منشورات الهيئة الوطنية
للأولمبياد العلمي السوري

NATIONAL COMMISSION FOR
THE SYRIAN SCIENCE OLYMPIAD

المفيد في علم الأحياء

لطلاب الأولمبياد العلمي السوري

اعداد:
الدكتورة غالية أبو الشامات

الطبعة الأولى

2016

فهرس الكتاب

المقدمة	9
الفصل الأول : جولة في علم الحياة	11
أولاً: علم الحياة (البيولوجيا)	12
ثانياً: خصائص الكائن الحيّ	13
ثالثاً:مستويات التنظيم البيولوجي المختلفة	14
رابعاً: التنوع البيولوجي(الحيوي)	22
خامساً: تصنيف الأنواع	24
نظام التصنيف الحديث للكائنات الحية	26
وحدة أشكال الحياة بالرغم من وجود التنوع	29
سادساً: المظاهر الموحدة في علم الحياة	30
النظرية الخلوية	31
الأساس الجزيئي في الوراثة يفسر استمرار الحياة	33
العلاقة بين البنية والوظيفة	33
يمثل التطور وحدة وتنوع الحياة	34
الفصل الثاني : الكيمياء والحياة	35
التركيب الكيميائي للخلية	37
أولاً: المركبات اللاعضوية	37
1- الماء	37
2- الأملاح المعدنيّة	42
ثانياً: المركبات العضوية	44
1- البروتينات	46
2- اللبيدات	52
1.2 الحموض الدسمة	53

2.2 الغليسيريدات الثلاثيّة	54
3.2 الليبيدات الفوسفوريّة	57
4.2 الليبيدات السكريّة	59
5.2 الستيروئيدات	59
3- السكاكر أو الكربوهيدرات	60
4- الأحماض النووية	62
1.4 الحمض الريبي النووي منقوص الأوكسجين DNA	63
1.1.4 بنية الحمض الريبي النووي منقوص الأكسجين	65
2.4 الحمض الريبي النووي RNA	70
1.2.4 الأنماط الرئسية للحمض الريبي النووي الـ RNA	72
الفصل الثالث : مقدمة في الخلية وخصائصها	77
أولاً: المجهر	80
1- المجهر الضوئي	81
1.1 مجهر الأطوار المتباينة	83
2.1 مجهر الفلورّة	84
2- المجهر الالكتروني	85
1.2 المجهر الإلكتروني النافذ	85
2.2 المجهر الإلكتروني الماسح	85
ثانياً: أنماط الخلايا في العالم الحيّ	87
1. أوجه التشابه والاختلاف الرئيسة بين الخلايا طلائعيات وحقيقيات النوى	88
2. البنيّة الخلوية العامة للخلايا طلائعيات النوى	91
3. نمط حياة الكائنات طلائعيات النوى وأشكالها	95
4. التكاثر لدى طلائعيات النوى	98

الفصل الرابع : التركيب البنائي للخلية	102
أولاً: فصل المكونات الخلوية وعضياتها	103
ثانياً: البنية الخلوية العامة للخلايا حقيقيات النوى	106
ثالثاً: العضيات الخلوية	110
رابعاً: الملحقات الخلوية	116
الفصل الخامس : بنية الغشاء السيتوبلاسمي ووظائفه	120
أولاً: بنية الغشاء السيتوبلاسمي وتركيبه الكيميائي	121
ثانيّاً: وظيفة الغشاء السيتوبلاسمي	130
الانتشار	132
التناضح	133
الانتشار الميسّر	136
النقل الفعّال	138
النقل بالإخراج الخلوي	141
النقل بالإدخال أو الالتقام الخلوي	142
الفصل السادس : العضيّات الخلويّة الرئيسة	146
أولاً: الشبكة البلاسمية الداخلية	147
التركيب الكيميائي للشبكة البلاسميّة الداخليّة	152
وظائف الشبكة البلاسميّة الداخليّة	153
ثانياً: الجسيمات الريبية	157
الجسيمات الريبية لدى الخلايا طلائعيات النوى	159
الجسيمات الريبية لدى الخلايا حقيقيات النوى	161
ثالثاً: الجسيمات الحالة	163
التركيب الكيميائي للجسيمات الحالة	165

البلعمة الغيريّة	166
البلعمة الذاتية	167
رابعاً: الجسيمات الكوندرية، الميتوكوندريات	170
DNA الجسيمات الكوندرية	172
التركيب الكيميائي للجسيمات الكوندرية	173
وظائف الجسيمات الكوندرية	176
تجديد الجسيمات الكوندرية	185
اضطرابات الجسيمات الكوندرية	187
خامساً: جهاز غولجي	188
بنية جهاز غولجي	188
التركيب الكيميائي لجهاز غولجي	190
وظائف جهاز غولجي	191
سادساً: النواة ، مركز القيادة الخلوي	193
البنية والتركيب	193
الصبغيات عند الإنسان	202
أنماط فريدة من الصبغيات	205
الصبغيات العماليق	206
الصبغيات الريشية	207
الفصل السابع : الدارة الخلوية والانقسام الخلوي	209
أولاً: الانقسام الخلوي	210
1- الانقسام الخلوي لدى طلائعيات النوى	211
2- الانقسام الخلوي لدى حقيقيات النوى	213
ثانياً: الدارة الخلوية	214
مراحل الدورة الخلوية	214

الانقسام المتساوي أو الخيطي	216
الفرق بين انقسام الخلية النباتية و الخلية الحيوانية	221
نقاط المراقبة	222
الانقسام المنصف، الانْتِصافي	223
أهمية الانقسام المنصف	227
الفصل الثامن : الـDNA و دوره في الوراثة	230
أولاً: لمحة عن التجارب الأولية لتحديد ماهية المادة الوراثية	231
1- الدراسات الكيميائيّة	231
2- الدراسات على الجراثيم	232
ثانياً: المعلومات والشيفرة الوراثية	234
ثالثاً: تضاعف جزيء الـ DNA	235
المراحل الرئيسة لعملية تضاعف الـ DNA	236
تضاعف الـ DNA لدى الجراثيم	239
التضاعف نصف المحافظ للـ DNA	241
رابعاً: وظائف جزيء الـ DNA تعتمد على بنيته	243
الفصل التاسع : الرسالة من المورثة إلى البروتين	244
أولاً: علم الوراثة	245
ثانياً: بنية المورثة في حقيقيات النوى	247
ثالثاً: بنية المورثة لدى طلائعيات النوى	248
رابعاً: الرسالة من المورثة إلى البروتين (آلية تركيب البروتين)	249
المراحل المختلفة لتركيب البروتين لدى الخلايا طلائعيات النوى	254
خامساً: مقارنة عمليتي النسخ والترجمة بين الكائنات حقيقيات وطلائعيات النوى	257
الفصل العاشر: الماندليّة ونماذج التوريث الرئيسة	262
أولاً: الماندلية و قوانين مندل الرئيسة	264

مفهوم الأليل	267
ثانياً :مفهوم السيادة والتنحي	270
تواتر الصفات السائدة	275
ثالثاً: مفهوم الأليلات المتعددة	277
رابعاً: مفهوم المورثات متعددة التأثير Pleiotropic genes	278
خامساً: الأمراض الوراثية التي تتبع نماذج التوريث المندلية لدى الإنسان	279
الفصل الحادي عشر: النظرية الصبغيّة في الوراثة	290
أولاً: النظرية الصبغية في الوراثة	291
ثانياً: مفهوم الارتباط المورثي و الوراثة المرتبطة بالجنس	292
ثالثاً: العبور الصبغي Crossing Over	295
رابعاً: الخرائط الوراثية	299
خامساً: فرضية ليون و تعطيل الصبغيX (X-inactivation)	301
الفصل الثاني عشر: مقدمة في وراثة الجماعات	307
تعريف علم وراثة الجماعات	308
التجمع المورثي	309
تعريف التطور	310
علاقةHardy-Weinberg	311
الإنسياب المورثي Gene flow	314
الإنسياق الجيني Genetic drift	315
التأثير المؤسس Founder effect	317
الفصل الثالث عشر: أنماط الطفرات ومسبباتها	319
أولاً: الاضطرابات (الشذوذات) الصبغيّة Chromosomes aberration	320
منشأ وآلية ظهور الشذوذات الصبغية	321
آلية حدوث الشذوذ الصبغي	321

أنماط الشذوذات الصبغية	321
ثانياً :الطفرات على مستوى المورثات (النكليوتيدات)	336
أسباب حدوث الطفرات	337
أنماط الطفرات المورثيّة	338
الطفرات الموروثة و المكتسبة	343
الفصل الرابع عشر: علم النسج والأنماط النسيجيّة المختلفة	345
الأوساط الخلاليّة (البينيّة) Extracellular matrix	346
الترابط بين الخلايا وأنماط الاتصالات بينها	347
أولاً: النسيج الظهاري Epithelial Tissue	349
ثانياً: النسيج الضام الدعامي Connective Tissue	355
ثالثاً: النسيج العضلي Muscle Tissue	362
رابعاً : النسيج العصبي Nerve Tissue	363
الملحق	367
المصطلحات العلمية	370
المراجع	379

بسم الله الرحمن الرحيم

المقدمة

يُعَدُّ علم الأحياء Biology العلم الذي يدرس الحياة والكائنات الحيّة ككل، ولهذا يُعرف بعلم الحياة. يشمل علم الأحياء كل ما يمكن تصوره من مواضيع مرتبطة بالحياة على سطح الأرض، فقد يكون واسعاً جداً ويركز على التفاصيل المتعلقة بكوكب الأرض بأكمله، أو أن يكون محدداً جداً ويهتم بدراسة البنى المجهريّة الدقيقة في الجراثيم مثلاً، أو حتى الجزيئات الخلويّة كجزيء الـDNA.

إنّ الإنسان بطبيعته لديه شعور طبيعي من الفضول والشغف تجاه كشف معالم الحياة وأسرارها، لذلك فإننا نشهد فيضاً مستمراً من المعلومات الجديدة التي تعزز المفاهيم الرئيسة، وتطرح حلولاً جديدة للعديد من المشاكل الصحيّة والبيئيّة التي يعاني منها البشر على كوكب الأرض، لاسيما في مجالات الهندسة الوراثيّة و البيولوجيا الجزيئيّة . وعلى الرغم من أنّ معارفنا حول الحياة ومعالمها تتغير بشكل مستمر، إلاّ أنّ المبادىء الجوهرية تبقى ثابتة لا تتغير مع استمرار التقدم العلمي والمعرفي. ولعل المفتاح الرئيسي لفهم علم الأحياء هو فهم تلك المبادىء والمفاهيم.

يحتوي هذا الكتاب بين دفتيه عدداً من الفصول التي تغطي أسس ومفاهيم علم الخليّة وعلم الوراثة وعلم النسج. والتي تُعَدُّ المفاهيم الأساسية لجميع الطلاب الدارسين لعلم الأحياء والمهتمين به. إذ تتيح تلك المفاهيم للطالب فهم خصائص الكائنات الحيّة و مستويات التنظيم البيولوجي المختلفة التي تنتظم ضمنها الأحياء، و تزود الطالب بالمعلومات الأساسيّة المتعلقة بمكونات الخليّة الحيّة وتركيبها البنائي والكيميائي، كما تغني معارفه حول علم الوراثة ونماذج التوريث الرئيسة ودور جزيء الـ DNA فيها، فضلاً عن تعريف مبسط بعلم النسج والأنماط النسيجية المختلفة.

وقد كان الهدف من وراء تأليف هذا الكتاب هو اتاحة مرجع باللغة العربية، يشمل المبادىء والمفاهيم الرئيسة مزوداً بعدد غير قليل من الصور و الأشكال التوضيحية المناسبة لسهولة شرح وفهم المادة العلميّة.

استند تأليف هذا الكتاب على جملة من المراجع الأساسيّة المعتمدة في البيولوجيا بأحدث طبعاتها. ولتعزيز الفائدة المرجوة من هذا الكتاب فقد تضمن قائمة بأهم المصطلحات العلميّة المستخدمة باللغتين العربية والإنجليزية، بالإضافة إلى ملحق بأهم وحدات القياس والحجوم شائعة الاستخدام، وبعض المعلومات المفيدة للطالب والمتعلقة بمواضيع هذا الكتاب.

والله ولي التوفيق

المؤلفة

الدكتورة غالية أبو الشامات

الفصل الأول

جولة في علم الحياة

- شرح أهمية علم الحياة.
- وصف خصائص النظم الحية.
- التعرف على التنظيم الهرمي للنظم الحية.
- التنوع الحيوي.
- لمحة عن تصنيف الأنواع.
- المظاهر الموحدة في علم الحياة.

تمهيد

يُعَدُّ علم الحياة أو البيولوجيا (Biology) أحد فروع العلوم الطبيعية (natural sciences) وهو ذو مجالات واسعة، إذ تُكتشف في كل يوم إنجازات جديدة و مثيرة. وتُعَدُّ النظم البيولوجية (Biological systems) من الأنظمة الأكثر تعقيداً على وجه الأرض، وتُحدد وظائفها العديدة وتقيدها مبادئ الكيمياء والفيزياء.

أولاً: علم الحياة (البيولوجيا)

علم الحياة Biology مصطلح يوناني عُرف منذ عام 1766، وهو مؤلف من كلمتين معاً هما:Bios وتعني الحياة و Logos وتعني العلم. و هو العلم الذي يدرس الكائنات الحيّة وجميع جوانب حياتها بما في ذلك الهيكل والوظيفة، النمو والتطور، الأصل والتنوع، وكذلك العلاقات المتبادلة بين تلك الكائنات الحيّة، يشمل هذا العلم علم النبات Botany وعلم الحيوان Zoology . تتنوع الكائنات الحيّة من حيث الأشكال والهيئات والأحجام وفي طرق وأساليب الحياة، ويعتمد علماء الأحياء في دراستهم لها على العديد من الطرق المختلفة؛ فهم يراقبون سلوكها، يجمعون الحفريات، يقرؤون شيفرتها الوراثية إلخ...

ولكن ما الذي يجعل العلماء يقرون بأنّ هذا الكائن هو كائن حيٌ" على قيد الحياة" ؟ و ما هي مقومات الحياة من وجهة نظرهم؟. في الواقع من الصعب تعريف الحياة بجملة

بسيطة، ولكن هناك مجموعة من الخصائص المشتركة التي تميز الكائنات الحيّة.

ثانياً: خصائص الكائن الحيّ

تتميز المتعضيّة أو الكائن الحيّ (Organism) بالمقدرة على القيام بمعظم خصائص الحياة التي يمكن إجمالها بما يلي:

1- التنظيم الخلوي Cellular organization: تتكون جميع الكائنات الحيّة من خلية واحدة أو أكثر، تقوم من خلالها بأداء الوظائف المختلفة و المتنوعة الرئيسة للحياة. ويحيط بكل خلية من الخلايا غشاء يفصلها عن محيطها الخارجي.

2-النمو والتطور Growth and Development: لا بد أن تكون جميع الكائنات الحيّة قادرة على النمو والتطور، حتى تستمر وتبقى على قيد الحياة.

3-التكاثر أو التناسل Reproduction : تمتلك الكائنات الحيّة المقدرة على التكاثر لضمان استمرارية النوع.

4-الاستقلاب (الأيض) Metabolism: يقوم الكائن الحيّ بعمليات الاستقلاب (الهدم والبناء) اللازمة للحفاظ على حياته.

5-الاستتباب أو التوازن Homeostasis: وهي العمليات التي من خلالها تحافظ جميع الكائنات على ثبات الشروط الداخلية نسبياً و تختلف عن البيئة المحيطة بها.

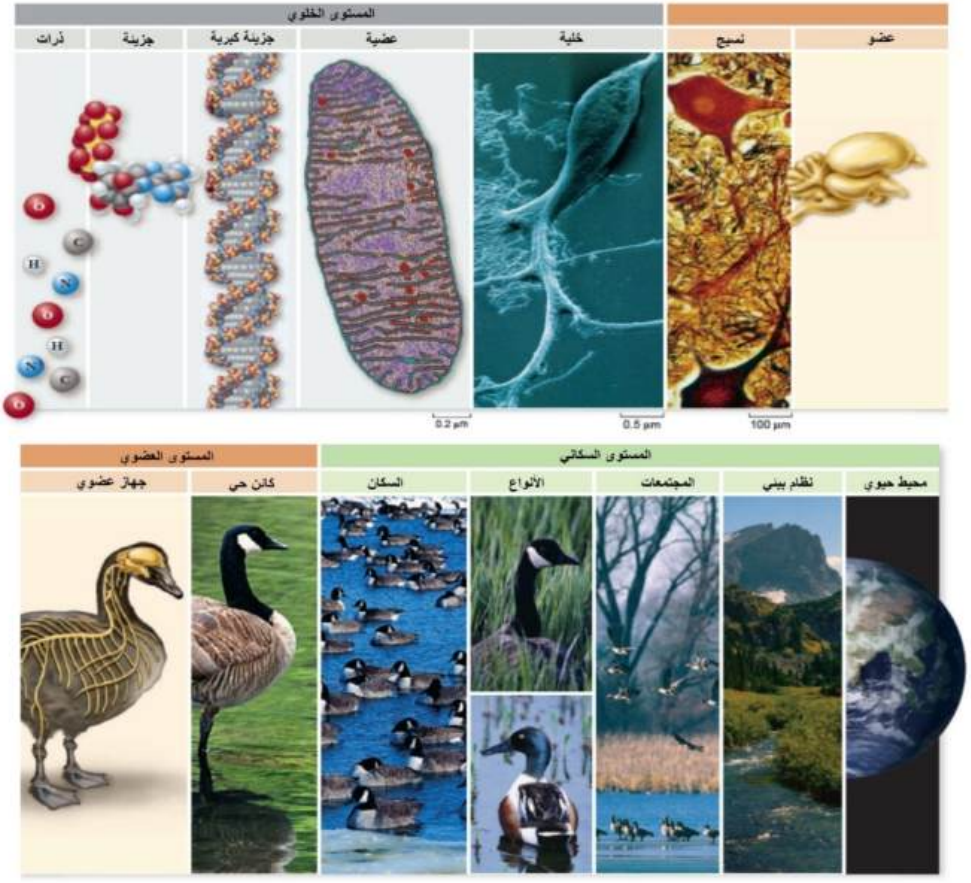
6-الحساسية Sensitivity والاستجابة للمؤثرات الخارجية: تستجيب جميع الكائنات الحيّة للمؤثرات الخارجية فمثلاً تنمو النباتات نحو مصدر الضوء.

7-استخدام الطاقة Energy utilization تستفيد جميع الكائنات من الطاقة وتوظفها لأداء العديد من أنواع العمل . فمثلاً تستخدم العضلات الطاقة الناتجة عن حرق الغذاء من أجل دعم الجسم.

8- التكيف التطوري Evolutionary adaptation تتآثر جميع الكائنات مع الكائنات الحيّة الأخرى، فضلاً عن تآثرها مع البيئة غير الحية المحيطة بها بطرق تؤمن بقائها على قيد الحياة. وكنتيجة لذلك، فإنّ الكائنات الحيّة تتطور و تتكيف مع البيئات التي تعيش فيها.

ثالثاً: مستويات التنظيم البيولوجي المختلفة

إنّ دراسة الحياة على الأرض تمتد من نطاق الدراسة المجهرية للجزيئات والخلايا التي تتشكل منها الكائنات الحيّة، وتتسع لتشمل دراسة كوكبنا الحيّ بأكمله. ويمكننا تقسيم هذا المدى الضخم و والواسع من مجالات الدراسة ضمن مستويات متسلسلة مختلفة من التنظيم البيولوجي (الشكل1-1)، والذي يمكن تمثيله بشكل تسلسل هرمي و يوضح (الشكل 1-2) المستويات المختلفة من التنظيم البيولوجي وفق تسلسل هرمي ابتداءً من القاعدة حتى قمة الهرم.



الشكل (1-1): التنظيم الهرمي لأحد النُظم الحيّة. الحياة على درجة عالية من التنظيم، وتبدأ من أبسط الذرات التي تتحد معاً لتعطي الجزيئات المشكلة للعضيات، والتي بدورها تشكيل النُظم الفرعية الوظيفية داخل الخلايا. .يتم تنظيم الخلايا في الأنسجة، والنسج في أعضاء ومن ثم إلى الأجهزة (الجهاز العصبي في الشكل) .تتجاوز هذه المنظومة الكائنات الفردية للسكان (الجماعة) والمجتمعات والنظم البيئية، وفي النهاية المحيط الحيوي بأكمله.

الشكل (1-2) : مخطط يمثل التسلسل الهرمي لمستويات التنظيم البيولوجي

لنتصور معاً أننا نقوم بإلقاء نظرة فاحصة للحياة على الأرض من خلال صورة مُكبرّة من الفضاء لإحدى الغابات، ونقوم بتكبير الصورة رويداً رويداً حتى نصل إلى نطاق الجزيئات التي تتشكل منها الصانعات الخضراء الموجودة في إحدى أوراق نبات القيقب مثلاً. سنلاحظ المستويات الآتيّة:

1- المحيط الحيوي Biosphere

يشكل المحيط الحيوي جميع البيئات المَسْكُونة بالحياةِ ويَتضمّنُ مناطق اليابسة على الأرض، وكذلك معظم الكتل المائية كالبحيرات والأنهار و المحيطات، بالإضافة إلى الغلاف الجوّي حتى ارتفاع عِدّة كيلومترات عن سطح الأرض.

2- النظام البيئي Ecosystem

يَشْملُ النظام البيئي كُل الأشكال الحيّة ضمن منطقة معيّنة، بالإضافة إلى كُلّ المكوّنات البيئية غير الحيّة المحيطة بها والتي تَتفاعلُ معها، مثل التربة والماء والضوء. تشكل كُلّ الأنظمة البيئية على الأرض مجتمعة المحيط الحيوي. تُعَدُّ الغابة في مثالنا هذا نموذجاً عن النظام البيئي.

3- المجتمعات Communities

تُدعى المجموعات المختلفة من الكائنات الحيّة التي تَسْكنُ نظاماً بيئياً معيّناً بالمجتمع الحيوي أو الأحيائي biological community. وفي مثالنا الحالي يشمل المجتمع الحيوي في الغابة أنواعاً متنوعة من الأشجار والنباتات وأنماطاً مختلفة من الحيوانات والفطريات، وكذلك أعداداً هائلة من الكائنات الحيّة المجهرية المتنوّعة كالجراثيم. نُسمي كل شكل من أشكال الحياة هذه بالنوع species.

4- الجماعة Populations

ندعو كل الأفراد الذين ينتمون إلى النوع الواحد ويعيشون ضمن حدود منطقة معينة بالجماعة. فمثلاً تشكل مجموعة أفراد أشجار نبات القيقب والتي تعيش ضمن إحدى الغابات ما يسمى بالجماعة population.

5- الكائنات الحيّة Organisms

ندعو جميع الأفراد الحيّة بالكائنات الحيّة؛ فكل شجرة من أشجار نبات القيقب في مثالنا هذا تشكل كائناً حيّاً بمفرده، وكذلك تُشكل جميع الحيوانات والنباتات المختلفة التي تعيش في الغابة.

6- الأعضاء و الأجهزة Organs and Systems

تمثل ورقة نبات القيقب أحد أعضاء النبات المختلفة. في حين يُشكل الساق والجذور الأعضاء الرئيسة الأخرى. وبشكل عام فإن العضو organ يشكل جزءاً من جسم الكائن الحي و يتألف من مجموعة من النسج، تنتظم الأعضاء ضمن أجهزة خاصة.

7- النسج Tissues

تتطلب دراسة النسج المختلفة المشكلة لورقة القيقب وفحصها استخدامنا للمجهر. إذ نلحظ من خلال الفحص المجهري أنه لكل نوع من أنواع النسج المختلفة، والتي تتشكل منها ورقة القيقب بنية خلوية متميزة ومختلفة، وبذلك فإن **النسيج** بالتعريف هو مجموعة من الخلايا المتشابهة فيما بينها في العضو الواحد من حيث الشكل والوظيفة.

8- الخلايا Cells

تُعرّف الخلية بأنّها الوحدة البنائية والوظيفية الرئيسة للحياة. تتميز بعض الكائنات الحيّة بأنها وحيدة الخلية single- celled كالحيوانات الأوالي Protozoa و الجراثيم في حين

أن الكائنات الحيّة الأخرى كالنباتات والحيوانات وكذلك الإنسان تتميز بأنها متعددة الخلايا multicellular. وعلى الرغم من صغر حجم الخلايا المتوضعة على السطح الداخلي من ورقة القيقب فإن كل خلية منها تحوي أعداداً كبيرة من بنى خضراء اللون تدعى بالصانعات الخضراء، المسؤولة عن عملية التركيب الضوئي.

9- العُضَيَّات Organelles

العُضَيَّات هي إحدى البنى المتعددة ذات الوظائف المتخصصة المنتشرة ضمن سيتوبلاسما الخلية حقيقية النوى لتقوم بكافة الوظائف الحيوية. وفي مثالنا هذا فإن الصانعات الخضراء تمثل نموذجاً لأحد العُضَيَّات المختلفة التي يمكن أن توجد ضمن خلايا ورقة نبات القيقب.

10- الجزيئات Molecules

نصل في نهاية المطاف لنلقى نظرة على الحياة على المستوى الجزيئي ضمن إحدى الصانعات الخضراء. نُعَرّف الجزيء بأنه أصغر جزء من المادة الكيميائية، يتألف من اثنين أو أكثر من الوحدات الكيميائية الأصغر والتي تدعى بالذرات. تضم كل صانعة خضراء ملايين الجزيئات من اليخضور أو الكلوروفيل والتي تشكل المادة الخضراء الملوَّنة التي تجعل من ورقة نبات القيقب تبدو خضراء اللون. يُعَدُّ اليخضور أحد أهم

الجزيئات الموجودة على الأرض حيث يقوم بامتصاص ضوء الشمس في أثناء المرحلة الأولى من عملية التركيب الضوئي ويحوله إلى طاقة كيميائيّة.

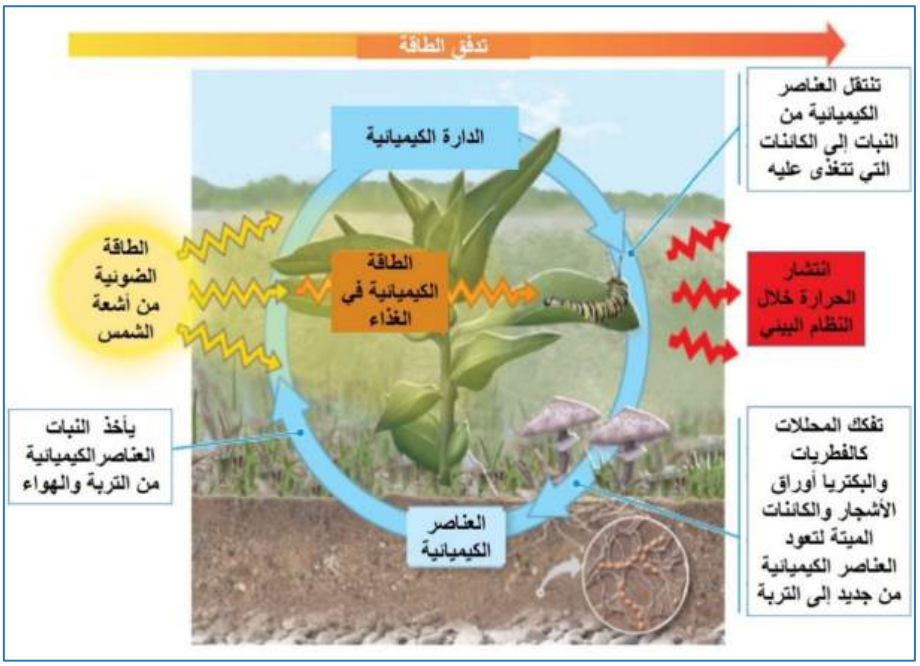
جدير بالذكر بأنه كلما ترقينا في هذا التسلسل الهرمي نلاحظ خصائص جديدة تبدأ في الظهور، إذ تنشأ هذه الخصائص عن الطريقة التي تتفاعل وتتأثر فيها العناصر مع بعضها بعضاً. وفي كثير من الأحيان لا يمكن استنتاج تلك الخصائص بمجرد النظر أو دراسة جزء من الأجزاء بمفرده فعلى سبيل المثال : إنّ فحص خلية واحدة من حيوان لا تعط سوى لمحة بسيطة فقط عن الحيوان ككل.

وعليه و بسبب الخصائص المستجدة التي يبديها العالم الحيّ فإنه من الصعب تعريف "الحياة."

تتطلب الحياة نقل وتحويل للطاقة

من السِمات الأساسية للكائنات الحيّة مقدرتها على استخدام الطاقة للقيام بالأفعال والأنشطة الحياتية الرئيسة، إذ تقوم الكائنات الحيّة بالحركة والنمو والتكاثر وسائر الأنشطة الخلوية المختلفة، التي تُعَدُّ عملاً يتطلب صرفاً للطاقة. تُعَدُّ أشعة الشمس المصدر الرئيسي للحصول على الطاقة وإنّ تحول الطاقة من شكل لآخر يجعل الحياة ممكنة. فعلى سبيل المثال تقوم أوراق النبات بامتصاص أشعة الشمس، وتحولها إلى طاقة كيميائية من خلال عملية التركيب الضوئي(Photosynthesis). تُمَرر الطاقة

الكيميائية في الجزيئات الغذائية إلى الكائنات الحيّة المستهلكة (Consumers) والتي هي كائنات حيّة، تتغذى على الكائنات المنتجة (producers)، وكذلك كائنات مستهلكة أخرى. يصرف الكائن الحيّ جُزءاً من الطاقة الكيميائية في أثناء أداء العمل على شكل حرارة . فمثلاً يرافق تقلص العضلات عملية صرف للطاقة الكيميائية إلى الوسط المحيط على شكل حرارة . وكنتيجة لذلك فإنَّ تدفق الطاقة يكون باتجاه واحد من خلال النظام البيئي حيث يدخل بصورة ضوء ويخرج على شكل حرارة. في المقابل، فإن المواد الكيميائية يعاد تدويرها ضمن النظام البيئي. فالمواد الكيميائية التي يمتصها النبات من الجو أو من التربة تدمج في جسم النبات ومن ثم تنتقل إلى الحيوان الذي يأكل هذا النبات وفي نهاية المطاف، سوف تعاد هذه المواد الكيميائية إلى البيئة من خلال المحللات (decomposers)، مثل الجراثيم والفطريات، التي تقوم بتحطيم وتفكيك الفضلات، أوراق الأشجار، وأجسام الكائنات الميتة فتصبح بذلك هذه المواد الكيميائية متاحة ليتم تناولها من قبل النباتات مرة أخرى، منهية بالتالي الدورة. (انظر الشكل1-3).



الشكل (1-3): مخطط يوضح تدفق الطاقة والدارة الكيميائية للعناصر. يكون اتجاه تدفق الطاقة خلال النظام البيئي وفق طريق واحد ، تحول النباتات الطاقة من أشعة الشمس إلى طاقة كيميائية بعملية التركيب الضوئي وتخزنها على شكل جزيئات سكرية . تستفيد الكائنات التي تتغذى على النباتات من الطاقة الكيميائية في الغذاء وتصرف جزءاً منه على شكل حرارة. بالمقابل تعاد العناصر الكيميائية إلى التربة من خلال تحلل أوراق الأشجار لتقوم النباتات بالاستفادة منها من جديد.

رابعاً: التنوع البيولوجي(الحيوي)

يمكننا أن نتصور بأنّ لعلم الحياة بعدان رئيسان: الأول، هو البعد العمودي الذي

يمثل المقياس الحجمي و يبدأ اعتباراً من الجزيئات حتى المحيط الحيوي (كما ورد في

الفقرة السابقة). أما البعد الثاني، فهو البعد الأفقي الذي يمتد من خلال التنوع الكبير للأنواع والملاحظ عبر تاريخ الحياة الطويل.

يُعَدُّ التنوع (diversity) العلامة أو السمة المميزة للحياة. فحيثما نظرنا من حولنا رأينا التفرد، إذ إن الاختلافات بين أنواع الكائنات الحيّة هي اختلافات لا نهائية يصعب حصرها، فلا يوجد فردان من الكائنات الحيّة مهما بلغت درجة القرابة بينهما يتماثلان في كل الصفات إلى حد التطابق.

ويقدر العدد الإجمالي للأنواع بحدود الـ 10 مليون إلى أكثر من 200 مليون نوع، يشمل هذا التنوع الهائل في أشكال الحياة قرابة الـ 5.200 نوعاً معروفاً من طلائعيات النوى (prokaryotes) و 100.000 نوعاً من الفطريات و290.000 نوعاً من النباتات و52.000 نوعاً من الفقاريات و قرابة الـ 1.000.000 نوعاً من أنواع الحشرات. فضلاً عن أن العلماء يتعرفون على آلاف الأنواع الإضافية في كل عام!.

حاول الإنسان منذ بدأت صلته بالكائنات الحيّة تصنيف هذه الكائنات وترتيبها ضمن نظام يسهل له أمر التعرف عليها والتمييز بينها. ويدعى المجال البحثي الخاص الذي يعنى بدراسة الكائنات الحية وتصنيفها **بعلم التصنيف** (Taxonomy)، حيث يهتم هذا العلم بوصف أنواع الأحياء وترتيبها في مجموعات.

خامساً: تصنيف الأنواع

إنّ الوحدة التصنيفية الأساسية في أي نظام تصنيفي هي النوع (species)، ويُعَرّفُ **النوع** بأنه مجموعة من الأفراد المتشابهة شكلياً وتشريحياً، وذات تركيب وراثي وخصائص فيزيولوجية متماثلة، لها نمط حياة متماثل ويمكنها التناسل فيما بينها وتعطي أفراداً خصبة لها نفس الصفات العامة للآباء. توضع الأنواع المتشابهة في جنس (Genus) واحد، ثم توضع الأجناس المتقاربة في وحدة تصنيفية أعلى تدعى الفصيلة (Family) وتوضع الفصائل المتقاربة في رتبة (Order). تُجمَع الرتب المتقاربة في صف(Class) واحد والصفوف المتقاربة في شعبة (Phylum) والشعب في مملكة أو عالم (Kingdom). يعرض (الشكل 1-4) مثالاً توضيحياً لطريقة تصنيف السنجاب الرمادي الشرقي*Sciurus carolinensis* .

هناك مراتب تصنيفية بينيّة مثل: فوق فصيلة (super family) وتحت فصيلة (sub family) وكذلك فوق رتبة وتحت رتبة. وقد يختلف الأفراد التابعون لنوع ما عن بعضهم بعضاً في عدد من الصفات غير الرئيسة، فإذا كانت هذه الفروق من الوضوح بحيث تكفي لتصنيفها إلى وحدات داخل النوع فإنها تصنف إلى تحت أنواع (sub-species) ثم إلى أصناف (varieties) ثم إلى سلالات(strains) وهكذا.

الشكل (1-4) : مخطط يوضح طريقة تصنيف السنجاب الرمادي الشرقي *Sciurus carolinensis* (eastern gray squirrel) توضع الأنواع المتقاربة من السناجب ضمن نفس الجنس وهو جنس السناجب (*Sciurus*,) ثم تجمع الأجناس ضمن فصيلة واحدة وهي الفصيلة السنجابية(Sciuridae) ترتب الفصائل المتقاربة ضمن رتبة القوارض (Rodentia) وتجمع في صف الثدييات(Mamalia) تُجمع الصفوف في شعبة الحبليات (Chordata) ضمن المملكة الحيوانية (Animalia) التابعة لحقل حقيقيات النوى (Eukarya).

لتسمية الأنواع اقترح العالم كارلوس لينيوس(Carolus Linnaeus) نظام **التسمية الثنائية** حيث إنّ لكل نوع اسمه اللاتيني الذي يتكون من كلمتين: الأولى هي الجنس وتبدأ بحرف كبير، والثانية هي النوع وتبدأ بحرف صغير.يكون اسم الجنس دائما اسماً (noun) في حين أنّ اسم النوع صفة (adjective) تتفق لغوياً من حيث التذكير والتأنيث مع الجنس. تُطبَع أسماء الجنس والنوع بأحرف مائلة، أو بوضع خطوط تحتها عند كتابتها باليد. إن النوع وحده هو الذي له اسمان، وكل المراتب التي هي أعلى من النوع ذات اسم واحد، وتكتب بحرف أول كبير.إنّ نظام التسميّة الثنائية لا يفيد فقط في إعطاء اسم واحد مميز لكل أنواع الكائنات الحيّة ولكنها أيضاً تؤدي إلى إظهار الأنواع المتقاربة وأواصر القربى بينها حيث يجمعها اسم جنس واحد.

نظام التصنيف الحديث للكائنات الحية:

تبنى العلماء حتى نهاية العقد الماضي نظاماً في تصنيف الكائنات الحية اعتمد على تصنيفها حسب درجات التشابه في نمط تطورها الجنيني وكذلك بنيتها التشريحية، حيث صنفوا الكائنات الحيّة في خمس ممالك مختلفة وهي: مملكة البدائيات (Monera) ومملكة الأوليات (protista)، مملكة الفطريات (Fungi) والمملكة الحيوانية (Animalia) والمملكة النباتية (Plantae). ومع التطور التقني الكبير والاستخدام الواسع له في مجال

البيولوجيا الجزيئية، تطور علم التصنيف حتى أصبح يعتمد أيضاً على بعض الصفات الكيميائية الحيوية والوراثيّة والفيزيولوجيّة للكائنات، وليس فقط على الصفات المورفولوجية (الشكليّة) والتشريحية. حيث أصبح بالإمكان دراسة التشابه وتحديد درجات القرابة بين الأنواع المختلفة على المستوى الجزيئي من خلال مقارنة تسلسل الأسس في الـ DNA و مقارنة الحموض الأمينية في البروتينات بين الأنواع المختلفة، الأمر الذي أدى إلى إعادة تقييم الحدود الفاصلة بين الممالك المختلفة وأعدادها. وعلى الرغم من اختلاف العلماء في اعتماد عدد ثابت للممالك التي تصنف ضمنها الكائنات الحية، إلاّ أنهم أجمعوا وبشكل شبه كامل على ترتيب الممالك المختلفة في ثلاثة حقول أو مجالات (domain) و هي: حقل الجراثيم أو البكتيريا، حقل البدائيات (Archaea) و حقل حقيقيات النوى (Eukarya). حيث يتكون حقل البكتيريا والبدائيات من طلائعيات النوى (Prokaryotes) حصراً، في حين تُصنّف جميع الكائنات الحيّة الباقية ضمن الممالك المختلفة والتي تشكل حقل حقيقيات النوى (Eukaryotes) (الشكل1-5) .

(سنقوم بدراسة الفروق المميزة لكلٍ من طلائعيات النوى و حقيقيات النوى في الفصل الثالث من هذا الكتاب).

سابقاً، وحسب نظام التصنيف القديم (الممالك الخمس)، تمّ وضع معظم الكائنات حقيقية النوى وحيدة الخلية بما فيها الحيوانات الأولية (protozoa) في مملكة واحدة سميت

بالأوليات (protista). غير أن إتباع المنظومة الحديثة في التصنيف أدى إلى توسيع حدود مملكة الأوليات لتشمل بعض الكائنات متعددة الخلايا أيضاً، مثل بعض أنواع الأعشاب البحرية.

صُنفتْ الكائنات متعددة الخلايا حقيقية النوى– حسب المنظومة الحديثة في التصنيف –في ثلاث ممالك وهي المملكة النباتية ومملكة الفطريات والمملكة الحيوانية، و يتم الفصل والتمييز مابين هذه الممالك الثلاث من خلال نمط التغذية. فالنباتات تقوم باصطناع الغذاء والسكريات اللازمة لها بنفسها عن طريق عملية التركيب الضوئي في حين تُعَدُّ الفطريات في الغالب مُحللات حيث تقوم بتحليل الكائنات الميتة والفضلات العضوية للحصول على غذائها، أما الحيوانات فتقوم بالتغذي على الأنواع المختلفة من الكائنات الحيّة وهضمها.

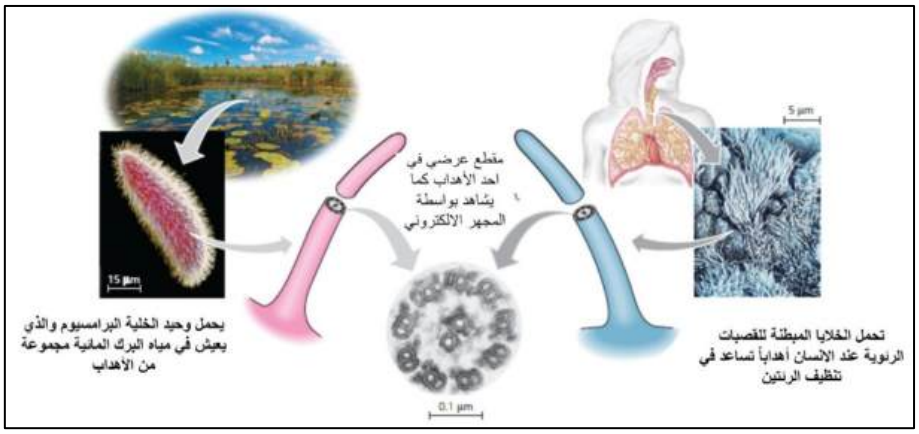
الشكل(1-5): يبين تصنيف الكائنات الحيّة ضمن ثلاث مجموعات شاملة تسمى حقول وهي حقل البكتيريا وحقل البدائيات وحقل حقيقيات النوى .يتكون حقل حقيقيات النوى من أربع ممالك وهي: المملكة النباتية و مملكة الفطريات و المملكة الحيوانية، والأوليات

وحدة أشكال الحياة بالرغم من وجود التنوع :

وعلى الرغم من التنوع الهائل الملاحظ بين الكائنات الحيّة إلاّ أنّ هناك العديد من الدلائل التي تشير إلى وجود وحدة ملحوظة بينها، وبشكل خاص على المستويين الجزيئي والخلوي. حيث تُعّد اللغة الوراثية للـ DNA المشتركة بين الكائنات الحيّة المختلفة بدءاً من الجراثيم ووصولاً إلى المملكة الحيوانية، خير مثال على ذلك. كذلك تبدو هذه الوحدة

واضحة بين الكائنات حقيقية النوى في العديد من خصائص البناء الخلوي لهذه الكائنات.

ويوضح (الشكل 1-6) مثالاً عن الوحدة الكامنة وراء التنوع.



الشكل (1-6): الوحدة الكامنة وراء التنوع من خلال البنية الهندسيّة للأهداب في حقيقيات النوى. الأهداب هي امتداد للخلايا تساعد في الحركة وتشاهد عند كائنات مختلفة ومتنوعة، كالبرامسيوم و الإنسان مثلاً. فعلى الرغم من اختلاف هذين الكائنين عن بعضهما بعضاً إلاّ أن البنية المجهرية للأهداب عند كليهما تُعَدُّ متشابهة.

سادساً: المظاهر الموحدة في علم الحياة

إنّ الدارس لعلم الحياة بشكل عام يلاحظ عدداً كبيراً من التخصصات الفرعية المختلفة، بدءاً من الكيمياء الحيوية (biochemistry) إلى البيئة (ecology) ومع ذلك، يمكنه أيضاً التعرف على الخصائص والمظاهر الموحدة التي تجمع تلك التخصصات

معاً. ومن بين هذه الخصائص نذكر: النظرية الخلوية، و الأساس الجزيئي في الوراثة والتوريث، و العلاقة بين البنية والوظيفة، و التطور فضلاً عن ظهور خصائص جديدة.

النظرية الخلوية Cell Theory :

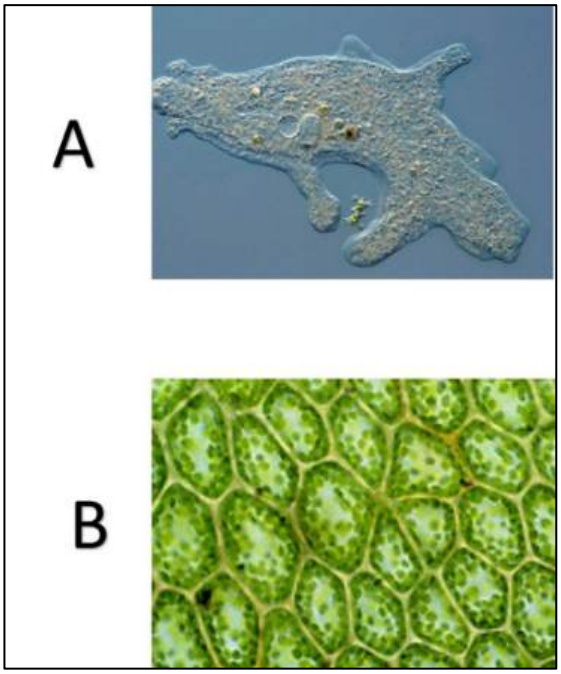
استغرق وضع هذه النظرية سنين طويلة وساهم في تجميعها كثير من العلماء حتى ظهرت بشكلها النهائي، فمنذ عهد العالم روبرت هوك و العلماء يفحصون بواسطة مجاهرهم نباتات وحيوانات كثيرة، و مع مرور الزمن تبين بأنها مركبة من خلايا. و لكن عند فحص خلايا الحيوانات لم تظهر الجدران السميكة المحيطة بالخلايا كما هو الحال في النباتات، لذلك كان من الصعب التوصل إلى نتيجة دقيقة حينها، إلى أن جاء عالِمُ الحيوان الألماني شوان *Schwann* عام(1839 م)، حيث لم يكتَفِ بمشاهدة الخلايا الحيوانية، لكنه حاول توضيح ما شاهده، وركز شفان على ما بداخل الخلايا، و ليس على الجدار فقط. و عندما فحص شفان بمجهره أجزاء صغيرة من الحيوانات، شاهد الأنوية داخل الخلايا كما لاحظ أن كل نواة محاطة بمادة سائلة سُميّت فيما بعد بالستوبلاسما، مع وجود غشاء رقيق خارجي حولها،.و بيّن أن النواة موجودة في كل من النباتات والحيوانات، و بذلك أوضح شفان أن التراكيب المجهرية بين النباتات و الحيوانات متشابهة إلى حد كبير و أن الاختلافات بينها قليلة جداً. .إنّ النتائج التي توصل إليّها العالم شفان جاءت متطابقة مع النتائج نفسها التي توصل إليها العالم الألماني شلايدن *Schleiden* وفي ذات الوقت تقريباً. و بعدها برز

سؤال جديد و هو من أين تأتي الخلايا ؟ في بادئ الأمر لم يتمكن العلماء من الإجابة عن السؤال و هم يشاهدون الخلايا بواسطة المجاهر البسيطة التي لديهم، حتى جاء العالم فيرتشو *Virchow* ،و هو عالم أمراض ألماني، عام 1855 و قال إنّ الخلايا تأتي من خلايا سابقة لها ، و من هنا وضعت نظرية الخلية بفضل هؤلاء العلماء الثلاثة والتي تبنى على ثلاثة مفاهيم رئيسة هي:

1–تُعَدُّ الخليّة الوحدة الأساسية والجوهرية في الحياة.

2– تتألف جميع الكائنات الحيّة من خليّة أو أكثر.

3–تنشأ الخلايا الحيّة من خلايا أخرى حيّة.



الشكل (1-7): الأساس الخلوي للحياة. تتألف كل الكائنات الحيّة من خلايا. بعض الكائنات كالأوالي protists تتألف من خلية واحدة فقط تمتلك كامل القدرة على قيام الكائن بكامل نشاطاته الحياتية ويظهر الشكل A : المتحول الحر وتبدو الأرجل الكاذبة محيطة بالفريسة، أما معظم الكائنات الحيّة فتتألف من العديد من الخلايا كما في النبات الشكل B .

الأساس الجزيئي في الوراثة يفسر استمرار الحياة

تُخَزن المعلومات التي تحدد ماهية الخلية وشكلها و وظيفتها ضمن جزيء يدعى الحمض الريبي النووي منقوص الأوكسجين (deoxyribonucleic acid, DNA). والذي يتألف من سلسلة حلزونية مضاعفة تُكوّن النكليوتيدات أحجار الأساس الرئيسة فيها، و يُعَدُّ جزيء الـ DNA المادة الوراثية في جميع الكائنات الحيّة (ما عدا بعض الكائنات) وهو جوهر القضية الرئيسة في الوراثة (central dogma) فوظيفته تخزين المعلومات الوراثية وتمريرها من جيل لآخر ومن خلية لأخرى، إذ يحوي المخطط (blueprint) لتركيب الببتيدات المتعددة من خلال ثلاث عمليات أساسية تتيح تدفق ونقل المعلومات الوراثية، هي :التضاعف النسخ والترجمة (انظر الفصل الثامن) .

العلاقة بين البنية والوظيفة:

أحد مظاهر وحدة علم الحياة هي العلاقة بين البنية والوظيفة، فوظيفة الجزيئات والمعقدات من الجزيئات الكِبَريّة macromolecular complexes تعتمد على بنيتها. فنحن ندرس بنية الجزيئات ومعقدات الجزيئات الكبرية لمعرفة وظائفها. ولدى معرفتنا وظيفة بنيّة معينة يمكن لنا بالتالي استنتاج وظيفة بنى مشابهة موجودة مثلاً في كائنات مختلفة أخرى. فعلى سبيل المثال، إذا وجدنا عند أحد الديدان بنيّة غشائية تشبه بنية

المستقبل الغشائي لهرمون الأنسولين عند الإنسان فمن الممكن لنا أن نستنتج بأن هذه البنية تؤدي وظيفة كمستقبل لجزيء يشبه الأنسولين ينتجه هذا النوع من الديدان. وبهذه الطريقة يمكن أن نكتشف العلاقة التطورية بين امتصاص الغلوكوز لدى البشر والديدان بآنٍ معاً.

يمثل التطور وحدة وتنوع الحياة

تشترك أشكال الحياة المختلفة بخصائص متماثلة كوجود البنية الخلوية، و القيام بعمليات الاستقلاب وتحويل الطاقة، و وجود المادة الوراثية متمثلة بجزيء الـ DNA. بالمقابل، تتميز الكائنات الحيّة بتنوعها الكبير بدءاً من الجراثيم حتى الحيتان الزرقاء وأشجار النخيل والشِعَاب المرجانية وصولاً إلى الإنسان إلخ..

وعلى مدى أجيال حاول علماء الأحياء تصنيف الكائنات اعتماداً على خصائصها المشتركة. وكان التصنيف الأكثر دقة ذاك المعتمد على العلاقات التطورية بين الكائنات، وقد أدى هذا النهج في النشوء والتطور وتطور السلالات فضلاً عن الكم الكبير من بيانات التسلسلات الجزيئية إلى ظهور فرضيات جديدة في التطور لتفسير تنوع الحياة.

الفصل الثاني

الكيمياء والحياة

- التركيب الكيميائي للخلية
- أولاً: المركبات اللاعضوية
- الماء
- الأملاح المعدنية
- ثانياً: المركبات العضوية
- البروتينات
- الليبيدات
- السكاكر
- الأحماض النووية

تمهيد :

قدر العلماء أنّ الحياة نشأت على الأرض منذ قرابة ثلاثة مليّارات عامٍ في الماء، قبل أن تنتشر على اليابسة. و لولا الماء لكانت الحياة مستحيلة على وجه الأرض. وكما نعلم فإنّ معظم الكائنات الحيّة تتكون من الماء وتعيش في بيئات تعتمد بشكل أو بآخر عليه.

يغطي الماء ثلاثة أرباع سطح الكرة الأرضية، ويكون في الغالب بشكله السائل لكنه يظهر أيضاً بالشكل الصلب (الجليد) والغازي (بخار الماء). والماء هو المادة الوحيدة في الوجود التي تظهر بالأشكال الفيزيائية الثلاثة للمادة، فضلاً عن الخاصة الفريدة المتمثلة بقابلية طفو الجليد على سطح الماء السائل والناجمة عن الخصائص الكيميائية النادرة له.

و لكي نتمكن من فهم طبيعة الحياة على الأرض لابد لنا من فهم طبيعة المواد المكونة منها. ولكي نفهم كيف تتجمع النُظم الحيّة(living systems)علينا أنْ ندرس التركيب الذري لها وكيف ترتبط الذرات معاً بروابط كيميائية لتشكل الجزيئات، وما هي السُبل التي ترتبط فيها تلك الجزيئات لتشكيل جزيئات أكبر لنصل في النهاية إلى البنى الخلوية ومن ثم إلى العضيات الخلوية إلخ.. .

يتكون عدد كبير من الجزيئات البيولوجية المعروفة من سلاسل طويلة مؤلفة من آلاف أو حتى المليارات من الذرات!. تعرف هذه التجمعات الضخمة، والتي يتم تركيبها من قِبَل الكائنات الحيّة، بالجزيئات الكِبَريّة *macromolecules*. ويمكن تقسيم الجزيئات الكِبَريّة ضمن أربع مجموعات هي: الكربوهيدرات والأحماض النووية، و البروتينات، و الليبيدات أوالدهون. تُعَدُّ هذه الجزيئات اللبنات الأساسية الكيميائية التي تتكون منها جميع الكائنات الحية. وسنتعرف في هذا الفصل على المكونات الكيميائية الرئيسة التي تتألف منها الخلية، أهميتها و وظائفها الأساسية.

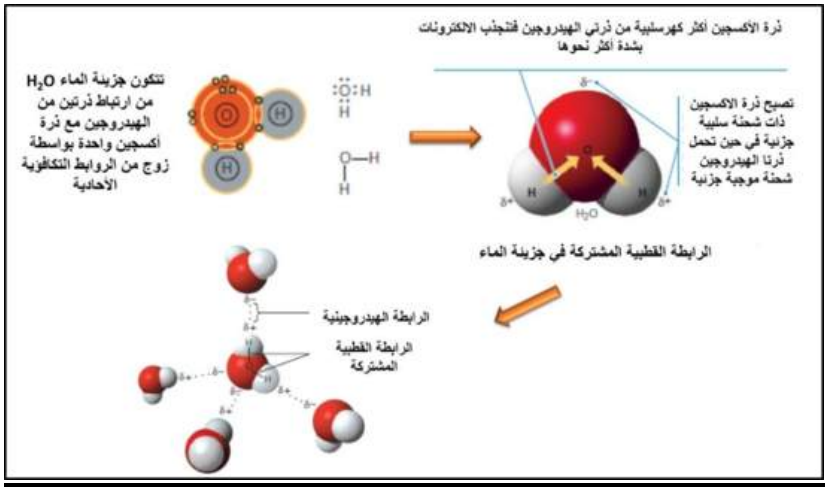
التركيب الكيميائي للخلية:

تتكون الخلية بشكل عام، من **مركبات لا عضوية** تضم الماء والأملاح المعدنية **ومركبات عضوية** تشمل البروتينات والسكاكر والليبيدات والحموض النووية.

أولاً: المركبات اللاعضوية:

1. الماء H_2O: يُشكل الماء 70% من محتوى الخلية، ويُعَدُّ من أهم مركباتها اللاعضوية، إذ تتم فيه جميع التفاعلات الكيميائية الخلوية. ويختلف المحتوى المائي للخلية من خلية لأخرى، كما يختلف في الخلية الواحدة حسب عمر الخلية؛ فالخلية الفتيّة تحوي نسبة أكبر من الماء مقارنة بالخلية الكهلة ضعيفة النشاط. ويدل وجود كميات

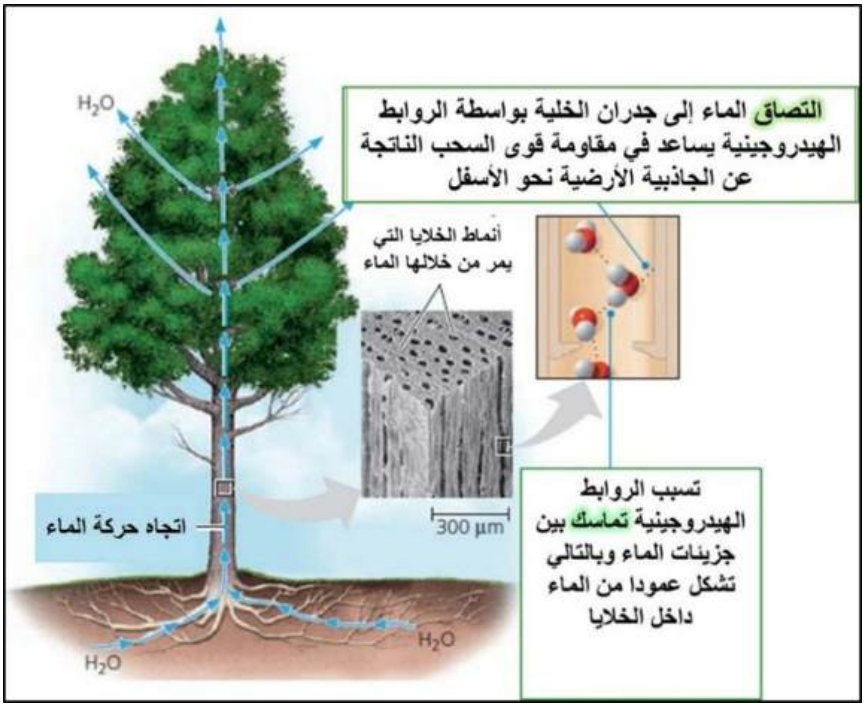
كبيرة من الماء داخل الخلايا وخارجها على أهميته في النشاط الحيوي للكائن. وتعود خصائص وسلوك الماء الفريدة إلى التركيب الجزيئي المميز لهذا الجزيئ، و تساهم الرابطة الهيدروجينية بشكل كبير في كثير من الخصائص الكيميائية المرتبطة بالمادة الحيّة (الشكل 2-1).



الشكل (2-1): البنية الجزيئية للماء والروابط الكيميائية المشاركة في تشكله. ترتبط ذرة أكسجين مع ذرتين من الهيدروجين من خلال الرابطة التكافؤية (المشتركة) حيث تكون الالكترونات مشتركة بين الذرات. وبسبب الكهرسلبية القوية لذرة الأكسجين فإنّ الالكترونات تنجذب أكثر نحو ذرة الاكسجين ويصبح تقاسم الالكترونات غير متساوٍ فتتولد شحنة سلبية جزئية -δ حول ذرة الاكسجين و شحنة موجبة جزئية +δ حول ذرتي الهيدروجين الأمر الذي يؤدي إلى توزع غير متكافئ بين الشحنات و يجعل جزيء الماء جزيئاً مستقطباً polar molecule ؛ أي أن الشحنة العامة للجزيء غير موزعة بشكل متساوٍ. وتنشأ خصائص الماء الفريدة عن الانجذاب بين جزيئات عديدة من الماء وارتباطها معاً بروابط هيدروجينية إذ تنجذب ذرة الهيدروجين المشحونة بشحنة موجبة جزئية من إحدى الجزيئات إلى ذرة الاكسجين المشحونة شحنة سالبة جزئية من جزيئة أخرى قريبة منها وترتبط الجزيئات معاً برابطة تدعى الرابطة الهيدروجينية hydrogen bond.

و من الخصائص الرئيسة للماء التي تساهم في جعل الأرض بيئة ملاءمة للحياة:

أ- **تماسك جزيئات الماء:** تقوم الروابط الهيدروجينية بربط جزيئات عديدة من الماء بقوة معاً، و تدعى هذه الظاهرة بالتماسك **cohesion**. فمثلاً: تساهم ظاهرة التماسك في حل ونقل المواد الغذائية عكس الجاذبية الأرضية عند النبات. حيث يعبر الماء من الجذور إلى الأوراق من خلال شبكة من الأقنية الخلوية (الشكل 2-2). كما يساهم تبخر الماء من الأوراق في سحب المزيد من الماء من الجذور باتجاه الأعلى ويرجع السبب لخاصتي التماسك والالتصاق,**adhesion** معاً، إذ إنّ التصاق جزيئات الماء إلى جدران الخلايا يساعد في مقاومة قوى السحب للأسفل الناجمة عن الجاذبية الأرضية.

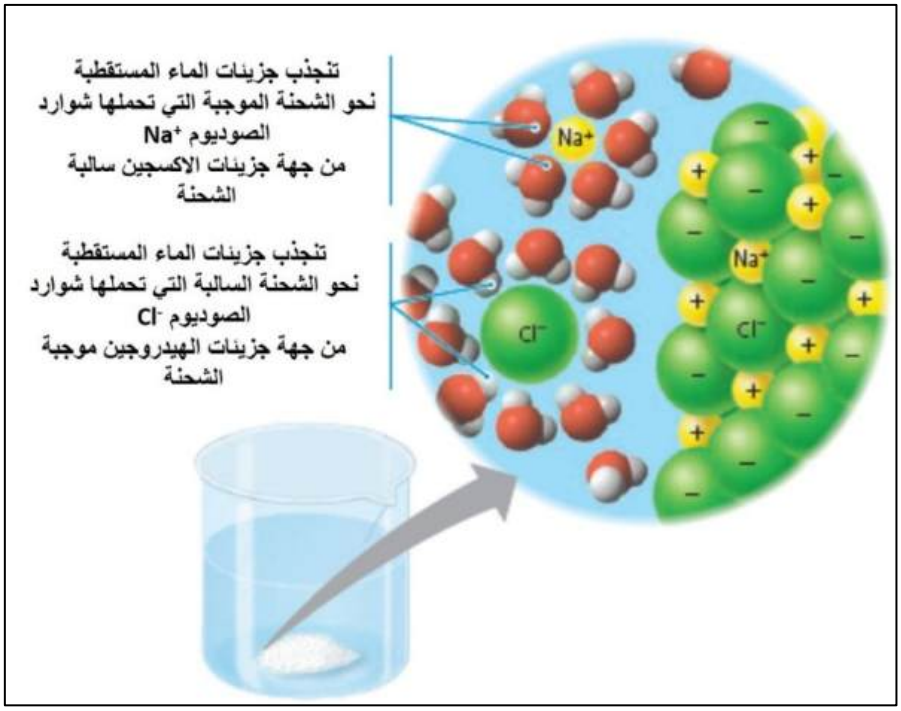


الشكل(2-2): نقل الماء في النبات. تساهم ظاهرتي التماسك والالتصاق الناتجتين عن الروابط الهيدروجينية في الماء في نقل الماء عبر الأنابيب الخشبية من الجذور باتجاه الأوراق في الأعلى.

وتكون ظاهرة التماسك مسؤولة عن جعل الماء سائلاً لا غازاً بدرجات الحرارة العادية، كما أنها مسؤولة عن نشوء ما يسمى بظاهرة التوتر السطحي للماء **surface tension**، وهي من الخواص الفيزيائية التي يمتاز بها الماء و تجعل العديد من الأجسام تطفو على سطحه (الشكل 2-3).

الشكل (2-3): ظاهرة التوتر السطحي للماء. يمكن لبعض الحشرات السير فوق الماء ! فالتوتر السطحي للماء أكبر من القوة المطبقة من أرجل الحشرة على الماء و يساعد في ذلك أيضاً شكل الأرجل الخاص لديها مما يجعلها تطفو على سطح الماء ويمنعها من اختراقه.

ب- الماء محل جيد : يُعَدُّ الماء وسطاً حالاً مميزاً ومذيباً ممتازاً للكثير من الشوارد والمركبات الموجودة ضمن الخلايا. فالعديد من المركبات القطبية إضافة للشوارد تنحل في الماء، مثل السوائل البيولوجية كالدم، والنسغ في النبات والعديد من السوائل الخلوية الأخرى. وترجع هذه الخاصية المميزة في الإذابة إلى قطبية جزيئاته (الشكل 2-4) .



الشكل (2-4): طريقة انحلال ملح الطعام في الماء. لدى وضع ملعقة من ملح الطعام (كلوريد الصوديوم NaCl) في كأس من الماء، تصبح شوارد الكلور والصوديوم معرضة لجزئيات المذيب (الماء). تنجذب هذه الشوارد وجزيئات الماء نحو بعضها البعض بسبب شحناتها المتعاكسة وينتج عن احاطة جزئيات الماء لشوارد الكلور و الصوديوم كلٍ على حدا إلى فصل الشوارد عن بعضها البعض مؤدية في النهاية إلى حل مركب كلوريد الصوديوم وذوبانه في الماء.

ت- الماء منظم مثالي للحرارة؛ يمتاز الماء بحرارة نوعية عالية تعزى إلى كونه جزيء مستقطب، وتُعَّرف **الحرارة النوعية** بأنّها كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة كيلو غرام واحد من المادة درجة مئوية واحدة. ولهذا السبب نجد أنّ درجة حرارة الماء ترتفع وتنخفض ببطء مقارنة مع معظم السوائل الأخرى. تساعد الحرارة النوعية العاليّة للماء

على أن تكون درجة حرارة الجسم ثابتة عند ارتفاع درجة حرارة الجو وكذلك الحال بالنسبة للبحار والمحيطات للحفاظ على الكائنات الحيّة فيها. حيث تُعَدُّ هذه الخاصيّة مهمة للخلية بشكل خاص و للكائن الحيّ بشكل عام، إذ تحافظ الخلية على ثبات درجة حرارتها و كذلك تستطيع الكائنات الحيّة أن تقاوم التغيرات في درجة الحرارة.

ث- الماء محلول متعادل: يتميز الماء بأنه متعادل بمعنى أن الرقم الهيدروجيني الـ pH له هو 7 وبذلك فهو يتناسب مع النظام الخلوي، إذ أنّ معظم التفاعلات الكيميائية الخلوية تتم في أوساط متعادلة.

ج- الماء عامل نقل مثالي : يُعَدُّ الماء عامل نقل مثالي حيث يتم بوساطته نقل المواد الغذائية إلى داخل الخلية وكذلك طرد الفضلات خارجها.

ح- الماء مصدر للامداد بشوارد الأكسجين والهيدروجين : يُعَدُّ الماء مصدراً أساسياً لإمداد الخلية بالهيدروجين والأكسجين اللذين يدخلان في تركيب كثير من المركبات العضوية المكونة للمادة الحيّة.

2. الأملاح المعدنية: تكون الأملاح المعدنية على هيئة كلوريد وكربونات وكبريتات وفوسفات كلٍ من الصوديوم والكالسيوم والبوتاسيوم والمغنيزيوم، وتوجد في الخلايا وفي السوائل كالدم والسوائل بين الخلايا وفي اللمف أيضاً. أما الشوارد الرئيسة خارج الخلايا فتكون عبارة عن شوارد الصوديوم والكلوريد، وتكون داخل الخلايا عبارة عن شوارد البوتاسيوم والفوسفات وشاردة البيكربونات.

تساهم الشوارد المختلفة في العديد من وظائف الخلايا منها:

1. تؤدي دوراً بنيوياً؛ فهي تدخل في بنية بعض المركبات الحيّة المهمة كالحموض النووية والهيموغلوبين.

2. تؤدي دوراً كهربائياً يكمن في فروق الكمون الكهربائي على الأغشية الخلوية، إذ تقوم الشوارد المعدنية في تنظيم عمل الخلايا القابلة للتنبيّه كالخلايا العصبيّة والعضليّة.

3.تؤدي دوراً تنظيميّاً، حيث ترتبط بعض الشوارد المعدنيّة بالأنزيمات التي تصبح بهذا الشكل فعالة، كما تسيطر على سرعة بعض التفاعلات في الخلية.

4. تؤدي دوراً ناقلاً؛ فالحديد الذي يدخل في تركيب الهيموغلوبين يرتبط مع الأكسجين ويشارك في نقله.

5. تستخدم الشوارد اللاعضوية الفوسفات من أجل تركيب الـ ATP لذا فهي تؤدي دوراً في إنتاج الطاقة.

6. تؤدي دوراً ميكانيكياً حيث تدخل شوارد الكالسيوم وشوارد الفوسفات في تركيب العظام وتساهم في متانتها.

7. لها دوراً موقيّاً في الخلية من خلال صيانة التوازن الحمضي – الأساسي ، حيث تساهم شوارد الفوسفات والبيكربونات في تكيّف الخلية لتبدلات درجة الحموضة.

ثانياً: المركبات العضوية:

تحتوي كافة المركبات العضويّة على الكربون، وتوجد هذه المركبات على هيئة جزيئات صغيرة حرّة (micromolecules) أو بهيئة جزيئات ضخمة أو كِبَريّة (macromolecules) ناتجة عن تجمع عدد كبير من الجزيئات الصغيرة مشكلة ما يدعى بالبوليميرات (Polymers). يتألف كل بوليمير من سلسلة طويلة من وحدات تركيبية أحادية الجزيء متشابهة ترتبط ببعضها بعضاً بروابط معينة، تسمى مونومير (monomere). أهم الجزيئات الكِبَرية في الخليّة هي: البروتينات والليبيدات والكربوهيدرات والحموض النووية (الشكل 2-5).

