضع لبراءة الاختراع فمن اجل براءة اختراع الجين يجب ان يكون الناتج ووظيفته معروفين.

ان ائتلاف الجينوم العام مدعوما من تمويل اتحادي كان مدفوعا بالاعتقاد ان تعاقب الجينومات يجب ان يكون متوافرا بحرية للجميع ويجب الا يكون مقيدا بامتياز معين تمتلك الشركات الخاصة براءة اختراع وظائف الجينات ولكنها تفتح المجال امام الاطلاع على التعاقب مع بعض القيود احيانا فالعلوم الطبيعية فاوضت البحوث الممولة من القطاع العام من اجل الربح لعشرات السنين غير ان هذا الامر جديد على علماء الحياة . وعلى الرغم من اننا نتحدث عن جينوم الانسان فان كلا منا لديه جينوم خفي يميزه عن غيره من البشر ويمكن استخدامه للتعرف اليه فالاضطرابات الوراثية مثل التليف الكيسي مرض هنتجتون يمكن التعرف اليهما عن طريق الدراسة المسحية ، إلا ان علم الجينوم سيزيد وبشكل كبير من عدد الصفات التي يمكن التعرف اليها .

## المراجع :

- 1- علم الأحياء تأليف : بيتر ريفن وجورج ب لوسوس /كينيث ماسون ترجمة :العبيكان المملكة العربية السعودية ط1 اصدار 2008. سلسلة الكتب الجامعية المترجمة .
- 2-د:على حسن بهكلي ,علم الأحياء الدقيقة للمهن الصحية ط3 –2007.
- 3-علم الأحياء- تأليف (د. رحاب رشيد طه-دار الكتاب الجامعي-2012م).
- 4-العلوم البيولوجية د:كامل مهدي-دار القرا 2009



# الفصل الثالث التنفس



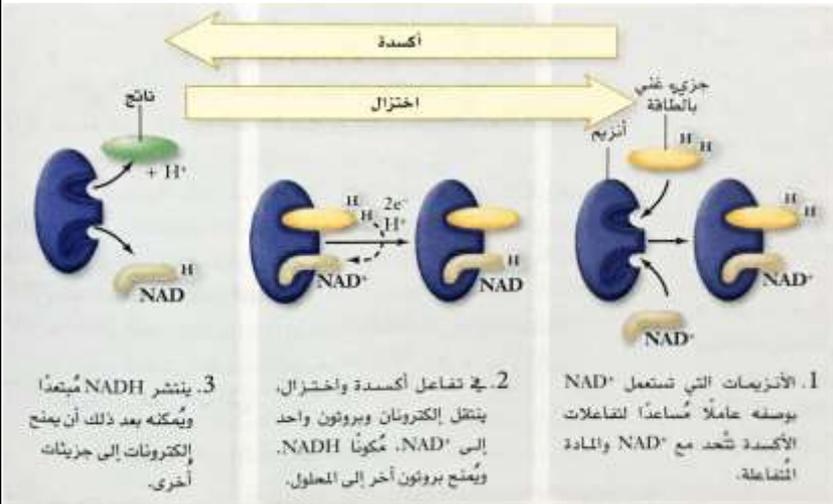
## الفصل الثالث

### التنفس Respiration

#### 1- التنفس الخلوي

التنفس الخلوي هو الأكسدة الكاملة للجلوكوز.

إن الذرة التي تفقد إلكترونات يُقال: إنها تأكسدت ، والذرة التي تكسب إلكترونات يُقال عنها: إنَّها اختزلت، ترتبط تفاعلات الأكسدة على الأغلب مع تفاعلات الاختزال في الأنظمة الحيوية، وهذه التفاعلات المزدوجة تُسمَّى تفاعلات Redox reactions – اختزال أكسدة . تستفيد الخلايا من تفاعلات اختزال- أكسدة وبتحفيز من الأنزيمات لكي تستخلص الطاقة من مصادر الغذاء وتحولها إلى ATP .



#### 1-1 تفاعلات الأكسدة – والاختزال

تقوم تفاعلات الأكسدة والاختزال بدور مهم في تدفق الطاقة خلال الأنظمة الحيوية لأنَّ الإلكترونات التي تعبر من ذرة إلى أخرى تحمل معها الطاقة. تعتمد كمية الطاقة التي يملكها الإلكترون على موقعه المداري أو على مستوى الطاقة، حول نواة الذرة. وعندما يغادر الإلكترون ذرة إلى أخرى في تفاعل أكسدة – واختزال، تنتقل طاقة الإلكترون معه.

#### الشكل 1

الشكل (1) يوضح آلية عمليتي الأكسدة والاختزال.

تحفز انزيمات معينة تفاعل الأكسدة والاختزال، مُتضمِّناً جزيئاً غنياً بالطاقة، بمُساعدة عامل مُساعد هو نيكوتين أميد ثنائي النيوكليوتيد ( $NAD^+$  Nicotinamide adenine dinucleotide). في هذا التفاعل يقبل  $NAD^+$  زوجاً من الإلكترونات من المادة الأساس مع بروتون واحد، ليتكون  $NADH$ ، ليتم إطلاق الناتج المُؤكسد من الموقع النشط للأنزيم، على شكل  $NADH$ . في عملية حصاد الطاقة الخلوية ككل، تحدث هناك العشرات من تفاعلات الأكسدة والاختزال، وتعمل كثير من الجزيئات في ذلك، بما في ذلك  $NAD^+$  بوصفها مستقبلات للإلكترونات، وتنتقل الطاقة خلال كل انتقال للإلكترونات. يُمكن لهذه الطاقة أن تلتقط وتُستعمل لتكوين ATP أو لتكوين روابط كيميائية أخرى، أما الباقي فيضيع على شكل حرارة.

في نهاية هذه العملية تكون الإلكترونات عالية الطاقة (من الروابط الكيميائية الابتدائية) قد فقدت طاقتها، وتنتقل الإلكترونات فقيرة الطاقة إلى آخر مُستقبل للإلكترونات. عندما يكون هذا المُستقبل هو الأكسجين، تُسمَّى هذه العملية التنفس الهوائي Aerobic respiration، ولكن عندما يكون مُستقبل الإلكترونات الأخير جزيئاً غير عضوي، غير الأكسجين، تُسمَّى هذه العملية التنفس اللاهوائي Anaerobic respiration، أما عندما يكون المُستقبل جزيئاً عضويًا فإن العملية تُسمى التخمير Fermentation.

## 1-2 حرق الكربوهيدرات

هناك اختلاف قليلة من الناحية الكيميائية، بين هدم الكربوهيدرات في الخلية من جهة، وحرق الخشب في المدفأة من جهة أخرى، في الحالتين المواد المتفاعلة هي الكربوهيدرات والأكسجين، والنواتج هي: ثاني أكسيد الكربون، وماء، و طاقة:



(مركب طاقة + حرارة) طاقة + ماء + ثاني أكسيد الكربون  $\rightarrow$  أكسجين + سكر الجلوكوز

التغير في الطاقة الحرة مقداره 686 كيلوكالوري/ مول من الجلوكوز (أو 2870 كيلو جول/ تحت الظروف المعيارية (أي على درجة حرارة الغرفة، 1 ضغط جوي، وهكذا). في الظروف الموجودة داخل الخلية، يُمكن أن تصل كمية الطاقة المنطلقة إلى نحو 720 كيلوكالوري/ مول (3012 كيلوجول/ مول) من الجلوكوز. وهذا يعني أنه تحت الظروف الخلوية الحقيقية، تنطلق طاقة أكثر من تلك التي تنطلق تحت الظروف المعيارية. تنطلق الكمية نفسها من الطاقة سواء عند أكسدة الجلوكوز أو حرقه، لكن عندما يتم حرقه، تُطلق معظم الطاقة على شكل حرارة. تحصد الخلايا الطاقة المفيدة من هدم الجلوكوز (باستخدام جزء من الطاقة) لتوليد ATP.

## 1-3 تؤدي نواقل الإلكترونات دورًا مهمًا في أيض الطاقة

خلال التنفس، يتأكسد الجلوكوز إلى  $CO_2$ ، ولكن إن أعطيت الإلكترونات مباشرةً للأكسجين، فسيكون التفاعل احتراقاً، وستشتعل الخلايا. بدلاً من ذلك تنقل الخلايا الإلكترونات إلى نواقل إلكترونات وسطية، ومن ثم إلى  $O_2$  أخيراً. تُستخدم أشكال عدة من نواقل الإلكترونات في هذه العملية: نواقل ذائبة تُحرك الإلكترونات من جزيء إلى آخر، نواقل مُرتبطة بالغشاء مُشكلة سلسلة أكسدة واختزال، ونواقل تتحرك خلال الغشاء. الصفة المُشتركة لهذه النواقل جميعها أن بإمكانها التأكسد والاختزال بشكل قابل للانعكاس. بعض هذه النواقل، مثل السييتوكرومات المُحتوية على الحديد، يُمكنها أن تنقل الإلكترونات، وبعضها ينقل الإلكترونات والبروتونات.

يُعدّ  $NAD^+$  أحد أهم نواقل الإلكترون (والبروتون). يتكوّن جزيء  $NAD^+$  من نيوكليوتيدين مُرتبطين معاً. النيكليوتيدان المُكوّنان لـ  $NAD^+$  نيكوتين أمايد أحادي الفوسفات (NMP) وأدينوسين أحادي الفوسفات (AMP)، مُرتبطان رأساً لرأس عن طريق مجموعات الفوسفات الخاصة بهما. للنيوكليوتيدين وظائف مُختلفة في جزيء  $NAD^+$ : يعمل AMP بوصفه أساساً يُوفّر الشكل الذي تُميّزه كثير من الأنزيمات، في حين يوفر NMP الجزء النشط في الجزيء، حيث إنه سهل الاختزال، أي إنه يقبل الإلكترونات بسهولة.

عندما يكتسب  $NAD^+$  إلكترونين وبروتوناً من الموقع النشط فإنه يختزل إلى  $NADH$ . يحمل جزيء  $NADH$  الآن إلكترونين مُحمّلين بالطاقة، ويُمكنه أن يعطيها لجزيئات أخرى مُختزلاً إياها. إن هذه المقدرة على تقديم إلكترونات عالية الطاقة مُهمة جداً لكل من أيض الطاقة وللبناء الحيوي لجزيئات عضوية عدة، مثل الدهون والسكريات. في الحيوانات عندما يصبح ATP متوفراً بكثرة تتحول قوة اختزال  $NADH$  المُتراكم نحو تزويد خامات أحماض دهنية بالإلكترونات عالية الطاقة، مُختزلةً إياها لتشكيل دهون، و تخزين الطاقة التي في الإلكترونات.

## 1- 4 يحصد الأيض الطاقة على مراحل

بشكل عام، كلما كان إطلاق الطاقة أكبر في أي مرحلة، زاد انطلاق الطاقة على شكل حرارة، وقل توافرها للاستعمال بطرق أكثر فائدة. في عملية احتراق البنزين، تنطلق الكمية نفسها من الطاقة لو انفجر البنزين كله في خزان وقود السيارة دفعة واحدة، أو لو اشتعل في سلسلة من الانفجارات الصغيرة داخل الاسطوانات، بإطلاق الطاقة من البنزين قليلاً قليلاً، يكون حصاد الفعالية أكبر، ويمكن استعمال الطاقة أكثر لدفع المكبس، وتحريك السيارة. ينطبق المبدأ نفسه على أكسدة الجلوكوز داخل الخلية، فإذا انتقلت الإلكترونات كلها إلى الأكسجين بخطوة واحدة، مُطلقة الطاقة كلها دفعة واحدة فإن الخلية سوف تستعيد القليل من تلك الطاقة في شكل مفيد. بدلاً من ذلك، تحرق الخلايا وقودها لحد قريب مثلما تفعل السيارة، أي قليلاً قليلاً.

تُنزَع الإلكترونات من روابط C-H في الجلوكوز على مراحل في سلسلة من تفاعلات تحفزها الأنزيمات، ويُشار إليها بشكل جماعي بالتحليل الجلوكوزي ودورة كربس. تُنزَع الإلكترونات عن طريق نقلها إلى  $NAD^+$  أو إلى نواقل إلكترونات أخرى.

لا تنطلق الطاقة التي تنتج عن تفاعلات الأكسدة هذه كلها دفعة واحدة، إذ تمرر الإلكترونات إلى مجموعة أخرى من نواقل الإلكترونات تدعى سلسلة نقل الإلكترونات Electron Transport Chain، موجودة في الغشاء الداخلي للميتوكوندريا. وتنتج حركة الإلكترونات عبر هذه السلسلة طاقة وضع على كل تدرج كهروكيميائي.

## 1- 5 يؤدي ATP دوراً مركزياً في الأيض

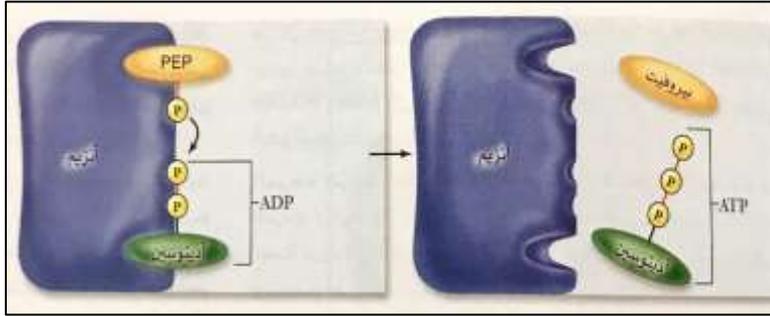
تستعمل الخلايا ATP لتحريك معظم تلك الأنشطة التي تحتاج إلى عمل أحد أكثر الأنشطة وضوحاً هو الحركة. إذ تنسحب ألياف دقيقة جداً داخل الخلية العضلية فوق بعضها، فتقبض عندئذ العضلات. ويمكن للميتوكوندريا أن تتحرك متراً أو أكثر على طول خلايا عصبية ضيقة تمتد من نخاعك الشوكي إلى قدميك. وتُسحب الكروموسومات بعيداً عن بعضها عن طريق الأنيبيبات الدقيقة خلال انقسام الخلية. هذه الحركات كلها يلزمها صرف طاقة عن طريق التحلل المائي لـ ATP. تستعمل الخلايا ATP لتحريك التفاعلات الماصة للطاقة، التي لا تحدث بشكل تلقائي دون ذلك.

كيف يقود ATP تفاعلاً ماصاً للطاقة؟ يمتلك الأنزيم المُحفِّز لتفاعل مُعيَّن موقعين للارتباط على سطحه: أحدهما للمادة الأساس والآخر لـ ATP. يكسر موقع ارتباط ATP جزيء ATP، مُطلقاً أكثر من 7 كيلوكالوري من الطاقة الكيميائية. تدفع هذه الطاقة المادة الأساس على الموقع الآخر «نحو الأعلى» في سلم الطاقة لتصل إلى طاقة التنشيط محرقة التفاعل الماص للطاقة. لذلك، فإن التفاعل الماص المرتبط بالتحلل المائي لـ ATP يُصبح مُمكن الحدوث.

إن الهدف النهائي من الخطوات المتعددة للتنفس الخلوي هو إنتاج ATP. إن تصنيع ATP هو تفاعل ماص للطاقة، وهذا يتطلب من الخلية القيام بتفاعلات طاردة للطاقة من أجل هذا التصنيع.

## 2- أكسدة الجلوكوز

تستطيع الخلايا صناعة ATP من أكسدة الجلوكوز عن طريق آليتين رئيسيتين مختلفتين، هما:



الشكل 2

(1) الفسفرة على مستوى المادة

Substrate level الأساس

phosphorylation: يتكوّن

ATP عن طريق نقل مجموعة

فوسفات مباشرة إلى ADP من

وسيط أو جزيء حامل للفوسفات

كما هو موضح في الشكل (2).

خلال التحلل الجلوكوزي

Glycolysis، أو التحطم المبدئي

للجلوكوز تغيّر الروابط الكيميائية مواقعها في تفاعلات توفر الطاقة اللازمة لتكوين ATP عن طريق

الفسفرة على مستوى المادة الأساس .

(2) الفسفرة التأكسدية: Oxidative phosphorylation يتكوّن ATP عن طريق أنزيم بناء ATP

(ATP synthase) مُستعملا طاقة ناتجة عن فرق تركيز (تدرّج) بروتوني ( $H^+$ ). هذا التدرج

يتشكل طريق عن إلكترونات عالية الطاقة نتجت عن أكسدة الجلوكوز، وتمر عبر سلسلة نقل

الإلكترونات. مع تناقص طاقة هذه الإلكترونات، تُمنح عندئذ للأكسجين، وهذا سبب التسمية الفسفرة

التأكسدية. يستعمل أنزيم بناء ATP الطاقة الناتجة عن تدرّج البروتونات لتحفيز التفاعل:



تنتج حقيقيّات النواة وبدائيات النواة الهوائية الغالبية العظمى من ATP الخاص بها بهذه الطريقة. في معظم

المخلوقات، هاتان العمليتان مندمجتان. لحصاد الطاقة من أجل صناعة ATP بوجود الأكسجين، تقوم الخلية

بإجراء سلسلة معقدة من التفاعلات المُحفّزة أنزيمياً التي تقع في أربع مراحل: تلتقط المرحلة الأولى الطاقة عن

طريق الفسفرة على مستوى المادة الأساس من خلال التحلل الجلوكوزي؛ تجري المراحل الثلاث اللاحقة تنفساً

هوائياً عن طريق أكسدة الناتج النهائي للتحلل الجلوكوزي مُكوّنة ATP.

الشكل (3) يوضح الصورة العامة لمرحل عملية التنفس وتكون مركب الطاقة ATP.

**المرحلة الأولى التحلل الجلوكوزي:** مسار كيميائي حيوي مُكوّن من 10 تفاعلات تُسمى التحلل الجلوكوزي

الذي يُنتج ATP عن طريق الفسفرة على مستوى المادة الأساس. توجد الانزيمات التي تُحفّز تفاعلات التحلل

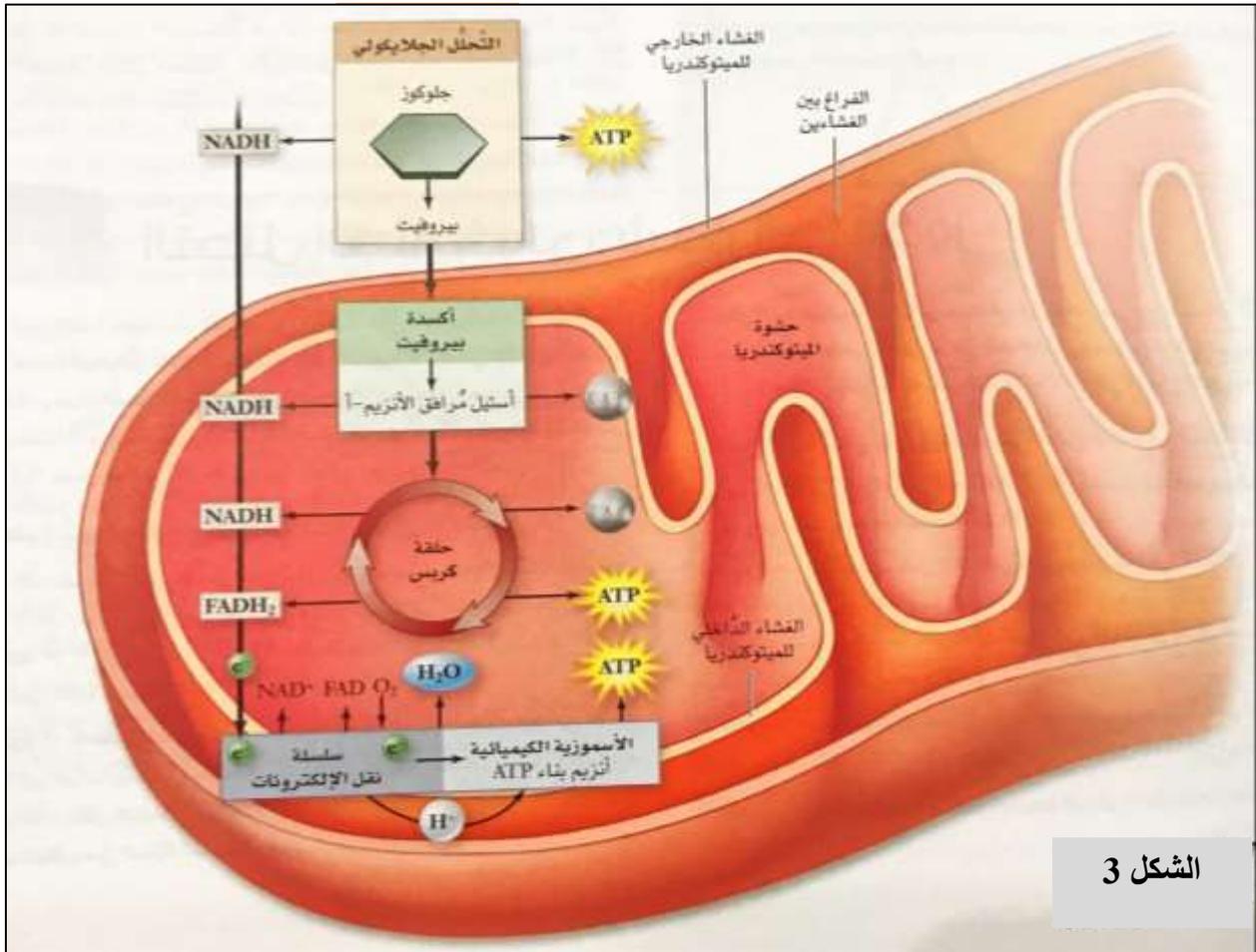
الجلوكوزي في سيتوبلازم الخلية، غير مُرتبطة مع أي غشاء أو عضيّة.

يُستهلك جزيئاً 2ATP لكلّ جزيء جلوكوز، مبكراً في بدء المسار، وينتج أربعة جزيئات 4ATP لكلّ جزيء

جلوكوز يتم هدمه. إضافة إلى ذلك، يتم حصاد أربعة إلكترونات من الروابط الكيميائية في الجلوكوز ويتم حملها

عن طريق NADH من أجل الفسفرة التأكسدية. يُنتج التحلل الجلوكوزي جزيئين من البيروفيت Pyruvate

غنيين بالطاقة من كل جزيء جلوكوز يدخل المسار. ويُمكن أن تُحصَد الطاقة المُتبقية في مراحل لاحقة.



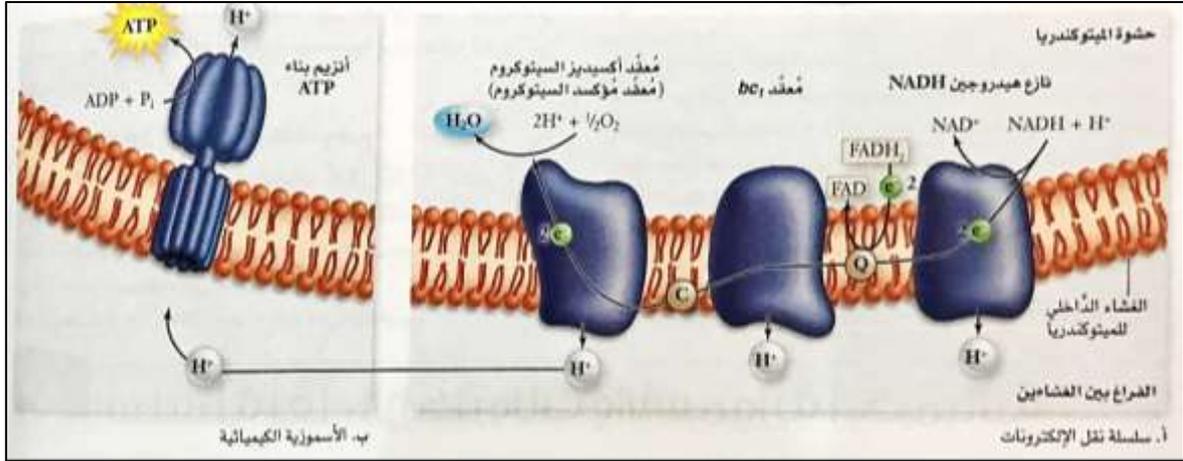
الشكل 3

**المرحلة الثانية أكسدة البيروفيت:** في المرحلة الثانية، يتم تحويل البيروفيت إلى ثاني أكسيد الكربون وجزء ثنائي الكربون يُدعى أستيل مُرافق الأنزيم -أ acetyl CoA. يُختزل جزء واحد من  $NAD^+$  إلى  $NADH$  لكل جزء بيروفيت يتم تحويله، وذلك من أجل حمل إلكترونات يُمكن أن تستعمل لصناعة ATP، تذكر أن جزيئين من البيروفيت ينتجان من كل جزء من الجلوكوز.

**المرحلة الثالثة دورة كريس:** تدخل المرحلة الثالثة جزء أستيل مُرافق الأنزيم - أ إلى حلقة من تسعة تفاعلات تُسمى دورة كريس Krebs cycle التي سميت كذلك على اسم العالم الكيميائي الألماني هانز كريس، الذي اكتشفها. تُسمى دورة كريس أيضاً دورة حمض الستريك Citric acid cycle بسبب حمض الستريك أو السترات، الذي يتكوّن في أول خطوة فيها، وتُسمى، بشكل أقل شيوعاً حلقة الحمض ثلاثي مجموعة الكربوكسيل Tricarboxylic acid cycle لأن السترات يمتلك ثلاث مجموعات كربوكسيل.

في كل دورة من دورات كريس، ينتج ATP واحداً عن الفسفرة على مستوى المادة الأساس، وعدداً كبيراً من الإلكترونات تُنتزع باختزال  $NAD^+$  إلى  $NADH$  و  $FAD$  إلى  $FADH_2$ . يزود كل جلوكوز واحد دورة كريس بجزئي (أستيل مُرافق الأنزيم - أ) مُعطياً دورتين اثنتين لدورة كريس.

المرحلة الرابعة سلسلة نقل الإلكترونات والأسموزية الكيميائية: في المرحلة الرابعة، يتم نقل الإلكترونات عالية الطاقة التي يحملها NADH إلى سلسلة من نواقل الإلكترونات التي تستخلص طاقة الإلكترونات بشكل تدريجي، وتستخدمها في ضخ بروتونات عبر الغشاء. الشكل (4) يوضح مرحلة سلسلة نقل الإلكترونات.



#### الشكل 4

التدرج البروتوني الناتج عن نقل الإلكترونات يستعمله أنزيم بناء ATP لإنتاج ATP. هذا الاستغلال لتدرج البروتونات لتحريك صناعة ATP يدعى الأسموزية الكيميائية Chemiosmosis التي هي أساس الفسفرة التأكسدية. تحدث أكسدة البيروفيت، وتفاعلات دورة كربس، وإنتاج ATP عن طريق سلاسل نقل الإلكترونات داخل أشكال عدة من بدائيات النوى وداخل الميتوكوندريا في حقيقيات النوى جميعها.

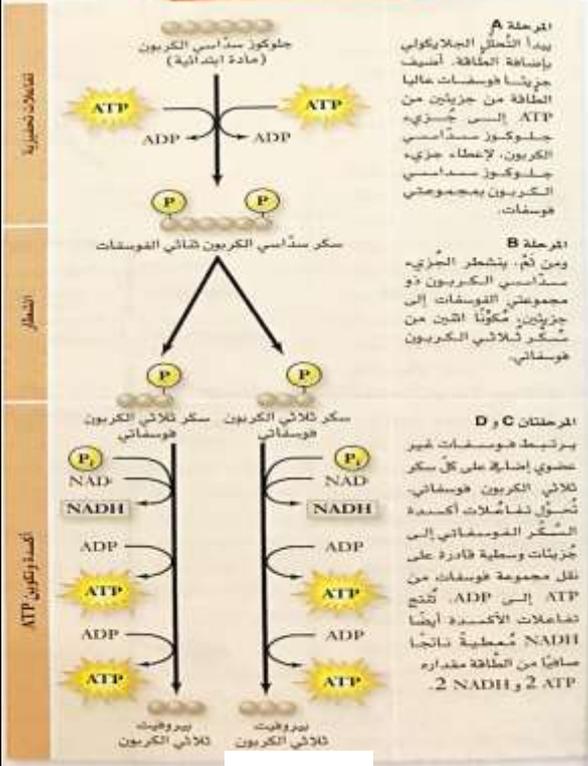


### 3- التحلل الجلوكوزي : شطر الجلوكوز

يمكن لجزيئات الجلوكوز أن تتفكك بطرق عدة، لكن المخلوقات البدائية أنشأت عملية هادمة للجلوكوز تطلق طاقة حرة كافية لتكوين ATP في تفاعلات تُحفظها أنزيمات. يحدث التحلل الجلوكوزي في السيتوبلازم، ويُحوّل الجلوكوز إلى جزيئين، في كل منهما 3 ذرات كربون، ويُدعى بيروفيت. تُنتج الخليّة جزيئين من ATP بشكل صاف، لكلّ جزيء من جلوكوز يمرّ عبر هذا التحول. الشكل (5) يوضح خطوات مرحلة التحلل الجلوكوزي.

#### 1-3 التحفيز يُحوّل الجلوكوز إلى شكل سهل الانشطار

يتكوّن النصف الأول من التحلل الجلوكوزي من خمسة تفاعلات متتابعة، تُحوّل جزيئاً واحداً من جلوكوز إلى جزيئين من مركب ثلاثي الكربون يُدعى جليسر ألدهيد فوسفات G3P. تحتاج هذه التفاعلات إلى صرف ATP لهذا، فهي عملية ماصة للطاقة.