الشكل (2-5): الجزيئات الكِبَريّة الأربعة الرئيسة المشكلة للبوليميرات. تتشكل البوليميرات بدءاً من وحدات تركيبية أحادية الجزيء تدعى المونوميرات ويوضح الشكل الجزيئات الكبرية الرئيسة في الخلية ؛ الكربوهيدرات، الحموض النووية ، الليبيدات والبروتينات داخل محتواها الخلوي.

1. البروتينات:

تُعَدُّ البروتينات من المكونات الأساسية في الخلية، وتصل نسبتها إلى 10% في الخلايا الحيّة وهي عبارة عن جزيئات ضخمة على شكل بوليميرات، مكوّنة من وحدات أساسيّة هي الحموض الأمينيّة، التي ترتبط مع بعضها بعضاً بواسطة الروابط الببتيديّة. ومع أنّ جميع البروتينات المختلفة الموجودة في الطبيعة مَبْنية من ترابط 22 حمضاً أمينياً مختلفاً فقط، فإنّ البروتين يقوم بمجموعة واسعة من المهام المتنوّعة (الشكل 2-6)؛ حيث تؤدي البروتينات وظائف حيوية مهمة في الخلية أهمها:

1. وظيفة بنيوية؛ حيث تدخل البروتينات في تركيب معظم أجزاء الخليّة.وتشكل الإطار البنيوي لأقسام متنوعة من الجسم، كالكيراتين في الجلد والشعر والكولاجين في النسيج الضام.

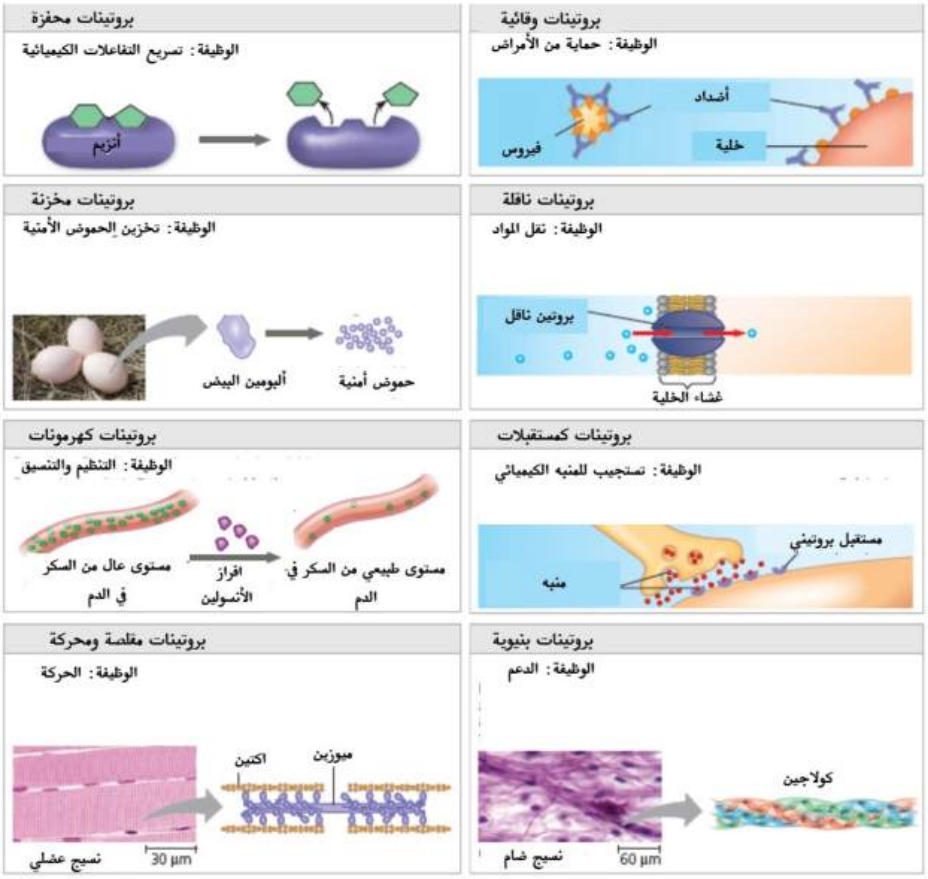
2. وظيفة محفّزة؛ حيث تتوسط الأنزيمات،التفاعلات الكيميائية الحيويّة في الخليّة.كالأميلاز في اللعاب والببسين في المعدة.

3. وظيفة ناقلة؛ تسهم في نقل بعض المواد الحيّوية المهمة عبر الجسم، كالهيموغلوبين الذي ينقل الأكسجين وثنائي أكسيد الكربون في الدم.

4. وظيفة مقلّصة ومُحرِكة؛ تعمل بعض البروتينات كعناصر قابلة للتقلص في النسيج العضلي كالأكتين والميوزين.

5. وظيفة منَظِمة؛ تقوم بعض البروتينات كالهرمونات بتنظيم العمليات الفيزيولوجيّة المتنوعة في الخلية كالأنسولين والأدرينالين.

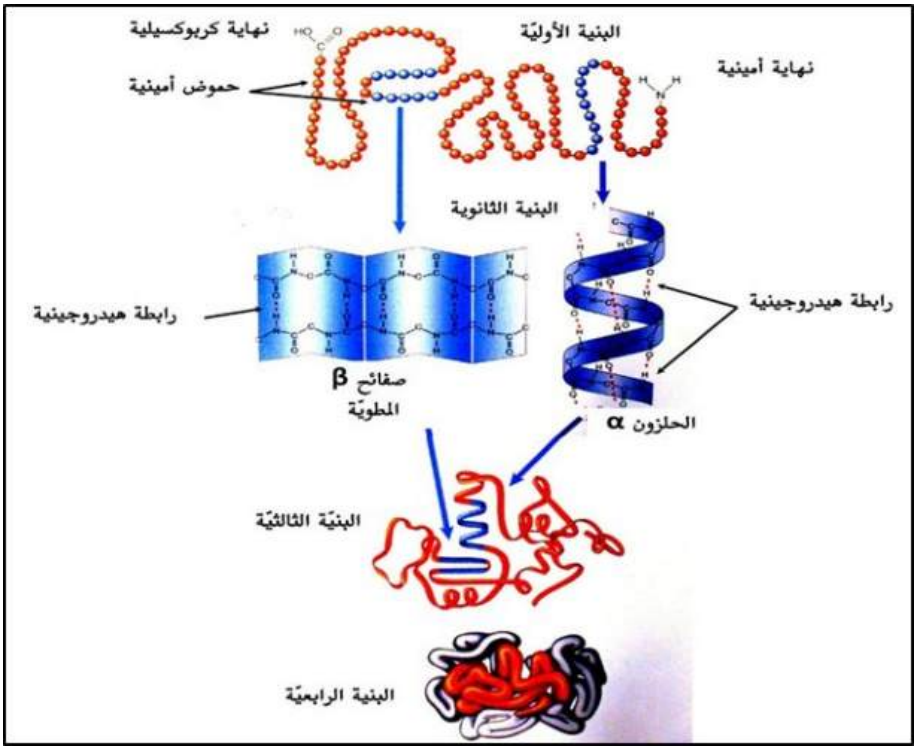
6. وظيفة مناعيّة دفاعية؛ تقوم بعض البروتينات بالعمل كأضداد تحمي الجسم من الجراثيم الغازية كالغلوبولينات المناعية.



الشكل (2-6): أهم الوظائف المتعددة للبروتينات

تحدد البنية الفراغية للبروتين الوظيفة التي يقوم بها، فالبروتين لا يكون قادراً على إنجاز وظائفه ما لم يكن على هيئة بنية ثلاثية الأبعاد أو بالتشكيل الفراغي المناسب، إذ تتحدد البنية ثلاثية الأبعاد عن طريق تسلسل الحموض الأمينية في البروتين. يمكن دراسة البنية الأساسية للبروتين عن طريق اعتبار أربعة مستويات تنظيمية بدءاً من الوحدات البنائية الأساسية؛ أي الحموض الأمينية حتى الوصول إلى البروتين النهائي. حيث يشكل ارتباط الحموض الأمينية وبشكل متسلسل بوساطة الروابط الببتيدية، الببتيد المُتَعدد و نطلق على التتابع الذي توجد فيه الحموض الأمينية في الببتيد المتُعَدُّد اسم **البنية الأوليّة** للبروتين(primary structure)، ويكون لهذا الببتيد المُتَعدد قطبية محددة فهو يملك زمرة أمينية حرة في إحدى نهايتيه وزمرة كربوكسيليّة حرة في نهايته الأخرى. لا يبقى البروتين بشكله الأولي بل يعيد تشكله ليُكوّن **البنية الثانوية** (secondary structure)، والتي تنتج من تكون روابط هيدروجينيّة بين الزمرة (C=O) في كل رابطة ببتيدية والزمرة(NH-) الخاصة بالرابطة الببتيدية، و التي تقع على بعد أربعة حموض أمينية منها وتتكرر عادة تلك الروابط الهيدروجينية بعد كل أربعة حموض أمينيّة متعاقبة، وتؤدي إلى التفاف البروتين حول نفسه التفافاً حلزونياً مكوناً تركيباً ثانوياً حلزونيّاً للبروتين يدعى الحلزون α. يأخذ جزيء البروتين في هذه الحالة شكلاً حلزونيّاً منتظماً بفضل انتظام الروابط الهيدروجينيّة المتشكلة بين الروابط الببتيدية، وقد ينثني البروتين ليكوّن تركيباً ثانوياً آخر، على شكل رقائق صفائحية تدعى صفائح β المطويّة (β-pleated

sheets). يلتف البروتين حول نفسه بشكل أكثر تعقيداً من التركيب الثانوي ليعطي شكلاً قريباً من الشكل الكروي ويؤدي هذا الالتفاف إلى تشكل **البنيّة الثالثيّة** (tertiary structure) وهي بنية ثلاثية الأبعاد ، ويعزى هذا الالتفاف في البنية الثانوية إلى نوعيّة الحموض الأمينيّة في السلسلة الببتيديّة وكيفيّة تكرارها ونوعيّة الأقطاب المحبة أو الكارهة للماء في الحمض ويسهم في تشكيل هذه البنية أنواعاً عديدة من الروابط الهيدروجينية ،إضافة إلى الرابطة ثنائية الكبريت المتشكلة بين جزيئين من حمض السيستيئين. وتنتج **البنية الرابعيّة** (quaternary structure) من تجمع عدد من السلاسل الببتيدية(سلسلتين فأكثر) (الشكل 2-7) فمثلاً، يتكون بروتين الهيموغلوبين من أربع سلاسل ببتيدية اثنتان من النوع α واثنتان من النوع β، تُعرف هذه السلاسل بتحت الوحدات وعندما تتداخل هذه الوحدات مع بعضها بعضاً تنتج البنية الرابعية.

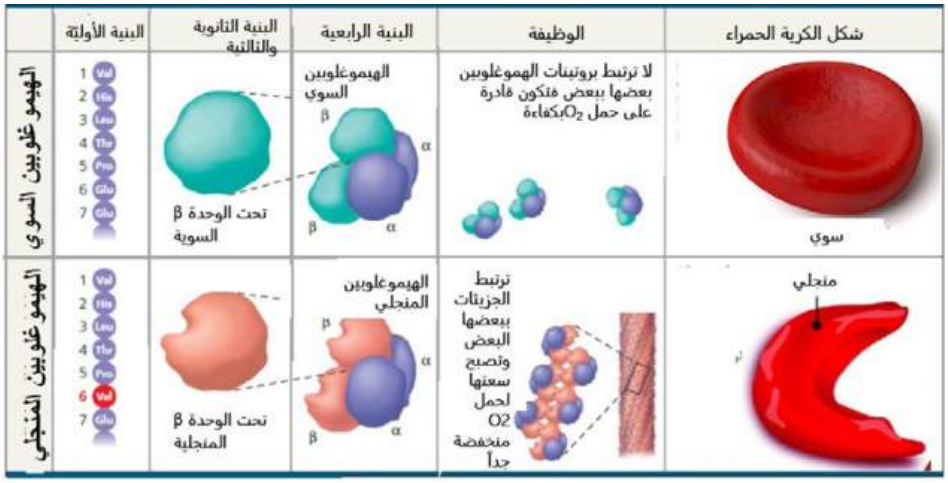


الشكل (2-7):يشرح المستويات الأربعة الخاصة ببنية البروتين. تنتج البنية الأوليّة من ارتباط سلسلة من الحموض الأمينيّة بوساطة الرابطة الببتيديّة مشكلةً ما يدعى بالببتيد المتعدد، يكون لهذا الببتيد المتعدد قطبية محددة فهو يملك زمرة أمينية حرّة في إحدى نهايتيه وزمرة كربوكسيليّة حرّة في نهايته الأخرى. تشكل السلاسل الببتيديّة الحلزون α أو صفائح β المطويّة، معطية البنية الثانويّة . تتشكل البنية الثالثيّة ثلاثية الأبعاد من التفاف السلاسل الببتيدية لتشكل شكلاً أكثر استقراراً بفضل تشكل روابط هيدروجينية والجسور الكبريتية ضمنها.و تنتج البنية الرابعيّة من تجمع اثنان أو أكثر من البنى الثالثيّة من أجل تشكيل جزيء بروتيني أكبر.

وجدير بالذكر، أن البنية البروتينية غير ثابتة إطلاقاً، بل تتغير لتأدية وظائفها المختلفة.

و لتحقيق هذا التغيير البنيوي يحدث تغير في ارتباطات البنية الثالثية و الرابعية ، لذلك

ندعو هذه البنى الثالثية و الرابعية تشكيلات كيميائية. و ما يحدث لها من تغيرات بالتغيرات في البنية الشكليّة conformational changes . كما أنّ البروتينات تغير من صفاتها وطبيعتها تحت تأثير بعض العوامل الخارجية كالحرارة والحموض أو الأسس أوشوارد المعادن الثقيلة وجميع أنواع الإشعاع، بحادثة تدعى بالتشوه (denaturation) حيث تتضمن هذه الظاهرة تحطيماً لبعض الروابط الموجودة فيها وتغيراً في صفاتها الكيميائية والفيزيائية، والتي تكون غير قابلة للعكس مما يؤدي إلى تغير الشكل الفراغي ثلاثي الأبعاد للبروتينات وتحولها إلى شكل مشوه غير سوي قد يفقدها وظيفتها. بالمقابل فقد تؤدي الطفرات إلى تغير في البنية الأولية للبروتين ينجم عنه تغير في شكل البروتين وبالتالي حدوث خلل وظيفي فيه كما في مرض فقر الدم المنجلي، حيث تؤدي الطفرة إلى استبدال حمض الفالين بالحمض الأميني غلوتامين في الموقع 6 من السلسلة الببتيدية مما يؤدي إلى تشوه في بنية بروتين الهيموغلوبين ينعكس بالتالي على شكل الكرية الحمراء. ويوضح(الشكل2-8) البنية السوية للهيموغلوبين المكونة من أربع تحت وحدات اثنتان من النوع α واثنتان من النوع β، وكذلك بنية الهيموغلوبين المنجلي الطافر.



الشكل (2-8): مقارنة بين بنية الهيموغلوبين السوي والهيموغلوبين المنجلي الطافر. ففي الهيموغلوبين السوي يكون حمض الغلوتامين Glu في الموقع 6 من السلسلة الببتيدية، وتتكون جزيئات هذا البروتين من أربع تحت وحدات اثنتان من النوع α واثنتان من النوع β، بحيث تكون كل جزيئة منها وظيفية قادرة على حمل الأكسجين ونقله وبالتالي تكون كريات الدم الحمراء بشكلها المقعر الدائري المنتظم، مليئة بجزئيات الهيموغلوبين الوظيفية السوية أما في الهيموغلوبين المنجلي الطافر، فيتم استبدال الحمض الأميني الفالين Val بالحمض الأميني غلوتامين في الموقع 6 من السلسلة الببتيدية، الأمر الذي يؤدي إلى تكتل جزيئات الهيموغلوبين بعضها مع بعض و حدوث تشوه في بنية البروتين ، يجعله يفقد جزءاً من وظيفته وينعكس ذلك على شكل الكرية الحمراء التي تأخذ شكلاً منجلياً بنتيجة تراكم جزئيات الهيموغلوبين المشوهة ضمنها.

2. الليبيدات:

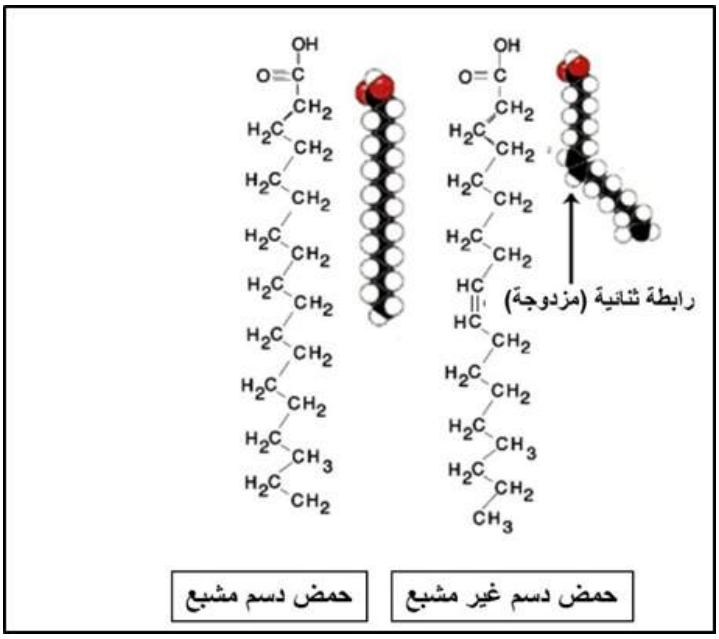
تشكل الليبيدات مجموعة غير متجانسة من المركبات الخلوية التي تختلف في التركيب الكيميائي و تتشابه فقط في خواصها الانحلاليّة، حيث تُعَدُّ الطبيعة الكارهة للماء السمة المميزة لها، إلاّ أنها تنحل بسرعة في المحلات العضويّة كالكلوروفورم أو الإيثر.

تؤدي الليبيدات ثلاثة أدوار رئيسة في الخلية وهي:

- ادخار الطاقة، كالحموض الدسمة والغليسيريدات الثلاثيّة.
- تدخل في تركيب الأغشية الخلوية، كالليبيدات الفوسفورية والسكريّة.
- تؤدي وظائف بيولوجية نوعية في الخلية، كالستيروئيدات.

تصنف الليبيدات حسب تركيبها الكيميائي إلى :الحموض الدسمة، الغليسيريدات الثلاثيّة، الليبيدات الفوسفورية، الليبيدات السكريّة، و الستيروئيدات.

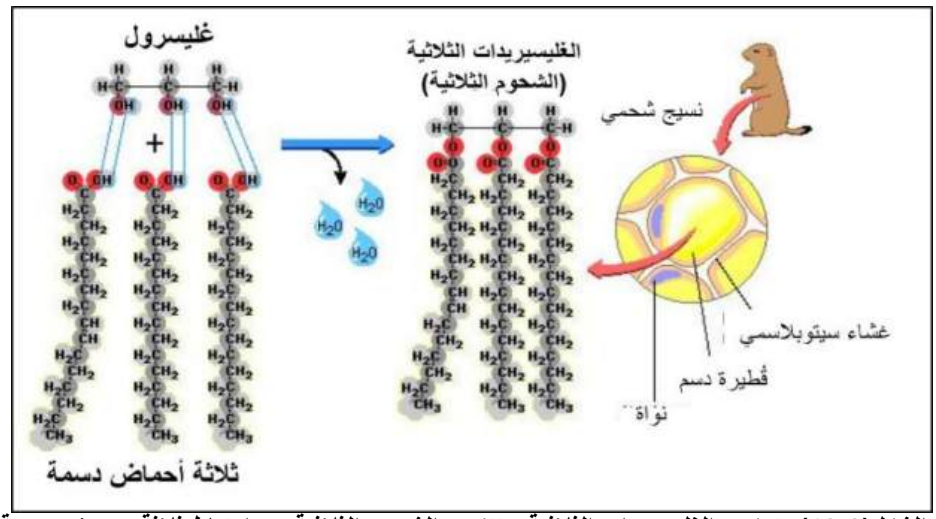
1.2 الحموض الدسمة (Fatty acids): وهي حموض عضوية ذات سلاسل هيدروكربونية غير متفرعة تشتمل على وظيفة كربوكسيلية في إحدى نهايتيها، لذلك فهي تُعَدُّ جزئيات مستقطبة وبشكل عام، نميز نمطين منها هما:الحموض الدسمة المشبعة saturated والحموض الدسمة غير المشبعةunsaturated .وبشكل عام، تُعَدُّ الحموض الدسمة الأشكال الأكثر فعاليّة لاختزان الطاقة، إذ ينتج عن أكسدتها كميات كبيرة من الطاقة(الشكل 2-9).



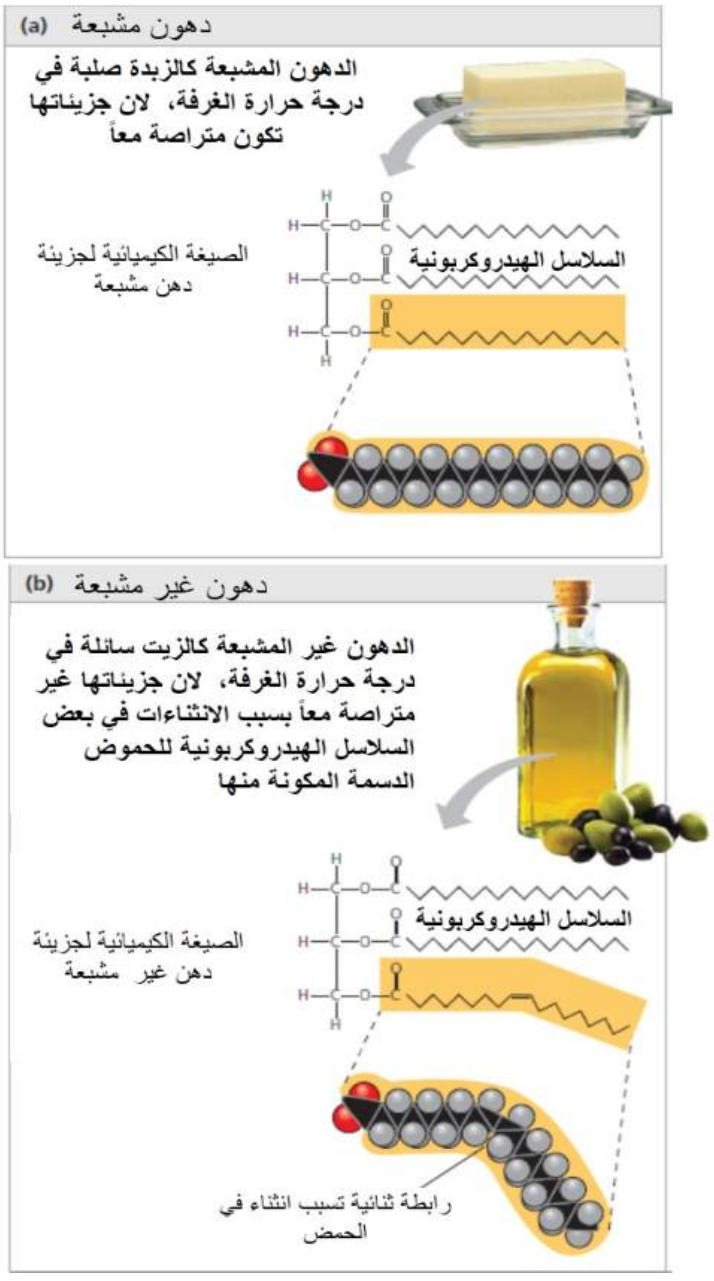
الشكل (2-9) : أنماط الحموض الدسمة. تكون الأحماض الدسمة المشبعة ذات بنية خطية، في حين يؤدي وجود الرابطة الثنائية بين ذرتي كربون C = C في المنطقة الهيدروكربونية من الحمض الدسم غير المشبع إلى انحناء واضح في البنية الفراغية.

2.2 الغليسيريدات الثلاثيّة (Triglycerides): تتألف الغليسيريدات الثلاثيّة (الشحوم الثلاثيّة) من ارتباط الغليسرول مع ثلاثة جزيئات من الحموض الدسمة بواسطة روابط استيرية (الشكل2-10). تتجلى الوظيفة الرئيسية لهذه المركبات باختزان الطاقة، فهي تشكل الأجزاء الادخارية الغنية بالطاقة في الخلية، وتظهر في سيتوبلاسما الخلية على شكل قُطيرات دسمة كروية الشكل بأقطار تصل حتى 200 نانومتر(انظر الملحق). تشكل الغليسيريدات الثلاثيّة الشحوم أو الدهون الموجودة في الجسم، وتدعى الشحوم المؤلفة من الحموض الدسمة المشبعة، بالدهون المشبعة، كالشحوم الحيوانيّة مثل الزبدة

والدهن الحيواني، والتي تكون صلبة في درجة حرارة الغرفة، بالمقابل فإنّ الدهون المؤلفة من الحموض الدسمة غير المشبعة تدعى بالزيوت كالزيوت النباتيّة، وتكون سائلة في درجة حرارة الغرفة (الشكل 2-11). يشكل النظام الغذائي الغني بالدهون المشبعة أحد الأسباب الرئيسة للإصابة بأمراض القلب والأوعية الدموية لاسيما تصلب الشرايين، حيث تترسب هذه الدهون على جدران الأوعية الدموية وتعيق مرونتها وجريان الدم فيها. تخزن معظم الثدييات ومنها الإنسان، الشحوم والدهون في النسيج الشحمي ضمن الخلايا الشحمية أو الدهنية حيث تشكل المصدر الأساسي لاختزان الطاقة، وتؤمن الطبقة الدهنية المتوضعة تحت الجلد، خاصة عند معظم الثدييات البحرية كالحيتان، عزل الجسم حرارياً وحمايته من برودة مياه المحيطات.



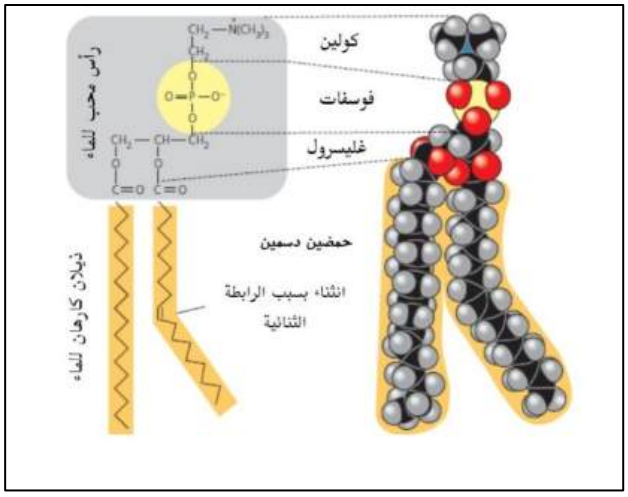
الشكل(2-10): تركيب الغليسريدات الثلاثية : تتكون الشحوم الثلاثية من ارتباط ثلاثة حموض دسمة مع جزيئة غليسرول بواسطة روابط استيرية. تشكل الشحوم الثلاثية المصدر الرئيس للطاقة، حيث تكوّن مخزون الدهون الموجودة في الجسم.



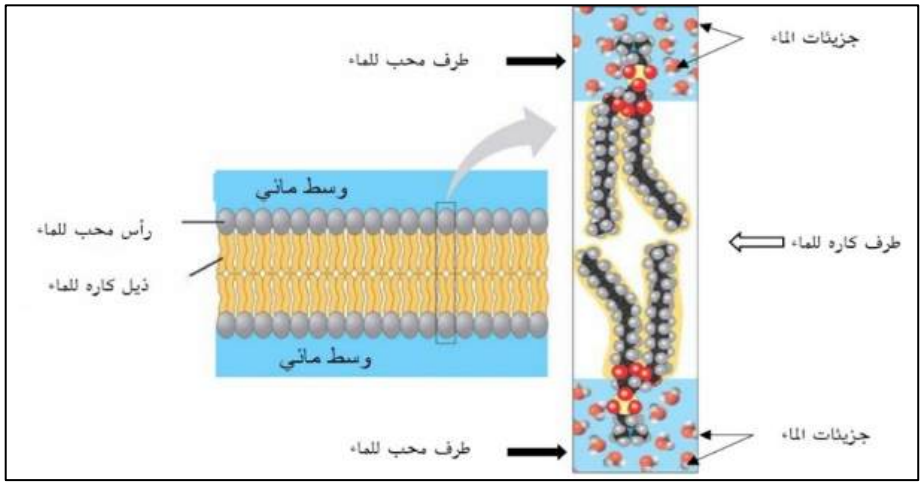
الشكل (2-11) : الدهون والأحماض الدهنية المشبعة وغير المشبعة

3.2 الليبيدات الفوسفوريّة (Phospholipids): تشبه الليبيدات الفوسفورية الغليسيريدات الثلاثيّة، لكنها تحوي على حمضين دسمين عوضاً عن ثلاثة يكونا مرتبطين مع الغليسيرول. وترتبط إلى الغليسيرول مجموعة فوسفاتية تحمل شحنة سالبة، قد ترتبط معها جزيئات صغيرة إضافية لتشكيل مجموعات متنوعة وواسعة من الليبيدات الفوسفورية. تُظهر الليبيدات الفوسفورية سلوكاً متناقضاً نحو الماء، حيث يشكل الجزء المؤلف من الحموض الدسمة الطرف الكاره للماء، في حين أنّ الجزء الحاوي على مجموعة الفوسفات والغليسرول يكون محباً للماء. وتُشبّه جزئية الليبيد الفوسفوري وكأنّ لها رأساً (الجزء الحاوي على مجموعة الفوسفات والغليسيرول) محباً للماء، وذيلان (الطرف المؤلف من الحمضين الدسمين) كارهان للماء (الشكل2-12). تنتظم الليبيدات الفوسفورية في الوسط المائي من تلقاء نفسها على شكل طبقة مضاعفة بحيث تتجه الأقسام المحبة للماء في كل منها نحو المحيط وتتجه أقطابها الكارهة للماء مبتُعَدُّة نحو الداخل. وبشكل عام، تشكل الليبيدات الفوسفورية المكوّن الأساسي لجميع الأغشية الخلوية، حيث تصطف بشكل طبقة مضاعفة، تكون فيها الرؤوس المحبة للماء على تماس مباشر مع الوسط المائي خارج الخلية وداخلها، بينما تكون الذيول الكارهة للماء متجهة باتجاه داخل الطبقة المضاعفة بعيداً عن الماء. (الشكل2-13) وبذلك يشكل الغشاء الخلوي عن طريق هذه الطبقة المضاعفة من الليبيدات الفوسفورية حاجزاً بين

الخلية والبيئة الخارجية المحيطة بها. تُعَدُّ بنية الغشاء الخلوي هذه أحد الأمثلة التي توضح تناسب الشكل مع الوظيفة.



الشكل(2-12):يوضح بنية جزيئة فوسفاتيديل الكولين كمثال عن بنية الليبيدات الفوسفورية. يرتبط الغليسيرول بسلسلتين من الحموض الدسمة بواسطة رابطة استيرية و.يشكل هذا الجزء الطرف الكاره للماء،و يرتبط إلى الغليسيرول مجموعة فوسفاتية مرتبطة بالكولين لتشكل جزيئة فوسفاتيديل الكولين ،يشكل هذا الجزء الطرف المحب للماء.



الشكل(2-13)رسم توضيحي يبين انتظام جزيئات الليبيد الفوسفوري في الوسط المائي. تصطف هذه الجزيئات في الوسط المائي من تلقاء نفسها على شكل طبقة مضاعفة تتألف كل جزيئة من رأس محب للماء يكون على تماس مباشر مع الماء، وذيلان مكونان من الحموض الدسمة الكارهة للماء بحيث تتوضع الذيول إلى الداخل بعيدة عن الماء.

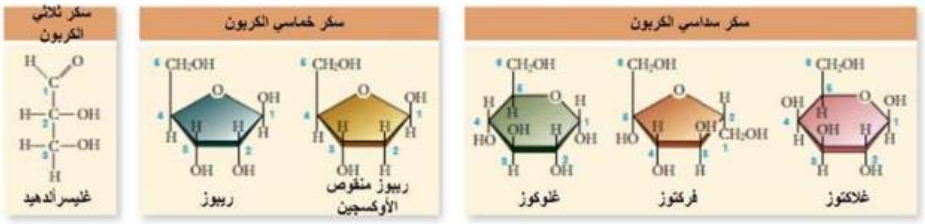
4.2 الليبيدات السكريّة (Glycolipids): تشبه الليبيدات السكريّة الليبيدات الفوسفورية، إلاّ أنها تشتمل على مجموعة سكريّة عوضاً عن المجموعة الفوسفاتية. تشكل هذه الليبيدات جزءاً أساسياً من أغشية بعض الأنماط الخلوية، مثل كريات الدم الحمراء حيث تتوضع بشكل كبير على السطح الخارجي للغشاء البلاسمي لها مكونة مواقع تعرّف بيولوجية يمكن تحديد الزمر الدموية من خلالها. وتحوي أغشية بعض أنواع الأحياء الدقيقة على هذه المركبات حيث تؤدي دوراً في حماية هذه الكائنات من مهاجمة الجهاز المناعي للمضيف.

5.2 الستيروئيدات (Steroids): تشكل الستيروئيدات مجموعة مميزة من الليبيدات حيث تحوي على أربع حلقات من الالكانات الحلقيّة (cycloalkane). تختلف الستيروئيدات عن بعضها بعضاً في عدد ومواقع الروابط المضاعفة و المجموعات الوظيفيّة فيها. يُعَدُّ الكوليسترول الستيروئيد الشائع في الخلايا الحيوانية، حيث يوجد بشكل رئيسي في الأغشية البلاسمية وأغشية العضيات الخلوية **ما عدا** الغشاء الداخلي للجسيمات الكوندرية، يُركب بدءاً منه جميع الهرمونات الستيروئيدية التي تشمل الهرمونات الجنسية الأنثوية كالاستراديول، والذكرية كالتستوستيرون، وكذلك هرمونات قشر الكظر كالكورتيزول الذي يساعد في تركيب الغلوكوز، ويخفف من ردود الأفعال الالتهابية، والفيتامين **D** الذي ينظم امتصاص الكالسيوم من المعي.

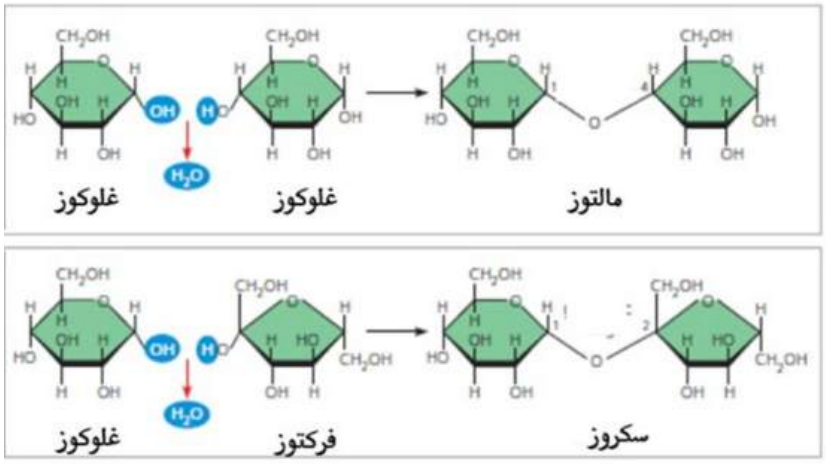
3. السكاكر أو الكربوهيدرات (Carbohydrates):

هي مجموعة ضخمة ومتنوعة من المركبات العضوية الموجودة في الجسم ، تؤدي وظائف حيوية أساسية ومهمة في الكائنات الحيّة. فبعضها يشكل **وحدات بنائية** مثل الكيتين (من السكاكر المُتعَددة) الذي يدخل في تركيب الهيكل الخارجي لبعض الحشرات كالبعوض و الصرصور مثلاً، و يُلاحظ الكيتين أيضاًعند بعض أنواع الفطريات التي تستخدمه في بناء جدارها الخلوي عوضاً عن السيللوز، و يشكل سكر الريبوز البنية الكيميائية المميزة في الحموض النووية (DNA,RNA) عند الكائنات الحيّة. تُحَوّل بعض السكاكر إلى بروتينات أو إلى شحوم للاستخدام في بناء المركبات المختلفة في الخلية وتزويد الجسم بالطاقة. وتُستخدم السكاكر أيضاً **كمدخرات غذائية** مثل الغليكوجين الذي يدخر في الكبد والعضلات الهيكليّة . وتُعَدُّ الوظيفة الرئيسة للسكاكر تزويد الجسم بالطاقة. تصنف السكاكر في ثلاث مجموعات رئيسة هي **السكاكر الأحادية** (monosaccharides) وهي أبسط أنواع السكاكر، مثل الغلوكوز و الفركتوز والريبوز (الشكل2-14). و **السكاكر الثنائية** (disaccharides) والتي تنشأ من اتحاد سكرين أحاديين مثل سكر المالتوز (سكر الشعير) واللاكتوز (سكر الحليب) وكذلك السكاروز (سكر القصب) (الشكل 2-15) .و **السكاكر المُتعَددة** (polysaccharides) وتتألف من

ثلاثة سكاكر أحادية أو أكثر مرتبطة مع بعضها بعضاً كالنشاء والغليكوجين(الشكل -16 2)



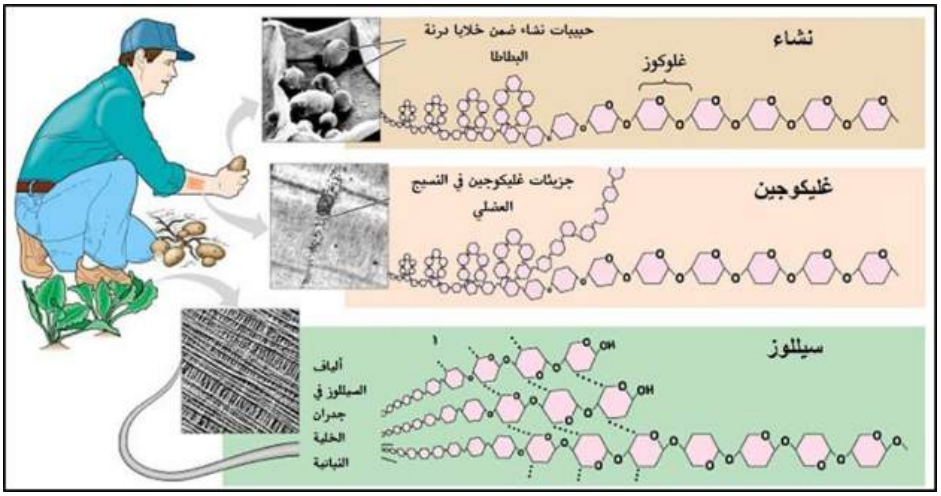
الشكل (2-14) : السكاكر الأحادية Monosaccharides . تدعى السكاكر الأحادية بالسكاكر البسيطة، وتتألف من ثلاث ذرات كربون على الأقل، و تستخدم بشكل عام كلبنات لتشكيل جزيئات أكبر. تستخدم السكاكر خماسية الكربون كمكونات في بناء الأحماض النووية.



الشكل (2-15) : السكاكر الثنائية. يوضح الشكل أمثلة عن تشكل بعض السكاكر الثنائية الشائعة كالمالتوز والسكروز

تُعَدُّ السكاكر الأحادية، لاسيما الغلوكوز المصدر الغذائي الأساسي للخلايا، حيث تقوم الخلايا من خلال عملية تدعى بالتنفس الخلوي باستخلاص الطاقة المخزنة في جزئيات

الغلوكوز والاستفادة منها في عملياتها الحيوية. وتقوم النباتات بتخزين النشاء وهو من السكاكر المُتعَددة ضمن بنى متخصصة تدعى البلاستيدات حيث يمكنها أن تفككه عند الحاجة، لتزويد الخلايا بالسكر. وتقوم خلايا الكبد باختزان الغليكوجين كمدخر عام للسكر في المتعضية.



الشكل (2-16): السكاكر المتعددة في النبات والانسان. تخزن الخلايا النباتية جزيئات السكر على هيئة نشاء، وتدخر الخلايا العضلية السكاكر بشكل غليكوجين أما جدران الخلايا النباتية فتبنى من ألياف السيللوز.

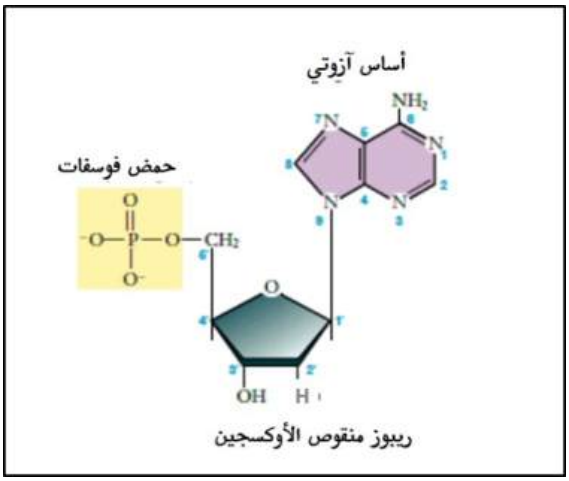
4. الأحماض النووية:

الأحماض النووية هي جزيئات بيولوجية مكونة من بوليميرات خطية من النكليوتيدات، تشكل الأسس الآزوتية جزءاً أساسياً من بنيتها، ويؤدي تسلسل وترتيب النكليوتيدات في

الحمض النووي الدور الرئيس في الترميز للمعلومات الوراثية حيث يكون هذا الترتيب بمثابة الحروف بالنسبة للجملة.

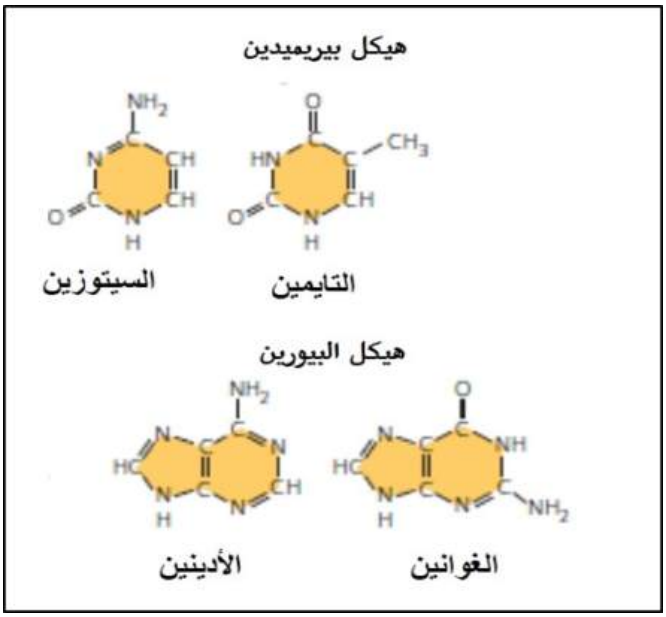
1.4 الحمض الريبي النووي منقوص الأوكسجين Deoxy Ribonucleic Acid (DNA)

يُعدُّ جزيء الـ DNA الحامل الوحيد للمعلومات الوراثية، حيث يشكل مستودع المعلومات الوراثية في الخلايا ويؤدي الدور الفعال في توجيه الحياة ضمن الخلية، وهو قادر على التضاعف بشكل ذاتي، و يؤمن بذلك انتقال المورثات من جيل لآخر. وهو الذي يسيطر على جميع العمليات الكيميائية الحيوية في العضوية. وبشكل عام، فإن الوحدة الأساسية في تركيب الـ DNA هي النكليوتيد منقوص الأوكسجين المكون من اجتماع سكر الريبوز المنقوص الأوكسجين و حمض الفوسفات وأساس آزوتي (الشكل2-17).



الشكل (2-17): بنية النكليوتيد منقوص الأوكسجين. يشكل النكليوتيد منقوص الأكسجين الوحدة البنائية الرئيسة في تركيب جزيء الـ DNA ويتكون من أساس آزوتي، حمض الفوسفات وسكر خماسي هو الريبوز منقوص الأكسجين إذ يرتبط بذرة الكربون الثانية '2 ذرة هيدروجين. ملاحظة: تُرَقم ذرات الكربون في السكر وتعطى الرمز ' لتمييزها عن ذرات الكربون الخاصة بالأساس الآزوتي.

هناك أربعة أنماط رئيسة من الأسس الآزوتية : اثنان مشتقان من هيكل البيورين "حلقة بنزن مع هيكل أميد أزول خماسي الحلقة" هما الأدينين (A) والغوانين (G),واثنان مشتقان من هيكل البيريميدين "مشتق من حلقة بنزن" هما التايمين (T) والسيتوزين (C) (الشكل2-18)



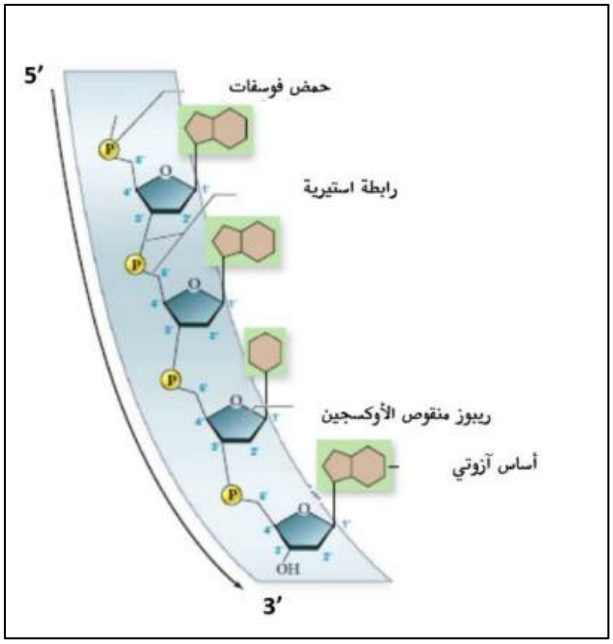
الشكل (2-18): البنية الكيميائية للأسس الآزوتية الأربعة في جزيء الـ DNA

1.1.4 بنية الـحمض الريبي النووي منقوص الأكسجين، الـ DNA

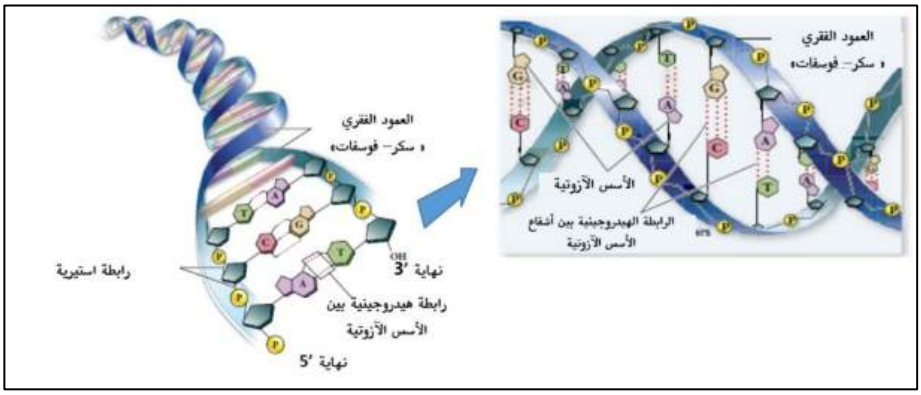
البنية الأوليّة: تتمثل البنية الأولية لجزيء الـ DNA بارتباط النكليوتيدات منقوصة الأوكسجين مع بعضها البعض بروابط استيرية لتشكل بنية خطية، حيث ترتبط بفعل مجموعة الفوسفات التي تربط بشكل دائم بين ذرتي الكربون '5 و'3 لنكليوتيدين متجاورين وترتبط الأسس الآزوتية بالريبوز منقوص الأوكسجين في الموقع '1. يمثل تتالي سكر الريبوز منقوص الأوكسجين والفوسفات العمود الفقري لجزيء الـ DNA. وتتميز البنية الخطية لجزيء الـ DNA بقطبية محددة حيث تنتهي إحدى النهايتين بـ'5 والثانية '3

(الشكل 2-19)

البنية الثانويّة: تتمثل البنية الثانوية لجزيء الـ DNA بارتباط سلسلتين من الـ DNA بواسطة الرابطة الهيدروجينية، حيث اقترح العالمان واطسون وكريك البنية الحلزونية المضاعفة لجزيء الـ DNA عام 1953 التي يكون فيها العمود الفقري للجزيء واقعاً إلى الخارج والأسس الآزوتية تقع في الداخل وتتمم السلسلتان بعضها بعضاً وترتبط الأسس المتقابلة بروابط هيدروجينية حيث يرتبط الأدنين مع التايمين برابطتين هيدروجينيتين بينما يرتبط السيتوزين مع الغوانين بثلاث روابط هيدروجينية وفق مبدأ التتامية (الشكل2-20).

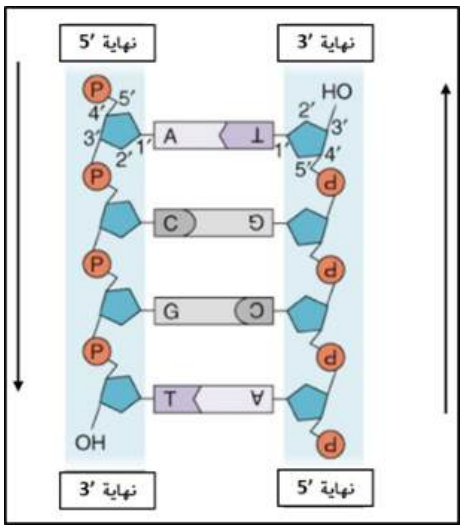


الشكل(2-19): البينة الأولية لجزيء الـ DNA

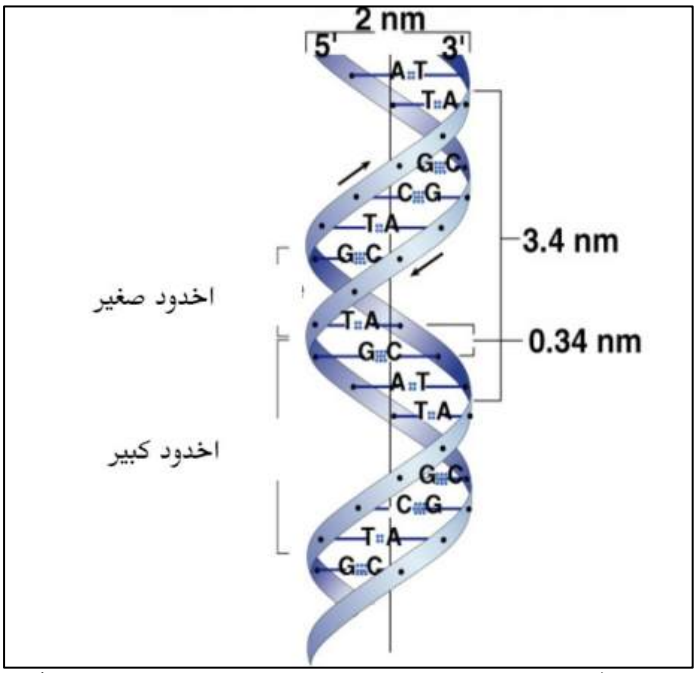


الشكل (2-20): يوضح البنية الثانوية لجزيء الـ DNA. لمزيد من الشرح يرجع إلى النص

استخدم واطسون وكريك المعطيات الفيزيائية والكيميائية وكذلك صور انعراج الأشعة السينية (X) في اقتراح بنية الـDNA. و وفقاً لهذا النموذج فإنه يعاكس اتجاه جزيئات السكر في السلسلة الواحدة اتجاهه في السلسلة المتممة، وتكون قراءة ارتباط السكر إلى الفوسفات في السلسلة الأولى 3' ← 5' بينما تكون القراءة في السلسلة المتممة 5' ← 3' وهكذا فإن السلسلتين تمتدان باتجاهين متعاكسين وهذا سبب تضاديّة التوازي أو التوازي المعاكس (antiparallel) والقطبية التي يختص بها جزيء الـ DNA (الشكل2-21). تلتف السلسلتان كل حول الأخرى في التفاف حلزوني يميني حول محور واحد ويؤدي نمط الالتفاف إلى تشكل نمطين من الأخاديد كبيرة (major groove) وأخرى صغيرة (minor groove) (الشكل2-22).



الشكل (2-21): التوازي المعاكس في جزيء الـ DNA

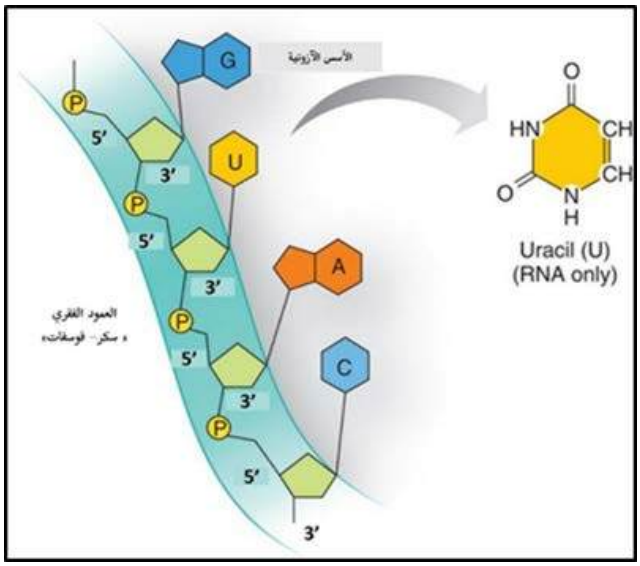


الشكل(2-22): يبين بنية جزيء الـ DNA. تلتف سلسلتي الـ DNA كل حول الأخرى في التفاف حلزوني يميني حول محور واحد. تكون المسافة بين زوجين من الأسس 0.34 nm وتتسع اللفة الواحدة لـعشرة أسس قطر اللفة 3.4 nm يؤدي نمط الالتفاف إلى تشكل نمطين من الأخاديد كبيرة وأخرى صغيرة. تمتد سلسلتي جزيء الـ DNA باتجاهين متعاكسين وهو مايدعى بالتوازي المعاكس والقطبية التي يختص بها جزيء الـ DNA. تشكل جزيئات (سكر - فوسفات) العمود الفقري للجزيء ويقع إلى الخارج بينما تتوضع الأسس داخل الجزيء.ترتبط الأسس الآزوتية وفق مبدأ التتامية بواسطة الروابط الهيدروجينية

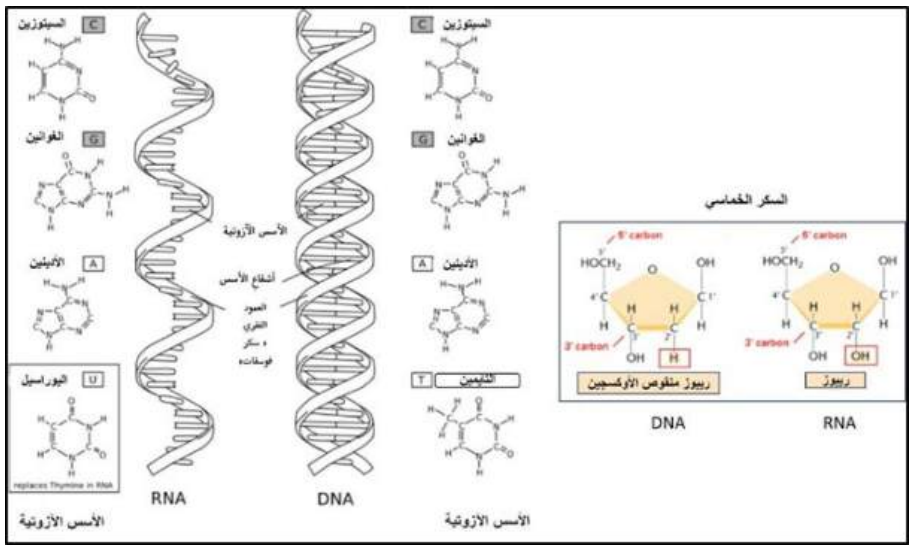
لجزيء الـ DNA بنية صلبة حيث تعمل الروابط الهيدروجينية بين الأسس على دعم صلابته بالإضافة إلى ربط السلسلتين معاً، كما تؤدي قوة التطابق بين الأسس إلى تدعيم هذه الصلابة ، أما الرابطة الايستيرية فهي تزيد من تثبيت الربط بين السلسلتين المتقابلتين المتكاملتين.

2.4 الحمض الريبي النووي Ribonucleic Acid (RNA)

يوجد الـ RNA في معظم الكائنات كسلسلة مفردة خطية، وهو جزيء متعدد النكليوتيد مع عمود فقري مكون من تتالي جزيئات سكر الريبوز والفوسفات.حيث ترتبط مجموعة الفوسفات مع ذرة الكربون '5 من سكر الريبوز للنكليوتيد الأول ومع ذرة الكربون '3 من سكر الريبوز من النكليوتيد المجاور (الشكل 2-23). إنّ الاختلاف الرئيس بين جزيء الـ DNA والـ RNA هو في جزيئة السكر حيث يكون في الـ RNA عبارة عن سكر الريبوز في حين يكون في الـ DNA ريبوز منقوص الأوكسجين حيث تغيب زمرة OH من الكربون رقم 2 ،كما أن الأسس الأزوتية في جزيء الـ DNA تكون الأدينين ،التايمين، الغوانين والسيتوزين أما في الـ RNA فهناك اليوراسيل عوض عن التايمين الذي يختلف عنه بوجود زمرة ميتل (الشكل2-24).



الشكل(2-23): البنية الكيميائية لجزيء الـ RNA



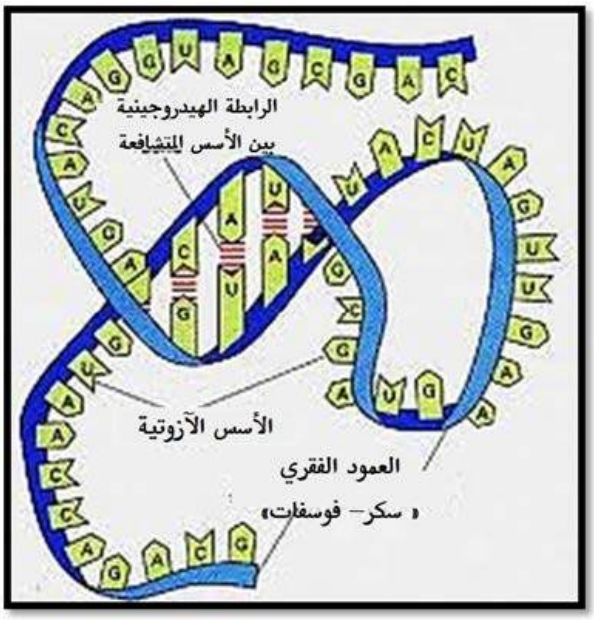
الشكل (2-24): الفروق الرئيسة بين الحمضين الريبيين النوويين DNAوRNA

1.2.4الأنماط الرئسية للحمض الريبي النووي الـ RNA:

للحمض الريبي النووي أنماط عديدة نذكر منها:

1) الـ **RNA كمادة وراثية** : تتميز أنواع معينة من الفيروسات بكون مادتها الوراثية هي **RNA** ، مثل فيروس التهاب الكبد C وفيروس الأيدز HIV . ويمكن أن تكون سلسلة الـ RNA بشكل أحادي (ssRNA) أو بشكل مزدوج السلسلة (dsRNA).

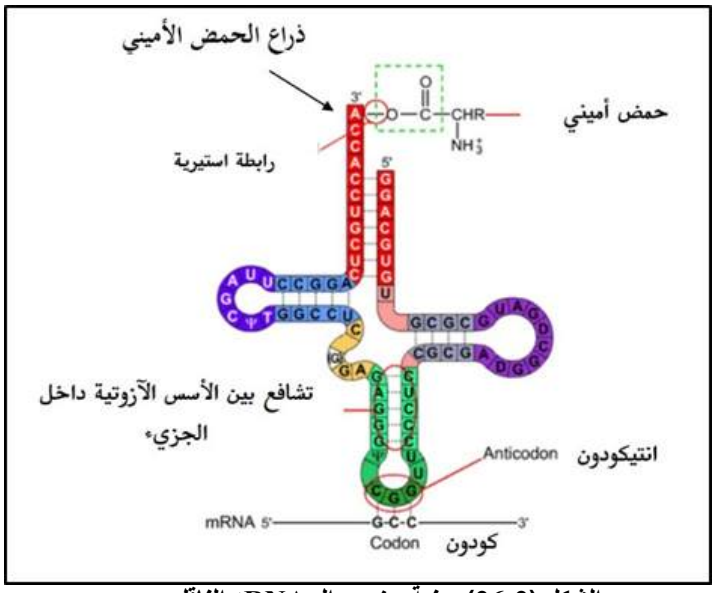
2) الـ **RNA المرسال** (Messenger RNA ,mRNA): يقوم بنقل الشيفرة الوراثية اللازمة لتركيب البروتين من النواة إلى الجسيمات الريبية، مواقع تركيب البروتين في السيتوبلاسما. إنّ الـ RNA المرسال عبارة عن جزيء أحادي السلسلة تتألف أسسه من A,G,C,U يمكن أن ينثني خارج الجسيمات الريبية وتتشافع أسسه المتقابلة مشكلةً بنية ثانوية تشبه عرى دبوس الشعر (الشكل 2-25) يشكل هذا النمط من الـ RNA 5 % أو أقل من الكمية الإجمالية للـ RNA الموجودة في الخلية، ويُعدّ هذا الجزيء غير مستقر أو غير ثابت استقلابياً. وتتمثل الوظيفة الرئيسة للـ RNA المرسال بحمل الشيفرة الوراثية من النواة إلى السيتوبلاسما ، حيث تتم ترجمتها إلى تتالٍ معين من الحموض الأمينية عند تركيب البروتين.



الشكل (2-25): بنية جزيء الـRNA المرسال

3) الـ **RNA الناقل (Transfer RNA, tRNA)**: يشكل قرابة 15% من كمية الـ RNA في الخلايا، يتألف من سلسلة أحادية واحدة، وهو أصغر حجماً من الـ RNA المرسال. له بنية تشبه ورقة البرسيم تشتمل على عرى ومناطق حلزونية مزدوجة ترتبط بالرابطة الهيدروجينية (الشكل 2-26). يملك الحمض الريبي الناقل مواقع وظيفية مهمة أبرزها: موقع للتعرف والارتباط بحمض أميني محدد واحد، ويدعى بذراع الحمض الأميني ينتهي بالنهاية '3 في التتالي C-C-A-OH الخطي المفرد و يرتبط الحمض

الأميني به تحت تأثير الأنزيمات المناسبة. أما الموقع الثاني فهو خاص بالتعرف والارتباط مع الكودون الموجود على الـ m-RNA ويدعى بالأنتيكودون (anticodon). يمارس هذا النمط من الـ RNA دوره في أثناء عملية الترجمة، حيث يُعَدُّ عامل نقل واصطفاء للحموض الأمنية فهو يقوم بقراءة الكودون (الرمز) على جزيئة الـ mRNA ويحمل الأحماض الأمينية الموافقة والتي ستدرج في البروتين المتشكل.



الشكل (2-26): بنية جزيء الـ tRNA الناقل

4) الـ **RNA الريبوزومي (Ribosomal RNA, rRNA)**: يشكل قرابة 80% من كمية الـ RNA الموجودة في الخلية، يرتبط الـ r-RNA مع بروتينات معينة لتشكيل الجسيمات الريبية وهي الموقع الذي يتم عليه تركيب البروتين. للـ r-RNA أدواراً مهمة

في الخلية حيث يشكل جزءاً رئيساً من بنية الجسيمات الريبية، كما يؤدي دوراً تحفيزياً من خلال تشكيل الرابطة الببتيدية بين الأحماض الأمينية.

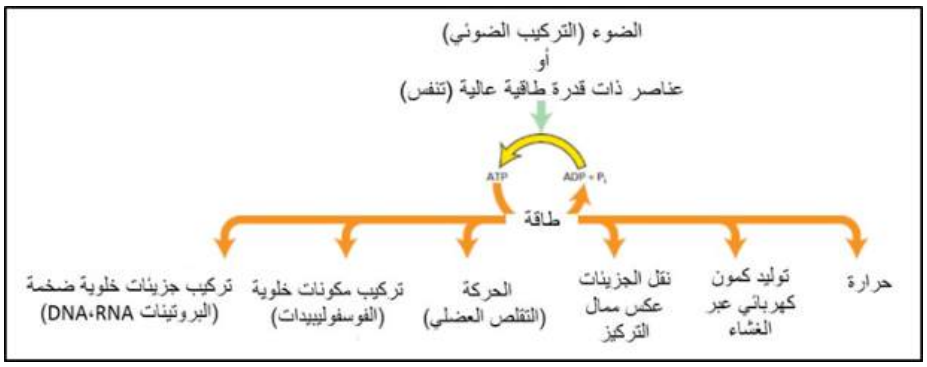
5) **مجموعة من الـ RNAs** تؤدي أدواراً منظمة للتعبير الجيني كالانتساخ والترجمة، مثل الـ miRNAs و siRNAs.

للنكليوتيدات أدواراً أخرى مهمة، فضلاً عن كونها تُعَدُّ أحجار أساس لبناء الأحماض النووية. إذ توجد نكليوتيدات تؤدي أدواراً رئيسة في الخلية نذكر منها:

1. الأدينوزين ثلاثي الفوسفات ATP (adenosine triphosphate): والذي يُعَدُّ مفتاح الطاقة في التفاعلات الكيميائية الحيوية في الخلية (الشكل 2-27) .

2. الغوانوزين ثلاثي الفوسفات GTP (guanosine triphosphate) : يُعدُّ بمثابة مصدر للطاقة، وخاصة في أثناء عملية تركيب البروتين، .كما يؤدي دوراً مهماً في النقل من أنسجة الجسم المختلفة وإليها.

3. الأدينوزين أحادي الفوسفات الحلقي (cyclic adenosine monophosphate, cAMP) : نمط مميز من النكليوتيدات يؤدي دوراً رئيساً في العديد من السُبل الحيوية في الخلية، كعمل الهرمونات و نقل الإشارة من خلال الجهاز العصبي.



الشكل(2-27): مخطط يوضح أهمية نكليوتيد الـ ATP كمصدر لتأمين الطاقة في الخلية. يتركب الـ ATP في النبات من الأدينوزين أحادي الفوسفات و جزيئة فوسفات الاعضوية P_i من خلال عملية التركيب الضوئي، وفي معظم الأنماط الخلوية عبر حرق الدهون والسكريات. ويتم الاستفادة من الطاقة المتحررة من تحطيم الـ ATP في العديد من العمليات الخلوية.

الفصل الثالث
مقدمة في الخلية وخصائصها

- لمحة عن المجاهر وأنواعها
- أنماط الخلايا في العالم الحيّ
- البنية الخلوية العامة للخلايا طلائعيات النوى
- نمط حياة الكائنات طلائعيات النوى وأشكالها
- التكاثر لدى طلائعيات النوى

تمهيد:

يُعَدُّ علم الخلية من أهم فروع علم الحياة إذ يهتم بدراسة بنية ووظيفة الخلية وجميع خصائصها الكيميائية والحيوية. وتنبع أهمية الخلية من كونها تشكل الوحدة البنائية والوظيفية الرئيسة لأيّ كائنٍ حيّ. وتقسم الكائنات الحيّة حسب عدد الخلايا المكونة لأجسامها إلى مجموعتين:

المجموعة الأولى: كائنات وحيدة الخلية تتركب أجسامها من خلية واحدة فقط (كالبرامسيوم والمتحولات)، إذ تقوم هذه الخلية بمفردها بجميع وظائف الحياة المعروفة من نمو واستقلاب وتنفس وتكاثر وامتصاص وإفراز.

المجموعة الثانية: كائنات كثيرات الخلايا، تتركب أجسامها من عدد كبير من الخلايا، تنشأ جميعها من خلية واحدة، هي البيضة الملقحة التي تنقسم انقسامات عديدة لتعطي ملايين الخلايا. تصطف هذه الخلايا بطرق متناسقة وخاصة، مع بعضها بعضاً لتشكل أنسجة الجسم المختلفة. كما تتمايز بحيث تقوم كل خلية من هذه الخلايا بوظيفة معينة وخاصة بها.

إنَّ التقدم العلمي يؤدي في كثير من الأحيان إلى اختراع أدوات تساعد الإنسان على فهم الأشياء من حوله ودراستها. فالخلية مثلاً، صغيرة جداً ولا يمكن رؤيتها أو

دراستها ومعرفة آليّة عملها بالعين المجردة. لذا فقد تزامنت أولى معرفتنا للخلية ودراستها مع اختراع المجهر.

ويعود الفضل الرئيسي في اكتشاف مبدأ عمل المجهر إلى صانع النظارات الهولندي زاكريس جانسن (Zaccharias Janssen) عام 1590. وفي منتصف القرن السابع عشر صنع العالم الإنجليزي روبرت هوك (Robert Hooke)، مجهراً مركباً يحتوي على أكثر من عدسة و قام بفحص أشياء عديدة بهذا المجهر مثل الجمادات والحيوانات، و النباتات، ومن الأشياء التي فحصها هوك أيضاً بمجهره البسيط، الفلين وهو أول من استعمل كلمة "خلايا" ليصف الثقوب الدقيقة التي رآها في الفلين وقد كان هوك ينظر إلى جدران الخلايا في نسيج ميت، لذا فهو بالتأكيد لم ير الخلايا كما نعرفها اليوم، و تعد ملاحظات هوك مهمة جداً في حينها، فقد أعطت المعلومات الأولية التي أفضت إلى وضع نظرية الخلية فيما بعد.وفي العام 1833 لاحظ عالم النبات الاسكتلندي روبرت براون (Robert Brown) النواة لأول مرة باستخدامه المجاهر الضوئية المركبة وذلك في سياق الفحوصات المجهرية التي كان يقوم بها على أوراق الأوركيد. وفي العام 1838 وضّح العالم شلايدن (Matthias Schleiden) وهو عالم متخصص في علم النبات، و العالم شوان (Theodor Schwann) في العام1839 أن الخلايا هي الوحدات الأساسية المكونة للنباتات والحيوانات على حد سواء.

تم تأكيد النتيجة التي توصل إليّها هذان العالمان من خلال سلسلة من الدراسات والتفسيرات اللاحقة والتي قادت في النهاية إلى وضع ما يسمى بالنظرية الخلوية.

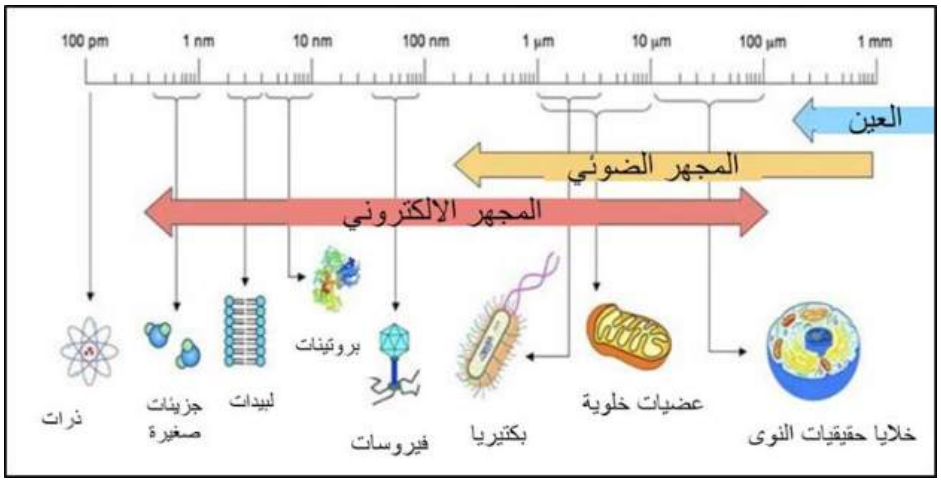
وقبل الانتقال إلى التعرف على الخلية ودراستها بشكل مفصّل، من المناسب دراسة أهم وأكثر أنواع المجاهر استخداماً في دراسة الخلايا مع أبرز الفروقات بينها.

أولاً: المجهر The microscope:

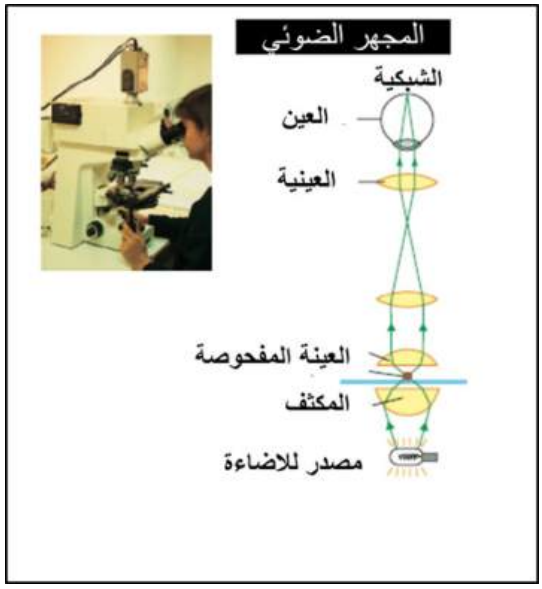
يُعَدُّ مؤسس علم البصريات، الحسن بن الهيثم، أول من استخدم المجهر البسيط والمؤلف من عدسة واحدة فقط، في فحص الأشياء الصغيرة. وكما ذكرنا آنفاً، فإنه يرجع اختراع المجهر إلى صانع النظارات الهولندي زاكريس جانسن عام 1590، وفي العام 1674 بنى العالم فان لوي فانهوك (van Leeuwenhoek) مجهراً بسيطاً مع عدسة واحدة فقط، فَحَص من خلاله خلايا الدم، والخميرة، والحشرات والعديد من الأشياء الصغيرة الأخرى. ومع مرور السنين و تقدم العلوم المختلفة تم صناعة مجموعة واسعة من المجاهر المتقدمة التي خدمت العلماء في كثير من المجالات. وتعد المجاهر بكافة أنواعها و اختلافاتها، أداة لا يمكن الاستغناء عنها في دراسة الخلايا، ويمكن تعريف المجهر بأنّه أداة لعرض الأشياء الصغيرة جداً والتي لا يمكن رؤيتها بسهولة بالعين المجردة. وبشكل عام، هناك نمطان رئيسيان من المجاهر، تختلف فيما بينها من حيث التركيب والقدرة

على التكبير والمصدر المستخدم في الإضاءة، هما **المجهر الضوئي (light microscope)** و **المجهر الإلكتروني (Electron Microscope)**. يوضح (الشكل 3-1) الحجوم المختلفة التي يمكن تمييزها بواسطة العين المجردة بالمقارنة مع المجهر الضوئي والمجهر الإلكتروني.

1- **المجهر الضوئي** : أوسع أنماط المجاهر انتشاراً واستخداماً. يعتمد الضوء المرئي كمصدر رئيس للإضاءة، وتتراوح قوة تكبيره مابين 40 إلى 1000 مرة. لا يمكن للمجهر الضوئي أن يُظهر تفاصيلاً أدق من 200 نانومتر حيث يمكننا ضمن هذا المجال من التكبير رؤية الشكل العام للخلية وتمييز بعض العضيات الخلوية الكبيرة الحجم فيها، كالنواة والجسيمات الكوندرية و في مراحل معينة من الانقسام الخلوي يمكن رؤية الصبغيات. يوضح (الشكل 3-2) مسار الأشعة الضوئية عبر المجهر الضوئي والتي تسمح لنا برؤية الأشياء من خلاله.



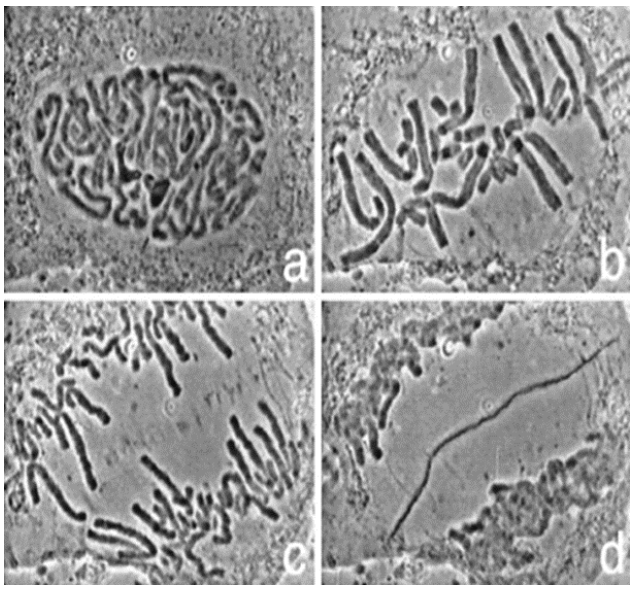
الشكل(3-1): حجوم ومقاسات بعض الأشياء الممكن تمييزها بواسطة العين المجردة و كل من المجهر الضوئي والمجهر الالكتروني. يمكن للعين المجردة تمييز الأشياء حتى حجم 1 مل تقريباً في حين أن المجهر الضوئي يمكنه تكبير الأشياء التي لا يتجاوز حجمها 100 نانومتر،أما المجهر الالكتروني فيمكنه إظهار الأشياء التي تصل حجومها حتى أقل من 1 نانومتر. (انظر الملحق)



الشكل (3-2) يوضح مسار الأشعة الضوئية في المجهر الضوئي

أُدخلت تحسينات كبيرة على المجهر الضوئي العادي لتحسين الرؤية والوضوح ليصبح لدينا مجموعة واسعة من أنواع المجاهر الضوئية والتي تستخدم لأغراض متنوعة ومن أهم هذه المجاهر:

1.1 **مجهر الأطوار المتباينة (Phase Contrast):** الذي يُستخدم بشكل خاص لدراسة الخلايا الحيّة غير الملونّة، ودراسة الأحياء الدقيقة وتتبع حركة العضيات الخلوية ضمن الخلية، وكذلك المستنبتات الخلوية للتحري عن الجراثيم. يعمل هذا المجهر على أساس أنّ الأجزاء المختلفة لشيء ما، لها معاملات انكسار مختلفة للضوء فالأجزاء المختلفة للخلية تتباين في قابليتها لعكس الضوء الساقط عليها، لذا فإن الموجات الضوئية تمر خلال بعض الأجزاء بسهولة أكثر من الأجزاء الأخرى (الشكل 3-3).



الشكل (3-3) سلسلة من الصور الحيّة المأخوذة باستخدام مجهر الأطوار المتباينة، حيث توضح الصور من a وحتى d مراحل الانقسام الخلوي وحركة الصبغيات ضمن الخلية.

2.1 مجهر الفلورّة (Fluorescent Microscope): يُعَدُّ نموذجاً خاصاً من المجاهر الضوئية، إذ يستخدم الأشعة فوق البنفسجية كمصدر للإضاءة. يعتمد هذا المجهر على استخدام ملونات متفلورة معينة، كالفلوريسين،الذي يصدر فلورة بلون أخضر والرودامين، الذي يصدر فلورة بلون أحمر، يمكن لتلك الملونات الارتباط بمواقع معينة من العينة المدروسة،.ولدى إثارة هذه الملونات بواسطة الأشعة فوق البنفسجية تمتص الإشعاع وتصدر ضوءاً مرئياً لامعاً وعند فحص العينة من خلال مرشحات زجاجية خاصة نشاهد تلك الجزيئات متوهجة في خلفية مظلمة.يستخدم هذا المجهر بشكل خاص في الدراسات المناعية وتحديد التوضع النوعي للمركبات الخلوية خاصة البروتينات وفي دراسة الصبغيات والتشخيص النوعي لبعض الأمراض الوراثية.

على الرغم من وجود أنماطٍ متطورة ومختلفة للمجهر الضوئي *لا مجال لشرحها هنا*،إلاّ أنه تبقى هناك كثير من البنى والعضيات الصغيرة جداً التي يعجز المجهر الضوئي بأنواعه عن كشفها لذلك فإنّ أهم اختراع ظهر في مجال دراسة الخلية و أحدث ثورة كبرى في علم الخلية هو اختراع المجهر الإلكتروني (Electron Microscope) من قبل المهندس الألماني إرنست روسكا (Ernst Ruska) عام 1931 حيث قام هذا المجهر بتوضيح تراكيب الخلية التي لم تكن معروفة من قبل، و معرفة تفاصيل أدق للتراكيب الخلوية وعضياتها.

2- **المجهر الإلكتروني:** يستخدم الإلكترونات كمصدر للإضاءة .تعد المجاهر الإلكترونية أقوى بكثير من المجاهر الضوئية. وتتراوح قوة تكبيرها بين $2x\ 10^5$ و 6x 10^5 هذا يعني أن القوة الإيضاحية للمجهر الإلكتروني تفوق القوة الإيضاحية للمجهر الضوئي بعشرة آلاف مرة، و يمكن بواسطته رؤية أشد عضيات الخلية صغراً ومعظم أنواع الفيروسات ويمكن لبعض المجاهر الإلكترونية أن تظهر الجزيئات الكيميائية الضخمة في الخلية.

من أهم أنواع المجاهر الإلكترونية :

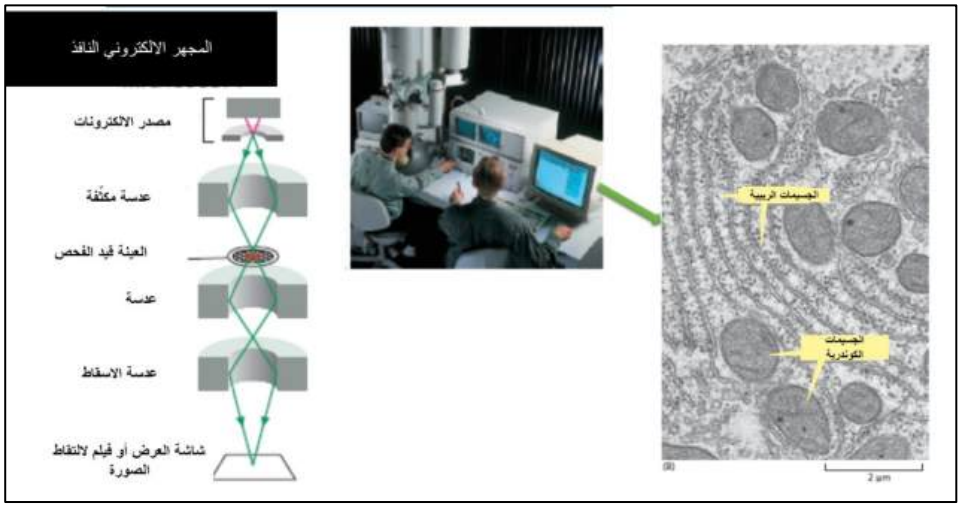
1.2 المجهر الإلكتروني النافذ (Transmission electron microscope) :

يستخدم لدراسة التفاصيل الدقيقة في بنية الخلية وتركيبها وكافة العضيات الموجودة ضمنها. إذ يتم الاستفادة من الإلكترونات النافذة عبر العينة المفحوصة لرسم صورة مكبرة لها. يُكَبر المجهر الإلكتروني النافذ الأشياء حتى 200000 مرة. ويتطلب استخدام هذا المجهر أن تكون المقاطع الخلوية رقيقة جداً بحيث تتراوح ثخانتها بين 0.01-0.2 مكرومتر وذلك حتى تتمكن الإلكترونات من اختراقها. من سلبيات هذا المجهر، عدم إمكانية استخدامه لمشاهدة العينات الحية (الشكل3-4).

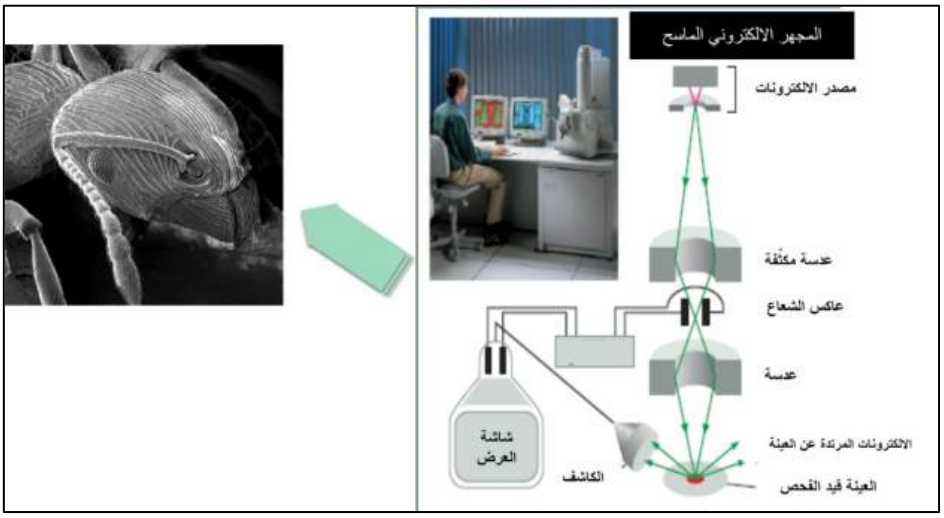
2.2 المجهر الإلكتروني الماسح (Scanning electron microscope) :

يُستخدم لدراسة التفاصيل الدقيقة لسطح الخلايا وعضياتها، حيث يستغل الإلكترونات المرتدة **لا** النافذة والمبعثرة بنتيجة اصطدامها بالعينة، فتتكون الصورة النهائية تبعاً لعدد

الإلكترونات المحررة من كل نقطة على سطح العينة، و تنشأ بذلك صورة محاكية تماماً للعينة و مطابقة لها.لقد ساعد المجهر الإلكتروني الماسح على اكتشاف أبعاد جديدة لتفاصيل الكائنات الحيّة الدقيقة و التراكيب المتناهية في الصغر.لا يُشترط أن تكون العينات رقيقة بل من الممكن فحص عينات كاملة كحشرة أو جزء منها. تستطيع المجاهر الإلكترونية الماسحة تكبير الأشياء حتى 100000 مرة، لكن كما هي الحال بالنسبة للمجهر الإلكتروني النافذ لا يمكن استخدامها لمشاهدة العينات وهي حيّة (الشكل 3-5).



الشكل(3-4): يوضح مسار الأشعة الالكترونية في المجهر الالكتروني النافذ ونموذجاً عنه، كما يبيّن صورة لجزء من السيتوبلاسما في الخلية تُظهر تفاصيل دقيقة لبعض العضيات الصغيرة الموجودة فيها



الشكل (3-5): يوضح مسار الأشعة الالكترونية في المجهر الالكتروني الماسح ونموذجاً عنه كما يبيّن صورة ملتقطة لنملة بواسطته إذ تظهر التفاصيل الدقيقة لرأس تلك النملة بوضوح.

من خلال العرض السابق عن تطور المجاهر المختلفة، ندرك أنّ التقدم في دراسة الخلية و أجزائها ارتبط بالتقدم والتحسينات التي طرأت على هذه المجاهر، فضلاً عما شهده بداية القرن العشرين من تقدم كبير في عملية صبغ وتلوين الخلايا، و عمل مقاطع رقيقة جداً في أنسجة الكائنات الحيّة.

ثانياً: أنماط الخلايا في العالم الحيّ:

يمكننا أن نميّز في عالمنا الحيّ نمطين رئيسين من الخلايا استناداً إلى بنيتها وتعضيها الخلوي العام، فالخلية إما أن تكون حقيقية النواة (Eukaryote)، أو أن تكون

من طلائعيات النوى (Prokaryotes).وكما ذكرنا سابقاً فإن حقل البكتيريا أو الجراثيم وحقل البدائيات (Archaea) يتكون حصراً من طلائعيات النوى، أما الأوليات (protista) و الفطريات (Fungi) و الحيوانات وكذلك النباتات جميعها تُعَدُّ من الكائنات حقيقيات النوى.

1. أوجه التشابه والاختلاف الرئيسة بين الخلايا طلائعيات وحقيقيات النوى:

تشترك كافة الأشكال الخلوية بخصائص مشتركة رئيسية وهي:

1) وجود غشاء خلوي يفصل داخل الخلية عن خارجها، يدعى بالغشاء السيتوبلاسمي، يحصر هذا الغشاء ضمنه مادة شبه سائلة تدعى العصارة الخلوية (Cytosol)، حيث تتوضع ضمنها جميع العضيات الخلوية.

2) وجود المادة الوراثية بأحد شكليها، الـ DNA أو الـ RNA .

3) وجود الأجسام الريبية (Ribosomes) وهي عضيات صغيرة تُعدُّ القالب الذي يتم عليه تركيب البروتينات.

4) تنقسم جميع الخلايا الحيّة لإنتاج خلايا جديدة.

إلاّ أنه هناك فرق جوهري بين الخلايا طلائعيات النوى والخلايا حقيقيات النوى يظهر من التسمية ذاتها، والتي تشير إلى أنّ الاختلاف يكمن في النواة نفسها، ففي طلائعيات

النوى تتركز المادة الوراثية في منطقة تدعى بالنكليوئيد (Nucleoid)، أو الحيّز النووي حيث لا وجود لغشاء يفصل هذه المنطقة عن بقية أجزاء الخلية، وتكون المادة الوراثية في هذا النمط من الخلايا عبارة عن صبغي حلقي، وقد تمتلك بعض الأنواع .DNA حلقي صغير آخر يسمى البلاسميد. في المقابل فإنّ الخلية حقيقة النواة تمتلك نواة تتوضع بداخلها الصبغيات والتي يكون فيها الـ DNA بشكل خيطي ، وتكون محاطة بغشاء نووي يغلّفها ويفصلها عن أجزاء الخلية الأخرى. كما أنّ جميع أشكال العضيات الوظيفية والمتخصصة المنتشرة ضمن العصارة الخلوية في الكائنات حقيقية النوى تكون محاطة بغشاء فاصل في حين أننا لا نلحظ مثل هذه العضيات المتخصصة في الكائنات طلائعية النوى. لذا تُعَدُّ الخلايا طلائعية النوى أقل تعقيداً من الخلايا حقيقية النواة من الناحية الهيكلية والكيميائيّة، فالخلايا حقيقية النواة لديها أعلى درجة من التنظيم بفضل وجود العديد من العضيات ذات أغشية تفصلها عن غيرها من مكونات السيتوبلاسما، في حين أن الخلايا طلائعية النوى لا تحتوي على مثل هذه العضيات.

وعلى الرغم من أن عملية التضاعف والنسخ والترجمة للـ DNA هي متماثلة في الأساس بين الخلايا حقيقية النوى وطلائعيات النوى إلاّ أنه هناك بعض الفروق فعلى سبيل المثال، إنّ الجسيمات الريبية تكون أصغر في الخلايا طلائعيات النوى منها في حقيقيات النوى وتختلف في محتواها من البروتينات والـrRNA .وتُعَدُّ هذه الفروق كبيرة بشكلٍ كافٍ

لتسمح لبعض أنواع المضادات الحيوية كالتتراسكلين بأن ترتبط إلى الجسيمات الريبية وتمنع تركيب البروتين في الخلايا طلائعية النوى في حين أنه لا يمكن لهذه المضادات الحيوية بأن ترتبط بتلك الأجسام في الخلايا حقيقية النوى وبالنتيجة فإننا نتناول مثل هذه المضادات الحيوية للقضاء على الجراثيم الممرضة والضارة لنا من دون أن تسبب تلك المضادات الحيوية الأذى لخلايانا.

كما أنّ الخلايا حقيقة النوى أكبر حجماً من الخلايا طلائعية النوى حيث يُعَدُّ الحجم أحد الجوانب العامة لبنية الخلية والذي يتعلق بطبيعة عملها فعلى سبيل المثال، يتراوح قطر معظم أنواع الجراثيم بين 1-10µm، في حين يتراوح قطر الخلايا حقيقية النوى بين 10- 100µm. وبشكل عام، فإنّ الكائنات طلائعية النوى غالباً ما تكون وحيدة الخلية (unicellular) مثل الإِشْرِيكِيَّةُ القولونِيَّة (*Escherichia coli*). في حين أنه غالباً ما تكون الكائنات حقيقية النوى متعددة الخلايا (multicellular) كما أنّ الخلايا حقيقية النوى تنقسم انقساماً خيطياً أو منصفاً في حين أنّ أغلب الخلايا طلائعية النوى تنقسم بواسطة الانشطار الثنائي(binary fission). ويكون نمط تكاثر الكائنات حقيقية النوى من خلال التكاثر الجنسي أو التكاثر اللاجنسي، في حين أن معظم الكائنات طلائعية النوى تتكاثر عن طريق التكاثر اللاجنسي.

والآن وبعد أن استعرضنا أبرز نقاط التشابه والاختلاف بين الخلايا حقيقيات وطلائعيات النوى ، لنبحث في مكونات الخلية طلائعية النواة بشيء من التفصيل.

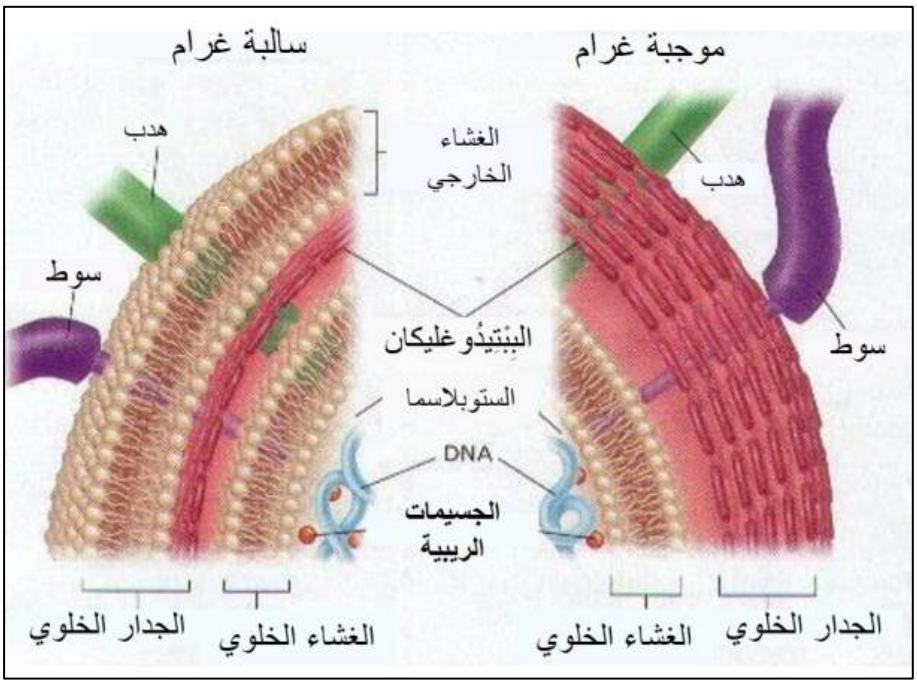
2. البنيّة الخلوية العامة للخلايا طلائعيات النوى:

❖ **الجدار الخلوي:(Cell wall)** يُعَدُّ الجدار الخلوي أحد أهم الخصائص المميزة لمعظم الخلايا طلائعيات النوى، حيث يحافظ على شكل الخلية ويؤمن لها الحماية. تتألف معظم الجدر الخلوية للجراثيم من معقد بروتيني سكري هو البِبْتِيدُوغليكان (peptidoglycan) صنف العلماء العديد من أنواع الجراثيم حسب الاختلاف في بنية وتركيب جدرانها الخلوية، باستخدام تقانة التلوين بغرام (نسبة إلى العالم الدنماركي غرام) ووضعوها ضمن مجموعتين هما: **الجراثيم موجبة الغرام**؛ تكون فيها الجدر الخلوية سميكة، بسيطة التركيب والبنية وتتألف من كميات كبيرة نسبياً من البِبْتِيدُوغليكان. تأخذ لوناً قرمزياً (بنفسجي) لدى تلوينها بملون غرام. **الجراثيم سالبة الغرام**؛ تكون فيها الجدر الخلوية رقيقة، لكنّها ذات بنية أكثر تعقيداً من الجراثيم موجبة الغرام حيث يتألف الجدار الخلوي من غشاء خارجي يتألف من طبقة شحميّة متعددة السكاريد (Lipopolysaccharide) وطبقة رقيقة داخلية من البِبْتِيدُوغليكان. تأخذ هذه الجراثيم لوناً ورديا لدى تلوينها بملون غرام (الشكل 3-6).

يُعَدُّ التلوين بملون غرام أداة تشخيصية هامة حيث تُعَدُّ الجراثيم سالبة غرام بشكل عام أكثر إمراضية من غيرها من أنواع الجراثيم المعروفة، وغالباً ما تكون المسبب لظهور كثيرٍ من الأمراض، فالطبقة الشحميّة السكرية الخارجية التي تميّز جدر الجراثيم سالبة الغرام تُعَدُّ سامة، وتساعد في حماية الجراثيم من المقاومة التي يبديها الجسم لها، تتميز هذه الجراثيم بأنها أكثر مقاومة للمضادات الحيوية من الجراثيم موجبة الغرام، حيث يعرقل غشاءها الخارجي دخول تلك العقاقير. إنّ فعاليّة بعض أنواع المضادات الحيوية كالبنسلين، تنشأ من تثبيطها لعملية ارتباط المعقدات البروتينية السكرية (البِبْتِيدُوغليكان) المكونة للجدر الخلويّة، خصوصاً عند الجراثيم موجبة الغرام، مما يمنع من تشكل تلك الجدر الخلوية. يتكون الجدار الخلوي للبدائيات (Archaea) عادة من معقد عديد السكاريد (polysaccharides) مع بروتينات خاصة ،وليس من البِبْتِيدُوغليكان المشاهد عند الجراثيم.

يُغلف الجدار الخلوي عند العديد من الكائنات طلائعيات النوى **محفظة خارجية (capsule)** وهي عبارة عن طبقة هلامية متعددة السكاريد تسمح لطلائعيات النوى بالالتصاق ببعضها بعضاً ضمن المستعمرة، و تحميها من المقاومة التي يبديها الجهاز المناعي للمضيف. تشاهد في الغالب عند الجراثيم موجبة الغرام. تتميز بعض أنماط الكائنات طلائعية النوى بوجود زوائد تشبه الأشعار تدعى **بالأهداب، أو الأشعار** عادة ما

تكون لها وظيفة الالتصاق لسطح الركيزة أو مع بعضها بعضاً أو أن تؤدي دوراً في عملية الاقتران (conjugation)، كما سيرد معنا لاحقاً.



الشكل (3-6): مقارنة بنيّة الجدار الخلوي لدى الجراثيم موجبة وسالبة غرام.

❖ الغشاء السيتوبلاسمي (Plasma membrane)

يتكون بشكل عام من ليبيدات فوسفورية وبروتينات ويشبه في تركيبه تركيب الغشاء الخلوي في حقيقيات النوى. نميّز في خلايا بعض طلائعيات النوى أغشية متخصصة

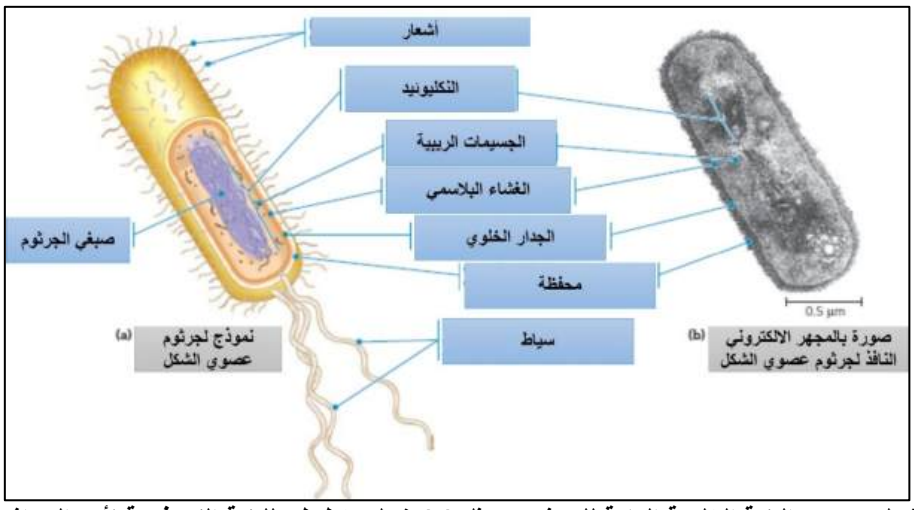
تمثل انثناءات من الغشاء السيتوبلاسمي، تقوم بوظائف استقلابية معينة حيث ترتبط إليها البروتينات اللازمة للقيام بعملية التنفس الخلوي والتركيب الضوئي.

❖ **السيتوبلاسما(Cytoplasm)**

تشكل المادة السائلة الداخلية في الخلية وتحوي الأنزيمات الضرورية اللازمة للقيام بجميع العمليات الاستقلابية.

❖ **منطقة النكليوئيد** (nucleoid region)

وهي منطقة من السيتوبلاسما، تحوي المادة الوراثية، أو جينوم الخلية طلائعية النوى، تبدو فاتحة اللون عند دراستها بواسطة المجهر الإلكتروني مقارنة بالسيتوبلاسما المحيطة بها. يختلف جينوم طلائعيات النوى كثيراً عن نظيره عند الكائنات حقيقيات النوى، إذ يكون الجينوم لدى طلائعيات النوى عبارة عن صبغي حلقي مؤلف من DNA عارٍ يرتبط إليه عدد قليل نسبياً من البروتينات، على عكس صبغيات الخلايا حقيقيات النوى، التي تكون متوضعة ضمن النواة و يحيط بها الغشاء النووي. تمتلك الكائنات طلائعية النوى النموذجية إضافةً للصبغي الحلقي حلقات صغيرة أيضاً من الـDNA تدعى بالبلاسميدات Plasmids. إنّ البلاسميدات غير ضرورية لحياة الجرثوم وتكاثره، وهي تتضاعف بشكل مستقل عن تضاعف الصبغي الحلقي، إلاّ أنها تمنح الجرثوم صفات إضافية مثل مقاومة المضادات الحيوية. وللبلاسميدات على العموم أهمية تطبيقية كبيرة بسبب امتلاكها مورثات مهمة، وتستعمل كنواقل في مجال الهندسة الوراثية (الشكل 3-7) .



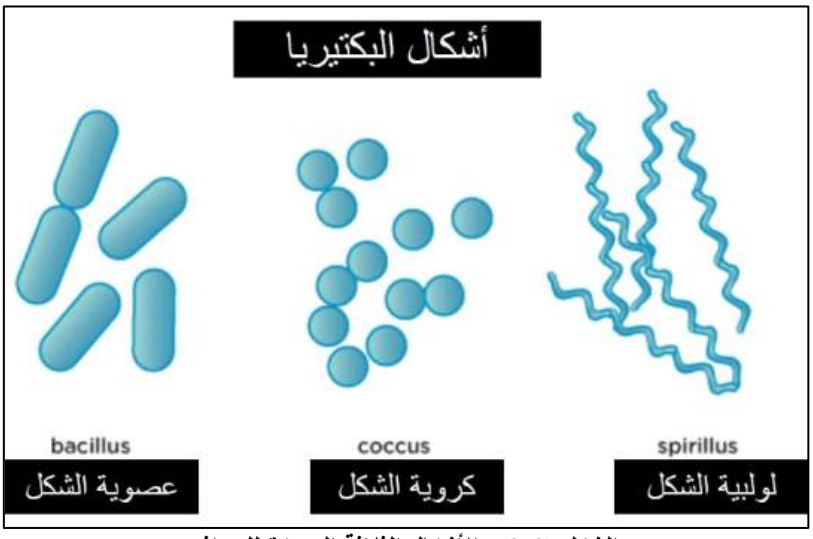
الشكل (3-7): البنية الخلوية العامة للجرثوم: يمثل (a) شكل تخطيطي للبنية النموذجية لأحد الجراثيم عصوية الشكل ويمثل (b) صورة حقيقة مأخوذة عن المجهر الالكتروني النافذ تظهر التفاصيل الخلوية الدقيقة للجرثوم .

بعد أن استعرضنا التركيب الخلوي للكائنات طلائعيات النوى من المناسب أن نأخذ لمحة موجزة عن نمط حياة هذه الكائنات وأنماطها الغذائية الرئيسة وطريقة تكاثرها.

3. نمط حياة الكائنات طلائعيات النوى وأشكالها:

تُعَدُّ طلائعيات النوى أصغر وأبسط الكائنات الحيّة. وتوجد بغزارة في الهواء والماء والتربة. وتوصف غالباً، بأنها وحيدة الخلية (unicellular) كالإِشْرِيكِيَّةُ القولونِيَّة (*Escherichia coli*)(نوع من أنواع الجراثيم التي تعيش في أمعاء الثدييات)، إلاّ أنه يمكن لطلائعيات النوى أن تعيش ضمن مستعمرات(colonies) على مستوى عال من التعقيد أيضاً.

يستخدم العلماء شكل الخلية كمعيار لتصنيفها، حيث يمكن أن نميّز ثلاثة أشكال رئيسة: فقد تكون الخلايا **كروية الشكل (spherical)** كالمكورات (coccus) التي تظهر إما بشكل مفرد أو كأزواج (diplococci) أو تبدو كسلاسل متعددة الخلايا مثل المكورات العقدية (streptococci)، أو بشكل عناقيد مثل العنقوديات (staphylococci).أو يمكن أن تكون الخلايا **عصويّة الشكل (rod-shaped)** كالعصيّات (bacillus)، والتي تظهر غالباً بشكل منفرد، إلاّ أن بعض الأنواع تتجمع في سلاسل مثل العصيات الشمعية (streptobacilli) أو أن تكون الخلايا **بشكل لولبي (spiral)**. كالحُلَيزِنَة (spirillum) (الشكل 3-8)



الشكل (3-8): الأشكال الثلاثة المميزة للجراثيم

يمكن تصنيف الكائنات الحيّة وفق نمط تغذيتها، و كيفية حصولها على الطاقة، و كذلك مصدر الحصول على الكربون المستخدم في بناء الجزيئات العضوية المكونة لخلاياها. وبشكل عام، فإنّنا نجد تنوعاً غذائياً كبيراً بين الكائنات طلائعيات النوى لا نظير له عند الكائنات حقيقيات النوى. فبالإضافة إلى وجود كل أنماط التغذية الملاحظة عند الكائنات حقيقية النوى فإن الكائنات طلائعية النوى تتميز بأنماط غذائية فريدة وخاصة بها.

ويمكن بالتالي تصنيف الكائنات حسب نمط تغذيتها ضمن أربع مجموعات رئيسة وهي:

- **الكائنات ذاتية التغذية الضوئية Photoautotrophs** : تقوم بعملية التركيب الضوئي وتحول الطاقة الضوئية إلى طاقة كيميائية تُستخدم في اصطناع الجزئيات العضوية. من الأمثلة الشائعة لهذا النمط من الكائنات البكتيريا الزرقاء cyanobacteria.
- **الكائنات ذاتية التغذية الكيميائية Chemoautotroph:** تقوم بأكسدة المواد غير العضوية، مثل كبريتيد الهيدروجين (H_2S) والنشادر (NH_3) أو شوارد الحديدي (Fe^{+2}). للحصول على الطاقة اللازمة لاصطناع جزئياتها العضوية. ويُعدّ هذا النمط من التغذية خاصاً ومميزاً لبعض أنواع طلائعيات النوى مثل sulfolobus، وهو جنس ينتمى إلى حقل البدائياتArchaea .
- **الكائنات غيريّة التغذية الضوئية Photoheterotrophs:** وهي كائنات تستخدم الضوء للحصول على الطاقة لكن لا تستطيع استخدام غاز ثنائي أكسيد الكربون كمصدر

وحيد للكربون، لذا فإنّها تستخدم المركبات العضوية من البيئة لتلبية متطلباتها من الكربون. حيث تستخدم مركبات مثل الكربوهيدرات والأحماض الدسمة والكحول كمصدر لغذاءها العضوي. يُعَدُّ الـ heliobacteria أحد نماذج هذه الكائنات.

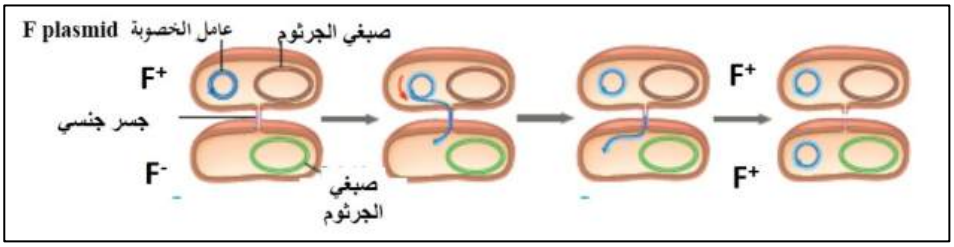
- **الكائنات غيريّة التغذية الكيميائية Chemoheterotroph:** تقوم بأكسدة الجزيئات العضوية للحصول على الطاقة.إنّ هذا النمط من التغذية شائع بشكل كبير بين الكائنات طلائعية النوى مثل الإشريكِيَّة القولونيَّة (*Escherichia coli*).

4. التكاثر لدى طلائعيات النوى:

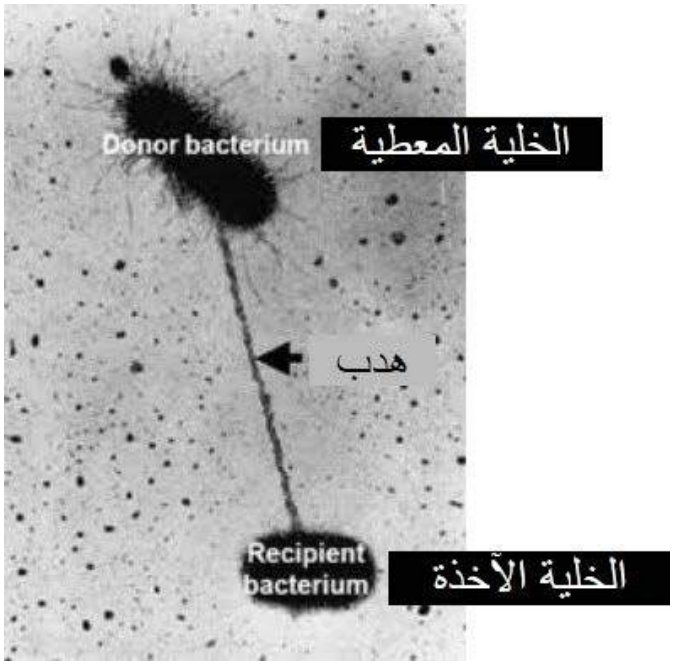
تتكاثر طلائعيات النوى **لا جنسياً بواسطة الانشطار الثنائي (binary fission)**، ويُعرّف الانشطار الثنائي بأنه شكل من أشكال التكاثر اللاجنسي والانقسام الخلوي. ففي الظروف البيئية المناسبة تنقسم الخلية الأم طلائعية النواة لتعطي خليتين بنتين متماثلتين ومشابهتين للخلية الأم. تنقسم هاتان الخليتان بعدها لإعطاء 4 خلايا ثم 8 ثم 16 و هكذا.

لا تتكاثر الكائنات طلائعيات النوى جنسيّاً كما في الكائنات حقيقيات النوى، لكنها تقوم بمجموعة من العمليات التي تهدف إلى تبادل المعلومات الوراثية وإعادة التركيب الوراثي. وأهم هذه العمليات هي: **الاقتران (Conjugation)** وتُعرّف هذه العملية بأنها اتحاد مؤقت بين كائنين اثنين من الجراثيم بهدف تبادل المعلومات الوراثيّة. و تعتمد آليّة

هذه العملية على اقتراب خليتين من بعضهما بعضاً، حيث يتشكل بينهما ما يدعى بالجسر الجنسي الذي يستخدم لعبور ونقل أجزاء من المادة الوراثية (الـDNA) من إحدى الخليتين والتي تسمى بالخلية المعطية إلى الخلية الثانية والتي تدعى بالخلية المستقبلة أو الآخذة ،حيث يكون النقل بطريق واحدة فقط (انظر الشكلين 3-9 و 3-10).



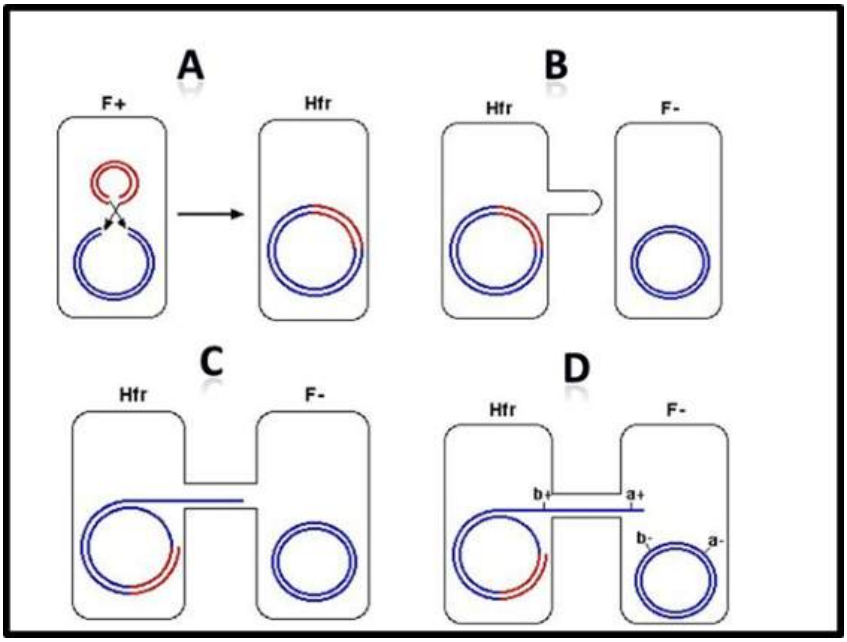
الشكل (3-9) :يوضح عملية الاقتران بين خليتين من الجراثيم. إنّ وجود عامل الخصوبة F plasmid يمنح الجرثوم المقدرة على القيام بعملية الاقتران وتدعى الخلية التي تملك هذا العامل بالخلية F^+ أما الخلية التي لا تملك مثل هذا العامل فتدعى بالخلية F^- . ينمو اعتبارا من الخلية F^+ جسر يتشكل من الأهداب أو الأشعار الموجودة على الجدار الخلوي يتضاعف العامل F وينتقل عبر الجسر إلى الخلية F^- التي تصبح عندها خلية معطية F^+.



الشكل (3-10) : صورة بالمجهر الإلكتروني تبين عملية الاقتران بين خليتين من الجراثيم .تدعى الخلية الأولى بالخلية المعطية والتي يتشكل منها الجسر الجنسي اعتباراً من الأهداب المحيطة بجدارها الخلوي، وتدعى الخلية الثانية بالخلية الآخذة التي ينتقل إليها جزء من المادة الوراثية

يرتبط في بعض الأحيان عامل الخصوبة F plasmid بالصبغي الجرثومي الحلقي وتدعى الخلية عندها بالخلية ذات الضم الجديد عالي التواتر

Hfr (high frequency of recombination). تحل المورثات المنقولة محل مثيلاتها في الخلية المستقبلة بفضل بعض الأنزيمات الموجودة. وقد استفاد العلماء من هذه العملية لوضع الخرائط الوراثية لسلالات مختلفة من الجراثيم، ولمعرفة أماكن توضع مورثاتها. يوضح (الشكل 3-11) انتقال الخلية F^+ إلى الحالة Hfr وكيفية حدوث عملية الاقتران.



الشكل (3-11) :شكل تخطيطي يوضح عملية الاقتران بين خليتين من الجراثيم ،حيث A: كيفية الانتقال من الحالة F^+إلى الحالة Hfr حيث يكون العامل F في الخلية F^+ بشكل حلقي ويتضاعف بشكل منفصل عن تضاعف الصبغي الجرثومي الحلقي أيضاً،يدخل هذا العامل ضمن DNA الخلية الجرثومية بسبب وجود مناطق تقابل بينهما ولدى اتحادهما معاً تدعى الخليةعندها بالخلية ذات الضم الجديد عالي التواتر.Hfr (high frequency of recombination)

B. : يوضح بداية عملية الاقتران بين الخلية Hfr والخلية F^- وهي الخلية الآخذة مع بداية تشكل الجسر الجنسي.C وD : عملية الاقتران و عبور جزء من المادة الوراثيّة إلى الخلية F^- ، حيث تسبق عملية العبور تضاعف للـDNA ثم حدوث قطع في منطقة من الـDNA الحلقي وتحوله إلى بنية خطية تعبر إلى الخلية F^- وتحل المورثات المنقولة محل مثيلاتها في الخلية المستقبلة بفضل بعض الأنزيمات الموجودة في الخلية.

الفصل الرابع

التركيب البنائي للخلية

- فصل المكونات الخلوية وعضياتها
- البنية الخلوية العامة للخلايا حقيقية النوى
- العضيات الخلوية الرئيسة
- ملحقات خلوية

تمهيد:

رأينا في الفصل السابق كيف أنّ العلماء استخدموا المجهر كأداة لدراسة الخلية و قد أفادت التحسينات التي أُدخلت على المجاهر بأنواعها وخاصة ما هو متعلق بمعايير ودقة وجودة التكبير و التباين، في دراسة و فهم البنية الخلوية بشكل أفضل ودقيق. وابتداءً من هذا الفصل سنقوم بالشرح عن البنى الخلوية من حيث التركيب وربط البنية الخلوية بالوظيفة المنوطة بها. ولكن كيف تمكن العلماء من دراسة تلك البنى الخلوية والتعرف على تركيبها الكيميائي والجزيئي وبالتالي وظائفها ؟ الجواب من خلال عملية الفصل (التجزئة) الخلوي cell fractionation.

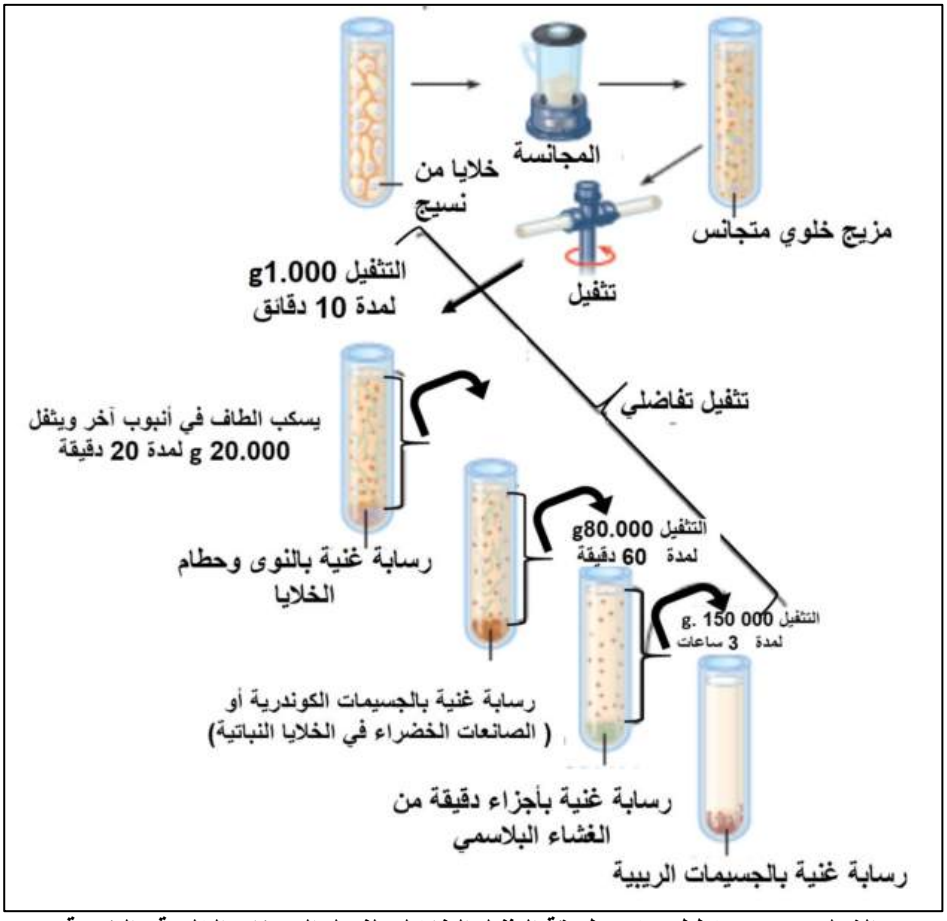
أولاً: فصل المكونات الخلوية وعضياتها:

تُعَدُّ عملية الفصل الخلوي أداة فعالة في دراسة البنى الخلوية ووظائفها، إذ تعتمد على تحطيم الخلايا وإبعادها عن بعضها بعضاً، ومن ثمَّ فصل عضياتها الرئيسة ومكوناتها الخلوية اعتماداً على حجمها وكثافتها. حيث يتم تعريض مزيج من الخلايا المحطمة للدوران وفق سرعات متزايدة باستخدام أجهزة طرد مركزية أو مثفلات centrifuges ، مما يؤدي إلى ترسيب مكوناتها الخلوية والبنيوية تبعاً لحجمها وكثافتها النوعية و استقرارها في قاع أنبوب التثفيل مُشَكِلةً ما يدعى بالرسابة pellet. ففي

السرعات العالية يُلاحظ في الرسابة المكونات والبنى الخلوية صغيرة الحجم أما المكونات الخلوية كبيرة الحجم فتظهر في الرسابة بعد التثفيل بسرعات منخفضة (الشكل 4-1).

سمحت هذه الطريقة للعلماء والباحثين بتحضير مكونات خلوية معينة بكميات كبيرة بُغية تحديد وظائفها. فعلى سبيل المثال: أظهرت التحاليل الكيميائية الحيوية لمكونات إحدى الرسابات الخلوية وجود أنزيمات تساهم في عملية التنفس الخلوي بالمقابل أظهرت الصور الملتقطة بواسطة المجهر الإلكتروني عدداً كبيراً من الجسيمات الكوندرية الأمر الذي ساعد علماء الأحياء في الإقرار بأن الجسيمات الكوندرية تعمل كمقرات للتنفس الخلوي.

بالتالي يمكن القول بأنّ علم الخلية cytology و الكيمياء الحيوية يكمل كل منهما الآخر في ربط البنية والتركيب مع الوظيفة.



الشكل (4-1): مخطط يوضح طريقة التثفيل التفاضلي لفصل المكونات الخلوية والبنيوية

بعد أن استعرضنا في الفصل السابق الخلايا طلائعيات النوى، بنيتها وتركيبها الخلوي و أنماط حياتها وتكاثرها سنتحول لدراسة الخلايا حقيقية النوى واستعراض مكوناتها البنيوية الأساسية ووظائفها.

ثانياً: البنية الخلوية العامة للخلايا حقيقيات النوى

يحيط بالخلية حقيقية النواة غشاء خلوي مؤلف من طبقة مضاعفة ليبيدية تتخللها أنماط متنوعة من البروتينات (كما سنرى في الفصل القادم). يُلاحظ داخل حدود الغشاء الخلوي مادة هلامية القوام تشكل جزءاً كبيراً من الخلية تحيط بالنواة تدعى **الستوبلاسما *Cytoplasm*** تشمل السيتوبلاسما العضيات الخلوية جميعها (عدا النواة)، **والعصارة الخلوية**؛ تتألف العصارة الخلوية من 70% ماء و30% أملاح معدنية منحلّة، فضلاً عن جزيئات عضوية كالأنزيمات والبروتينات، السكاكر والليبيدات إضافة إلى المدخرات الغذائية. تجري معظم التفاعلات الاستقلابية الوسيطية والكيميائية الحيوية ضمن العصارة الخلوية. كما تتوزع في جميع أرجاء سيتوبلاسما الخلية أيضاً شبكة من الأنيبيبات الدقيقة والخييطات الدقيقة والمتوسطة التي تشكل بمجملها ما يدعى **بالهيكل الخلوي Cytoskeleton** الذي يساهم في إعطاء الخلية الحيّة شكلها المميز، بيضوياً كان أو دائرياً أو مكعباً وفي ربط العضيات الخلوية الغشائية وحركتها.

ففي الأيام الأولى لاختراع المجهر الإلكتروني واستخدامه في دراسة الخلية ظنّ العلماء أن عضيات الخلية حقيقية النوى تسبح بحريّة ضمن السيتوبلاسما ولكن الدراسات والأبحاث اللاحقة، كشفت عن وجود شبكة من الألياف تمتد عبر السيتوبلاسما دعيت هذه الشبكة بالهيكل الخلوي الذي يؤدي دوراً مهماً في تنظيم بنية ونشاط الخلية.

يتألف الهيكل الخلوي بشكل عام من ثلاثة أنماط رئيسة من الألياف هي: الأنيبيبات الدقيقة (microtubules)، والخييطات الدقيقة (microfilaments)، والخييطات المتوسطة (intermediate filaments)، وهي جميعها خاصة بالخلايا حقيقية النوى.

يُعَدُّ الهيكل الخلوي كما يدل اسمه دعامة داخلية تعطي الخلية حقيقية النواة شكلها المميز إضافة إلى المستوى العال من التنظيم الداخلي ويساعد في ترسيخ شكل الخلية وصيانته كما يؤدي دوراً مهماً في حركتها وانقسامها. وتقوم الأنيبيبات والخييطات المكونة للهيكل الخلوي بوظائف متنوعة، كالتقلص في الخلايا العضلية وحركة الأهداب والسياط وحركة الصبغيات في أثناء انقسام الخلية، ويعمل الهيكل الخلوي إضافة إلى ذلك كدعامة لتوضع العضيات السيتوبلاسمية وحركتها الفعالة ضمن العصارة الخلوية وكذلك في الجسيمات الريبية والأنزيمات.

وسنستعرض الخصائص الرئيسة لمكونات الهيكل الخلوي الثلاث:

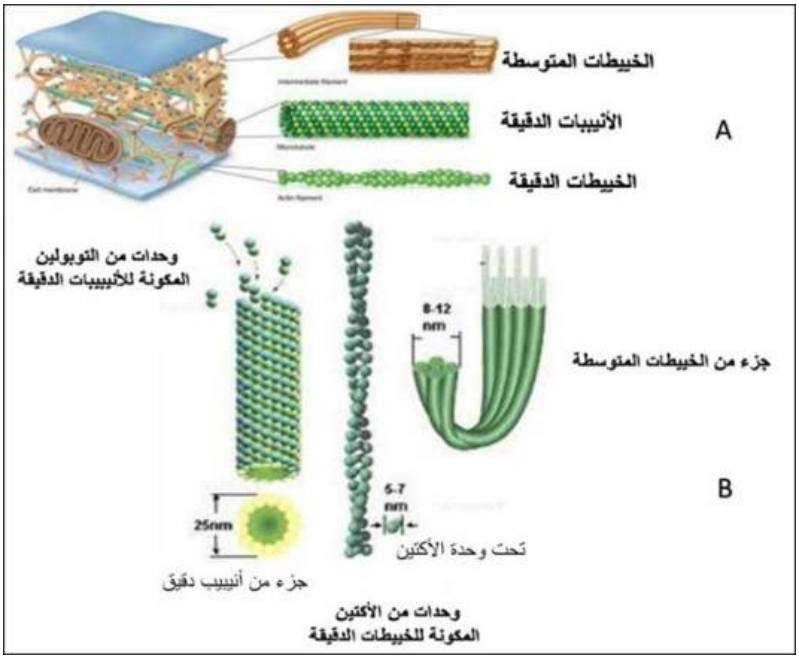
1-الأنيبيبات الدقيقة microtubules: تُعَدُّ من أكبر العناصر الخلوية الموجودة في الهيكل الخلوي وهي البنية الخلوية المكونة للخيط المحوري للأهداب والسياط. تشكل الأنيبيبات الدقيقة أيضاً الألياف المغزلية التي تفصل الصبغيات قبل بدء انقسام الخلية، لذا فهي تؤدي دوراً مهماً في حركة الصبغيات كما تسهم في إعطاء الخلية الشكل الإجمالي

والتوضع الفراغي لعضياتها المختلفة. تظهر الأنيبات الدقيقة على شكل أسطوانات مجوفة يكون فيها جدار الأنيبيب الدقيق مؤلفاً من خييطات أولية مكونة من جزيئات بروتين التوبولين.

2-الخييطات الدقيقة microfilaments: أقل ثخناً بكثير من الأنيبات الدقيقة مما يجعلها من أصغر مكونات الهيكل الخلوي تعرف بدورها في الليفات المتقلصة للخلايا العضلية وتشكل اتصالات مع الغشاء السيتوبلاسمي مؤثرة بذلك في الانتقال والحركة الأميبية والتيارات السيتوبلاسمية وتولد الأخدود الانقسامي (ثلم الانقسام cleavage furrow) الذي يقسم الخلايا الحيوانية بعد انفصال الصبغيات عبر مغزل الانقسام. تتألف الخييطات الدقيقة من متعدد بروتين الأكتين إذ يتألف الخييط الدقيق من سلسلة وحيدة من أحاديات جزيء الأكتين التي تتجمع لتشكل خييطاً بمظهر حلزوني.

3-الخييطات المتوسطةintermediate filaments : من أكثر مكونات الهيكل الخلوي ثباتاً، حيث تُعَدُّ حوامل تدعم كامل الهيكل الخلوي، ويعتقد بأن لها دوراً بالتوتر في بعض الخلايا لأنها غالباً ما تلاحظ في مناطق من الخلية خاضعة لضغط ميكانيكي. تختلف الخييطات الدقيقة في بنيتها من نسيج لآخر لذا فقد صنفت في ستة صفوف حيث يمكن أن يحتوي نمط خلوي معين على نوع أو نوعين من بروتينات هذه الخييطات المتوسطة. وبسبب النوعية النسيجية للخييطات المتوسطة يمكن تمييز الخلايا الحيوانية المأخوذة من

نسج مختلفة اعتماداً على طبيعة بروتينات الخييطات الموجودة فيها حيث يستخدم هذا التنميط كأداة تشخيصية في الطب (الشكل 4-2) .



الشكل (4-2): رسم تخطيطي يبين في A بنية الهيكل الخلوي وأجزاؤه الثلاثة المختلفة، كما يبين ارتباط العناصر الخلوية المختلفة بهذه الأجزاء أما في B فيوضح البنى المختلفة المكونة لكل جزء من أجزاء الهيكل الخلوي.ويبين الفروق بينها.

تمتاز الخلايا حقيقية النوى بوجود عضيات خلوية عديدة ومتنوعة ذات أغشية تفصلها عن غيرها من مكونات السيتوبلاسما، فجميع أشكال العضيات الوظيفية والمتخصصة المنتشرة ضمن العُصارة الخلوية في الكائنات حقيقية النوى تكون محاطة بغشاء فاصل. يسمح هذا الفصل بوجود بيئات مختلفة تدعم عمليات استقلابية محددة،

بالتالي من الممكن أن تحدث عمليات غير متوافقة في آنٍ معاً في خلية واحدة؛ فعلى سبيل المثال: تساهم أغشية العضيات الخلوية الموجودة في السيتوبلاسما مع الغشاء السيتوبلاسمي بشكل مباشر في العمليات الاستقلابية داخل الخلية وذلك لوجود أنزيمات متخصصة ضمن تلك الأغشية.

فما هي العضية الخلوية وما هي أبرز العضيات الخلوية الموجودة في الكائنات حقيقية النوى ؟

ثالثاً: العضيات الخلوية Organelles

هي الوحدات الوظيفية المفردة الملاحظة في الخلايا حقيقية النوى. بحيث تكون الوظائف المختلفة التي تقوم بها الخلية موزعة بين العضيات الخلوية المتخصصة وتجرى بشكل منفصل ضمن الخلية الواحدة. وتُعَدُّ العضيات الخلوية المسؤولة عن الحفاظ على حياة الخلية واستمراريتها.

سنستعرض بشكل سريع أهم العضيات الخلوية ووظائفها، لنتابع في الفصول القادمة الشرح عنها بشكل مفصل.

1) **الشبكة السيتوبلاسميّة الداخلية (Endoplasmic reticulum):** وهي شبكة من الكييسات الغشائية المسطحة والأنابيب الغشائية المستمرة إضافة إلى مجموعة من الحويصلات المقترنة بها ويمكن أن نميز منها نوعين خشنة وملساء.

2) **جهاز غولجي (Golgi apparatus):** وهو عبارة عن عدد من الكييسات أو الصفائح الغشائية المجوّفة المتراصة فوق بعضها بعضاً، تكون هذه الصفائح الغشائية محدبة من جهة ومقعّرة من الجهة الأخرى. يؤدي جهاز غولجي دوراً مهماً في إفراز البروتينات وإعطائها شكلها الوظيفي.

3) **الجسيمات الكوندرية (Mitochondria):** تُعَدُّ هذه العضيات بمثابة الرئة الخلوية حيث يتم بداخلها معظم عمليات الأكسدة الخلوية وإنتاج الطاقة. تأخذ أشكالاً مختلفة منها الكروي أو الخيطي أو البيضوي.

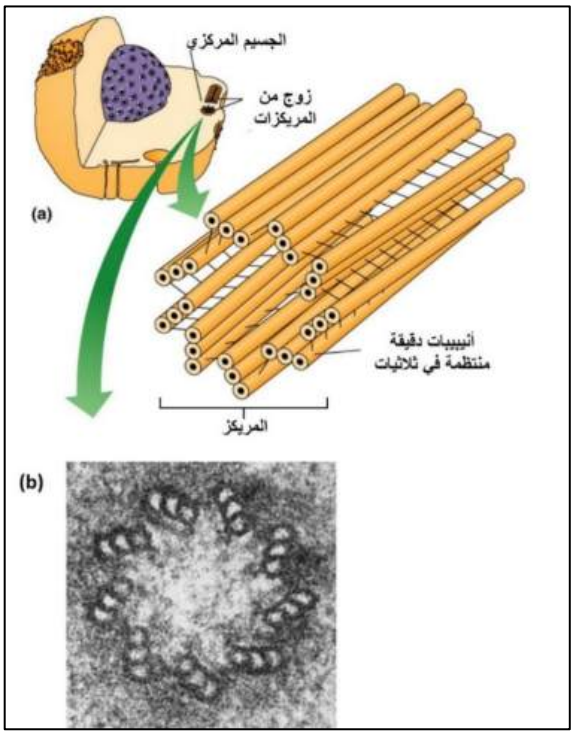
4) **البلاستيدات (plastids):** تُعَدُّ من المكونات المميزة للخلية النباتية وهي مسؤولة بشكل رئيسي عن صنع وتخزين المواد الغذائية، لها أنماط متنوعة مثل: الصانعات الخضراء Chloroplasts ، الصانعات البيضاء leucoplasts و الصانعات الملونة Chromoplasts

5) **الجسيمات الحالّة (Lysosomes):** تُعَدُّ بمثابة جهاز الهضم الخلوي فهي عبارة عن حويصلات صغيرة تحتوي على أنزيمات حالّة، تستخدمها الخلية في عملية الهضم الخلوي كما تقوم بالدفاع عن الخلية ضد أي جسم غريب يدخلها.

6) **الأجسام البيروكسيدية peroxisomes:**عضيات صغيرة موجودة في سيتوبلاسما العديد من الخلايا، تحوي أنزيمات مسؤولة عن العديد من التفاعلات الاستقلابية في الخلية بما فيها المنتجة للطاقة.

7) **الجسيمات الريبية (Ribosomes):** تؤدي دوراً مهماً في أثناء عملية تركيب البروتين، توجد حرّة في السيتوبلاسما أو مرتبطة إلى قنيات الشبكة البلاسمية الداخلية والغلاف النووي.

8) **الجسيم المركزي (Centrosome):** يتألف من أسطوانتين متعامدتين هما المريكزان centrioles يتوضعان بالقرب من النواة، يأخذ المريكز شكل أسطوانة مكونة من مجموعة من الأنيبيبات الدقيقة microtubules التي تنتظم في تسع ثلاثيات (الشكل4-3) تتجلى الوظيفة الرئيسة للمريكز في مساهمته في تشكيل ألياف مغزل الانقسام في الخلية وفي تشكيل الأهداب والسياط celiogenesis على سطح الخلية.