الشكل 5

### الخطوة A: تحفيز الجلوكوز:

تحفز ثلاثة تفاعلات الجلوكوز عن طريق تحويله إلى مركب يُمكنه أن ينشطر بسهولة إلى جزيئين مُفسرين، كلٌ منهما فيه 3 كربونات. ينقل تفاعلات من هذه التفاعلات الفوسفات من ATP. لهذا، هذه الخطوة تتطلب من الخلية استخدام جزيئين من ATP.

### الخطوة B: شطر وإعادة ترتيب:

في أول تفاعل من زوج التفاعلات المُنبقية، ينشطر المُركَّب سداسي الكربون في الخطوة أ إلى جزيئين ثلاثي الكربون. الأول هو G3P والثاني يتم تحويله بعد ذلك بتفاعل ثانٍ إلى G3P. في النصف الثاني من التَّحلل الجلوكوزي تُحوَّل خمسة تفاعلات إضافية G3P إلى بيروفيت بعملية مُنتجة للطاقة تُولِّد ATP.

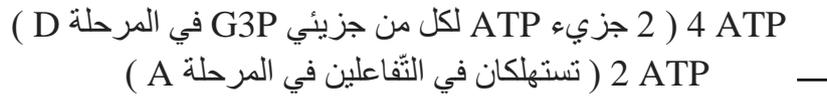
### الخطوة C: الأكسدة

ينتقل إلكترونان (وبروتون واحد) من G3P إلى  $NAD^+$  ليتكون NADH. يُضاف أيضاً جزيء Pi إلى G3P ليتكون جليسرال 1, 3 ثنائي الفوسفات. تنتقل مجموعة الفوسفات لاحقاً إلى ADP عن طريق الفسفرة على مستوى المادة الأساس لتسمح بإنتاج صافٍ من ATP.

### الخطوة D: توليد ATP

تحول أربعة تفاعلات جليسرال 1, 3 ثنائي الفوسفات إلى بيروفيت. وتولد هذه العملية جزيئين من ATP لكل G3P أنتج في الخطوة ب.

ولأن جزيء الجلوكوز الواحد يتم شطره إلى جزيئي G3P، فإن التفاعل الكلي يُعطي ناتجاً صافياً مقداره جزيئان من ATP وكذلك جزيئان من NADH وجزيئان من حمض البيروفيت:



2 ATP (الناتج الصافي في العملية كلها)

ينتج التَّحلل المائي لجزيء ATP واحد طاقة مقدارها 3.7 كيلوكالوريات/مول في الظروف المعيارية. لهذا تحصد الخلايا حداً أقصى مقداره (كيلوكالوريات) من الطاقة لكل مول جلوكوز من التَّحلل الجلوكوزي.

### 2-2 يجب إعادة تدوير NADH حتى يستمر التنفس

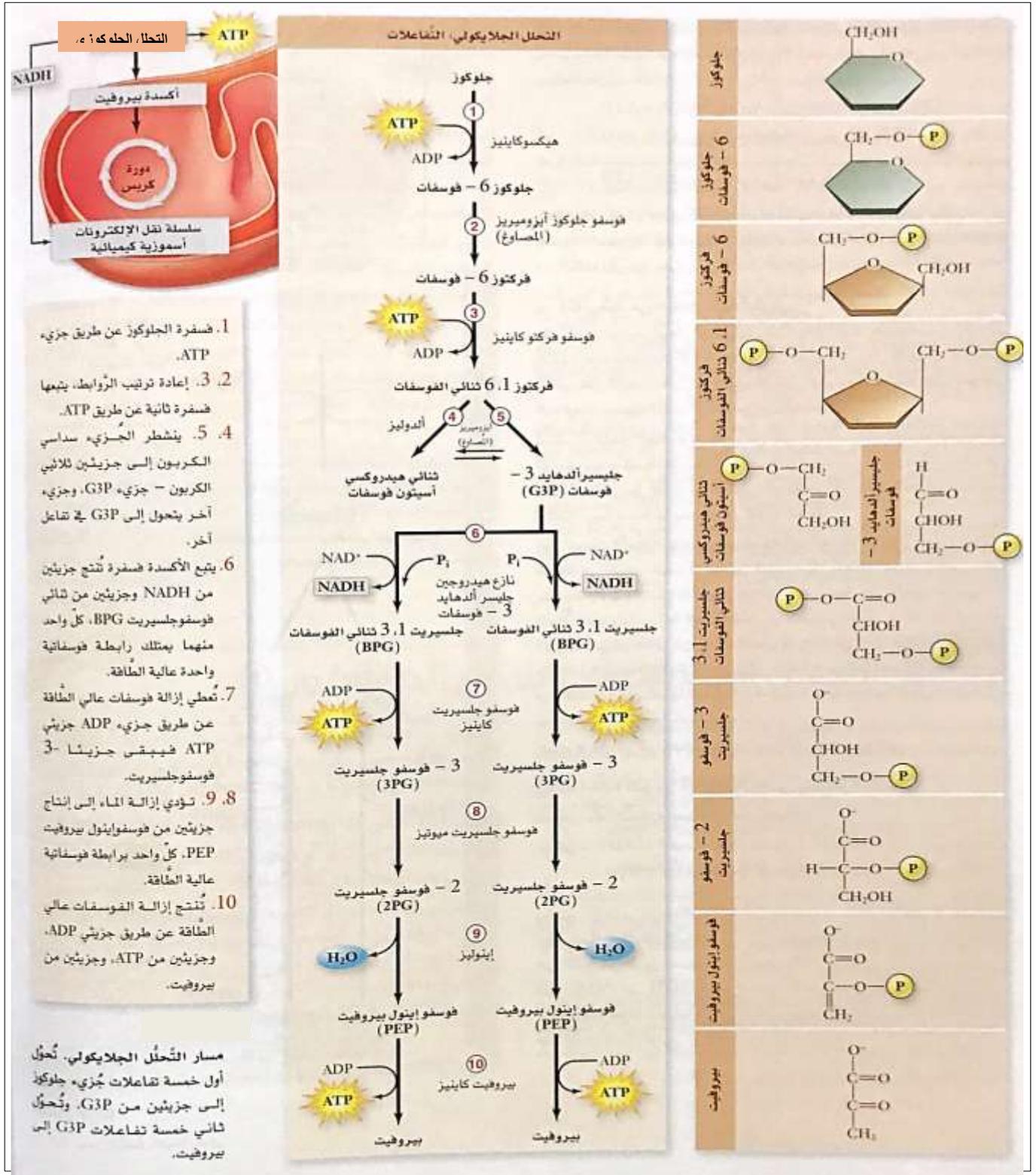
تفحص برهة المُعادلة الصافية للتَّحلل الجلوكوزي:



يُمكنك أن ترى أنّ هناك ثلاثة تغيرات تحدث خلال التَّحلل الجلوكوزي:

- (1) يتحوّل الجلوكوز إلى جزيئين من بيروفيت
- (2) يتحوّل جزيئان من ADP إلى ATP عن طريق الفسفرة على مستوى المادة الأساس.
- (3) يتحول جزيئان من  $NAD^+$  إلى NADH.

يترك هذا الأمر الخلية تعاني مشكلتين، هما: استخلاص الطاقة المُتبقية في جزئي البيروفيت وإعادة تكوين  $NAD^+$  للإبقاء على التحلل الجلوكوزي. خطوات التحلل الجلوكوزي والتركيب الكيميائي للمركبات المتكونة خلال هذه الخطوات يوضحها الشكل (6).



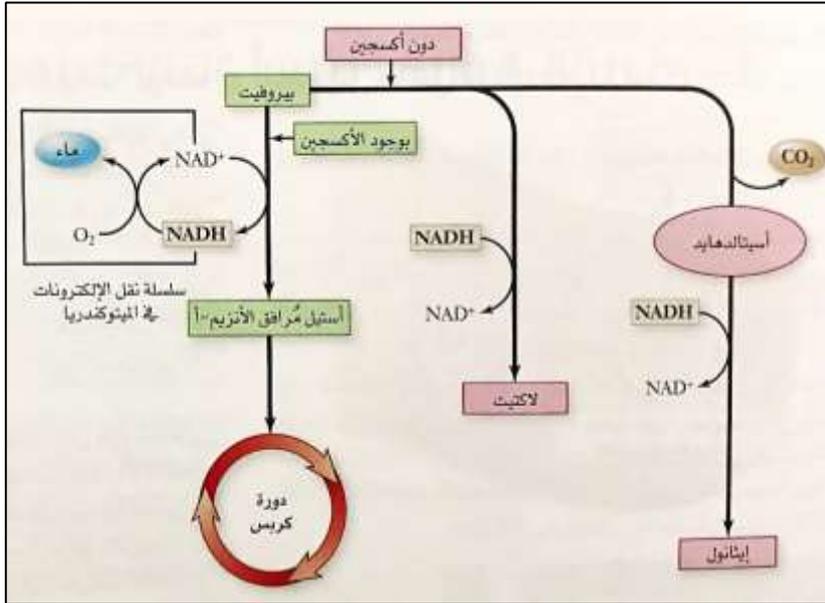
الشكل 6

### 2-3 إعادة تدوير NADH

يُمكن للخلية أن تُنتج باستمرار ATP للقيام بأنشطتها، مادام أن جزيئات الغذاء التي يتم تحويلها إلى جلوكوز متوافرة. بعملها هذا، تُراكم الخلية NADH وتنفق مخزون  $NAD^+$ . لا تحتوي الخلية على كمية كبيرة من  $NAD^+$ . ولهذا، فحتى يستمر التحوّل الجلوكوزي يجب أن يُعاد تدوير NADH إلى  $NAD^+$ . بعض الجزيئات الأخرى، يجب عليها بشكل حتمي أن تقبل الإلكترونات المأخوذة من G3P وأن يتمّ اختزالها. يُمكن أن تقوم بهذه المهمة الأساسية عمليتان:

1. **التنفس الهوائي Aerobic Respiration:** يعد الأكسجين مستقبل الكترولونات ممتاز. خلال سلسلة من عمليات انتقال الإلكترونات تؤخذ الإلكترونات من G3P وتعطى إلى الأكسجين مكونة الماء. تحدث هذه العملية في ميتوكوندريا خلايا حقيقيات النواة بوجود الأكسجين، ولأن الهواء غني بالأكسجين فإنه يشار إلى هذه العملية أيضاً بالأيض الهوائي Aerobic Metabolism. يتم أيضاً إنتاج كمية مناسبة من ATP.
2. **التخمير Fermentation:** عندما يكون الأكسجين غير متوافر فإن جزيئاً عضويّاً مثل أسيتالدهيد في تخمر النبيذ يمكن أن يقبل الكترولونات بدلاً عن الأكسجين. يؤدي هذا التفاعل دوراً مهماً في أيض معظم المخوقات، حتى القدرة منها على التنفس الهوائي.

### 3-3 مصير البيروفيت



يعتمد مصير البيروفيت الذي أنتجه التحلل الجلوكوزي على حدوث أي طريقة من هاتين الطريقتين. يبدأ مسار التنفس الهوائي بأكسدة البيروفيت إلى أستيل مرافق الإنزيم (أ)، الذي يحدث له المزيد من الأكسدة في سلسلة من التفاعلات تدعى دورة كريبس. أما مسار التخمير فعلى العكس من ذلك، يستعمل الاختزال لكل البيروفيت أو لجزء منه لأكسدة  $NADH$  إلى  $NAD^+$  مرة أخرى. الشكل (7) يوضح المسارات المختلفة لمصير مركب البيروفيت.

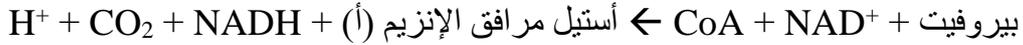
شكل 7

### 4- أكسدة البيروفيت لإنتاج أستيل مرافق الإنزيم (أ)

بوجود الأكسجين تستمر أكسدة الجلوكوز الذي بدأ في التحلل الجلوكوزي الذي يغادر بإعطاء البيروفيت. في المخوقات حقيقية النواة، يحدث استخلاص المزيد من الطاقة من البيروفيت بشكل حصري داخل الميتوكوندريا. وفي بدائيات النواة تحدث تفاعلات مشابهة في السيتوبلازم، وعند الغشاء البلازمي. تحصد الخلية طاقة مناسبة من البيروفيت بخطوتين: الأولى، يتأكسد فيها البيروفيت إلى مركب ثنائي الكربون و  $CO_2$ ، مع انتقال الإلكترونات إلى  $NAD^+$  لإنتاج  $NADH$ . الثانية يتم فيها أكسدة المركب ثنائي الكربون إلى  $CO_2$  بتفاعلات دورة كريبس.

يتم أكسدة البيروفيت بتفاعل (نزع مجموعة الكربوكسيل) الذي ينزع ذرة الكربون من ثلاث ذرات كربون للبيروفيت. تغادر ذرة الكربون هذه على شكل  $CO_2$ . يتم ربط المركب ثنائي الكربون المتبقي، المسمى مجموعة الأستيل، مع مرافق الإنزيم (أ): هذا المركب الكلي الناتج يدعى أستيل مرافق الإنزيم (أ). يتم نقل زوج من الإلكترونات وبروتون مرتبط معهما إلى ناقل الإلكترونات  $NAD^+$ ، فيتم اختزاله إلى  $NADH$ ، ويُعطى بروتوناً ثانياً إلى المحلول.

يدخل في هذا التفاعل ثلاثة مراحل، ويحفز في داخل الميتوكوندريا عن طريق (مركب معقد عديد الإنزيمات MultiEnzyme Complex)، ينظم هذا المركب سلسلة من الخطوات الإنزيمية، لذلك لا تنتشر فيه المركبات الكيميائية الوسيطة بعيداً، ولا تدخل في تفاعلات أخرى. داخل المركب تقوم مكونات عديدة اليبنتيد بنقل المواد المتفاعلة من إنزيم إلى الإنزيم الذي يليه دون أن تتركها حرة. يعد إنزيم نازع هيدروجين بيروفيت Pyruvate dehydrogenase (وهو معقد انزيمي ينزع  $CO_2$  من البيروفيت) أحد أكبر الإنزيمات المعروفة فهو يحتوي على 60 تحت وحدة. يمكن تلخيص التفاعل كما يأتي:



يستعمل  $NADH$  الناتج لاحقاً في إنتاج  $ATP$ . تدخل مجموعة أستيل دورة كريبس، حيث يعاد تدوير مرافق الإنزيم (أ) لأكسدة بيروفيت آخر. ثم تكمل دورة كريبس أكسدة ذرات الكربون الأصلية في الجلوكوز.

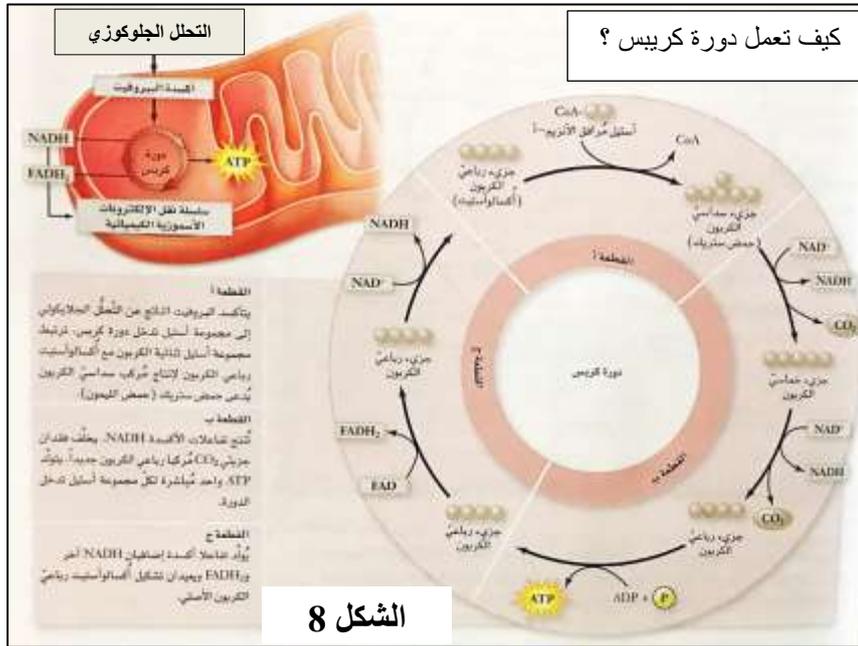
يتأكسد البيروفيت في الميتوكوندريا لإنتاج الأستيل مرافق الإنزيم (أ) و  $CO_2$ . هذا التفاعل هو رابط بين التحلل الجلايكولي وتفاعلات دورة كريبس، حيث أن الأستيل مرافق الإنزيم (أ) يستعمل في دورة كريبس.

## 5- دورة كريبس

في هذه المرحلة الثالثة، تؤكسد مجموعة الأستيل القادمة من البيروفيت في سلسلة من تسعة تفاعلات يطلق عليها دورة كريبس. تتم هذه التفاعلات في حشوة الميتوكوندريا. يوضح الشكل (8) خطوات هذه المرحلة.

في هذه الحلقة، تلتحم مجموعة الأستيل ثنائية الكربون في الأستيل مرافق الإنزيم (أ) مع جزيء رباعي الكربون يدعى الأكسالوأسيتايت. يتركب بذلك مركب سداسي ذرات الكربون ويدعى سترات، يدخل في سلسلة من تفاعلات

الأكسدة المطلقة للإلكترونات، ويتم خلالها فصل جزيئين من  $CO_2$ ، مستعيدة بذلك جزيء أكسالوأسيتايت. يستعمل الأكسالوأسيتايت المتكون مرة أخرى في الارتباط مع مجموعة أستيل أخرى في دورة أخرى لدورة كريبس. في كل دورة من دورات كريبس، تضاف مجموعة أستيل جديدة، وتضع ذرتا كربون على شكل جزيئين من  $CO_2$ ، وينتقل المزيد من الإلكترونات إلى نواقل الكترونية. تمر هذه الإلكترونات بعد ذلك في سلسلة نقل الإلكترونات لتحريك مضخات بروتونات Proton Pumps تولد  $ATP$ .



## 1-5 خطوات دورة كربس

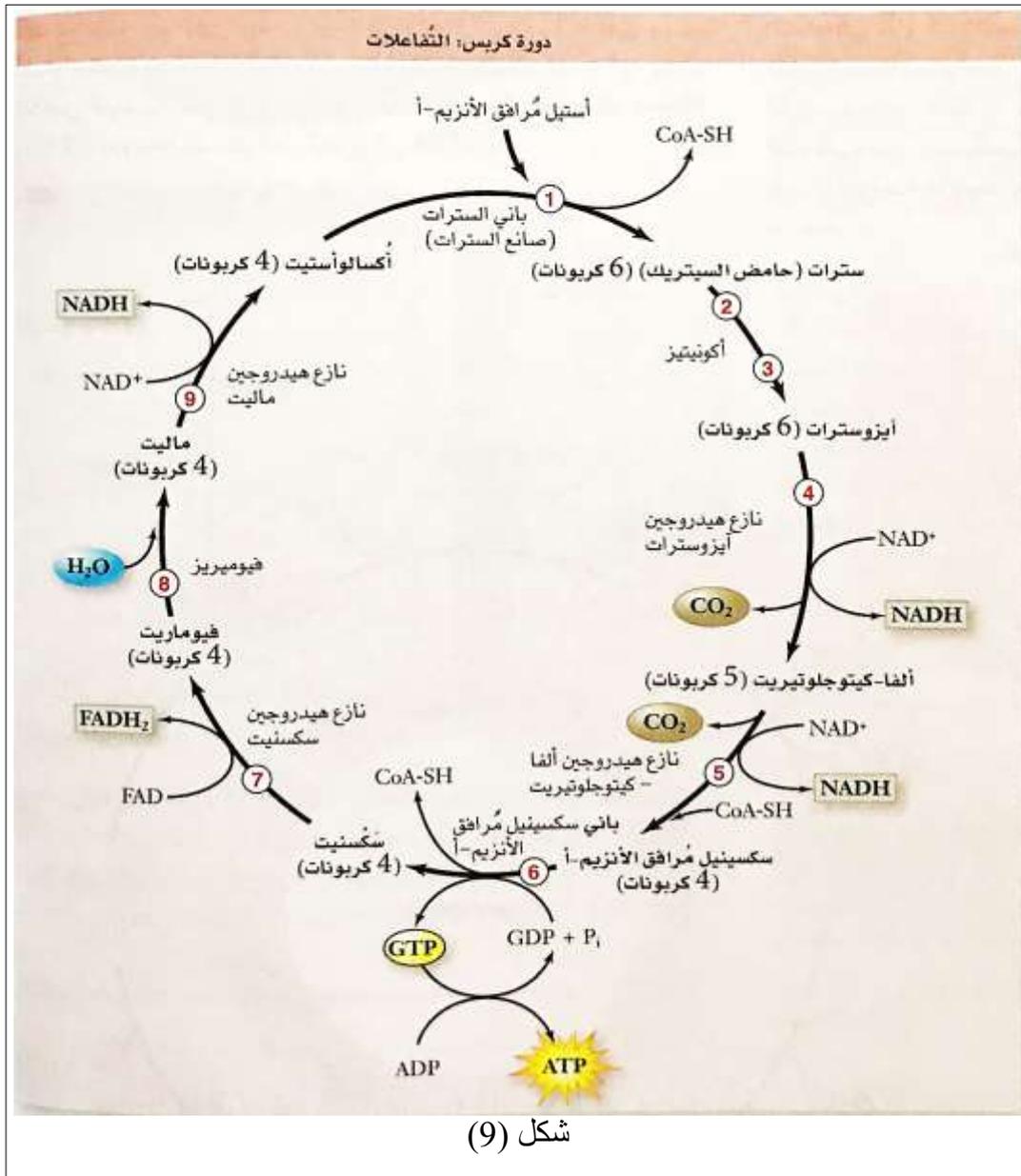
يمكن ترتيب التفاعلات التسعة في دورة كربس إلى ثلاثة أجزاء وهي:

**الجزء (أ):** أستيل مرافق الأنزيم (أ) زائد أكسالوأسيت، ينتج هذا التفاعل مركباً سداسي الكربون يدعى سترات.

**الجزء (ب):** إعادة ترتيب السترات وعملية نزع الكربوكسيل. وتتكون من خمس خطوات إضافية، تختزل سترات إلى وسيط خماسي الكربون، ومن ثم إلى مركب سكسينيت رباعي الكربون، خلال هذه التفاعلات، يتم إنتاج جزيئين من NADH وجزيء ATP واحد.

**القطعة (ج):** إعادة أكسالوأسيتيت. يتعرض سكسينات إلى ثلاثة تفاعلات إضافية، حتى يصبح أكسالوأسيتيت. خلال هذه التفاعلات، ينتج NADH واحداً، إضافة إلى، جزيء فلافين أدينين ثنائي النيوكليوتيد Flavin Adenine Dinucleotide (FAD) وهو عامل مساعد آخر يختزل إلى  $FADH_2$ .

الشكل (9) يبين ما يحدث من تحول للمركبات والمركبات الناتجة في الخطوات الثلاثة في دورة كربس.



## 5-2 تحورت دورة كربس لاستخلاص الإلكترونات وتصنيع ATP واحد

في تتابع تفاعلات دورة كربس تدخل مجموعة ثنائية الكربون من أستيل مرافق أنزيم - أ الحلقة من البداية، وينتج جزيئات من  $CO_2$ . وجزء ATP واحد، وأربعة أزواج من الإلكترونات.  
التفاعل ( 1 ) ( **التكاثف**): يتكون السترات من أستيل مرافق أنزيم - أ و أكسالوأسيتيت تفاعل التكاثف غير منعكس، إذ يلتزم بإدخال مجموعة أستيل ثنائية الكربون إلى دورة كربس. يثبط هذا التفاعل عندما يكون تركيز ATP في الخلية مرتفعاً. وينشط عندما يكون منخفضاً فعندما تمتلك الخلية كميات عالية من ATP. تتوقف دورة كربس، ويتحول أستيل مرافق أنزيم - أ إلى تصنيع الدهون.

التفاعلان ( 2 ) و ( 3 ) **التصاوغ**: قبل أن تبدأ تفاعلات الأكسدة، يجب أن يعدل موقع مجموعة الهيدروكسيل (-OH) على جزيء السترات تحدث عملية إعادة الترتيب هذه على خطوتين: أولاً. ينزع جزيء ماء من ذرة كربون، ومن ثم يضاف الماء إلى ذرات كربون أخرى وبهذا تتغير مواقع مجموعة H- و OH-. يكون الناتج مصاوغاً للسترات ويدعى أيزوسترات هذا التعديل يسهل التفاعلات اللاحقة.

التفاعل (4) **التأكسد الأول في أول خطوة منتجة للطاقة في الحلقة**: يتعرض أيزوسترات لتفاعل أكسدة نازعة للكربوكسيل. أولاً: يتأكسد أيزوسترات منتجاً زوجاً من الإلكترونات التي تختزل جزيء  $NAD^+$  إلى  $NADH$ . ثم تنتزع مجموعة كربوكسيل من الوسيط المتأكسد، تنفصل الكربوكسيل المركزية لتكون  $CO_2$ ، ما يعطي جزيئاً خماسي الكربون يدعى ألفا-كيتوجلوتاريت.

التفاعل (5): **التأكسد الثاني**: بعد ذلك تنتزع مجموعة كربوكسيل من ألفا-كيتوجلوتاريت عن طريق المركب معقد عديد الإنزيم شبيه بإنزيم نازع هيدروجين بيروفيت. تغادر مجموعة سكسينيل المتبقية بعد إزالة  $CO_2$  لترتبط مع مرافق ( أ )، مكونة مكونة سكسينيل مرافقاً ( أ ). في هذه العملية يتم استخلاص الكترولنين، وهما يختزلان جزيئاً آخر من  $NAD^+$  إلى  $NADH$ .

التفاعل (6) **الفسفرة على مستوى المادة الأساسية**: إن الرابطة بين مجموعة سكسينيل رباعي الكربون ومرافق الإنزيم ( أ ) رابطة عالية الطاقة. ويتم كسر هذه الرابطة في تفاعل مزدوج شبيه بذلك الذي يحدث في التحلل الجلوكوزي، وتقود الطاقة المنطلقة إلى فسفرة GDP إلى GTP. يمكن لـ GTP أن ينقل فوسفات إلى ADP محولاً إياه إلى ATP. يدعى مركب رباعي ذرات الكربون المتبقي سكسينيت Succinate.

التفاعل (7) **التأكسد الثالث**: بعد ذلك يتأكسد سكسينيت إلى فيوماريت Fumarate بإنزيم موجود في الغشاء الداخلي للميتوكوندريا. لا يكون التغيير في الطاقة الحرة لهذا التفاعل كبيراً بشكل يكفي لاختزال  $NAD^+$  بدلاً من ذلك سيكون FAD هو مستقبل الإلكترونات. وبخلاف  $NAD^+$  لا يستطيع FAD الحركة في الميتوكوندريا لأنه مرتبط بقوة مع الإنزيم الخاص به في الغشاء الداخلي للميتوكوندريا. ويمكن لشكل المختزل له ( $FADH_2$ ) أن يساهم بالإلكترونات فقط لسلسلة نقل الإلكترونات في الغشاء.

التفاعلان (8) و (9) **إعادة بناء الأكسالوأسيتيت**: في آخر تفاعلين في الدورة، يضاف جزيء ماء إلى فيوماريت، مكوناً ماليت Malate. يتأكسد ماليت بعد ذلك معطياً جزيئاً رباعي الكربون، وهو الأكسالوأسيتيت Oxaloacetate وزوج إلكترونات تختزل  $NAD^+$  إلى  $NADH$ . وهكذا فإن الأكسالوأسيتيت؛ الجزيء الذي بدأ الدورة، هو الآن حر، يمكنه أن يرتبط مع مجموعة أستيل ثنائية الكربون من أستيل مرافق إنزيم ( أ ) آخر، وبذلك يعاد بدء الدورة من جديد.

### 3-5 تحول الجلوكوز إلى CO<sub>2</sub> وطاقة وضع

في عملية التنفس الهوائي يستهلك الجلوكوز بشكل كامل، إذ ينشطر جزيء الجلوكوز سداسي الكربون إلى زوج من جزيئات البيروفيت ثلاثية الكربون خلال التحلل الجلوكوزي . تفقد ذرة كربون واحدة من كل بيروفيت على شكل CO<sub>2</sub> في أثناء تحويل البيروفيت إلى أستيل مرافق الإنزيم ( أ ) . وتفقد ذرتا الكربون الأخريان على شكل CO<sub>2</sub> خلال عمليات الأكسدة في دورة كريبس.

كل ما يتبقى يشير إلى مرور الجلوكوز وتحوله إلى ستة جزيئات CO<sub>2</sub> هو الطاقة الناتجة عنه، التي يكون بعضها محفوظاً في أربعة جزيئات ATP وفي الحالة المختزلة لـ 12 ناقل إلكترون. عشرة من هذه النواقل هي جزيئات NADH والأخران هما حزيئاً FADH<sub>2</sub>.

### 4-5 تتبع الإلكترونات في التفاعلات يظهر اتجاه الانتقال

عندما تدرس التغيرات في الشحنة الكهربائية في التفاعلات التي تؤكسد الجلوكوز، فإن الاستراتيجية الجيدة لإبقاء عمليات النقل واضحة في الذهن هي دائماً بتتبع الإلكترونات. فمثلاً في التحلل الجلوكوزي يقوم إنزيم بنزع ذرتي هيدروجين -أي إلكترونين وبروتونين- من الجلوكوز وينقل كلا الإلكترونين وأحد البروتونين إلى NAD<sup>+</sup>. ويطلق البروتون الآخر على شكل أيون هيدروجين H<sup>+</sup> إلى المحلول المحيط. يحول هذا النقل NAD<sup>+</sup> إلى NADH أي أن الكترنين سالبين ( 2e<sup>-</sup> ) وبروتوناً موجباً ( H<sup>+</sup> ) واحداً تضاف إلى جزيء NAD<sup>+</sup> موجب الشحنة لتكوين NADH الذي يعد متعادلاً كهربائياً.