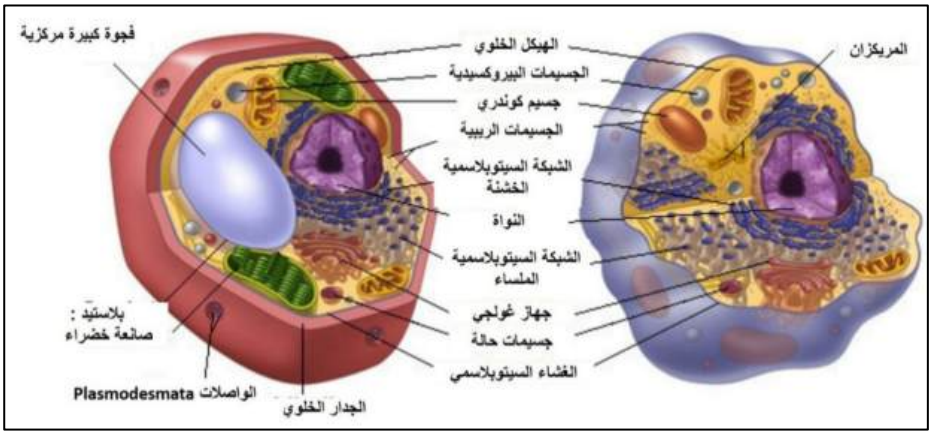


الشكل (4-3) البنية العامة للمريكز. (a) رسم تخطيطي يوضح بنية المريكز. (b) صورة بالمجهر الالكتروني توضح البنية الدقيقة للمريكز من خلال مقطع عرضي فيه.

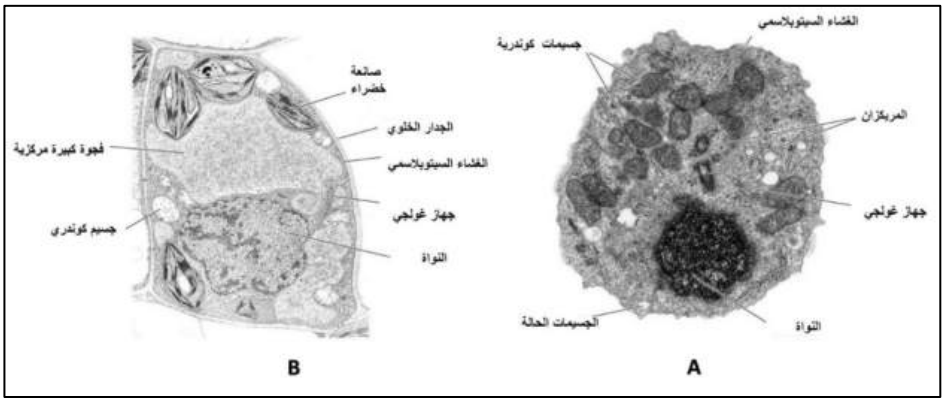
9) **النواة (Nucleus):** تحتوي على المادة الوراثية لذا فهي من أهم العضيات الخلوية وتكون محاطة بغلاف نووي يشتمل على ثقوب نووية تسمح بتبادل المواد بينها وبين السيتوبلاسما تحوي النواة بداخلها البلاسما النووية التي تضم نوية أو أكثر. وكما السيتوبلاسما فإنّ البلاسما النووية nucleoplasm تتألف بشكل أساسي من ماء وشوارد وجزيئات منحلة.

تجدر الإشارة هنا إلى دور وأهمية كلٍ من الستوبلاسما الخلوية والبلاسما النووية في الخلية: فالطبيعة المائية لكليهما تسمح للشوارد والجزيئات وكذلك العضيات الخلوية بالتنقل والحركة بحريّة ضمن الخلية، وتساعد الجزيئات المختلفة المنحلّة في العصارة الخلوية العضيات باستخدامها من أجل تركيب جزيئات كبرية ضخمة، كما تساهم كل من السيتوبلاسما والبلاسما النووية بالمحافظة على شكل وهيئة الخلية. وبشكل عام، فإنّ معظم خلايا الكائنات حقيقية النوى تشترك بوجود معظم العضيات الخلوية آنفة الذكر، غير أننا نلاحظ **بعض الاختلافات بين خلايا النبات و الحيوان.** حيث يحيط بالخلية النباتية **جدار خلوي** cell wall بالإضافة للغشاء السيتوبلاسمي، وهو مكون بشكل أساسي من السيللوز بينما لا يوجد جدار خلوي في خلايا الحيوان. وتتميز خلايا النبات بوجود **البلاستيدات** بالمقابل لا توجد في خلايا الحيوان هذه العضية الخلوية. و تملك خلايا النبات **فجوات** واضحة وكبيرة، بينما تغيب الفجوات في خلايا الحيوان وإن وجدت فيكون وجودها بشكل مؤقت و تكون مسؤولة بشكل رئيسي عن الاطراح أو الإفراز. وكذلك

يغيب **المريكز** في خلايا النبات و يقل عدد الجسيمات الحالّة فيها (الشكل 4-4) و(الشكل 4-5)



الشكل (4-4): رسم توضيحي لأبرز الفروق بين الخلية النباتية و الخلية الحيوانية



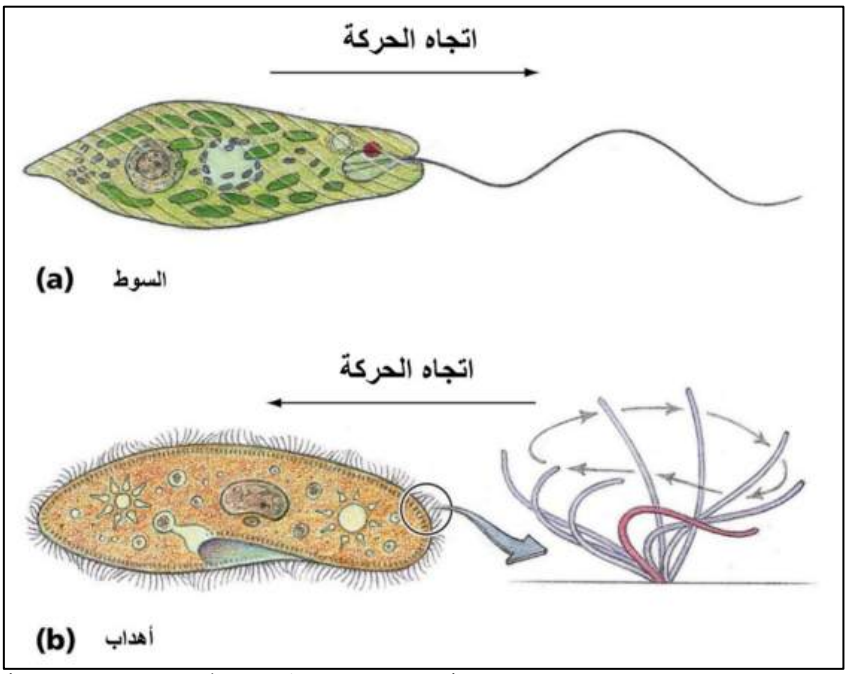
الشكل (4-5) صور بالمجهر الإلكتروني تبيّن البنية الدقيقة لكلٍ من الخلية الحيوانية (A) و الخلية النباتية (B)

بالإضافة لوجود العضيات الخلوية تحوي الخلية حقيقية النواة **مكتنفات خلوية غير حيّة** مثل الحبيبات الإفرازية والأصبغة المتنوعة، وكذلك **الفجوات Vacuoles** والتي تؤدي مجموعة متنوعة من الوظائف في العديد من الأنماط الخلوية المختلفة. فالفجوات الغذائية Food vacuoles تحوي المدخرات الغذائية كالسكريات والدهون والبروتينات، بالمقابل تملك العديد من وحيدات الخلية والتي تعيش في المياه العذبة فجوات نابضة contractile vacuoles التي تضخ الماء الزائد من الخلية، وبالتالي تحافظ على تركيز مناسب من الشوارد والجزيئات داخل الخلية.

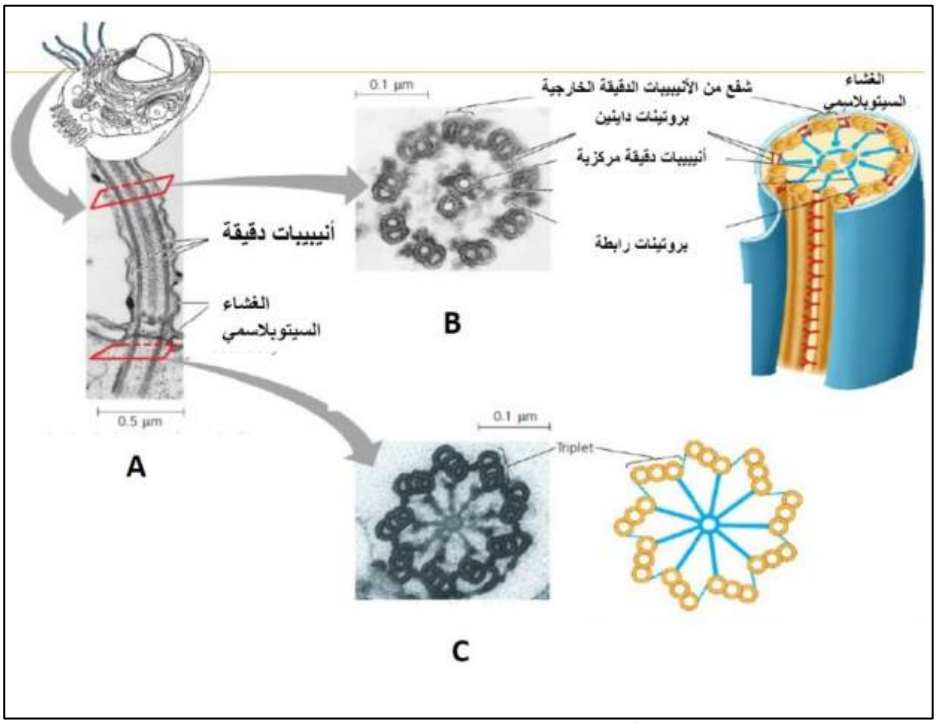
رابعاً: الملحقات الخلوية

تمتلك بعض أنواع الخلايا حقيقية النوى بنى إضافية كالأهداب والسياط وهي من العضيات السيتوبلاسمية المتحركة التي تنشأ عن المريكز، و تساعد الخلية على الحركة والتنقل (الشكل4-6). غالباً يفوق عدد الأهداب في الخلية عدد السياط ، فالبرامسيوم Paramecium مثلاً يملك 17,000 هدب يصل طول كل واحد منها قرابة 10 µ (انظر الملحق). و تشبه بنية الأهداب والسياط بنية المريكز و تتكون من أنيبيبات دقيقة و بعض البروتينات الرابطة، وتظهر المقاطع العرضية الملتقطة بواسطة المجهر الإلكتروني لكلٍ من الهدب والسوط مايسمى بالترتيب(9+2) الذي يشير إلى وجود 9 أشفاع من

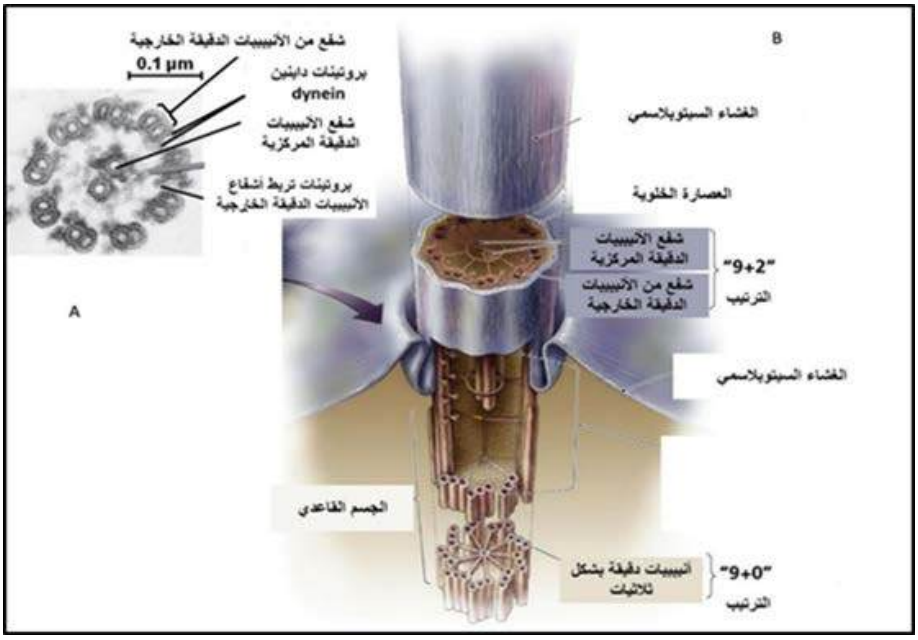
الأنيبيبات الدقيقة المنتظمة في ثنائيات محاطة بلب مركزي مكون من شفع من الأنيبيبات المركزية الدقيقة (الشكل 4-7) و(الشكل 4-8).



الشكل (4-6): رسم تخطيطي يوضح دور الأهداب والسياط في حركة بعض الكائنات كالأوغلينا Euglenas (a) و البرامسيوم (b)



الشكل (4-7) البنية التفصيلية للأهداب في الخلية:A صورة بوساطة المجهر الإلكتروني النافذ لمقطع طولي من أحد أهداب الخلية تظهر الأنيبيبات الدقيقة على طول الهدب. B: صورة بوساطة المجهر الإلكتروني النافذ لمقطع عرضي في أحد أهداب الخلية يظهر الترتيب "9+ 2". وترتبط أشفاع الأنيبيبات الدقيقة الخارجية وكذلك الأنيبيبات المركزية بوساطة بروتينات رابطة. كما ترافق أشفاع الأنيبيبات بروتينات محركة تدعى داينين.C: صورة بوساطة المجهر الإلكتروني النافذ لمقطع عرضي في الجسم القاعدي حيث تنتظم مجموعة من الأنيبيبات الدقيقة في تسع ثلاثيات وترتبط الثلاثيات بعضها بعضاً بوساطة بروتينات غير التوبولين مشكلة الترتيب "9+0 .



الشكل (4-8) البنية العامة للهدب أو السوط. A: **صورة بالمجهر الإلكتروني لمقطع عرضي في الهدب أو السوط B: شكل تخطيطي يوضح البنية الدقيقة للهدب أو السوط في الخلية حقيقية النواة.**

الفصل الخامس

بنية الغشاء السيتوبلاسمي ووظائفه

- بنية الغشاء السيتوبلاسمي وتركيبه الكيميائي
- وظيفة الغشاء السيتوبلاسمي

تمهيد

يحيط بالخلية غشاء رقيق جداً لا تتجاوز سماكته 8 نانومتر يدعى الغشاء السيتوبلاسميplasma membrane أو غشاء الخلية cell membrane. يعمل هذا الغشاء كحاجز يفصل الخلية عن البيئة المحيطة بها كما ينظم مرور المواد من وإلى الخلية من خلال خاصية النفاذية الاصطفائية التي يتمتع بها؛ فهو يسمح بنفوذ بعض المواد والجزيئات إلى داخل الخلية في حين يمنع مرور مواد أخرى عبرها.

أولاً:بنية الغشاء السيتوبلاسمي وتركيبه الكيميائي

لم يتحقق للعلماء دراسة تفاصيل البنية الدقيقة للغشاء الخلوي إلاّ بعد اختراع المجهر الإلكتروني، حيث تأكدوا من وجود غشاء خلوي يحيط بكل خلية، كما لاحظوا أن أغلب العضيات الخلوية في الخلايا حقيقية النوى تكون محاطة بأغشية خلوية. وبشكل عام، فقد استغرقت دراسة هذا الغشاء أكثر من قرن من الزمن اقترح الباحثون فيه العديد من النماذج لتفسير طبيعة تركيب هذا الغشاء وبنيته الدقيقة، وفي عام 1972 وضع كلٍ من نيكلسون وسنجر (Nicolson and Singer) نموذجاً لتفسير طبيعة الغشاء الخلوي يُعَدُّ حالياً النموذج الأحدث والمقبول عن بنية الغشاء الخلوي يُعرف باسم **النموذج الفسيفسائي السائل** (fluid mosaic model). اعتمد في التوصل إلى هذا النموذج على تجارب علمية عديدة، استخدمت طرائق بحثية متنوعة مثل الكسر بالتجليد (freeze-

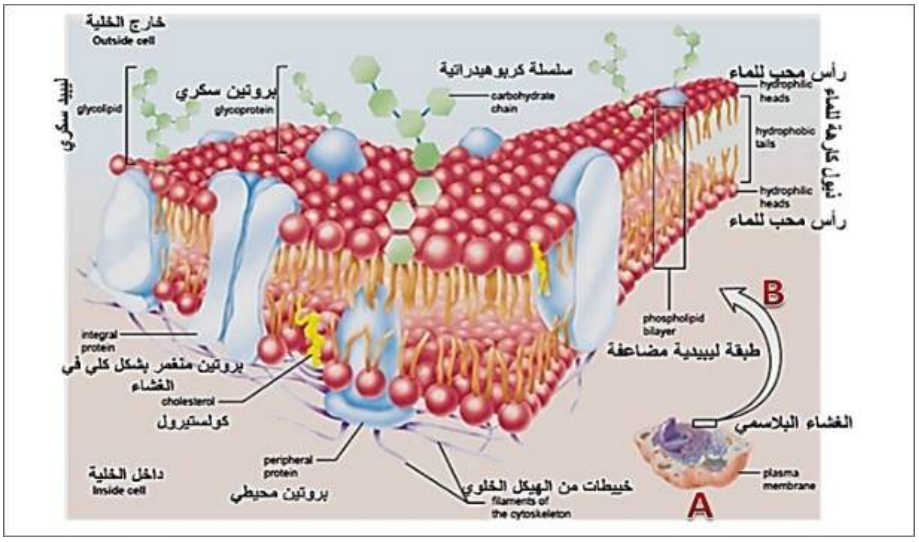
fracture) التي اعتمدت التبريد السريع للخلايا وتحضير مقاطع رقيقة منها، درست بعدها المقاطع بالمجهر الإلكتروني. (الشكل 5-1)

الشكل (5-1): رسم توضيحي لطريقة الكسر بالتجليد

النموذج الفسيفسائي السائل للغشاء السيتوبلاسمي:

يتألف الغشاء السيتوبلاسمي من طبقة ليبيدية مضاعفة تشكل الليبيدات الفوسفورية معظمها، تكون فيها الرؤوس المحبة للماء أو المستقطبة في كل طبقة متجهة نحو الوسط المائي الموجود على جانبي الغشاء، في حين تتوضع الذيول الكارهة للماء وغير المستقطبة والخاصة بكل طبقة باتجاه الداخل مبتعدة عن الوسط المائي. تحجز الطبقة الليبيدية المضاعفة ضمنها أنواعاً متنوعة وعديدة من البروتينات بشكل فسيفسائي، تكون المناطق المحبة للماء فيها بارزة وبعيدة بشكل كاف عن الطبقة الليبيدية المضاعفة

ومعرضة للوسط المائي من الجهتين. إنّ هذا التوضع الجزيئي يزيد بشكل كبير اتصال المناطق المحبة للماء في كل من البروتينات والليبيدات الفوسفورية مع الوسط المائي المحيط بالغشاء، بينما يؤمن اتصال الأجزاء الكارهة للماء مع المحيط اللامائي. وعليه فإن الغشاء السيتوبلاسمي عبارة عن بنية فسيفسائية من جزيئات البروتينات تطفو في وسط سائل ثنائي الطبقة من الليبيدات الفوسفورية تقترن بها بالاعتماد على ألفتها مع الأجزاء الكارهة للماء (الشكل -52).



الشكل (5-2) النموذج الفسيفسائي السائل للغشاء البلاسمي،A مقطع في الخلية B جزء مكبر من الغشاء الخلوي يظهر النموذج الفسيفسائي السائل المؤلف من طبقة ليبيدية مضاعفة كأساس وتكون البروتينات الغشائية فيه على شكل وحدات كروية مستقلة تقترن بالطبقة الليبيدية المضاعفة حسب ألفتها مع الأجزاء الكارهة للماء فيها.

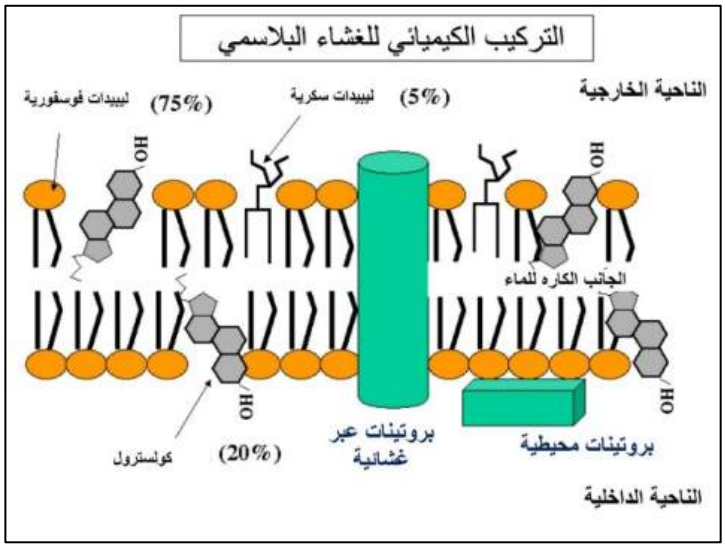
تم تصنيف البروتينات الغشائية اعتماداً على الاختلافات في طبيعة ارتباطها مع الطبقة الليبيدية المضاعفة إلى ثلاث مجموعات هي:

1- بروتينات ضمنيّة (integral proteins) (عبر غشائية): وهي بروتينات تتخلل الطبقة الليبيدية المضاعفة للغشاء بشكل جزئي أو كلي بحيث يبرز أحد أطرافها من الوجه السيتوبلاسمي الداخلي للغشاء والوجه الأخر على الوجه الخارجي للغشاء، وتتثبت في أماكنها بواسطة ألفة أقسامها الكارهة للماء مع الأقسام الداخليّة الكارهة للماء الخاصة بالطبقة الليبيدية.

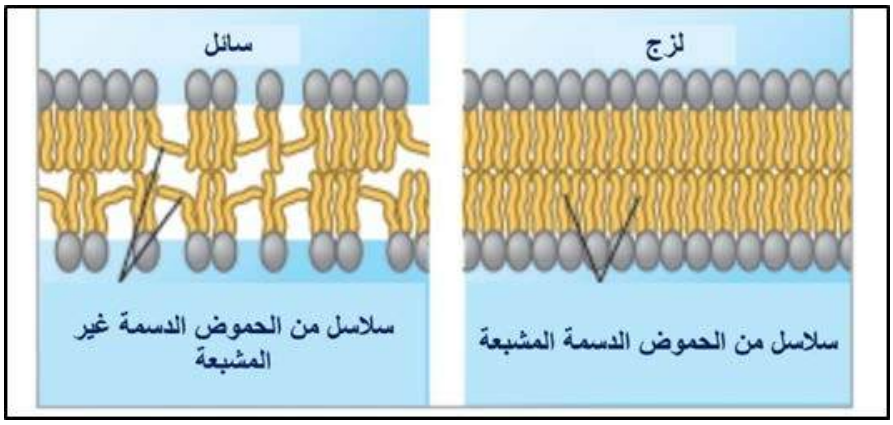
2- بروتينات محيطية (peripheral proteins): وهي بروتينات محبة للماء تتوضع على سطح الغشاء وترتبط بروابط لا تكافؤية مع الرؤوس القطبية الخاصة بالليبيدات الغشائية أو مع الأجزاء المحبة للماء الخاصة بالبروتينات الغشائية الأخرى.

3- بروتينات متثبتة ليبيدية: وهي بروتينات محبة للماء بشكل أساسي تتوضع على السطح، لكنها ترتبط بروابط تكافؤية مع الجزيئات الليبيدية الموجودة في الطبقة المضاعفة الليبيدية. قد ترتبط بعض البروتينات بسلاسل من عناصر كربوهيدراتية، لذا تدعى بالبروتينات السُكريّة (Glycoproteins) كما هو الحال بالنسبة لليبيدات السُكريّة (Glycolipids) حيث توجد هذه المركبات على سطح الغشاء وتشكل مواقع تعرف بيولوجية مهمة (الشكل 5-2).

يتركب الغشاء السيتوبلاسمي بشكل أساسي من ليبيدات وبروتينات إضافة إلى نسب قليلة من بعض العناصر السُكريّة الأخرى. تتألف **الليبيدات** الغشائية بمعظمها من ليبيدات فوسفورية بنسبة 75% وليبيدات سُكريّة بنسبة 5% ويشكل الكولستيرول نسبة 20% من الليبيدات الغشائية (الشكل 5-3). وكما ذكرنا آنفاً فإن هذه الليبيدات تُعَدّ جزيئات مستقطبة مكونة من رأس محب للماء مستقطب وذيلين كارهين للماء مكونين من سلسلتين من الحموض الدسمة، بحيث تكون عادة إحدى السلسلتين مؤلفة من حموض دسمة مشبعة والأخرى من حموض دسمة غير مشبعة. وتعزى سيولة الغشاء الخلوي أو لزوجته إلى نسبة تشبع سلاسل الحموض الدسمة، فكلما كانت مشبعة ازدادت لزوجة الغشاء والعكس صحيح. (الشكل 5-4).



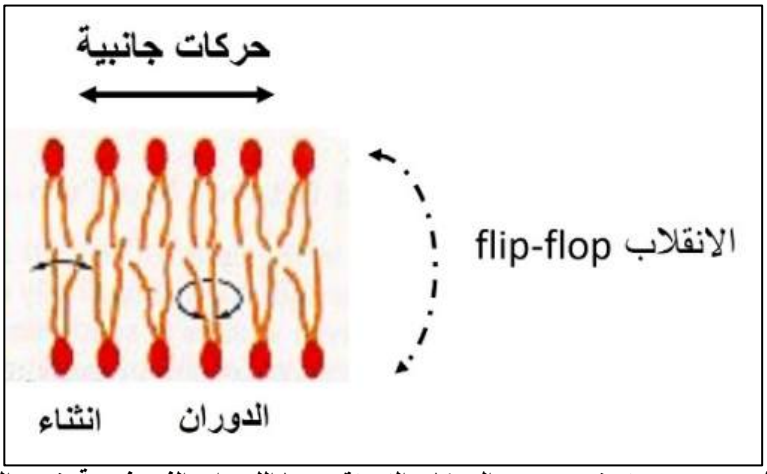
الشكل (5-3) التركيب الكيميائي للغشاء السيتوبلاسمي



الشكل (5-4) يوضح الفرق بين لزوجة وسيولة الغشاء الخلوي إذ يبقى الغشاء سائلاً إذا كان غنياً بالليبيدات الفوسفورية الحاوية على حموض دسمة غير مشبعة (تحوي روابط مضاعفة) حيث تشكل السلاسل تخلخلات أو فراغات تمنعها من الالتصاق ببعضها بعضاً مما يجعل الغشاء أكثر سيولة. في حين يكون الغشاء أقل سيولة (لزجاً) إذا تألف بشكل أساسي من ليبيدات فوسفورية تحوي حموضاً دسمة مشبعة حيث تلتصق السلاسل فيها بعضها مع بعض مما يجعل الغشاء لزجاً.

تختلف نسب وأنواع **الليبيدات** التي تدخل في تركيب الأغشية الخلوية بين الأنماط الخلوية المختلفة فمثلاً، إنّ الغشاء الخلوي للجراثيم يتألف من نوع واحد من الليبيدات الفوسفورية ولا يحوي الكولستيرول، بينما يحتوي غشاء الخلية حقيقية النواة على كميات كبيرة من الكولستيرول الذي يؤدي دوراً مهماً في ثبات الغشاء الخلوي، إضافة إلى أنواع مختلفة من الليبيدات الفوسفورية.

تمتاز جزيئات الليبيدات الفوسفورية ببعض الميزات الحركية التي تكون مسؤولة عن صفات النفوذية للغشاء الخلوي فهي قادرة على القيام بحركات جانبية (lateral movement) أو بالدوران حول نفسها أو الانتقال من طبقة إلى أخرى بحركة تسمى الانقلاب (flip-flop) يبين (الشكل5-5) أنماط الحركات التي يمكن أن تقوم بها الليبيدات الفوسفورية.



الشكل (5-5) رسم توضيحي يبين الحركات التي تقوم بها الليبيدات الفوسفورية ضمن الغشاء السيتوبلاسمي

تتألف **بروتينات** الغشاء الخلوي من أنواع مختلفة من البروتينات التي تؤدي دوراً بنيوياً رئيساً في الغشاء، كما تقوم بأدوار عديدة أخرى منها:

- **النقل** (transport) حيث تعمل بعض البروتينات الغشائية كقنوات تنتقل عبرها بعض المواد من وإلى الخلية.

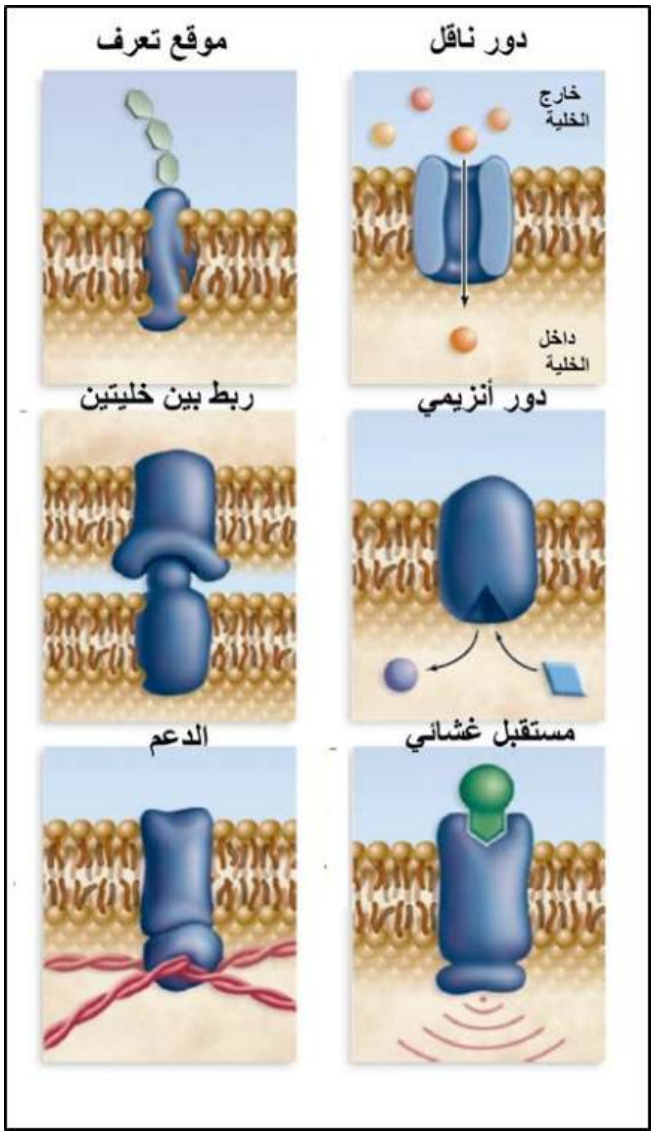
❖ **الاستقبال** (reception) حيث يمكن لبعض البروتينات الغشائية أن تؤدي دور المستقبل حيث تحوي مواقع ربط ذات أشكال خاصة ترتبط إليها بعض المركبات الكيميائية بشكل نوعي كالهرمونات مثلاً.

❖ **التعرف** (recognition) تشكل بعض البروتينات السُكريّة الغشائية مواقع تعرف نوعية تتعرف عليها خلايا أخرى.

❖ **الربط** (junction) يمكن للبروتينات الغشائية الخاصة بالخلايا المتجاورة أن ترتبط معاً بأشكال مختلفة

❖ تقوم بعض البروتينات الغشائية بدور **داعم** (support) حيث ترتبط البروتينات الغشائية بالخبيطات الدقيقة للهيكل الخلوي وبالتالي تساعد في المحافظة على الشكل المناسب للخلية واستقرار مواقع بعض البروتينات الغشائية

❖ كما تؤدي بعض البروتينات دوراً **أنزيمياً**، حيث يقدر عدد الأنزيمات الغشائية بقرابة الـ 30 أنزيماً (الشكل5-6).

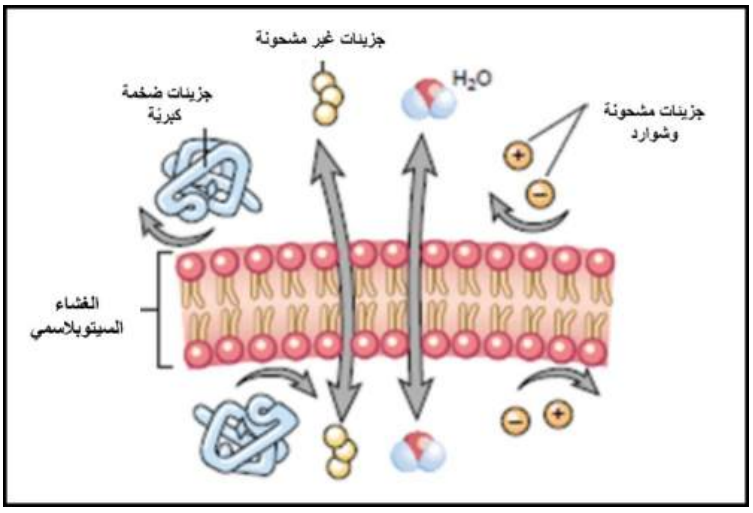


الشكل (5-6): رسم توضيحي لأهم وظائف البروتينات الغشائية، يمكن للبروتينات الغشائية أن تؤدي دور مستقبل غشائي أو أن تقوم بدور أنزيمي أو أن تشكل قنوات ناقلة لبعض المواد، وقد ترتبط إلى خييطات الهيكل الخلوي لتؤدي دوراً دعامياً أو أنها ترتبط مع بروتينات غشائية خاصة بخلايا مجاورة أو أن تكوّن مواقع تعرف بيولوجية مهمة.

وبشكل عام، يمكن القول بأن البروتينات الغشائية تحدد معظم الوظائف النوعية والخاصة للغشاء الخلوي في حين تكون الليبيدات مسؤولة عن صفات النفوذية لهذا الغشاء.

ثانيّاً: وظيفة الغشاء السيتوبلاسمي.

الغشاء السيتوبلاسمي غشاء شبه نفوذ أو ذو **نفوذية اصطفائية**، إذ يتحكم بمرور المواد من وإلى الخلية حسب طبيعة هذه المواد. فهو يملك القدرة على اختيار المواد التي تحتاج الخلية إلى إدخالها أو إخراجها. وبشكل عام، فإنّ الجزيئات الكبيرة لا تستطيع العبور من خلال الغشاء بسبب كبر حجمها، كما أن الشوارد والجزيئات المشحونة لا تستطيع اختراق الطبقة المضاعفة الليبيدية الكارهة للماء، بالمقابل فإنّ الجزيئات غير المشحونة أو القابلة للانحلال في الدهون تستطيع عبور الغشاء بسهولة حيث يمكنها الانزلاق بين الرؤوس المحبة للماء الخاصة بالليبيدات الفوسفورية والعبور من خلال الغشاء الخلوي. و يمكن لبعض الجزيئات القطبية الصغيرة كجزيئات الماء وثنائي أكسيد الكربون العبور من خلال الغشاء بسهولة، إذ تعبر الغشاء اعتماداً على تدرج تركيزها على جانبي الغشاء، ويتم عبورها بعملية تدعى **الانتشار** (الشكل 5-7)

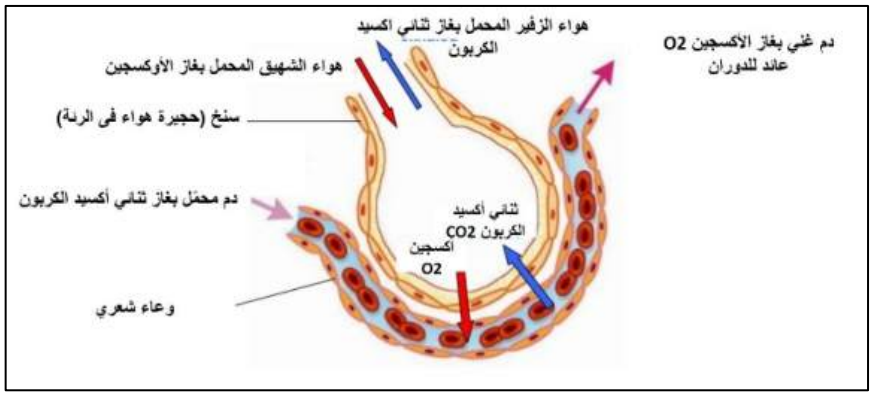


الشكل (5-7): رسم توضيحي لامكانية عبور الجزيئات والشوارد عبر الغشاء الخلوي.

تسلك الجزيئات المشحونة أو الشوارد سُبلاً خاصة للنفوذ عبر الغشاء الخلوي فقد ترتبط إلى بروتينات على سطح الغشاء تدعى بالبروتينات الناقلة أو أن تعبر من خلال قنوات خاصة كمضخات الصوديوم و البوتاسيوم. وتعبر الجزيئات الكبيرة بآلية الإدخال الخلوي. وبشكل عام، يمكن تصنيف الآليات التي تنفذ بواسطتها المواد عبر الغشاء الخلوي إلى: **النقل السلبي (المنفعل passive transport)**، الذي يشمل الانتشار البسيط (simple diffusion) والانتشار الميسّر (facilitated diffusion). لا تحتاج هذه الآليات إلى مصدر للطاقة لإنجازها.**النقل الفعّال (active transport)** و **الإدخال الخلوي (endocytosis)** . تستخدم هذه الآليات مصدراً للطاقة لإتمامها.

الانتشار Diffusion:

شكل من أشكال النقل المنفعل (passive transport)، وهو حركة الجزيئات من مناطق التركيز المرتفع إلى مناطق التركيز المنخفض حيث يحدد اتجاه الحركة اختلاف تراكيز هذه الجزيئات على جانبي الغشاء وهو ما يدعى بممال التركيز. وتستمر هذه الحركة حتى الوصول إلى حالة التوازن أي يكون توزع هذه الجزيئات متساوٍ على جانبي الغشاء. وكما ذكرنا آنفاً فإنه يمكن للغازات أن تنتشر عبر الغشاء من خلال الطبقة الليبيدية المضاعفة وهي الآلية التي تدخل من خلالها جزيئات الأكسجين الخلية و تخرج بواسطتها جزئيات غاز ثنائي أكسيد الكربون، وكذلك انتقال جزئيات الأكسجين من الحويصلات الهوائية في الرئتين إلى الدم في الأوعية الشعرية، فعند الشهيق يكون تركيز غاز الأكسجين ضمن الحويصلات الهوائية أعلى منه في الدم لذا ينتشر الأكسجين إلى الدم بسهولة ويسر الشكل(5-8).



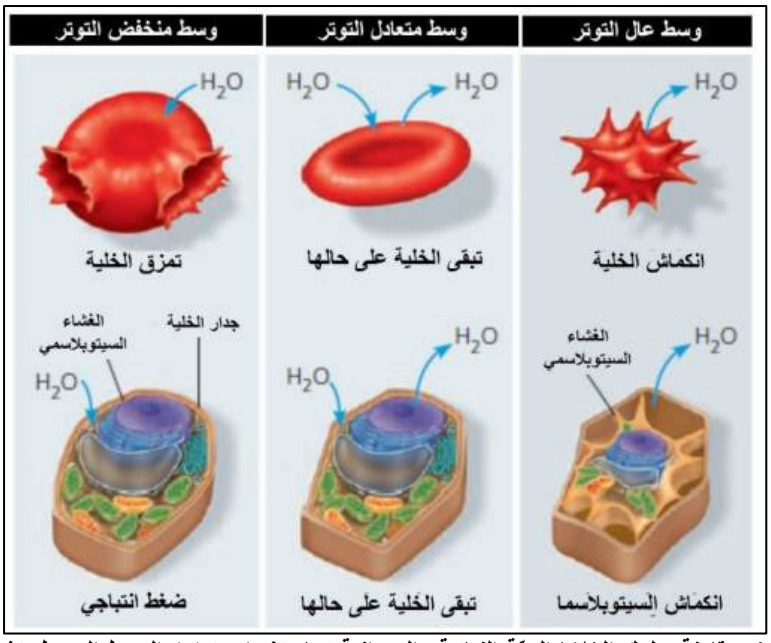
الشكل (5-8): رسم تخطيطي لانتشار الغازات عبر الأسناخ الرئوية.

[I32]

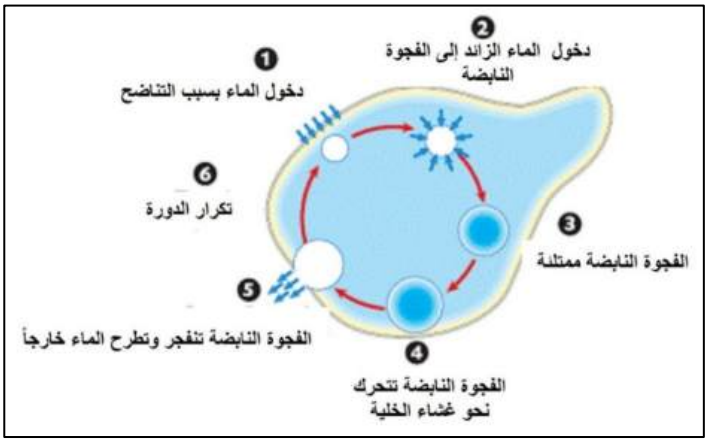
- **التناضح (osmosis)** : هو انتثار الماء من الخلية وإليها ، إذ لدى جزيئات الماء القدرة على الانتثار عبر الغشاء الخلوي لإيصال نسبة تراكيز المواد المذابة داخل الخلية إلى حالة متعادلة مع تلك المحيطة بها من الخارج، وبما أن الغشاء لا يسمح بخروج الجزيئات المذابة من داخل الخلية فإنّ استمرار انتثار الماء إلى داخل الخلية يولد ضغطاً داخليّاً على الغشاء الخلوي يعرف **بالضغط الحلولي**. وتعرف عملية انتثار الماء إلى داخل الخلية عبر الغشاء الخلوي دون السماح للمواد المنحلة بالخروج، بالحلوليّة أو التناضح. تختلف الخلايا فيما بينها بقدرتها الحلولية ، فكل غشاء خلوي له قدرة محددة في تحمل الضغوط الحلولية الناتجة عن نفوذ الماء. تُعَدُّ السيتوبلاسما من المحاليل عالية الضغط أو التوتر (hypertonic solutions) مقارنة بالمحاليل المحيطة بالخلية والتي تعد منخفضة التوتر(hypotonic solutions) لأن عدد الجزيئات المذابة فيها أقل بكثير من تلك الموجودة في سيتوبلاسما الخلية. وعند تعادل تركيز المحلول داخل الخلية مع المحلول خارج الخلية يسمى المحلول بمتعادل التوتر (isotonic solution). وبشكل عام، فإنّ خلايا النبات تتحمل ضغوطاً حلولية كبيرة أكبر بكثير من الخلايا الحيوانية وذلك بسبب إحاطتها بجدر خلوية قوية تكسبها القدرة على تحمل الضغوط الحلولية العالية وتمنحها الصلابة، لذلك يطلق على الضغط الحلولي عند النبات بالضغط الانتباجي (turgor pressure) أما في الخلايا التي لا تملك جداراً خلوياً كالخلايا الحيوانية فإنها تُعالج مشكلة الحلولية من خلال استمرار الضخ الفعّال للشوارد غير العضوية خارج الخلية وبذلك

تخفض الحلولية خارج الخلية لحدها الأدنى وتخفض التوتر بين الخلية والوسط المحيط بها. و تؤدي مضخة الصوديوم –بوتاسيوم الدور الفعّال في هذا الأمر كما تستهلك هذه الخلايا كميات كبيرة من الطاقة لضمان بقاء الحلولية منخفضة داخلها كي لا تنتبج أو تنفجر، بينما تستطيع الخلايا ذات الجدر الخلوية أن تتحمل ضغوطاً حلولية كبيرة دون الخوف من خطر الانفجار أو التمزق (الشكل5-9). بالمقابل فإنّه لدى بعض وحيدات الخلية التي تعيش في بيئات مائية مثل المتحول الحر أو البراميسيوم، القدرة على التخلص من الماء الزائد عن حاجتها و المحافظة على ضغوط حلولية ثابتة من خلال وجود الفجوات النابضة ضمن سيتوبلاسما الخلية. إذ يكون التوتر الداخلي للسيتوبلاسما أكبر بكثير من توتر الوسط الخارجي وبالتالي يتم تجميع الماء الزائد عن حاجة الكائن ضمن فجوة كبيرة تتجه نحو غشاء الخلية لتتحد معه وتنفجر طارحة محتواها من الماء خارج الكائن، تحافظ هذه العملية على حياة الكائن الحيّ وتمنع تمزق الخلية

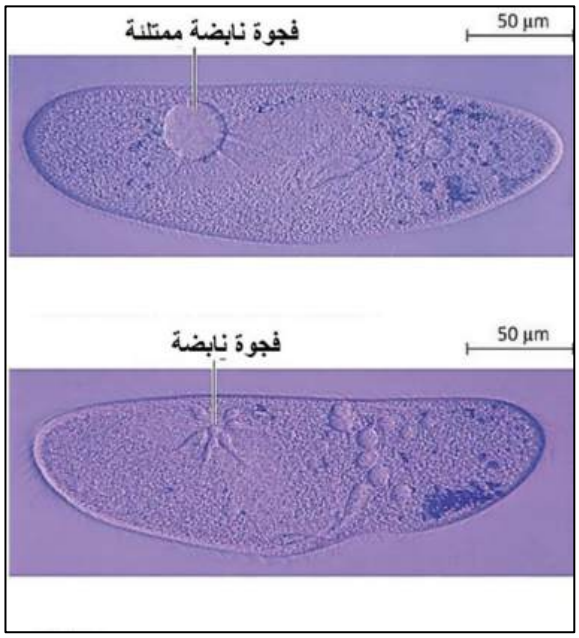
(الشكل5-10) و (الشكل 5-11)



الشكل (5-9): مقارنة سلوك الخلايا الحيّة النباتية والحيوانية تجاه تغيرات تركيز الوسط المحيط. تشير الأسهم إلى حركة الماء ففي الوسط متعادل التوتر تبقى الخلية على حالها لا تفقد ولا تكسب الماء، أما في الوسط منخفض التركيز فإنّ الماء يدخل الخلية وإذا ما استمر الماء بدخول الخلية فقد يؤدي ذلك إلى انفجار الخلية الحيوانية وتمزقها، و في الخلية النباتية تمتلئ الفجوات بالماء ويتشكل ضغطاً انتباجياً لكن الخلية لا تنفجر بسبب وجود الجدار الخلوي الذي يحميها ويمنع تمزقها. أما في الوسط عال التركيز تفقد الخلية الماء فتنكمش.



الشكل (5-10):يوضح آلية تخلص البرامسيوم من الماء الزائد بواسطة الفجوات النابضة.حيث تحوي الفجوة على قنيات صغيرة تجمع بداخلها الماء من السيتوبلاسما وعندما تمتلئ الفجوة بالكامل تنفتح ثقوب منها على الغشاء السيتوبلاسمي للبرامسيوم وتتقلص الفجوة طارحة الماء خارج الكائن

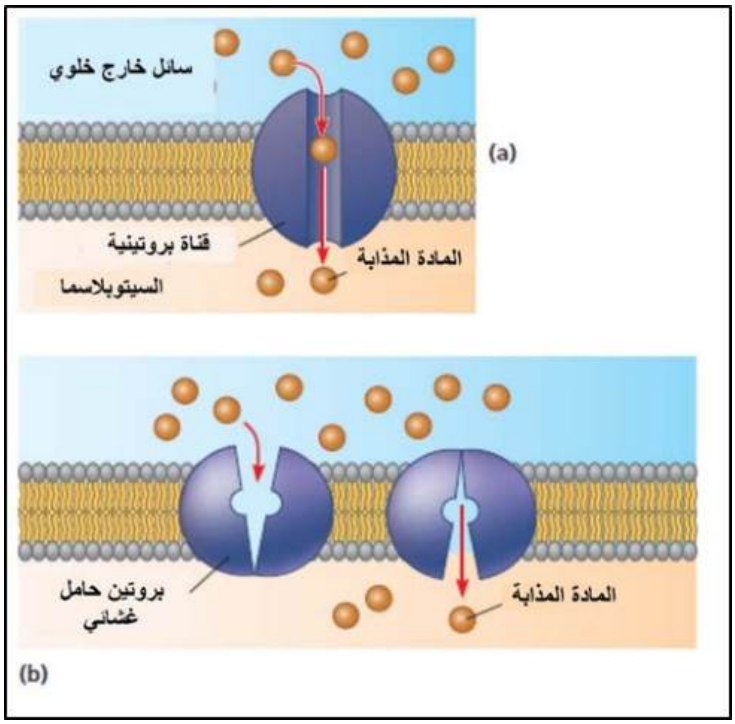


الشكل (5-11): صورة بالمجهر الإلكتروني تظهر الفجوة النابضة في حالتين قبل وبعد امتلائها بالماء الزائد وبعده

الانتشار الميسّرFacilitated diffusion:

تعبر بعض المواد المنحلة الغشاء السيتوبلاسمي بمساعدة بروتينات ناقلة غشائية، حيث ترتبط هذه المواد إلى بعض البروتينات الغشائية التي تقوم بنقلها عبر الغشاء اعتماداً على ممال تركيزها ومن دون صرف طاقة، تدعى هذه الآليّة بالانتشار الميسّر. وبشكل عام تحوي جميع الأغشية السيتوبلاسمية بروتينات ناقلة تتولى نقل الشوارد والجزيئات حسب تدرج تركيزها. يُعَدُّ الغلوكوز من أكثر المواد التي تنتقل بهذه الآليّة حيث تنتشر نواقل الغلوكوز بكثرة في أغشية خلايا الدماغ والكبد كما توجد في الخلايا الحساسة

لهرمون الأنسولين الذي يعمل على تسريع دخول الغلوكوز إلى الخلايا مثل الألياف العضلية والنسيج الشحمي ويوضح (الشكل 5-12) آلية الانتشار الميسر.

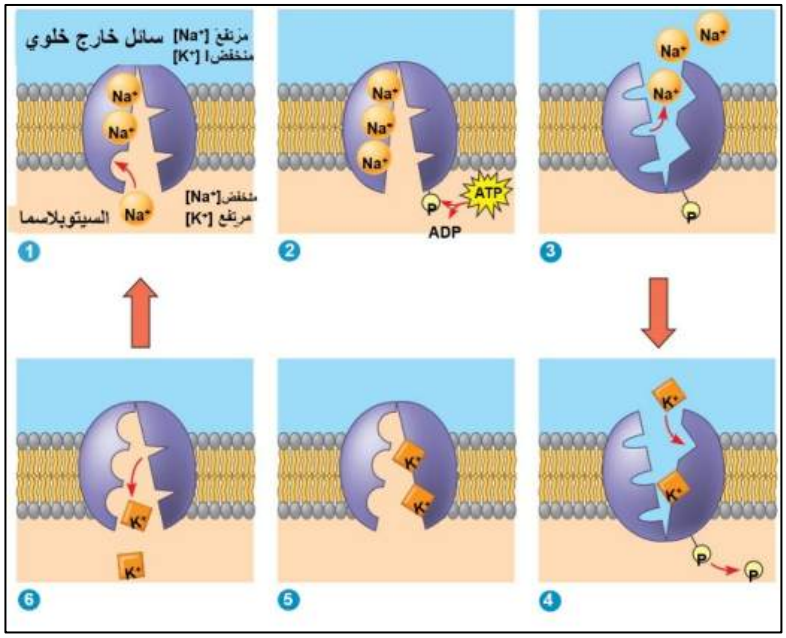


الشكل (5-12): آلية الانتشار المُيَسّر: (a) تُسَرِع البروتينات الناقلة انتقال المواد المنحلة عبر الغشاء حسب تدرج تركيزها من الوسط مرتفع التركيز إلى الوسط منخفض التركيز. وحسب الشكل فإن تركيز المادة خارج الخلية أعلى منه داخلها لذا ترتبط المادة بالبروتين الناقل الغشائي. ولدى الارتباط يغير البروتين من شكله ويقوم بنقل المادة إلى داخل الخلية. ثم يعود لشكله السابق قبل ارتباط المادة به.وتتكرر هذه العملية حتى يتعادل تركيز المادة على جانبي الغشاء .(b) وقد يتناوب البروتين الغشائي بين شكلين مختلفين ناقلاً المواد المذابة عبر الغشاء الخلوي.

النقل الفعّال Active transport:

تعمل بعض البروتينات الغشائية كمضخات، بحيث تعيد ضخ المواد المنحلة عكس **ممالها الكهركيميائي** (*يحدد الممال الكهركيميائي تركيز المواد وكمون الغشاء ، فمعظم الأغشية الخلوية يكون الوجه الداخلي لها مشحوناً سلباً أما الوجه الخارجي فيكون ذا شحنة موجبة يسهل الغشاء نفوذ الشوارد المشحونة إيجابياً ولكنه يعيق نفوذ الشوارد السالبة*). فمثلاً، يتم بواسطة هذه الآليّة تراكم شوارد اليود ضمن خلايا الغدة الدرقية، كما تعاد بشكل كامل شوارد الصوديوم من البول إلى الخلايا المبطنة للأنابيب الكلوية. ووفقاً لهذه الأمثلة فإن حركة هذه المواد تكون باتجاه المناطق ذات التركيز المرتفع وهو ما يخالف اتجاه وحركة المواد التي تسلكها المواد وفقاً لعملية الانتشار، لذا فإن الخلية في هذه الحالة بحاجة لمصدر للطاقة كي تستطيع إتمام هذه العملية، وقد تبين أن الخلية تصرف أكثر من 40% من طاقتها على النقل الفعّال. تحصل الخلية في الغالب على الطاقة من إماهة جزيئات الـ ATP بوساطة أنزيمات من نمط الـ ATPase. وهو ما يفسر وجود أعداد كبيرة من الجسيمات الكوندرية بالقرب من الغشاء الخلوي للخلايا، التي يكون النقل الفعّال فيها نشطاً. وكما ذكرنا آنفاً، يتم النقل الفعّال بواسطة بروتينات غشائية تدعى بالمضخات أو بالقنوات الشارديّة تشكل ممرات تسمح للجزيئات المشحونة لاسيما الشوارد بالعبور من خلال الغشاء الخلوي، وهي كمضخات الماء بحاجة إلى طاقة لضخ

الماء عكس الجاذبية الأرضية لنقل المواد عكس ممال تركيزها. وتعدّ مضخة الصوديوم –بوتاسيوم أحد أنماط المضخات النشطة وبشكل خاص في الخلايا العصبية والعضلية، حيث تتحرك شوارد الصوديوم خارج الخلية في حين تدخل شوارد البوتاسيوم إلى داخلها. وتهدف عملية ضخ شوارد الصوديوم و البوتاسيوم في اتجاهين متعاكسين إلى الحفاظ على تراكيز ثابتة لهذه الشوارد على جانبي الغشاء الخلوي، بحيث يكون تركيز شوارد البوتاسيوم عالياً داخل الخلية بينما يكون تركيز شوارد الصوديوم عالياً خارجها. وبشكل عام، يملك البروتين الناقل لشوارد الصوديوم –بوتاسيوم مواقع استقبال خاصة بواقع ثلاثة مواقع لشوارد صوديوم و اثنين للبوتاسيوم. وعند ارتباط شوارد الصوديوم بمواقعها المخصصة من البروتين الناقل على الناحية الداخلية لغشاء الخلية يحفز أنزيم ادينوزين ثلاثي الفوسفتاز مركب الـATP وعند اتحاد مجموعة الفوسفات بالبروتين الناقل يتغير شكله مما يسمح بتحرير شوارد الصوديوم إلى خارج الخلية وانفتاح مواقع استقبال شاردتين من البوتاسيوم الموجودة خارج الخلية تحدث عملية نزع للمجموعة الفوسفاتية من البروتبن الناقل ليعود إلى هيئته الشكلية الأولى محرراً شوارد البوتاسيوم داخل الخلية ويوضح (الشكل 5-13) آليّة النقل الفعّال.



الشكل (5-13): آليّة النقل الفعّال من خلال مضخة الصوديوم –بوتاسيوم. .يكون تركيز شوارد الصوديوم داخل الخلية أقل منه خارجها بينما يكون تركيز شوارد البوتاسيوم داخل الخلية أعلى منه خارجها ولدى ارتباط 3 شوارد صوديوم بالبروتين الناقل من الوجه الداخلي للغشاء وارتباط مجموعة الفوسفات الناتجة عن حلمهة جزيء الـATP يغير البروتين من شكله ويحرر شوارد الصوديوم خارج الخلية وبذلك تنفتح مواقع ارتباط شوارد البوتاسيوم وترتبط شاردتين منه من خارج الخلية،ليعود البروتين ويحررها داخل الخلية عند انفصال الفوسفات عنه.

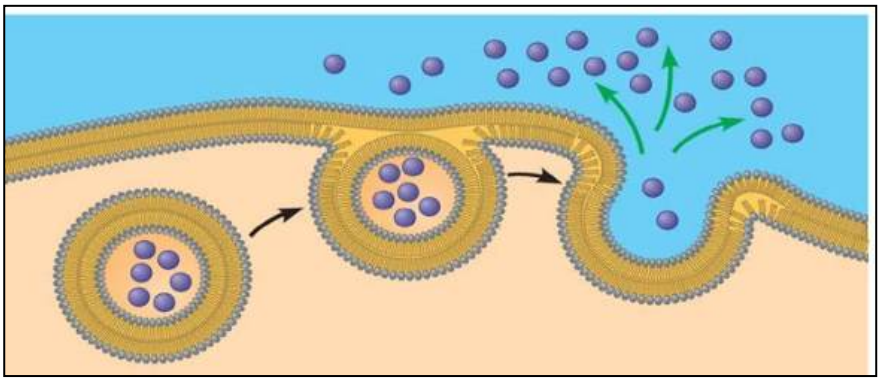
يتسبب الخلل في بعض المضخات الشاردية بحدوث أمراض وراثية خطيرة مثل مرض شلل فرط بوتاسيوم الدم الدوري (hyperkalemic periodic paralysis,HPP) والذي ينجم عن عوز أو خلل في مضخات الصوديوم –بوتاسيوم في الغشاء السيتوبلاسمي للخلايا العضلية، يؤدي إلى حدوث نوبات من الشلل الدوريّة ورفع مستوى البوتاسيوم في الدم

خصوصاً بعد إجراء تمارين رياضية حادة. وقد يؤدي تناول طعام يحوي كميات كبيرة من البوتاسيوم مثل الموز لحدوث نوبات من الانهيار والشلل. كما ينجم مرض التليّف الكيسي (cystic fibrosis) عن طفرة تؤدي إلى خلل في عمل مضخات الكلور الغشائية المبطنة للرئتين والبنكرياس .

ولكن ماذا عن نفوذ الجزيئات الكبيرة أو المستقطبة، والتي لا تستطيع أن تعبر الغشاء السيتوبلاسمي بآليات النقل السابقة الذكر؟

في الواقع يتم نفوذ مثل تلك الجزيئات الكبيرة بواسطة حويصلات تتشكل خصيصاً لأداء هذا الغرض، وبالتالي يتم المحافظة على هذه الجزيئات وعدم اختلاطها مع الجزيئات الموجودة في سيتوبلاسما الخلية ويتم ذلك وفقاً لنوعين من الآليّات هي: الإدخال الخلوي (endocytosis) و الإخراج الخلوي (exocytosis).

-**النقل بالإخراج الخلوي:** تتشكل الحويصلات غالباً من معقد غولجي، إذ تحيط تلك الحويصلات بالجزيئات المطلوب إخراجها خارج الخلية، ثم تلتحم هذه الحويصلات مع الغشاء السيتوبلاسمي ويتم لفظ الجزيئات خارج الخلية.فعلى سبيل المثال، يتم إفراز هرمون الأنسولين من الخلايا المنتجة له عن طريق النقل بالإخراج الخلوي (الشكل 5-14) .



الشكل (5-14): يشرح مراحل الإخراج الخلوي بشكل مبسط، حيث يحيط بالمواد المراد إخراجها وطرحها خارج الخلية حويصل يتجه باتجاه الغشاء الخلوي ويتحد معه ثم يتم طرح محتوياته خارج الخلية

– **النقل بالإدخال أو الإلتقام الخلوي:** وهي عملية تتشكل من خلالها حويصلات من الغشاء الخلوي من أجل إدخال مادة ما إلى داخل الخلية، حيث يحدث انخماص في غشاء الخلية يحيط بتلك المادة كليّاً ثم ينفصل عن الغشاء مشكلاً حويصل داخل خلوي، وهنا يمكن تمييز عدة أنماط لهذه الآليّة حسب نوع المادة المدخلة وحجمها وهي:

- **الشرب الخلوي (pinocytosis)** وهي عملية حيوية تقوم الخلية بإدخال جزيئات بسيطة مثل الحموض الأمينة أو بعض البروتينات الليبيدية على شكل محاليل. وتتم هذه العملية وفق مراحل متتابعة حيث تتجمع الجزيئات المراد إدخالها حول منطقة من الغشاء يتشكل حولها حويصلات غشائية تحصرها ثم تقوم بابتلاعها وإدخالها إلى داخل الخلية.تستخدم خلايا عديدة هذا النمط من النقل الخلوي مثل الخلايا المبطنة للأنابيب الكلوية أو جدران الأمعاء وكذلك خلايا جذور النباتات.

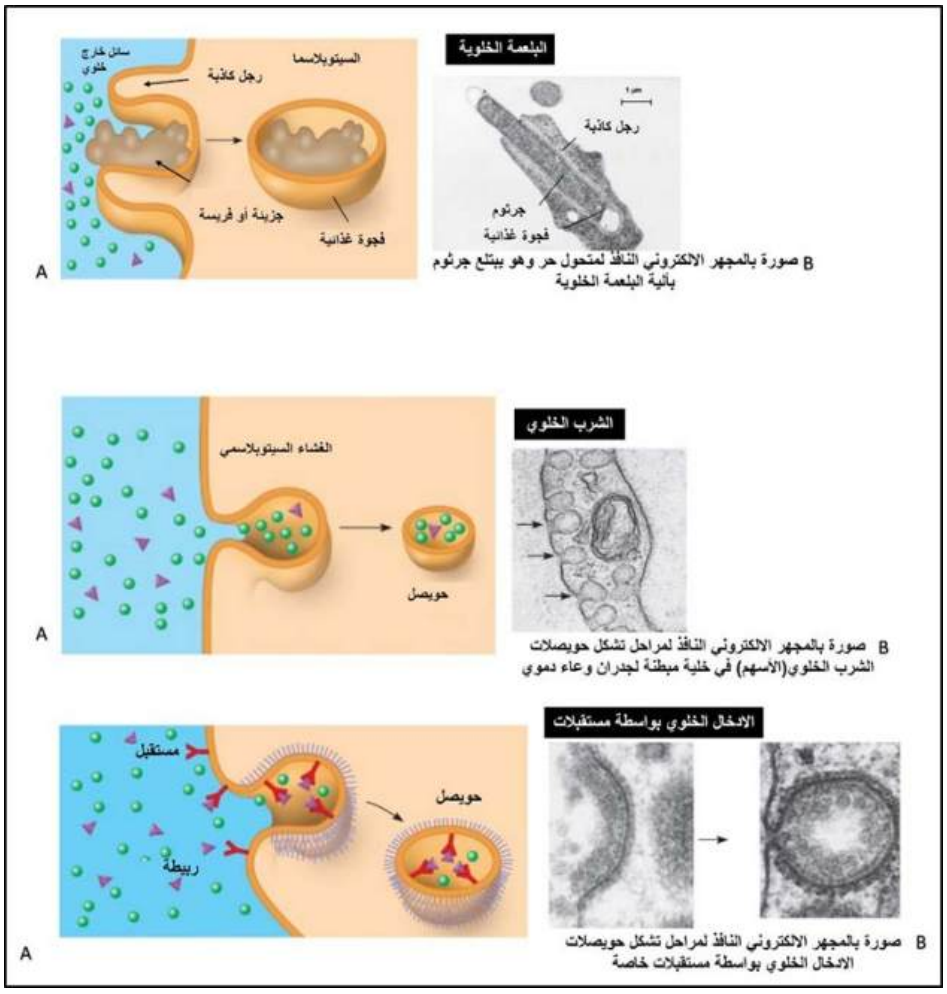
- **الإدخال الخلوي بوساطة مستقبلات خاصة (receptor- mediated endocytosis)**

وهي عملية امتصاص انتقائية لجزيئات معينة عن طريق ربطها إلى مستقبلات غشائية خاصة. تقوم تلك المستقبلات بانتقاء الجزيئات الكبيرة لا سيما البروتينات و الفيتامينات والهرمونات الببتيدية وترتبط إليها بشكل نوعي .ويؤدي ارتباط جزيئة واحدة من تلك الجزيئات في منطقة محددة من الغشاء إلى تجمع العديد من المستقبلات في المكان نفسه. وعند ارتباط جزيئات البروتين بالمستقبلات تتغير الخصائص السطحية للغشاء مؤدية لتشكل انخماصاً في الغشاء لا يلبث أن يكبر على شكل حويصلة تتركز فيها الجزيئات المراد إدخالها ثم تنفصل هذه الحويصلة عن الغشاء السيتوبلاسمي وتطرح في السيتوبلاسما.

جدير بالذكر، أنه وإلى جانب إدخال بعض المواد إلى الخلية بصورة انتقائية، فإنّ هذه الآلية تساهم في نقل وتبادل المواد بين الخلايا كما يحدث في أثناء تبادل المواد بين دم الأم ودم الجنين عبر المشيمة. ويمكن ملاحظة أهمية هذا النمط من النقل الخلوي من خلال مرض فرط كوليسترول الدم العائلي الوراثي (familial hypercholesterolemia) حيث يتم نقل الكولسترول في الدم من خلال معقد يدعى البروتين الليبيدي منخفض الكثافة(low- density lipoprotein)(LDL) ولكن في حالة مرض ارتفاع الكولسترول العائلي يكون لدى الأشخاص المصابين مورثة طافرة تؤدي إلى إنتاج أعداد قليلة أو

مشوهة من هذا البروتين وبالتالي يتم تراكم الكولسترول على جدارن الشرايين والأوعية الدموية، عوض عن دخوله إلى الخلايا مسبباً ارتفاعاً في ضغط الدم وحدوث انسداد في الأوعية الدموية مع نوبات قلبية حادة.

- **البلعمة الخلوية** (phagocytosis) ويتم فيها إدخال مواد كبيرة معقدة التركيب مثل الجراثيم والخلايا الميتة وتلاحظ هذه العملية عند أغلب الكائنات وحيدة الخلية مثل المتحول الحرّ الذي يمكنه ابتلاع كائنٍ كاملٍ إلى جوفه كمادة غذائية وذلك بعد إحاطته ببروزات سيتوبلاسمية على شكل أرجل كاذبة تندفع من الغشاء الخلوي ليصبح بعدها الكائن داخل فجوة غذائية في سيتوبلاسما الخلية.كما تملك الكائنات متعددة الخلايا خلايا متخصصة بالبلعمة الخلوية تدعى الخلايا البلعمية، وتُعَدُّ الخلايا البلعمية الكبيرة أكثرها انتشاراً وهي أحد أنواع خلايا الدم البيضاء المتخصصة في الدفاع عن الجسم ضد إصابته بالجراثيم كما تتم عملية التخلص من كريات الدم الحمراء الكهلة في الكبد والطحال ونقي العظم عن طريق البلعمة الخلوية (الشكل 5-15).



الشكل (5-15): آليات النقل بالإدخال الخلوي. A رسم تخطيطي B صور عن المجهر الإلكتروني النافذ،للمزيد من الشرح يرجع إلى النص

الفصل السادس
العضيات الخلوية الرئيسة

- الشبكة السيتوبلاسمية الداخلية
- الجسيمات الريبية
- الجسيمات الحالة
- الجسيمات الكوندرية
- جهاز غولجي
- النواة

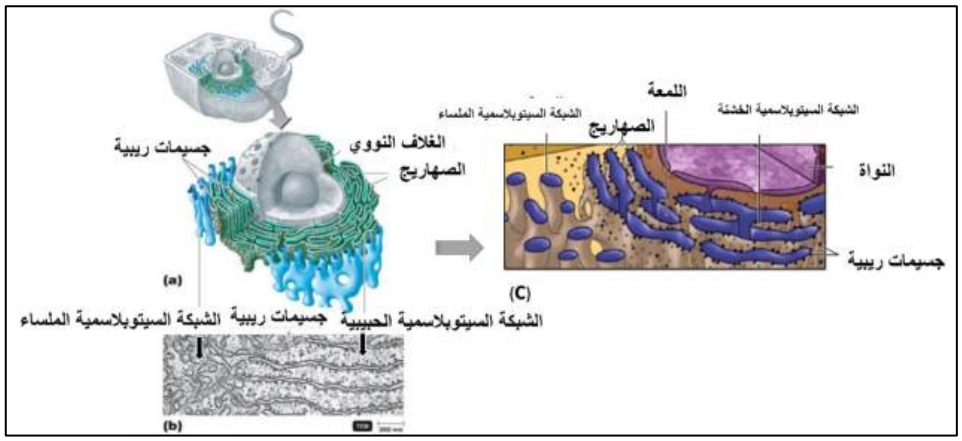
تمهيد:

النظام الغشائي الداخلي Endomembrane system : هو نظام تتميز به الخلايا حقيقيات النوى يشمل الشبكة البلاسمية الداخلية وجهاز غولجي والجسيمات الحالة والغلاف النووي والغشاء السيتوبلاسمي. يؤدي النظام الغشائي الداخلي إلى تقسيم الخلية إلى حجيرات شبه مستقلة وتكوين ما يُعرف بعضيات الخلية، بهدف توزيع العمل وفصل الأنزيمات المتخصصة في أماكن خاصة بها وضمن أماكن تسمح لها بالقيام بوظائفها الحيوية ويمنع التداخل غير المرغوب فيه بين التفاعلات الاستقلابية المختلفة.

أولاً: الشبكة البلاسمية الداخلية The Endoplasmic Reticulum (ER)

تُعَدُّ الشبكة البلاسمية الداخلية جزءاً من النظام الغشائي الداخلي الذي تتميز به الخلايا حقيقيات النوى. جاءت تسمية الشبكة البلاسمية الداخلية من (endo- plasmic) والتي تعني داخل السيتوبلاسما و (reticulum) وهي كلمة لاتينية وتعني الشبكة. وتُعَرّف بأنها عبارة عن شبكة من الكُييسات الغشائية المسطحة والأنابيب الغشائية المستمرة المجوفة إضافة إلى مجموعة من الحويصلات المقترنة بها، تدعى بمجملها بالصهاريج (cisternae) التي تكون متراصة على نحو متوازٍ ومتصلة مع بعضها بعضاً بصورة متكررة مما يكسبها الشكل الشبكي. تمتد الشبكة البلاسمية الداخلية لتشمل كافة أنحاء السيتوبلاسما. وبشكل عام، لا يمكن رؤية الشبكة البلاسمية الداخلية بالمجهر الضوئي لأنّ قوتها الفاصلة أكبر من القوة الفاصلة للمجهر الضوئي، بالمقابل أوضح المجهر

الإلكتروني أن كل كُييس غشائي في الشبكة البلاسمية يتكون من غشائين ينفصلان عن بعضهما بمسافة نيرة تدعى تجويف الشبكة البلاسمية أو اللمعة (ER lumen)، وتتصل أغشية الشبكة البلاسمية الداخلية في نقاط عديدة مع الغشاء الخارجي للغلاف النووي (الشكل 6-1)



الشكل (6-1) : بنية الشبكة البلاسمية الداخلية. (a) رسم توضيحي يبين بنية الشبكة البلاسمية الداخلية المكونة من مجموعة من الكييسات الغشائية المتراصة على نحو متوازٍ ومتصلة مع بعضها بعضاً بصورة متكررة واتصالها في مناطق متعددة مع الغشاء الخارجي للغلاف النووي.(b) صورة بالمجهر الإكتروني النافذ توضح جزءاً من الشبكة السيتوبلاسمية الداخلية. (c) رسم توضيحي يظهر بنية الكُييس الغشائي المؤلف من غشائين ينفصلان عن بعضهما بمسافة أو تجويف تُعرف بلمعة الكُييس.

يمكن أن تكون الشبكة ضامرة أو نامية حسب الحالة الفيزيولوجية للخلية فمثلاً، إذا درسنا خلايا كبديّة لجرذ وصل إلى حالة التخمة نلاحظ أنها تشتمل على شبكة نامية إلى حد كبير، في حين أنه لو درسنا الخلايا الكبدية للجرذ ذاته ولكن في حالة الجوع نلحظ

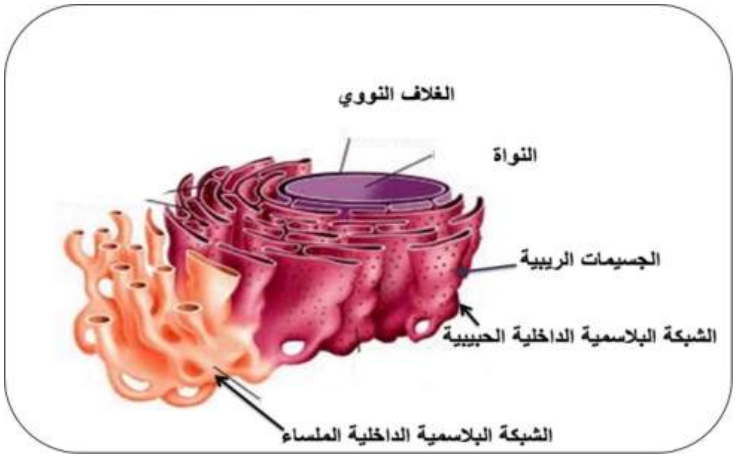
ضمور هذه الشبكة، مما يؤكد أن للشبكة البلاسمية الداخلية دوراً مهماً تؤديه ويختلف هذا الدور باختلاف الحالة الفيزيولوجية للخلية. وتكون بعض خلايا الفقاريات كالكريات الحمراء مثلاً، خالية من الشبكة البلاسمية الداخلية.

يمكن تمييز نوعين من الشبكة البلاسمية الداخلية وذلك اعتماداً على وجود أو غياب الجسيمات الريبية المرتبطة بالسطح الخارجي لأغشية الشبكة (الشكل 6-1) هما:

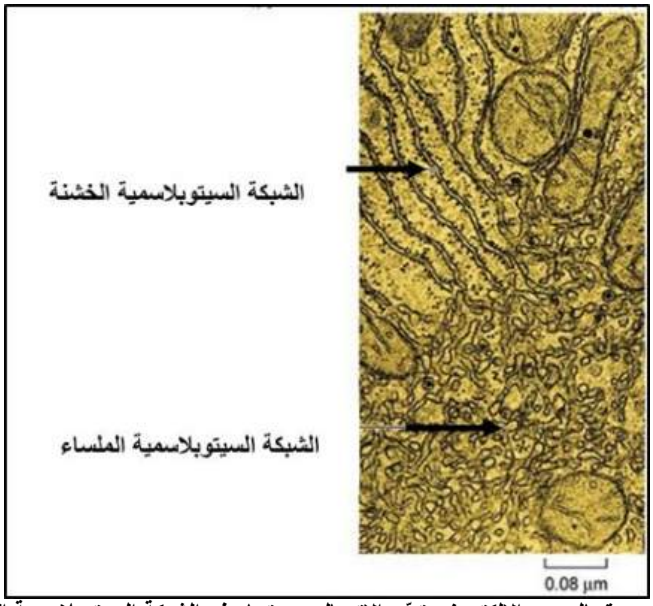
الشبكة البلاسمية الداخلية الحبيبية تتميز بوجود جسيمات ريبية مرتبطة بالسطح الخارجي لأغشيتها وتعد مصدراً للعناصر الانتقالية التي تؤدي دوراً مهماً في تشكيل الحويصلات الانتقالية التي تنقل الليبيدات والبروتينات من عناصر الشبكة إلى جهاز غولجي. تشاهد الشبكة البلاسمية الداخلية الحبيبية في الخلايا النشطة بتركيب البروتين مثل: الخلايا الغديّة وخلايا الكبد والبنكرياس.

الشبكة البلاسمية الداخلية الملساء والتي تتميز بعدم ارتباط الجسيمات الريبية بها وتصادف في الخلايا غير النشطة أو الخاملة بتركيب البروتين مثل الخلايا الشحميّة .ويمكن التمييز مورفولوجياً بين النوعين من الشبكة البلاسمية الداخلية، إذ تشكل الشبكة البلاسمية الداخلية الخشنة عادة صفائح غشائية مسطحة كبيرة بينما تشكل الشبكة البلاسمية الداخلية الملساء تراكيب أنبوبية أو حويصليّة (الشكل 6-2).تعكس هذه الاختلافات بين النوعين من الشبكة البلاسمية الداخلية الاختلافات الوظيفيّة بينهما، ولكن

وعلى الرغم من ذلك لا يمكن اعتبارهما عضيّات منفصلة عن بعضها بعضاً فقد أظهر المجهر الإلكتروني اتصالاً بين تجاويف نوعي الشبكة الخشنة والملساء بحيث تستطيع المواد الانتقال بين نوعي الشبكة من دون تدخل لحويصلات انتقالية (الشكل 6-3).



الشكل (6-2): رسم تخطيطي يميّز بين نوعي الشبكة البلاسمية الداخلية الحبيبية والملساء. تتميز الشبكة الحبيبية بوجود جسيمات ريبية مرتبطة بالسطح الخارجي لأغشيتها وبكونها تأخذ شكل صفائح غشائية مسطحة كبيرة، في حين لا تشاهد الجسيمات الريبية في الشبكة البلاسمية الملساء وتأخذ شكل تراكيب أنبوبية أو حويصليّة



الشكل (6-3): صورة بالمجهر الإلكتروني تبيّن الاتصال بين تجاويف الشبكة السيتوبلاسمية الحبيبية والملساء.

يُلاحظ نوعا الشبكة السيتوبلاسمية الداخلية في جميع الخلايا حقيقية النوى مع وجود اختلاف كبير في الكميات النسبية لكلٍ منهما وفق نشاط الخلية فمثلاً: تحتوي الخلايا الكبدية نوعي الشبكة الخشنة والملساء نظراً لأنّ معظم التفاعلات الاستقلابية الوسيطية تتم في الخلايا الكبدية بحيث يتم تقسيم هذه التفاعلات بين النوعين من الشبكة. بالمقابل تتميز الخلايا النشطة بتركيب البروتينات الإفرازية كخلايا البنكرياس وخلايا الكبد بسيادة الشبكة البلاسمية الخشنة، من جهة أخرى يسود في الخلايا المنتجة للمركبات الستيروئيدية مثل خلايا قشر الكظر عناصر من الشبكة البلاسمية الملساء حيث يتم تركيب الكولستيرول في هذا النوع من الشبكة إضافة لحدوث التفاعلات التي تؤدي إلى تكوين البروجسترون والكورتيزون.

❖ التركيب الكيميائي للشبكة البلاسميّة الداخليّة

سمح استخدام طريقة التثفيل التفاضلي و اتباع الطرق الكيميائية الحيوية الخاصة، بفصل مكونات الشبكة ومعرفة تركيبها الكيميائي بدقة، حيث تبيّن أن **أغشية الشبكة** تشبه في بنائها الجزيئي البناء الجزيئي للغشاء السيتوبلاسمي الخلوي وتتكون من ليبيدات بنسبة 30% وبروتينات بنسبة 70% وتكون معظم ليبيدات أغشية الشبكة عبارة عن ليبيدات فوسفورية إضافة لنسب قليلة من الليبيدات السكرية والكولستيرول مقارنة بالغشاء البلاسمي وتكون سلاسل الحموض الدسمة لجزيئات الليبيدات الفوسفورية أقصر وأقل إشباعاً. و يعزى زيادة درجة ثبات أغشية الشبكة البلاسمية الداخلية وانخفاض مرونتها عن الغشاء البلاسمي إلى محتواها المرتفع من البروتينات بالنسبة للدهون وللتركيز المنخفض من الكولستيرول فيها.

عُزل أكثر من ثلاثين نوعاً من **البروتينات الغشائية الخاصة بالشبكة البلاسمية الداخليّة**، بعضها على شكل بروتينات سُكريّة وبعضها على شكل أنزيمات متنوعة مثل، أنزيمات الحلمهة وأنزيمات استقلاب الحموض الدسمة وأنزيمات تركيب الليبيدات الفوسفورية والستيروئيدات وأنزيمات تتوسط تركيب الليبيدات السُكريّة و البروتينات السُكريّة، وكذلك بعض أنماط أنزيمات الأكسدة كالسيتوكروم P-450 و السيتوكروم P-448

تجدر الإشارة إلى أن بعض البروتينات الغشائية الخاصة بالشبكة البلاسميّة الداخلية تكون محيطية وتتوضع على الجانب التجويفي للشبكة، في حين يكون أغلبها

بروتينات ضمنيّة تمتد على كامل الطبقة المضاعفة الليبيدية أما **محتوى تجاويف كييسات الشبكة** فيتكون من وسط مائي يضم مزيجاً من البروتينات والبروتينات السُكريّة والليبيدات والشوارد المعدنية. تختلف طبيعة هذه المكونات من نمط خلوي لآخر فمثلاً تحتوي تجاويف الخلايا ß في البنكرياس على طليعة الأنسولين أما الخلايا خارجية الإفراز في البنكرياس فتحوي تجاويف الشبكة الداخلية الخلوية فيها على أنزيمات حلمهة وبروتينات حامضيّة .

❖ وظائف الشبكة البلاسميّة الداخليّة

1-**تركيب ونقل الببتيدات:** يتم تركيب قسم من الببتيدات على الجسيمات الريبية المرتبطة على الشبكة البلاسمية الداخلية الخشنة ثم نقلها إلى مناطق متفرقة من الخلية، وقد أجريت عدة تجارب للتأكد من هذه العملية حيث تم استخدام خلايا كبدية مزروعة في وسط صنعي أضيف إليه حموض أمينية موسومة بالنظائر المشعة، درست هذه الخلايا بعد فترة من الزمن حيث لوحظ بدء ظهور النشاط الإشعاعي بعد 10 دقائق على الجسيمات الريبية المرتبطة بالشبكة البلاسمية الداخلية الخشنة وبعد 20 دقيقة بدء النشاط الإشعاعي بالظهور على أغشية الشبكة البلاسمية الداخلية، وبعد 30 دقيقة ظهر النشاط الإشعاعي ضمن لمعة تجاويف الشبكة البلاسمية الداخلية،أما بعد ساعة فقد ظهر النشاط الإشعاعي ضمن الحويصلات التابعة لكييسات الشبكة البلاسمية الداخلية، و بعد مدة

أطول أمكن ملاحظة النشاط الإشعاعي في قنيات وحويصلات جهاز غولجي الإفرازية. دلت هذه التجربة على أن بناء وتركيب السلاسل متعددة الببتيد يتم على الجسيمات الريبية المرتبطة بالشبكة البلاسمية الداخلية الخشنة وأن هذه السلاسل المتشكلة تُنقل عبر غشاء الشبكة في أثناء عملية التركيب حيث يندمج بعضها في غشاء الشبكة بينما ينفذ بعضها الآخر عبر غشاء الشبكة إلى داخل تجاويفها. و أنّ عناصر الشبكة البلاسمية الداخلية الخشنة تساهم في نقل البروتينات المركبة حديثاً على الجسيمات الريبية المرتبطة بها إلى أماكن مختلفة في الخلية إذ تبين أنّ بعض الببتيدات المتعددة والمتشكلة حديثاً تمر عبر أغشية الشبكة إلى التجاويف ومنها إلى جهاز غولجي الذي ينقلها بدوره إما إلى الجسيمات الحالّة أو تنقل عبر حويصلات إفرازية خارج الخلية أو من الممكن أن تدمج في الغشاء السيتوبلاسمي للخلية.

يطرأ على متعددات الببتيد داخل تجاويف الشبكة عمليات معالجة وتعديلات كثيرة منها، التفاف متعدد الببتيد مكوناً البنية الثلاثية النهائية للبروتين وقد ترتبط متعددات الببتيد مع بعضها بعضاً لتشكل البروتين متعدد الوحدات وتُسَهل عملية التفاف متعددات الببتيد داخل أجواف الشبكة أحد أنواع بروتينات المساعِدة أو المرافِقة (chaperones). غالباً ما ترتبط البروتينات التي تُرَكّب على الجسيمات الريبية المرتبطة بأغشية الشبكة البلاسمية الداخلية الخشنة بوحدات سُكريّة مشكلة البروتينات السُكريّة أو بوحدات ليبيدية مكونة البروتينات الليبيدية.

2- **التركيب الحيوي لليبيدات:** تُعَدُّ الشبكة البلاسمية الداخلية الملساء المصدر الوحيد لليبيدات الغشائية بما فيها الليبيدات الفوسفورية، وذلك لأن معظم الأنزيمات التي تتوسط تركيب هذه المركبات توجد في أغشية الشبكة الملساء. كما تساهم بعض هذه الأنزيمات في تركيب الكولسترول و يعمل بعضها على تحويل الكولسترول إلى حموض صفراوية كما في خلايا الكبد أو تحويل الكولسترول إلى هرمونات ستيروئيدية كالبروجستيرون في خلايا الجسم الأصفر لمبيض الفقاريات و التستوستيرون في الخلايا البينيّة في الخصية وهناك أنزيمات أخرى تعمل على ربط السكاكر بالبروتينات أو الليبيدات.

3- **إزالة سُميّة العقاقير:** تقوم أغشية الشبكة البلاسمية الداخلية بإبطال مفعول المواد السامة التي تدخل إلى الجسم وذلك بأكسدة هذه المركبات بأنزيمات نوعية مثل السيتوكروم P-450 الموجود بشكل كبير في أغشية الشبكة البلاسمية الداخلية الملساء الخاصة بالخلايا الكبدية وخلايا الأمعاء والرئتين والكليتين والجلد.أو عن طريق ربط المواد السامة بمركبات خاصة يتم طرحها خارج الجسم.

4- **اختزان شوارد الكالسيوم:** تستخدم عناصر الشبكة البلاسمية الداخلية الملساء في بعض الخلايا كمواقع لاختزان شوارد الكالسيوم وتحتوي تجاويف الشبكة في هذه الخلايا على تراكيز مرتفعة من شوارد الكالسيوم المرتبطة بالبروتينات. وتجري بصورة مستمرة عملية ضخ لشوارد الكالسيوم من السيتوبلاسما إلى الشبكة بواسطة مضخات الكالسيوم وتتحرر منها استجابة لتأثير إشارات خارج خلوية. فعلى سبيل المثال تُعَدُّ الشبكة

البلاسمية الداخلية الملساء الموجودة في الخلايا العضليّة متخصصة باختزان شوارد الكالسيوم وتقوم مضخات الكالسيوم بضخ هذه الشوارد بشكل مستمر باتجاه أجواف الشبكة ويؤدي ارتباط النواقل العصبية إلى مستقبلاتها الموجودة على سطح الخلية العضلية إلى إطلاق سلسلة من الإشارات تؤدي إلى تحرير شوارد الكالسيوم وتقلص الألياف العضلية.

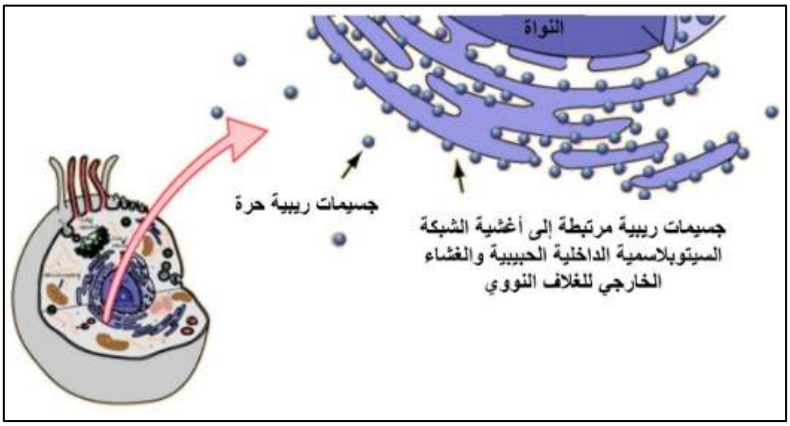
5- **وظيفة أجواف الشبكة البلاسمية الداخلية:** تحوي أجواف الشبكة على مركبات عضوية ولا عضوية تؤخذ من السيتوبلاسما وتدخر ضمن تجاويف الشبكة من أجل استخدامها في التركيب الحيوي للمركبات المختلفة أو من أجل الادخار.هذه المركبات إما أن تكون داخلية المنشأ مثل السلاسل متعددة الببتيد والبروتينات السُكريّة وشوارد الكالسيوم ،أو خارجية المنشأ كالبروتينات التي تلتقط بواسطة عملية الإدخال الخلوي حيث تدخل إلى تجاويف الشبكة عن طريق التحام أغشية حويصلات الإدخال الخلوي مع أغشية الشبكة الملساء ثم انصبابها في جوف الشبكة. وسواء كانت داخلية أم خارجية المنشأ، فإن المواد المنقولة إلى تجاويف الشبكة تعاني ضمن التجاويف تحولات عديدة مثل إضافة وحدات سُكريّة بتوسط أنزيمات غشائية ناقلة للسكاكر أو تشكيل جذور ثنائية الكبريت بين السلاسل الثقيلة والخفيفة للغلوبولينات المناعية. وتبقى هذه المواد معزولة ضمن تجاويف الشبكة لا تستطيع الخروج منها إلى العُصارة الخلوية لكنها تتحرك وتنتقل ضمن أرجاء الشبكة، كما يترك بعضها الشبكة مختزناً ضمن حويصلات غشائية ناتجة

عن تبرعم أغشية الشبكة حيث تتوجه نحو أماكن معينة وخاصة بها ضمن الخلية ويقوم بعملية النقل هذه جهاز غولجي كما سندرس لاحقاً.

سنقوم بدراسة نبذة عن الجسيمات الريبية لنتعرف على بنيتها ووظائفها بشكل عام، على أن نقوم بتفصيل ذلك لاحقاً، عند دراسة تركيب البروتين.

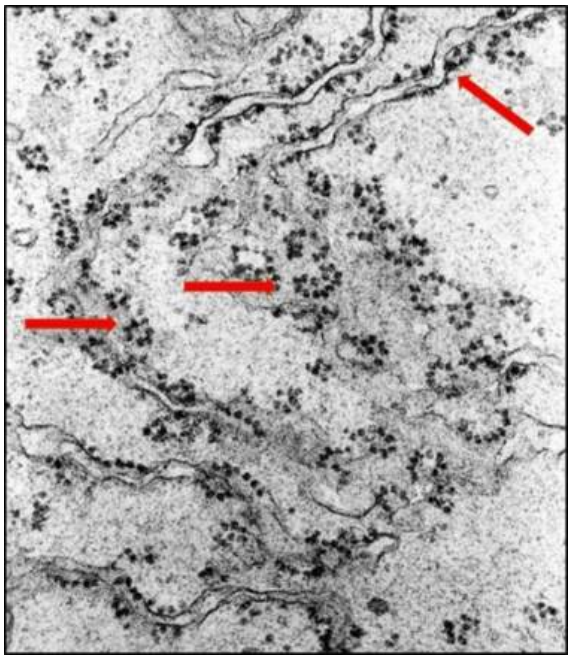
ثانياً: الجسيمات الريبية Ribosomes

أصغر العضيات الخلوية حجماً وتتميّز بأنها غير محاطة بأغشية خلوية، تشاهد في جميع الأنماط الخلوية إذ تُشاهد في سيتوبلاسما الخلايا حقيقيات وطلائعيات النوى وفي الجسيمات الكوندرية والصانعات الخضراء، وتكون في سيتوبلاسما الخلايا حقيقيات النوى موجودة بصورة حرة أو مرتبطة إلى أغشية الشبكة البلاسمية الداخلية والغشاء الخارجي للغلاف النووي (الشكل6-4)



الشكل (6-4): شكل تخطيطي يوضح توضع الجسيمات الريبية في الخلية، تشاهد الجسيمات الريبية إما بشكل حر ضمن سيتوبلاسما الخلية أو مرتبطة إلى أغشية الشبكة السيتوبلاسمية الداخلية والغشاء الخارجي للغلاف النووي.

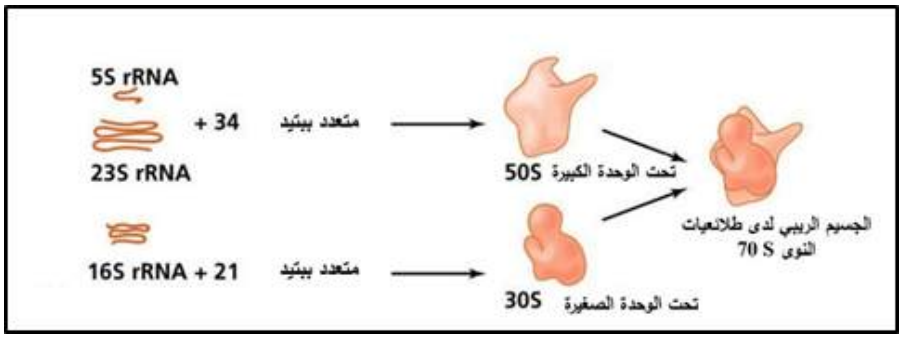
لا يمكن رؤية الجسيمات الريبية إلاّ باستخدام المجهر الإلكتروني إذ تظهر على هيئة حبيبات كروية الشكل،(الشكل 6-5). وبشكل عام تتكون الجسيمات الريبية من قرابة 60 % من الحمض الريبي النووي الريبوزومي (rRNA) ومن 40 % من البروتين. وقد أمكن عزل الجسيمات الريبية بواسطة التثفيل الفائق (ultracentrifugation)، حيث تدعى الجسيمات الريبية وتحت الوحدات العائدة لها وفقاً لخصائص ترسيبها في أثناء التثفيل. و تعتمد خصائص الترسيب على حجمها الجزيئي وشكلها الهندسي و يُعبّر عن معدل الترسيب في أثناء التثفيل بوحدة تدعى بوحدة سفيدبرغ (Svedberg) التي يرمز لها بـ (S) ، وهي وحدة زمنية تقاس بالثانية تستخدم كمعامل للترسيب تصف سلوك الجزيئة في أثناء عملية الترسيب



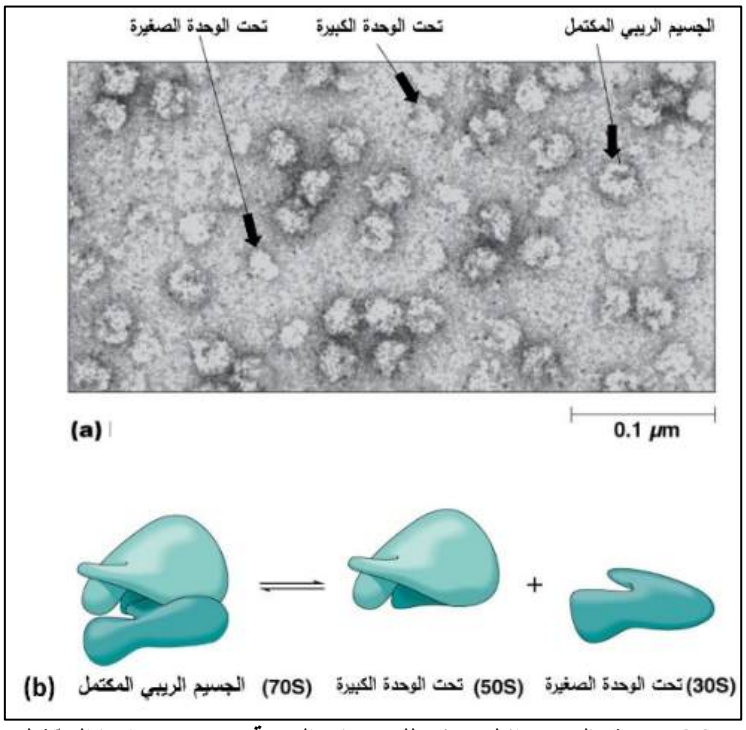
الشكل (6-5): صورة بالمجهر الإلكتروني تُظهر جزء من الشبكة السيتوبلاسمية الداخلية الحبيبية مأخوذة من خلية من جذر نبات الذرة. تظهر الجسيمات الريبية (الأسهم) بشكل حبيبات كروية مرتبطة إلى أغشية الشبكة.

الجسيمات الريبية لدى الخلايا طلائعيات النوى:

أظهرت دراسة الجسيمات الريبية بواسطة المجهر الإلكتروني أنها مكونة من تحت وحدتين منفصلتين هما: تحت الوحدة الكبيرة وتحت الوحدة الصغيرة. وبشكل عام، يبلغ معامل ترسيب الجسيمات الريبية لدى الخلايا طلائعيات النوى s 70 ، وتترسب تحت الوحدة الكبيرة عند 50s بينما تترسب تحت الوحدة الصغيرة عند 30s. تتكون تحت الوحدة الصغيرة من rRNA ذي معامل ترسيب 16s مؤلف من 1540 نيكليوتيداً، و يرتبط الـrRNA مع 21 نوعاً من متعددات الببتيد البسيطة. و تتكون تحت الوحدة الكبيرة من نوعين مختلفين من الـ rRNA هما (rRNA 23s) المؤلف من 2900 نيكليوتيداً و (rRNA 5s) والمؤلف من 120 نيكليوتيداً يتحد هذان النوعان من الـ rRNA مع 34 نوعاً من متعددات الببتيد المختلفة. يتم تركيب الجسيمات الريبية ضمن سيتوبلاسما خلايا الكائنات طلائعيات النوى (الشكل 6-6) و(الشكل6-7)



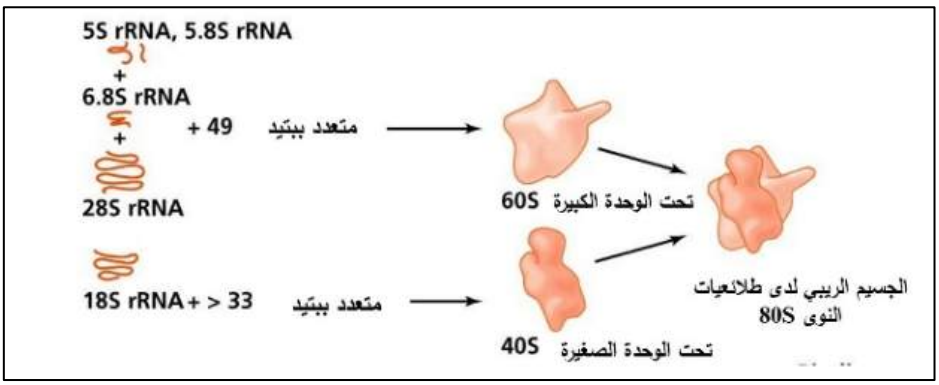
الشكل (6-6) : تركيب الجسيم الريبي لدى الكائنات طلائعيات النوى



الشكل (6-7): (a) صورة بالمجهر الإلكتروني للجسيمات الريبية و تحت وحداتها الحرّة لدى الجراثيم. (b) رسم تخطيطي لتحت الوحدات الصغيرة والكبيرة المكونة للجسيم الريبي لدى الكائنات طلائعيات النوى.

الجسيمات الريبية لدى الخلايا حقيقيات النوى:

تمتاز الجسيمات الريبية لدى الخلايا حقيقيات النوى بمعامل ترسيب 80s، وترسب تحت الوحدة الكبيرة عند 60s في حين ترسب تحت الوحدة الصغيرة عند 40s . تتكون تحت الوحدة الصغيرة من rRNA يمتاز بمعامل ترسيب 18s ويتألف من 1900 نيكليوتيداً، يتحد الـ rRNA مع 33 نوعاً من متعددات الببتيد المختلفة، أما تحت الوحدة الكبيرة فتتألف من ثلاثة أنواع من الـ rRNA (28s,5.8s,5s) تتحد مع 49 نوعاً من متعددات الببتيد الشكل(6-8).

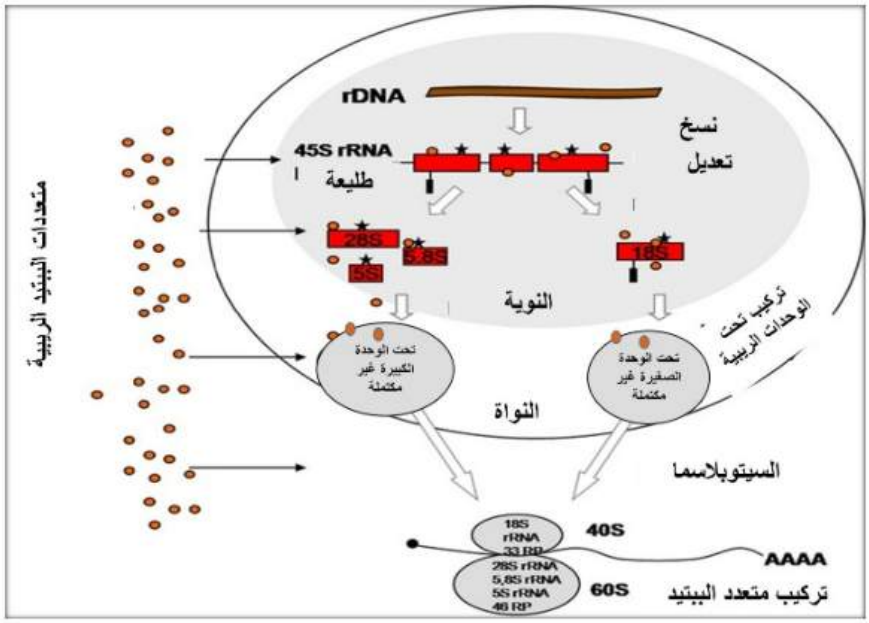


الشكل (6-8) : تركيب الجسيم الريبي لدى الكائنات حقيقيات النوى

وبشكل عام، تشكل الجسيمات الريبية القالب الذي تُركب عليه الببتيدات، لذا نجدها بغزارة في الخلايا النشطة بتركيب البروتينات مثل خلايا البنكرياس والمخ...

ويمكن تمييز ثلاثة مواقع مهمة على الجسيم الريبي خاصة من أجل تركيب البروتين هي موقع ارتباط الـ mRNA وموقعين لارتباط جزيئات tRNA الموقع A (أمينواسيتيل) والموقع P (ببتيديل) وكما ذكرنا سابقاً ستتم دراسة وظيفة كل موقع منها لدى دراسة تركيب البروتين. تُعَدُّ الجسيمات الريبية لدى الخلايا حقيقيات النوى، جزيئات معقدة مؤلفة من أربعة أنماط من الـ rRNA وقرابة 80 نوعاً من متعددات الببتيد. لذا فإن تركيبها يتطلب وجود تراكيب غزيرة من البروتينات والحموض النووية، وتتم معظم مراحل اصطناع الجسيمات الريبية ضمن النوية، إذ يتم انتساخ طليعة الـ rRNA (45s) وإجراء تعديلات عليه حيث يجزأ إلى جزأين اثنين يجري عليهما بعض التعديلات ليعطيا في النهاية النمط (18s) والنمط (5s) و(5.8s) و (28s) بالمقابل يتم تركيب متعددات الببتيد

الريبية في السيتوبلاسما وتنفذ إلى النواة ليتم تجميعها ذاتياً في تحت وحدتي الجسيم الريبي ومن ثمّ ينتقل الجسيم الريبي إلى السيتوبلاسما ليباشر عمله (الشكل 6-9).



الشكل (6-9): شكل تخطيطي يوضح مراحل تركيب الجسيمات الريبية لدى حقيقيات النوى. يتم نسخ طليعة الـ rRNA من النوية وتجرى عليه بعض التعديلات ومن ثمّ يرتبط مع متعددات الببتيد الخاصة و التي تم تركيبها في السيتوبلاسما تدخل متعددات الببتيد النواة و تتجمع مع الـ rRNA ثم تنتقل تحت الوحدات الصغيرة والكبيرة المتشكلة إلى السيتوبلاسما حيث تتحد مشكلة الجسيم الريبي الوظيفي.

ثالثاً: الجسيمات الحالة The lysosomes

اكتُشفت من قبل البيولوجي دي دوف De Duve عام 1951 وتعود تسميتها إلى اللاتينية حيث lises تعني يحلل و soma وتعني جُسيم، وهي عبارة عن عضيات من النظام الغشائي الداخلي الخاص بالخلايا حقيقيات النوى. مكونة من حويصلات غشائية صغيرة محاطة بغشاء رقيق تبدو بأشكال وحجوم مختلفة، تحوي بداخلها أنزيمات حالة

حامضية. وبشكل عام، فإنّ الجسيمات الحالة توجد في الخلايا حقيقية النوى وتزداد أعدادها في الخلايا الناشطة في الإفراز أو الاطراح كخلايا الكبد أو الكلية والخلايا المبطنة للأمعاء وخلايا الطحال ونقي العظم والخلايا البلعمية المنتشرة في الجسم والمختصة بمهاجمة الأجسام الغريبة الغازية لجسم الكائن الحيّ.

تُصنّف الجسيمات الحالة إلى ثلاثة أشكال:

1-الجسيمات الحالة الأولية: تنشأ من تبرعم أغشية جهاز غولجي وتبدو على شكل حويصلات غشائية ذات محتوى متجانس وتحتوي فقط على أنزيمات حالة حامضية.

2- الجسيمات الحالة الثانوية: وهي حويصلات غشائية كبيرة ذات محتوى غير متجانس تحوي أنزيمات حالّة حامضية ومواد في مراحل الهضم المختلفة، تنتج إما من اتحاد الجسيم الحال الأولي مع فجوة بلعمية ذات مواد مصدرها من خارج الخلية ودخلت إلى داخل الخلية بعملية إدخال خلوي لذا تسمى هذه الجسيمات الحالة بالفجوات الهضمية، أو تنتج عن اتحاد الجُسيمات الحالة الأولية مع مكونات الخلية الداخلية الهرمة بغرض هضمها لذا تدعى بالجسيم الحال الذاتي أو الفجوات البلعمية الذاتية.

4- **الأجسام المتبقية:** وهي ما تبقى من مواد غير مهضومة داخل الجسيمات الحالة الثانوية بعد توقف النشاط الأنزيمي بسبب عدم تأثرها بالأنزيمات الحالة، تطرح خارج الخلية بواسطة آلية الاخراج الخلوي أو من الممكن أن تبقى في الخلية، و يؤدي تراكمها إلى أعراض مرضية.

التركيب الكيميائي للجسيمات الحالة

أمكن باستخدام طرائق التثفيل التفاضلي عزل الجسيمات الحالة وتنقيتها و فصل أغشيتها عن محتواها. دُرِس محتوى الجسيمات الحالة عن طريق التحليل الكيميائي فتبيّن أنه يحوي الكثير من الأنزيمات الحالة الحامضية وهي أنزيمات إماهة حامضية تعمل عند درجة pH=5، تقوم بتفكيك وهضم جزيئات المواد الرئيسة (البروتينات، السكاكر، الليبيدات الحموض النووية). تم التعرف على أكثر من 50 أنزيماً حالاً مختلفاً مثل أنزيمات الفوسفتاز والبروتيآز والببتيداز والليباز وسلفتاز.

تتركب أغشية الجسيمات الحالة من طبقة مضاعفة من الليبيدات الفوسفورية يتوضع ضمنها بروتينات ضمنية ومحيطية تشتمل الأغشية على مضخات بروتونية (H+) تضخ البروتونات إلى أجواف الجسيم الحال بهدف المحافظة على درجة pH بين 5 و 4.5 داخل الجسيمات الحالة، وهي الدرجة الملائمة لعمل الأنزيمات الحالّة. تحدث عملية ضم وحدات سُكريّة لكامل المكونات الغشائية الموجودة على السطح الداخلي لغشاء الجسيم الحال حيث ترتبط البروتينات والليبيدات المكونة للغشاء مع سلاسل من السكاكر قليلة التعدد غير المتجانسة بواسطة روابط تكافؤية. إن هذه العملية تحمي غشاء الجسيم الحال من تأثير الأنزيمات الحالة الموجودة ضمنه وتمنعها من هضم الجزيئات الليبيدية والبروتينية المكونة للغشاء.

يُعَدُّ الجسيم الحال في الخلية بمثابة جهاز الهضم الخلوي، حيث تستخدم الخلية الأنزيمات الحالّة الموجودة ضمن الجسيمات الحالة في عملية الهضم الخلوي، كما تقوم بالدفاع عن الخلية ضد أي جسم غريب يدخلها ، وهنا يمكن تمييز نوعين من عمليات الهضم الخلوي حسب منشأ المواد المراد هضمها، فإمّا أن تكون المواد خارجية المنشأ وبذلك تدعى عملية الهضم بالبلعمة الغيريّة **(heterophagy)** أو أن تكون المواد داخلية المنشأ (هضم بعض المكونات الداخلية للخلية نفسها) وتدعى عندئذٍ عملية الهضم بالبلعمة الذاتية.

❖ **البلعمة الغيريّة**

من أهم وظائف الجسيمات الحالة أنها تقوم بهضم وتفكيك المواد الغريبة الملتقطة من قبل الخلايا بعملية البلعمة الغيريّة، كما أنها تُعَدُّ الوسيلة الوحيدة للتغذي عند الحيوانات الأوالي حرّة المعيشة كالمتحولات، وتساهم في إنجاز عدد من الوظائف الإفرازية كما في الغدة الدرقية.

وبشكل عام تتم عملية البلعمة الغيرية كما يلي:

1- تلتقط الخلية مواد خارجية المنشأ وتدخلها إلى داخل الخلية بعملية إدخال خلوي

2- تتشكل فجوة بلعمية

3- تلتحم الجسيمات الحالة الأولية مع أغشية الفجوات البلعمية وتتكون منهما جسيمات حالة ثانوية أو الجسيمات الحالة البلعمية المتغايرة، يتم ضمنها هضم وتفكيك المواد الغريبة

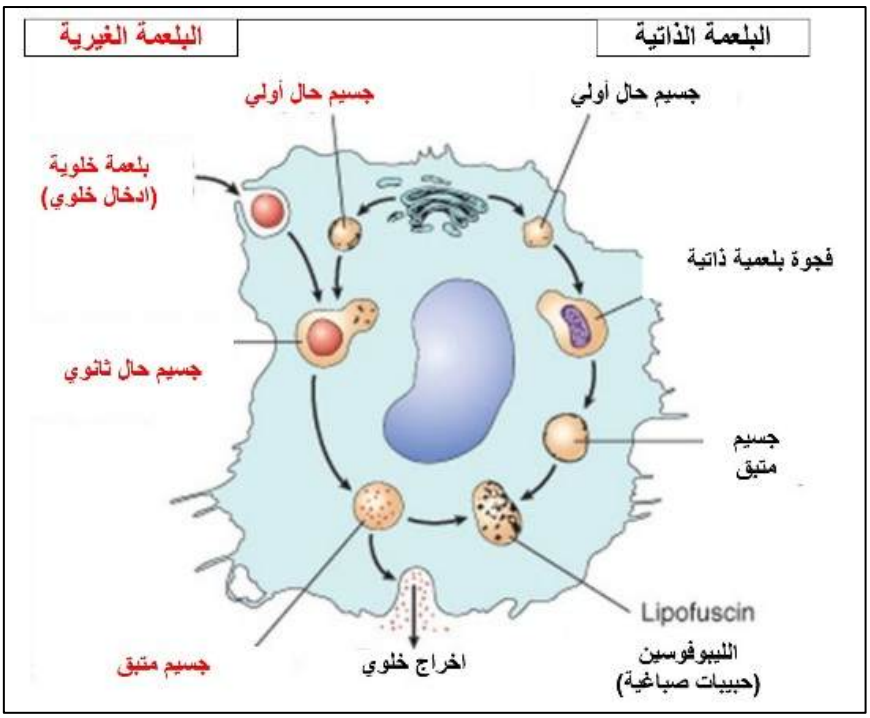
4- تنتقل الجزيئات الصغيرة كالسكاكر والحموض الأمينية الناتجة عن الهضم عبر غشاء الجسيم الحال إلى العصارة الخلوية لتُستخدم كمصدر للمواد المغذية للخلية

5- تتشكل الأجسام المتبقية من بقايا الأنزيمات الحالة التي تغيرت طبيعتها ومعها المواد التي لم تهضم.

6- إما أن تطرح الأجسام المتبقية خارج الخلية أو أن تتراكم ضمنها مما يساهم في تقدم عمر الخلية(الشكل6-10).

❖ البلعمة الذاتية

تشمل تفكيك المكونات الخلوية الداخلية كالعضيات السيتوبلاسمية الهرمة أو البنى الخلوية التي انتهى دورها وتريد الخلية التخلص منها، ويمكن التمييز بين نوعين من البلعمة حسب الحجم : بلعمة ذاتية كبيرة macrophgy و بلعمة ذاتية دقيقة microphagy وبشكل عام فإنّه تتم إحاطة العضيات (الجسيمات الكوندرية أو قطع صغيرة من العضيات السيتوبلاسمية) بغشاء مضاعف من الشبكة الداخلية البلاسمية وتتشكل بذلك الفجوة البلعمية الذاتية، تلتحم مع جسيمات حالة أولية مكونة جسيمات حالة ثانوية يتم فيها هضم العضيات الهرمة (الشكل 6-10) .



الشكل (6-10):شكل تخطيطي يوضح عملية البلعمة الغيرية و البلعمة الذاتيّة

تجدر الإشارة إلى أنّه تحدث البلعمة الذاتية بتوترات مختلفة وفي ظروف متنوعة فمثلاً: في أثناء نضج كريات الدم الحمراء تتحطم جميع محتوياتها الداخل خلوية بما فيها الجسيمات الكوندرية، وكذلك في أثناء عملية التحول الشكلي التي تمر بها بعض الأعضاء والأنسجة كاختفاء الذيل في أثناء تطور شراغيف الضفادع أو انسلاخ الجلد لدى الحشرات فمثلاً، تحدث لدى الضفادع عملية بلعمة ذاتية كثيفة لأنسجة الذيل وتبدأ الخلايا بتكوين فجوات بلعمية ذاتية تهضم جزءاً كبيراً من مكوناتها وفي مرحلة تالية تتمزق أغشية الفجوات الهاضمة وتنتشر الأنزيمات الحالة في جميع أرجاء الخلايا مما

يؤدي إلى موت الخلايا و في مرحلة تالية يتم هضم حطام الخلايا من قبل خلايا بلعمية تقوم بعملية بلعمة غيريّة، منظفة بهذا الشكل النسيج المتموت. تُحَرّض عملية الهضم النسيجي الكثيف هرمونات تفرز في أثناء التحول الشكلي كهرمون التيروكسين لدى الضفادع وتنشط هذه الهرمونات تركيب الأنزيمات الحالة الحامضية وتشكيل الجسيمات الحالة.

وبعد أن تعرفنا على دور ووظيفة الجسيمات الحالة لنرى ما يحدث في حال غياب أو حدوث قصور في أنزيم ما من أنزيمات الجسيمات الحالة النوعية.

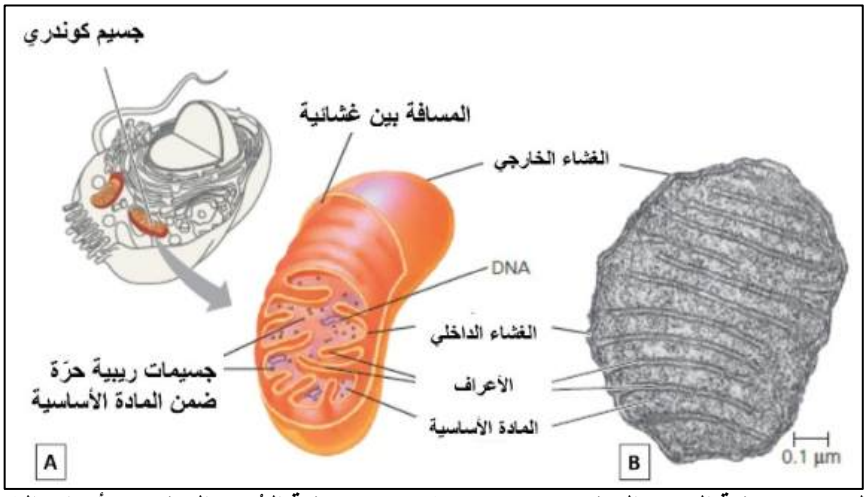
يؤدي غياب أحد الأنزيمات الحالة الوظيفية النوعية إلى تراكم في المادة النوعية الخاصة بذلك الأنزيم في الخلايا، مما يسبب أعراضاً مرضية خاصة فمثلاً، ينجم مرض النقرس عن اضطراب في استقلاب البيورينات يؤدي إلى تراكم حمض البول Uric Acid، داخل المفاصل على هيئة بلورات إبرية الشكل ، مما يسبب مظاهر التهابية وألماً شديداً، ويمكن أن يتجمع حمض البول أيضاً تحت الجلد في جيوب أو في القناة البولية على شكل حصيّات كلوية. وكردّ فعل إيجابي من الجسم لتلك البلورات المتراكمة ضمن السائل الزلالي للمفاصل فإنه تتم بلعمة تلك البلورات من قبل الخلايا البيضاء الحُبيبية وتتكون لها فجوات بلعمية تتحد بدورها مع الجسيمات الحالة الأولية مكونة فجوات هاضمة. تنشط الأنزيمات في نزع البروتينات المغلفة للبلورات وبذلك تصبح البلورات معرضة للغشاء

الحال، ويؤدي احتكاك البلورات بالغشاء إلى تمزقه مؤدياً إلى تحرر الأنزيمات الحالّة وطرحها في السائل الزلالي للمفاصل مما يسبب آلاماً مفصلية حادة.

رابعاً: الجسيمات الكوندرية، الميتوكوندريات The Mitochondria

توجد الجسيمات الكوندرية في جميع الخلايا حقيقية النوى بما فيها النبات والحيوان والفطريات وكذلك معظم الكائنات وحيدات الخلية، و تُعَدُّ مقر الأكسدة التنفسية في الخلية. وهي عبارة عن عضيات يتراوح طولها بين 0.5 إلى 2 ميكرون وقطرهـا بين 0.1 إلى 0.5 ميكرون، يمكن رؤيتها بواسطة المجهر الضوئي إلاّ أن دراستها باستخدام المجهر الالكتروني أدت إلى التعرف على بنيتها الدقيقة. يحيط بالجُسيم الكوندري الواحد غشاءان : خارجي وداخلي يفصل بينهما حيّز غشائي، إذ يتضاعف الغشاء الخارجي نحو الداخل مشكلاً غشاءاً له ذات الثخانة هو الغشاء الداخلي، ينثني الغشاء الداخلي نحو مركز الجُسيم الكوندري من أجل زيادة مساحة السطح الكلي للغشاء الداخلي، مشكلاً ما يدعى بالأعراف (cristae) (الشكل6-11). لذا يمكن القول بأنّ للجسيمات الكوندرية بنية حُجيرية، أي أنها مقسمة إلى حُجرات ناجمة عن التنظيم الغشائي المضاعف فيها. يمكن تمييز خمس حُجرات رئيسة في الجُسيم الكوندري الواحد هي: الغشاء الخارجي، المسافة بين الغشائيّة (الحيّز بين الغشاءين)، الغشاء الداخلي، الأعراف (الانثناءات

المتشكلة عن الغشاء الداخلي)، والمادة الأساسية (matrix)(المسافة ضمن الغشاء الداخلي) (الشكل6-11).



الشكل (6-11) بنية الجسيم الكوندري:A رسم توضيحي يبين بنية الجُسيم الكوندري بأجزائه الخمسة B صورة بالمجهر الالكتروني النافذ

تتميز الجسيمات الكوندرية عن باقي عضيات الخلية بالعديد من الصفات الخاصة، إذ يختلف عددها وفقاً للمتعضية وللنمط الخلوي المدروس، فهناك أنسجة تملك جُسيماً كوندرياً واحداً فقط في كل خلية من خلاياها، بالمقابل نجد بعض النسج كالقلب والعضلات الهيكلية وكذلك البنكرياس تملك آلاف الجسيمات الكوندرية ضمن الخلية الواحدة، كما تمتاز الجسيمات الكوندرية بالبنية الحُجيرية التي تقوم بوظائف متخصصة، ولعل الصفة الأكثر تميزاً هي امتلاك الجسيمات الكوندرية جينومها الخاص والمستقل عن

الـDNA الموجود ضمن النواة، فضلاً عن وجود جسيمات ريبية ضمن مادتها الأساسيّة، وبذلك فهي تملك القدرة على اصطناع بروتيناتها الخاصة بها.

DNA الجسيمات الكوندرية:

تمتلك الجسيمات الكوندرية DNA خاصاً بها، فبينما تتميز الخلايا حقيقيات النوى بوجود معظم الـ DNA الخلوي ضمن بنى خاصة تدعى بالصبغيات، و تكون هذه البنى موجودة ضمن النواة ومحاطة بالغشاء النووي، فإن الجسيمات الكوندرية أيضاً تتميز بوجود كمية قليلة من الـDNA في مادتها الأساسية، وهو مستقل عن ذلك الموجود في النواة، ويدعى بـِ DNA الميتوكوندريا أو mtDNA. يتميز DNAالجسيم الكوندري بأنه جزيء حلقي وصغير ويقع في منطقة تدعى بالنكليوئيد (Nucleoid)، أو الحيّز النووي، إذ لا وجود لغشاء يفصل هذه المنطقة عن بقية أجزاء الجُسيم الكوندري ويمكن أن تحوي منطقة الحيّز النووي من 4–10 نسخ من الـ DNA. يكون ترتيب الأسس في DNA الجُسيم الكوندري مختلفاً عما هو عليه في الـ DNA النووي، حيث يضم 37 مورثة مسؤولة عن الوظائف الأساسية التي تقوم بها الجسيمات الكوندرية، تؤمن 13 مورثة منها التعليمات الخاصة لاصطناع الأنزيمات التي تتدخل في تفاعلات الفسفرة التأكسدية، بينما تزود المورثات الباقية التعليمات اللازمة لاصطناع الأنماط المختلفة من الـRNA الناقل (tRNAs) والـRNA الريبوزومي (rRNAs). وعلى الرغم من أن تضاعف DNA الجُسيم الكوندري يحصل

بشكل ذاتي، إلاّ أنّ هذا الأمر لا يحصل من دون مساعدة رئيسة من الـ DNA الموجود في النواة، إذ أن أنزيمي الـ DNA بوليميراز والـRNA بوليميراز يتم تركيبهما في السيتوبلاسما وفق الشيفرة الوراثيّة القادمة من النواة، ثم يعبر هذان الأنزيمان إلى داخل الجُسيم الكوندري للقيام بعمليات التضاعف والنسخ، وبالتالي يمكن القول بأن الجسيمات الكوندرية تتمتع باستقلالية جزئية في بناء بعض النواتج، فمثلاً يتم نسخ الـRNA الريبوزومي (rRNA) اعتباراً من mtDNA بينما يرمز الـ DNA الموجود في النواة للبروتينات العائدة لهذا الجسيم الريبي وتتم ترجمتها في سيتوبلاسما الخلية، ثم تنتقل إلى الجسيم الكوندري لتتحد مع rRNA وتُكوّن الجسيمات الريبية الخاصة بالجسيمات الكوندرية. يتضاعف DNA الجُسيم الكوندري خارج طور التضاعف (S) الخاص بتضاعف صبغيات العضويات الراقية (*كما سيرد معنا لاحقاً*)، و يتم توريثه عن طريق سيتوبلاسما البيضة فقط، مما يعني أن DNA الجُسيم الكوندري يورّث من الأم فقط، ولا تساهم الجسيمات الكوندرية الموجودة في النطفة في عملية التوريث هذه، بسبب إتلاف البيضة لجميع الجسيمات الكوندرية القادمة من النطفة بعد الإلقاح.

التركيب الكيميائي للجسيمات الكوندرية:

أمكن تحديد التركيب الكيميائي لكل جزء من أجزاء الجُسيم الكوندري عن طريق التحطيم ثم بواسطة التثفيل التفاضلي مما سمح بالحصول على الأجزاء معزولة بشكل منفصل ومن ثمّ تحليلها و دراستها. وعلى الرغم من أنّ التركيب الكيميائي للغشائين

متشابه (طبقة مضاعفة من الليبيدات الفوسفورية تتخللها بروتينات مختلفة)، إلاّ أنّ كلاهما له خصائصه المميزة. حيث تبيّن وجود اختلاف واضح بين مكونات الغشائين. يحتوي الغشاء الخارجي على نسب متساوية من البروتينات والدسم في حين تزداد نسبة البروتين في الغشاء الداخلي لتصل إلى 80% و تتمثل بأنزيمات نازعة للهيدروجين، و نواقل الإلكترونات وأنزيمات تركيب الـ ATP ومضخات البروتونات في حين تغيب مثل تلك الأنزيمات في الغشاء الخارجي وتلاحظ بالمقابل أنزيمات تتوسط عملية تحول الليبيدات مثل أنزيم أستيل كوأنزيم –A–سينتيتاز. يعكس الاختلاف في التركيب الكيميائي وخاصة نوع البروتينات الاختلاف في الوظيفة، إذ أنها تحدد نوع الوظيفة التي يقوم بها كلا الغشائين. كما تختلف بنية مكونات كل من الغشاء الداخلي والمادة الأساسية مما يعكس الاختلاف في الوظيفة أيضاً ، إذ تحوي المادة الأساسية الأنزيمات الضرورية لأكسدة حمض البيروفيك والحموض الدسمة، وكذلك أنزيمات حلقة كريبس بالإضافة إلى وجود الـ mtDNA والجسيمات الريبية الحرّة وبعض الحموض الريبية النووية الناقلة.

يمكن تقسيم البروتينات التي يتكون منها الغشاء الداخلي إلى ثلاث مجموعات حسب الوظيفة التي تقوم بها وهي كالآتي:

أ. بروتينات تتوسط التفاعلات التأكسدية في السلسلة التنفسيّة:

مثل الأنزيم النازع للهيدروجين الـ NADH (NADH dehydrogenase) اختصاراً من مركب ثنائي نيكليوتيد الأدينين النيكوتين أميد، الذي يوجد ضمن الغشاء الداخلي للجُسيم

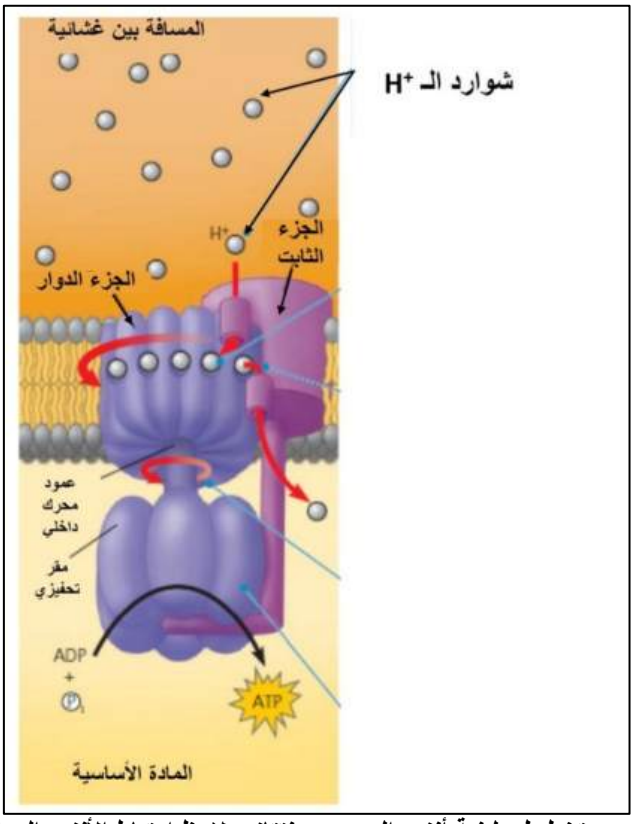
الكوندري ويتوسط نقل الإلكترون من الـNADH إلى مستقبل يدعى بمتمم الأنزيم Q أو كوأنزيم Q (coenzyme Q). يُعَدّ هذا الأنزيم أنزيم البدء الذي تبدأ به تفاعلات الفسفرة التأكسدية وسلسلة نقل الإلكترون. ومن البروتينات التي تتوسط تفاعلات الأكسدة التنفسيّة السيتوكرومات (Cytochromes) وهي بشكل عام، بروتينات غشائية تحوي زمرة الهيم وتساهم في عملية نقل الإلكترون حيث تملك القدرة على إجراء عملية الأكسدة والإرجاع نظراً لاحتوائها على ذرة الحديد التي يمكن أن تنتقل من حالة الحديدي Fe^{2+} إلى حالة الحديد Fe^{3+} وبالتالي تسهم في نقل الإلكترونات، وهناك أنواع مختلفة من هذه البروتينات مثل: السيتوكروم c، والسيتوكروم a، والسيتوكرومa_3 ، والسيتوكروم c_1 ، والسيتوكروم b.

ب. أنزيم تركيب الأدينوزين ثلاثي الفوسفات ATP أو الـ ATP سنتيتاز (ATP synthase)

يرتبط أنزيم الـ ATP سنتيتاز إلى الناحية الداخلية للغشاء الداخلي للجُسيم الكوندري، ويُعَدُّ من الأنزيمات المهمة جداً في الخلية، إذ يتم بواسطته تأمين الطاقة اللازمة للخلية. ويتم تركيب جزيئات الأدينوزين ثلاثي الفوسفات الـ ATP اعتباراً من الأدينوزين ثنائي الفوسفات (ADP) والفوسفات الاعضوي (P_i) وبتدخل أنزيم الـ ATP سنتيتاز وينتج عن التفاعل انطلاق طاقة على شكل بروتيوم أو +H (الشكل 6-12).

ت. بروتينات ناقلة نوعيّة:

وهي بروتينات تقوم بتنظيم نقل المواد إلى المادة الأساسية في الجسيم الكوندري ومنها إلى أماكن مختلفة أخرى.



الشكل (6-12): رسم تخطيطي لبنية أنزيم الـATP سنتتاز . لاحظ ارتباط الأنزيم إلى الناحية الداخلية من الغشاء الداخلي للجُسيم الكوندري.

وظائف الجسيمات الكوندرية:

تقوم الجسيمات الكوندرية بوظائف مهمة في الخلية، ويدل غناها بالأنزيمات على شدة نشاطها الحيوي، فهي تتوسط مجموعة واسعة من العمليات الخلوية كالتمايز الخلوي، والموت الخلوي بالإضافة إلى السيطرة على الدارة الخلوية والنمو. ولعل أهم وأبرز الوظائف التي تقوم بها الجسيمات الكوندرية هي الأكسدة التنفسية وإنتاج الطاقة. حيث

لوحظ أن الجسيمات الكوندرية تنشط بوجود الأكسجين، ففي **الوسط الهوائي:** تكون الجسيمات الكوندرية متطورة وكثيرة العدد و كبيرة الحجم و ذات أعراف نامية، في حين أنه في **الوسط اللاهوائي:** تكون الجسيمات الكوندرية غير متطورة، قليلة العدد و صغيرة الحجم و ذات أعراف ضامرة، و بالتالي فهي تُعَدُّ مقراً للأكسدة التنفسية وإنتاج الطاقة.

وبشكل عام، تتم عملية التنفس الخلوي في جميع الخلايا الحيّة ضمن الجسيمات الكوندرية. ويمكن تعريف **عملية التنفس** بأنّها: ظاهرة حيوية يتم خلالها هدم الغلوكوز كلياً بوجود الأكسجين ويتم من خلالها إنتاج كمية كبيرة من الطاقة، تضيع 60 بالمئة منها على شكل حرارة بينما يتم تحويل 40 بالمئة منها إلى ATP التي تشكل طاقة قابلة للاستعمال من قبل الخلية في مختلف نشاطاتها الحيوية (التقلص العضلي، الاصطناع الحيوي ،النقل الفعّال للشوارد من خلال الأغشية البيولوجيّة..).

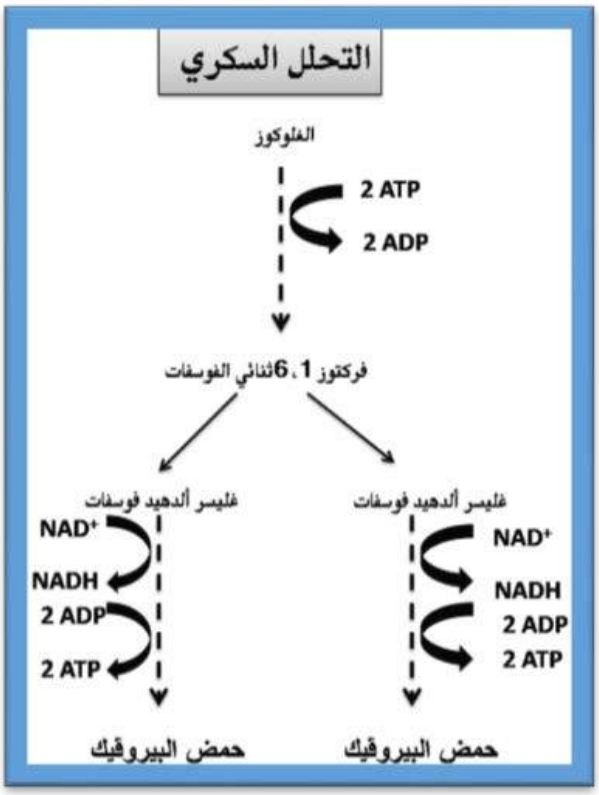
وبذلك فإنّ الهدف الرئيس من عملية التنفس الخلوي هو إنتاج الـ ATP. و يمكن التعبير عن عملية التنفس بالمعادلة المبسطة الآتية، والتي تشمل كافة العوامل التي تؤدي دوراً في هذه العملية:

من المعروف بأنّ عملية التنفس الخلوي هي عملية هوائية ؛ أيّ أنّها تتطلب وجود الأكسجين لإنجازها، وكما توضح المعادلة فإنّ الماء هو أحد نواتج هذه العملية حيث ينتج من نقل ذرات الهيدروجين من الغلوكوز إلى الأكسجين، ويؤدي هذا الانتقال دوراً حاسماً في عملية التنفس الخلوي، ولهذا السبب فإنّ وجود الأكسجين أساسي من أجل إنتاج الطاقة في أثناء هذه العملية. يُعَدُّ السكر أحد العوامل الأوليّة في عملية التنفس الخلوي، ويستخدم عادة الغلوكوز كمصدر رئيس للطاقة حيث ينتج عن هدم جزيئة غلوكوز واحدة 38 جزيئة ATP. لا يتم هذا التفاعل داخل الخلايا دفعة واحدة وإلاّ كان مدمراً، بل يحدث على عدة مراحل تنطلق خلالها الطاقة الكامنة في جزيء السكر على دفعات صغيرة يمكن للخلايا الاستفادة منها حيوياً. ويمكننا تمييز ثلاث مراحل في عملية الأكسدة الهوائية التنفسية هي كالآتي:

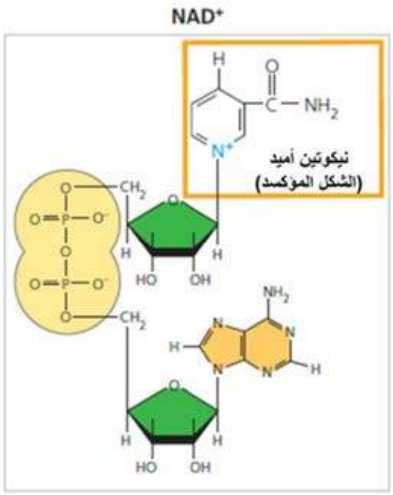
المرحلة الأولى، أكسدة حمض البيروفيك:

وهي الخطوة الأولى في هدم السكر ويتم خلالها تحطيم جزيء الغلوكوز إلى جزيئتين من حمض البيروفيك وجزيئتين من الـ NADH وإنتاج 4 جزيئات من الـ ATP، وفق تسلسل التفاعلات الخاصة بالتحلل السكري (Glycolysis). **تتم هذه العملية في سيتوبلاسما الخلية** (الشكل 6-13). بعدها يتم تحول حمض البيروفيك إلى أستيل كوأنزيم–A (acetyl CoA) بنتيجة نزع الكربوكسيل التأكسدي وبوجود كوأنزيم–A والنيكوتين أميد أدينين ثنائي

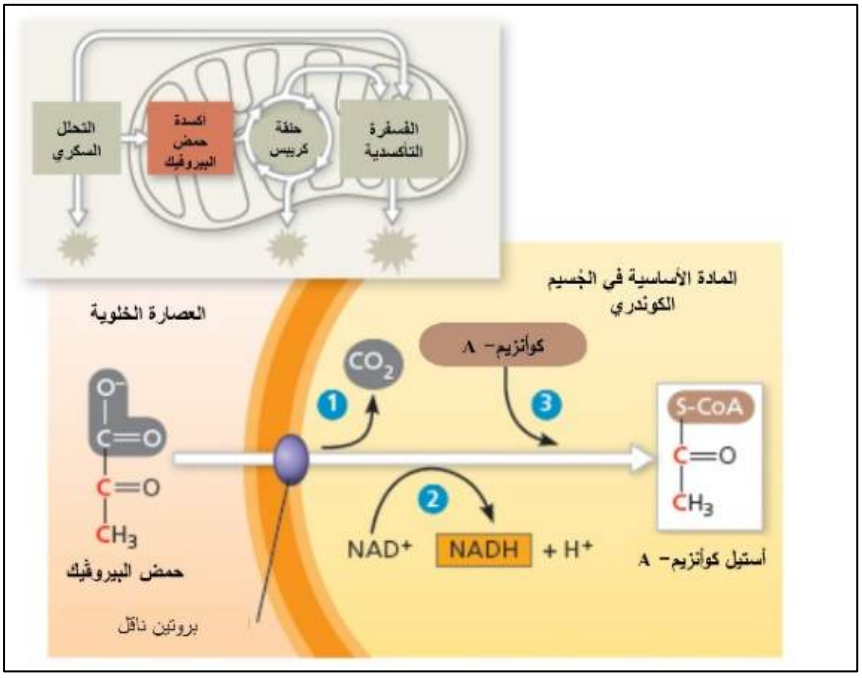
النكليوتيد (NAD^+) (الشكل 6-14)، تجري هذه العملية على عدة مراحل **وتتم في المادة الأساسية للجسيمات الكوندرية** (الشكل 6-15). بعد تشكل أستيل كوأنزيم–A يتم الانتقال إلى المرحلة الثانية والتي تُعْرف بحلقة الليمون أو حلقة كريبس (Citric Acid Cycle، Krebs Cycle).