لا يتم حصاد الطاقة التي يلتقطها NADH دفعة واحدة. إذ يمر زوج الإلكترونات التي يحملها NADH عبر سلسلة نقل الإلكترونات، التي تتكون من سلسلة من نواقل الإلكترونات وهي بروتينات في الأغلب، منعسة في الغشاء الداخلي للميتوكوندريا.

يسلم NADH الإلكترونات إلى بداية سلسلة نقل الإلكترونات، ويلتقطها الأكسجين عند النهاية. ويرتبط الأكسجين بعد ذلك مع الهيدروجين مكوناً الماء. عند كل خطوة في السلسلة تتحرك الإلكترونات نحو الناقل الأعلى قليلاً بالسالبية الكهربائية، وتزاح عن أماكنها قليلاً. وعلى هذا فإن الإلكترونات تتحرك نزولاً مع تدرج الطاقة.

تطلق عملية انتقال الإلكترونات كلها ما يقارب 53 كيلو كالوري / مول (222 كيلو جول / مول) في الظروف المعيارية. يسمح انتقال الإلكترونات عبر هذه السلسلة باستخلاص الطاقة بشكل تدريجي.

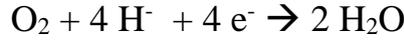
### 6- سلسلة نقل الإلكترونات والأسموزية الكيميائية

يحتوي كل من NADH و FADH<sub>2</sub> (جزيئات تكونت خلال التنفس الهوائي) على زوج من الإلكترونات اكتسبتها عند اختزال NAD<sup>+</sup> و FAD. تحمل جزيئات NADH إلكتروناتها إلى الغشاء الداخلي للميتوكوندريا، حيث تُنقل إلكتروناتها إلى سلسلة من البروتينات المرتبطة بالغشاء تُدعى معاً سلسلة نقل الإلكترونات.

### 6-1 تنتج سلسلة نقل الإلكترونات فرقاً في تركيز البروتونات

أول البروتينات التي تستقبل الإلكترونات هو معقد إنزيمي منعس في الغشاء يدعى نازع هيدروجين NADH ) (NADH dehydrogenase). بعد ذلك يقوم ناقل إلكترونات يسمى يوبيكينون Ubiquinone بتمرير الإلكترونات إلى معقد بروتين - سيتوكروم يسمى معقد bc1. كل معقد في السلسلة يعمل بوصفه مضخة بروتينية، دافعاً بروتوناً إلى الخارج عبر الغشاءين إلى الفراغ بين الغشاءين.

تحمل الإلكترونات بعد ذلك بناقل آخر، يسمى سيتوكروم Cytochrome، إلى معقد أكسيداز السيتوكروم، يستخدم هذا الناقل أربعة إلكترونات لاختزال جزيء  $O_2$  ثم يتحد كل أكسجين بعد ذلك مع بروتونين لإعطاء جزيء ماء:



على العكس من NADH الذي يمنح إلكتروناته إلى نازع هيدروجين NADH، بالمقابل يمنح  $FADH_2$  الذي يوجد في الغشاء الداخلي للميتوكوندريا، إلكتروناته إلى يوبيكينون، الذي يوجد أيضاً في الغشاء ولذلك فإن إلكترونات و  $FADH_2$  تخطو أول خطوة في سلسلة نقل الإلكترونات.

إن توافر الكثير من مستقبل الإلكترون القوي، الأكسجين، هو ما يجعل عملية التنفس التأكسدية ممكنة. لاحظ أن سلسلة نقل الإلكترونات المستخدمة في التنفس الهوائي شبيهة بالسلسلة الموظفة في البناء الضوئي وربما نشأت منها.

### 6-2 يتشكل التدرج عندما ما تتحرك الإلكترونات عبر نواقل

يحدث التنفس داخل الميتوكوندريا الموجودة في الخلايا حقبقة النوي كلها. تحوي الحجرة الداخلية. أو حشوة، عضوية الميتوكوندريا أنزيمات تقوم بإجراء تفاعلات دورة كربس. كما ذكر سابقاً، تتولد بروتونات ( $H^+$ ) عندما تنتقل إلكترونات إلى  $NAD^+$  عندما تمر الإلكترونات التي تم حصادها عن طريق التنفس التأكسدي عبر سلسلة نقل الإلكترونات. تطلق طاقة تنقل بروتونات خارجاً من الحشوة في اتجاه الحجرة الخارجية المسماة الفراغ بين الغشاءين.

في الحقيقة تقوم ثلاثة من المعقدات المخترقة للغشاء من سلسلة نقل الإلكترونات في الغشاء الداخلي للميتوكوندريا بنقل البروتونات يحفز تدفق الإلكترونات عالية الطاقة تغييراً في شكل بروتينات المضخات ما يجعلها تنقل البروتونات عبر الغشاء تنشيط الإلكترونات التي تساعد بها جزيئات NADH المضخات البروتونية الثلاث كلها في حين تنشيط الإلكترونات التي تساهم بها جزيئات و  $FADH$  مضختين بروتونيتين فقط بسبب المكان الذي تدخل منه السلسلة بهذه الطريقة ينشأ تدرج بروتوني في الفراغ بين الغشاءين والحشوة.

### 6-3 تستفيد الأسموزية الكيميائية من التدرج البروتوني لتكون ATP

مقارنة مع الفراغ بين الغشاءين، تجذب السالبة الداخلية للحشوة البروتونات الموجبة وتشجعها على الدخول مرة أخرى إلى الحشوة وإن التركيز الخارجي العالي للبروتونات يقود البروتونات عائدة عن طريق الانتشار ولكن بسبب عدم النفاذية النسبية للأغشية للأيونات فإن هذه العملية تحدث ببطء. تعبر معظم البروتونات التي تدخل الحشوة مرة أخرى من خلال أنزيم بناء ATP وهو أنزيم يستفيد من طاقة التدرج لتحفيز صناعة ATP من ADP والفوسفات غير العضوي  $P_i$ ، وحيث أن التكوين الكيميائي لجزيئات ATP تحركه قوة انتشار شبيهة بالخاصية الأسموزية. فيشار إلى هذه العملية بالأسموزية الكيميائية. يُنقل ATP المتكون حديثاً عن طريق الانتشار الميسر إلى مناطق متعددة في الخلية حيث هناك انزيمات تحتاج إلى طاقة لكي تحفز تفاعلات ماصة للطاقة. تحرك الطاقة الناتجة عن التنفس الخلوي مضخات البروتون التي تنتج تدرجاً بروتونياً ويزود هذا التدرج البروتوني الطاقة اللازمة لتصنيع ATP.

#### 4-6 أنزيم بناء ATP عبارة عن محرك دوار جزيني

يستخدم أنزيم بناء ATP آلية مذهشة لأداء عملية تصنيع ATP من ناحية بنائية يمتلك هذا الأنزيم جزءاً مرتبطاً بالغشاء وساقاً ضيقة تربط الجزء الغشائي مع جزء تحفيزي يشبه العقدة يمكن أن يتفكك هذا المعقد إلى جزأين صغيرين معقد مرتبط بالغشاء يدعى  $F_0$  ومعقد  $F_1$  يتكون من ساق وعقدة أو منطقة الرأس.

يمتلك  $F_1$  نشاطاً أنزيمي في حين يحوي المعقد  $F_0$  قناة تتحرك خلالها البروتونات مع تدرج التركيز الخاص بها عبر الغشاء. بقيامها بذلك تسبب حركتها دوراً جزءاً من معقد  $F_0$  والساق بالنسبة إلى العقدة تستعمل الطاقة الميكانيكية للدوران في تغيير شكل المنطقة التحفيزية في المعقد  $F_1$ .

وهكذا يتحقق تصنيع ATP عن طريق محرك دوراني دقيق ويقود التدرج البروتوني دورانه تشبه هذه العملية ما يحدث في المطحنة التي تديرها المياه حيث بسبب جريان الماء بسبب الجاذبية دوران عجلة مطحنة تنجز عملاً أو تنتج طاقة يشبه تدفق البروتونات جريان الماء الذي يسبب دوران العجلة. بالتأكيد أن أنزيم بناء ATP محرك أكثر تعقيداً وينتج ناتجاً نهائياً كيميائياً.

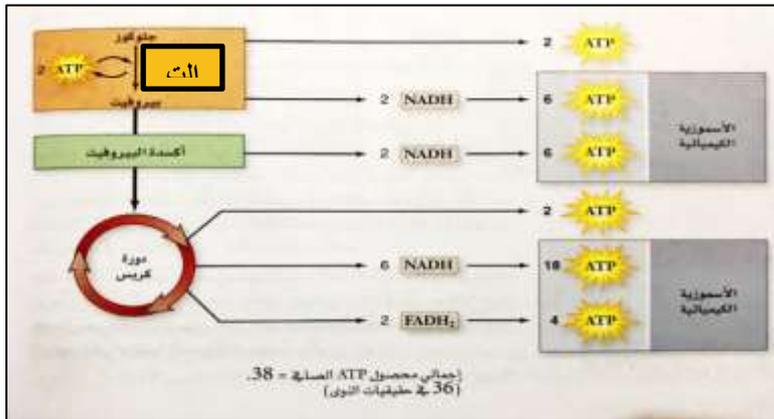
#### 7- ناتج الطاقة للتنفس الهوائي

كم طاقة الأيض التي تكسبها الخلية على شكل ATP من الهدم الهوائي للجلوكوز؟ بمعرفتنا للخطوات التي تشترك في هذه العملية يمكن لنا أن تسحب الناتج النظري ل ATP ومقارنته بالناتج الحقيقي.

#### 1-7 الناتج النظري في حقيقيات النوى هو 36 ATP لكل جزيء جلوكوز

يقترح النموذج الكيميائي الأسموزي أن جزيء ATP واحداً يتولد عن كل مضخة بروتونات تنشط عن طريق سلسلة نقل الإلكترونات ولأن الإلكترونات من NADH تنشط ثلاث مضخات وتلك التي من FADH تنشط مضختين فإننا نتوقع أن كل جزيء NADH و FADH يولد ثلاثة جزئيات وجزئيتين اثنين من ATP. على التوالي بإجراء مثل هذه الحسابات تذكر أن تضرب كل ما يخرج من التحلل الجلوكوزي في 2 لأن جزئيتين من بيروفيت ينتجان من كل جزيء جلوكوز يتولد من التنفس ما مجموعه 10 جزئيات NADH اثنان من التحلل الجلوكوزي واثنان من أكسدة البيروفيت (2×1) FADH2 أخيراً جزئيان من ATP يتكونان مباشرة من التحلل الجلوكوزي واثنان آخران من دورة كريس (2×1) وهذا يعطي ما مجموعه 30×10 ATP من NADH إضافة إلى 2×2=4 ATP من FADH2 إضافة إلى 4 ATP أي ما مجموعه 38 ATP.

هذا العدد دقيق تماماً بالنسبة إلى البكتيريا ولكنه لا ينطبق على حقيقيات النوى ! لأن NADH المنتج في السيتوبلازم عن طريق التحلل الجلايكولي في حاجة إلى أن ينتقل إلى داخل الميتوكوندريا عن طريق النقل النشط الذي يكلف 1 ATP لكل جزيء يتم نقله وهذا يقلل الناتج المتوقع لحقيقيات النوى إلى 36 ATP. هذه العملية يوضحها الشكل (10).



الشكل 10

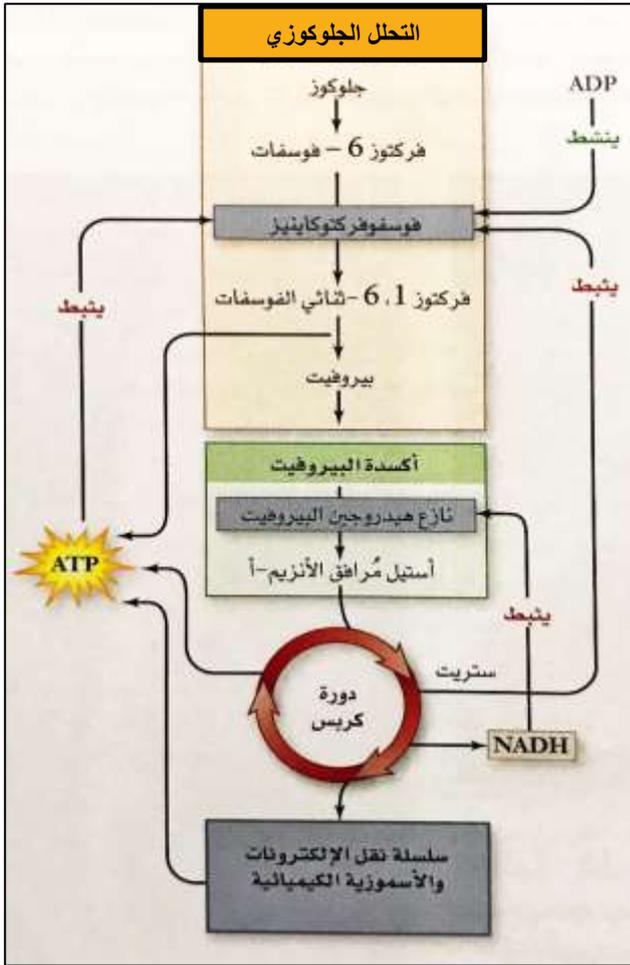
## 7-2 الناتج الحقيقي لحقيقيات النوي هو ATP 30 لكل جزيء جلوكوز

كمية ATP الحقيقية المنتجة في حقيقيات النوي خلال التنفس الهوائي أقل من 36، فالغشاء الداخلي للميتوكوندريا هو إلى حد ما منفذ للبروتونات سامحاً لبعضها بالعودة إلى الحشوة دون العبور من خلال أنزيم بناء ATP الثاني تستعمل الميتوكوندريا تدرج البروتونات المتولد عن طريق الأسموزية الكيميائية لأهداف أخرى غير تصنيع ATP (مثل نقل البيروفيت إلى الحشوة). بناءً على ذلك. فالكمية الحقيقية المقيسة لـ ATP المتولد من جزيئات NADH و FADH2 هي قريبة إلى 2.5 لكل NADH . و 1.5 لكل FADH2 مع هذه التعديلات يمكن حساب الناتج الكامل و ATP من جزيء جلوكوز كما يأتي، 4 ATP من الفسفرة على مستوى المادة الأساس + 25ATP من  $3ATP + (10 \times 2) NADH - (2 \times 1.5) FADH2$  لنقل NADH الناتج من التحلل الجلايكولي - 30 جزيء ATP.

كما ذكرنا سابقاً. إن هدم الجلوكوز عن طريق التنفس الهوائي، بالمقارنة مع التحلل الجلايكولي وحده، يمتلك ناتج طاقة عالياً بحصد التنفس الهوائي في خلية حقيقية النوي نحو  $(30 \times 7.3) / 686 = 32\%$  من الطاقة المتوافرة في الجلوكوز. (بالمقارنة تحول سيارة نموذجية فقط نحو 25% من طاقة البنزين إلى طاقة مفيدة).

الناتج العالي للطاقة التي يحصدها التنفس الهوائي كان أحد العوامل المهمة التي تبنت نشوء عضوية التغذية. عندما نشأت هذه الآلية لإنتاج الطاقة. أصبح بإمكان المخلوقات التي لا تقوم بالبناء الضوئي أن تؤسس أيضاً بنجاح كبير على الاستعمال الحصري لجزيئات مشتقة من مخلوقات أخرى. فما إن تمكنت بعض المخلوقات من الإمساك بالطاقة عن طريق البناء الضوئي، فإن مخلوقات أخرى أمكنها الوجود عن طريق التغذية عليها فقط.

## 8- تنظيم التنفس الهوائي



الشكل 11

عندما تمتلك الخلايا كميات وافرة من ATP تثبط التفاعلات الرئيسية في التحلل الجلوكوزي ودورة كريس وهدم الأحماض الدهنية. مبطناً إنتاج ATP. إن تنظيم هذه المسارات الكيميائية الحيوية لمستويات ATP مثال على التغذية الراجعة المثبطة في المقابل عندما تكون مستويات ATP في الخلية منخفضة ومستويات ADP مرتفعة فإن ينشط أنزيمات في مسارات هدم الكربوهيدرات لتحفز إنتاج ATP أكثر. يوضح الشكل (11) المركبات التي تثبط إنتاج ATP.

يحدث التحكم في عملية هدم الجلوكوز عند نقطتين مهمتين في مسار البدء وبالتحديد عند نقطة في التحلل الجلوكوزي وعند البدء بدورة كريس إن نقطة التحكم في عملية التحلل الجلوكوزي هي أنزيم فوسفوفركتوكاينيز الذي يحفز تحويل فركتوز فوسفات إلى فركتوز ثنائي الفوسفات وهو التفاعل الأول في التحلل الجلوكوزي غير القابل للإعكاس ملزماً المادة المتفاعلة على دخول التحلل الجلوكوزي بعد ATP في حد ذاته مثبطاً مختلف الموقع للأنزيم فوسفوفركتوكاينيز كما هو الحال بالنسبة إلى السترات

المادة الوسطية في دورة كريس المستوي العالي لكل من ATP والسترات يتبطان فوسفوفركتوكاينيز وهكذا فعند الظروف التي يكون عندها ATP فائضاً أو عندما تنتج دورة كريس سترات بشكل أسرع من استهلاكه تبطئ عملية التحلل الجلوكوزي. تحدث نقطة التحكم الرئيسية في عملية أكسدة البيروفيت عند خطوة مهمة في دورة كريس عن طريق أنزيم نازع هيدروجين البيروفيت الذي يحول البيروفيت إلى أستيل مرافق الأنزيم -1. هذا الأنزيم يثبط عن طريق مستويات مرتفعة من NADH الناتج المهم لدورة كريس. نقطة تحكم أخرى في دورة كريس هي أنزيم بناء السترات الذي يحفز التفاعل الأول أي تحويل الأوكسالوأسيتات وأستيل مرافق الأنزيم -1 إلى سترات تثبط مستويها عالية من ATP أنزيم بناء السترات (إضافة إلى فوسفوفركتوكاينيز ، ونزاع الهيدروجين البيروفيت وأنزيمين آخرين من أنزيمات دورة كريس) مبطناً مسار الهدم بكامله.

## 9- التنفس اللاهوائي : الأوكسدة دون الأوكسجين الجزيئي

تستطيع الخلايا استخدام الأوكسجين عند وجوده لإنتاج كمية كبيرة من ATP وحتى بعدم وجود أوكسجين لكي يستقبل الإلكترونات تستطيع بعض الخلايا أن تتنفس لاهوائياً Anaerobically باستخدام جزيئات غير عضوية بوصفها مستقبلات أخيرة للإلكترونات في سلسلة نقل إلكترونات. على سبيل المثال كثير من بدائيات النوي تستخدم الكبريت أو النيترات أو CO<sub>2</sub> أو حتي معادن غير عضوية بوصفها مستقبلات أخيراً للإلكترونات بدلاً من الأوكسجين. لا تكون الطاقة الحرة المنطلقة من استخدام هذه الجزيئات الأخرى مستقبلات نهائية للإلكترونات كبيرة كما هو في حال استخدام الأوكسجين بوصفه مستقبلات لأنها تمتلك قابلية منخفضة للإلكترونات، فالنتيجة مجموع أقل من ATP ولكن العملية لا تزال تنفساً وليست تخمراً.

## 9-1 تستخدم بكتريا الميثان ثاني أكسيد الكربون

من المخلوقات عضوية التغذية التي تقوم بعملية التنفس اللاهوائي البكتيريا البدائية القديمة مثل بكتيريا المياه الساخنة بكتيريا الميثان تستخدم بكتيريا الميثان  $CO_2$  مستقبلاً للإلكترونات مختزلة  $CO_2$  إلى ميثان ذرات الهيدروجين في الميثان في بيئات متنوعة تشمل التربة والأجهزة الهضمية للحيوانات المجتررة مثل الأبقار.

## 9-2 تستخدم بكتيريا الكبريت الكبريتات

يشاهد دليل على عملية تنفس لاهوائي أخرى بين البكتيريا البدائية في مجموعة من الصخور عمرها نحو 2.7 بليون سنة تعرف بالتكوين الحديدي لنهر المرأة المادة العضوية في هذه الصخور غنية بالنظير الخفيف للكبريت.  $^{32}S$  نسبة إلى النظر الثقيل  $^{34}S$  لا تعرف عملية جيوكيميائية تنتج مثل هذه الكمية الكبيرة.

لكن الاختراق الحيوي للكبريت يمكنه فعل ذلك بعملية لا تزال تقوم بها اليوم بعض المخلوقات بدائية النوي. في تنفس الكبريتات هذا تستخلص المخلوقات بدائية النوي الطاقة من اختزال الكبريتات العضوي ( $SO_4$ ) إلى كبريتيد الهيدروجين ( $H_2S$ ) يتم الحصول على ذرات الهيدروجين من مركبات عضوية تنتجها مخلوقات أخرى، ولكنها تستخدم الكبريتات بوصفها عاملاً مؤكسداً (أي مستقبل للإلكترونات) بدلاً من  $CO_2$ .

وضعت مختزلات الكبريتات الأولى أساس نشوء البناء الضوئي منشئة بيئة غنية بكبريتيد الهيدروجين وكما سيذكر فإن أول شكل من البناء الضوئي حصل على الهيدروجين من كبريتيد الهيدروجين باستخدام طاقة من ضوء الشمس.

## 10- هدم البروتينات والدهون

إلى هنا ركزنا على التنفس الهوائي للجلوكوز الذي تحصل عليه المخلوقات من هضم الكربوهيدرات أو من التمثيل الضوئي للجزيئات العضوية غير الجلوكوز وبالتحديد البروتينات والدهون مصادر مهمة للطاقة أيضاً.

## 10-1 هدم البروتينات ينزع مجموعة الأمين

تحطم البروتينات أولاً إلى أحماض أمينية منفردة. تُنزع المجموعة الجانبية المحتوية على النيتروجين (مجموعة الأمين) من كل حمض أميني بعملية تدعى نزع مجموع الأمين Deamination ثم تحول سلسلة من التفاعلات سلسلة الكربون المتبقية إلى جزيء يمكنه أن يدخل التحلل الجلوكوزي أو دورة كربس على سبيل المثال يتم تحويل الأنين إلى بيروفيت وجلوتاميت إلى ألفا - كيتوجلوتريت وأسبارتيت إلى أكسالواسيتايت تستخلص تفاعلات التحلل الجلوكوزي ودورة كربس الإلكترونات عالية الطاقة من هذه الجزيئات وتسخرها لتصنيع ATP.

## 10-2 هدم الأحماض الدهنية ينتج مجموعة أستيل

تحطم الدهون إلى أحماض دهنية وجليسيرول عادة تحتوي الأحماض الدهنية طويلة السلسلة عدداً زوجياً من الكربون حيث توفر روابط C-H المتعددة مصدراً غنياً بالطاقة تؤكسد الأحماض الدهنية في حشوة الميتوكوندريا تنزع الأنزيمات مجموعات أستيل ثنائية الكربون من نهاية كل حمض دهني حتى يتحول الحمض كله إلى مجموعات أستيل ترتبط كل مجموعة أستيل مع مرافق أنزيم - أ لكي يتكون أستيل مرافق أنزيم - أ. تعرف هذه العملية بأكسدة بيتا B-oxidation إن هذه العملية معتمدة على الأكسجين وهذا يفسر سبب حرق التنفس الهوائي الدهون ولا تستطيع التنفس اللاهوائي ذلك.

كم كمية ATP التي ينتجها هدم الأحماض الدهنية؟ لتقارن حمضاً دهنيًا افتراضياً سداسي الكربون مع الجلوكوز سداسي الكربون، الذي قلنا سابقاً، إنه ينتج 30 جزئياً من ATP في الخلية حقيقية النوي ستحول دورتان من أكسدة بيتا الحمض الدهني إلى 3 جزئيات أستيل مرافق أنزيم -أ كل دورة تتطلب جزئياً واحداً من ATP لتحفيز العملية ولكنها تنتج جزئياً من NADH وآخر من  $FADH_2$  هذان الجزئيان مما يطلقان ATP 4 (على افتراض ATP 2.5 لكل NADH و 1.5 ATP لكل  $FADH_2$ ).

تنتج أكسدة كل جزيء أستيل مرافق أنزيم -أ في دورة كربس في النهاية 10 جزئيات ATP إضافية على العموم بعد ذلك سوف يكون ناتج ATP لحمض دهني سداسي الكربون تقريباً 8 (من دورتي أكسدة بيتا) - 2 (للتحفيز لهاتين الدورتين) + 30 (من أكسدة 3 أستيل مرافق أنزيم -أ) -36 جزيء ATP. لذلك التنفس الهوائي لحمض دهني سداسي الكربون ينتج 20% طاقة أكثر من التنفس الهوائي للجلوكوز.

إضافة إلى ذلك سيكون وزن حمض دهني بهذا الطول أقل من ثلثي وزن الجلوكوز لذلك فإن جراماً واحداً من الأحماض الدهنية يحتوي على ضعف الطاقة بالكيلو كالوري من الوزن نفسه من الجلوكوز تستطيع أن تري من هذه الحقيقة لماذا يكون الدهن جزيئاً خازناً للطاقة الزائدة في أنواع عدة من الحيوانات ولو أن الطاقة الزائدة تم تخزينها بدل ذلك على شكل كربوهيدرات كما في النباتات لكانت أجسام الحيوانات أثقل.

### 10-3 عدد قليل من المركبات الوسيطة المهمة تربط المسارات الأيضية

إن مسارات أكسدة جزئيات الغذاء مترابطة من حيث إن عدداً قليلاً من الجزئيات الوسيطة مثل البيروفيت وأستيل مرافق أنزيم -أ تربط عملية التحطيم من نقاط بداية مختلفة هذه الجزئيات الوسيطة المهمة تسمح بالتحويل المتبادل للجزئيات المختلفة مثل السكريات والأحماض الأمينية.

يمكن للخلايا أن تصنع جلوكوزاً وأحماضاً أمينية ودهوناً إضافة إلى أخذها من مصادر خارجية وتستخدم تفاعلات شبيهة بتلك التي تكسر هذه المواد في أحيان عدة يمكن أن تستعمل المسارات المنعكسة الأنزيمات نفسها إذا كانت الفروق في الطاقة الحرة قليلة فعلي سبيل المثال يستعمل تصنيع الجلوكوز من مصادر غير سكرية كل أنزيمات التحلل الجلايكلولي ما عدا ثلاثة أنزيمات ولذلك فإن معظم التحلل الجلوكوزي يجري إلى الأمام وإلى الخلف بالاعتماد على تركيز الجزئيات الوسيطة - مع ثلاث خطوات مهمة تمتلك أنزيمات مختلفة لاتجاهات الأمام أو الخلف.

### 10-4 لجزيء أستيل مرافق أنزيم (أ) أدوار عدة

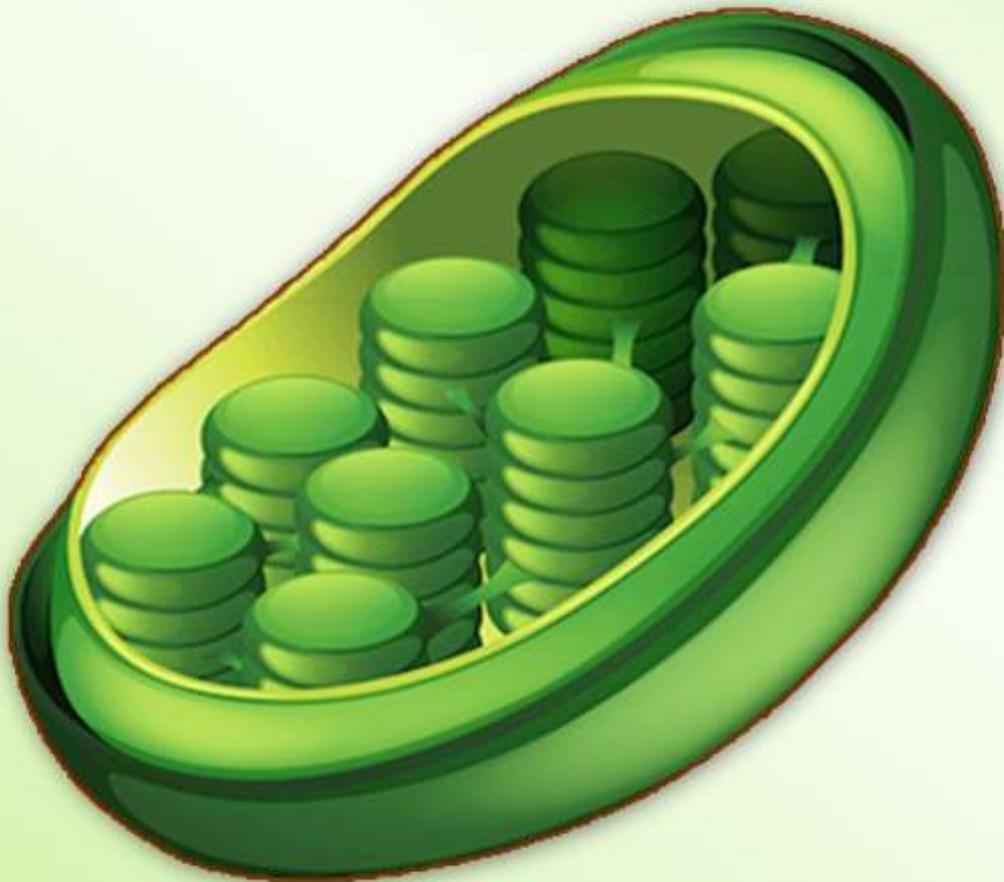
تولد عمليات عدة مختلفة أستيل مرافق أنزيم (أ)، إذ لا يفعل ذلك فقط أكسدة البيروفيت، ولكن كسر البروتينات والدهون والشحميات الأخرى أيضاً تولد أستيل مرافق أنزيم -أ، وفي الحقيقة تحول تقريباً كل الجزئيات التي تحطمت لإنتاج الطاقة إلى أستيل مرافق أنزيم (أ)، يقوم أستيل مرافق الأنزيم -أ بدور في الأيض البنائي أيضاً إذ تستعمل وحدات ثنائية الكربون مشتقة من أستيل مرافق الأنزيم -أ لبناء السلاسل الهيدروكربونية في الأحماض الدهنية وعلى هذا فإن (أستيل مرافق الأنزيم -أ) المصنع من مصادر متنوعة يمكن أن يدخل في تكون الأحماض الدهنية أو في إنتاج ATP. بالاعتماد على احتياجات المخلوق من الطاقة ويعتمد أي خيار من الخيارين يتبعه الخلية على مستويات ATP في الخلية. عندما تكون مستويات ATP عالية فإن مسار الأكسدة يتم تثبيطه ويدخل أستيل مرافق الأنزيم (أ) في تصنيع الأحماض الدهنية يفسر هذا لماذا تتولد في كثير من الحيوانات (ومن ضمنها الإنسان) مخازن دهون وشحوم عندما يكون الغذاء الذي تستهلكه أكثر من حاجة أنشطتها وبشكل بديل وعندما تكون مستويات ATP قليلة يتحفز مسار الأكسدة ويدخل أستيل مرافق أنزيم (أ) مسار الأيض المؤكسد المنتج للطاقة.