الشكل (6-13) مخطط مبسط لعملية التحلل السكري والتي ينتج عنها جزيئتين من حمض البيروفيك و جزيئتين من NADH و 4 جزيئات من الـ ATP



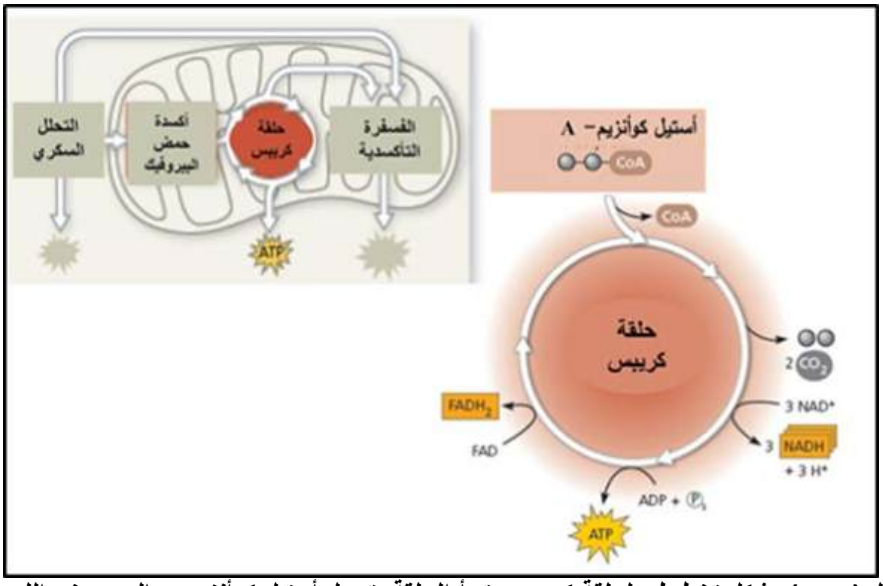
الشكل (6-14): بنية جزيء النيكوتين أميد أدينين ثنائي النكليوتيد NAD^+. يتألف الجزيء من نكليوتيدين مرتبطين بواسطة زمر الفوسفات، ويُعد النيكوتين أميد من الأسس الآزوتية، يوجد في جميع خلايا الكائنات الحيّة ويعمل كمستقبل للالكترونات. يلاحظ في التفاعلات الاستقلابية التناوب بين شكليه المؤكسد (NAD^+) والشكل المرجع المانح للالكترونات (NADH).



الشكل(6-15): مخطط يبين عملية أكسدة حمض البيروفيك وتحوله إلى أستيل كوأنزيم-A (acetyl CoA) بنتيجة نزع الكربوكسيل التأكسدي وبوجود كوأنزيم-A والنيكوتين أميد أدينين ثنائي النكليوتيد (+NAD)، تجري هذه العملية في المادة الأساسية من الجسيمات الكوندرية.

المرحلة الثانية، حلقة كريبس:يتم في هذه المرحلة أكسدة أستيل كوأنزيم–A إلى ثنائي أكسيد الكربون والماء وفق ما يسمى بحلقة كريبس أو حلقة الليمون أو حلقة الحموض ثلاثية الكربوكسيل، وتُعَدُّ المصدر الأساسي لإمداد الخلايا بالطاقة في الظروف الهوائية إضافة إلى تشكل عدد من المركبات البينية التي تدخل في العمليات التركيبية الحيوية المهمة، تجري تفاعلات هذه الحلقة **ضمن المادة الأساسية للجسيمات الكوندرية**، حيث توجد جميع الأنزيمات المشاركة في عمليات الأكسدة المتتالية للحموض ثنائية وثلاثيّة الكربوكسيل الناتجة عن التفاعل. وتكون الحصيلة النهائية للتفاعلات المتتالية في حلقة كريبس هي تحويل **جذري الأستيل كوأنزيم–A** إلى 4 جزيئات ثنائي أكسيد الكربون، (انتزاع الالكترونات العاليّة الطاقة من جزيئة الأستيل كوأنزيم–A) ونقل 16 ذرة من الهيدروجين إلى الجزيئات المستقبلة (جزيئات حاملة للالكترونات عالية الطاقة وهي 6

جزيئات $NADH_2$ و جزيئتين $FADH_2$ يحدث ذلك من خلال إرجاع متممات أنزيم قابلة لحمل أربعة أشفاع من الالكترونات هي(NAD و FAD) (الـ FAD هو: فلافين ثنائي نكليوتيد الأدينين وهو عامل مساعد مؤكسد) إضافة إلى تشكل جزيئتين من الـATP من عملية الفسفرة في مستوى المداد (الشكل 6-16) .



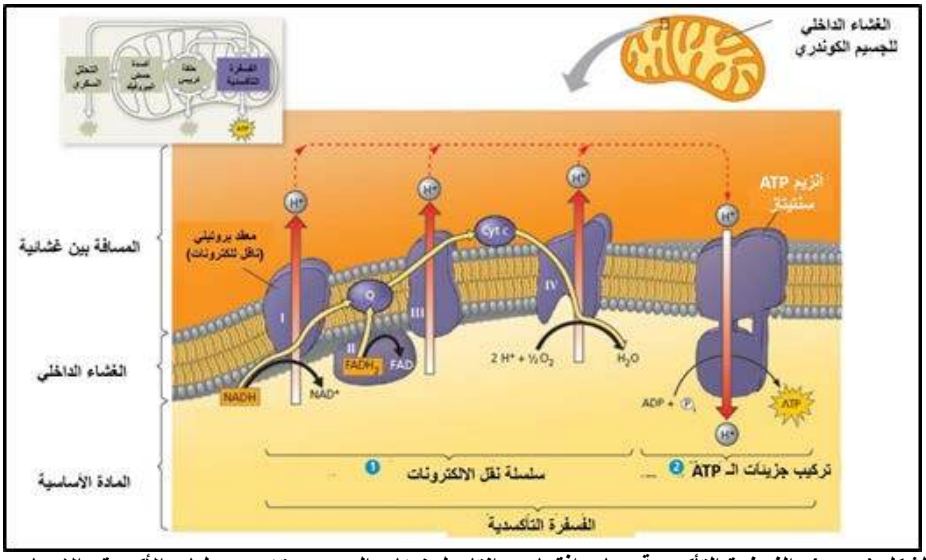
الشكل (6-16): شكل تخطيطي لحلقة كريبس. تبدأ الحلقة بتحول أستيل كوأنزيم-A إلى حمض الليمون وهو الناتج الأولي لهذه الحلقة تجري تفاعلات هذه الحلقة ضمن المادة الأساسية للجسيمات الكوندرية وينتج عنها مجموعة من الحموض ثلاثية الكربوكسيل، التي تستخدم في العمليات التركيبية الحيوية المهمة في الخلية وتكون الحصيلة النهائية للتفاعلات المتتالية في حلقة كريبس هي تحويل جذري الأستيل كوأنزيم-A إلى 4 جزيئات ثنائي أكسيد الكربون، و 6 جزيئات NADH و جزيئتين FADH2يإضافة إلى تشكل جزيئتين من الـATP

المرحلة الثالثة، الفسفرة التأكسدية و سلسلة نقل الإلكترونات

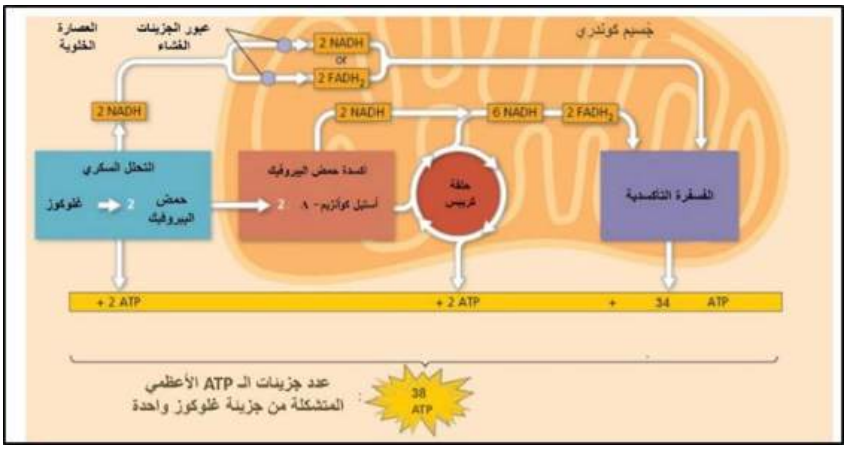
Electron Transport Chain:

تتم هذه العملية في **الغشاء الداخلي للجُسيم الكوندري**، وتُعَدُّ مسؤولة عن تركيب 90% من مجمل جزيئات الـATP خلال عملية الهدم التأكسدي غير المباشر للغلوكوز. إنّ معظم طاقة جزيء الغلوكوز والمتمثلة بذرات الهيدروجين تنتقل بوساطة أنزيمات الديهيدروجيناز إلى المركبات المساعدة NAD وFAD. تتعرض هذه المركبات إلى عمليات أكسدة في الغشاء الداخلي للجُسيم الكوندري يتم خلالها نقل الإلكترونات الناتجة عن شطر ذرات الهيدروجين عبر سلسلة من النواقل البروتينية إلى المتقبل النهائي وهو الأكسجين. وخلال انتقال الإلكترونات من ناقل إلى آخر (تفاعلات أكسدة وإرجاع) تحصل عملية عبور متدرج للالكترونات من المستوى الطاقي الأعلى إلى المستوى الطاقي الأخفض وتتحرر بذلك طاقتها المختزنة بشكل متتالٍ التي تبلغ وسطيّاً 56600 كالوري. وبشكل عام، تنطلق سلسلة نقل الالكترونات بدءاً من أكسدة NADH ويشارك فيها جملة من المركبات الناقلة للالكترونات والخاصة بالجسيمات الكوندرية كالسيتوكرومات و الكوأنزيم Q. وترافق هذه العملية ضخ البروتونات الناتجة إلى السطح الخارجي من الغشاء الداخلي للجسيمات الكوندرية، تُنَشّط البروتونات أنزيم تركيب الـATP المتوضع في الغشاء الداخلي للجسيمات الكوندرية ويتشكل بذلك جزيء ATP انطلاقاً من ADP و الفوسفور. وهكذا يتشكل جزيء ATP لدى مرور زوج الكترونات من خلال كل حلقة على طول السلسلة (الشكل 6-17).

فتتشكل ثلاثة جزيئات ATP لكل جزيء NADH. أما الفسفرة التأكسدية لمركب $FADH_2$ فهي تترافق بتشكيل جزيئتين من الـ ATP خلال مرور الإلكترونات في كل حلقة. وبالتالي فإنّه **يترافق مع الهدم غير المباشر لجزيء الغلوكوز تشكل 38 جزيئة ATP** (الشكل 6-18).



الشكل (6-17): الفسفرة التأكسدية وما يرافقها من إنتاج لجزيئات الـ ATP. تؤدي عمليات الأكسدة والإرجاع للمركبات NADH وFADH. إلى عبور متدرج للالكترونات من المستوى الطاقي الأعلى إلى المستوى الطاقي الأخفض وتتحرر الطاقة المختزنة في هذه المركبات بشكل متتالٍ، ترافق هذه العملية ضخ البروتونات الناتجة إلى السطح الخارجي من الغشاء الداخلي للجسيمات الكوندرية، تُنشّط البروتونات أنزيم *تركيب الـ*ATP المتوضع في غشاء الجسيمات الكوندرية ويتشكل بذلك جزيء ATP انطلاقاً من ADP و الفوسفور.



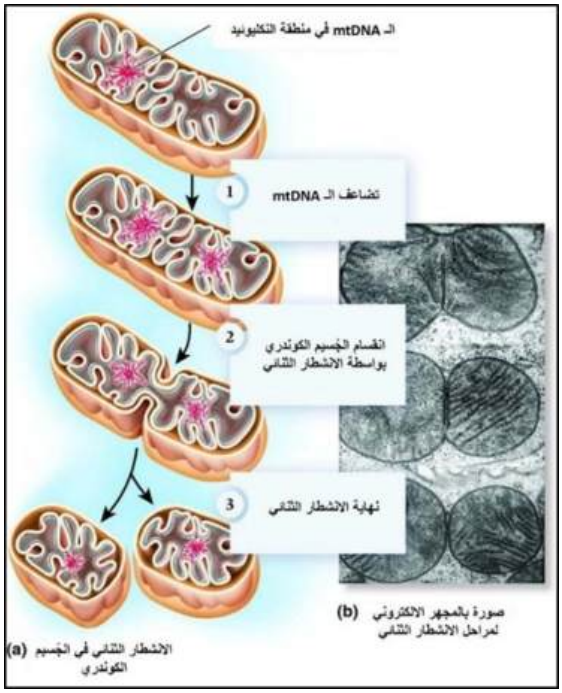
الشكل (6-18): رسم تخطيطي يوضح عدد جزيئات الـ ATP الأعظمية المتشكلة عن الهدم غير المباشر لجزيء غلوكوز واحد. يرافق عملية التحلل السكري إنتاج جزيئتين من الـ ATP و جزيئين NADH. وينتج عن أكسدة 2 من حمض البروفيك جزيئين NADH وينتج عن حلقة كريبس جزيئتين من الـ ATP وتؤدي الفسفرة التأكسدية لمركبNADH إلى تشكل 3 جزيئات ATP لكل جزيء و جزيئتين من الـ ATP لمركب FADH2 بالتالي فإنّه يترافق مع الهدم غير المباشر لجزيء غلوكوز واحد تشكل 38 جزيئة ATP.

ومن هنا يتضح الدور المهم و الفعّال الذي تقوم به الجسيمات الكوندرية في التنفس الهوائي والأكسدة الهوائية وتركيب الـATP في الخلايا حقيقيات النوى.

❖ تجديد الجسيمات الكوندرية:

يشبه تكاثر أعداد الجسيمات الكوندرية في الخلية وازديادها التكاثر عند الجراثيم، فعندما تصبح هذه الجسيمات كبيرة الحجم يتم أولاً تضاعف للـ mtDNA الخاص بها، يليه انقسام بواسطة الانشطار الثنائي المستعرض (Binary fission). وبشكل عام، فإنّه تحدث استطالة الأغشية الخلوية ونمو للأعراف لتمتد خلال المادة الأساسية إلى أن تتصل وتلتحم بالغشاء الداخلي للجهة المقابلة، وبذلك تُكوّن حداً فاصلاً يؤدي في النهاية إلى

تقسيم المادة الأساسية إلى حجرتين ثم ينغمد الغشاء الخارجي عند مستوى التقسيم ويظل في الانغماد إلى الداخل إلى أن ينقسم الجُسيم الكوندري إلى وحدتين مستقلتين، تتم هذه المرحلة تحت سيطرة نواة الخلية، تلي هذه المرحلة تمايز الجسيمات الكوندرية المتشكلة إلى الشكل الفعّال الوظيفي وفي هذه المرحلة يكون اعتماد الجسيمات الكوندرية على مادتها الوراثية نفسها أي على الـ mtDNA ويتم التنسيق بينها وبين DNA النواة من أجل اصطناع أنزيمات التنفس (الشكل 6-19).



الشكل (6-19): الانشطار الثنائي في الجسيم الكوندري. (a) رسم تخطيطي يوضح مراحل انشطار الجُسيم الكوندري. يقابله (b) صورة بالمجهر الإلكتروني تظهر عملية الانشطار وتشكيل جُسيمين كوندريين حديثين.

❖ اضطرابات الجسيمات الكوندرية mitochondrial disorders

يفوق احتمال حصول طفرات في mtDNA احتمال حدوث الطفرات في DNA الموجود في النواة بأضعاف المرات، و ذلك بسبب كون النواة في الخلية الواحدة تملك نسختين فقط من الذخيرة الوراثية النووية، بينما تحتوي الخلية ما يزيد على الألف نسخة من الذخيرة الوراثيّة الميتوكوندرية، باعتبار أن كل جُسيم كوندري يحوي 10 نسخ من mtDNA وسطيّاً ويوجد في كل خلية مئات الجسيمات الكوندرية. تؤدي الطفرات ضمن mtDNA إلى نشوء أمراض وراثية معينة، وبما أن وظيفة الجسيمات الكوندرية الرئيسة هي تركيب الـ ATP فإنّ أعراض اضطرابات الجسيمات الكوندرية عادة تصيب الأعضاء والأنسجة التي تعتمد الأكسدة الهوائية وإنتاج الـATP مثل المخ والعضلات الهيكلية وعضلات القلب والعين والتي تحوي عدداً كبيراً من الأجسام الكوندرية. يُعَدُّ مرض ليبر Leber أو ما يدعى بالاعتلال العصبي البصري العائلي أحد الأمراض الناتجة عن حدوث طفرة ضمن mtDNA والذي تتجلى أعراضه بعمى مفاجئ ناجم عن ضمور في العصب البصري مع ظهور بعض الأمراض العصبية.

تورّث اضطرابات الجسيمات الكوندرية عن طريق الأمهات فقط لأن البويضة هي التي تزود البيضة الملقحة بالسيتوبلاسما والجسيمات الكوندرية، ولهذا فإنّ جميع ذرية الأم

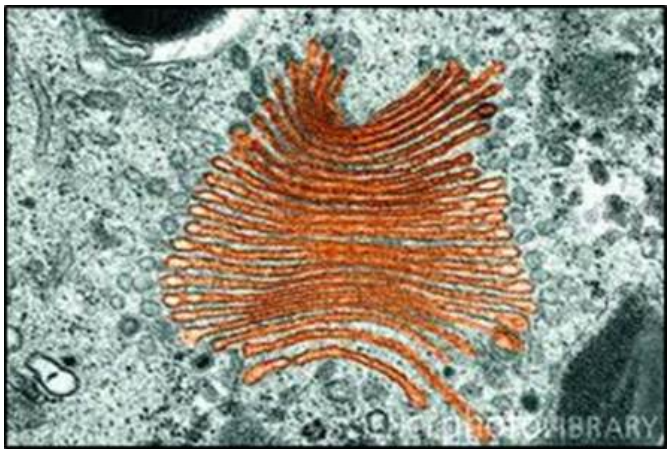
الحاملة للطفرة الوراثية سواء كانوا ذكوراً أم إناثاً سيحملون الطفرة نفسها حتماً أما الأب الحامل للطفرة الوراثية فإنّه لا يورثها لأي من ذريته.

خامساً: جهاز غولجي The Golgi apparatus

يُشكل جهاز غولجي جزءاً من النظام الغشائي الداخلي، سُمى نسبة إلى مكتشفه الطبيب الإيطالي غولجي عام 1898م. يرتبط بعلاقة وثيقة مع الشبكة السيتوبلاسمية الداخلية الحبيبية يؤدي دور الوسيط في عمليات النقل و الإفراز.

بنية جهاز غولجي:

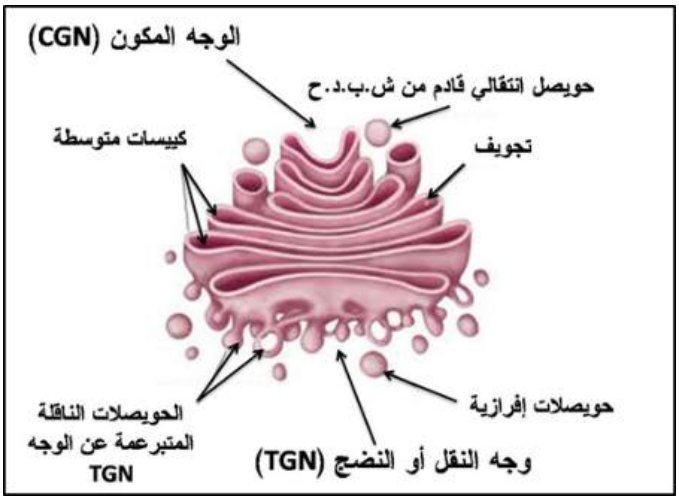
يتكون من بنى شبكية الشكل يطلق عليها اسم الجسيمات الشبكية أو حزم غولجي، تشكل بمجموعها جهاز غولجي. يتركب الجُسيم الشبكي الواحد من عدد من الكييسات أو الصفائح الغشائية المجوفة المتراصة فوق بعضها بعضاً والتي تفصل بينها مسافات بينية. تكون الصفائح الغشائية محدبة من جهة ومقعرة من الجهة الأخرى ، ويوجد بالقرب منها العديد من الحويصلات الغشائية (الشكل6-20).



الشكل (6-20) صورة بالمجهر الإلكتروني للجُسيم الشبكي

يملك كل جسيم شبكي وجهين: وجهاً مركزياً محدباً يدعى وجه المكون (CGN) cis-golgi network يتجه نحو الحويصلات الانتقالية القادمة من الشبكة البلاسمية الداخلية الخشنة، ويستقبل الحويصلات الحاوية على البروتينات والليبيدات القادمة منها، ووجهاً مقعراً يدعى وجه النقل أو النضج (TGN) trans- golgi network يتجه نحو سطح الخلية، ويتميز بكييسات متوسعة ذات أطراف منتفخة.

يتبرعم من أطراف الجسيم الشبكي حويصلات إفرازية تحمل البروتينات المعالجة ضمن جهاز غولجي والتي تكون وجهتها إمّا إلى الحبيبات الإفرازية أو إلى الجسيمات الحالة أو إلى الغشاء البلاسمي (الشكل 6-21). وبشكل عام فإنّه تختلف أشكال الجسيمات الشبكية وأعدادها وتوزعها بشكل كبير من نمط خلوي لآخر حسب نشاط الخلية وطبيعتها الإفرازية.



الشكل (6-21): رسم تخطيطي يوضح بنية الجسيم الشبكي المكون لجهاز غولجي.

التركيب الكيميائي لجهاز غولجي:

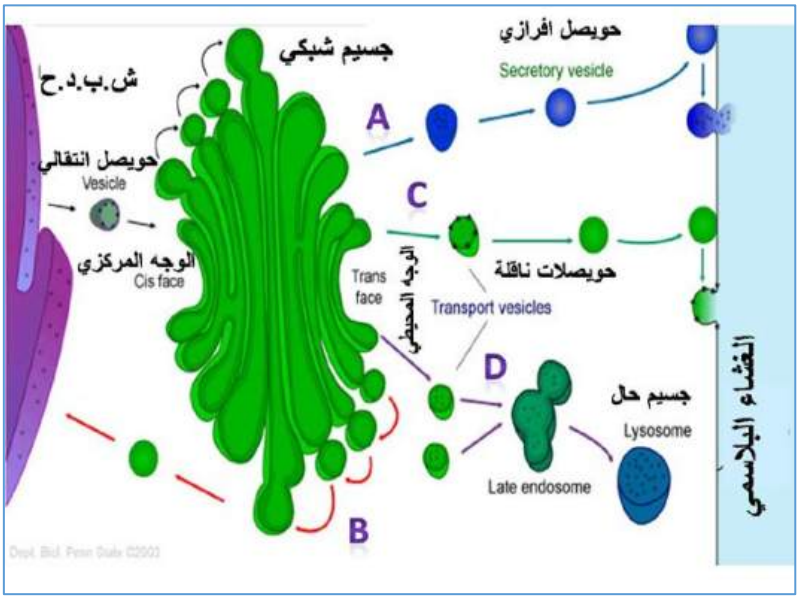
أمكن باستخدام طرائق التثفيل التفاضلي عزل عناصر جهاز غولجي وتحليلها بالطرق الكيميائية، فتبين أنّ الأغشية الخلوية المحيطة بالكييسات الغشائية تماثل في تركيبها وهندستها بنية الأغشية الخلوية عامة؛ والتي تتألف من طبقة ليبيدية مضاعفة مع بروتينات ضمنية ومحيطية، تشكل الأنزيمات جزءاً من البروتينات الضمنية و تتوضع البروتينات السُكريّة باتجاه لمعة التجاويف. وبشكل عام، فإنّ الليبيدات تشكل 35% من بنية الأغشية بينما تشكل البروتينات 65 % منها وتتميز البروتينات بكونها بروتينات سكرية و ليبيدية بالإضافة إلى وجود بروتينات خاصة بأغشية جهاز غولجي والتي هي عبارة عن أنزيمات ناقلات السكاكر وناقلات الكبريتات وأنزيم الفوسفتاز وسلسلة نقل الإلكترونات مثل السيتوكرومات .أما محتوى التجاويف الخاصة بالكييسات الغشائية فإنّه

يماثل محتوى تجاويف الشبكة الداخلية السيتوبلاسمية الحبيبية، مع وجود كميات كبيرة من السكاكر.

وظائف جهاز غولجي

يُعَدُّ جهاز غولجي عضية مهمة في الخلايا حقيقية النوى. إذ تتجلى مهمته الأساسية بتوجيه السكاكر والبروتينات اللازمة للجسم إلى وجهتها الصحيحة. و يقوم بمعالجة البروتينات المركبة ضمن الشبكة الداخلية السيتوبلاسمية و ينقلها لأجزاء مختلفة من الخلية. وتتضمن معالجة البروتينات ضم السكاكر من أجل تشكيل البروتينات السكرية، وكذلك إضافة مجموعات من الكبريتات أو جزيئات الفوسفات إلى البروتينات، وقد تحتاج بعض البروتينات إلى معالجة خاصة ضمن كييسات جهاز غولجي، لاستكمال نضجها وقبل مغادرتها إلى وجهتها الأخيرة. وبشكل عام، يساهم جهاز غولجي في فرز وتكثيف البروتينات المعدّة للإفراز، إذ تُركب عناصر الشبكة البلاسمية الخشنة البروتينات التي تنتقل إلى الوجه المكون CGN للجُسيم الشبكي بواسطة حويصلات صغيرة انتقالية تتبرعم عن أغشية الشبكة البلاسمية، تتحد الحويصلات الانتقالية مع كييسات الوجه المكون للجُسيم الشبكي وتتراكم البروتينات بذلك داخل تجاويف الجسيم الشبكي حيث تتكثف وتتركز على شكل حبيبات إفرازية، تتبرعم حويصلات إفرازية تحوي على حبيبات إفرازية، من أغشية كييسات وجه النقل أو النضج، وتتحرك ضمن السيتوبلاسما باتجاه

الغشاء السيتوبلاسمي حيث تتحد معه وتطرح محتواها إلى خارج الخلية بعملية إخراج خلوي (الشكل 6-22 A).تحتاج بعض البروتينات لمعالجة خاصة ومن ثم تقوم الحويصلات بحملها عن طريق النقل إلى الوراء من جهاز غولجي وتعود بها إلى الشبكة السيتوبلاسميّة الداخلية (الشكل 6-22 B). يؤدي جهاز غولجي دوراً مهماً في تركيب مكونات الغشاء السيتوبلاسمي ، إذ تقوم الحويصلات المتبرعمة عن كييسات الجهاز والحاوية على البروتينات والدهون الخاصة بالغشاء السيتوبلاسمي بالاتجاه نحوه والالتحام معه، وبذلك تؤمن محتوى الغشاء من البروتينات والدهون(الشكل 6-22 C). كما يقوم جهاز غولجي بتوجيه أنزيمات الجسيمات الحالّة إلى الجسيمات الدقيقة الداخلية والجسيمات الحالة (الشكل 6-22 D).



الشكل (6-22): رسم تخطيطي يوضح وظائف جهاز غولجي في الخلية.

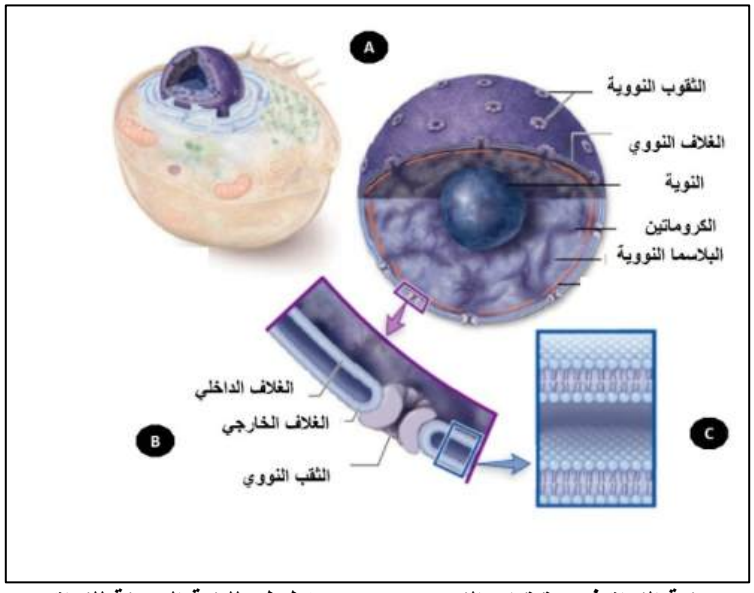
سادساً: النواة ، مركز القيادة الخلوي The nucleus

النواة : هي السمة المميزة والرئيسة في الخلايا حقيقيات النوى، توجد تقريباً في جميع أنواع الخلايا وأنماطها، وتُعَدُّ مركز القيادة والسيطرة والتحكم في الخلية، تعمل كالعقل بالنسبة للجسم كونها تحوي المادة الوراثيّة الخاصة بالمتعضية أو الفرد.

البنية والتركيب: يحيط بالنواة من الخارج **الغلاف النووي** المكون من غلافين داخلي وخارجي تفصل بينهما مسافة فاصلة، ويتصل الغلاف النووي مع الشبكة السيتوبلاسمية الداخلية الحبيبية. يُشبه الغلاف النووي في بنيته بنية وتركيب الأغشية الخلوية الأخرى،

إلاّ أنّه يتميز عنها بوجود **الثقوب النووية** التي تتوضع على امتداد الغلاف النووي و تصل بين البلاسما الخلوية و البلاسما النووية (الشكل 6-23).

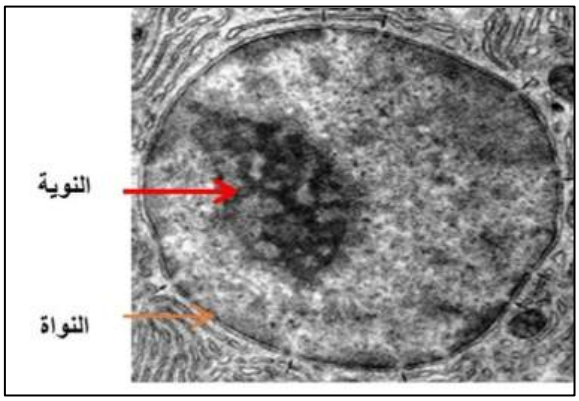
يشرف الغلاف النووي بشكل دقيق على المبادلات بين النواة و السيتوبلاسما، و تؤدي الثقوب النووية أيضاً دوراً حيوياً مهماً في هذه المبادلات، إذ تشكل البوابة التي تمر عبرها الجزيئات الكبيرة من النواة.وإليها. تعبر بعض الهرمونات الستيروئيدية، مثل الكورتيزول، والأندروجينات وبعض الجزيئات القابلة للذوبان في الدهون المكونة للغشاء الخلوي بوساطة الانتشار، ثم ترتبط ضمن السيتوبلاسما بمستقبلات خاصة تدعى بالمستقبلات النووية التي تقوم بنقلها إلى النواة.



الشكل (6-23): بنية النواة في حقيقيات النوى. A: رسم تخطيطي للبنية المكونة للنواة. B: شكل مكبر يوضح الغلاف النووي والثقب النووي. C: بنية الغلاف النووي.

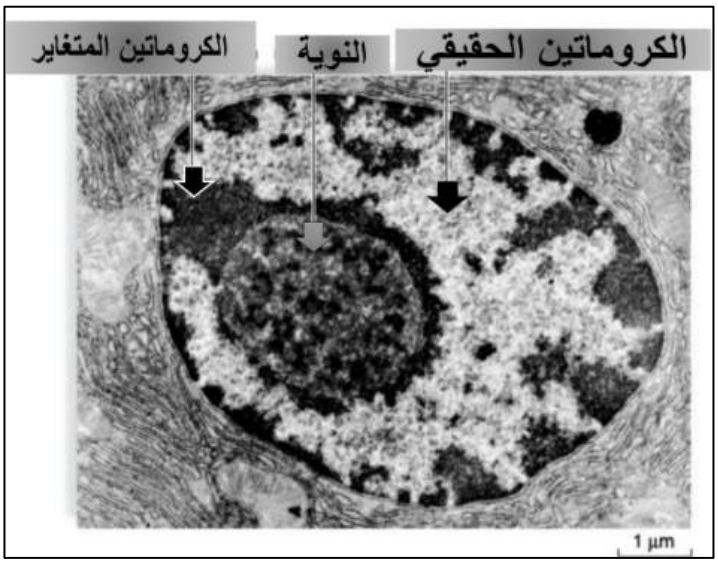
تشكل الثقوب النووية قنوات مائية تقع ضمن الغلاف النووي وتتألف من بروتينات متعددة. يتكون الثقب النووي الواحد من ثمان أقنية منفصلة عن بعضها بعضاً يبلغ قطر القناة الواحدة 9 نانومتر. تسمح الثقوب بمرور الشوارد والجزيئات الصغيرة (البروتينات الصغيرة والنكليوتيدات الضرورية لتركيب الـ DNA والـ RNA) غير القابلة للدخول بحريّة عبر الغلاف النووي، في حين تمنع الجزيئات الكبيرة كالحموض النووية والبروتينات الضخمة من الدخول أو الخروج من النواة، وحتى تدخل الجزيئات الكبيرة الحجم، كالأنزيمات الداخلة في تركيب الـ DNA والـ RNA وتحت وحدات الجسيمات الريبية عبر الثقوب، يجب أن تُنَشّط ويتم دخولها أو خروجها عبر تلك الثقوب **بآليّة النقل الفعّال** والتي تتم بوجود مصدر للطاقة وبوجود بروتينات خاصة توجه الجزيئات الداخلة عبر الثقوب بآليّة معقدة.

تحوي البلاسما النووية عضية مهمة هي **النويّة (Nucleolus):** تكون النويّة ذات بنية كثيفة وغير محاطة بغشاء أي أنّها غير مفصولة عن مكونات النواة وتوجد مختلطة مع مكونات البلاسما النووية، غالباً ما تتوضع بالقرب من الغشاء النووي (الشكل 6-24). يمكن لبعض الخلايا أن تحوي نوية واحدة أو أكثر. يوجد ضمن النوية DNA الريبوزومي (rDNA) الذي ينسخ عنه أنواع مختلفة من الـ rRNA الخاص بالجسيمات الريبية وهي 18s والنمط 5s والنمط 28s (الشكل6-9)



الشكل (6-24): صورة بالمجهر الإلكتروني تظهر النواة وبداخلها النوية

يلاحظ ضمن البلاسما النووية أيضاً، شبكة من الخيوط الدقيقة الحبيبية تدعى بالكروماتين النووي، والتي تُميّز الخلايا حقيقيات النوى. يُظهر المجهر الإلكتروني وجود نمطين من هذه الخيوط ضمن البلاسما النووية هي : الكروماتين الحقيقي euchromatin والكروماتين المتغاير heterochromatin. يحتل الكروماتين الحقيقي معظم النواة ويمتاز بكونه قليل الالتفاف مقارنة مع الكروماتين المتغاير الشديد التكثف والالتفاف والذي يوجد بالقرب من الغشاء النووي (الشكل 6-25).

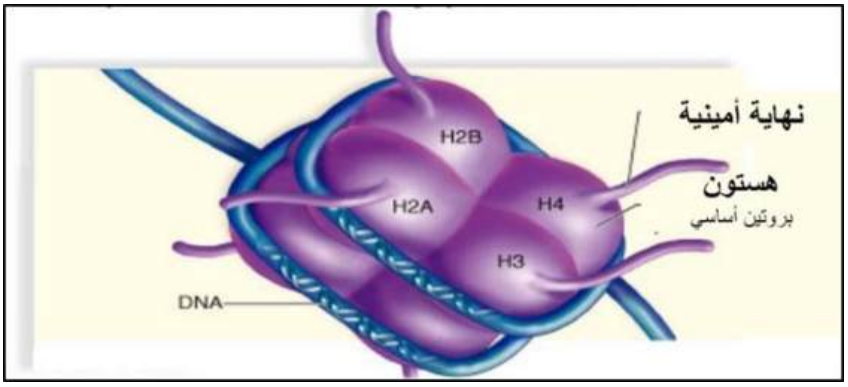


الشكل (6-25): صورة بالمجهر الإلكتروني تظهر بنية النواة ويظهر بشكل واضح الكروماتين النووي بنوعيه الحقيقي والمتغاير وكذلك النوية

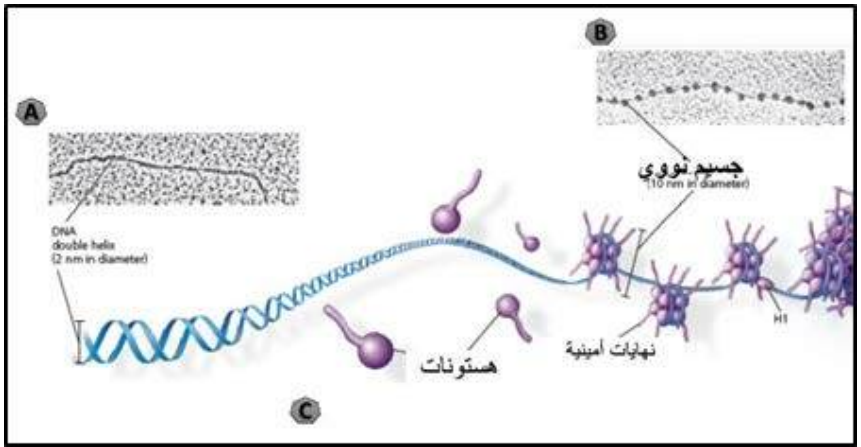
يتكون **الخيط الكروماتيني** من DNA وبروتينات أساسية تدعى **بالهستونات** والتي هي بروتينات أساسية بسبب احتوائها على نسبة عالية من الأحماض الأمينية الأساسية خاصة (الأرجينين والليزين). توجد هذه البروتينات في نوى الخلايا حقيقيات النوى. يمكن تمييز خمسة أنماط رئيسة من الهيستونات هي : H1,H2A,H2B,H3,H4 وهي جميعها بروتينات صغيرة الحجم ومنخفضة الوزن الجزيئي، تتميز هذه الهستونات بالثبات (لا يختلف تركيبها بين معظم الكائنات حقيقية النوى). تكون الوظيفة الأساسية لهذه البروتينات هي رزم وترتيب الـ DNA في بنية هيكلية تدعى الجسيمات النووية

nucleosomes، إذ تعمل كالبكرات يلتف حولها جزيء الـ DNA وبذلك فهي تؤدي دوراً مهماً في **تنظيم التعبير الورثي** (الشكل 6-26).

يلتف خيط الـ DNA حول الهيستونات مشكلة بنية تدعى **الجسيمات النووية** nucleosomes ، تشبه هذه البنية عقد اللؤلؤ حيث تشكل كل حبة من حبات العقد جُسيماً نووياً واحداً يتكون من لبّ مؤلف من معقد من ثمانية هستونات بحيث تجتمع جزيئتان من كل نمط من الهيستونات وهي H2A, H2B, H3, ,H4 ، يلتف حول هذا اللبّ بنحو مرتين شريط من الـ DNA بطول 146 زوج من النكليوتيدات (bp) (الشكل 6-26 و 6-27). يفصل كل جسيم نووي عن الجسيم النووي الذي يليه بخيط من الـ DNA الذي يدعى بالـ DNA الرابط (Linker) يقوم الـ H1 بربط لب الجسيم النووي مع مواقع دخول وخروج الـ DNA وبذلك يثبت جزيء الـDNA في مكانه ويسمح بتشكيل بنية ذات تنظيم عالي الدقة والتنظيم.

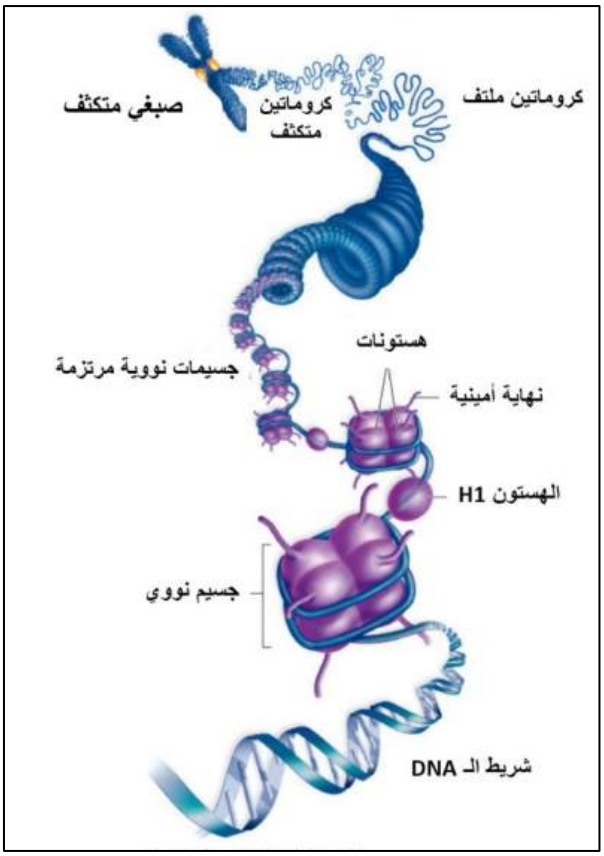


الشكل (6-26): رسم توضيحي يوضح بنية الجسيم النووي nucleosome. يلتف خيط الـ DNA حول الهيستونات مشكلة بنية تدعى الجسيم النووي nucleosomes ، يتكون الجسيم النووي من لبّ مؤلف من ثمانية هستونات بحيث تجتمع جزينتان من كل نمط من الهيستونات وهي H2A, H2B, H3 ,H4 ، يلتف حول هذا اللبّ بنحو مرتين شريط من الـ DNA بطول 146 زوج من النكليوتيدات (bp). يبرز من كل هستون نهاية طويلة مكونة من مجموعة من الحموض الأمينية تكون هذه الحموض عرضة لتعديلات فوق وراثية مختلفة وشاملة. تشكل هذه التعديلات عنصراً رئيساً في تنظيم التعبير المورثي .



الشكل (6-27): A: صورة بالمجهر الإلكتروني النافذ تظهر جزيء الـ DNA الحر(غير المرتبط مع الهستونات) والذي يبلغ قطره 2 نانومتر. B: صورة بالمجهر الإلكتروني النافذ لخيط الكروماتين الذي يبلغ قطره 10 نانومتر، تُشبّه هذه البنية بعقد اللؤلؤ إذ يلتف خيط الـ DNA حول بروتينات الهستونات مشكلة بينة تدعى الجُسيم النووي. C: رسم تخطيطي يوضح الصور السابقة الملتقطة بواسطة المجهر الإلكتروني.

تُعَدُّ عملية لف ورزم الـ DNA حول الهيستونات في غاية الأهمية وذلك من أجل السماح لجزيء الـ DNA الطويل جداً (2 متر) بأن يتناسب مع حجم النواة، والتي لا يتجاوز قطرها بضعة ميكرونات. ويؤدي التفاف جزيء الـDNA حول الهسيتونات إلى تشكيل خيط الكروماتين بطول 30 مكرومتر. تتحول خيوط الكروماتين عندما تدخل الخلية مراحل الانقسام الخلوي إلى عدد من الخيوط المستقلة القصيرة والثخينة المميزة تحت المجهر الضوئي والتي تعرف عندها باسم الصبغيات (chromosomes)(الشكل 6-28)



الشكل (6-28): رسم تخطيطي مبسط يوضح عملية رزم الكروماتين. يؤدي ارتزام خيط الكروماتين بشكل كبير إلى تشكيل الصبغي.

تعتمد بنية الكروماتين وشكله على حالة الخلية والمرحلة التي تمر بها من الدارة الخلوية، ففي أثناء الطور البيني من الانقسام يكون الكروماتين بشكل خيوط منتشرة وقليلة الالتفاف والتكثف وتسمح بذلك للـ RNA و DNA بوليميراز بالقيام بعملية النسخ والتضاعف.

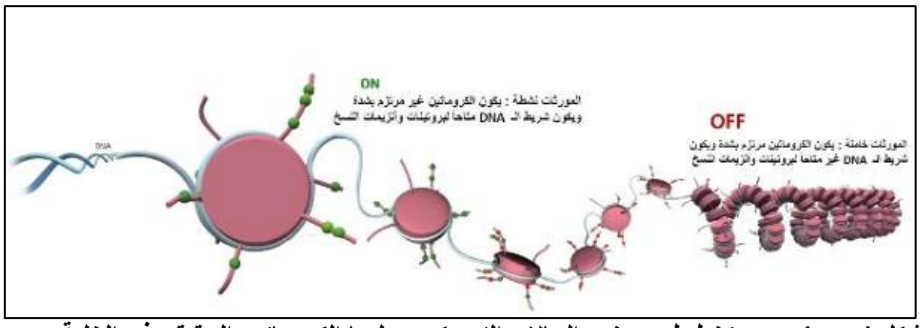
إنّ المورثات النشطة الوظيفية والتي تكون بحالة "تشغيل On" تكون غير مرتزمة بإحكام (ارتزام غير محكم) وتكون مرتبطة مع RNA بوليميراز وتشكل الكروماتين الحقيقي، في حين أنّ المورثات الخاملة "المعطلة Off " تبدو مرتزمة بشكل محكم ومرتبطة مع بروتينات بنيوية وتشكل الكروماتين المغاير (الشكل6-29).وبالتالي يمكن القول بأنّ **الوظيفة الرئيسة للكروماتين هي :**

1- تعبئة جزيء الـ DNA الطويل جداً ليناسب حجم نواة الخلية.

2- دعم جزيء الـ DNA في أثناء عملية الانقسام المتساوي والمنصف وحمايته من التخريب والتكسر.

3- تنظيم عملية التعبير المورثي وتضاعف الـ DNA.

5-تُسَهل عملية الارتزام، انفصال الصبغيات في أثناء طور الصعود وتساعد في إمكانية رؤية الصبغيات تحت المجهر.



الشكل (6-29): رسم تخطيطي يوضح الحالات التي يكون عليها الكروماتين الحقيقي في الخلية.

الصبغيات عند الإنسان Human Chromosomes

جاء مصطلح الصبغي (الكروموزوم chromosome) من التسمية اليونانيّة وهو مؤلف من كلمتين هما: الكروما chroma وتعني التلون، و زوما soma وتعني الجسم. فالصبغيات هي جُسيمات قابلة للتلوّن الشديد. ويعرّف الصبغي بأنّه جزيء عملاق مفرد يُشكل الـ DNA الوحدة الأساسية فيه ويحتوي على المورثات في ترتيب خطي. لذا تُعرّف الصبغيات بنواقل المورثات لأنّها تحمل المعلومات الوراثية لتكوين الإنسان وبهذا تدعى باسم الحقيبة الوراثيّة البشريّة.

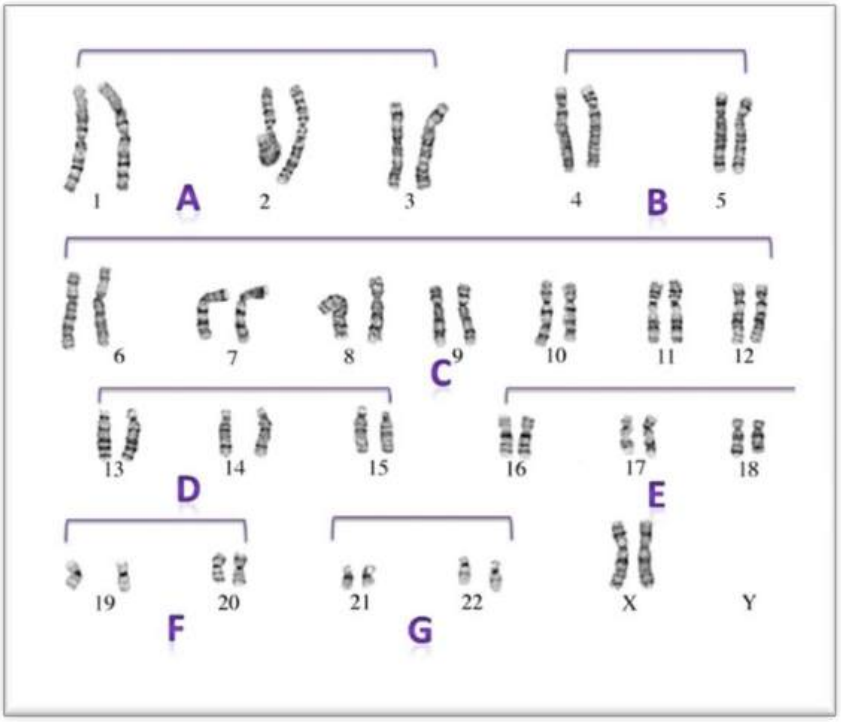
يُعبأ DNA الصبغي على بكرات هستونيّة بالتفاف مكثّف وضمن هندسة معينة تبدو في المجهر على شكل صبغيات متميّزة هندسياً في الطور الاستوائي metaphase من الانقسام الخلوي(الشكل6-28).

تتألف الصبغيات عند الإنسان من 46 صبغياً، موزعة ضمن أزواج، ويتمثّل كل زوج صبغي بنسختين واحدة جاءت من الأم والأخرى من الأب، بحيث تُمثّل كل مجموعة منها بكتاب يحمل المعلومات الوراثيّة الآتيّة من الأم والكتاب الآخر يحمل المعلومات الوراثيّة الآتيّة من الأب، وهذا معنى الصيغة المضاعفة. وعلى هذا تُصَنّف الصبغيّات إلى صبغيّات جسميّة(autosomes)غير جنسيّة مؤلفة من 22 زوجاً من الصبغيات من الرقم 1 إلى الرقم 22 في الطابع النووي Karyotype وهي نفسها في المرأة والرجل وتكون مسؤولة عن البناء الجسمي بكل خصائصه، أما الصبغيات الأخرى فهي الصبغيات الجنسية (sex chromosomes). التي لها دور في تحديد الجنس وتكون XX في المرأة و XY في الرجل.

يتألف صبغي الطور الاستوائي metaphase من صُبيغيين أخوين(كروماتيدين أخوين) sister chromatids متماثلين بحملهما لنفس المعلومات الوراثيّة ومرتبطين معاً بالجزء المركزي. ويمتلك كل صبغي ذراعين يرمز للذراع القصيرة p (مأخوذة من الفرنسيّة petit) ويرمز للذراع الطويلة q (من queue) ويقع بين الذراعين الجزء المركزي centromere المؤلف من مئات الآلاف من الأسس bases في تسلسلات تكراريّة يؤمن الجزء المركزي حركة الصبغي في أثناء عمليّة الانقسام الخلوي كما ينتهي كل ذراع

صبغي بجزء انتهائي يدعى بالقُسيم الانتهائي أوبالتيلومير(telomere)، الذي يؤدي دوراً مهماً في إغلاق نهايات الصبغيات والمحافظة على بنيتها سليمة.

تدعى الصبغيات التي يقع فيها الجزء المركزي في المنتصف بالصبغيات مركزية الجزء المركزي metacentric ويكون للصبغي ذراعان متساويان تقريباً. بينما تدعى الصبغيات التي يتوضع فيها الجزء المركزي بالقرب من منتصف الصبغي بالصبغيات قرب مركزية الجزء المركزي submetacentric.أما الصبغيات التي يتوضع فيها الجزء المركزي بالقرب من نهاية الصبغي فتدعى قرب طرفية الجزء المركزي acrocentric ويكون أحد ذراعي الصبغي فيها قصيراً جداً.تصنف صبغيّات الطور الاستوائي من الانقسام المتساوي وفقاً لأطوالها وموقع الجزء المركزي في سبع مجموعات؛ تمثل المجموعة A المجموعة الأولى والتي تكون الصبغيات فيها مركزيّة الجزء المركزي وتحوي أطول الصبغيات، أما المجموعة السابعة G فتحوي أقصر الصبغيات وتكون قرب طرفيّة الجزء المركزي.**(تتميز الصبغيات عند الإنسان بعدم احتوائها على صبغيات طرفية الجزء المركزي)** وقد وضعت الصبغيّات الجنسيّة خارج الترتيب حيث يكون الصبغي X قرب مركزي الجزء المركزي والصبغي Y قرب طرفي الجزء المركزي (الشكل 6-30)



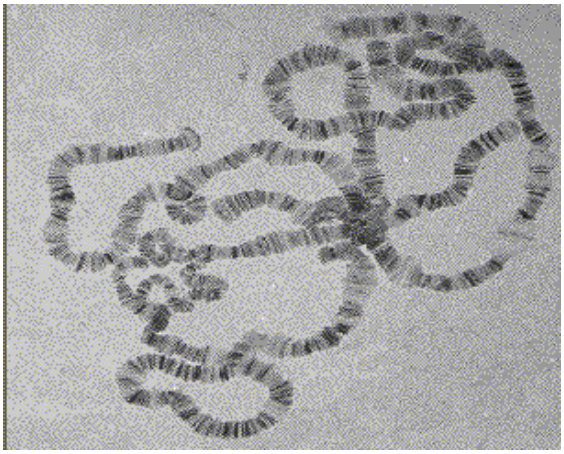
الشكل (6-30): الطابع النووي Karyotype عند المرأة 46,XX وتبدو المجموعات السبع التي تصنف ضمنها الصبغيات لمزيد من الشرح يرجع إلى النص.

أنماط فريدة من الصبغيات

يمكن أن تشاهد لدى الكائنات حقيقيات النوى، بالإضافة إلى النمط المعتاد من الصبغيات، بعض الأنماط الفريدة والمتميزة من الصبغيات في بعض خلايا الجسم أو أن هذه الأنماط الفريدة من الصبغيات تظهر في مرحلة معينة من الحياة ، هذه الأنماط من الصبغيات هي:

1- الصبغيات العماليق giant chromosome أو الصبغيات متعددة الخيوط polytene chromosomes

تشاهد في نوى خلايا الغدد اللعابية عند يرقات بعض الحشرات مثل ذبابَة الفاكِهَة fruit fly أو ذبابة الخل *Drosophila melanogaster* صبغيات عملاقة تكبر بمئة إلى مئتي مرة الصبغيات المشاهدة خلال الانقسام المنصف أو المتساوي عند النوع نفسه. يتضاعف الـ DNA في الانقسام المتساوي عدة مرات و يصل عدد خيوط الـ DNA إلى المئات ضمن الصبغي الواحد، يدعى هذا النمط من الانقسام **بالانقسام الداخلي** endomitosis وتصبح بذلك الصبغيات وبشكل استثنائي ضخمة جداً ، تدعى هذه الصبغيات بالصبغيات عديدة الخيوط polytene أو الصبغيات العماليق (الشكل 6-31)

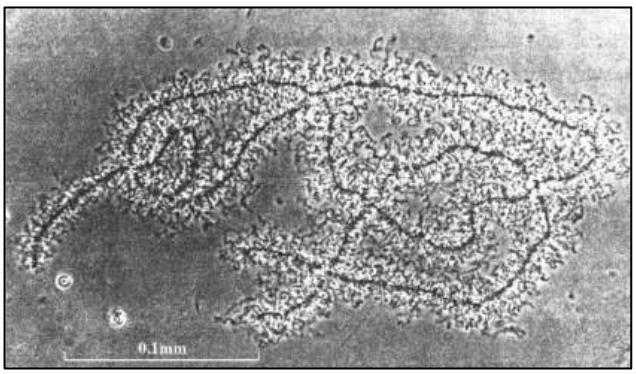


الشكل (6-31): صورة بالمجهر للصبغي العملاق عند ذبابة الفاكِهَة

تتمثل الوظيفة الرئيسة للصبغيات العماليق بالتضخيم المورثي، إن وجود نسخ متعددة من المورثات يسمح بمستوى عال من التعبير المورثي وبالتالي إنتاج كميات كبيرة من البروتينات والأنزيمات الضرورية وهذا ما يفسر وجود هذا النمط من الصبغيات في الخلايا النشيطة استقلابياً مثل الغدد اللعابية.

2- الصبغيات الريشية أو الفِرْجَونِيَّة Lampbrush chromosomes

يشاهد هذا النمط من الصبغيات العملاقة في الخلايا البيضية عند العديد من الكائنات مثل الحبار، شوكيات الجلد، الحشرات، البرمائيات الزواحف والطيور، إذ تحوي نوى تلك الخلايا والتي تكون في مرحلة التضاعف من الانقسام المنصف الأول العديد من الصبغيات التي لها شكل يشبه الريشة. يتألف الصبغي الريشي من محور رئيس تنتشر عنه خيوط الـ DNA مشكلة عرى جانبية (الشكل 6-32)



الشكل (6-32): صورة بالمجهر الإلكتروني للصبغي الريشي

تكمن وظيفة هذا النمط من الصبغيات في تهيئة البيضة للانقسام من خلال تأمين مخزون ضخم من mRNA المرسال ليتم استخدامه فيما بعد. فالبيضة في أثناء عملية الانقسام تكون بحاجة إلى كميات كبيرة من المواد المغذية والبروتينات لذلك فإن وجود مخزون من mRNA المرسال يسد حاجتها لهذه المواد.

الفصل السابع
الدارة الخلوية والانقسام الخلوي

أولاً: الانقسام الخلوي

- **الانقسام الخلوي لدى طلائعيات النوى**
- **الانقسام الخلوي لدى حقيقيات النوى**

ثانياً: الدارة الخلوية

- **الانقسام المتساوي أو الخيطي**
- **الانقسام المنصف**

تمهيد:

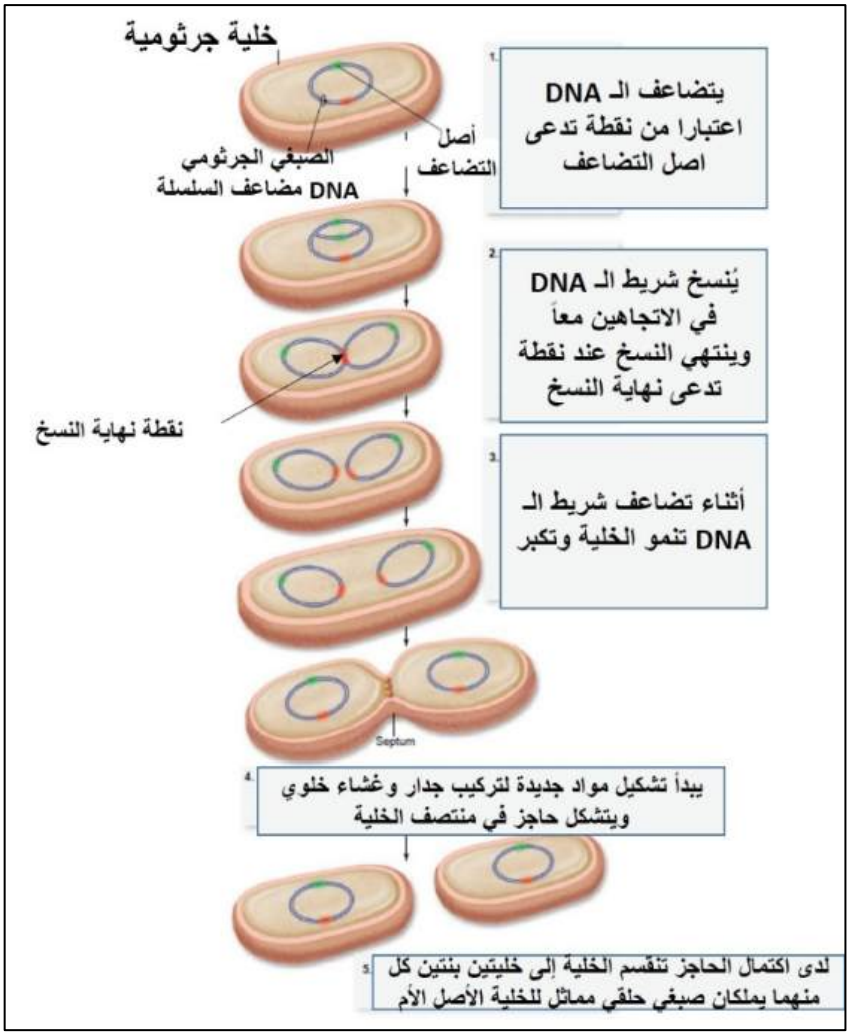
كما ذكرنا سابقاً، فإن من صفات الكائنات الحيّة جميعها أنها تنمو وتتكاثر، وتنشأ عنها ذرية تشبهها بفضل انتقال الصفات الوراثية من جيل لآخر. فالإنسان مثلاً: يبدأ رحلة حياته اعتباراً من خلية واحدة؛ البيضة الملقحة وسرعان ما تتحول هذه الخلية إلى ملايين الخلايا الوظيفية المتخصصة. و تتجدد معظم خلايا الجسم لدى الإنسان بشكل دائم كما خلايا الجلد و الطبقة المبطنة لجدران المعدة والأمعاء، وفي حال حدث جرح في مكان ما من جسم الإنسان فإنّه سرعان ما يلتئم ويبرأ. تتحقق هذه العمليات جميعها بفضل الانقسام الخلوي.

أولاً: الانقسام الخلوي :

يُعَرّف الانقسام الخلوي بأنّه ظاهرة تؤدي إلى تكوين خلايا جديدة متماثلة البنية والوظيفة انطلاقاً من خلية واحدة ، وتؤدي بذلك إلى زيادة حجم الكائنات وحيدة الخلية وكثرة عددها كالجراثيم مثلاً، وكذلك تحقيق نمو المتعضيات كثيرات الخلايا، وترميم ما تخرب منها. كما يُعدّ الانقسام الخلوي الآليّة الوراثية التي من شأنها المحافظة على ثبات الصيغة الصبغية في الكائنات عامة، وتوزيع الصِبْغِيات (نواقل المُوَرِّثات) ونقلها من الخلية الأم إلى الخلية البنت ومن جيل خلوي إلى آخر.

1- الانقسام الخلوي لدى طلائعيات النوى Prokaryotes:

تتخذ الجراثيم الانقسام الخلوي كوسيلة للتكاثر والنمو. ويُعَدُّ التكاثر لدى الجراثيم نسيلي (clonal)؛ أي أنّ الخلايا الناتجة عن الانقسام الخلوي هي نسخة مطابقة للخلية الأم الأصل. ويُعَدُّ **الانشطار الثنائي** Binary fission أبسط أنواع الانقسام الخلوي لدى الجراثيم. وتتصف الجراثيم بأنّها فردانية الصيغة الصبغيةHaploid أي تمتلك صبغي حلقي وحيد. يبدأ الانقسام عندما يتضاعف الـ DNA اعتباراً من نقطة تدعى أصل التضاعف وينتج عن ذلك تكون صبغيين حلقيين اثنين، تكبر الخلية وتبدأ بتركيب جدار الانقسام إذ يتكون اختناق في جدار الخلية يكبر تدريجياً ليقسم الخلية إلى خليتين اثنتين، وباكتمال الجدار الخلوي تنفصل الخلية الجرثومية الأم إلى خليتين بِنتيْن متماثلتين وراثياً أي في كل منهما صبغي حلقي واحد مماثل لصبغي الخلية الأم. تتكرر هذه الحادثة ما دامت الجراثيم مستمرة في التكاثر (الشكل7-1).



الشكل (7-1):يوضح عملية الانشطار الثنائي لدى الجراثيم.

تتميّز طلائعيات النوى بأنّ لديها المقدرة على الانقسام والتكاثر بسرعة كبيرة ضمن الشروط البيئية المناسبة، ففي حين تستطيع أغلب الكائنات طلائعيات النوى الانقسام كل 1-3 ساعات، نجد بعض الأنواع القادرة على تشكيل جيل جديد في غضون 20 دقيقة !

فإذا ما استمرت تلك الخلايا بالانقسام إلى مالا نهاية ومن دون أي ضابط فإنه من الممكن أن تظهر مستعمرة تغطي سطح الأرض بشكل كامل في غضون ثلاثة أيام فقط وذلك بدءاً من خلية واحدة فقط!. إلاّ أنّ هذا الأمر لا يحدث بالطبع في الواقع، نظراً لأنّ انقسام الخلايا طلائعيات النوى يبقى محدوداً، إذ تستنفذ الخلية مخزونها من المواد الغذائية وتتراكم فيها الفضلات الناتجة عن العمليات الاستقلابية مع تكرار الانقسامات فضلاً عن، إمكانية تعرضها للاستهلاك من قبل كائنات حيّة أخرى.

2- الانقسام الخلوي لدى حقيقيات النوى Eukaryotes :

تمتاز الكائنات حقيقيات النوى بأنها مضاعفة الصيغة الصبغية Diploid ويُلاحظ تناوب بين نمطين من الانقسامات الخلوية هما: **الانقسام الخيطي أو المتساوي Mitosis** الذي يقود التشكل الجنيني ونمو الخلايا مضاعفة الصيغة الصبغية، و يعمل على توزيع الصبغيات والمورثات (الجينات) بالتساوي على الخليتين البنتيْن مادام النمو مستمراً. والنمط الآخر هو **الانقسام المنصف Meiosis** ، الذي يعمل على إرجاع العدد الصبغي إلى النصف وتشكيل الأعراس (الخلايا التناسلية) فتصير الأعراس فردانية الصيغة الصبغية، وعند الإلقاح تعود الصيغة الصِبغيّة المضاعفة إلى البيضة الملقحة. وبشكل عام، يتكون الانقسام الخلوي لدى حقيقيات النوى من عمليتين متميزتين تحدثان بشكل متواصل هما :الانقسام النووي و الانقسام السيتوبلاسمي cytokinesis.

يُعَدُّ الانقسام الخلوي جزءاً أساسياً من الدارة الخلوية، لذلك سنتعرف قبل الدخول بتفاصيل الانقسام الخلوي على الدارة الخلوية ومراحلها.