**المراجع :**

1- علم الأحياء ، تأليف بيتر هـ . ريفن وآخرون McGrawHill ترجمة مكتبة العبيكان – الطبعة العربية الأولى 2014

2- Introduction to General , Organic and Biochemistry by Frederick A.Bettelheim ,  
William H. Brown , Mary K.Campbell , Shawn O. Farrell & Omar J.Torres - 11<sup>th</sup>  
edition -2015

# الفصل الرابع البناء الضوئي





وتحدث عملية البناء الضوئي على ثلاث مراحل، هي:

1. امتصاص الطاقة الضوئية من أشعة الشمس.
2. استخدام الطاقة الضوئية لتكوين ATP واختزال مركب  $NADP^+$  - الذي هو مستقبل للإلكترونات - إلى NADPH.
3. استهلاك ATP و NADPH لبناء المواد العضوية من  $CO_2$  الجوي.

وتحتاج المرحلتان 1 و 2 إلى الضوء، وعادة ما تسمى **التفاعلات العضوية Light – dependent reactions**. أما المرحلة الثالثة التي يتم فيها بناء المركبات العضوية من  $CO_2$  فتسمى عملية تثبيت الكربون **Carbon Fixation**، وتتم من خلال سلسلة من التفاعلات الحلقية. وما دام كل من ATP و NADPH متوافران، فإن تفاعلات تثبيت الكربون تتم بوجود الضوء أو بعدم وجوده. لذا؛ فإن هذه التفاعلات تسمى **التفاعلات غير المرتبطة بالضوء Light – independent reactions**.

ويمثل التفاعل البسيط الآتي عملية البناء الضوئي :

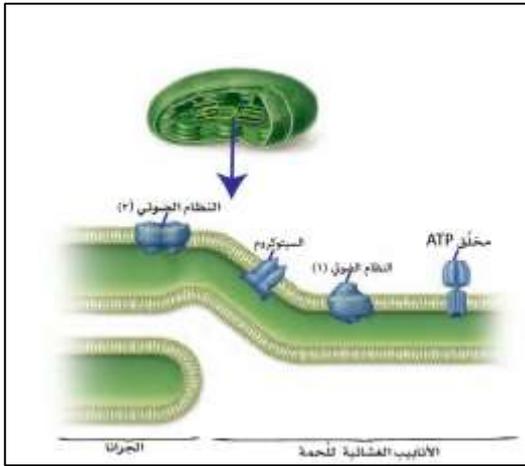


أكسجين ماء جلوكوز ثاني أكسيد الكربون ماء

ويمكنك الملاحظة أن هذه المعادلة هي تماما عكس التفاعل الذي يحصل خلال عملية التنفس. ففي عملية التنفس، تتم أكسدة الجلوكوز إلى  $CO_2$  مع استخدام الأكسجين بوصفه مستقبلا للإلكترونات. أما في حالة البناء الضوئي فإن  $CO_2$  يختزل إلى الجلوكوز باستخدام إلكترونات يتم الحصول عليها من أكسدة الماء. وتحتاج عمليتا أكسدة الماء واختزال  $CO_2$  إلى الطاقة التي توفرها أشعة الشمس. وعلى الرغم من أن الجمل السابقة ليست إلا تبسيطا شديدا لما يتم، فإنها تقدم منظورا شموليا مفيدا.

## 2-1 تركيب البلاستيدات

إن التركيب المعقد لأغشية البلاستيدات الخضراء الداخلية والخارجية يتوافق مع وظيفتها (شكل 2). إن الأغشية الداخلية للبلاستيدات الخضراء والمسماة **أغشية الثايلاكويد Thylakoid Membranes**، عبارة عن طبقتين متواصلتين من الدهون المفسفرة، تترتب على شكل أكياس مسطحة تتراكم فوق بعضها على شكل طبقات عمودية تسمى **جرانا Grana** تحتوي أغشية الثايلاكويد على **صبغة الكلوروفيل Chlorophyll** والصبغات الأخرى المشتركة في امتصاص الطاقة الضوئية، وتحتوي على التراكيب اللازمة لبناء ATP، وتتصل الجرانا ببعضها من خلال تراكيب غشائية تسمى



شكل (2)

## طبقات اللُّحمة Stroma Lamella .

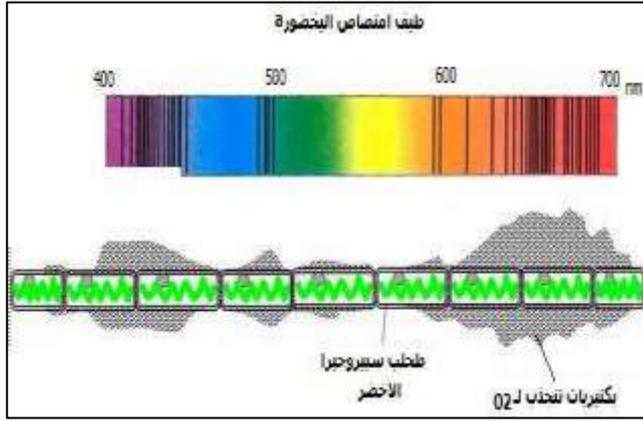
يحيط بأغشية الثايلاكويد مادة شبه سائلة لزجة تسمى **اللُّحمة Stroma** تحتوي اللُّحمة على الانزيمات الضرورية لبناء المادة العضوية من  $CO_2$  باستخدام طاقة ATP و NADPH. تتجمع أعداد من الصبغات المشاركة في عملية البناء الضوئي معا لتكوين تركيب يسمى **النظام الضوئي Photosystem** الذي يتشكل بنمط معين داخل أغشية الثايلاكويد. يستطيع كل جزيء من الصبغة ضمن النظام الضوئي امتصاص الفوتونات، وهي وحدات الطاقة الضوئية، وعندما يسقط طول موجي معين على جزيء الصبغة، فإن التهيج الناتج ينتقل من جزيء إلى آخر.

لا تنتقل الإلكترونات المهيجة فعلياً، ولكن طاقة هذه الإلكترونات تنتقل من جزيء إلى آخر بطريقة مشابهة لانتقال الطاقة الحركية لحجارة الدومينو التي إذا دُفع واحد منها يقع ما بعده، فالذي يليه، وهكذا حتى وقوع الحجرة جميعها.

تصل هذه الطاقة في النهاية إلى جزيء مهم من الكلوروفيل المتصل مع أحد البروتينات المرتبطة بالغشاء. تنقل الطاقة على شكل إلكترون مهيج إلى البروتين الذي ينقل هذا الإلكترون إلى سلسلة من البروتينات الموجودة في الغشاء.

تستخدم الإلكترونات المتحركة عبر هذه البروتينات طاقتها لتصنيع كل من ATP و NADPH وبعد ذلك تستهلك هذه النواتج لبناء المواد العضوية. وبذلك فإن النظام الضوئي يعمل كهوائي كبير يجمع الطاقة الضوئية من خلال جزيئات الصبغة المختلفة المكونة له.

تحول عملية البناء الضوئي الطاقة الضوئية إلى مواد عضوية، وتستخدم هذه العملية تفاعلات تسمى التفاعلات المعتمدة على الضوء، التي تحتاج إلى أشعة الشمس وتفاعلات أخرى تحول CO<sub>2</sub> إلى مواد عضوية ضمن عملية تسمى تثبيت الكربون. التفاعل الكلي لهذه العملية هو بشكل أساسي عكس ما يحدث في عملية التنفس. تُستخدم الطاقة الضوئية لأكسدة الماء مكونة الإلكترونات والبروتونات التي تستخدم لاختزال CO<sub>2</sub> إلى جلوكوز، وينتج الأوكسجين خلال هذه التفاعلات بوصفه مادة جانبية.



شكل 3

### 3- اكتشاف عمليات البناء الضوئي

تم اكتشاف عملية البناء الضوئي منذ ما يزيد عن 300 سنة، ولا تزال قيد البحث والدراسة حتى الآن.

استنتج العالم الإنجليزي بلاكمان (1866 – 1947) في بداية القرن العشرين استنتاجاً مثيراً يشير إلى عملية البناء الضوئي تتم من خلال خطوات عدة تستخدم واحدة منها فقط الضوء بشكل مباشر. (شكل 3). قاس بلاكمان تأثير شدة الإضاءة، وتركيز CO<sub>2</sub> ودرجة الحرارة في عملية البناء الضوئي. ووجد أنه طالما بقيت شدة الإضاءة متدنية، فإن يمكن زيادة معدل البناء الضوئي بزيادة شدة الإضاءة، وليس درجة الحرارة وكميات CO<sub>2</sub>.

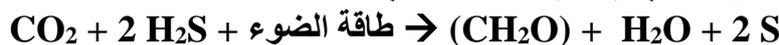
واستنتج بلاكمان أن عملية البناء الضوئي تبدأ بمجموعة من التفاعلات أسماها التفاعلات "الضوئية" تعتمد بشكل مباشر على شدة الإضاءة، ولا تتأثر بدرجة الحرارة. وأن هناك مجموعة أخرى من تفاعلات "الظلام" (تسمى بشكل مناسب أكثر التفاعلات غير المعتمدة على الضوء) التي تبدو أنها غير معتمدة على الضوء، ولكنها محددة بثاني أكسيد الكربون.

وهنا يجب الانتباه إلى وصف بلاكمان لتفاعلات "الظلام" التي تحدث بوجود الضوء (لأنها في الحقيقة تحتاج إلى نواتج التفاعلات الضوئية) لأن استخدامه لكلمة مظلم تشير إلى أن الضوء لا يتدخل بشكل مباشر. التفاعل سُمي مظلماً لأنه لا يحتاج إلى الضوء بشكل مباشر.

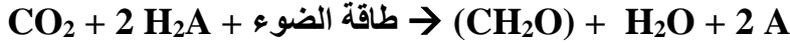
لقد وجد بلاكمان أن الزيادة في درجة الحرارة قد صاحبها زيادة في معدل التفاعلات غير المعتمدة على الضوء، (فقط 35°س) استنتج بلاكمان أن لا بد أن يكون للأنزيمات دور مهم في التفاعلات غير المعتمدة على الضوء.

### 3-1 الأوكسجين المنطلق مصدره الماء وليس CO<sub>2</sub>

في ثلاثينيات القرن الماضي اكتشف فان نيل (1897 – 1985)؛ طالب دراسات عليا في جامعة ستانفورد، أن بكتريا الكبريت البنفسجية لا تطلق الأوكسجين خلال عملية البناء الضوئي، ولكنها تستهلك H<sub>2</sub>S، وتحوله إلى كريات كبريت تتراكم داخل الخلايا، بحسب المعادلة الآتية :



ونظرا للتشابه الكبير بين هذه المعادلة ومعادلة العالم إنجن - هاوس، اقترح فان نيل التفاعل العام لعملية البناء الضوئي على النحو الآتي:



في هذه المعادلة يشكل المركب  $\text{H}_2\text{A}$  مصدرا مانحا للإلكترونات، هذا المركب في النباتات الخضراء هو الماء، وفي بكتريا الكبريت البنفسجية  $\text{H}_2\text{A}$  هو كبريتيد الهيدروجين وبذلك فإن الناتج A يأتي من تحلل الماء، وليس من ثاني أكسيد الكربون.

وعندما بدأ العلماء استخدام النظائر الكيميائية في بداية 1950 قاموا بفحص اقتراح فان نيل، حيث أجريت تجارب على عملية البناء الضوئي في النباتات الخضراء بوجود الماء المحتوي على نظير الأكسجين  $^{18}\text{O}$  وقد تبين لهم أن  $^{18}\text{O}$  المنطلق خلال عملية البناء كان O ولم يحتو السكر الناتج على هذا النوع من الأكسجين، تماما كما توقع فان نيل.



إن السكر الذي تنتجه الطحالب والنباتات في الغالب هو سكر الجلوكوز المحتوي على ست ذرات كربون، ومعادلة البناء الضوئي الموزونة في هذه المخلوقات هي على النحو التالي:



#### ATP و NADPH المنتج خلال التفاعلات المعتمدة على الضوء يستخدم لاختزال $\text{CO}_2$ وتكوين الجلوكوز

إن الأبحاث الرائدة التي أجراها فان نيل على عملية البناء الضوئي جعلته يقترح أن أيونات الهيدروجين (البروتونات) والإلكترونات الناتجة عن تحلل الماء تستخدم لتحويل  $\text{CO}_2$  إلى مادة عضوية، وقد سمي هذه العملية تثبيت الكربون Carbon Fixation. وفي الخمسينيات من القرن الماضي، بين العالم روبرت هيل (1899 - 1991) صحة نتائج فان نيل، وأكد أنه بالإمكان تجميع الطاقة الضوئية واستخدامها في تفاعل اختزالي. وجد هيل أن البلاستيدات الخضراء المعزولة من أوراق النبات تستطيع أن تختزل صبغة، وأن تطلق الأكسجين بوجود الضوء، وفي تجارب لاحقة تم التأكد من أن الإلكترونات الناتجة عن تحلل الماء تنقل إلى  $\text{NADP}^+$ ، وأن البلاستيدات الخضراء المعرضة للضوء تُراكم ATP أو NADPH، ويتحول  $\text{CO}_2$  إلى مادة عضوية.

هذه التجارب مهمة لأسباب ثلاثة، هي:

- أولا: لأنها أثبتت بشكل قاطع أن عملية البناء الضوئي في النباتات تحصل في البلاستيدات الخضراء،
- ثانيا: لأنها تبين أن التفاعلات المعتمدة على الضوء تستخدم الطاقة الضوئية لاختزال  $\text{NADP}^+$  وتصنيع ATP.
- ثالثا: لأنه تؤكد أن ATP و NADPH يستخدمان في التفاعلات الأخرى لعملية البناء الضوئي التي تختزل ثاني أكسيد الكربون لإنتاج السكريات البسيطة.

#### 4- الصبغات :

حتى تستطيع النباتات الاستفادة من طاقة ضوء الشمس يجب أن يوجد في البلاستيدات الخضراء والثايلاكويد بعض التراكيب الكيميائية القادرة على امتصاص الطاقة. تسمى الجزيئات القادرة على امتصاص الطاقة الضوئية في نطاق الجزء المرئي من الضوء **الصبغات Pigments**، ونحن نعرف أن كثيرا من الصبغات تستخدم في تصنيع الملابس الملونة وغيرها. واللون الذي نراه من الضوء هو الذي لا يمتص، وهو في الحقيقة الذي يعكس. وحتى تعرف كيف تستخدم النباتات الصبغات لامتصاص الطاقة الضوئية، يجب أولاً أن نراجع بعض المعلومات حول طبيعة الضوء.

#### 4-1 الضوء شكل من أشكال الطاقة

إن الطبيعة الموجية للضوء ستنتج طيفا كهرومغناطيسياً يميز بين الضوء على أساس طول موجاته. إن أكثر ما نعرفه هو عن الجزء المرئي من الضوء لأننا نستطيع رؤيته، ولكن هذا الضوء يشكل جزءاً صغيراً من الطيف الكلي. يمكن تقسيم الضوء المرئي إلى ألوان عدة منفصلة عند استخدام منشور يقوم بفصل الضوء اعتماداً على طول موجاته.

تسمى دقيقة الضوء **الفوتون Photon** ، الذي يعمل بوصفه رزمة محددة من الطاقة. وتستخدم الطبيعة الموجية للضوء لفهم ألوانه، وطبيعته الجزيئية ولفهم انتقال الطاقة التي تحدث خلال عملية البناء الضوئي، سنستخدم الطول الموجي للضوء وفوتونات الضوء خلال هذا الفصل.

#### 4-2 طاقات الفوتونات

تتناسب طاقة الفوتون تناسباً عكسياً مع طول موجة الضوء، الأضواء ذات طول موجي قصير تحتوي فوتونات ذات طاقة أعلى من طاقة ضوء له طول موجي كبير. فالأشعة السينية التي تحتوي على طاقة عالية جداً لها طول موجات قصير جداً، وأقل كثيراً من طول موجات الضوء المرئي.

يستطيع الشعاع الضوئي أن يزيل الإلكترونات من بعض المواد، محدثاً تياراً كهربائياً، وتسمى هذه الظاهرة **التأثير الكهروضوئي Photoelectric Effect** الذي يحدث عندما تنتقل طاقة الفوتونات إلى الإلكترونات، وتعتمد قوة التأثير على طول موجة الضوء، كلما قل طول الموجة يزداد التأثير، لأن هذه الأمواج تحمل طاقة عالية.

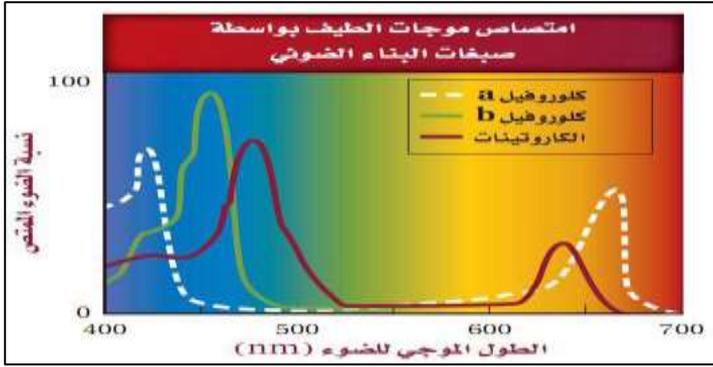
في عملية البناء الضوئي تعمل البلاستيدات الخضراء بوصفها أجهزة كهروضوئية تقوم بامتصاص الضوء، وتنتقل الإلكترونات المهيجة إلى مادة ناقلة. وعندما نوضح هذه العملية بالتفصيل، سوف يصبح واضحاً كيف تستخدم الطاقة التي تم جمعها في بناء المركبات العضوية.

#### 4-3 كل نوع من الصبغات له طيف امتصاص محدد

عند اصطدام فوتون بأحد الجزيئات، فإن طاقته إما أن تُفقد على شكل حرارة، أو تُمتص من خلال إلكترونات هذه الجزيئات، ما يدفع هذه الإلكترونات إلى مستوى طاقة أعلى. وتعتمد طاقة الإلكترون المكتسبة على مقدار الطاقة التي يحملها الفوتون (ويحدد ذلك طول الموجة) وعلى الطبيعة الكيميائية للجزيئات التي تصطدم بها. تحتل الإلكترونات مستوى معيناً من الطاقة في مداراتها حول النواة، ولذلك فإنه يجب تزويد هذه الإلكترونات بمقدار من الطاقة لترتفع إلى مستوى مداري أعلى، تماماً كالطاقة اللازمة للانتقال من درجة إلى درجة أخرى أعلى على السلم. تمتص كل ذرة من الذرات نوعاً محدداً من فوتونات الضوء، وتحديدًا تلك التي تناسب والطاقة المتوافرة لمستوى طاقة الذرة.

ولذلك فإن كل جزيء له **طيف امتصاص خاص Absorption Spectrum** يبين مدى طول الموجات والكفاءة التي يتم بها امتصاص الضوء.

وكما ذكر سابقاً، فإن الصبغات عبارة عن جزيئات تمتص الضوء المرئي بفعالية كبيرة. وقد طورت المخلوقات الحية أنواعاً مختلفة من الصبغات إلا أن نوعين أساسيين من الصبغات يستخدمان في عملية البناء الضوئي في النباتات الخضراء: الكلوروفيل والكاروتينويدات، وفي بعض المخلوقات تقوم صبغات أخرى بامتصاص الطاقة المعتمدة على الضوء.



شكل 4

**4-4 طيف الامتصاص لصبغة الكلوروفيل**  
يمتص الكلوروفيل الفوتونات ضمن مستويات طاقة محددة (شكل 4). هناك نوعان من الكلوروفيل (كلوروفيل أ وكلوروفيل ب). تمتص هذه الصبغات الأزواء الزرقاء – البنفسجية والحمراء. ولا تقوم هذه الصبغات بامتصاص موجات الضوء ما بين (500 – 600) نانوميتر، حيث يتم انعكاسها وعند وقوع هذه الفوتونات على شبكية العين فإنها تمتص، وترى بلون أخضر.

يعد **الكلوروفيل أ Chlorophyll a** الصبغة

الأساسية التي تقوم بعملية البناء الضوئي في النباتات الخضراء، والطحالب الخضراء المزرقة، الصبغة الوحيدة القادرة على تحويل الطاقة المعتمدة على الضوء إلى طاقة كيميائية، في حين تعمل صبغة الكلوروفيل ب **Chlorophyll b** بوصفها صبغة مساعدة Accessory Pigment أو صبغة ممتصة للضوء ثانوية تكمل وتضيف إلى الطاقة الممتصة من خلال الكلوروفيل أ.

ويمتاز طيف امتصاص الكلوروفيل ب بإزاحة نحو أمواج الضوء الخضراء، لذا فإن الكلوروفيل ب قادر على امتصاص الفوتونات التي لا يستطيع كلوروفيل أ امتصاصها من أشعة الشمس. إضافة إلى ذلك هناك مجموعة من الصبغات الثانوية في كل من النباتات والبكتريا والطحالب.

#### 5-4 تركيب الكلوروفيل

يمتص الكلوروفيل فوتونات الضوء عن طريق عملية تهيج مشابهة للتأثير الكهروضوئي. تتكون هذه الصبغات من تركيب حلقي معقد يسمى دورة البروفيرين Prophyrin Ring المحتوية على روابط أحادية وثنائية متبادلة. ويوجد في مركز هذا التركيب الحلقي ذرة ماغنيسيوم (شكل 5).

تُهيج الفوتونات الإلكترونية في دورة البروفيرين التي يتم توجيهها بعيداً عبر الروابط الأحادية والثنائية المتبادلة، يغير عدد من المجموعات الجانبية المختلفة المرتبطة بالتركيب الحلقي صفات الامتصاص الضوئي لهذه الجزيئات في الأنواع المختلفة من الكلوروفيل. وتؤثر البيئة المحلية المصغرة التي توجد فيها هذه الجزيئات، والتي تنتج من ارتباطها من أنواع مختلفة من البروتينات في طيف امتصاصها الدقيق.

**طيف فعل البناء الضوئي Action Spectrum** – الفعالية النسبية لأطوال موجية مختلفة من الضوء في دفع عملية البناء الضوئي (يطابق طيف الامتصاص الضوئي للكلوروفيل)، لذلك تستخدم النباتات جميعها والطحالب، والطحالب الخضراء المزرقة كلوروفيل أ بوصفه صبغات أساسية في عملية البناء الضوئي.

من المنطق الاستفسار عن سبب عدم استخدام المخلوقات التي تقوم بعملية البناء الضوئي صبغات مثل الريتينال (الصبغة الموجودة في العين) التي تمتص الضوء ضمن مجال واسع يمتد من (500 – 600) نانوميتر. إن الفرضية الأكثر احتمالاً هي التي تعني بالكفاءة الضوئية Photoefficiency. فمع أن الريتينال يمتص مجالاً واسعاً من الموجات الضوئية لكنه يقوم بذلك بكفاءة منخفضة. بالمقارنة صبغة الكلوروفيل التي تمتص الضوء ضمن مجالين ضيقين، تقوم بهذه العملية بكفاءة عالية جداً، لذا فإن النباتات ومعظم المخلوقات التي تقوم بعملية

البناء الضوئي تتمكن من القيام بامتصاص مستويات عالية من الطاقة من خلال صبغة الكلوروفيل مقارنة بالصبغات الأخرى.

#### 4-6 الكاروتينويدات والصبغات الأخرى

تتكون الكاروتينويدات من حلقات كربونية متصلة مع سلسلة تحتوي على روابط أحادية وثنائية متبادلة. تستطيع هذه الصبغات امتصاص فوتونات ذات مدى واسع من الطاقة، مع أنها قد لا تكون ذات كفاءة عالية في نقل هذه الطاقة. تساعد الكاروتينويدات في عملية البناء الضوئي، إذ أنها تمتص الطاقة الضوئية للأمواج التي لا تمتصها صبغة الكلوروفيل بكفاءة.

للكاروتينويدات دور مهم في التخلص من الجذور الحرة، كيف؟ إن تفاعلات الأكسدة والاختزال التي تتم في البلاستيدات الخضراء يمكن أن تنتج جذورا، أو شوارد حرة خطيرة، وتعمل الكاروتينويدات بوصفها مادة مضادة للتأكسد تقلل من خطر هذه المواد. وليس من الغريب أن تقوم الكاروتينويدات بدور الحماية هذا، حيث أن هذه الصبغات موجودة في مخلوقات متعددة بعكس الكلوروفيل.

أحد الكاروتينويدات المعروفة هو ما يسمى بينا كروتين الذي يحتوي على حلقتي كربون مرتبطين بسلسلة مكونة من 18 ذرة كربون ذات روابط أحادية وثنائية متبادلة. وينتج تحطيم جزيء بينا كروتين إلى نصفين متساويين جزيئين من فيتامين أ. عند تأكسد فيتامين أ. تؤدي أكسدة فيتامين أ إلى إنتاج مادة الريتينال، وهي الصبغة التي تستخدمها الفقاريات في الرؤية، إن هذا الارتباط يبين سبب تحسن الرؤية عند تناول الجزر الغني بهذه الصبغة.

**الفيكوبيلوبروتينات Phycobiloproteins** صبغات ثانوية توجد في بعض الطحالب الخضراء المزرققة، والطحالب الأخرى. وتتكون هذه الصبغات من بروتينات مرتبطة مع مجموعة البيروول الرباعي. تحتوي هذه الحلقات البيروولية نظاما متبادلاً من روابط ثنائية تشبه تلك الموجودة في الصبغات الأخرى والمواد الناقلة للإلكترونات، ويمكن للفيكوبيلوبروتينات أن تكون معقدا يسمى جسيمات فيكوبيلين، وهي نوع آخر من المعقدات الممتصة للضوء، التي يمكنها امتصاص الضوء الأخضر الذي يعكسه الكلوروفيل عادة، وتعد هذه المعقدات ذات أهمية بيئية للطحالب الخضراء المزرققة، لأنها تساعد على وجودها في المناطق ذات الإضاءة القليلة في المحيطات، وفي هذه البيئة يتوافر الضوء الأخضر بعد امتصاص الأمواج الزرقاء والحمراء عن طريق الطحالب الخضراء القريبة من السطح.

والخلاصة أن الضوء نوع من أنواع الطاقة له طبيعة موجية وأخرى جزيئية، تعتمد عملية البناء الضوئي على قدرة بعض الجزيئات على امتصاص طاقة الضوء، أي الصبغات. يعد الكلوروفيل الصبغة الأساسية التي تقوم بعملية البناء الضوئي، وتوجد بأشكال عدة. تمتاز جزيئات الصبغات بطيف امتصاص ضوئي ذي كفاءة عالية. يمكن زيادة كفاءة امتصاص طاقة الضوء من خلال الصبغات الثانوية التي تمتاز بطيف امتصاص ضوئي مختلف عن صبغة الكلوروفيل.

#### 5- تركيب النظام الضوئي

إحدى الطرق لدراسة دور الصبغات في عملية البناء الضوئي هي قياس العلاقة بين شدة الإضاءة، ونواتج عملية البناء الضوئي، بمعنى: كم من النواتج ينتج، وبكم من الطاقة الضوئية؟ بينت نتائج التجارب في النباتات أن نواتج البناء الضوئي تزداد بشكل خطي مع ازدياد كمية الإضاءة من مستوى قليل إلى أعلى، ولكنها في النهاية تستقر عند مستويات تسمى مستويات الإشباع (أي لا تزداد نواتج البناء الضوئي مع زيادة شدة الضوء). يحصل الإشباع لأن قدرة النبات على امتصاص الضوء قد وصلت إلى أقصى درجات الاستخدام.

#### 5-1 يتطلب إنتاج جزيء واحد من الأكسجين مجموعة من جزيئات الكلوروفيل

إذا أخذنا في الحسبان ظاهرة الإشباع في عملية البناء الضوئي، فإن السؤال الآتي هو: كم جزيئا من صبغة الكلوروفيل قد امتصت فوتونات بشكل فعلي؟ ويمكن وضع صبغة السؤال بشكل آخر هو: هل تصل عملية البناء الضوئي إلى مستوى الإشباع عندما تكون جزيئات الكلوروفيل جميعها قد امتصت فوتونات؟

للحصول على إجابة عن هذا السؤال، يجب قياس كل من نواتج البناء الضوئي (أي عدد جزيئات الأكسجين المنتجة) وعدد جزيئات الكلوروفيل الموجودة. استطاع الباحثون باستخدام الطحالب أحادية الخلية المسماة كلوريللا Chlorella الحصول على هذه القيم، فتعرض مزرعة كلوريللا لومضات من الضوء متزايدة الشدة،

يجب أن يزيد محصول الأكسجين الناتج عن كل ومضة، إلى أن يصبح النظام مشبعًا. بعد ذلك يمكن مقارنة إنتاج الأكسجين مع عدد جزيئات الكلوروفيل الموجودة في المزرعة.