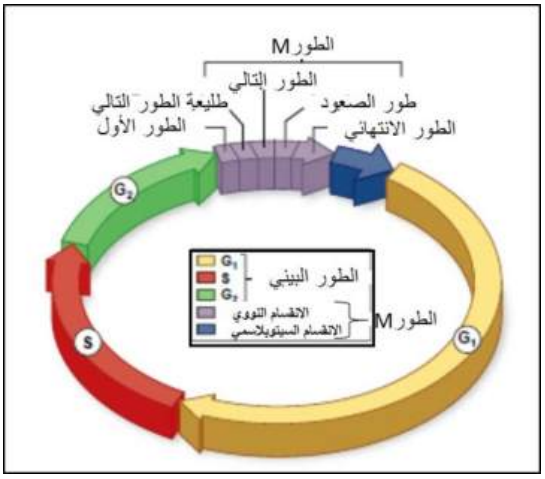
ثانياً: الدارة الخلوية Cell Cycle

تتضمن حياة أي خلية طورين رئيسين هما النمو والانقسام، و تدعى مجموعة الأحداث اعتباراً من الانتهاء من الانقسام الخلوي الأول حتى بداية الانقسام الخلوي التالي بالدارة الخلوية. تصف الدارة الخلوية سلوك الخلية في أثناء نموها وانقسامها؛ أي أنها تمثل جميع أطوار حياة الخلية. ويمكن تعريفها بأنّها: مجموعة الأحداث المنظمة التي يتحقق من خلالها زيادة عدد الخلايا ونمو المتعضية أو الكائن الحيّ وتطوره.

❖ مراحل الدورة الخلوية

يبيّن الشكل(7-2) الدارة الخلوية بمراحلها المختلفة، يسمى الطور ما بين انقسامين متتالين **بالطَّورُ البَيْنِيّ** (interphase) والذي يبدأ بالطور G1 (GAP 1)، إذ تكون الصبغيات في أعلى حد من الارتخاء والتطاول وتأخذ شكلاً حلزونياً متعرجاً. تكون الخلية في أثناء الطور البيني نشيطة استقلابياً، إذ تبدأ بتركيب جميع ما يلزمها من أنزيمات وبروتينات ومركبات مهمة استعداداً للدخول في مرحلة الانقسام. تكون الخلايا المتوقفة عن الانقسام كالخلايا العصبية مثلاً، متوقفة عند هذا الطور وتدخل فيما يُعرف بالطور G0 ، ويمكن أن تبقى الخلايا في هذا الطور لفترة غير محددة من الوقت، وذلك

عندما لا تكون هناك حاجة لخلايا جديدة. إلاّ أنّه في ظل ظروف محددة من الممكن إعادة إدخالها في الطور G1 و عندها تبدأ بالانقسام مرة أخرى. يلي الطور G1 طور التركيب S (synthesis phase) إذ يتم فيه تضاعف الـDNA وبالتالي يصبح كروماتين كل صبغي من الصبغيات متضاعفاً، الأمر الذي يؤدي إلى تشكيل كروماتيدين اثنين. ملاحظة:(تتضاعف الأزواج الصبغية الصنوة أو المتماثلة (homologous) معاً وبشكل متزامن، كما أن تضاعف الـ DNA يبدأ في مناطق متعددة على الصبغي نفسه، وآخر الصبغيات تضاعفاً هو الصبغي X الخامل). ينتهي الطور البيني بالطور G2 (GAP 2.) القصير حيث تبدأ الصبغيات بالتكثف استعداداً لدخول مرحلة الانقسام أو ما يدعى بالطور M (الشكل 7-2)



الشكل (7-2): رسم تخطيطي يبين المراحل المختلفة للدارة الخلوية

جدير بالذكر أن الزمن الذي تستغرقه الخلية لاستكمال دارتها الخلوية يختلف باختلاف الخلية نفسها. فالخلايا الجنينية تكمل دارتها الخلوية في أقل من 20 دقيقة. وتُعَدُّ الدارة الخلوية في الخلايا الجنينية لذبابة الفاكهة الأقصر زمناً إذ تبلغ 8 دقائق فقط! أما الخلايا الناضجة أو المكتملة فهي تتطلب وقتاً أطول لتنمو. تستغرق الدارة الخلوية لدى خلايا الثدييات عادة قرابة 24 ساعة غير أنّ بعض الخلايا كخلايا معينة في الكبد تدوم دارتها الخلوية أكثر من سنة تقريباً!

الانقسام المتساوي أو الخيطي، mitosis

تبدأ الكائنات متعددة الخلايا ومضاعفة الصيغة الصبغية حياتها ابتداء من خلية واحدة هي البيضة الملقحة zygote. و إنّ انقسام البيضة الملقحة والخلايا الناتجة عنها انقسامات متساوية يُعَدُّ أساس التنامي و نمو الكائن الحي. وفي الكائن البالغ يُعَدُّ الانقسام الخلوي ضرورياً لعملية التئام الجروح وتعويض الخلايا والنسج التالفة وكذلك في الخلايا الشبكية reticulocytes لتكوين كريات الدم الحمراء الناضجة.

ويمكن تعريف الانقسام المتساوي بأنّه: انقسام يحصل للخلايا الجسمية ويؤدي إلى إنتاج خليتين بنتين متماثلتين ومماثلتين للخلية الأم، حيث يتحقق من خلاله توزيع الصبغيات بشكل متساوٍ بين الخلايا الناتجة بفضل انقسام كل صبغي إلى صُبيغيين اثنين وتوزع هذه الصبغيات على الخلايا الناتجة.

وكما ذكرنا سابقاً فإنّ الانقسام الخلوي يتكون من عمليتين متميزتين تحدثان بشكل متواصل هما :الانقسام النووي و الانقسام السيتوبلاسمي cytokinesis.

❖**الانقسام النووي** : وفيه يمكن تمييز 5 أطوار واضحة هي:

1- الطَّورُ الأَوَّل Prophase: وفيه يبدأ الكروماتين بالتكثف إذ يصبح بالإمكان ملاحظته على شكل صبغيات قابلة للمشاهدة العينية بالمجهر الضوئي، كما تختفي النوية nucleolus ، ويتحرك المريكزان باتجاه قطبي الخلية و يبدأ مغزل الانقسام بالتشكل.

2- طَليعَةُ الطَّورِ التَّالِي Prometaphase: يبدأ الغشاء النووي بالانحلال، وتتشكل حول الجزء المركزي من كل صبغي بنية تدعى بالحَيِّزُ الحَرَكِيّ أو التخصر الأولي (kinetochore)، والذي من خلاله يسمح بارتباط كل صبغي إلى أنيبيبات مغزل الانقسام.

3- الطَّورُ التَّالِي Metaphase: وفيه تصطف الصبغيات على طول ما يدعى بالصفيحة الاستوائية(metaphase plate) وتكون الصبغيات في هذا الطور أكثر تكثفاً ووضوحاً ويمكن مشاهدتها بشكل مرئي وواضح باستخدام المجهر الضوئي. إنّ ترتيب الصبغيات بهذه الطريقة يسمح بحصول الخلايا الناتجة في المرحلة التالية على العدد نفسه من الصبغيات، حيث يكون كل صبغي من الصبغيات مؤلف من كروماتيدين أخوين منفصلين بشكل طولي و متصلين بالجزء المركزي.

4–طَورُ الصُّعُود Anaphase : وفيه ينفصل الجزء المركزي لكل صبغي من الصبغيات بشكل طولي، مؤدياً إلى انفصال الكروماتيدين الأخوين عن بعضهما بعضاً و تحركهما بالاتجاه المعاكس نحو قطبي الخلية. وتتم هذه الحركة بفضل الحَيِّزُ الحَرَكِيّ(kinetochore) الذي يساعد على هجرة الصبغيات و حركتها على طول أنيبيبات المغزل.

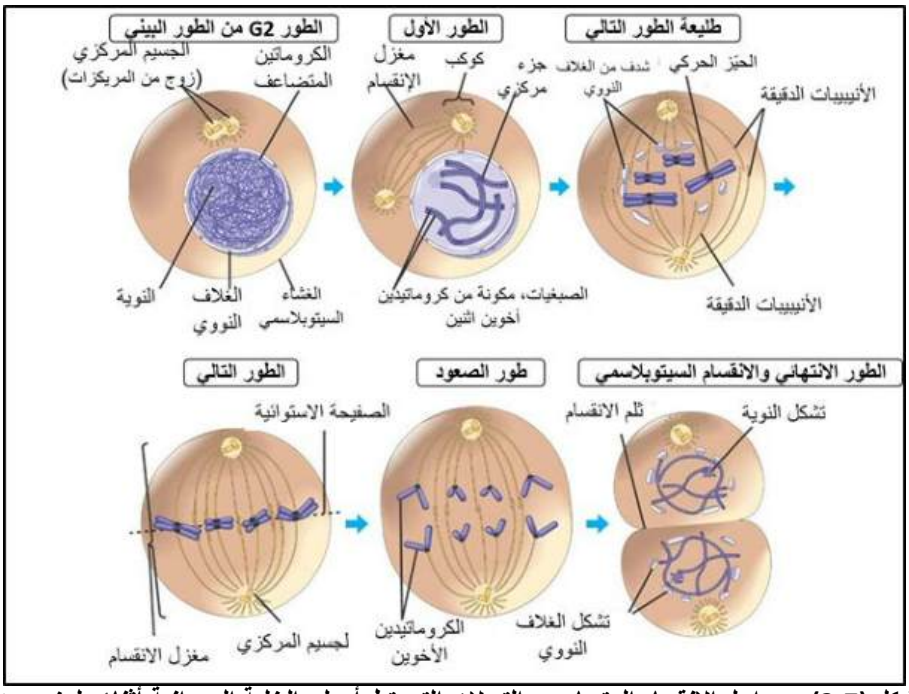
5– الطَّورُ الانْتِهائِيّ Telophase: تكون الكروماتيدات (الصبغيات) قد انفصلت بشكل كامل في هذا الطور وتمركزت حول قطبي الخلية، عندها يبدأ الغشاء النووي بالتشكل حول كل مجموعة من تلك الصبغيات. وتكون الصبغيات في هذا الطور غير مرئية بالمجهر الضوئي، وتختفي خيوط المغزل وتنحل تماماً كما يبدأ انقسام السيتوبلاسما اعتباراً من هذا الطور و يؤدي ذلك إلى إنتاج خليتين بنتين كل واحدة منهما تحوي العدد ذاته من الصبغيات(المجموعة مضاعفة الصيغة الصبغية diploid) (الشكل 7-3).

❖ الانقسام السيتوبلاسمي :

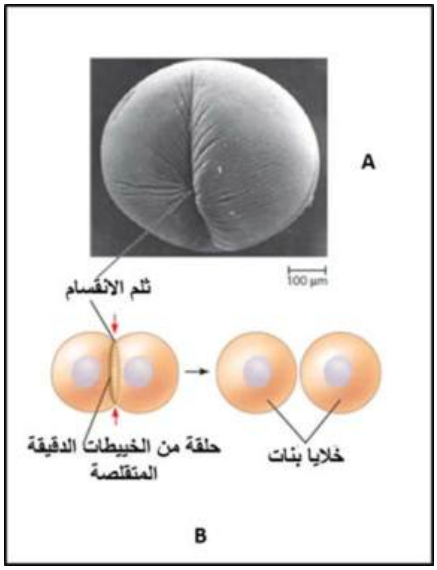
يحدث الانقسام السيتوبلاسمي في **الخلايا الحيوانية**، من خلال عملية تعرف باسم الانشطار(cleavage). وتكون أول بادرة له ظهور ثلم الانقسام أو الانشطار (cleavage furrow)، وهو أخدود سطحي يظهر بالقرب من سطح الخلية. ويبدو على الجانب السيتوبلاسمي من الأخدود حلقة قابلة للانقباض مكونة من خييطات دقيقة من الأكتين

المرتبطة مع جزيئات من بروتين الميوزين. إنّ تآثر الخييطات الدقيقة مع جزيئات الميوزين يؤدي إلى تقلص الحلقة. يرافق التقلص انخماص الأخدود تدريجياً نحو الداخل حتى انفصال الخلية إلى خليتين بنتين منفصلتين تماماً تحوي كل واحدة منهما نواتها وعضياتها وعصارتها الخلوية الخاصة. (الشكل 7-4)

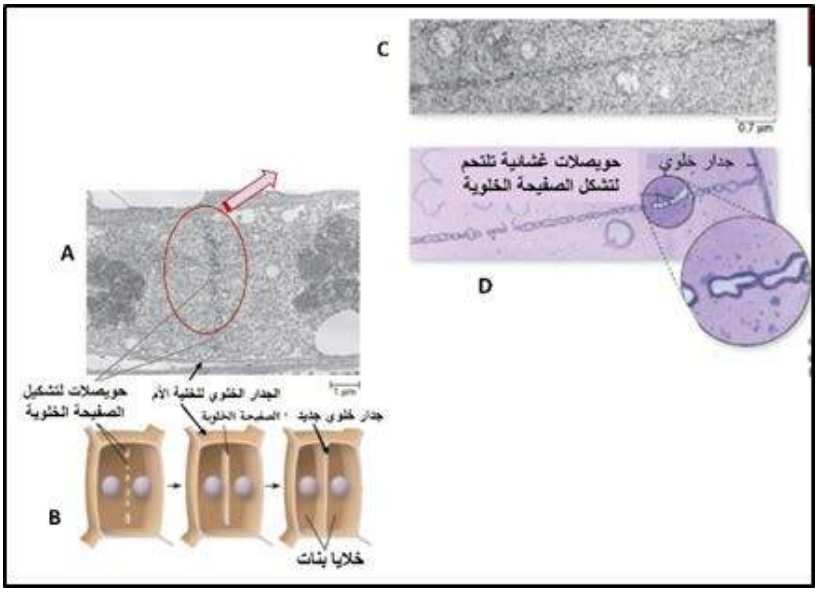
أما في **الخلايا النباتية** حيث يوجد الجدار الخلوي، فيختلف الانقسام السيتوبلاسمي بشكل ملحوظ. إذ لا يظهر ثلم الانقسام، بالمقابل تتحرك حويصلات ناشئة عن جهاز غولجي على طول الأنيبيبات الدقيقة نحو منتصف الخلية حيث تتجمع و تلتحم معاً لتشكيل الصفيحة الخلوية(cell plate). تتجمع مكونات الجدار الخلوي المحمولة في الحويصلات ضمن الصفيحة الخلوية في أثناء نموها. تكبر الصفيحة الخلوية إلى أن تندمج أغشيتها المحيطة مع الغشاء السيتوبلاسمي على طول محيط الخلية. وتكون النتيجة تشكل خليتين بنتين تملك كل واحدة منها غشاءها السيتوبلاسمي، وفي الوقت نفسه تكون جدار خلوي جديد بين الخليتين البنتين من مكونات الصفيحة الخلوية(الشكل 7-5).



الشكل (7-3) : مراحل الانقسام المتساوي والتبدلات التي تطرأ على الخلية الحيوانية أثناؤه لمزيد من الشرح يرجع إلى النص



الشكل (7-4): A صورة بالمجهر الإلكتروني الماسح لانقسام الخلية الحيوانية. B: رسم تخطيطي يوضح آلية انقسام الخلية الحيوانية



الشكل (7-5): الانقسام السيتوبلاسمي في الخلايا النباتية. A: صورة بالمجهر الإلكتروني النافذ لتشكل الصفيحة الخلوية. B: رسم تخطيطي يوضح مراحل تشكل الصفيحة الخلوية. C: صورة بالمجهر الإلكتروني النافذ مكبرة عن A و D: رسم تخطيطي تفصيلي يبين التحام الحويصلات الغشائية لتشكيل الصفيحة الخلوية.

الفرق بين انقسام الخلية النباتية و الخلية الحيوانية:

هناك ثلاثة فروق رئيسة بين انقسام خلايا النبات و انقسام خلايا الحيوان المتساوي:

1- في المرحلة التمهيدية: يظهر لدى الخلية الحيوانية كوكبان (Aster) في مستوى القطبين (يتشكلان من الجسيم المركزي) لتتشكل المغازل، أما عند الخلية النباتية فلا يظهر الكوكبان وإنما تتشكل قلنسوة قطبية عند كل قطب (يتشكلان نتيجة تكاثف السيتوبلاسما) وتتشكل المغازل في السيتوبلاسما بعد ذلك.

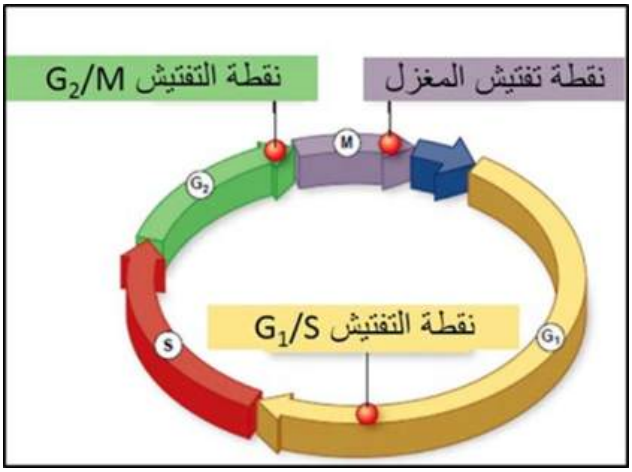
2- في المرحلة النهائية: يظهر في منتصف الخلية الحيوانية اختناق يقسم الخلية الأم إلى خليتين بنتين، أما عند الخلية النباتية فيتم ذلك عن طريق الصفيحة الخلوية التي تصل ثم تندمج مع السيتوبلاسما مشكلة جداراً خلوياً جديداً يفصل الخليتين البنتين.

3- يحدث الانقسام المتساوي في جميع النسج عند الخلايا الحيوانية أما لدى النبات فيلاحظ فقط في خلايا الميرستيم.

عملية الانقسام الخلوي عملية دقيقة جداً ومنضبطة بشدة، إذ هناك **نقاط مراقبة**(**checkpoints**) يضمن بأن تحدث عملية الانقسام بدقة متناهية جداً، ويتم التأكد من جاهزية الخلية للدخول في الانقسام و ضبط تضاعف الجينوم وانتقاله إلى الخلايا البنات، ويتم التأكد من حصول عملية التضاعف وإصلاح الخلل (إن وجد) قبل الانتقال إلى المرحلة التالية، وبذلك يضمن حصول الخلايا البنات على نفس العدد الصبغي وتكون الخلايا البنات الناتجة متماثلة وراثياً مع الخلية الأم الأصل. وفي حال حدث أي خلل في نظام المراقبة هذا فإن ذلك قد يؤدي إلى نشوء السرطان.

يتكون نظام المراقبة من ثلاث نقاط تدعى **نقاط التفتيش** عندها يمكن للخلية أن توقف أو تؤخر دارتها الخلوية، تستخدم الخلية هذه النقاط لتقييم حالتها الداخلية، هذه النقاط هي: نقطة التفتيش G1/S و نقطة التفتيش G2/M وأخيراً نقطة تفتيش تشكل مغزل الانقسام

التي تؤكد على ارتباط جميع الصبغيات إلى خيوط المغزل وأنّها جاهزة للدخول في طور الصعود. (الشكل 7-6)



الشكل (7-6): رسم تخطيطي لأماكن وجود نقاط المراقبة والتفتيش على سيرورة عملية الانقسام والدارة الخلوية بشكل عام

الانقسام المنصف، الانْتِصافي ،meiosis

إنّ المعلومات الوراثية الموجودة والمخزنة في الـ DNA ضرورية لتكوين كلّ خصائص الكائن الحيّ. ولبقاء النوع واستمراره، وللحفاظ على المعلومات الوراثية مصانة يجب أن يحدث الإلقاح بحيث يتم نقل المعلومات الوراثية المحمولة على الصبغيات عن طريق الأعراس المتشكلة نتيجة للانقسام المنصف meiosis من الآباء إلى الأبناء.

و يمكن تعريف عملية الانقسام المنصف بأنّها عملية انقسام تحدث في المراحل الأخيرة من تشكل الأعراس والتي تنتج عنها أربع خلايا أحادية الصيغة الصبغية haploid اعتباراً من خلية أصل مضاعفة الصيغة الصبغية diploid. وعند الالقاح يتم اندماج العروس الأنثوية (أحادية الصيغة الصبغية) مع العروس الذكرية (أحادية الصيغة الصبغية) وتتشكل بذلك البيضة الملقحة التي توصف بأنها مضاعفة الصيغة الصبغية.

يتألف الانقسام المنصف من انقسامين خلويين اثنين يعرفان بالانقسام المنصف الأول meiosis I والانقسام المنصف الثانيmeiosis II ، ويتألف كل واحد منهما من الأطوار الأربعة الملاحظة في الانقسام المتساوي والتي هي: الطَّورُ الأَوَّلProphase وطَليعَةُ الطَّورِ التَّالِي Prometaphase ، الطَّورُ التَّالِي Metaphase ، طَورُ الصُّعُود Anaphase والطَّورُ الانْتِهائِيّ Telophase. سنقوم بإيجاز كل مرحلة وذكر أبرز الملاحظات فيها.

الانقسام المنصف الأول meiosis I (أو الانقسام الاختزالي)

- **الطَّورُ الأَوَّل Prophase:** وفيه يكون كل صبغي من الصبغيات مؤلف من كروماتيدين أخوين مرتبطين معاً بالجزء المركزي. تبدأ الصبغيات المُتَماثِلة أو الصنوة (Homologous chromosomes) بالتزاوج بعضها مع بعض، مشكلة المشابك synapses ويتزاوج الصبغي X مع الصبغي Y عن طريق المنطقة الجسمية الذاتية

الكاذبة pseudoautosomal region فقط. تدعى الصبغيات المتزاوجة بالثنائيات الصبغية bivalents (حيث تتألف كل ثنائية من صبغيين وأربعة كروماتيدات ويكون كل صبغي قادم من أب)، تلاحظ حادثة العبور الصبغي crossing over في هذا الطور.

- **الطَّورُ التَّالِي Metaphase**: تصطف الصبغيات على طول الصفيحة الاستوائية.

- **طَورُ الصُّعُود Anaphase**: تنفصل الصبغيات الصنوة عن بعضها بعضاً (كل صبغي مؤلف من كروماتيدين اثنين) وتتحرك باتجاه معاكس إلى أحد قطبي الخلية.

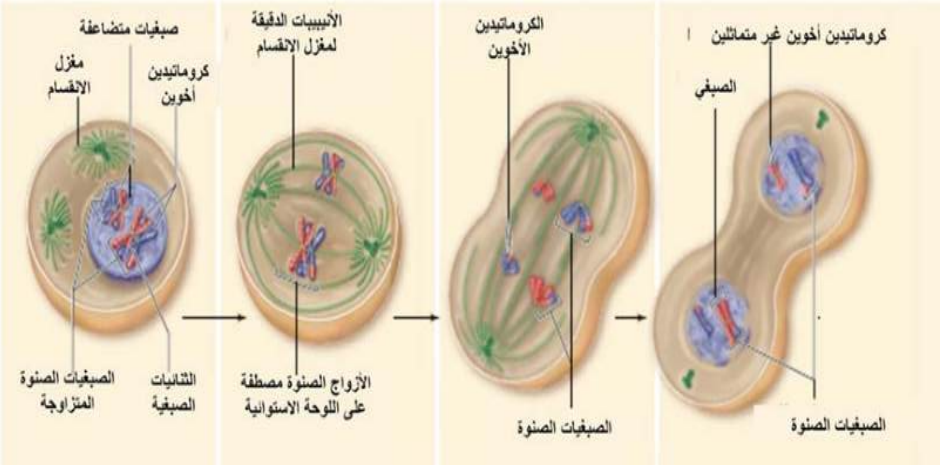
- **الطَّورُ الانْتِهائِيّ Telophase**: تصبح كل مجموعة من الصبغيات أحادية الصيغة الصبغية و منفصلة تماماً عن المجموعة الأخرى، و تتشكل بذلك خليتان بنتان أحاديتا الصيغة الصبغية اعتباراً من الخلية الأم مضاعفة الصيغة الصبغية.

قد يتشكل الغشاء النووي حول كل مجموعة صبغية أو أنّ الخلايا تتابع مباشرة الانقسام وتدخل في الانقسام المنصف الثاني (الشكل 7-7).

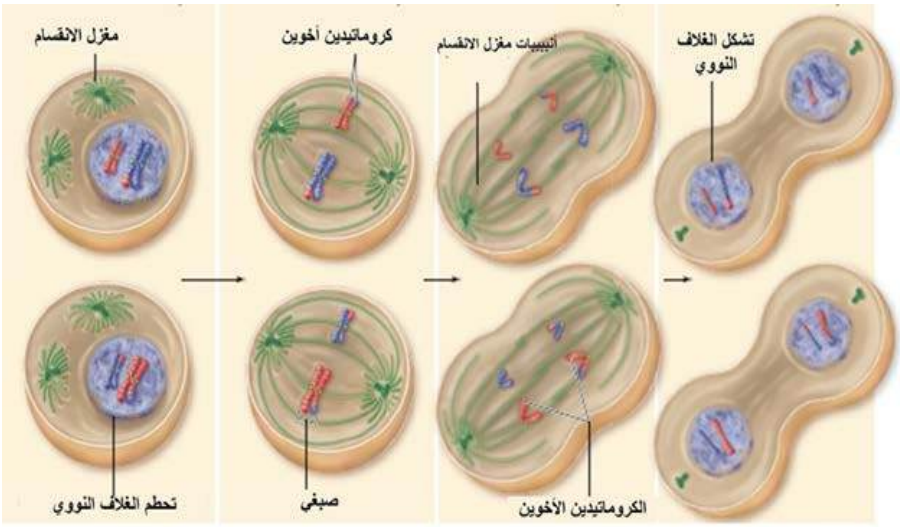
الانقسام المنصف الثاني meiosis II

يشابه هذا الانقسام إلى حد كبير الانقسام المتساوي، باستثناء عدم وجود الطورS، حيث يصطف كل صبغي (والمؤلف من كروماتيدين أخوين، الكروماتيدين الأخوين في كل صبغي هنا غير متماثلين بفضل ظاهرة العبور) على طول الصفيحة الاستوائية، ينفصل بعدها الكروماتيدين الأخوين عن بعضهما بعضاً و يتحركان بالاتجاه المعاكس نحو قطبي

الخلية. وبهذا تتشكل في نهاية الانقسام المنصف أربع أعراس أحادية الصيغة الصبغية، ولدى الإلقاح تتحد مع العروس المقابلة لتشكل البيضة الملقحة (الشكل 7-8) .



الشكل (7-7): رسم تخطيطي للانقسام المنصف الأول



الشكل (7-8): رسم تخطيطي يوضح الانقسام المنصف الثاني

❖ أهمية الانقسام المنصف:

1- يحقق الانقسام المنصف اختزال الصيغة الصبغية المضاعفة إلى الصيغة الأحادية وبالتالي فإن الفرد الناتج تكون نصف ذخيرته الوراثية قادمة من الأم والنصف الثاني قادمة من الأب.

2- يحقق الانقسام المنصف قابلية استثنائية للتنوع الوراثي إذ يتحقق ذلك من خلال كون الثنائيات الصبغيةbivalents تنفصل في أثناء الطور الأول من الانقسام المنصف الأول بشكل مستقل عن بعضها بعضاً وبالتالي فإن كل عروس تحصل على تشكيلة

مختلفة من الصبغيات الأبوية، وبذلك فإن احتمال حصول عروسين مختلفتين على نفس الصبغيات من الفرد ذاته يساوي 1 إلى 2^{23} وهو ما يقارب احتمال 1 إلى 8 مليون وهذا يجعل احتمال مجيء تركيب وراثي مماثل لتركيب سابق (أو مجيء طفل مماثل لأخيه) أمراً بعيد التحقيق إن لم يكن مستحيلاً.

3- تزيد ظاهرة العبور الصبغي التي تحدث في أثناء الطور الأول من الانقسام المنصف الأول أيضاً من التنوع الوراثي.

إنّ هذا المدى من التغير الكبير للمورثات يجعل لكل فرد شخصية معينة وفريدة لا تتكرر إطلاقاً. ولهذا لا نجد إنساناً يماثل إنساناً آخر (ما خلا التوائم الحقيقية)، ولا بصمة إبهام تماثل بصمة إبهام شخص آخر .

يختلف الانقسام المنصف عن الانقسام المتساوي بثلاث نواحٍ أساسية هي:

1- يؤدي الانقسام المتساوي إلى إنتاج خليتين بنتين متماثلتين ومماثلتين للخلية الأم، إذ يحوي كلاهما العدد الصبغي المضاعف، بينما يتم في أثناء الانقسام المنصف اختزال الصيغة الصبغية إلى الصيغة الأحادية وبالتالي كل عروس تحصل على نصف المجموع الصبغي.

2- يحصل الانقسام المتساوي في الخلايا الجسمية وفي أثناء المراحل الأولى من انقسام وتشكل الأعراس (مرحلة التكثير الخلوي قبل الانقسام) بينما يحدث الانقسام المنصف فقط في الأعراس.

3- يتم الانقسام المتساوي كعملية واحدة بينما يتضمن الانقسام المنصف انقسامين اثنين.

الفصل الثامن

الـ DNA ودوره في الوراثة

- لمحة عن التجارب الأولية لتحديد ماهية المادة الوراثية
- المعلومات والشيفرة الوراثية
- تضاعف جزيء الـ DNA
- وظائف جزيء الـ DNA تعتمد على بنيته

تمهيد

كان من المستحيل أن نفهم شيئاً عن العمليات البيوكيميائية التي من خلالها تحدد المورثات النمط الظاهري للفرد، وتنتقل بواسطتها التعليمات الوراثية من جيل لآخر، في ظل غياب المعرفة الكاملة للجزيء الذي يحمل المعلومات الوراثية. لذا سعى العلماء جاهدين لاكتشاف هذا الجزيء وتحديد خصائصه وصفاته. ومنذ أن اقترح كل من واطسون وكريك البنية الحلزونية المضاعفة لجزيء الـDNA عام 1953، أضحى هذا الجزيء رمزاً مألوفاً ومحط العديد من الدراسات والأبحاث إلى يومنا هذا. وبعد أن تعرّفنا في الفصل الثاني من هذا الكتاب على البنية الكيميائية لجزيء الـ DNA سنقوم في هذا الفصل بدراسة تضاعف ووظيفة جزيء الـ DNA ودوره في الوراثة، وسنستنتج العلاقة بين بنيته ووظيفته. ولكن دعونا أولاً نعرض سريعاً التجارب الأساسية التي أدت إلى إثبات أنّ الـ DNA هو المادة الوراثية في الخلية.

أولاً: لمحة عن التجارب الأولية لتحديد ماهية المادة الوراثية

1- الدراسات الكيميائية

تمكّن الباحث Friedrich Miescher عام (1869) من عزل مادة غنية بالفوسفور ذات طبيعة حامضية ضعيفة من نوى الكريات البيضاء عند الإنسان دعاها

" نوكلئين "(nuclein). دُرِسَ بعدها التركيب و الخواص الكيميائية لهذه المادة، فتبيّن أنها مؤلفة من سكر الريبوز منقوص الأكسجين، وهي من طبيعة حامضية وتوجد حصرياً في النواة. وبالتالي أُطلق عليها اسم الحمض الريبي النووي منقوص الأوكسجين **deoxyribonucleic acid (DNA اختصاراً)**.

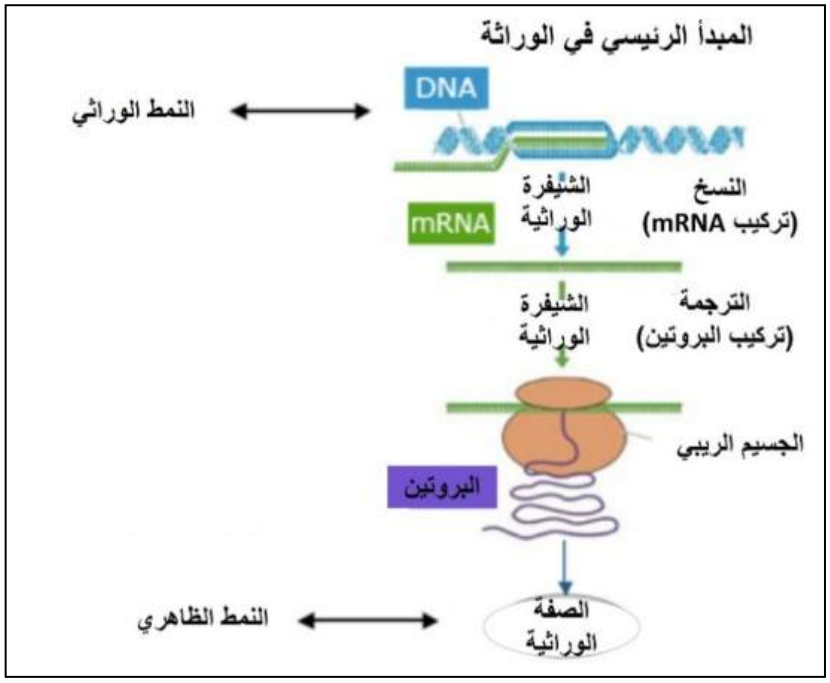
وفي عام 1914 قام الباحث الكيميائي الألماني Feulgen بتلوين جزيء الـ DNA ضمن أنبوب الاختبار مستخدماً ملوناً يدعى كاشف شيف (Schiff reagent). وفي عام 1923 قام بتلوين نوى مجموعة من الخلايا مستخدماً ذات الملون، فتلوّنت الصبغيات باللون الأحمر بينما لم تتلون باقي العضيات والأجزاء الخلوية الأخرى بأي لون، أكدت هذه التجربة أنّ الـ DNA موجود حصراً داخل الصبغيات، ولكنها لم تثبت بأنّه المادة الوراثية في الخلية.

2- الدراسات على الجراثيم:

أجرى الباحث Frederick Griffith عام 1928 تجاربه على سلالات من المكورات الرئوية Streptococcus pneumoniae واستنتج من خلال دراسة ظاهرة التحول الجرثومي (bacterial transformation) أنّ " مقدرة أي مادة على تغيير الصفات الوراثية لعضوية ما تُعد تحولاً فيها ". و يعود الفضل لتجارب كلٍ من الباحثين Alfred Hershey و Martha Chase عام 1952، التي أجريت على دورة حياة آكل

الجراثيم T2 (T2 bacteriophage)، في إثبات أنّ الـ DNA هو المادة الوراثية في الخلية وليس البروتين كما كان يعتقد سابقاً.

يُعَدُّ جزيء الـ DNA المادة الوراثية في جميع الكائنات الحيّة (ما عدا بعض الكائنات كالفيروسات) و مخزناً للمعلومات الوراثية الضرورية لبناء عضوية من نوع أبويها وهو جوهر المبدأ الرئيسي (المُسَلّمة المركزية) في الوراثة (central dogma) فوظيفته تخزين المعلومات الوراثية وتمريرها من جيل لآخر ومن خلية لأخرى إذ يحوي المخطط (blueprint) لتركيب الببتيدات المتعددة من خلال ثلاث عمليات أساسية تتيح تدفق ونقل المعلومات الوراثية من الآباء إلى الأبناء، هذه العمليات الثلاث هي: التضاعف النسخ والترجمة (الشكل 8-1).



الشكل (8-1): المبدأ الرئيسي في الوراثةcentral dogma ويوضح سيرورة العمليات الثلاث التي تؤمن نقل وتدفق المعلومات الوراثية من جيل لآخر.

ثانياً: المعلومات والشيفرة الوراثية

تُعرف المعلومات الوراثية بأنها مجموع الرموز المختزنة في تسلسل الأسس داخل نواة البيضة الملقحة والتي تضم ملايين الرموز التي عندما تُقرأ خلال التنامي الجنيني تعطي فرداً كاملاً من نوع أبويه. هذا التسلسل أو ترتيب الأسس يرمز إلى تركيب أو اصطناع بروتين ما. تتوزع المعلومات الوراثية على المورثات بحيث تحمل كل مورثة رسالة وراثية معينة ضمن مفهوم **الشيفرة الوراثية** والتي هي: مجموع التعليمات التي

تنقل المعلومة الوراثية المخزنة في جزيء الـ DNA إلى البروتين عن طريق آليتي النسخ والترجمة.

ثالثاً: تضاعف جزيء الـ DNA

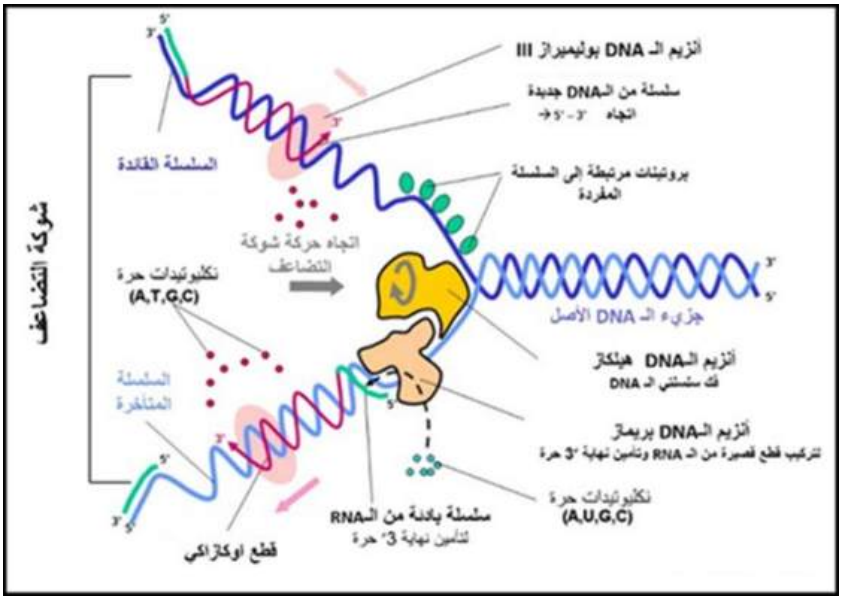
يتميز الـ DNA بقابلية **التضاعف الذاتي**، والذي يؤمن انتقال المعلومات الوراثية من جيل لآخر، وبالتالي يجب أن تكون عملية التضاعف كاملة ودقيقة للمحافظة على الثبات الوراثي داخل الخلية وداخل العضوية وحتى داخل النوع الواحد. كما يمتاز جزيء الـDNA مضاعف السلسلة بأنّ تتالي الأسس في إحدى سلسلتي الجزيء يتمم تتالي الأسس في السلسلة الأخرى المقابلة لها؛ إذ ترتبط الأسس الآزوتية المتقابلة وفق **مبدأ التتامية**، وبالتالي يتحكم تتالي أسس إحدى السلسلتين في تتالي السلسلة الأخرى، فالأدنين (A) لا يرتبط إلا مع التايمين (T) و السيتوزين (C) لا يرتبط إلا مع الغوانين (G). لذلك فإنّه لدى الانتهاء من عملية التضاعف تتشكل سلسلة مضاعفة جديدة مماثلة للأصل و عندما تنقسم الخلية تصان المعلومات الوراثية ويحافظ عليها وتنقل من دون تغيير إلى الخلايا البنات المتشكلة.

المراحل الرئيسة لعملية تضاعف الـ DNA:

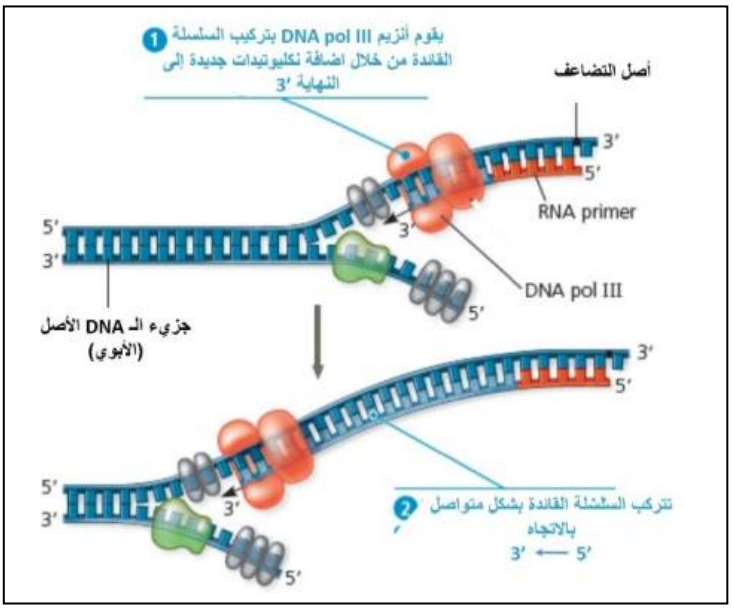
يتألف جزيء الـDNA في معظم الكائنات الحيّة من شريط مضاعف حلزوني، وتبدأ عملية التضاعف عند نقطة تدعى أصل التضاعف، حيث يقوم أنزيم الهيلكاز Helicase بفك حلزنة شريط الـ DNA من خلال فصم الروابط الهيدروجينية بين السلسلتين المتتامتين، ثم تقوم بعض البروتينات الخاصة بتثبيت السلسلتين والإبقاء عليهما منفصلتين، تتشكل بذلك بنية تشبه الشوكة تدعى شوكة التضاعف (الشكل 8-2). ترتبط سلسلة قصيرة من الـ RNA تدعى القطعة البادئة (RNA primer)، في بداية كل سلسلة بمساعدة أنزيم البريماز (DNA Primase) ليقوم أنزيم الـ DNA بوليميراز III (أنزيم البلمرة) بإضافة نكليوتيدات جديدة إليها، إنّ أنزيم الـ DNA بوليميراز III يستطيع إضافة نيكليوتيدات جديدة إلى النهاية OH - '3 الحرّة من السلسلة الجديدة المتشكلة والتي تسمى بالسلسلة القائدة (leading strand)، وبالتالي يتم تركيب هذه السلسلة بشكل متواصل بالاتجاه '5 إلى '3 حيث يتم إضافة أسس جديدة الواحد تلو الآخر (الشكل8-3)، بالمقابل يُعَدُّ تركيب السلسلة المتممة للسلسلة القائدة أكثر تعقيداً، إذ تدعى السلسلة الجديدة المتشكلة عنها بالسلسلة المتأخرة (lagging strand) ، ونظراً لعدم توافر نهاية '3 حرة يمكن لأنزيم الـ DNA بوليميراز III إضافة نكليوتيدات جديدة إليها، فإنّ هذه السلسلة يتم تركيبها ابتداءً من سلاسل قصيرة بادئة من الـ RNA من أجل تأمين نهاية '3 حرّة ، ثم

يقوم أنزيم الـ DNA بوليميراز I بإزالة تلك السلاسل واستبدالها بسلاسل من الـ DNA ليقوم بعدها أنزيم الـ DNA بوليميراز III بإضافة نكليوتيدات منقوصة الأوكسجين إلى النهاية '3 الحرّة. تدعى القطع المتشكلة بقطع أوكازاكي (وهي قطع بطول 150 نكليوتيد)، ثم يقوم أنزيم الربط الليغاز (DNA ligase) بربط القطع معاً من خلال تشكيل رابطة استيرية بين النهاية '3 من السلسلة الجديدة المتشكلة وزمرة الفوسفات في الموقع '5 أمامها لإعطاء السلسلة الكاملة المتممة للقالب (الشكل8-4).

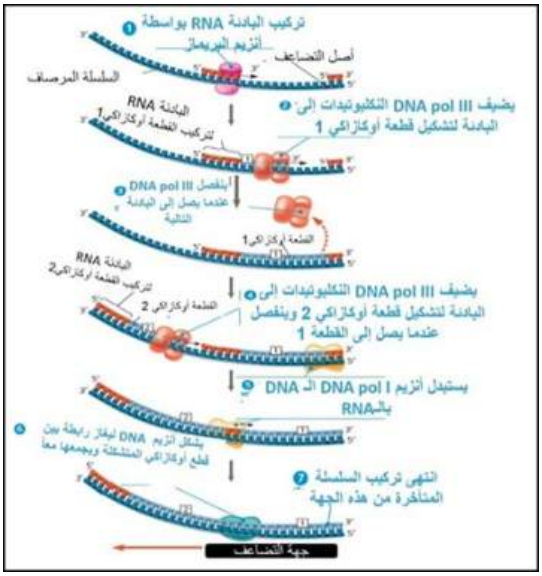
وبشكل عام، يمكن القول بأنّ السلسلة القائدة تتركب بشكل متواصل ومستمر في حين أن تركيب السلسلة المتأخرة يكون بشكل متقطع وغير مترابط.



الشكل (8–2) : شوكة التضاعف للشرح ارجع إلى النص



الشكل (8–3): تركيب السلسلة القائدة



الشكل (8–4): تركيب السلسلة المتأخرة.

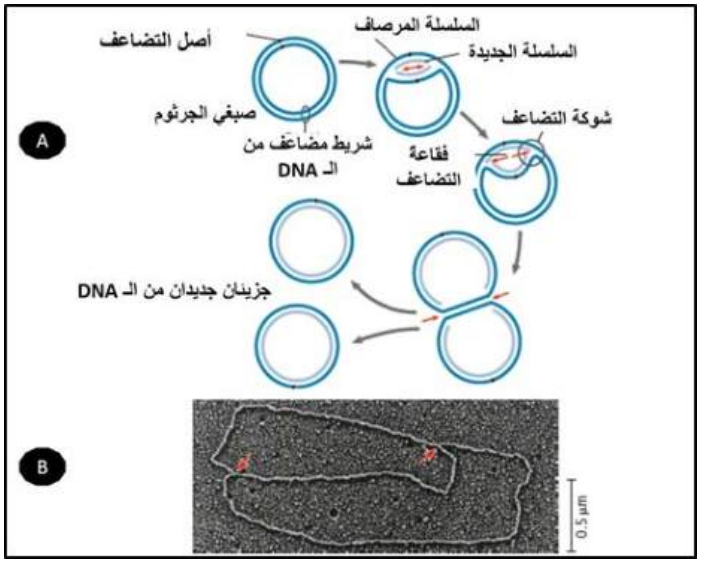
تساهم العديد من الأنزيمات في عملية تضاعف جزيء الـ DNA، ويُعَدُّ أنزيم الـ DNA بوليميراز III أهمها، حيث يقوم بإضافة نكليوتيدات جديدة إلى النهاية 3' الحرّة من السلسلة الجديدة المتشكلة ويقوم أيضاً، بما يدعى بتدقيق ومراجعة القراءة proofreading وتصحيحها حيث يقوم بتدقيق النكليوتيدات المضافة حديثاً وفحصها للتأكد من كونها متتامة مع الأساس المرصاف template فإذا كانت غير متطابقة يقوم باستبدالها. وهكذا يتبين دور الأنزيم في تحقيق الضمان الأكيد والدقة المتناهية والتصحيح المستمر في تركيب سلسلة الـ DNA مكملة للسلسلة المرصاف (الأصل) وفقاً للمعلومات المحمولة على السلسلة المرصافية.

تضاعف الـ DNA لدى الجراثيم

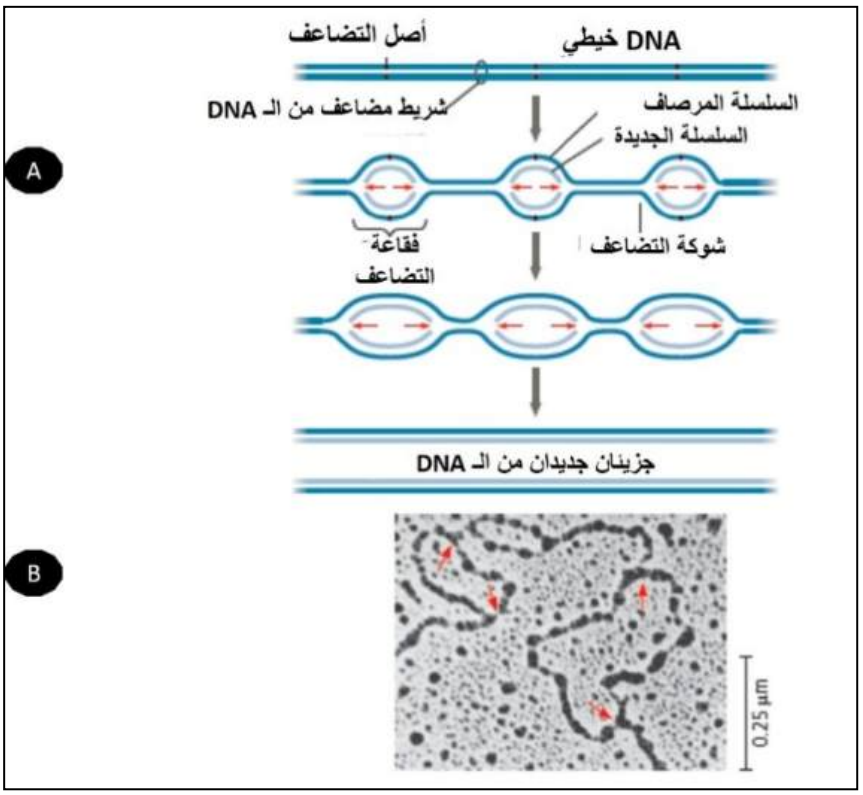
تشبه مراحل تضاعف جزيء الـ DNA لدى الجراثيم تلك لدى حقيقيات النوى، غير أنّ الجراثيم تمتلك صبغياً حلقياً وحيداً، وتبدأ عملية التضاعف انطلاقاً من نقطة واحدة تدعى أصل التضاعف (تسلسلات معينة من النكليوتيدات) تتعرف الأنزيمات والبروتينات الخاصة ببدء مرحلة التضاعف عليها وترتبط إليها. ويجري تضاعف جزيء الـ DNA لدى الجراثيم في كلا الاتجاهين لحين اكتمال تضاعف كامل الجزيء

(الشكل8-5).

تجدر الإشارة إلى أنّ معدل تضاعف جزيء الـ DNA يكون عند الجراثيم بحدود 1000 نكليوتيد بالثانية، في حين يكون لدى حقيقيات النوى أقل بكثير؛ فمثلاً عند الإنسان يكون بحدود 40 إلى 50 نكليوتيد بالثانية وهو بذلك بطيء جداً و يمكن أن يستغرق تضاعف شريط واحد من الـ DNA قرابة الشهرين !. وللتغلب على هذه الحقيقة فإن التضاعف لدى حقيقيات النوى يبدأ بنقاط عديدة مختلفة وبشكل متواقت على طول شريط الـ DNA ثم يتم وصل تلك النقاط مع بعضها بعضاً مُسَرِّعَة بذلك تضاعف جزيء الـ DNA الطويل جداً (الشكل 8-6).



الشكل (8-5): A: رسم تخطيطي يبيّن تضاعف جزيء الـDNA لدى الجراثيم. B: صورة بالمجهر الإلكتروني النافذ وتبدو فقاعة تضاعف واحدة كما تشير الأسهم لشوكة التضاعف.



الشكل (8-6): A: رسم تخطيطي يبيّن تضاعف جزيء الـDNA لدى حقيقيات النوى. B: صورة بالمجهر الإلكتروني النافذ وتبدو ثلاث فقاعات تضاعف كما تشير الأسهم لشوكات التضاعف الناتجة.

التضاعف نصف المحافظ للـ DNA

أكدت التجارب التي قام بها العالمان Meselson و Stahl عام 1958 باستخدام الوسم بالتيميدين المشع ونظير الآزوت الثقيل N^{15} و N^{14} أنّ جزيء الـ DNA يتضاعف بطريقة التضاعف نصف المحافظ؛ أي تقوم كلتا سلسلتي جزيء DNA بالعمل كمرصاف (قالب) لبناء سلسلة مقابلة لها. وبذلك يكون نصف جزيء الـ DNA مكوناً من الجزيء

الأبوي الموروث والنصف الآخر مركباً حديثاً. وهذا يعني أن سلسلة واحدة تبقى محافظة في كل حلزون مضاعف جديد إذ يتم تشكل جزيئتين جديدتين من الـ DNA تحوي كل واحدة منهما على سلسلة مرصافية آتية من الجزيء الأب وسلسلة متممة لها وفقاً لمبدأ التتامية. وبذلك يتحقق نقل المعلومات الوراثية المخزنة في جزيء الـ DNA الأصلي إلى الجزيئتين الوليدتين بحيث تملك كل خلية وليدة نفس المعلومات الوراثية للخلية الأم (الشكل 8-7) .

الشكل (8-7): التضاعف نصف المحافظ لجزيء الـ DNA

رابعاً: وظائف جزيء الـ DNA تعتمد على بنيته

❖ **الـ DNA مخزن المعلومات الوراثية في الخلية:**

يُشفر جزيء الـDNA كميات هائلة من المعلومات الوراثية ضمن تسلسل أسسه الخاص.

❖ **المادة الوراثية عُرضة للطفور أو التغيرات الدائمة في الشيفرة الوراثية:**

تحدث الطفرات من خلال تعرض جزيء الـDNA للعوامل المُطَفِرة كالأشعة وبعض المواد الكيميائية، أو أن تحدث بشكل تلقائي كما سيمر معنا لاحقاً. تحقق إمكانية تعرض المادة الوراثية للطفرات خاصة التنوع فيها.

❖ **تتضاعف المادة الوراثية باستمرار وبدقة متناهية خلال الدارة الخلوية:**

يعتمد تضاعف جزيء الـDNA على مبدأ التتامية، والذي من خلاله تصان المعلومات الوراثية وتنقل دون تغيير من جيل لآخر.

❖ **يُعبر النمط الظاهري Phenotype عن النمط الوراثي Genotype المحفوظ في المادة الوراثية:**

كما سنرى لاحقاً في الفصل التالي من هذا الكتاب فإنّه يتم نسخ الشيفرة الوراثية وتُنقل إلى السيتوبلاسما حيث تتم ترجمتها والتعبير عنها.

الفصل التاسع

الرسالة من المورثة إلى البروتين

- علم الوراثة
- بنية المورثة لدى حقيقيات النوى
- بنية المورثة لدى طلائعيات النوى
- الرسالة من المورثة إلى البروتين
- مقارنة عمليتي النسخ والترجمة بين حقيقيات وطلائعيات النوى

تمهيد:

وكما درسنا في الفصل السابق فإنّ جزيء الـDNA يُعَدُّ جوهر المُسَلّمة الرئيسة (central dogma) في الوراثة فهو يملك المخطط لتركيب الببتيدات المتعددة من خلال ثلاث عمليات أساسية وهي : التضاعف النسخ والترجمة.

درسنا في الفصل السابق تضاعف الـ DNA وسنكمل في هذا الفصل باقي العمليات من نسخ وترجمة لتكتمل معرفتنا عن الآليات التي يتحقق من خلالها تدفق المعلومات الوراثية من جيل لآخر. ولنبدأ بالتعرف على علم الوراثة وتعريفه وماذا نعني بمصطلح المورثة والتعبير الجيني Gene expression.

أولاً: علم الوراثة

هو فرع من علم الأحياء يتعامل مع الوراثة وتوريث الصفات، و آليات الانتقال الوراثي، واختلاف الخصائص الموروثة بين الكائنات الحيّة. كما يهتم بدراسة المورثات والتآثرات المورثية (بين المورثات) ودراسة الصبغيات و التغيرات المختلفة التي يمكن أن تطرأ عليهما كالطفرات مثلاً.

يمكن تقسيم علم الوراثة إلى أربعة فروع هي:

الوراثة الكلاسيكية Classical genetics : والتي تصف كيف تنتقل الصفات من جيل لآخر .

الوراثة الجزيئية Molecular genetics : تتم من خلالها دراسة البنية الكيميائية والفيزيائية للمادة الوراثية وللبروتين .

وراثة الجماعات Population genetics : والتي تعتمد على الوراثة الماندلية (وراثة الأفراد ضمن الأسرة الواحدة) و تسقطها على التركيب الوراثي لمجموعات أكبر ضمن المجتمع.

الوراثة الكمية Quantitative genetics: وهي حقل رياضي إلى حد كبير يدرس العلاقات الإحصائية بين المورثات والصفات التي ترمز لها.

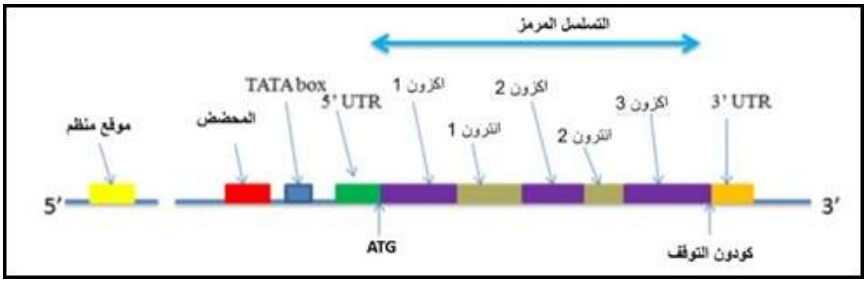
يقصد بالمورثة: هي الوحدة الوظيفية و الفيزيائية الأساسية للمعلومات الوراثية فهي قطعة من الـ DNA مؤلفة من تسلسل مرمز من الأسس بشكل شيفرة وراثية محددة لاصطناع أو نسخ جزيء RNA . يشمل هذا التعريف الوحدة الوظيفية بالكامل؛ التسلسل المرمز، والتسلسلات غير المرمزة .

التعبير الجيني Gene expression: هي العملية التي يقود فيها جزيء الـ DNA تركيب البروتين (أو في بعض الحالات تركيب جزيء RNA فقط).

ثانياً: بنية المورثة في حقيقيات النوى

تتميز المورثات لدى حقيقيات النوى بوجود مناطق مرمزة تدعى إكزونات(exons) تتخللها مناطق غير مرمزة تدعى انترونات (introns). تُقرأ المورثة بالاتجاه '5←3' لنسخ mRNA ، ترمز كل ثلاثة نكليوتيدات لحمض أميني معين تدعى بالكودون (codon) أو الشيفرة الوراثية. تلاحظ كودونات معينة توافق بداية ونهاية التسلسل المرمز؛ إذ تبدأ معظم السلاسل الببتيدية لدى حقيقيات النوى بالحمض الأميني الميتيونين (methionine, MET) لذا فإن الكودون المرمز للميتيونين وهو الـ ATG يشكل بداية التسلسل المرمز لأي بروتين، و يدعى بكودون البدء (start codon). ينتهي التسلسل المرمز بكودونات تدعى بكودونات التوقف (stop codons)، أو بالكودونات عديمة المعنى (nonsense codons) وذلك لأنها لا ترمز لأي حمض أميني هذه الكودونات هي TAG / TAA /TGA. ويدعى التسلسل النكليوتيدي المكون من كودون البداية وكودون النهاية أو التوقف الذي يحصر سلسلة طويلة من الكودونات الثلاثية بإطار القراءة open reading frame (ORF)، يقع قبل التسلسل المرمز لأول حمض أميني، وبعد نهاية التسلسل المرمز من المورثة في الاتجاهين '5 و'3 تسلسل من النكليوتيدات يدعى بالمنطقة (untranslated region, UTR) تتميز هذه المنطقة بأنها تُنسخ لكنها لا تترجم إلى حموض أمينية، فالترجمة تبدأ اعتباراً من كودون البداية وتنتهي عند كودون

التوقف فقط. تمتلك جميع المورثات مواقع تنظيمية تتعرف عليها العناصر المشاركة في عملية النسخ منها المحضض (promoter) وهو تسلسل من الأسس يتوضع بالقرب من نقطة بداية النسخ بالاتجاه '5 ، يرتبط إليه أنزيم الـ RNA بوليميراز وعناصر الانتساخ الأخرى من أجل استهلال عملية نسخ mRNA، غالباً ما يتميز بوجود تسلسلات مميزة ضمنه هي TATA–box أو CG box, أو CAAT box (الشكل 9-1)

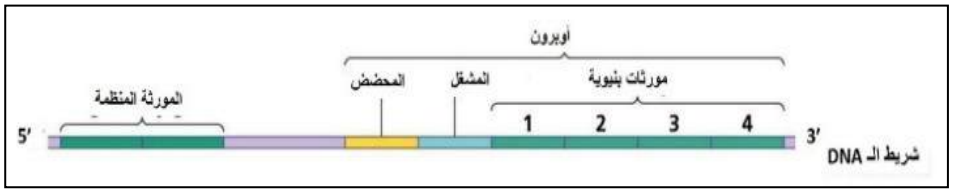


الشكل (9–1): رسم توضيحي لبنية المورثة لدى الكائنات حقيقيات النوى

ثالثاً: بنية المورثة لدى طلائعيات النوى

تختلف بنية المورثة لدى الكائنات طلائعيات النوى عنها في حقيقيات النوى، إذ تكون المورثات مجتمعة على شكل أوبيرونات operons و **الأوبيرون** : هو وحدة وظيفية من صبغي الجرثوم، يتألف من مجموعة من المورثات التي تكون مسؤولة عن الترميز للأنزيمات اللازمة لتأمين خط استقلابي معين، أو لمجموعة من البروتينات

المترافقة. يشتمل الأوبيرون على محضض promoter (مكان ارتباط أنزيم الـ RNA بوليميراز)، ومشغل operator (مكان ارتباط البروتين الكابح). ويتم التحكم بعملية التعبير المورثي من خلال مورثة تقع خارج الأوبيرون تدعى بالمورثة المنظمة regulatory gene تقوم بالترميز إلى بروتين يدعى بالبروتين الكابح(repressor protein) يرتبط هذا البروتين إلى المشغّل، ويمنع بالتالي من عمل المحضض أي يتم إيقاف عملية النسخ ، وبذلك يتم التحكم بآلية عمل وتعبير الأوبيرون(الشكل 9-2).



الشكل (9-2): رسم تخطيطي لبنية المورثة لدى طلائعيات النوى

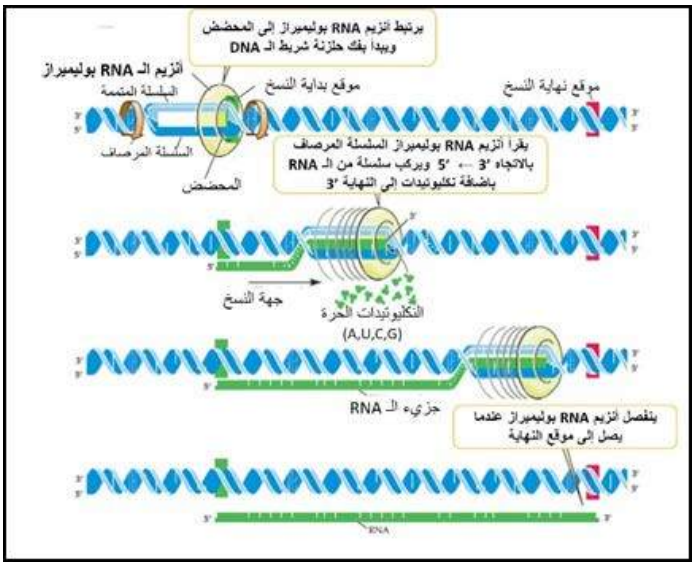
رابعاً: الرسالة من المورثة إلى البروتين (آلية تركيب البروتين)

يتضمن تركيب البروتين مرحلتين رئيستين هما: **النسخ** وهي أولى مراحل التعبير المورثي إذ يتم اصطناع تسلسلات معينة من الـ RNA الرسيل اعتباراً من جزيء الـ DNA الأصل وتلي عملية النسخ **الترجمة** إذ يتم تحويل المعلومات الوراثية المتضمنة

ضمن تسلسلات أسس جزيء الـ RNA الرسيل إلى تسلسلات من الحموض الأمينية لتشكيل سلسلة عديد الببتيد.

مرحلة النسخ أو الاصطناع الحيوي للـ RNA

تبدأ عملية النسخ اعتباراً من المحضض حيث يوجه تسلسل المحضض أنزيم الـ RNA بوليميراز باتجاه نسخ أحد سلسلتي شريط الـ DNA التي تدعى بالمرصاف template . يرتبط أنزيم الـ RNA بوليميراز إلى المحضض ويقوم بفك شريطي الـ DNAعن بعضهما كاشفاً الأسس في مكان بداية استهلال النسخ، يبدأ الأنزيم عمله بقراءة تسلسل المرصاف وبناء سلسلة متممة لها من الـ RNA اعتباراً من النكليوتيدات الحرّة الموجودة في الوسط، تبنى سلسلة الـ RNA بإضافة النكليوتيدات إلى النهاية '3 وتكون إضافة النكليوتيدات بالتتامية مع استبدال نكليوتيد اليوراسيل U بنكليوتيد التايمين T. وفي أثناء سير الأنزيم تعاود شريطتي الـ DNA ارتباطهما معاً بفضل قوة الروابط الهيدروجينية بينها. وعندما يصل الأنزيم إلى نقطة النهاية ينفصل الأنزيم عن DNA المرصاف و تتحرر سلسلة الـ RNA المرسال عنها (الشكل9-3).



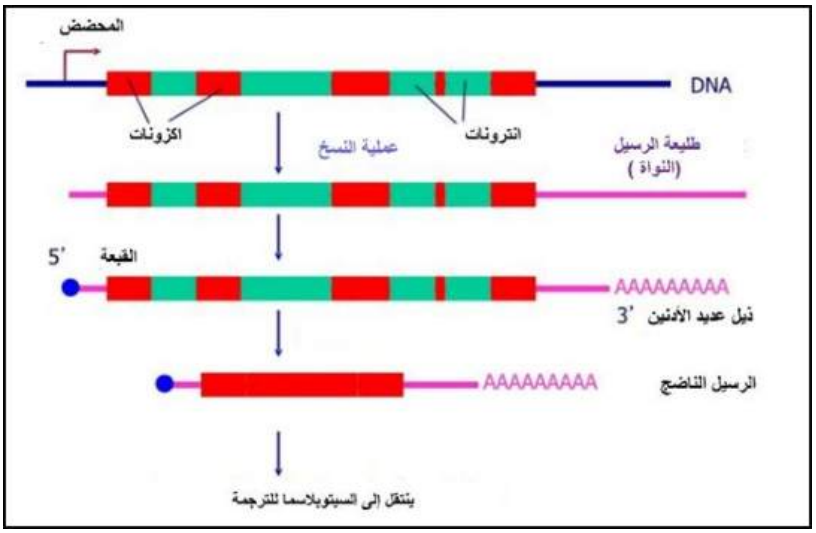
الشكل (9-3): رسم تخطيطي لعملية نسخ جزيء الـ RNA المرسال لدى حقيقيات النوى

يتم نسخ المورثة كاملة لتعطي طليعة الـ mRNA الرسيل، ثم تخوض هذه الطليعة عملية نضج لتشكيل الرسيل الناضج و الجاهز للترجمة إلى عديد ببتيد. إذ يخضع جزيء الـRNA المرسال (mRNA) لدى حقيقيات النوى إلى عمليات معالجة ضمن النواة وقبل مغادرته إلى السيتوبلاسما تتضمن ما يلي:

1- إضافة نكليوتيد الغوانين G المعدل إلى النهاية '5 من جزيء الـ RNA المرسال والتي تعرف باسم القبعة CAP تساعد هذه القبعة في تثبيت الجزيء و تمنعه من الانحلال كما تساعد في تحديد مكان بداية الترجمة.

2- إضافة ذيل من متعدد نكليوتيدات الأدنين بطول 100-200 نكليوتيد إلى النهاية '3 من جزيء الـ RNA المرسال والذي يقوم بتثبيت الجزيء ويحول دون تفككه في أثناء عبوره الثقوب النووية إلى السيتوبلاسما.

3- قطع واستبعاد الإنترونات (التسلسلات غير المرمزة) ومن ثم وصل الإكزونات (التسلسلات المرمزة) بعضها مع بعض (الشكل9-4).



الشكل (9-4):رسم توضيحي يشير إلى عملية نسخ طليعة الـmRNA الرسيل وعملية النضج التي تجري عليه في نواة الخلية و تحوله إلى جزيء مرسال ناضج جاهز لعملية الترجمة إلى بروتين

مرحلة الترجمة:

الترجمة هي المرحلة الثانية في التعبير المورثي تتم فيها قراءة جزيء الرسيل حسب الشيفرة الوراثية الحامل لها، وتتمثل أدواتها بما يلي :

1- جزيء الـ mRNA الذي يحمل الشيفرة الوراثية المرمزة للمعلومات الخاصة بسلسلة الحموض الأمينية من أجل تركيب بروتين معين.

2- الجسيمات الريبية والمكونة من تحت وحدتين منفصلتين هما: تحت الوحدة الكبيرة وتحت الوحدة الصغيرة، التي تشكل القالب الذي تتركب عليه الببتيدات ويمتلك الجسيم الريبي '3 مواقع مهمة هي: موقع ارتباط الـ mRNA وموقعين لارتباط جزيئات tRNA هما الموقع A (امينواسيتيل) والموقع P (ببتيديل).