لقد وُجد أن مستوى الأكسجين الملاحظ لكل جزيء كلوروفيل عند الإشباع هو جزيء واحد من الأكسجين لكل 2500 جزيء من الكلوروفيل.

أدت هذه النتيجة للتوصل إلى الاستنتاج بأن الضوء لا يمتص من خلال جزيئات الصبغات بشكل أحادي، بل بشكل تجمعات من جزيئات الكلوروفيل والصبغات الثانوية الأخرى التي تشكل ما يسمى النظام الضوئي. عند امتصاص الضوء من أي واحد من مئات جزيئات الصبغة في النظام الضوئي، يتم نقل طاقة التهيج إلى جزيء واحد ذي مستوى طاقة أقل منه.

## 5-2 النظام الضوئي العام يحتوي على معقد مجمع للطاقة الضوئية ومركز للتفاعل

تمتص الطاقة الضوئية من خلال الأنظمة الضوئية في البلاستيدات الخضراء للنباتات، وأنواع المخلوقات جميعها التي تقوم بالبناء الضوئي ما عدا بعض المخلوقات بدائية النوى. يتكون كل نظام ضوئي من تركيب متشابه من جزيئات صبغة كلوروفيل، والأصبغ الثانوية وبروتينات مرتبطة معا ضمن معقد بروتيني على سطح أغشية الثايلاكويد. وكما تقوم العدسة بتجميع الضوء في نقطة معينة.

يقوم النظام الضوئي بتوجيه الطاقة الضوئية المجمعة من خلال جزيئات الصبغة المشكلة له نحو جزيء من الكلوروفيل يسمى مركز التفاعل. يعمل جزيء مركز التفاعل على تمرير الطاقة خارج النظام الضوئي على شكل إلكترون مهيج يدفع عمليات بناء ATP والمواد العضوية.

## 5-3 يتكون النظام الضوئي من تركيبين متصلين، هما:

(1) معقد مجمع للطاقة الضوئية Antenna Complex يتكون من مئات الجزيئات من الصبغات وظيفتها

تجميع الطاقة الضوئية، وتوجيهها نحو مركز التفاعل.

(2) مركز التفاعل Reaction Center من جزيء أو أكثر من جزيئات كلوروفيل أ ضمن حشوة بروتينية

تقوم بنقل الإلكترونات المهيجة خارج النظام الضوئي.

## 1- معقد الهوائي Antenna Complex

يسمى معقد الهوائي أيضا المعقد المجمع للطاقة الضوئية، لأنه يصف دوره بدقة. يقوم هذا المعقد بتجميع الطاقة المتوافرة في فوتونات الضوء القادمة من أشعة الشمس وتوجيه هذه الطاقة نحو مركز التفاعل.

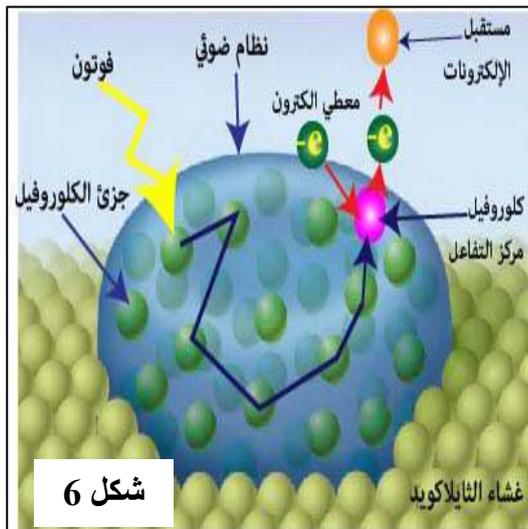
في البلاستيدات الخضراء، يتكون هذا المعقد من شبكة من جزيئات الكلوروفيل المرتبطة معا، والمحمولة على مجموعة من البروتينات الموجودة في أغشية الثايلاكويد، وتوجد كميات متفاوتة من الأصباغ الثانوية ضمن هذا المعقد. تترتب جزيئات الأصباغ بشكل مثالي لانتقال الطاقة الضوئية.

وتنقل طاقة التهيج الناتجة عن امتصاص طاقة الفوتون من جزيء إلى جزيء مجاور في طريقها نحو مركز التفاعل. بعد الانتقال، يعود الإلكترون المهيج إلى موقعه الطبيعي قليل الطاقة الذي كان عليه قبل امتصاص طاقة الفوتون، وعليه فإن الطاقة وليست الإلكترونات هي التي تنقل بين جزيئات الصبغات، ويقوم معقد تجميع الطاقة بتوجيه الطاقة نحو جزيء مركز التفاعل.

## 2- مركز التفاعل Reaction Center

مركز التفاعل Reaction Center هو معقد من صبغة،

وبروتين غشائي. في بعض أنواع البكتريا الضوئية المحتوية على تراكيب أبسط من البلاستيدات الخضراء، ولكنها مفهومة بشكل أفضل، يعمل جزيئات من الكلوروفيل البكتيري أ بوصفها مصيدة لطاقة الفوتونات، ويمرر الإلكترون المهيج إلى مستقبل إلكتروني موجود بالقرب منها. لاحظ هنا أن الإلكترون المهيج ذاته هو



شكل 6

الذي ينتقل وليس طاقة الفوتونات كما يحصل بين جزيئات الصبغات في المعقد المجمع للطاقة، وهذا يمكن من انتقال طاقة الفوتون بعيدا عن جزيئات الكلوروفيل، وهي الخطوة الأهم في تحول الطاقة الضوئية إلى طاقة كيميائية.

يبين (الشكل 6) كيفية انتقال الإلكترونات المهيجة من مركز التفاعل إلى المستقبل الابتدائي للإلكترونات. عند ارتفاع طاقة إلكترون في جزيء كلوروفيل مركز التفاعل يكون الضوء قد كون مركزاً مانحاً للإلكترونات ذا فعالية عالية لم يكن موجوداً قبل امتصاص الضوء. ينقل الكلوروفيل الإلكترون المهيج إلى المستقبل الابتدائي للإلكترونات، وهو جزيء من الكوينون، فيختزل بعدها هذا الجزيء، ويتحول إلى مصدر مانح للإلكترونات، يقوم جزيء قريب ذو قدرة ضعيفة على إعطاء الإلكترونات بتقديم إلكترون ضعيف الطاقة إلى الكلوروفيل ليعيده إلى الوضع السابق قبل خسارته للإلكترون. في حين يقوم الكوينون بنقل الإلكترونات إلى مستقبل آخر، وتكرر هذه العملية.

في البلاستيدات الخضراء للنباتات يقوم الماء بدور المانح الضعيف للإلكترونات، وعند أكسدة الماء بهذه الطريقة يتم انطلاق الأكسجين مع بروتونين ( $H^+$ ).

### 6- التفاعلات الضوئية ( المعتمدة على الضوء )

التفاعلات المعتمدة على الضوء تحدث في مجموعة من الأغشية. في البكتريا الضوئية تحدث هذه التفاعلات في الغشاء البلازمي متعرجا لزيادة مساحة السطح. أما في الطحالب والنباتات فإن عملية البناء الضوئي تحدث في البلاستيدات الخضراء، التي يُعتقد أنها كانت قد تطورت من أصول تعود إلى البكتريا الضوئية. لغشاء الثايلاكويد الداخلي تركيب عالي التنظيم، يحتوي على تراكيب لها دور في التفاعلات المعتمدة على الضوء، ولهذا فإن هذه التفاعلات تسمى أيضا تفاعلات الثايلاكويد.

وتحدث هذه التفاعلات من خلال أربع خطوات، هي:

#### 1. الحدث الضوئي الابتدائي Primary Photoevent :

في هذه العملية؛ تلتقط الصبغة طاقة أحد الفوتونات، ويكون نتيجة هذا الحدث الضوئي الابتدائي تهيج أحد الإلكترونات في هذه الصبغة.

#### 2. فصل الشحنات Charge Separation :

يتم نقل طاقة التهيج إلى مركز التفاعل الذي يقوم بدوره بنقل إلكترون مهيج إلى جزيء مستقبل للإلكترونات مبتدئا بذلك عملية نقل إلكتروني.

#### 3. النقل الإلكتروني Electron Transport :

تنقل الإلكترونات المهيجة عبر سلسلة من الجزيئات الناقلة للإلكترونات والموجودة ضمن الأغشية النباتية الضوئية، تستجيب كثير من هذه الجزيئات بنقل البروتونات عبر الغشاء ما يجعل فرقا في تركيز البروتونات، في نهاية هذه السلسلة تستخدم الإلكترونات لاختزال المستقبل النهائي الذي يكون مركبا يدعى NADPH .

#### 4. الأسموزية الكيميائية Chemiosmosis :

تتدفق البروتونات التي تراكمت في جهة واحدة من الأغشية لتعود من خلال مصنع ATP نحو التركيز الأقل، حيث يتم تصنيع ATP نتيجة لهذه الأسموزية الكيميائية.

تشكل هذه الخطوات الأربع مرحلتي التفاعلات المعتمدة على الضوء التي ذكرت سابقا في بداية هذا الجزء. تمثل الخطوات 1 - 3 المرحلة التي تُمتص فيها الطاقة الضوئية والمرحلة الرابعة هي المرحلة التي يتم فيها إنتاج ATP (وكذلك NADPH).

وفيما تبقى من هذا الجزء سنناقش تطور الأنظمة الضوئية، وتفاصيل عمل النظام الضوئي في التفاعلات المعتمدة على الضوء.

## 6-1 النظام الضوئي الواحد في البكتريا

تستخدم بعض البكتريا نظاما ضوئيا واحداً

يُعتقد أن تجمع الصبغات الضوئية قد تطور قبل بليون سنة في البكتريا المشابهة لبكتريا الكبريت الموجودة حالياً. تحدث في الأنظمة الضوئية لهذه البكتريا خطوتان، هما:

### 1. يرتبط إلكترون مع بروتون لتكوين الهيدروجين:

في هذه البكتريا يكون امتصاص الضوء أعلى ما يكون على طول موجة 840 nm (الأشعة تحت الحمراء القريبة وغير المرئية لعين الإنسان)، ولذلك فإن مركز التفاعل في هذه المخلوقات يسمى P<sub>840</sub> وامتصاص الفوتون يؤدي إلى نقل إلكترون مهيج عبر سلسلة من النواقل الإلكترونية. وفي نهاية هذه السلسلة، يتحد الإلكترون مع بروتون مكوناً ذرة الهيدروجين. في بكتريا الكبريت يتم استخلاص الإلكترونات من كبريتيد الهيدروجين مخلفاً عنصر الكبريت وبروتونات بوصفها نواتج جانبية. وفي البكتريا التي تطورت لاحقاً وفي الطحالب والنباتات يأتي الإلكترون من الماء مخلفاً أكسجين وبروتونات بصفتها نواتج جانبية.

### 2. إعادة دوران الإلكترون إلى الكلوروفيل:

إن انفصال إلكترون وانطلاقه من مركز التفاعل في البكتريا يؤدي إلى خسارته لإلكترون. وقبل أن يقوم النظام الضوئي بالعمل مرة أخرى في بكتريا الكبريت، فإن من الضروري إعادة الإلكترون. تقوم هذه البكتريا بتوجيه الإلكترونات رجوعاً نحو الصبغة من خلال نظام ناقل للإلكترونات. وتؤدي حركة الإلكترونات إلى دفع مضخات بروتونية تبني ATP من خلال الأسموزية الكيميائية، حيث يتم إنتاج جزيء واحد من ATP لكل ثلاثة من الإلكترونات التي تسير في هذا النظام.

وبشكل عام مسار الإلكترون حلقي، ولهذا السبب يسمى الكيمائيون عملية النقل الإلكتروني التي تكون ATP **الفسفرة الضوئية الحلقية Cyclic Photophosphorylation**.

لاحظ أن الإلكترون الذي غادر P<sub>840</sub> ضمن مركز التفاعل ذو طاقة عالية نتجت من خلال امتصاص الفوتون الضوئي. وعلى العكس من ذلك، فإن الإلكترون بعد عودته يحمل طاقة مساوية لما كان عليه قبل امتصاص الطاقة الضوئية. ويقوم الفرق في الطاقة بدفع المضخة البروتونية. ومنذ أكثر من مليار عام، كانت الفسفرة الضوئية الحلقية النوع الوحيد من التفاعلات المعتمدة على الضوء، ومن أهم محدودياتها أنها تنتج نحو توليد الطاقة، وليس نحو تصنيع السكريات. ونظراً لأن جزيئات السكر مختزلة بشكل أكبر (أي أنها تحتوي على عدد أكبر من ذرات الهيدروجين) من ثاني أكسيد الكربون، يجب أن يتوافر مصدر للهيدروجين اللازم للاختزال، ولا يمكن لعملية الفسفرة الحلقية الضوئية أن تقوم بهذا الدور. إن ذرات الهيدروجين التي يتم الحصول عليها من H<sub>2</sub>S تستخدم بوصفها مصدراً للبروتونات اللازمة لتصنيع ATP ولا يتم استخدامها للاتحاد مع الكربون، وعلى البكتريا المحددة بهذه العملية الحصول على الهيدروجين من مصادر أخرى، وعليه فهي عملية ليست ذات كفاءة مناسبة.

## 6 – 2 النظامين الضوئيين في البلاستيدات الخضراء

تحتوي البلاستيدات الخضراء على نظامين ضوئيين مرتبطين

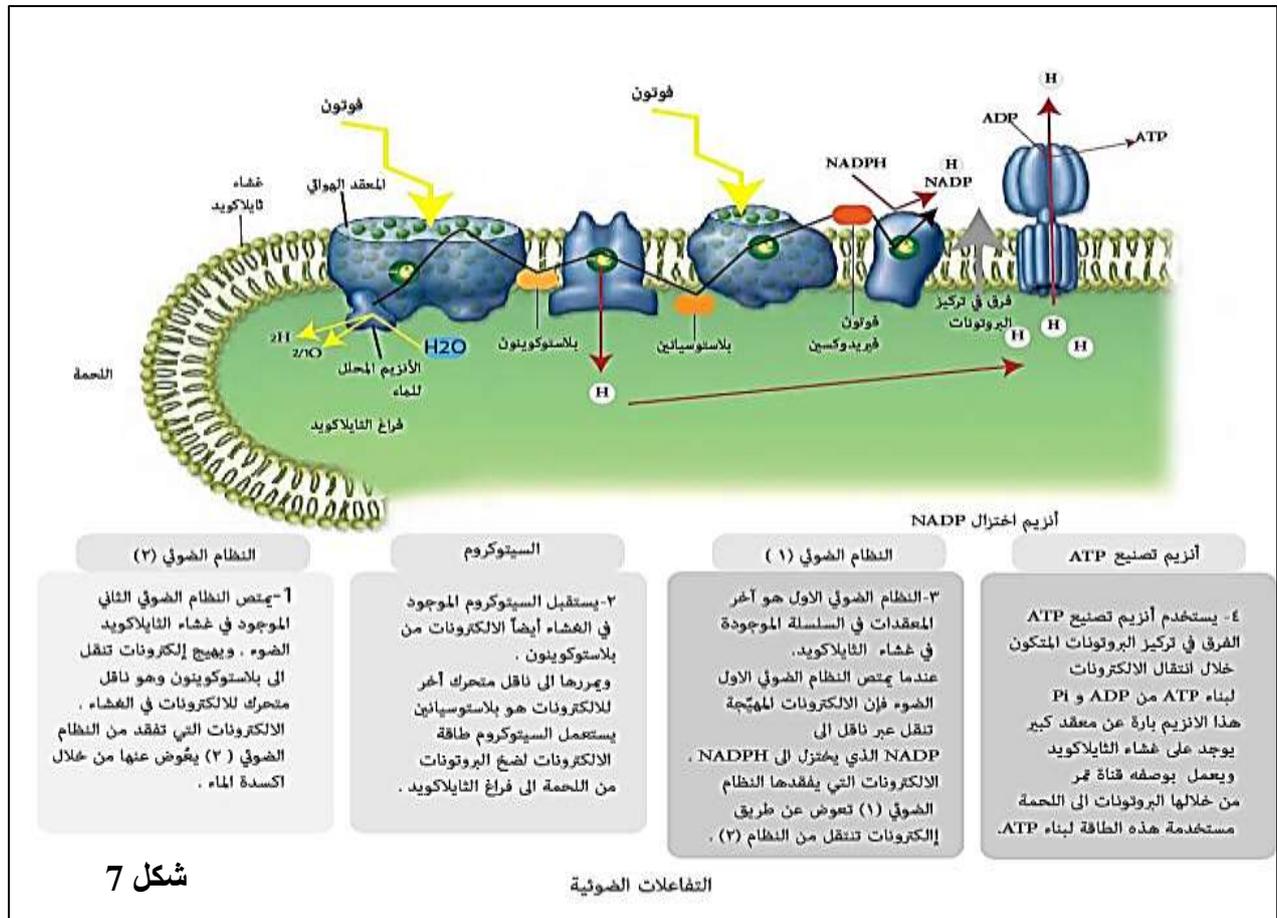
بعكس بكتريا الكبريت تمتلك النباتات نظامين ضوئيين متصلين. يؤدي هذا إلى التخلص من محدودية الفسفرة الضوئية الحلقية بتوفير مصدر بديل للإلكترونات من خلال أكسدة الماء. وتنتج عملية أكسدة الماء الأكسجين أيضاً، وبذلك تسمى هذه العملية البناء الضوئي الأكسجيني. إن الانتقال غير الحلقي للإلكترونات ينتج أيضاً NADPH الذي يمكن استخدامه في بناء السكريات.

يسمى أحد هذين النظامين **النظام الضوئي I Photosystem I** وتكون قمة امتصاص الضوء له على طول موجة 700 نانومتر. ولهذا فإن صبغة مركز التفاعل في هذا النظام تسمى P<sub>700</sub> ويعمل هذا النظام الضوئي بطريقة مشابهة للنظام الضوئي الموجود في بكتريا الكبريت، الذي تم مناقشته سابقاً. أما النظام الضوئي الآخر فيسمى النظام الضوئي **II Photosystem II** وتكون قمة امتصاص الضوء له على طول موجة 680

نانوميتر، ولهذا فإن مركز التفاعل في هذا النظام الضوئي يسمى  $P_{680}$ . ويمكن لهذا النظام الضوئي أن يوفر قدرة مؤكسدة كافية لأكسدة الماء. وعند عمل هذين النظامين معا فإنهما يقومان بعملية نقل غير حلقية للإلكترونات تستخدم لإنتاج كل من ATP و NADPH .

سمي النظامان الضوئيان I و II على الترتيب بحسب ترتيب اكتشافهما، وليس بحسب طريقة عملهما في التفاعل المعتمد على الضوء. في الطحالب والنباتات، يختص النظامان الضوئيان بأدوار مختلفة في مجمل عملية البناء الضوئي الأكسجيني. فالنظام الضوئي I ينقل الإلكترونات نحو  $NADPH^+$  منتجا NADPH ويتم التعويض عن الإلكترون الذي فقده النظام الضوئي I من الإلكترونات القادمة من النظام الضوئي II الذي له قدرة عالية على أكسدة الماء للتعويض عن الإلكترون الذي فقد من النظام الضوئي I. لذا، فإن هناك عملية انتقال إجمالية للإلكترونات من الماء إلى NADPH .

يرتبط النظامان الضوئيان بمعقد من الناقلات الإلكترونية يسمى معقد سيتوكروم  $b_6-f$  cytochrome. ويمكن لهذا المعقد استخدام الطاقة الناتجة عن حركة الإلكترونات لنقل البروتونات عبر غشاء الثايلاكويد لإنتاج فرق، أو تدرج في تركيز البروتونات يستخدمه الأنزيم المصنع لـ ATP ( شكل 7 ).



### 3-6 آلية عمل النظامين الضوئيين :

يعمل النظامان الضوئيان معاً خلال الفسفرة الضوئية غير الحلقية

جاءت الدلائل على عمل النظامين الضوئيين من خلال التجارب التي تم فيها قياس معدلات البناء الضوئي باستخدام شعاعين من الضوء لهما طولان موجيان مختلفان: أحدهما ضوء الأحمر، والآخر ضوء تحت الأحمر. فباستخدام الضوءين معاً، تم حدوث معدلات بناء ضوئي تزيد على مجموع معدلات البناء لكل منهما على حدة.

يمكن تفسير هذه النتائج غير المتوقعة، التي تدعى "التأثير المحسن" Enhancement Effect من خلال آلية تتضمن نظامين ضوئيين يعملان بشكل متسلسل (واحد تلو الآخر). فأحد النظامين الضوئيين يمتص الضوء الأحمر بشكل خاص، في حين يمتص الآخر الضوء تحت الأحمر.

تستخدم النباتات النظامين الضوئيين II و I بشكل متسلسل.

يستخدم النظام الضوئي الأول أولاً، ومن ثم النظام الضوئي الثاني لإنتاج كل من ATP و NADPH .

تسمى هذه العملية ذات المرحلتين **الفسفرة الضوئية غير الحلقية Noncyclic Photophosphorylation**، لأن مسار الإلكترونات ليس حلقياً – فالإلكترونات المنطلقة من النظام الضوئي لا تعود إليه، بل إنها تنتهي في NADPH ، ويتم تعويض الإلكترونات في النظامين الضوئيين من الإلكترونات التي يتم الحصول عليها من تحلل الماء.

يوضح النمط الذي يدعى المخطط Z diagram Z ، خطوتي تنشيط الإلكترونات، ويحفظ كل نظام ضوئي إحداهما. يبين المحور الأفقي سير التفاعلات الضوئية والموقع النسبي للمعقدات. أما المحور العمودي فيبين المستوى النسبي لطاقة الإلكترونات. تنشأ الإلكترونات من الماء الذي يمسك بالإلكترونات بقوة (قدرة أكسدة واختزال له  $+820 \text{ mV}$ ) وتنتهي بـ NADPH الذي يمسك بالإلكترونات بقوة أضعف (قدرة أكسدته واختزاله  $-320 \text{ mV}$ ).

يعمل النظام الضوئي II أولاً، حيث تستخدم الإلكترونات ذات الطاقة العالية التي ينتجها النظام الضوئي II في بناء ATP ، ومن ثم يتم تمريرها إلى النظام الضوئي I لدفع إنتاج NADPH . ولكل زوج من الإلكترونات يتم الحصول عليها من جزيء من الماء ينتج جزيء واحد من NADPH وأكثر قليلاً من جزيء واحد من ATP .

### 1- النظام الضوئي II

يتشابه مركز التفاعل الخاص بالنظام الضوئي II إلى حد كبير من مركز التفاعل للبكتريا الحمراء الأرجوانية، حيث يتكون من لب من 10 تحت وحدات من البروتينات عبر الغشائية وتراكم ناقل للإلكترونات وجزيئين من الكلوروفيل  $P_{680}$  المرتبة حول اللب. أما الهوائي أو المعقد المجمع للضوء، فيتكون من مجموعة من جزيئات الكلوروفيل أ، وصبغات ثانوية مرتبطة من سلاسل بروتينية متعددة. ويختلف مركز التفاعل II عن مركز تفاعل البكتريا الحمراء الأرجوانية في أنه يحتوي أيضاً على 4 ذرات من المنجنيز، وهذه ضرورية لأكسدة الماء. ومع أن تفاصيل عملية تأكسد الماء ليست واضحة تماماً، لكن الصورة العامة لهذه العملية بدأت بالظهور. ترتبط مجموعات من 4 ذرات من المنجنيز مع بروتينات مركز التفاعل، ويرتبط جزيئان من الماء مع هذا التجمع من المنجنيز. وعندما يمتص مركز التفاعل للنظام الضوئي II طاقة الفوتون يهيج أحد إلكترونات جزيء الكلوروفيل  $P_{680}$  الذي ينقل هذا الإلكترون إلى مستقبل للإلكترونات. عند خسارة  $P_{680}$  للإلكترون، تصبح هذه الصبغة مادة مؤكسدة تزيل إلكترونات من ذرة المنجنيز. تزيل ذرة المنجنيز مؤكسدة وبمساعدة البروتينات الموجودة في مركز التفاعل الإلكترونات من ذرات الأكسجين في جزيئين من الماء. تتم هذه العملية بعد أن يقوم مركز التفاعل بامتصاص 4 فوتونات تؤدي إلى أكسدة كاملة لجزيئين من الماء وإنتاج جزيء واحد من الأكسجين.

### دور المعقد $b_6 - f$

إن المستقبل الابتدائي للإلكترونات المهيجة بالطاقة الضوئية التي تنطلق من النظام الضوئي II هو عبارة عن جزيء من مادة كوينون. عند اختزال الكوينون بعد استقباله زوجاً من الإلكترونات يتكون مركب بلاستوكوينون Plastoquinone يرمز إليه بـ (PQ). هذا المركب مانح قوي للإلكترونات؛ لذا يقوم بتمرير زوج الإلكترونات إلى مضخة بروتينية تسمى المعقد  $b_6 - f$  complex منغرسه ضمن غشاء الثايلاكويد.

عند وصول زوج الإلكترونات ذات الطاقة العالية إلى معقد  $b_6 - f$ ، يضخ هذا المعقد البروتونات إلى فراغ الثايلاكويد، في حين يحمل بروتين صغير محتوٍ على النحاس يسمى بلاستوسيانين Plastocyanin (يرمز إليه PC) زوج الإلكترونات إلى النظام الضوئي I.

## 2- النظام الضوئي I

يتكون مركز التفاعل للنظام الضوئي I من لب من معقد البروتينات عبر الغشائية يتكون من 12-14 تحت وحدة بروتينية، وجزئين مرتبطين من صبغة الكلوروفيل  $P_{700}$ . يُغذى المركز بالطاقة من الهوائي أو المعقد المجمع للطاقة الضوئية والمكون من جزيئات من صبغة كلوروفيل أ وصبغات ثانوية. يستقبل النظام الضوئي I إلكترونات من جزيء البلاستوسيانين ليعوض النقص الذي حصل بفقدان إلكترون بفعل الطاقة الضوئية الممتصة. فعند امتصاص النظام الضوئي I الفوتون، ترتفع طاقة الإلكترون إلى مستوى كبير، بحيث يترك هذا الإلكترون مركز التفاعل، وبعكس النظام الضوئي II والأنظمة الضوئية البكتيرية، فإن النظام الضوئي I الفوتون، ترتفع طاقة الإلكترون إلى مستوى كبير، بحيث يترك هذا الإلكترون مركز التفاعل. وبعكس النظام الضوئي II والأنظمة الضوئية البكتيرية، فإن النظام الضوئي I في النباتات لا يعتمد على الكوينون بوصفه مستقبلاً لهذه الإلكترونات، بل يقوم بنقل هذه الإلكترونات إلى بروتين غني بالحديد والكبريت يسمى فيريدوكسين Ferredoxin (Fd).

### • تصنيع NADPH

يُنقل النظام الضوئي I الإلكترونات إلى الفيريديوكسين الموجود على سطح غشاء الثايلاكويد القريب من اللحمة. يحمل الفيريديوكسين المختزل الإلكترونات ذات الطاقة العالية إلى جزيء  $NADP^+$  لينتج جزيء NADPH، ويسهل هذا التفاعل أنزيمياً مرتبطاً بالغشاء يسمى الأنزيم مختزل  $NADP^+$  reductase. وحيث أن هذا التفاعل يحصل على جانب لغشاء الثايلاكويد القريب من اللحمة، ويتضمن استهلاك بروتونات عند تكوين NADPH فإن لهذا التفاعل دوراً إضافياً في تكوين فرق في تركيز البروتونات المتشكل خلال النقل الإلكتروني لعملية البناء الضوئي.

### • الكيميائية الأسموزية (الكيموأسموزية) Chemiosmosis وتكون ATP

يتم ضخ البروتونات من اللحمة إلى حجرة الثايلاكويد عبر المعقد  $b_6 - f$ ، وتضيف عملية تحلل الماء كميات أخرى من البروتونات التي تشارك في تكوين الفرق في تركيز البروتونات. ولأن غشاء الثايلاكويد غير منفذ للبروتونات، فإن تراكم البروتونات فيه يؤدي إلى تشكل فرق في الجهد الكهربائي الكيميائي يمكن أن يُستخدم في بناء ATP.

## 3- مُصنَع ATP ATP syntbase

يوجد الأنزيم المُصنَع لـ ATP في غشاء الثايلاكويد للبلاستيدات الخضراء، حيث يكون قناة تسمح للبروتونات بالمرور من خلالها إلى اللحمة، حيث تبرز هذه القنوات على السطح الخارجي لغشاء الثايلاكويد. عند مرور البروتونات عبر هذه القنوات خارجة من الثايلاكويد يتم فسفرة ADP وتحويله إلى ATP الذي يغادر إلى اللحمة. تحتوي اللحمة على الأنزيمات الضرورية لتفاعلات تثبيت الكربون من خلال تفاعلات دورة كالفن. إن هذه الآلية، وتركيب الأنزيم المُصنَع لـ ATP هي نفسها الموجودة في الميتوكوندريا. وفي الحقيقة فإن هناك تماثلاً في تطور هذين الأنزيمين. إن التشابه في تشكيل فرق في تركيز البروتونات من خلال نظام نقل الإلكترونات، وتكوين ATP من خلال العملية الكيموأسموزية تبين التشابه في تركيب الميتوكوندريا والبلاستيدات الخضراء ووظيفتهما.

### • إنتاج ATP إضافي

إن تحرك زوج من الإلكترونات من الماء إلى  $NADP^+$  خلال الفسفرة الضوئية غير الحلقية يُنتج جزيئاً واحداً من NADPH وكمية من ATP تزيد قليلاً على جزيء واحد. وكما سنتعلم لاحقاً في هذا الجزء، فإن بناء المواد

العضوية يحتاج إلى طاقة تزيد على هذه. إذ يستهلك 1.5 جزيء من ATP مع كل جزيء من NADPH لتثبيت كل ذرة كربون.

لإنتاج الطاقة الإضافية من ATP فإن عددا من النباتات تستطيع استخدام النظام الضوئي I للتحويل نحو الفسفرة الضوئية الحلقية **Cyclic Photophosphorylation**، التي بها تستخدم طاقة الإلكترونات المنطلقة من النظام الضوئي I لبناء ATP بدلا من NADPH. يتم هنا نقل الإلكترونات ذات الطاقة العالية ببساطة رجوعا إلى المعقد  $b_6 - f$  بدلا من ذهابها نحو  $NADP^+$ .

يقوم المعقد  $b_6 - f$  بضخ البروتونات إلى فراغ الثايلاكويد مضيفا إلى فرق تركيز البروتونات التي تدفع البناء الكيموأسموزي لـ ATP ، وتحدد النسبة بين الفسفرة الضوئية الحلقية واللاحقية في هذه النباتات كميات ATP و NADPH النسبية المتوافرة لبناء المواد العضوية.

إن المعقدات الأربعة المسؤولة عن التفاعلات الضوئية، وهي: النظام الضوئي I و II وسيتوكروم  $b_6 - f$  ومُصنع ATP لا تترتب بشكل عشوائي في الثايلاكويد. لقد بدأ الباحثون تصوير هذه المعقدات باستخدام مجهر القوة الذرية. وبدأت تظهر صورة تبيّن أن النظام الضوئي II يوجد بشكل أساسي في الجراناء، أما النظام الضوئي I ومُصنع ATP فيوجدان بشكل أساسي على الأغشية المحاذية للحمّة، وقد يوجدان أيضا على الحواف بين أغشية الجراناء والحمّة.

لا يُعتقد الآن أن الثايلاكويدات مجرد أقرص ذات ترتيب طبقي فقط، بل هناك نماذج للثايلاكويدات مستمدة من دراسات مجهرية إلكترونية وغيرها، تبيّن أن الجراناء أغشية متعرجة ومتصلة. ويعد هذا النوع من الترتيب مشابه إلى حد كبير للبكتيريا التي تقوم بالبناء الضوئي، وهي ذات طبيعة مرنة تتناسب مع ترتيب المعقدات المختلفة نسبة إلى بعضها بعضا.

تنتج التفاعلات الضوئية كلا من ATP و NADPH. تستخدم بكتيريا الكبريت نوعا مبسطا من البناء الضوئي مكونا من نقل حلقي للإلكترونات لتشكيل فرق في تركيز البروتونات المستخدم لبناء ATP ، ولكنها لا تؤدي إلى تكوين NADPH بشكل مباشر.

تحتوي البلاستيدات الخضراء على نظامين ضوئيين يوجدان على غشاء الثايلاكويد، ويتصلان معا من خلال سلسلة ناقلة للإلكترونات. يستطيع كل نظام ضوئي أن يمتص طاقة فوتون ضوئي تؤدي إلى تهيج أحد الإلكترونات التي يتم نقلها إلى مركب مستقبل للإلكترونات. في النظام الضوئي I تمرر الإلكترونات إلى NADPH.

يتم التعويض عن هذه الإلكترونات من تلك القادمة من النظام الضوئي II عبر سلسلة نقل للإلكترونات. ويقوم النظام الضوئي II بأكسدة الماء للتعويض عن الإلكترونات التي فقدها النظام الضوئي II . يتم تكوين ATP من خلال العملية الكيموأسموزية باستخدام فرق تركيز البروتونات المتشكل نتيجة لحركة الإلكترونات بين النظامين الضوئيين.

## 7- دورة كالفن - تثبيت الكربون

تحتوي السكريات على عدد كبير من الروابط بين C-H ، وهي مختزلة بشكل كبير مقارنة مع ثاني أكسيد الكربون  $CO_2$  .

لبناء السكريات، تستخدم الخلية الطاقة ومصدراً للإلكترونات يتم إنتاجه خلال التفاعلات المعتمدة على الضوء في الثايلاكويدات.

**1. طاقة ATP:** يتم توفيرها عن طريق الفسفرة الضوئية والحلقية واللاحلقية، وهي تدفع التفاعلات المستهلكة للطاقة.

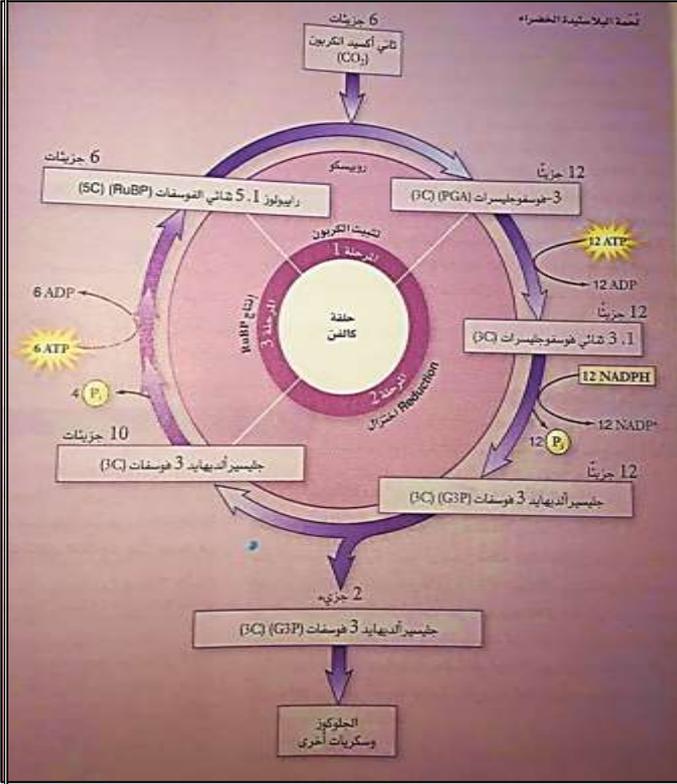
**2. القدرة الاختزالية:** يوفر NADPH (الذي يتم توفيره من خلال نشاط النظام الضوئي I) مصدراً للبروتونات والإلكترونات ذات الطاقة العالية اللازمة لربط هذه البروتونات مع ذرات الكربون. ينتهي جزء كبير من الطاقة الضوئية التي يتم امتصاصها خلال عملية البناء الضوئي بوصفها طاقة في الروابط الغنية بالطاقة والموجودة بين C-H في السكريات.

### 7-1 تحول تفاعلات دورة كالفن الكربون اللاعضوي إلى جزيئات عضوية

كان الباحثون الأوائل قد بينوا أن معدل عملية البناء الضوئي تعتمد على درجة الحرارة، وبذلك فقد كان واضحاً أن تفاعلات البناء الضوئي تتكون من مجموعة من التفاعلات التي تسيرها مجموعة من الأنزيمات، التي تشابه دورة كريس التي تحدث خلال عملية التنفس، وبعكس ما يحصل في دورة كريس، فإن التفاعلات الحلقية لتثبيت الكربون تسير بطريقة تؤدي إلى تكوين مركبات جديدة. وبذلك فإن طبيعة هذه التفاعلات مختلفة تماماً. وتسمى التفاعلات الحلقية التي تثبت الكربون دورة كالفن **Calvin Cycle** نسبة إلى مكتشفها ملفن كالفن (1911 – 1997).

ولأن المادة الوسيطة الأولى في هذه الدورة المسماة فوسفوجليسيرات مادة ثلاثية الكربون، فإن هذه العملية تسمى البناء الضوئي نوع **C<sub>3</sub> Photosynthesis**.

الخطوة الأساسية في هذه العملية هي المرحلة التي تؤدي إلى اختزال ثاني أكسيد الكربون ( $CO_2$ ) تتضمن ارتباط  $CO_2$  مع مركب عضوي خاص. تنتج الخلايا التي تقوم بعملية البناء الضوئي هذا الجزيء من خلال إعادة تكوين الروابط في وسيطين في عملية تحلل الجلوكوز - وهما مادة فركتوز -6- فوسفات وجليسرألدهايد -3- فوسفات ( $G_3P$ ) - لتكوين سكر خماسي غني بالطاقة يسمى رايبولوز 5،1 ثنائي الفوسفات - ribulose 1,5 - bisphosphate (RuBP).



شكل (8)

يتحد  $CO_2$  مع رايبولوز ثنائي الفوسفات ليكونا مركباً مرحلياً سداسي الكربون غير مستقر لا يلبث أن ينقسم إلى جزئين من مادة ثلاثية الكربون تسمى 3 فوسفوجليسيرات (PGA) 3-phosphoglycerate ويسمى هذا التفاعل تفاعل تثبيت الكربون Carbon Fixation Reaction ؛ لأن الكربون اللاعضوي في  $CO_2$  يصبح جزءاً من شكل عضوي - الحمض PGA. ويقوم الأنزيم المسمى نازع كربوكسيل ومؤكسد رايبولوز ثنائي الفوسفات / ribulose bisphosphate carboxylase oxygenase وعادة ما يختصر بـ روبيسكو Rubisco وهو أنزيم ضخم مكون من 16 تحت وحدة موجود في لحمة البلاستيدات الخضراء، هو الذي ينجز هذا التفاعل (شكل 8).

## 2-7 تكون الجلوكوز :

سوف نرى كيف تنتج تفاعلات دورة كالفن جزيئاً واحداً من الجلوكوز مع أن جزيء الجلوكوز لا يتم إنتاجه بشكل مباشر خلال هذه الدورة. في سلسلة من التفاعلات ترتبط 6 جزيئات من  $CO_2$  مع 6 جزيئات من رايبولوز ثنائي الفوسفات بمساعدة أنزيم روبيسكو لإنتاج 12 جزيئاً من 3- فوسفوجليسيرات (تحتوي على  $3 \times 12 = 36$  ذرة كربون بمجموعها، 6 ذرات من  $CO_2$  و 30 ذرة من رايبولوز ثنائي الفوسفات). تدخل الـ 36 ذرة كربون دورة من التفاعلات الحلقية لتعيد إنتاج 6 جزيئات رايبولوز ثنائي الفوسفات التي استخدمت في الخطوة الأولى (محتوية على  $5 \times 6 = 30$  ذرة كربون) وبذلك يبقى جزيئان من مركب جليسيرألدهايد 3- فوسفات لإنتاج جزيء واحد من الجلوكوز. والمعادلة العامة لدورة كالفن هي:



وعند تكرار الدورة 6 مرات يدخل في التفاعلات 6 جزيئات  $CO_2$  ، وينتج جزيئان من جليسيرألدهايد فوسفات، ويعاد إنتاج 6 جزيئات من رايبولوز ثنائي الفوسفات. ولهذا فإن 6 دورات من دورة كالفن تنتج جزيئين من جليسيرألدهايد فوسفات يمكن أن يستخدم لإنتاج جزيء واحد من الجلوكوز. كما تؤدي 6 دورات من دورة كالفن لدمج 6 جزيئات من  $CO_2$  الداخلة في التفاعلات لتوفر عدداً من ذرات الكربون كافياً لإنتاج الجلوكوز، إلا أن هذه الذرات من  $CO_2$  ليس بالضرورة أن تنتهي بجزيء الجلوكوز.

يمكن تقسيم دورة كالفن إلى ثلاث مراحل، هي:

1. تثبيت الكربون.
2. الاختزال.
3. إعادة تكوين رايبولوز ثنائي الفوسفات.

تؤدي مرحلة تثبيت الكربون إلى إنتاج جزيئين من حمض ثلاثي الكربون هو PGA. يتم اختزال 3- فوسفوجليسيرات في تفاعلات تشابه بشكل أساسي التفاعلات العكسية لتحلل الجلوكوز إلى جليسير ألددهايد ثنائي الفوسفات. عند حدوث هذه الدورة 3 مرات تكون التفاعلات قادرة على إنتاج جزيء واحد من جليسير ألددهايد فوسفات، وعند تكرارها 6 مرات يمكن إضافة كمية من الكربون كافية لإنتاج جزيء واحد من الجلوكوز. نحن نعرف الآن أن الحاجة إلى الضوء خلال تفاعلات دورة كالفن غير مباشرة. تنشيط 5 من الأنزيمات التي تعمل خلال دورة كالفن بما فيها أنزيم روبيسكو بالضوء، بمعنى أنها تعمل بشكل فاعل بوجود الضوء. ويسارع الضوء بنقل المواد الوسيطة ثلاثية الكربون عبر أغشية البلاستيدات الخضراء. وأخيرا فإن الضوء يحفز دخول Mg ، الذي يقوم بدور أساسي في تنشيط أنزيم روبيسكو، إلى أحمة البلاستيدات الخضراء.

### 3-7 مخرجات دورة كالفن

يعد جليسير ألددهايد 3- فوسفات، وهو سكر ثلاثي الكربون، أحد المواد الوسيطة الأساسية في تحلل الجلوكوز. تنتقل معظم جزيئات هذا المركب من البلاستيدات الخضراء إلى السيتوبلازم في الخلية، حيث يدخل مجموعة من تفاعلات تكون عكسية لما يحصل في تحلل الجلوكوز. ويتم تحويله من خلالها إلى فركتوز - 6 - فوسفات وجلوكوز - 6 - فوسفات. وهذه النواتج يمكن أن تستخدم في بناء السكروز - سكر المائدة - وهو ثنائي السكر يتكون من فركتوز وجلوكوز. عند حصول معدلات عالية من البناء الضوئي، تتفاعل جزيئات الجلوكوز - 1 - فوسفات معا مكونة معقدا لا يذوب من سلاسل النشا يتم تخزينها على شكل حبيبات في السيتوبلازم. وتمثل هذه الحبيبات شكلا من أشكال تخزين الجلوكوز للاستخدام مستقبلا.

### تنقسم النباتات حسب دورة تثبيت CO<sub>2</sub> إلى :

1- نباتات ثلاثية الكربون-PLANTSC<sub>3</sub>  
حيث الناتج الأول في عملية البناء الضوئي هو عبارة عن حمض ذو ثلاث ذرات من الكربون يسمى (3PGA فوسفات حمض الجليسرين) ومن أمثلتها القمح، الارز وفول الصويا

### 2- نباتات رباعية الكربون-PLANTSC<sub>4</sub> :

حيث الناتج الأول في عملية البناء الضوئي (تثبيت CO<sub>2</sub>) هو عبارة عن حمض ذو اربع ذرات من الكربون مثل حمض الماليت Malate ومن أمثله هذه النباتات الذرة وقصب السكر.

### 3- النباتات العصارية Crassulacean Acid METABOLISM (CAM):

وهي تلك النباتات المتأقلمة لظروف الجفاف حيث تقفل ثغورها في النهار وتفتح بالليل حيث يتم امتصاص CO<sub>2</sub> خلال الليل وتخزينه على شكل احماض وعند حلول النهار تتم عملية البناء الضوئي حيث يثبت CO<sub>2</sub> ويتحول إلى مواد كربوهيدراتية ومن أمثلة هذه النباتات الصبار والتين الشوكي حيث تتميز هذه النباتات بأوراق سميكة عصيرية .

### 8- العوامل المؤثرة على عملية البناء الضوئي

العوامل الخارجية: وتشمل جميع العناصر المحيطة بالنبات من وفرة المياه، ومقدار تركيز غاز ثاني أكسيد الكربون في الجو، وتركيز العناصر المعدنية في التربة والممتصة مع الماء، وعدد ساعات النهار ومقدار التعرض لضوء الشمس ومدى شدتها.

العوامل الداخليّة: وتشمل الورقة وهو العضو الرئيسيّ في عملية البناء الضوئيّ والجزء الأكثر تعرّضًا لأشعة الشمس المباشرة والأكثر عددًا على النبتة؛ فسُمك الورقة، ووجود الوبر على سطحها، والتركيّب الداخلي لنسيجها، وحجم المسام والفراغات الموجودة على سطح الورقة وكيفية توزيعها من الأمور التي تؤثر على كفاءة عملية البناء الضوئيّ.

### 9- دورة الطاقة

إن الأيض المقتنص للطاقة في البلاستيدات الخضراء الذي درسته في هذا الفصل والأيض في الميتوكوندريا الذي درسته في (فصل سابق) يتلاقيان بشكل كبير جدا.

يستخدم البناء الضوئي نواتج التنفس بوصفها مواد بادئة للتفاعلات، ويستخدم التنفس نواتج البناء الضوئي بوصفها مواد بادئة لتفاعلاته، حتى إن إنتاج الجلوكوز من جليسيرألديهايد - 3 - فوسفات يستخدم جزءا من تفاعلات تحلل الجلوكوز القديمة بشكل عكسي. وإن البروتينات الأساسية التي تنقل الإلكترونات وإنتاج ATP في النباتات مماثلة من حيث تطورها لتلك الموجودة في الميتوكوندريا.

إن عملية البناء الضوئي ليست إلا واحدة من بيولوجية النباتات فقط، على الرغم من أنها جزء مهم. وقد قمنا هنا بدراسة عملية البناء الضوئي بوصفها جزءاً من بيولوجيا الخلية لأن عملية البناء الضوئي قد تطورت قبل مدة طويلة من تشكل النباتات، ولأن معظم الكائنات تعتمد بشكل مباشر أو غير مباشر على عملية البناء الضوئي للحصول على الطاقة اللازمة لحياتها.

وفي الختام فإن تثبيت الكربون هو إضافة CO<sub>2</sub> اللاعضوي إلى مادة عضوية، يتم هذا في تفاعلات دورة كالفن التي تحدث في لحمية البلاستيدات الخضراء. المركب الوسيط المهم في هذه العملية هو سكر خماسي الكربون، يدعى رايبولوز ثنائي الفوسفات، يرتبط مع CO<sub>2</sub> خلال تفاعل تثبيت الكربون. يعمل الأنزيم روبيسكو على تسهيل هذا التفاعل. يمكن تقسيم الدورة إلى ثلاث مراحل، هي: تثبيت الكربون، والاختزال، وإعادة تكوين رايبولوز ثنائي الفوسفات. يوفر ATP و NADPH اللذان يتم إنتاجهما خلال التفاعلات الضوئية، الطاقة والإلكترونات الضرورية للتفاعل المختزل.

**المراجع :**

1. كيمبل بيولوجي - الجزء 1 + الجزء 2، تأليف جون وكيمبال ترجمة جامعة الملك فيصل، دار المريخ للنشر 2015م.
2. علم الأحياء تأليف : بيتر ريفنوجورج ب لوسوس /كينيث ماسون. ترجمه :العبيكان المملكة العربية السعودية ط1 سلسلة الكتب الجامعية المترجمة اصدار 2008م.
3. 3-علم الأحياء-تأليف(د.رحاب رشيد طه-دار الكتاب الجامعي-2012م).
4. 4-العلوم البيولوجيه د:كامل مهدي-دار القرى 2009م.

# الفصل الخامس التكاثر في النبات



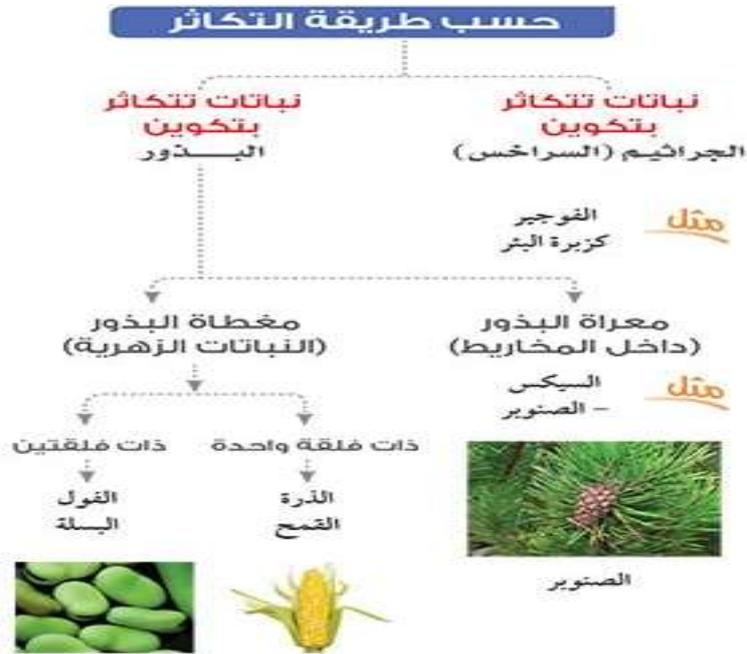
## الفصل الرابع

### التكاثر في النباتات

#### المقدمة:

يعد التكاثر من أهم النقاط الأساسية في حياة الكائن الحي التي تسعى إلى الاستمرارية والبقاء، لأن فيه استمرارية للنوع الواحد، وحفاظاً على النسل من الانقراض كما حدث مع العديد من الكائنات الحية التي انقرضت لأسباب كثيرة، وتعد النباتات من أهم الكائنات الحية على وجه الأرض، ويعود ذلك إلى دورها المحوري في إكمال السلاسل الغذائية في الطبيعة، فالإنسان يعتمد على النبات في غذائه، وهناك كائنات حية تعتمد على النبات وحده في غذائها، وتسمى بأكلات الأعشاب، وتستمر أنواع النباتات في البقاء من خلال طرق تكاثر النباتات المختلفة.

تمر النباتات متعددة الخلايا بانقسام متساوي بعد كل اتحاد للجاميتات وانقسام منصف، وتكون نتيجة ذلك أفراد أحادية العدد الكروموسومي متعددة الخلايا، وأفراد ثنائية العدد الكروموسومي متعددة الخلايا، وذلك بخلاف دورة حياة الإنسان، الذي يتبع في اتحاد الجاميتات الانقسام الاختزالي مباشرة، إن حياة الإنسان ذو دورة حياة ثنائية الكروموسومات، بمعنى أن ثنائية العدد الكروموسومي هي فقط متعددة الخلايا، وفي المقابل، فإن حياة النبات هي أحادية ثنائية الكروموسومات أي إن لها مراحل متعددة الخلايا أحادية الكروموسومات وثنائية الكروموسومات.



الشكل رقم (1): تكاثر النباتات

#### • أنواع التكاثر:

يتم استمرار حياة النباتات بواسطة التكاثر، ويتم التكاثر في الحياة النباتية بإحدى لطرق الآتية:

- ١- التكاثر الجنسي Sexual Propagation
- ٢- التكاثر الخضري Asexual/Vegetative Propagation
- ٣- التكاثر بالهرمونات Hormone Propagation



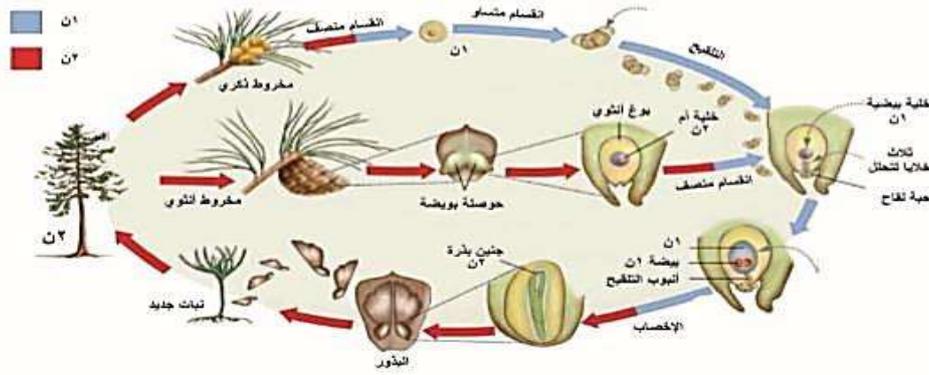
## 2-2: التكاثر الجنسي في النباتات البذرية:

### 1- نباتات معرّاة البذور.

النباتات معرّاة البذور هي تسمية تطلق على صنف كبير من النباتات البذرية التي تندرج تحت شعبية البذريرات حقيقية الأوراق، أما الصنف الآخر فيطلق عليه اسم النباتات مغطاة البذور، وتمتاز معرّاة البذور عن باقي أنواع النباتات بكون بذورها مكشوفة، ومن أشهرها أشجار الصنوبر، وتدعى أيضا المخروطيات وهي نباتات غير مزهرة مختلفة الأحجام وتنتمي أقدم وأكبر الأشجار في العالم إلى شعبة المخروطيات، وتعتبر من أقدم النباتات الموجودة على الأرض وأكثرها تعميراً، حيث يوجد ما يقارب 700 نوع مختلف منها، وتقسّم بشكل عام إلى أربعة أصناف رئيسية وهي السيكاديات، والجنكويات، والجنجوتويات، والمخروطيات. خصائص النباتات معرّاة البذور تظهر البذور عارية على مخاريطها، وهي من البذور عديدة الفلقات، أوراقها تكون على شكل إبر رفيعة، وتجتمع كل مجموعة منها حول بعضها البعض على طرف أحد الأغصان، وتعرف باسم الأوراق الحرشفية الخبائية. المخروط هو عضو التكاثر فيها، وتحمل النباتات معرّاة البذور مخاريط أنثوية ومخاريط ذكورية منفصلة عن بعضها البعض. جميع النباتات المعرّاة البذور من النباتات الخشبية كالشجر والشجيرات، ولا تشتمل على أي نوع من النباتات العشبية، وأغلبها من الشجر المعمر والدائم الخضرة. تحتوي على أنسجة مولدة وعائية تغلف الخشب واللحاء الثانويين، مما يؤدي إلى الزيادة في قطر سيقانها وجذورها. يسودها الطور الجرثومي، أما الطور الجاميطي فمختزل ويتطفل على أنسجة النباتات الجرثومية. تمتلك البعض منها أزهاراً بدائية مختزلة. يتكون خشبها من قصيبات ولا تمتلك أوعية خشبية بداخلها. تمتلك مخاريط مختلفة النوع والحجم، إلا أنها تمتاز جميعاً بشكلها المزدوج. طريقة تكاثر النباتات معرّاة البذور يتم تصنيع حبوب اللقاح الذكرية في المخاريط الذكرية، بينما يتم تصنيع البويضات (الأكواز) في المخاريط الأنثوية، وتنتقل حبوب اللقاح من المخاريط الذكرية إلى المخاريط الأنثوية عن طريق الرياح والحشرات لتلقح البويضات الموجودة فيها وتكوّن مخاريط جديدة تحمل البذور، ثم تتساقط البذور على التربة بعد نضجها لتكوّن نباتات جديدة. أهمية النباتات معرّاة البذور للهواء: تساعد النباتات معرّاة البذور الكثيفة على التقليل من سرعة الرياح الحاملة للتراب والغبار مما يساهم في الحد من تلوث الهواء، كما تفرز زيوتاً طيارة تساهم في تنقية الهواء من الجراثيم خاصة جرثومة السل، فضلاً عن الدور الذي تلعبه في الحد من وجود ثاني أكسيد الكربون وإنتاج الأكسجين. للتربة: زراعة أعداد كبيرة من النباتات معرّاة البذور في المناطق المنحدرة يقلل من انجراف التربة فيها وتصحرها. للصناعة: تستخدم أخشابها في صناعة الأثاث والأجهزة الموسيقية، كما يستخلص منها مركبات تدخل في تكوين العطور والمراهم. للطب: تستخدم في إدرار البول وعلاج حصى الكلى، وعلاج أمراض الأعصاب وطرده البلغم.

يحدث التكاثر الجنسي في النباتات على شكل دورة معقدة تعرف بتبادل الأجيال، تشتمل على جيلين أو مرحلتين متميزتين، وخلال إحدى مرحلتي الدورة، يعرف النبات بالنبات المشيجي أو النبات الحامل للأمشاج، وتصعب مشاهدة الطور المشيجي في معظم الأنواع النباتية، أو نادراً ما يلاحظه الناس، ويعطي هذا الطور الأمشاج أي الخلية المذكرة والخلية البيضية، وقد ينتج الطور أيضاً الخلايا المذكرة، أو الخلايا البيضية أو كليهما تبعاً لنوع النبات، وعند اتحاد الخلية المذكرة مع الخلية البيضية، في هذه المرحلة يعرف النبات بالطور البوغي أو النبات الحامل للأبواغ، عندما يشاهد الناس نباتاً فعلاً ما يكون في مرحلة الطور البوغي، ويعطي الطور البوغي خلال انقسام خلوي يعرف بالانقسام الاختزالي تراكيب متناهية الصغر تسمى الأبواغ، وتتكون الأبواغ داخل تراكيب مقفلة تشبه الكيس تسمى بالكيس البوغي (الحافظة البوغيّة)، وينشأ الطور المشيجي عن الأبواغ وتبدأ دورة الحياة مرة أخرى.

يوجد هذا النوع من التكاثر لدى النباتات المزهرة وعاريات البذور، ويسفر عادة عن تكوين بذرة. تقوم النباتات البذرية بتكوين بذورها ضمن ثمرة حقيقية. بالتالي فهي تحمل الأعضاء التكاثرية في الزهرة. يحتوي المتاع على البويضة التي ستعطي بذورها الثمرة بعد حدوث التلقيح واندماج واحدة من حبوب اللقاح معها، ويوضح الشكل رقم (3) التكاثر في الصنوبريات.



الشكل (٣): يوضح التكاثر في الصنوبر

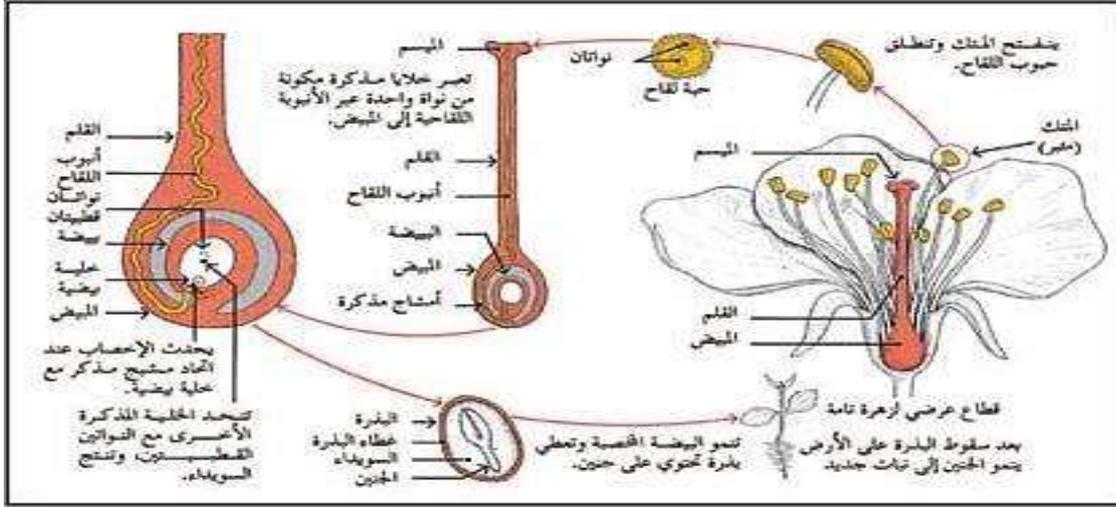
## ٢- دورة مغطاة البذور (الزهريّة):

تتكاثر النباتات الزهرية من خلال عملية التلقيح. تبدأ هذه العملية عندما تصل إحدى حبوب اللقاح من متك السداة إلى ميسم المدقة، وينمو بعد ذلك أنبوب لقاح طويل، يشبه الشعرة من حبة اللقاح إلى إحدى البويضات بالمبيض. ثم تنتقل الأمشاج المذكرة من أنبوب اللقاح إلى المدقة حتى يحدث الإخصاب، ويُعرف هذا الانتقال بالتلقيح، وإذا سقطت حبة اللقاح من زهرة إلى مدقة الزهرة نفسها، أو مدقة زهرة أخرى على النبات نفسه فإن هذه العملية تُعرف بالتلقيح الذاتي، أما إذا انتقلت حبة اللقاح من زهرة إلى مدقة على نبات آخر فإن هذه العملية تُعرف بالتلقيح الخلطي (التهجين)، وتُحمل حبوب اللقاح من زهرة إلى زهرة في التلقيح الخلطي بواسطة الحيوانات، مثل الطيور، والحشرات، أو بواسطة الرياح. تمتاز النباتات الخلطية التلقيح بأنها ذات أزهار كبيرة، ورائحة طيبة، ورحيق حلو. وتجذب هذه الخصائص كلاً من الخفافيش، والبوسوم، والطيور كالطنان، والثُمير، وحشرات مثل النمل، والنحل، والخنافس، والفراشات والعثة. وتحمل هذه الحيوانات حبوب اللقاح على أجسامها أثناء تنقلها من زهرة إلى زهرة بحثاً عن الغذاء. وغالبية الأعشاب والأشجار، والشجيرات ذات أزهار صغيرة، وغير واضحة. وتحمل الرياح حبوب لقاح هذه النباتات. وقد تحمل الرياح حبوب اللقاح لمسافة تبعد نحو 160 كم، وتسبب بعض أنواع حبوب اللقاح المحمولة بالهواء حمى القش وغيرها من أنواع الحساسية.

**والبذرة:** هي البويضة المخصبة الناضجة التي نشأت من اتحاد النواة الذكرية بالخلايا المؤنثة، والنواة الذكرية هي حبوب اللقاح التي توجد داخل المتك أما الخلايا المؤنثة هي التي توجد في الكيس الجنيني داخل الميسم، وعندما يحدث الإخصاب تنمو أنبوبة اللقاح إلى داخل الميسم وتتحد إحدى النوايا الذكرية مع خليتين من الخلايا المؤنثة لتكوين الجنين، ونواة أخرى مع خليتين مؤنثتين في وسط الكيس الجنيني لتكون "الأندوسبيرم"، أما بقية الخلايا الموجودة في الكيس الجنيني تكون بعض الأنسجة الأخرى اللازمة لحياة الجنين (البذرة) أو لإمداده بالغذاء.

وقد تحتوي البذرة على "الأندوسبيرم"، وعندما يكتمل غلاف البذرة يكون ذلك دليلاً على نضجها، يتم جمع البذور عقب نضجها وتترك لتجف بإبعادها عن مصادر الرطوبة والبلل، ثم تُخزّن بعد غربلتها في أماكن جافة بها تهوية (دواليب ذات أدراج مبطنّة بالزئبق أو يمكن وضعها في أكياس ورقية)، وينبغي الإسراع في جمع البذور الخفيفة ذات الأجنة التي تتطاير.

يسمى هذا النوع من التكاثر أيضاً بالتكاثر الزهري، وهي عملية تكاثر بعض أنواع النباتات كالقنول والجلبان والقوارص وصبار الزينة (*Echinopsis spachiana*). ولتعطي النبتة الزهرية نباتاً جديدة يجب أن ينضج المنبر لنتنثر حبوب الطلع وتسقط على الميسم (التلقيح) فتنتشر حبوب الطلع فتتكون أنابيب طلعية تخترق القلم وتصل إلى المبيض حاملة محتوى الأمشاج الذكرية التي تتحد مع البويضات (الأمشاج الأنثوية) وتسمى هذه العملية الإخصاب. يسمى التكاثر جنسياً أو زهرياً إذا جمع بين عنصرين: أنثوي وذكوري، ويوضح الشكل (٤) التكاثر في الأزهار.



الشكل (٤): يوضح التكاثر في الأزهار

إذا كانت الخلية النباتية تحتوي على  $2n$  من الصبغيات،  
تحتوي البويضة على  $(n)$  من الصبغيات،  
وتحتوي حبة واحدة من حبوب اللقاح على عدد  $(n)$  من الصبغيات،  
وعند التلقيح تندمج المحتويات التكاثرية في البويضة وحبة اللقاح وتصبح الخلية المتكونة كاملة بعدد  $(2n)$  من الصبغيات (كروموسومات) وتسمى عندئذ خلية مخصبة.

### التلقيح في النبات نوعان:

تلقيح ذاتي يحدث في الزهرة أي أن تكتسب البويضة حبة من حبوب اللقاح من نفس الزهرة، أو تلقيح خلطي يتم فيه تلقيح البويضة بحبة من حبوب لقاح نبات آخر من نفس النوع.

### 3-2 كيفية التعبير عن الأوساط الزهرية:

#### أولاً: الوضع المشيمي:

يقصد به كيفية اتصال البويضات بجدار المبيض والأوضاع المشيمية المعروفة:

#### ١. وضع مشيمي حافي (Marginal):

يتكون المبيض من كربة واحدة، وتخرج البويضات من مكان التحام حافتي الكربة  
مثال: العائلة البقولية.

#### ٢. وضع مشيمي قاعدي (Basal):

يتكون المبيض من كربة واحدة أو أكثر وتخرج البويضة من قاعدة المبيض.  
مثال: زهرة عباد الشمس.

#### ٣. وضع مشيمي قمى (Apical):

يتكون المبيض من كربة واحدة أو أكثر وتخرج بويضة واحدة من قمة المبيض.  
مثال: أزهار العائلة الخيمية.

#### ٤. وضع مشيمي جداري (Parietal):

يتكون المبيض من أكثر من كربة التحمت حوافها مكونة مبيضاً وتخرج البويضات مرتبة في صفوف على جدار المبيض.  
مثال: أزهار العائلة الصليبية.

٥. وضع مشيمي محوري ( Axile ) :

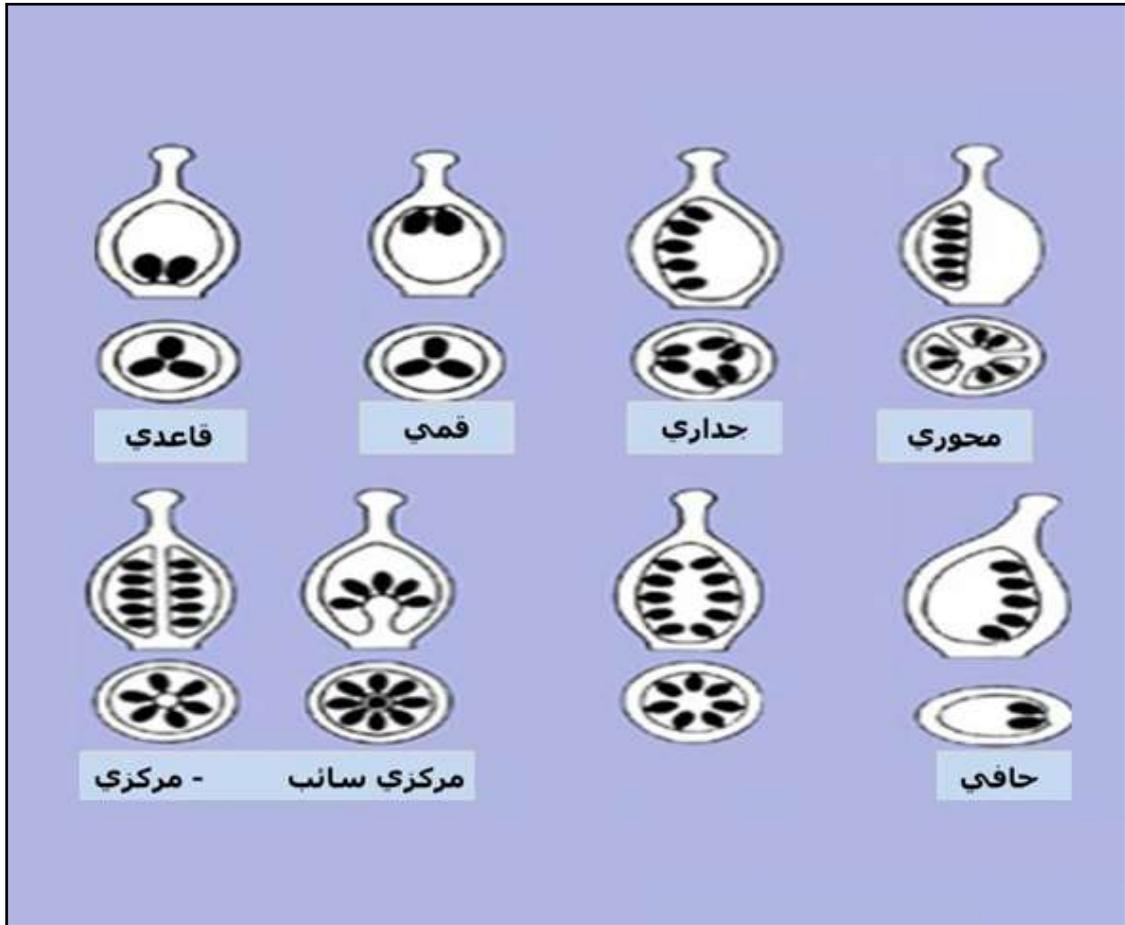
يتكون المبيض من أكثر من كروية واحدة التحمت حوافها في مركز المبيض وتخرج البويضات مرتبة في صفوف على المحور الناشئ من تلاقى حواف الكرابل .  
مثال : أزهار العائلة الزنبقية .

٦. وضع مشيمي مركزي (Central) :

يشبه الوضع المشيمي المحوري إلا أن حواف الكرابل تتمزق ويظل المبيض محور وسطى يصله من أعلى إلى أسفل وتخرج منه البويضات .  
مثال : القرنفل .

٧. وضع مشيمي مركزي سائب ( Free central ) :

يتكون المبيض من أكثر من كروية وينمو من قاعدة المبيض محور مركزي ينمو إلى أعلى ولا يصل لقمة المبيض .  
مثال : زهرة الربيع .



الشكل (٥): يوضح الوضع المشيمي

## 4-2 الجنس في الزهرة :

اغلب الأزهار خنثى، أي تحتوي على أعضاء التأنيث والتذكير معاً على نفس الزهرة. بينما هناك أزهاراً وحيدة جنس أي مذكرة فقط أو مؤنثة فقط . قد تحمل هذه الأزهار مختلفة الجنس على نفس النبات فيسمى النبات هنا ( وحيد الجنس وحيد المسكن) كما في الخروع *Ricinus communis*. وقد تحمل الأزهار المؤنثة على نبات والمذكرة على نبات آخر من نفس النوع فيسمى النبات هنا ( وحيد الجنس ثنائي المسكن) كما في النخيل. كما توجد نباتات تحمل أزهاراً خنثى ووحيدة جنس في نفس الوقت فيسمى النبات ( متعدد الجنس وحيد المسكن) كما في الذرة والقرع .

## 5-2: التربيعة الزهري Aestivation:

يعرف ترتيب السبلات والبتلات على المحور الزهري باسم التربيعة الزهري، وهو يتخذ عدة اوضاع كما يلي :

### 1. ترتيب مصراعي Valvate:



وفيه تخرج السبلات او البتلات من التخت على مستوى واحد بدون التفاف او تراكب بل تتلامس بجانب بعضها البعض, وإذا كان المحيط الزهري ملتصقا فإن مواضع الالتحام قد تنطوي الى الداخل ويسمى حينئذ بمنثني الحواف إلى الداخل . أو قد تبرز مواضع الالتحام الى الخارج فيسمى المحيط منثني الحواف إلى الخارج.

### 2. ترتيب ملتف او حلزوني Contorted or spiral:



في هذه الحالة يلتف طرف كل ورقة زهرية على طرف الورقة الزهرية التي تليها وهكذا , ويكون الالتفاف في اتجاهين حسب الزهرة اما التفاف مع عقارب الساعة أو التفاف عكس عقارب الساعة.

### 3. ترتيب متراكب Imbricate:



يكون التراكب في الأوراق الزهرية إما تنازلي أو تصاعدي أو كوني , ويتحدد هذا الترتيب بكيفية مسك الزهرة بالشكل السليم من قبل الشخص الفاحص لها ( بحيث تكون القنابة ناحية جسم الشخص الفاحص لها والمحور الذي يحمل الزهرة في الجهة الخلفية محمولة باليد).

### أ. تصاعدي Ascending :

وفيه تحيط الورقة الزهرية الأمامية بالأوراق الزهرية المجاورة.



### ب. تنازلي Descending:

بالعكس من السابق، تحيط الورقة الزهرية الظهرية التي من ناحية المحور بالأوراق الزهرية المجاورة.



### ج. كوني Quincuncial:

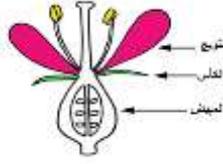
وفية تكون ورقتين زهريتين خارجيتين والاخرين داخليتان والورقة الزهرية المتبقية لها طرف داخلي والاخر خارجي.



## 6-2 أنواع الأزهار تبعا لموقع المحيطات الزهرية مع المبيض:

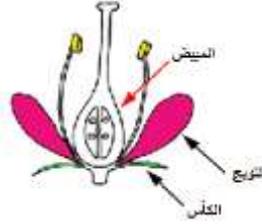
### 1. زهرة علوية Superior:

وفيه يكون المبيض في موقع أسفل المحيطات الزهرية الباقية ملتحما مع التخت كما في زهرة دوار الشمس.



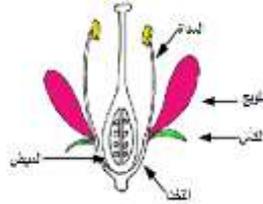
### 2. زهرة سفلية Hypogynous:

وفيه يكون المبيض في وضع أعلى من المحيطات الأخرى كما في أغلب الأزهار.



### 3. زهرة محيطية Perigynous:

تكون كل أجزاء الزهرة في محيط واحد كما في زهرة الكاسيا.

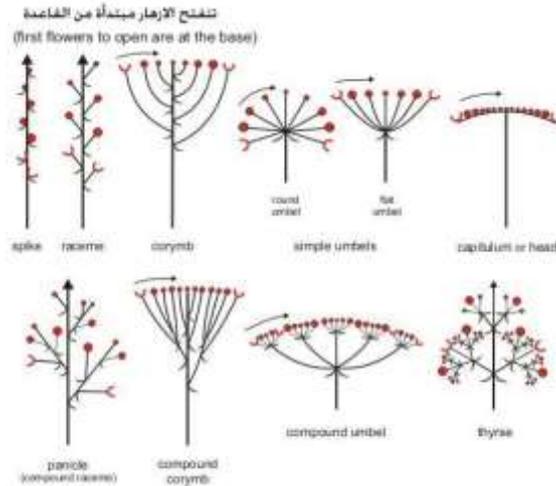


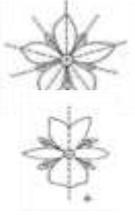
## 7-2 النورة Inflorescence:

قد تكون الزهرة وحيدة تنشأ من برعم طرفي في نهاية الساق، ولكن أغلب أزهار كاسيات البذور تتميز بوجود الأزهار في نورات.

تعرف النورة بأنها ترتيب الأزهار على المحور الزهري، وتنقسم إلى:

1. نورات محدودة (سيميية) Cymose وفيها ينتهي المحور الزهري بزهرة تنشأ من البرعم الطرفي ثم تتفرع الأزهار الأخرى من البراعم الجانبية (تكون أكبر الأزهار موجودة بأعلى النورة وأصغرها عند قاعدة النورة).
2. نورات غي محدودة (راسيميية) Racemose على العكس من السابق تتكشف الأزهار رأسياً نحو أعلى الزهرة، أي كلما استطال المحور الزهري تنشأ أزهار جديدة، (تكون أكبر الأزهار موجودة عند قاعدة النورة وأصغرها في قمته).





## 7-2 التناظر في الزهرة Symmetry:

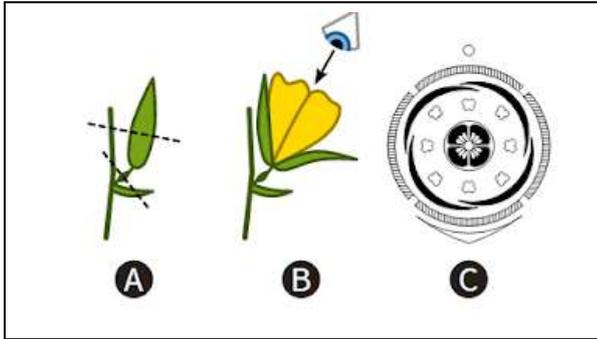
1. الزهرة متناظرة Actinomorphic أو منتظمة Regular : يمكن تقسيم الزهرة إلى نصفين متماثلين بأكثر من قطاع طولي .

2. الزهرة وحيدة التناظر Zygomorphic : يمكن تقسيمها إلى نصفين متشابهين بقطاع طولي واحد.

3. الزهرة عديمة تناظر Irregular: لا يمكن الحصول على نصفين متشابهين عند قطعها بأي شكل.<sup>1</sup>

## 9-2 طرق التعبير عن الأوساط الزهرية

### (1) المساقط الزهرية:



المسقط الزهري: هو رسم تخطيطي يمثل تركيب الزهرة، ووضع المحور الزهري والقنابة بحيث يكون المحور للخلف والقنابة للأمام، يتم التعبير عن السبلات والبتلات بأقواس في دائرتين منفصلتين، الخارجية للسبلات والداخلية للبتلات، يكون عدد الأقواس مساوياً لعدد وحدات المحيط، وتكون الأقواس متباعدة إذا كان المحيط سائباً بينما توصل الأقواس إذا كان المحيط ملتحمًا، يجب الانتباه

إلى أن السبلات تكون متبادلة مع البتلات غالباً، أي بين كل سبلتين توجد أمامهما بتلة واحدة.

عند التعبير عن الطلع يمثل الطلع بشكل ∞ التي تشير إلى شكل المتك في قطاع عرضي، أما إذا كانت السداة عقيمة يتم وضع نقطة للتعبير عنها، وإذا كانت الاسدية مساوية للبتلات في عددها يراعى كيفية وضعها متقابلة أو متبادلة معها حسب وضعها في الزهرة، وإذا كانت الاسدية فوق بتليه يتم وصلها بالبتلات برسم خط يوصل بين المتك والبتلة، يمثل المتاع برسم قطاع عرضي للمبيض او في ثمرة حديثة التكوين كما هو واضح تحت المجهر او العدسة المكبرة , ويرسم عدد المساكن والوضع المشيمي. يبين المسقط الزهري الأقراص الغدية وعددها، كما يوضح التناظر في الزهرة.

### (2) القطاع الطولي:

هو رسم تخطيطي للزهرة عند تصور مرور خط مستقيم يبدأ من محور الزهرة وينتهي بالقنابة ماراً بوسط الزهرة، وعند مرور هذا الخط ترسم الأجزاء الزهرية بأحجامها النسبية. ويبين القطاع الطولي:

يبين نوع الزهرة محيطية او سفلية او علوية.

يبين الأجزاء المختلفة التي يمر بها وطوالها وتحوراتها.

يبين وضع الاسدية على الزهرة وشكلها وطوالها.

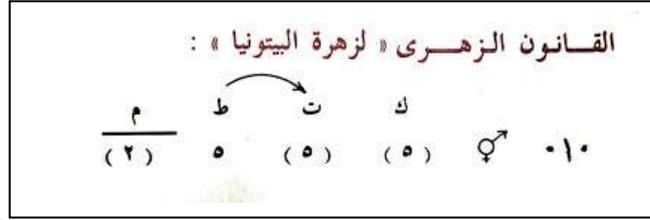
الوضع المشيمي في قطاع طولي والقلم والميسم.



### (3) القانون الزهري: Floral formula.

هو استخدام رموز معينة للتعبير بشيء من الإيجاز عن الصفات التي تتميز بها الزهرة، ويكتب القانون الزهري في سطر واحد مثل المعادلة.

مثال :



الصفات الزهرية	الرموز	الصفات الزهرية
كاس	ك	أولاً : انظام الزهرة
لوبج	ت	عديدة التناظر
طلع	ط	غير متناظرة
متاع	م	
غلاف زهري	خ	
محيط ملتحم	( )	
العدد غير محدد	ط	
المتاع علوي (زهرة سفلية)	م	
المتاع سفلي (زهرة عفرية)	م	
زهرة محيطية	م	
الأسدية فوق بتلية	ت	
الوحدات لي محيطين	+	

### 3. أهمية البذور:

إن البذرة نظام حي مثل كل الأنظمة الحية، ويجب أن تكون ملائمة للظروف البيئية، بحيث تكون خالية من الأمراض والحشرات، وتكون مقاومة لها ونقية ومتجانسة الشكل والحجم واللون، ولذلك يجب الاهتمام بما يلي:

#### أ. قياس جودة البذرة:

البذرة الجيدة هي المتماثلة في الحجم واللون مع مثيلاتها، وتكون ممتلئة ولها رائحة طازجة، وغير الجيدة تلك الصغيرة في الحجم والمجعدة والمختلفة في اللون، كما أن الجودة تتعلق بالنقاوة والقدرة على الإنبات. ونقاوة البذرة تُقاس بوجود المواد الغريبة التالية بها:

١- بقايا أجزاء النبات فيها بالإضافة إلى القاذورات.

٢- بذور غريبة تختلف عن إجمالي البذور الأخرى.

٣- بذور الحشائش الضارة (قد تنتقل بعض الأمراض للحديقة).

ولتحديد القدرة على الإنبات، يتم ذلك بواسطة الملاحظة والمراقبة حيث تُخذ عينة وتُترك لتتنبت على قطعة من القماش مبللة في غرفة دافئة درجة حرارتها (21) درجة مئوية مع ملاحظة النبات كل ٢-٣ أيام والمداومة على جعل قطعة القماش رطبة دائماً، يستمر هذا الاختبار من ١٠-٢ يوماً، وبعد عد البذور التي بدأت في الإنبات (تُجرى التجربة على ٣-٤ عينات أخرى) من مجموع البذور.

#### ب- تحضير التربة للبذور.

تحضير التربة يسبق عملية نثر البذور، في حالة التربة الجيدة يتم تقليبها بالفأس أو بالمحراث ثم تُترك أسبوعاً للتهوية ثم تسوى الأرض مع إزالة الأحجار، ثم تُنعم بالشوكة. وفي حالة التربة الضعيفة يتم إضافة السماد العضوي لها ليحسن من خواصها والمواد التي تزيد من خصوبة التربة بالإضافة إلى ورق الشجر المتحلل والطيني الذي يضاف للأرض أثناء حرثها بعمق ١٥-٢٥ سم، بجانب الثلاث عناصر الأساسية المغذية للنبات من النيتروجين والبوتاسيوم والفوسفور.

#### 4. أنواع وطرق الزراعة:

##### 1 - الزراعة في العراء (الأرض المباشرة):

وتتم بطريقتين الزراعة على خطوط حيث تُستخدم البذور التي لها غطاءً كاملاً والتي تستطيع مقاومة الحشائش، تتم الزراعة بواسطة الفأس أو بواسطة آلة التخطيط.

الطريقة الثانية هي الزراعة بواسطة النثر، وذلك عن طريق أخذ كمية من البذور في اليد ثم يُسمح لها بالسقوط بواسطة تحريك الأصابع والإبهام، وتوجد طريقة أخرى بإسقاط كمية صغيرة من البذور في الخط ثم ترك مسافة صغيرة وهكذا أو بواسطة آلة أيضاً.

##### 2 - الأصص والصناديق الخشبية.

عن زراعة البذور في الأصص، يتم ملء ثلثها بالخزف المكسور ثم يكمل بقيتها بالرربة المخلوطة وتُضغط بالأصابع، وبعد وضع البذور يُنخل من أعلى قليلاً من التربة الناعمة، أما الصناديق الخشبية فلا توضع مادة للصرف وإنما أوراق جرائد في القاع ثم توضع التربة ويتم الضغط عليها وبعد الانتهاء من نثر البذور تُغطى الصناديق الخشبية أو الأصص بألواح زجاجية ويُكشف عنها يومياً لملاحظة الإنبات وإزالة الماء المتكثف على الزجاج. عند الإنبات تنقل الأصص أو الصناديق الخشبية إلى الضوء ليستمر نموها مع الابتعاد في نفس الوقت عن أشعة الشمس المباشرة الساطعة، ولا يُنصح بالري حتى يحدث الإنبات وتظهر البادرات.

##### 3 - الكمر البارد Stratification

هي طريقة إنبات البذور حيث يتم معاملتها معاملة خاصة بتعريضها لدرجة حرارة باردة وظروف رطبة، ويكون ذلك بخلط التربة مع البذور والرمل أو بترتيب البذور في طبقات متبادلة مع التربة والرمل.

#### 5 - التكاثر الخضري (اللاجنسي):

يعرف التكاثر الخضري بأنه عبارة عن إكثار أو زيادة أعداد النباتات عن طريق استخدام الأجزاء الخضرية أو الجذرية المختلفة الممكنة للنبات الواحد بعيداً عن جنين البذرة الجنسي الناتج عن عملية التلقيح والإخصاب، ويمكن إجراء التكاثر الخضري باستخدام الأجزاء النباتية المختلفة إذ أن كل خلية من الخلايا الجسمية بهذه الأجزاء تحتوي علي جميع المعلومات الوراثية اللازمة لإنتاج فرد كامل جديد .

##### 1-5 أغراض التكاثر الخضري :

يجري التكاثر الخضري لتحقيق العديد من الأغراض والتي من بينها علي سبيل المثال :

##### - المحافظة على التراكيب الوراثية

ينتج عن التكاثر الخضري مجموعة من النباتات المتشابهة في تركيبها الوراثي ، وهي ما يطلق عليه بالسلالة الخضرية . ويرجع التشابه في التركيب الوراثي لهذه المجموعة من النباتات لكونها نتجت من مجرد مضاعفات لأجزاء نباتية استخدمت في إكثارها، وهذه الأجزاء النباتية هي عبارة عن خلايا جسمية أمكن تضاعفها عن طريق الانقسام المباشر العادي ( الميتوزي )، ومن ثم فإنه لم تحدث أو تظهر أي اختلافات أو تغيرات وراثية تؤدي لاختلاف الناتج عن النبات الأم .

وتعتبر طريقة التكاثر الخضري من الأهمية بما كان للحفاظ علي هذه التراكيب الوراثية خاصة في حالة النباتات خلطية التركيب مثل كثير من أشجار الفواكه ونباتات الزينة والتي بها من الصفات الظاهرية التي يراد الإبقاء عليها كما هي في النسل الناتج .

##### - إكثار النباتات البذرية

فعند إكثار النباتات عن طريق البذرة ( جنسياً )، فنجد سرعان ما تفقد هذه النباتات صفاتها المميزة كألوان معينة في الأزهار أو تبرقش الأوراق بألوان معينة أو بطريقة معينة كذلك.

### - الإسراع من حمل الثمار

من الملاحظ أن النباتات ( خاصةً أشجار الفاكهة ) الناتجة عن طريق البذرة ( متكاثرة جنسياً ) كثيراً ما تتأخر في إزهارها وحملها للثمار . يرجع هذا التأخر لطول فترة الشباب في حياة مثل هذه النباتات، ولكن عن طريق الخضري يمكن اختصار هذه المرحلة وتقصيرها، وبالتالي تقصير الفترة اللازمة للوصول بالنباتات لمرحلة البلوغ ومن ثم الإزهار وحمل الثمار.

### - إدماج أكثر من سلالة خضرية

ويتم لك عن طريق بعض طرق الإكثار الخضري كالتطعيم أو التركيب حيث يتم جمع أو دمج سلالتين خضريتين معاً في نبات واحد كما هو الحال عند تطعيم البرتقال مثلاً على أصل من النارج و كل منهما سلالة خضرية مختلفة عن الأخرى.

### - تجنب ظهور بعض الصفات غير المرغوبة

كثيراً ما تظهر بعض الصفات المورفولوجية ( الظاهرية ) غير المرغوبة وذلك عند إكثار النباتات جنسياً بالبذرة ويرجع ذلك إلي الانعزالات الوراثية التي تحدث عند تكوين الجاميطات المذكرة والمؤنثة . هذه الانعزالات كثيراً ما ينتج عنها ظهور صفات رديئة أو غير مرغوبة لم تكن موجودة من قبل في كلا الأبوين . وعلي سبيل المثال ظهور الأشواك الحادة علي شتلات الموالح ( الحمضيات ) الناتجة من البذور وذلك بالمقارنة بمثيلاتها الناتجة عن طريق التكاثر الخضري ( خالية من الأشواك )، وكما هو معروف فإن وجود الأشواك يعيق العمليات الزراعية المختلفة كالتقليم والخف وجمع الثمار . هذا فضلاً على أن وجود الأشواك يسبب تجريح الثمار ويقلل من جودتها وقيمتها التسويقية. أما بالنسبة عن إكثار البذور عن طريق البذرة ( جنسياً ) فهذا قد يؤدي لفقدان بعض الألوان المرغوبة نتيجة الانعزالات الوراثية التي تحدث عند تكوين الجاميطات المذكرة والمؤنثة . أو ظهور ألوان لم تكن موجودة من قبل في الأبوين وهي أقل جودة من الناحية الجمالية أو التنسيقية كما هو الحال في إكثار البانسية والفوكس وغيرها من الزهور الحولية أو نباتات الظل الورقية أو المزهرة.

### - التغلب على العوامل البيئية غير الملائمة

يعتبر التكاثر الخضري أحياناً وسيلة يمكن عن طريقها التغلب علي بعض الظروف البيئية غير المناسبة لنمو صنف معين ز فعلي سبيل المثال نجد أن زراعة الخوخ لا تجود في الأرض الثقيلة، ولكن عند توافر باقي الظروف البيئية فإنه يمكن زراعته في مثل هذه الأراضي وذلك بتطعيمه علي أصل يصلح في الأراضي الثقيلة كالشمش أو البرقوق، أما إذا كانت الأرض قلوية فأن الخوخ يصعب أن ينمو بها وفي هذه الحالة يختار من الأصول المناسبة للخوخ وفي نفس الوقت تجود في التربة القلوية حيث يطعم عليها الخوخ المرغوب إكثاره كأصل الخوخ الصيني، الذي يتحمل القلوية الأرضية.

### - التغلب على بعض الأمراض

يمكن عن طريق التكاثر الخضري التغلب على بعض الأمراض فمثلاً البرتقال سهل الإصابة بمرض التصمغ . وللتغلب على ذلك تزرع أصول مقاومة لهذه المرض كأصل النارج أو اليوسفي كليبواترا ويطعم عليها صنف البرتقال المطلوب . كذلك أصناف العنب الأوربي تتكاثر تجارياً بالعقل الساقية الناضجة الخشب على أن تكون التربة خالية من الكائنات الضارة مثل حشرة الفيلوكسرا . وفي حالة وجود هذه الحشرة يجب أن تطعم أصناف العنب الأوربي على أصول مقاومة لهذه الحشرة مثل نوع العنب الأمريكي بإنتاج أصول للتطعيم عليها

### - المحافظة على الطفرات الممتازة

في بعض الأحيان تظهر طفرات طبيعية - أو نتيجة عمليات التربية المختلفة باستخدام الإشعاع أو المطفرات الكيماوية ... تكون ذات صفات خضرية أو ثمرية مرغوبة، وغالباً ما تظهر هذه الطفرات علي شجرة نامية في بستان ما أو علي أحد فروع شجرة معينة . فنجد على سبيل المثال البرتقال بسرة نشأ كظفرة برعمية علي شجرة برتقال عادي بأحد البساتين بالبرازيل.

وكذلك الجوافة اللابذرية ( النباتي ) ظهرت كظفرة في الهند علي شجرة جوافة من سلالة بذرية . وقد أمكن بطرق التكاثر الخضري المختلفة الحفاظ على تلك السلالات ، ولتفادي التعرض لمشكلات سكون البذور أو أمراض البادرات.

## 2-5 طرق التكاثر الخضري :

يبنى التكاثر الخضري على أساس فصل أجزاء من النبات ثم زراعته وتركه لينمو من أجل ظهور نباتات جديدة تماثل الأصل، تختلف وتتعدد طرق التكاثر باختلاف الجزء المستخدم في التكاثر والنبات المستخدم في التكاثر فيستخدم الجذر أو الساق أو الأوراق أو البراعم الطرفية أو الإبطية حسب سرعة إنتاجها وارتفاع كفاءتها الإنتاجية، وأشهر الطرق المستخدمة منذ قديم الزمان هو استخدام العقله وتختلف تسمية العقله حسب الجزء المأخوذ منها.

### أ- التكاثر بالعقل Propagation by cutting

إكثار النبات عن طريق فصل أجزاء خضرية منه، وهذه الأجزاء قد تكون من الساق وتسمى بالعقل الساقية، أو من الأوراق وتسمى بالعقل الورقية أو من الجذور وتسمى بالعقل الجذرية أو من السوق المتحورة وتسمى بالعقل المنحدرة من ريزومات ودرنات وكورمات وأبصال. وتعتمد جودة العقل المأخوذة على الكمية المخزنة في أنسجة العقله من المواد الكربوهيدراتية، فالنسبة العالية من المواد الكربوهيدراتية تُعطي نتائج ممتازة عند زراعتها، كما أن العقل المأخوذة من النباتات الصغيرة في السن تُخرج جذوراً جيدة بصفة عامة أكثر من عقل النباتات الكبيرة، وهناك مميزات كثيرة لاستخدام العقله:

١- سهولة التنفيذ ولا تحتاج لخبرة

٢- نسبة نجاحها عالية جداً

٣- شائعة الاستعمال

٤- توفر أجزائها الخضرية وسهولة فصلها

## 3-5 الأسس التشريحية والفسولوجية لتكاثر العقله ترجع سهولة استخدامها إلى:

١- قدرة استعادة نشاطها مرة أخرى.

٢- مقدرتها على الانقسام السريع مكونة الأجزاء النباتية المختلفة وكما سبق أن ذكرنا أن النموات الجديدة غالباً. ٣- تحمل نفس الصفات الوراثية للأم مما يعطي نباتات متتابعة التركيب الوراثي مع أن الشكل المورفولوجي يختلف من نبات إلى آخر حسب الظروف البيئية المحيطة بالنبات.

ويمكن تفسير ما يحدث علمياً لأن الخلايا البالغة غالباً ما تسترجع شبابها وتصبح خلايا مرستيمية مرة أخرى وتكون مناطق نمو جديدة فيما يعرف باسم ال Re - Juvenile ثم تتشكل الخلايا المرستيمية الجديدة طبقاً للتوازن الهرموني الموجود داخل النبات أما في الأسس التشريحية فتختلف العقل في إعطاء أجزاء نباتية مختلفة حسب نوع العقله.

فالعقله الساقية والبرعمية تتكون عليها أجزاء جذرية فقط أما في حالة العقل الجذرية فإن النموات التي تظهر تكون نموات خضريه كالسيقان وفي حالة العقل الورقية تنشأ الجذور والأوراق وكذلك الحال بالنسبة للكالوس أو البراعم الإبطية.

#### 4-5 نماذج استخدام العقل في التكاثر الخضري في محاصيل الخضر:

##### ١- العقل الساقية- :

تستخدم في إكثار بعض المحاصيل مثل محصول البطاطا ويمكن استخدام أي جزء من الساق الممتدة فوق سطح التربة. التي يصل طولها أحياناً 6 - 8 م في إنتاج نباتات جديدة حيث تحتوي العقل الواحدة علي 1 - 2 برعم إبطي ويمكن أن يكون عقله طرفية في حالة استخدام البرعم الطرفي أو قاعدية في حالة استخدام نهاية الساق المتصل بالجذر أو وسطية عند استخدام أي جزء آخر بالساق.

##### ٢- العقل الجذرية- :

وهي قطعة ناشئة من تقسيم الجذر إلى أجزاء يحتوي كل جزء منها على 1 - 2 برعم على الأقل مثل البطاطا.

##### ٣- العقل الورقية- :

حيث يمكن استخدام أوراق البطاطا في تكوين نباتات جديدة، وقد أمكن إنتاج نباتات كاملة من الفلفل الرومي باستخدام العقل الورقية في معامل كلية الزراعة بجامعة أسيوط وذلك بوضع العقل في مزارع مائية يتم إمدادها بالهواء والأوكسجين إلا أن المراحل التطبيقية لهذا المشروع البحثي لم يتم تطبيقها.

#### 5-5 التكاثر الخضري باستخدام الأجزاء النامية تحت سطح التربة:

يتميز بعض نباتات الخضر بقدرتها علي تحويل بعض الأجزاء كالأوراق والسيقان والجذور لتصبح أجزاء تخزينية وتستخدم في الغالب لتخزين المواد الكربوهيدراتية بصورة أساسية لإعادة استخدامها في مواسم قادمة أو في حالة احتياج النبات إليها وتعتمد هذه النباتات علي نظرية تعرف باسم المصدر Source أو المصب Sink وهذه النظرية ببساطة شديدة تفترض أن أحد الأجزاء النباتية يعمل كمصدر لتكون الأغذية والجزء الآخر يصبح مستقبلاً لهذه المواد في صورة قابلة للتخزين وغالباً ما تكون الأوراق والمجموع الخضري هي المصدر الرئيسي بينما يشكل الجزء الآخر مثل البصلة أو الورقة أو الكورمة ... الخ المصب وغالباً ما يتم انتقال هذه المواد في صورة ذائبة في الغالب ما تكون سكريات بسيطة كجلوكوز والفركتوز والسكروز أو بعض السكريات الكحولية ثم تنتقل لتصبح في صورة معقدة مثل النشا ويحدث في بعض النباتات المعمرة أن يصبح المصدر مصب والمصب مصدراً وذلك حيث يتم إنبات هذه الأجزاء الخضريه في العام التالي فمثلاً نبات البطاطس يتم تخزين النشا بالدرنات بعد تكوين السكريات بالأوراق وفي العام التالي عند زراعة الدرنات فإنها تعطي مجموع خضري إلا أنها تصبح مصدر بينما تصبح الأوراق في هذه الحالة مصب لحين اكتمال نمو المجموع الخضري أو إنهاء وجود المادة الغذائية في الدرنه فتنعكس الدورة وهكذا، كما يحدث في بعض النباتات أكثر من دورة يتبادل فيها المصدر والمصب فقد وجد د / نبيل حسن في بحث الدكتوراه الخاص به أنه يوجد في نبات البطاطا دورتين علي الأقل من التبادل بين الجذور والمجموع الخضري فتنمو الجذور التخزينية أولاً لتعطي مجموع خضري ثم يكون المجموع الخضري الجذور التخزينية ثم تتوقف هذه العملية لتكون مجموع خضري آخر ثم يتم زيادة في وزن المجموع الجذري أو تكوين جذور تخزينية جديدة ومن أهم الأجزاء المتحورة تحت سطح التربة والتي لها القدرة علي إعادة دورة حياة النبات مما تتمتع به من وجود براعم خضريه بهذه الأجزاء ما يلي:

### ١- الأبصال الحقيقية- :

وهي عبارة عن سيقان قرصية قاعدية تترتب عليها قواعد الأوران العصيرية ( لحمية ) التي تحتضن عند قواعدها وفي أبطها البراعم الخضرية أو الخلفات الصغيرة هذا بالإضافة إلي وجود أوراق خرسفية جافة تعمل علي حماية البصلة وما بها من براعم زهرية أو خضريه ثم تخرج في الجذور اللبية عند قواعد السيقان القرصية وهي في الغالب سطحية منتشرة عرضية ( بصل ، ثوم ).

### ٢- الريزومات- :

وهي عبارة عن سيقان مداده أو زحافة غالباً ومقسمة إلي عقد وسلميات وغالباً ما تتواجد البراعم عند العقد مغطاة بأوراق حرسفية أو عصيرية وعند الإكثار بالريزومات فإنها غالباً ما تقسم إلي أجزاء يحتوي كل جزء منها علي عقدين وبرعمين علي الأقل وتزرع أفقياً علي العمق المناسب وفي بعض الأحيان تتوزع علي السيقان الريزومية قواعد الأوراق الصلبة التي تخرج أعناقها قائمة وصلبة حاملة أنصالتها فوق سطح التربة وقد تقسم الريزومات وهي ما زالت محتوية علي الأوراق أو بدونها.

### ٣- الكورمات- :

وهي عبارة عن سيقان متحورة مفلطحة ومقسمة إلي حلقات كما في بعض أبصال الزينة (الجلديوس) أو قد تكون مستديرة مقسمة إلي حلقات كما في نبات القلقاس ويوجد علي هذه الحلقات التي تمتد العقد البراعم الخضرية في وضع متبادل بحيث يوجد البرعم أقمي (الطرفي) عند مركز الكورمة تقريباً ثم تتواجد البراعم بعد ذلك بواقع برعم واحد علي كل حلقة بالتبادل بحيث يكون البرعم الثاني في الحلقة الثانية وفي الجهة المقابلة للبرعم الثاني وعند زراعة الكورمات يبدأ البرعم أقمي في النمو فإذا تصادف ولم ينجح هذا البرعم لسبب لآخر كالتعفن أو بفعل الأفراد الميكانيكية أو الحشرات أو الأمراض الفيروسية . فإن البرعم الذي يليه علي الخلة مباشرة يبدأ في النمو وقد يمكن تقسيم الكورمات كبيرة الحجم إلي مقطع بحيث يمكن فصل البرعم الطرفي أو أقمي في قطعة ثم يتم تقسيم باقي الكورمة إلي جزئين أو 4 أجزاء حسب حجم الكورمة بحيث تحتوي كل قطعة علي برعم واحد علي الأقل ... وقد ينمو أحد البراعم الإبطية ويكبر في الحجم فيكونا كريمة صغيرة أو ما يعرف بالفكوك وهذه تعتبر نصوات شاذة وتستخدم في التكاثر أحياناً وقد أمكن بمعامل زراعة الأنسجة بكلية الزراعة في جامعة أسيوط من إنتاج كريمات بزراعة الأنسجة وبزراعة البراعم علي بيئة 5 - B وباستخدام تركيز عالي من السكر ( 8 % ) دون الحاجة إلي إضافة منظمات نمو.

### ٤- الدرناات :

وهي عبارة عن سيقان منتفخة ومتحورة لاختزان المواد النشوية بها تنشأ نتيجة استطالة السيقان الأرضية التي تنتهي بإنثفاخت تعرف باسم ستولين التي تكبر في الحجم لتكون درنات كاملة ويمكن زراعة الدرنة كاملة أو تقسيمها إلي أجزاء بحيث يحتوي الجزء الواحد منها علي عين واحدة علي الأقل وتحتوي العين في الغالب علي 3 براعم أحدهما هو البرعم الوسطي وبرعمين جانبيين كما يوجد بأعلى العين حافة تعرف باسم حافة العين لحماية البراعم كما سبق أن ذكرنا فغن في حالة حدوث وقف أو خلل بالبرعم الوسطي فإن البراعم الجانبية ينمو ليعطي المجموع الخضري.

### ٥- الجذور التخزينية:-

وهي جذور عرضية تبدأ بكونها جذور ليفية ثم تتحول إلي جذور تخزينية كما يحدث في البطاطا ويتميز الجذر التخزيني عن الجذر الليفي بالممدادات والسيقان الجارية حيث تتميز بعض النباتات بقدرتها علي إنتاج سيقان مداده أو

جارية فوق سطح التربة مباشرةً وغالباً ما تخرج هذه السيقان جارية من منطقة التاج التي تعلو قمة الساق مباشرةً وفي الغالب ما تكون هذه المدادات مقسمة إلى عقد وسلميات وعند ملامسة هذه المدادات لسطح التربة وعند وجود رطوبة كافية أرضية فإن كل عقلة يمكنها أن تتكشف لتعطي جذور وأوراق وتكون نباتات كاملة الهيئة يمكن فصلها كأحد وسائل الإكثار الخضري في النباتات، تتميز الفراولة عن الكثير من النباتات التي تعطي مدادات بأنها تكون نبات كل عقدة دون الأخرى .

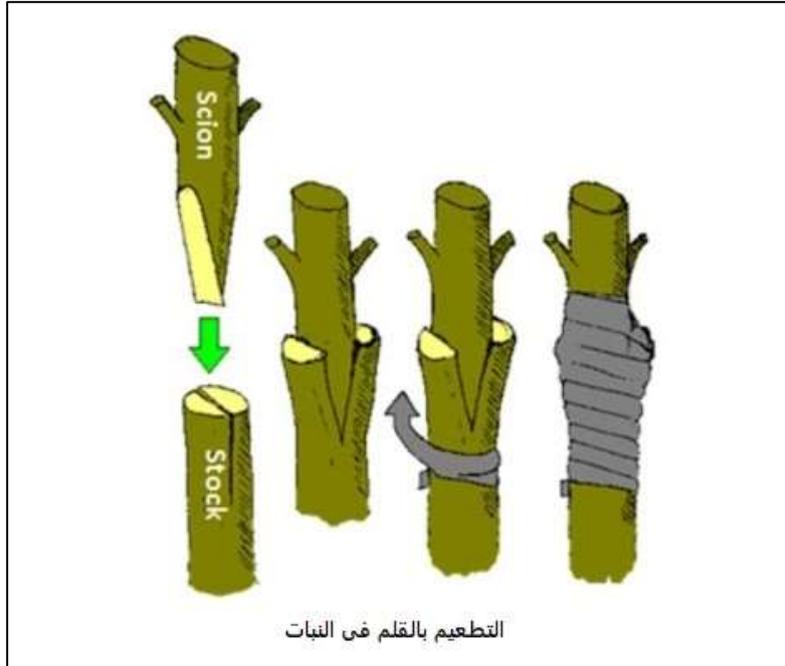
### ب- التكاثر بالترقيد Propagation by layering

طريقة أخرى من طرق تكاثر النبات، حيث يتم جعل أفرع النباتات أو سيقانها تنتج جذوراً وهي مازالت ملتصقة بالنبات الأم، لكنها طريقة صعبة ولا تُستخدم مع الكثير من النباتات، ويستعمل مع النباتات الخشبية الصلبة أو مع بعض النباتات العشبية مثل القرنفل، ومن أنواع الترقيد المتعددة:

- التكاثر الأرضي: يحنى فرع من أفرع النبات على الأرض ويُدفن جزء منه في التربة بعمق ١٠-٥ سم بعد عمل قطع في الجانب السفلي من هذا الجزء المدفون، وعلى أن يتم ريه من أن لآخر ويُخرج جذور يتم فصلها من الأم تدريجياً، يستغرق تكون النبات الجديد من ٣-٦ أشهر، يجدى هذا النوع من التكاثر من المتسلقات والياسمين بأنواعه.
- الترقيد القمعي: ويُستخدم مع النباتات التي له فروع قريبة من سطح الأرض بالاستعانة بأقماع من الزنك ذات مفصلات لفتحها أو غلقها، حيث ترقد الأفرع في القمع بعد عمل قطع فيها الترقيد بالأرضي، ثم يُملأ القمع بالتربة التي يم ريبها من حين لآخر، وقد يتم استبدال القمع بأصص مشقوقة إلى نصفي بوضع الفرع بين هذين الشقين ثم يغلقا بعد ملئه بالتربة وريبها ثم ربط الشقين برباط.
- الترقيد الثعباني: تدفن أجزاء من الساق المراد ترقيدها بالتربة عند أماكن عديدة بالتبادل مع أماكن أخرى غير مغطاة من الساق.
- الترقيد المستمر: دفن الفرع بأكمله في التربة لعمق ١٠ سم على أن يُترك الطرف فقط ظاهراً فوق سطح التربة.
- الترقيد الهوائي: تتبع هذه الطريقة في النباتات التي تحمل أفرعها بعيداً عن التربة ولا يمكن توصيلها لها، حيث يقع الاختيار على الأفرع الصغيرة التي ليس بها أوراق بعمل قطع رأسي ثم يُغطى القطع أو الجرح بواسطة مادة منشطة للنمو وتغطي بطبقة من *Sphagnum moss* تغطية كاملة (وهو نوع من الطحالب التي تستخدم كترربة معدلة).

### ج- التكاثر بالتطعيم Propagation by grafting

التطعيم هو عن تركيب برعم أو أكثر أو جزء من نبات على نبات آخر ينتج عنه التنام الجزأين سوياً، و يوضح الشكل (٥) بعض أنواع التطعيم وهو التطعيم بالقلم.



الشكل (٥): يوضح التطعيم

وتُجرى عملية التطعيم للنباتات على طبقة من الكامبيوم مستمرة بي اللحاء والخشب، ومن الأفضل أن تكون النباتات منتمية إلى نفس السلالة وأفضلها على الإطلاق إذا كانت من نوع واحد (وهذا لا ينفي وجود التكاثر بهذا النوع بين الأجناس وبعضها).

توجد أنواع عديدة للتكاثر بالتطعيم:

التطعيم الدعامي - التطعيم بالقلم أو الشق- التطعيم بالعين - التطعيم السوطي - التطعيم اللساني- التنظيم القاعدي- التطعيم بالرقيقة- التطعيم بالقشرة- التطعيم بالقلم الجانبي-التطعيم البرعمي.

ويطلق على الجزء من النبات الذي يطعم عليه البراعم "الأصل" stock، من الذر أو الساق، ولفظ "الطعم" scion ، على الجزء من النبات الذي يتحد مع الأصل وعادة ما يكون ساق، تختلف الطعوم في طولها حسب طول كل نبتة والطول العادي هو (١٥) سم، يتوقف نجاح التكاثر بالتطعيم على كيفية اتحاد كامبيوم الأصل بكامبيوم الطعم حيث يكونا على اتصال جيد، ويتم ربط الطعم بالأصل وبعد الربط يتم اللصق لمنع دخول الماء وكذلك لمنع جفاف الأنسجة المقطوعة (المجروحة) حديثاً، توجد مادة للتشميع قديمة مؤلفة من طين (نوعين) ،نوع من روث البقر وقليل من الدريس، تخلط مع بعضها بعد إضافة الماء لتكون شبيهة بالمعجون، أما الشمع الجديد فيتكون من جزء من شحم البقر، وجزئين من شمع النحل وأربعة أجزاء من الصمغ ويتم صبهم جميعاً في الماء البارد وتعجن المكونات باليد، وعند استخدامه يسخن مرة أخرى ويطلى به مكان الاتحاد لكن ليس بدرجة كبيرة حتى لا تتلف الأنسجة، والآن يوجد شمع للتطعيم يستخدم بارداً، كما يوجد شريط لاصق يقوم بالربط والتشميع في آن واحد.

واللجوء إلى التكاثر بالتطعيم يكون للأسباب التالية:

- تجديد النباتات القديمة.
- بهدف تأقلم بعض النباتات في أجواء غير مناسبة.
- تغيير بعض الصفات النباتية.
- مساعدة النباتات ضعيفة الجذور أو التي لديها حساسية شديدة للإصابة بالأمراض والآفات.

#### د- التكاثر بالجراثيم **Propagation by spores**:

المقصود بالجراثيم هنا أجسام ذات خلية واحدة تقوم مقام البذور لإتمام عملية التكاثر في النباتات عديمة الأزهار ولا يتوقف على الاختلاط الجنسي كما في النباتات الزهرية. ويشبه هذا النوع التكاثر بالبذور لكن الفرق بينهما هو أن التكاثر بالجراثيم لا يحتوي على جنين، فعندما تسقط هذه الجراثيم على الأرض من النباتات مع مساعدة الماء والرطوبة تُخرج أجساماً خيطية صغيرة تكون الأعضاء التناسلية بحيث يحمل كل عضو تناسلي مؤنث جرثومة مؤنثة وكذلك يحمل عضو التناسل الذكر عدة جراثيم هيدبية. وتسبح إحدى الجراثيم الهيدبية بمعاونة قطرات الماء لنقل الجرثومة المؤنثة ثم تلقحها، وتكون الزيغوت الذي ينمو ويشكل النبات الجديد.

#### هـ- التكاثر بالتقسيم **Propagation by division**:

وهو يُتبع مع النباتات مثل الفوجير *Nephrolepis* والأسبرجس *Asparagus*، التي تخرج تيجاناً في أطراف سوقها الأرضية أو الريزومات، بحيث يتم تقسيم الريزومات إلى قسمين أو ثلاثة حمل كل منهم جزء من الأوراق ويتم زراعتها على حده.

#### و- التكاثر بالخلفة/ الفسائل **Propagation by offsets**:

الخلفة هو عبارة عن نمو ثانوي من براعم إبطيه قرب أو تحت سطح التربة، ويكون لها جذور مستقلة عن النبات الأم لذا فهو يشابه النبات الأم في كل صفاته ويُراعى عند الفصل ألا تحدث جروح كبيرة تعرض النبات الجديد للفطريات، ويفضل عزله عندما يكون الجو معتدلاً في الربيع والخريف، بعد الفصل يتم تغطية النبات بقش الأرز لحمايته من المؤثرات الخارجية، تصلح هذه الطريقة مع نباتات الزينة.

#### ز- التكاثر بالبراعم **Propagation by sucker**:

البراعم عبارة عن نمو ثانوي من براعم متواجدة بالقرب من قاعدة النبات أو تحت سطح التربة، لكن ليس لها جذور مستقلة بنفسها كما في حالة الخلفة وتعتمد في غذائها على الأم، وعند الفصل لا بد وأن يفصل النمو الجديد بجزء من الجذع الأصلي الذي يطلق عليه الكعب ليساعد النبات الجديد على تكوين الجذور لأنه يحتوي على مواد غذائية من النبات الأم.

ويوجد للتكاثر الخضري مزايا وعيوب، فمن مزايا هذا التكاثر الوصول إلى النضج الكامل للنبات بعد فترة قصيرة من الزراعة، كما أنه لا يحتاج إلى عناية كاملة لأطوار الحياة الأولى للنباتة والتعرض للحشائش والآفات الضارة أقل من التكاثر البذري.

أما عن العيب الذي يتواجد في هذا النوع من التكاثر هو احتمال نقل الأمراض من الآباء، في حين أنه لا يحدث ذلك مع التكاثر البذري.

### ٣- التكاثر بالهرمونات:

قد توصل علماء النبات أن عملية النمو في النباتات تتحكم في مواد كيميائية يطلق عليها الهرمونات وهي ذات طبيعة نشطة، تنتج هذه الهرمونات في البراعم والأوراق أو في القمم النامية، ثم تنتقل هذه الهرمونات إلى أجزاء الأخرى في النبات لكي تقوم بعملها في زيادة النمو، وأصبحت هذه الهرمونات تأخذ مجالاً كبيراً في الأبحاث حيث تم التعرف على الأنواع التي تحدث تغييراً في عمليات التنفس بل وأمكن تحضيرها صناعياً ويطلق عليها العلماء "المواد المنظمة للنمو".

ومن هذه المواد المنظمة للنمو "أندول حامض البيوتريك" حيث يسرع نباتات معينة على اخراج جذورها، لكن هناك تحذير دائم بأن الإفراط في أي شيء يقدم الضرر وليس النفع وهكذا الحال مع الهرمونات المنظمة للنمو، كما بينت التجارب أن هذه المواد تؤثر على العقل الورقية تحت درجة حرارة ١٨ درجة مئوية وعندما تكون التربة حامضية نوعاً ما أو متعادلة.

- توجد طريقتان لمعاملة العقل بالهرمونات المنظمة للنمو:
- الطريقة الأولى: بغمس العقل في محلول الهرمون لمدة (١٨-٢٤) ساعة ثم تغسل وتزرع.
- الطريقة الثانية: استخدام الهرمون في شكل المسحوق، أولاً يتم غمس العقلة في الماء ثم هزها للتخلص من المادة الزائدة وتزرع.

**الأبصال:** الأبصال هو عبارة عن ساق قرصية أرضية قصيرة، تحمل برعم طرفي كبير وتحيط به الأوراق اللحمية العسارية المليئة بالغذاء.

**الكورمات:** الكورمات عبارة عن سيقان منتفخة تخزن فيها المواد الغذائية، ويوجد عليها أوراق حرشفية تحمل في داخلها براعم، وتتكون عند قاعدتها جذور عرضية تمتص الماء والأملاح وقد تنمو البراعم الجانبية مكونة ساقاً منتفخة تخزن الغذاء.

**الريزومات:** هي سيقان زاحفة تنمو تحت سطح التربة ومقسمة على عقد وسلاميات، حيث توجد براعم عند العقد مغطاة بأوراق حرشفية أو عصيرية.

### المراجع:

1. بيتر، ريفن وجورج، جونسون و جوناثان، لوسوس و كينيث، ماسون و سوزان، سنجر. (٢٠١٤). علم الاحياء. العبيكان للنشر
2. أفندي، عماد. (٢٠١٦). أطلس النبات. دار الشرق العربي. سورية
3. كايا، زكريا. (٢٠١٤). عالم النبات وطب الأعشاب. دار الراتب الجامعية. لبنان
4. Methods of propagation- Fairchildgarden.org, 2014.
5. Plant Propagation- njha.org, 2012.
6. www.britannica.com, Retrieved 'Hans Lambers, "Plant reproductive system" .6 .25-4-2018. Edited

biology- Jonathan B Losos, Kenneth A. Mason, Susan R. Singer, Peter H. Raven,.7 George B. Johnson, Mc Graw Hill, Aug 19, 2014 - Science .