3- الـ RNA الناقل (tRNA) و يملك موقعين مهمين هما: ذراع الحمض الأميني الذي ينتهي بالنهاية '3 حيث يرتبط الحمض الأميني تحت تأثير الأنزيمات المناسبة. الموقع الثاني الأنتيكودون الذي يتعرف ويرتبط إلى الكودون الموجود على الـ m-RNA ، إذ يتم الارتباط وفق مبدأ التتامية. يقوم الـ RNA الناقل (tRNA) بقراءة الكود (الشيفرة) ويحمل الحمض الأميني الموافق.

تمثل كل ثلاثة نكليوتيدات في جزيء الـ mRNA كودون (شيفرة) وكل كودون يحدد حمضاً أمينياً واحداً على الأقل. إنّ الشيفرة الوراثية واحدة لكل الكائنات الحيّة، وهي مؤلفة من 64 كودوناً أي: ^{3} (4) منها 61 كودوناً مرمزاً. وباعتبار أنه يوجد 22 حمضاً أمينياً فقط يدخل في تركيب البروتينات المختلفة في الطبيعة بالتالي توجد بعض الكودونات التي ترمز لنفس الحمض الأميني (الشكل 9-5) .

يتم اصطناع سلسلة عديد الببتيد على الجسيمات الريبية الموجودة حرّة في سيتوبلاسما الخلية أو المرتبطة إلى الشبكة السيتوبلاسمية الداخلية الخشنة، وذلك بوصل الحموض الأمينية بعضها مع بعض ضمن تسلسل خطي معين تحدده الشيفرة الوراثية المحمولة على جزيء الـ RNA الرسيل.

	U	C	A	G	
U	UUU - Phenylalanine	UCU - Serine	UAU - Tyrosine	UGU - Cysteine	U
	UUA - Phenylalanine	UCA - Serine	UAA - Tyrosine	UGA - Cysteine	A
	UUC - Leucine	UCC - Serine	UAC - Stop Codon	UGC - Stop Codon	C
	UUG - Leucine	UCG - Serine	UAG - Stop Codon	UGG - Tryptophan	G
C	CUU - Leucine	CCU - Proline	CAU - Histidine	CGU - Arginine	U
	CUA - Leucine	CCA - Proline	CAA - Histidine	CGA - Arginine	A
	CUC - Leucine	CCC - Proline	CAC - Glutamine	CGC - Arginine	C
	CUG - Leucine	CCG - Proline	CAG - Glutamine	CGG - Arginine	G
A	AUU - Isoleucine	ACU - Threonine	AAU - Asparagine	AGU - Serine	U
	AUA - Isoleucine	ACA - Threonine	AAA - Asparagine	AGA - Serine	A
	AUC - Isoleucine	ACC - Threonine	AAC - Lysine	AGC - Arginine	C
	AUG - Methionine (start codon)	ACG - Threonine	AAG - Lysine	AGG - Arginine	G
G	GUU - Valine	GCU - Alanine	GAU - Aspartic acid	GGU - Glycine	U
	GUA - Valine	GCA - Alanine	GAA - Aspartic acid	GGA - Glycine	A
	GUC - Valine	GCC - Alanine	GAC - Glutamic acid	GGC - Glycine	C
	GUG - Valine	GCG - Alanine	GAG - Glutamic acid	GGG - Glycine	G

الشكل (9-5): الشيفرة الوراثية

المراحل المختلفة لتركيب البروتين لدى الخلايا طلائعيات النوى

تقسم دارة الترجمة إلى ثلاث مراحل وهي:

1- مرحلة البدء أو استهلال الترجمة:

ترتبط بروتينات مساعدة تعرف بعوامل بدء التركيب وهي (IF_1, IF_2, IF_3) إلى تحت الوحدة الصغيرة من الجسيم الريبي (30s)، يلي ذلك ارتباط جزيء الـ tRNA الحامل للحمض الأميني فورميل الميتيونين وجزيء الرسيل mRNA إلى تحت الوحدة الصغيرة من الجسيم الريبي، ويؤدي ارتباط الرسيل مع موقع ارتباطه الخاص على تحت الوحدة الصغيرة إلى توضع كودون البداية AUG في الموقع P من الجسيم الريبي، و يمكن بالتالي الارتباط مع الانتيكودون الموافق له لجزيء tRNA. يشكل المجموع معقد بداية الترجمة الذي يربط إليه تحت الوحدة الكبيرة من الجسيم الريبي (50s)، وتتحرر عوامل بدء التركيب الثلاثة، ويصبح الموقع A شاغراً لاستقبال أمينو أسيتل tRNA

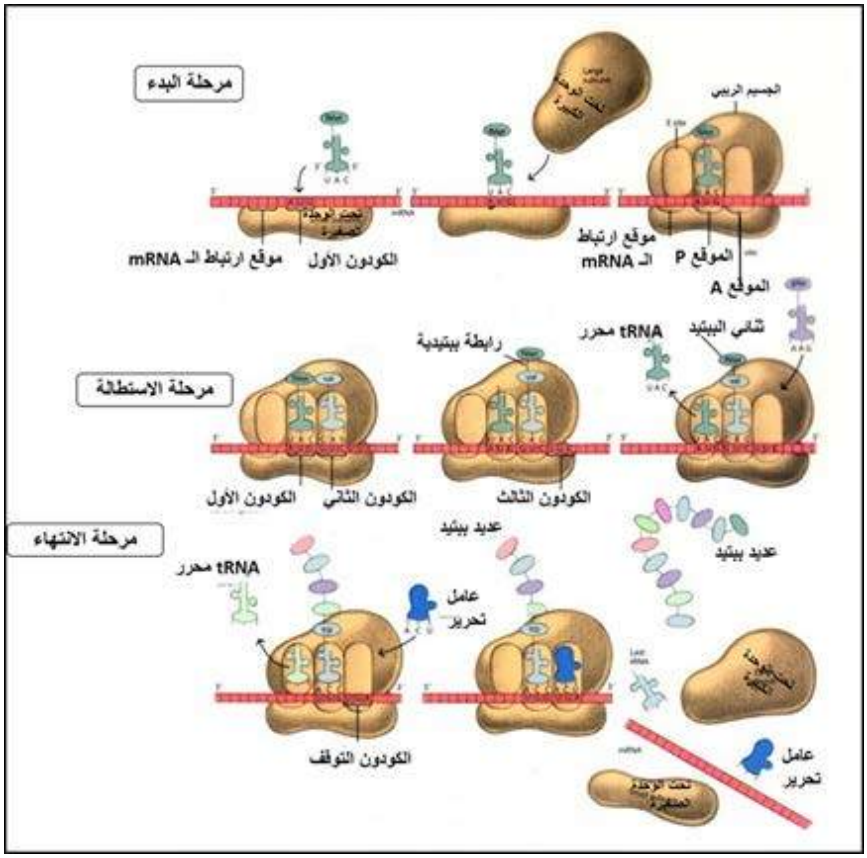
2- مرحلة الاستطالة:

تبدأ الاستطالة عندما يتوضع أمينو أسيتل tRNA (والذي يملك انتيكودون متتام مع الكودون الثاني) في الموقع A ، ويتطلب ارتباطه وجود عوامل بروتينية مساعدة تدعى عوامل الاستطالة elongation factor ، تتشكل رابطة ببتيدية بين الزمرة الأمينية للحمض الأميني المرتبط في الموقع A والزمرة الكربوكسيلية التي يرتبط بواسطتها الحمض الأميني البدئي مع tRNA المتوضع في الموقع P ويسبب تشكل هذه الرابطة نقل سلسلة متعدد الببتيد الآخذه بالنمو من الموقع P إلى الموقع A

وعندها يصبح الموقع P فارغاً ويكون الموقع A حاوياً ببتيديل الـ tRNA عندها يتقدم الـ mRNA ثلاث نكليوتيدات بحيث يجلب الكودون التالي إلى الموقع الموافق للترجمة وينتقل tRNA من الموقع A إلى الموقع P وهكذا يدخل كودون جديد إلى الجسيم الريبي ويجذب tRNA حمضاً أمينياً جديداً. وهكذا تستطيل السلسلة الببتيدية وفقاً لتتابع تسلسل ترجمة الكودونات واحداً بعد الآخر.

4- مرحلة الانتهاء:

تستمر عملية الاستطالة بإضافة الحموض الأمينية الواحد تلو الآخر حتى تصل إلى إحدى كودونات التوقف (UAA,UGA،UAG) إلى الموقع A ، إذ لا يوجد لها جزيئات من الـ tRNA فتُهاجم من قبل عوامل التحرير release factor منهيةً عملية الترجمة بتحرير سلسلة عديد الببتيد المتشكلة وانفصال وحيدات الجسيم الريبي عن بعضها بعضاً (الشكل 9-6)



الشكل (9-6): مراحل تركيب عديد الببتيد لدى طلائعيات النوى

خامساً: مقارنة عمليتي النسخ والترجمة بين الكائنات حقيقيات وطلائعيات النوى

لدى **حقيقيات النوى** يتم انتساخ نسخة طليعة من الـ mRNA تعالج هذه النسخة في النواة حيث يضاف إليها ذيل عديد الأدنين وقبعة من الغوانين وكذلك يتم قطع الإنترونات وإزالتها ووصل الإكزونات، هذه العمليات تساهم في تنظيم مستويات إنتاج

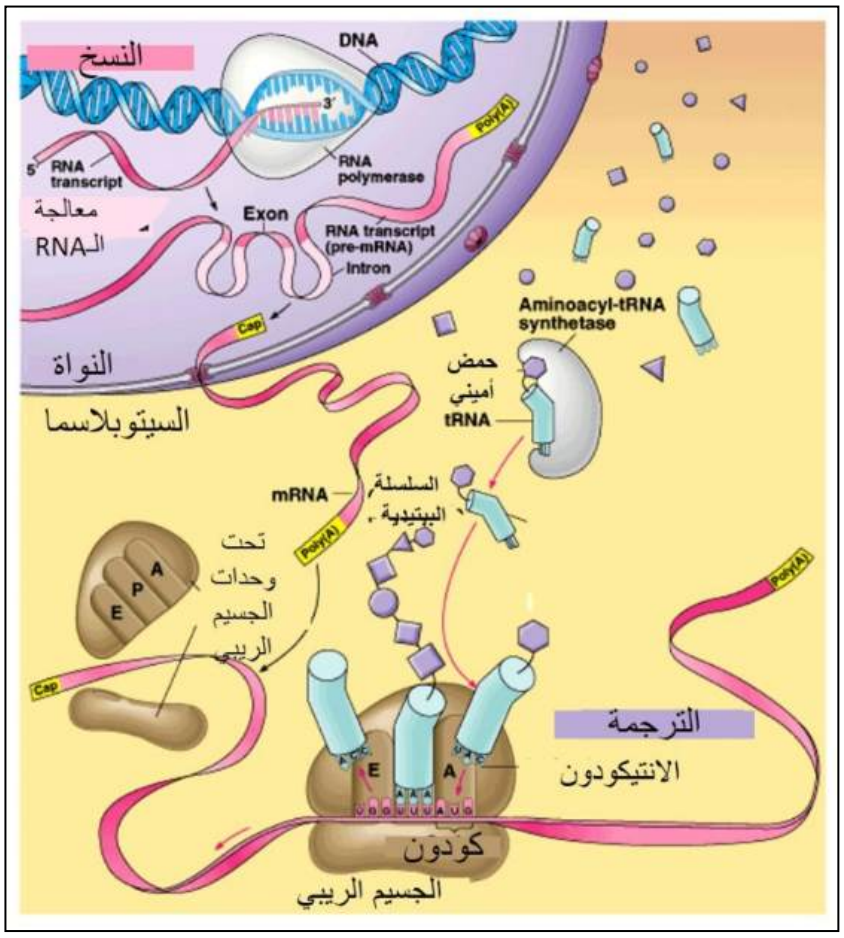
البروتين وبالتالي تساهم في تعديل التعبير المورثي. تعبر بعدها نسخة الرسيل الناضجة عبر الثقوب النووية إلى السيتوبلاسما حيث يتم ترجمتها إلى بروتين.

أما لدى **طلائعيات النوى** فالأمر أقل تعقيداً إذ يُنسخ الرسيل ويترجم في آن معاً وفي مكان واحد(تحدث عمليتي النسخ والترجمة بآن معاً) لعدم وجود الإنترونات، وتبدأ الترجمة في النهاية '5 من الـ mRNA بينما ماتزال النهاية '3 مرتبطة بجزيء الـ DNA

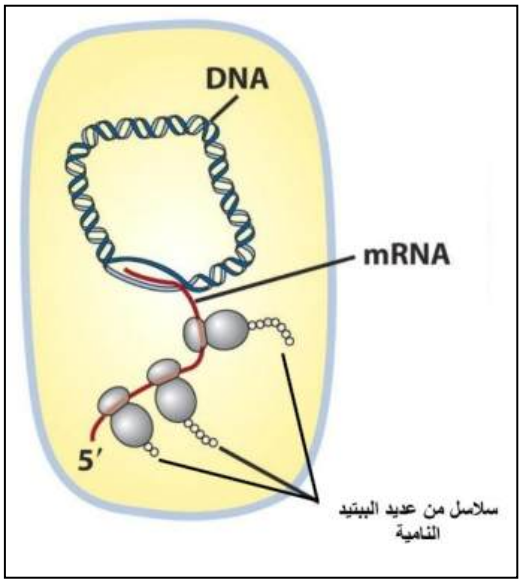
تكون عملية الترجمة تقريباً متشابهه إلاّ أنّ الاختلاف يكون في العوامل البروتينية المساعدة المستخدمة في كل من مراحل الترجمة الثلاث. وكذلك فإنّ الـ RNA الناقل الأول أو البدئي يكون حاملاً للحمض الأميني الميتيونين عند حقيقيات النوى وبالتالي فإن بداية السلسلة الببتيدية عند حقيقيات النوى تكون بالحمض الأميني الميتيونين، بينما يكون الـ RNA الناقل البدئي في طلائعيات النوى حامل للحمض الأميني فورميل الميتيونين. وتختلف حجوم الجسيمات الريبية والتي تشكل القالب الذي تبنى عليه سلسلة متعدد الببتيد بين الكائنات حقيقية النوى وطلائعيات النوى، إذ تكون 70s في طلائعيات النوى و 80s عند الكائنات حقيقية النوى.

يمكن أن تنتج عدة سلاسل ببتيدية عند طلائعيات النوى اعتباراً من جزيء رسيل واحد (أي يمكن أن يحمل الرسيل رسالة للترميز لأكثر من بروتين في آن معاً)، إذ يمكن أن يحوي جزيء الـ mRNA على عدة مواقع بدء وانتهاء. أما في حقيقيات النوى فجزيء

الرسيل يملك موقع بدء واحد وبالتالي يوجه لتشكيل سلسلة ببتيدية واحدة فقط (الشكل9-7) و(الشكل 9-8)

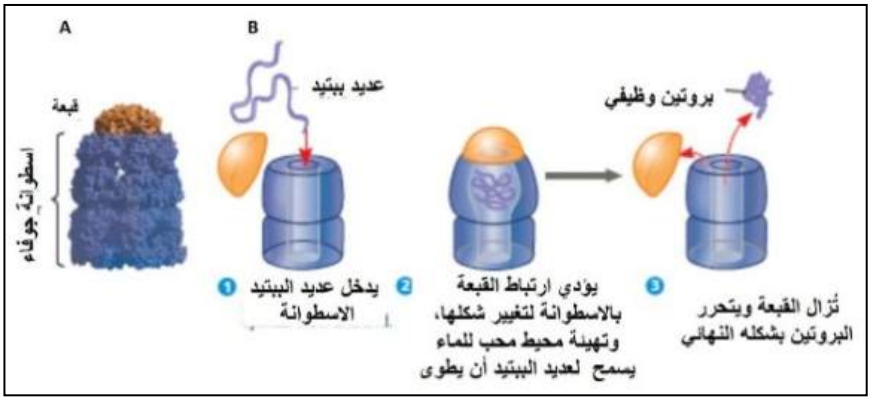


الشكل (9–7): رسم تخطيطي يُلخص عمليتي النسخ والترجمة لدى حقيقات النوى. يوضح الشكل الرسالة من المورثة حتى سلسلة عديد ببتيد.



الشكل (9-8): رسم تخطيطي يوضح عمليتي النسخ والترجمة لدى طلائعيات النوى.

تحدد الشيفرة الوراثية البنية الخطية الأولية للسلسلة الببتيدية ولكن هذه السيرورة لا تعتبر كافية لتركيب البروتين الوظيفي الذي يتطلب بنية فراغية ثلاثية الأبعاد بمراكز فعالة وظيفياً تعرف باسم البنى الثنائية والثلاثية، إذ تلتف السلسلة الخطية وتنطوي لتشكل الجزيء الوظيفي ثلاثي الأبعاد وقد تنضم سلسلتان أو أكثر لتشكل البنية الرابعية الوظيفية. وتساهم بعض البروتينات المتخصصة والتي يطلق عليها اسم البروتينات المساعدة أو الوصيفات (**chaperons**) في إعطاء البروتين شكله النهائي (الشكل 9-9).



الشكل (9-9): آلية عمل البروتينات المساعدة؛ الوصيفات A: رسم حاسوبي لأحد البروتينات الوصيفة يظهر البنى الرئيسة المكون منها. B: رسم تخطيطي لآلية عمل البروتين المساعد

وبعد أن درسنا تركيب البروتين والمراحل التي يمر بها حتى نصل إلى البروتين الوظيفي يبرز السؤال الآتي: من الذي يحدد أي بروتين يجب تركيبه في الخلية وبأي كمية و متى و أين؟

يؤدي التعبير التفاضلي للمورثات المختلفة إلى أداء الخلايا المختلفة لوظائف محددة خاصة بها، وإنّ تنظيم التعبير التفاضلي للمورثات يسمح لبعض المورثات بالتعبير عن نفسها في الزمان والمكان المحدد ويمنع غيرها.فمثلاً، وعلى الرغم من أنّ جميع الخلايا تحوي نفس المورثات لكنها تعطي أو تنتج بروتينات مختلفة والتي تحدد وظيفتها فخلايا β في البنكرياس تفرز الأنسولين ، بينما الخلايا خارجية الإفراز في البنكرياس نفسه تفرز العصارات المعثكلية الهاضمة.

الفصل العاشر
الماندلية ونماذج التوريث الرئيسة

- الماندلية وقوانين مندل الرئيسة
- مفهوم السيادة والتنحي
- مفهوم الأليلات المتعددة
- مفهوم المورثات متعددة التأثير
- نماذج التوريث الماندلية والأمراض الوراثية لدى الإنسان
- مصطلح النفاذية
- التعبير المورثي

تمهيد:

نلاحظ في الجماعات البشرية على سبيل المثال: وجود ألوان مختلفة للعين كالبني أو الأزرق أو الأخضر أو العسلي، فما هي المبادىء الوراثية التي تشرح انتقال مثل هذه الصفات من الآباء إلى الأبناء؟

سادت **فرضية المزج الوراثي** حتى منتصف القرن التاسع عشر؛ والتي تنص على أن المادة الوراثية التي يسهم بها الأبوان تمزج بطريقة شبيهة بمزج الألوان ! لكن هذه الفرضية أُسقطت مع ظهور دراسات مندل وذلك بسبب عودة الصفة للظهور من جديد في الأجيال المتعاقبة.

يُعَدُّ الراهب النمساوي مندل ((1822–1884) **Gregor Mendel**) مؤسساً لعلم الوراثة، كان يُدرّس الفيزياء والعلوم الطبيعية لطلاب المرحلة الثانوية، اهتم بزراعة النباتات وملاحظة كيفية انتقال الصفات الوراثية عبر الأجيال المتعاقبة فكانت حديقة الدير الذي يسكن فيه، مقراً لجميع التجارب التي أجراها والتي أسس من خلالها للعديد من المُسَلّمات التي نعرفها حتى يومنا هذا. ومن هناك طرح مندل نظريته في التوريث قبل أن تتم دراسة الصبغيات وملاحظتها تحت المجهر بعقود! وعلى الرغم من أن تجارب مندل كانت في معظمها على نبات البازلاء، إلاّ أنّ قوانينه تنطبق على الحيوانات والبشر أيضاً لكون آليات التوريث بشكل رئيسي هي نفسها لجميع أشكال الحياة المعقدة.

سنقوم في هذا الفصل بشرح القوانين الماندليّة ونماذج التوريث الرئيسة كما نراها اليوم، ومن ثمّ سنستعرض كيفية تطبيق تلك النماذج على وراثة التغيرات الوراثية لدى الإنسان لاسيما الاضطرابات الوراثية.

أولاً: الماندلية و قوانين مندل الرئيسة

تُعَدُّ التجارب التي قام بها مندل نموذجية بنتائجها وتفسيراتها وعاملاً أساسياً في الدخول إلى علم الوراثة، كما يُعَدُّ التهجين أساسياً في تحري سلوك المورثات في مختلف الدراسات المندلية.

درس مندل سبع صفات أساسية في نبات البازلاء (*Pisum sativum*) يمكن تمييزها بسهولة، وتظهر بشكل واحد فقط وبوضوح، هذه الصفات هي : شكل البذور ولونها، لون الزهرة وموقعها، شكل القرون ولونها و كذلك طول الساق. قام مندل أولاً بإجراء التهجين بين سلالتين صافيتين مختلفتين بصفة واحدة فقط، وهو ما يدعى **بالهجونة الأحادية**

فمثلاً: قام بتهجين سلالتين صافيتين من البازلاء تميزت الأولى بأزهار أرجوانية (بنفسجية) اللون، في حين كانت السلالة الصافية الثانية ذات أزهار بيضاء اللون. لاحظ ماندل أن جميع أفراد الجيل الأول F1 كانت ذات أزهار أرجوانية اللون. وعندما قام بتهجين نباتات الجيل الأول الهجين مع بعضها بعضاً عادت كل من الصفتين المتقابلتين للظهور (الأرجواني والأبيض) وكانت نسبة الأزهار الأرجوانية إلى الأزهار البيضاء 1:3 التي أتت من التركيب الأبيض المتنحي (الشكل 10-1) .

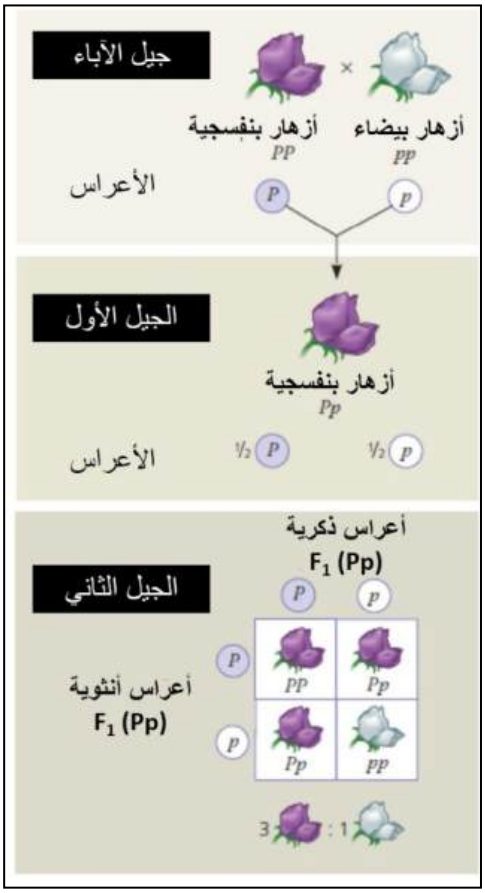
اكتشف مندل من خلال تجارب التهجين التي قام بها ولعدة أجيال متعاقبة، أن بعض الصفات تظهر في الذرية من دون أي مزج بين خصائص الأصل، أي أن الصفات الوسيطة لا تظهر. واستنتج مندل من خلال نتائج تجاربه ما يلي:

1- تُعبر أفراد الجيل الأول الهجين عن الصفة السائدة (الراجحة).

2- تعود الصفتان المتقابلتان إلى الظهور في الجيل الثاني الهجين.

3- تظهر الصفة السائدة في أفراد الجيل الثاني بنسبة تعادل ثلاثة أرباع الأفراد.

4- تبقى الصفة المتنحية مستترة في الجيل الأول وتظهر في الجيل الثاني، مما يؤكد أن المورثتين المتقابلتين(الأليلين) القادمتين من الأبوين تحافظان على ثباتهما واستمراريتهما في مختلف الأجيال الهجينة المتعاقبة



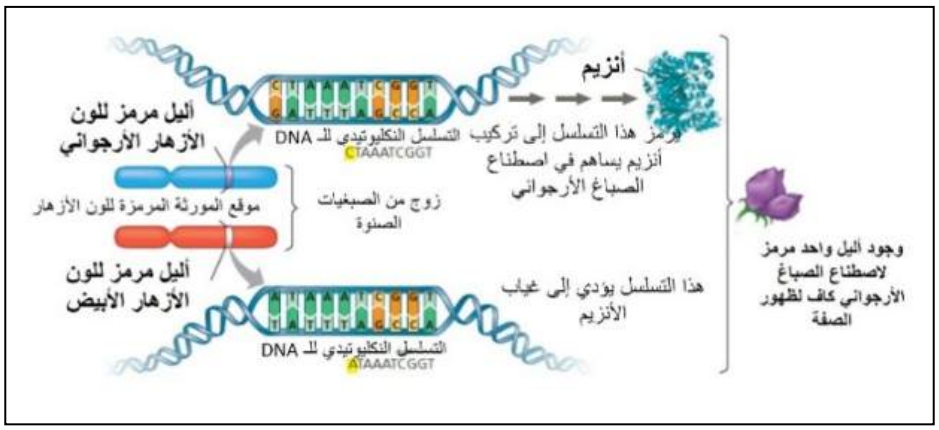
الشكل (10-1): رسم تخطيطي يُبيّن نتائج تجارب ماندل في الهجونة الأحادية على لون أزهار نبات البازلاء.

توصل مندل من خلال تجاربه إلى وضع قانونه الأول في الوراثة الذي يدعى بقانون **مندل الأول أو قانون انفصال الأليلات** و ينص على:

وجود زوج من المورثات المتقابلة (أليلات) لكل صفة في الكائنات مضاعفة الصيغة الصبغية، ينفصل كل أليل عن الأليل الآخر المقابل له انفصالاً كاملاً عند تشكل الأعراس ليعود وينضم عشوائياً في الأبناء.

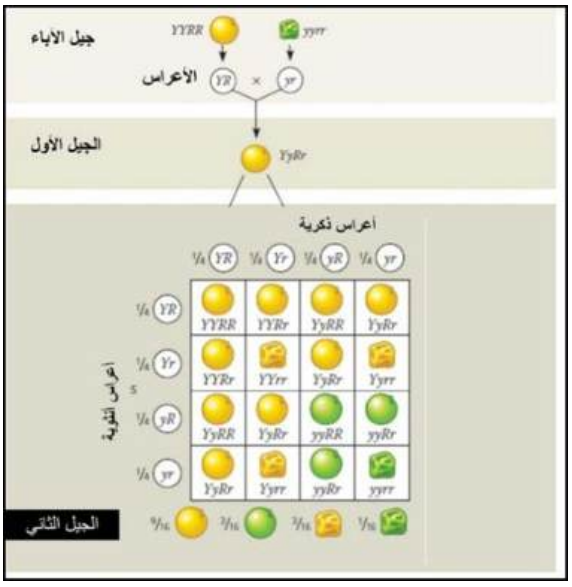
مفهوم الأليل:

لنأخذ لون الزهرة لدى نبات البازلاء كمثال لشرح مفهوم الأليل. إنّ المورثة المرمزة للون الأزهار في نبات البازلاء موجودة بنسختين؛ أحدها ترمز للون الأبيض والثانية ترمز للون الأرجواني تدعى هذه النسخ البديلة من المورثة بالأليل allele . وكما رأينا سابقاً فإنّ المورثة عبارة عن تسلسل من النكليوتيدات تقع في مكان محدد على الصبغي ، وقد يختلف تسلسل النكليوتيدات قليلاً في هذا الموضع الأمر الذي سيؤثر على تركيب البروتين ووظيفته وبالتالي سينعكس على النمط الظاهري الناتج. فالأليلان المسؤولان عن ظهور لون الأزهار في نبات البازلاء (الأرجواني والأبيض) يمثلان تسلسلين مختلفين من الـ DNA أحدهما فقط قادر على تركيب الصباغ الأرجواني. (الشكل 10-2)



الشكل (10-2): رسم توضيحي يشرح مفهوم الأليل

لم يكتفِ مندل بإجراء تجاربه على نباتات تختلف عن بعضها بصفة واحدة فقط بل أجرى تجاربه على نباتات تختلف بصفتين اثنتين أيضاً، وهو ما يدعى بالتجهين الثنائي أو **الهجونة الثنائية:** التهجين بين سلالتين مختلفتين بصفتين اثنتين **فمثلاً:** أعطى التهجين بين سلالتين من البازلاء الأولى تمتاز ببذور ملساء وفلقات صفراء وتمتاز الثانية ببذور متجعدة وفلقات خضراء أفراداً كلها متماثلة تمتاز ببذور ملساء وفلقات صفراء (F1) أما أفراد الجيل الثاني الهجين (F2) فقد أعطت الأنماط التالية : نباتات ببذور ملساء وفلقات صفراء بنسبة 9/ 16، نباتات ببذور ملساء وفلقات خضراء بنسبة 3 / 16 نباتات ببذور متجعدة وفلقات صفراء بنسبة 3/ 16 نباتات ببذور متجعدة وفلقات خضراء بنسبة 1 / 16 (الشكل 10-3) .



الشكل (10-3): رسم تخطيطي يوضح مثالاً عن تجارب الهجونة الثنائية التي قام بها ماندل .

توصل مندل من خلال تكرار تجاربه عدداً كبيراً من المرات وملاحظة نفس النسب في كل تجربة، إلى وضع قانونه الثاني في الوراثة وهو ما يدعى **بقانون التوزع المستقل** الذي ينص على:

انفصال المورثات المتقابلة في أثناء تشكل الأعراس يكون مستقل عن انفصال المورثات الأخرى، أي أن هذه الصفات المتقابلة تفترق وتتوزع مستقلة الواحدة عن الأخرى.

وضع مندل قانونيه في التوريث عام 1866 مستنداً إلى قواعد الاحتمالات الرياضية، التي سمحت له بالتنبؤ بالأنماط الظاهرية المحتمل ظهورها. ولم يتم التأكد من صحة هذه القوانين إلا بعد زمن طويل بعد اكتشاف النظرية الصبغية في الوراثة ومبادئ الانقسام

المنصف وتشكل الأعراس من قبل العالمين Sutton و Boveri تلاها إعادة التدقيق في قوانين مندل في الانفصال الصبغيات وإعادة التقائها عند الالقاح، و يُعَدُّ الفهم الواضح لعملية الانقسام الخلوي الأساس لفهم وراثة مندل، وبالتالي فنحن نعلم اليوم أنه ولكي يتحقق قانون مندل الثاني لابد من انفصال الصبغيات المتقابلة والتي تحمل المورثات المتقابلة ، خلال تشكل الأعراس لكي تتمكن المورثات المعنية بعدها من الالتقاء عشوائياً في الأبناء.

جدير بالذكر أن هذا القانون ينطبق فقط على المورثات المتوضعة على صبغيات مختلفة، أما المورثات المتوضعة بجانب بعضها بعضاً وعلى نفس الصبغي فهي تميل لأن تنتقل وتورث معاً ويكون لها نموذج من التوريث أكثر تعقيداً.

وبشكل عام، فقد كان مندل موفقاً في اختياره لنبات البازلاء إذ إنّ جميع مورثات الصفات السبع المعنية التي درسها كانت محمولة على صبغيات مستقلة. وقد أثبتت الدراسات الخلوية الصبغية لاحقاً وجود سبعة أزواج من الصبغيات المتقابلة في نبات البازلاء (يبلغ عدد صبغيات نبات البازلاء 14صبغياً).

ثانياً: مفهوم السيادة والتنحي

أظهرت التجارب المندلية في مختلف الكائنات وجود أربعة أنماط من العلاقات المبدئية بين المورثات المتقابلة هي:

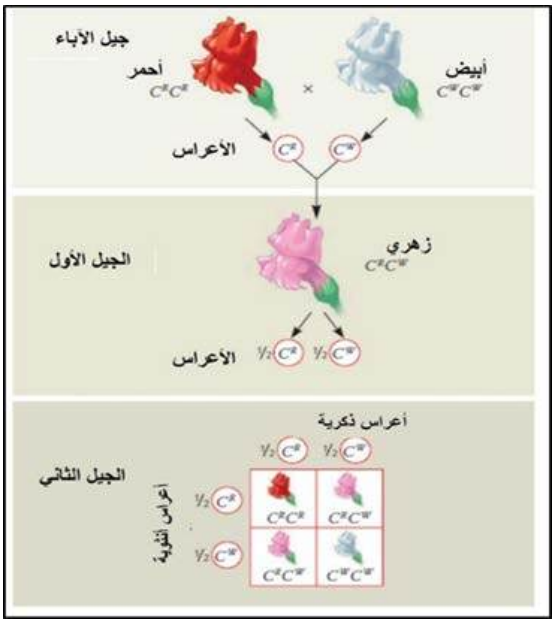
1. **السيادة الكاملة Complete dominance:** يكون فيها الطابع الظاهر للطابع الوراثي متخالف اللواقح، مماثل لأحد الطابعين الظاهريين للأبوين مثال: لون الزهرة في الجيل الأول عند نبات البازلاء (الشكل 10-1) .

2. **السيادة غير الكاملة incomplete dominance** : يكون فيها الطابع الظاهر للفرد متخالف اللواقح **طابع وسط** (مزيج) بين الطابعين الظاهرين للأبوين مثال: لون الأزهار في نبات شب الليل البستاني، فعند التهجين بين نباتين (سلالتين صافيتين) أزهار النبات الأول ذات لون أحمر وأزهار النبات الثاني ذات لون أبيض، تكون أزهار نباتات الجيل الأول جميعها ذات اللون الزهري. إذ تكون الأزهار في الجيل الأول متخالفة اللواقح وتحمل أزهارها صباغاً أحمر، تقل كميته عن كمية الصباغ الموجود لدى النبات متماثل اللواقح الأصل. وتكون نسبة ألوان أزهار النباتات لدى إجراء التهجين بين نباتات الجيل الأول 1:2:1 .(الشكل 10-4) ومن الأمثلة عن السيادة غير الكاملة أيضاً وراثة بنية أو تركيب الشعر لدى الإنسان.

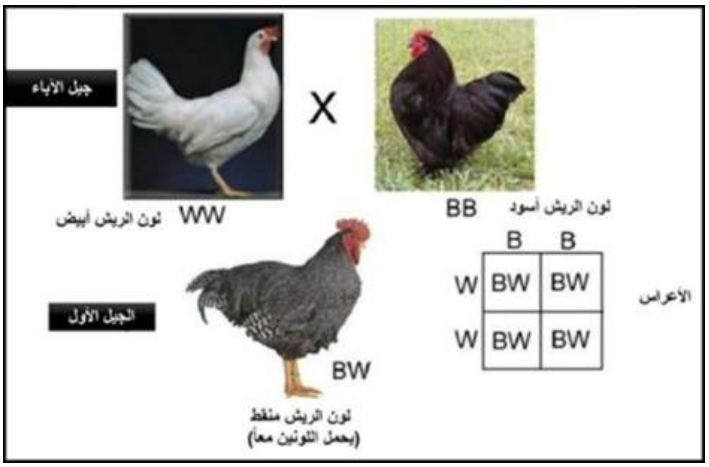
3. **السيادة المتساوية Codominance:** يعبر فيها الفرد الهجين عن طابع ظاهري يمثل مجموع الطابعين الظاهريين للأبوين مثال: الزمرة الدموية AB عند البشر والناتجة عن الزمرتين A و B (الطابع الظاهري هنا ليس حالة وسط بين النمطين بل يعبر عن كلا النمطين باعتبار كلا الجزيئتين A و B موجودتين على سطح الكرية الحمراء.ومن

الأمثلة على السيادة المتساوية أيضاً لون الفراء أو الأرياش لدى بعض الحيوانات.(الشكل 10-5).

4. **السيادة الفوقية Overdominance:** يكون الطابع الظاهر للفرد متخالف اللواقح أعلى حدية أو تعبيراً من أيٍ من الطابعين الظاهريين للأبوين فمثلاً كمية صباغ العين في عين ذبابة الخل متخالفة اللواقح(w+/w) يزيد عن كميته الموجودة في أي من عيني السلالتين الأبويتين(w+w+)(ww).



الشكل (10-4): السيادة غير الكاملة لدى نبات شب الليل البستاني



الشكل (10–5): السيادة المتساوية في وراثة لون الريش لدى الدجاج

إن تسمية المورثة (الأليل) بأنه سائد لا يكون بسبب قهره للأليل المقابل له، فلا توجد سيادة أليل على الأليل المقابل له لأن الأليلات هي مورثات؛ أي قطعة من الـ DNA ترمز إلى تركيب أنزيم أو بروتين معين، فهي تغيرات في تسلسل أسس هذه المورثات ولكل أليل مساره الخاص به يلاحظ من الطابع الوراثي حتى الطابع الظاهر.

إذا ما الذي تعنيه فعلاً حالة السيادة وما معنى القول بأن المورثة سائدة أو متنحية؟

إنّ تصنيف المورثات المتقابلة كمورثات سائدة أو متنحية يعتمد كلياً على وظيفة المورثة من خلال الناتج الواقع تحت سيطرتها، وعلى هذا يُنظر إلى المورثات الحالية من خلال المفهوم والمصطلحات الوظيفية، بالتالي فإن السيادة والتنحي لهما معنى وظيفي ملموس عندما نتعامل مع المنتوج المتشكل بفعل المعلومات التي تملكها المورثة وليس مع المورثة نفسها إذ إن لكل مورثة ذاتيتها المستقلة وقدرتها الخاصة على العمل ولا توجد أي علاقة بين المورثة ومقابلتها تعتبر سبباً في حالة السيادة والتنحي، إذ إنّ هذه الحالة لا ترتبط بطبيعة أي من المورثتين المتقابلتين علماً بأنها تختلف من زوج مورثي مقابل إلى آخر حتى إنها تختلف باختلاف البيئة أيضاً.

وسنوضح العلاقة بين السيادة والطابع الظاهري من خلال مثال شكل البذور في نبات البازلاء:

ترمز المورثة المسؤولة عن صفة البذور الملساء المدورة السائدة، لتركيب أنزيم يساعد على تحويل السكر إلى نشاء ضمن البذرة وبالتالي تخزن هذه البذور كل ما تحتويه من احتياطي من السكر على شكل نشاء ضمن البذور، أما النباتات ذات البذور المتجعدة فلا تخزن سوى القليل من النشاء لأنها تدخر معظم السكر على شكل ستاكيوز stachyose بسيط غير قابل للتحول إلى نشاء، فالمورثة المسؤولة وهي ذات الطابع المتنحي، ترمز إلى أنزيم لا يملك الكفاءة الكافية لتحويل السكر إلى نشاء لذلك يتراكم السكر في تلك النباتات، وبالتالي فإن التركيز العالي من السكر يجعل البذور تمتص

الماء حسب مبدأ الحلول مما يجعل البذور تنتفخ، و عندما تنضج البذور و تجف تتشكل التجاعيد فصفة التجعد تظهر فقط عندما تجف البذور بعد نضجها ويذهب الماء عنها، بالمقابل في حالة الأليل السائد ونظراً لتحول السكر إلى نشاء فإن البذور لا تمتص الماء و بالتالي لا تتجعد عندما تجف.

على الرغم من أن قوانين مندل دُرست أولاً على نبات البازلاء وذبابة الفاكهة إلاّ أنه سرعان ما تبين أن هذه القوانين تنطبق أيضاً على سائر الكائنات الحيّة الأخرى، فهنالك العديد من الصفات الوراثية مثلاً عند الإنسان التي تتبع قوانين مندل في التوريث مثل: شكل منبت الشعر، فهناك مورثة ترمز إلى شكل منبت الشعر ولها أليلان متقابلان يرمز الأول W إلى الصفة السائدة والتي يكون فيها محيط منبت الشعر بشكل مدبب في حين يرمز الأليل الثاني w إلى الصفة المتنحية والتي يكون فيها محيط منبت الشعر بشكل مستقيم. وكذلك وضعية شحمة الأذن إذ تُعَدُّ شحمة الأذن الحرّة صفة سائدة بينما شحمة الأذن المرتبطة هي صفة متنحية أيضاً شكل وحجم شحمة الأذن.

تواتر الصفات السائدة.

لربما يسود الإعتقاد بأنّ الأليل السائد المسؤول عن صفة معينة يكون أكثر انتشاراً في المجتمع من انتشار الأليل المتنحي المسؤول عن الصفة نفسها. ولكن في واقع الأمر هذا ليس بالضرورة أن يحدث فعلى سبيل المثال: في الولايات المتحدة الأمريكية هناك

إحصائيات تشير إلى أنه يولد طفل واحد من أصل 400 لديه إصبع زائد، تدعى هذه الصفة بكثرة الأصابع (polydactyly) إنّ الأليل المسؤول عن هذه الصفة الغريبة يمتلك صفة السيادة على الأليل المقابل له الأكثر انتشاراً و المسؤول عن صفة الخمسة أصابع، بمعنى أنه يوجد 399 فرداً من بين 400 يحملون التركيب المتماثل اللواقح المتنحي لهذه الصفة وبالتالي فإنّ الأليل المتنحي هو أكثر انتشاراً من نظيره السائد(الشكل 10-6).

الشكل (10-6): صورة لأحد الأفراد الحاملين لصفة كثرة الأصابع

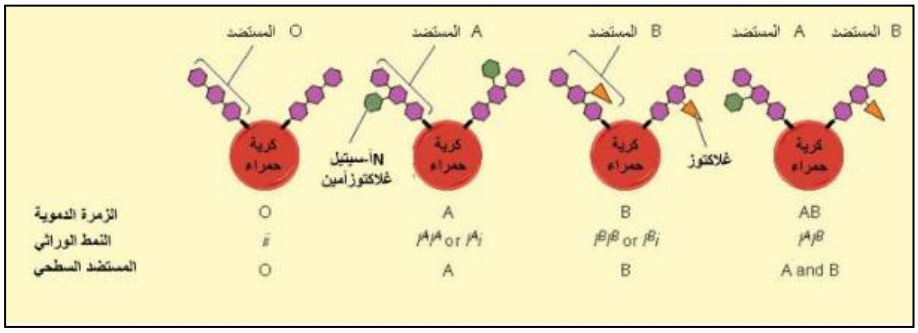
وصف مندل نماذج التوريث وفقاً لقانونيه (قانون الانفصال و التوزع المستقل)، إذ تشمل الماندلية البسيطة مورثة واحدة لها أليلان أحدهما سائد والآخر متنح. غير أنّ الوراثية الماندلية تُعَدُّ أعمق وأوسع من ذلك بكثير خاصة عندما تتضمن مجموعة من الأليلات أو المورثات المتعددة.

ثالثاً: مفهوم الأليلات المتعددة

تُظهر معظم المورثات أكثر من شكلين للأليل الواحد فعلى سبيل المثال، يحدد الزمرة الدموية عند الإنسان مجموعة من الأليلات التابعة للمورثة *ABO*. وتُعَدُّ الزمرة الدموية مثالاً جيداً للمورثات المتقابلة التي تشغل نفس الموقع الوراثي على الصبغي رقم 9 بحيث إذا تحقق تقابل مورثتين منها عند الإلقاح تشكلت الزمرة الدموية في الفرد الواحد. إذ تختلف الزمرة الدموية عند الإنسان وفقاً لنمط المستضد المعروض على سطح الكريات الحمراء. وتوجد أربعة أنماط ظاهرية مختلفة شائعة للزمرة الدموية لدى البشر، فمن الممكن أن يحمل الفرد الزمرة الدموية من النمط A أو B أو AB أو O. تنتج الزمر الدموية الأربع عن التراكيب المختلفة من الأليلات الثلاثة المختلفة والتي ترمز لتركيب الأنزيم I الذي يربط المجموعات السكرية A و B إلى سطح الكرية الحمراء حيث يضيف الأنزيم المرمز بالأليل I^A الكربوهيدرات A بينما يضيف الأنزيم المرمز بالأليل I^B الكربوهيدرات B أما الأنزيم المرمز بالأليل i لا يضيف أي من النوعين من الكربوهيدرات وبما أن كل فرد مضاعف الصيغة الصبغية يحمل أليلين لكل صفة فهناك ستة أنماط وراثية محتملة لوراثة الزمر الدموية هي $I^A I^A$ أو $I^A i$ أو $I^B I^B$ أو $I^B i$ أو $I^A I^B$ أو ii وباعتبار أن كلا الأليلين I^A و I^B سائدين على الأليل i تكون الزمرة الدموية للأفراد الحاملة للتركيبين الوراثيين $I^A I^A$ أو $I^A i$ هي A وكذلك بالنسبة للتركيبين الوراثيين $I^B I^B$ أو $I^B i$

تكون الزمرة الدموية B ، أما الأفراد الحاملون للنمط متماثل اللواقح المتنحي ii فتكون الزمرة الدموية العائدة لهم من النمط O

وكما ذكرنا سابقاً، فهناك سيادة متساوية ما بين الأليلين I^A و I^B ، لذا فإن الأفراد الحاملين للتركيب الوراثي متخالف اللواقح $I^A I^B$ يحملون الزمرة الدموية AB (الشكل 10-7).



الشكل (10-7) : تحديد الزمر الدموية ABO بواسطة الأليلات المتعددة

رابعاً: مفهوم المورثات متعددة التأثير Pleiotropic genes

يشير مصطلح المورثات متعددة التأثير إلى حالة بعض المورثات التي تُعَدُّ مسؤولة عن إظهار عدد من الصفات التي تبدو غير مرتبطة معاً ظاهرياً، ويظهر هذا التأثير بشكل واضح عندما تطفر هذه المورثة فتضطرب الصفات المرتبطة بها. ولعل أوضح مثال على المورثات متعددة التأثير هو **مرض فقر الدم المنجلي**.

فإذا ما أخذنا شكل جزيئات الهيموغلوبين الطافرة وبنيتها، وشكل الكرية الحمراء والحالة الفيزيولوجية للفرد فمن غير المستبعد أن مورثة واحدة قادرة على أن تؤثر على عدد من الصفات في المتعضية

خامساً: الأمراض الوراثية التي تتبع نماذج التوريث المندلية لدى الإنسان

يمكن تصنيف الأمراض الوراثية أو نماذج التوريث المندلية حسب مكان توضع المورثة المسؤولة عن المرض، وحالة الأليلات كي يتم التعبير عن النمط الظاهري ضمن 5 صفوف رئيسة وهي:

1. الأمراض الوراثية الجسمية المتنحية Autosomal Recessive inheritance:

تقع المورثة المسؤولة عن المرض على صبغي جسمي، ولكي يتم التعبير عن المرض يجب أن يكون كلا الأليلين طافرين.

الصفات العامة :

أ. المورثة المتنحية المسؤولة عن المرض متوضعة على أحد الصبغيات الجسمية

ب. يكون الفرد المصاب متماثل اللواقح homozygous بالنسبة للمورثة الطافرة المسؤولة عن المرض، أي أنه ورثَ الأليلين الطافرين من أبويه.

ت. يكون والدا الفرد المصاب سليمين ظاهرياً ولكن حاملين للمرض وفي حالة تخالف لواقح (*A*⁄a) heterozygous، لذا فإن احتمال ولادة طفل مصاب يكون (25%)

ث. يتم التوريث عن طريق الذكور والإناث على حد سواء.

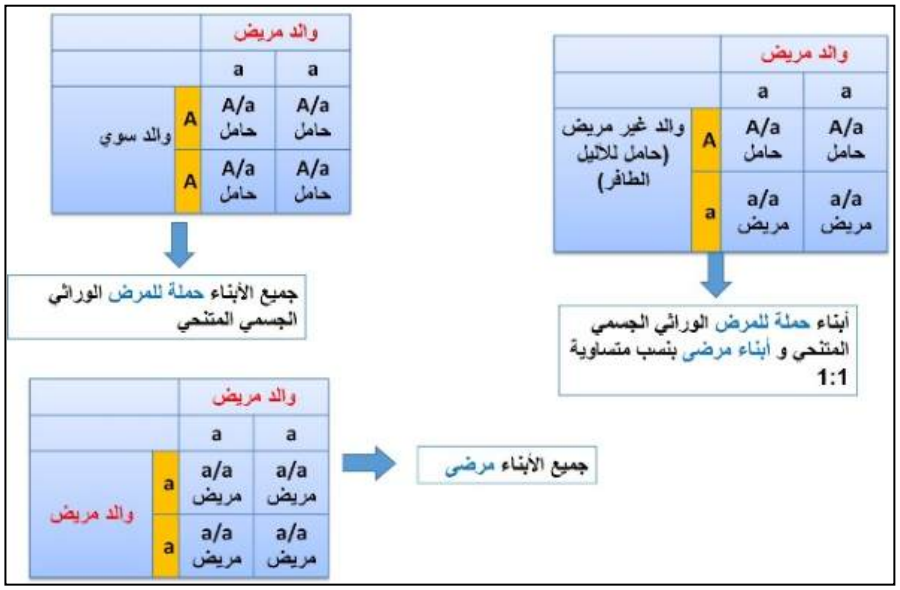
ج. لا يظهر المرض في كل جيل (يحدث تخطي للأجيال).

ح. تظهر بين الأخوة والأخوات فقط في العائلة.

الجدول (10–1) يوضح الوراثة الجسميّة المتنحيّة.

		والد غير مريض (حامل للأليل الطافر)	
		A	**a**
والد غير مريض (حامل للأليل الطافر)	**A**	**A/A سوي**	**A/a حامل**
	a	**A/a حامل**	**a/a مريض**

يورث الفرد المريض (متماثل اللواقح (Homozygotes (*a/a*) المورثة الطافرة لأبنائه ولكن هناك عدة احتمالات حسب النمط الوراثي للوالد الآخر (الشكل 10-8).



الشكل (10-8): وراثة المرض الجسمي المتنحي لدى الإنسان

يبقى حاملو الأمراض الوراثية الجسمية المتنحية أصحاء ولا يظهر المرض عليهم عادة، لذا من الصعب تشخيصهم وملاحظتهم سريرياً، وتكون نسبة تكرار حاملي المرض في المجتمع أكثر بكثير من المرضى أنفسهم. ومن الأمثلة الشائعة لهذا النمط من الأمراض الوراثية: مرض التليف الكيسي (cystic fibrosis) وفقر الدم المنجلي (sickle cell anaemia) والتلاسيميا (thalassemia).

2. الأمراض الوراثية الجسمية السائدة Autosomal Dominant inheritance:

تقع المورثة المسؤولة عن المرض على صبغي جسمي، ويكفي وجود أليل واحد طافر كي يتم التعبير عن المرض.

الصفات العامة :

أ. المورثة المسؤولة عن المرض تقع على أحد الصبغيات الجسمية.

ب. يكفي وجود أليل واحد طافر كي يتم التعبير عن المرض، وغالباً يكون الشخص المصاب متخالف اللواقح (Aa).

ت. تصيب كلا الجنسين الذكور والإناث، على حد سواء.

ث. يكون أحد الأبوين على الأقل مريضاً.

ج. يظهر المرض في كل جيل وبنسبة خمسين بالمئة من الأفراد.

ح. لا تنتقل عبر الأشخاص السليمين الذين لا يظهر لديهم المرض (الجدول10-2).

الجدول (10-2): الوراثة الجسمية السائدة، إذ يكفي وجود أليل واحد طافر حتى يظهر المرض.

		والد سوي	
		a	a
والد مريض	A	A/a مريض	A/a مريض
	a	a/a سوي	a/a سوي

من الأمراض الوراثيّة التي توّرث وفق النموذج الجسمي السائد: مرض فرط كولسترول الدم العائلي Familial Hypercholesterolemia و مرض هنتنغتون Huntington's Disease

3. الأمراض الوراثية المرتبطة بالصبغي الجنسي X المتنحية X-linked recessive inheritance:

تقع المورثة المسؤولة عن المرض على الصبغي الجنسي X و يختلف التعبير عن تلك المورثة بين الإناث والذكور ففي حين تعبر المورثة عن نفسها بشكل عام لدى الذكور يجب أن يكون كلا الأليلين طافرين عند الإناث كي يتم التعبير عن المرض.

الصفات العامة :

أ. تتوضع المورثة المسؤولة عن المرض على الصبغي X و يجب أن يكون كلا الأليلين طافرين كي يتم التعبير عن المرض عند الأناث.

ب. يكون المصابون من الذكور فقط، ولا تبدي الأمهات أعراض المرض الوراثي لكنها تكون حاملة له، إذ ينتقل المرض عن طريق إناث سليمات ظاهرياً وحاملات للمورثة الطافرة.

ت. يكون نصف أبناء الأمهات الحاملات للمرض من الذكور مصابين ويكون نصفهم من الإناث حاملين للمورثة الطافرة .

ث. ينقل الذكر المصاب المرض إلى جميع بناته ويكون جميع أبنائه من الذكور سليمين (لا تنتقل من ذكر إلى ذكر بصورة مباشرة).

ج. قد يظهر المرض عند الإناث عندما يتزوج أب مصاب من أم حاملة للمرض، نظراً لتشكل حالة متماثلة اللواقح.

من الأمثلة عن هذا النمط من الأمراض: مرض عمى الألوان ، الناعور haemophilia، حثل دوشين العضلي Duchene muscular dystrophy، ومرض الفُوّال (عوز الأنزيم غلوكوز-6 فوسفات، G6PD).

4. الأمراض الوراثية المرتبطة بالصبغي الجنسي X السائدة X-linked dominant inheritance:

الصفات العامة :

أ. تقع المورثة المسؤولة عن المرض على الصبغي X و يكفي وجود أليل واحد طافر كي يتم التعبير عن المرض عند الإناث.

ب. تنقل الذكور المصابة المرض لجميع الأبناء من البنات اللواتي يكن مصابات حتماً.

ت. يكون جميع أبناء الأم المصابة والمتماثلة اللواقح X^AX^A بالنسبة للمورثة الطافرة مرضى، أما في حالة تخالف اللواقح X^AX^a فهناك احتمال 50% أن يصاب أبناؤها بالمرض.

ث. الإناث في هذا النمط من الأمراض أكثر عرضة للإصابة بالمرض، وغالباً ما يتوفى الذكور المصابون بالمرض لذا يكون عدد الذكور المصابين في العائلة أقل بينما تكثر نسبة الإناث المصابات.

وتُعَدُّ متلازمة ريت Rett syndrome و مرض لين العظام المقاوم لفيتامين D (Rickets resistant to vitamin D) من أشهر الأمثلة عن هذا النمط من الأمراض.

5.الأمراض الوراثية المرتبطة بالجسيمات الكوندرية mitochondrial inheritance

تنشأ الأمراض الوراثية المرتبطة بالجسيمات الكوندرية نتيجة حدوث طفرة في أحد المورثات المتوضعة على DNA الجسيمات الكوندرية (mtDNA) . تنقل الأم المصابة بالمرض المورثة الطافرة لجميع أبنائها (جميع ذرية الأم الحاملة للطفرة الوراثية من الذكور والإناث مرضى) لا يورث الأب المريض الطفرة لأي من ذريته.

تصيب الأمراض المرتبطة بالجسيمات الكوندرية عادة الأعضاء والأنسجة التي تحوي على عدد كبير من الجسيمات الكوندرية والتي تعتمد على الأكسدة الهوائية وإنتاج الـ ATP ، من أشهر الأمثلة عن هذا النمط من الأمراض : مرض ليبر أو الاعتلال العصبي البصري الوراثي Leber hereditary optic neuropathy (LHON)

تجدر الإشارة إلى وجود عدد قليل من الصفات الظاهرة التي ترمز لها مورثة واحدة فقط (single gene traits)، وأنّ مصطلح السيادة والتنحي ينطبق فقط على الصفة التي تُرمّز بمورثة واحدة؛ وهذا يعني أنّ معظم الصفات الوراثية هي نتاج تآثر بين مجموعة من المورثات وبالتالي فإنه يكون من الصعب التنبؤ بنموذج توريث هذه الصفات.

عند دراسة العلاقة بين النمط الظاهري والنمط الوراثي فإنه من المفيد دراسة أو إحصاء تكرار ظهور ذات النمط الظاهري للنمط الوراثي الواحد ضمن الجماعة، لأنه في كثير من الحالات لا يتجلى النمط الظاهري كما هو مبرمج في النمط الوراثي، فأحياناً لا يتم التعبير عن النمط الوراثي مطلقاً، وأحياناً أخرى يتم التعبير عن النمط الوراثي لكن بدرجات متفاوتة بين الأفراد، أي لا تتجلى كل الأنماط الظاهرية بذات الدرجة.

ويستخدم مصطلح **النفاذية Penetrance** لتحديد نسبة الأفراد التي تحمل نمطاً وراثياً معيناً وتُظهر النمط الظاهري الموافق له، إذ تكون النفاذية 100% أو كاملة في حال عَبَّر جميع الأشخاص الحاملين لمورثة ما عن الصفة بذات الدرجة، و تكون النفاذية غير كاملة إذا عَبَّر بعض الأشخاص عن ذات الصفة بينما لم يعبر الأشخاص الباقون عنها، ولعل من أبرز الأمثلة على هذه الحالة ورم أرومة شبكية العين Retinoblastoma، والذي ينجم عن مورثة طافرة إذ أنّ المرض يظهر عند 75% فقط من الأفراد الحاملين لهذه المورثة الطافرة، (نفاذية غير كاملة).

التعبير المورثي Expressivity :

وهو مصطلح يمثل الدرجة التي تعبر فيها المورثة عن النمط الظاهري ضمن الفرد. فالتعبير المورثي يمكن أن يكون متغيراً أو متفاوتاً (فقد يصيب سرطان الشبكية كلتا

العينين أو أحدهما)، أو أن يكون التعبير المورثي غير متغير مثل لون البذرة في نبات البازلاء. وهناك مجموعة من العوامل التي تؤثر على التعبير المورثي ؛ كالتركيب الوراثي ،العوامل بيئية ، العمر إلخ.. وباعتبار أنه قد لا يظهر الأشخاص الحاملين لتركيب وراثي معين النمط الظاهري العائد له أو قد يتفاوت التعبير عن التركيب الوراثي نفسه ضمن الجماعة فإنّ **العلاقة بين نمط ورثي ما و النمط الظاهري الخاص فيه ليست مُطْلَقة؛** فالنفاذية قد تكون غير كاملة والتعبير عن النمط الظاهري قد يكون متفاوتاً. **مثال:**

تشكل درجة الحرارة مكوناً من المكونات البيئية التي يمكن أن تؤثر وبشكل ملحوظ على النمط الظاهري للفرد.

فعلى سبيل المثال تؤثر درجة الحرارة على لون الفراء المميز لدى القطط السياميّة Siamese cat، وأرانب هيميلايا Himalayan rabbits، إذ تملك هذه الأنواع مورثة متنحية تكون دوماً بحالة متماثلة اللواقح، ترمز لاصطناع أنزيم Tyrosinase الذي يحفز إنتاج صباغ الميلانين الداكن. يمتاز أنزيم Tyrosinase بأنّه لا يعمل في درجة حرارة الجسم الطبيعية ويصبح فعّالاً فقط في درجات الحرارة المنخفضة والتي تكون في الأطراف الإنتهائية من الجسم و حول الأنف و الأذنين و الذيل حيث يحفز الأنزيم في تلك الأماكن إنتاج الميلانين ولذا يدعى هذا الأنزيم بالأنزيم الحساس لدرجة الحرارة (الشكل 10-9).

الشكل (10–9) A: صورة لقطة سيامية وأرنب هيميلايا تبين الفرق في لون الفراء بين الجسم والأطراف وحول الأنف و الأذنين وكذلك الذيل. B: مخطط يوضح الأماكن التي يعمل فيها الأنزيم وفق درجة حرارة الجسم.

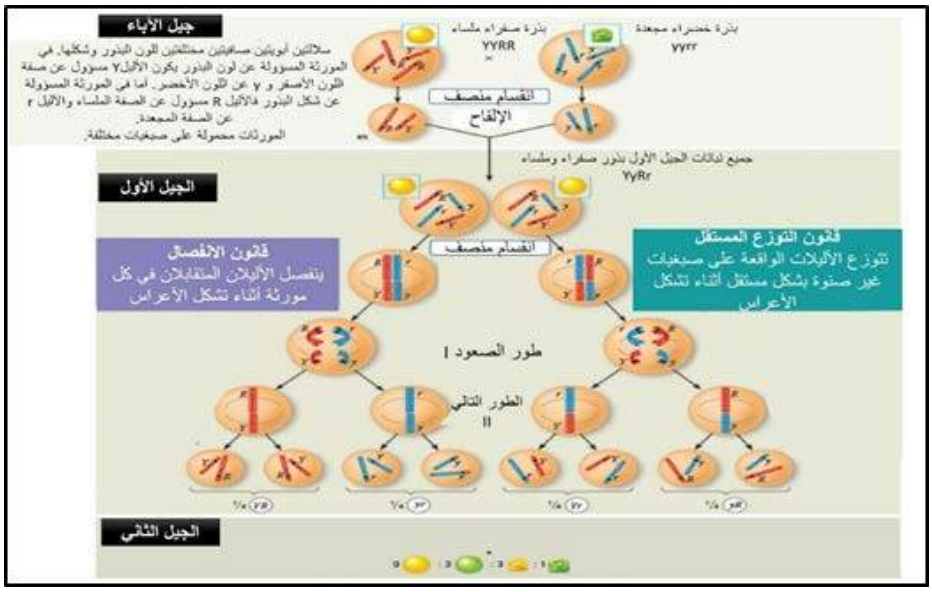
الفصل الحادي عشر
النظرية الصبغية في الوراثة

- النظرية الصبغية في الوراثة
- مفهوم الارتباط المورثي والوراثة المرتبطة بالجنس
- العبور الصبغي
- الخرائط الوراثية
- فرضية ليون والتعطيل الصبغي X

أولاً: النظرية الصبغية في الوراثة

درس العلماء منذ عام 1875 وباستخدام التقنيات المجهرية سيرورة الانقسام الخلوي، ومع بداية عام 1900 بدأ يتضح التوازي بين سلوك الصبغيات المتقابلة و سلوك الأليلات المتقابلة (عناصر مندل). فالصبغيات توجد في أزواج وفي كل زوج يوجد صبغيان أحدهما موروث من الأب والآخر موروث من الأم، وكذلك توجد الأليلات أو المورثات المتقابلة.

ينفصل الصبغيان كل عن الآخر انفصالاً كاملاً خلال الانقسام المنصف ليذهب كل منهما إلى عروس وكذلك تفعل المورثات المتقابلة ويكون الترتيب المغزلي للصبغيين في كل زوج صبغي مستقلاً عن ترتيب الأزواج الصبغية الأخرى. وبذلك تمتلك العروس الواحدة مزيجاً من الصبغيات الأبوية و الأمومية المنشأ، وهذا هو شأن الأليلات التي تتوزع توزعاً مستقلاً كل واحدة عن الأخرى. ويعيد الإلقاح العدد المضاعف للصبغيات وكذلك الأمر بالنسبة للأليلات. ونظراً لانطباق الخصائص الصبغية على المبادىء المندلية للوراثة استدعى قيام النظرية الصبغية في الوراثة والتي تنص على أن : **الصبغيات تحمل المورثات وأن سلوك هذه المورثات في الانقسام المنصف بنوعيه يحقق الشرح الكافي للوراثة المندلية.** ولنوضح مفهوم النظرية الصبغية في الوراثة من خلال وراثة لون البذور وشكلها عند نبات البازلاء والذي يُبيّنه (الشكل 11-1).



الشكل (11-1): الأساس الصبغي لقوانين مندل ؛ النظرية الصبغية في الوراثة (للتبسيط رسمت فقط الصبغيات المعنية)

ثانياً: مفهوم الارتباط المورثي و الوراثة المرتبطة بالجنس

مع بداية القرن العشرين، بدأ مورغان تجاربه في مختبر للحشرات في جامعة كولمبيا، وعلى الرغم من أنه في بادئ الأمر كان مشككاً بالمندلية وبالنظرية الصبغية إلاّ أنّ تجاربه جاءت مقنعة بالشكل الكافي، وأعطت الدليل الملموس عن علاقة المورثات بالصبغيات وبأنّ الصبغيات هي فعلاً حوامل المورثات. أجرى مورغان تجاربه على ذبابة الفاكهة *Drosophila melanogaster* و خرج بنتائج واكتشافات عديدة عن المورثات وطرق التوريث الصبغي. كان مورغان موفقاً في اختياره لتلك الحشرة للدراسة الوراثية للأسباب الآتية:

1- هي حشرة غير ضارة

2- من السهل إكثارها وتعطي المئات من الحشرات بدءاً من عملية تزاوج واحدة

3- يمكن الحصول على أجيال جديدة منها كل أسبوعين.

4- تملك أربعة أزواج من الصبغيات يمكن تمييزها بسهولة تحت المجهر، ثلاثة منها جسمية وزوج واحد جنسي (XX) و (XY).

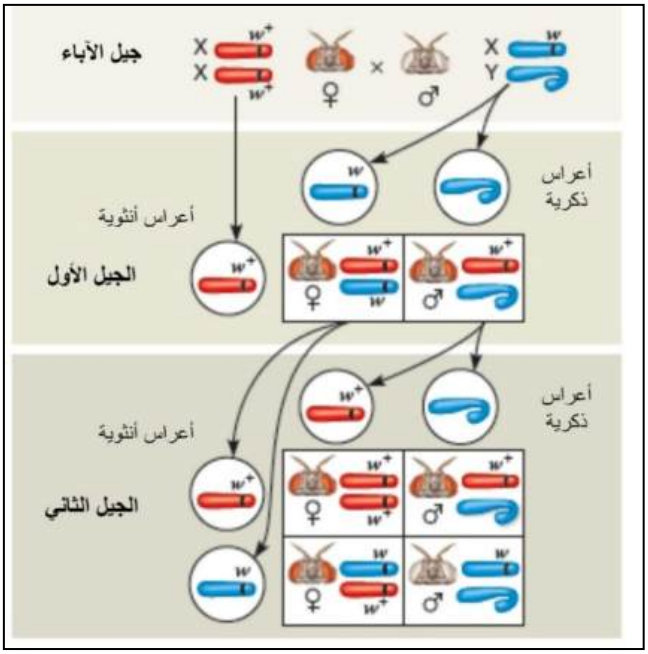
يُعَدُّ لون العيون الأحمر النمط الوحشي Wild type لعيون ذبابة الفاكهة، مقارنة بالنمط الطافر Mutant type الذي يكون لون العيون فيه أبيض. وبعد عام من تربية الذبابات حظي مورغان بذبابة ذكر طافرة تتميز بعيون بيضاء.

قام مورغان بإجراء التزاوج بين الذكر الطافر الذي يحمل صفة العيون البيضاء وبين أنثى من النمط الوحشي. فكانت جميع أفراد الجيل الأول تمتلك عيوناً حمراء اللون، قام مورغان بعدها بإجراء التزاوج بين أفراد الجيل الأول فجاءت النتيجة متوافقة مع نتائج مندل حيث عادت في الجيل الثاني صفة العيون البيضاء للظهور كصفة متنحية وبنسبة 3:1. غير أنّ اللافت في الأمر أن جميع الإناث كانت تحمل صفة العيون الحمراء بينما الذكور فقط هي التي كانت تحمل صفة العيون البيضاء (الشكل 11-2).

استنتج مورغان حينها بأن المورثة المسؤولة عن صفة لون العيون لدى ذبابة الفاكهة محمولة على الصبغي الجنسي X وليس لها مقابل على الصبغي Y

وبناءً عليه وضع مورغان **مفهوم الوراثة المرتبطة بالصبغي X (X-linked) :**

إذ يمكن أن تكون فيها المورثات سائدة أو متنحية لكن في كلا الحالتين تعبر عن نفسها عند الذكور بشكل تام لعدم وجود مقابل لها.



الشكل (11-2): وراثة لون العيون لدى ذبابة الفاكهة وفق تجارب مورغان

بالتزامن مع طرح النظرية الصبغية أثبتت الدراسات أيضاً، أن عدد الصبغيات في الخلية أقل من عدد المورثات التي تحملها، فكل صبغي يحمل المئات أو الآلاف من المورثات. هذه النتيجة كانت واضحة في نتائج تجارب مورغان على ذبابة الفاكهة، فقد لاحظ مورغان وفريق عمله ظهور ترتيب معين من الصفات غالباً ما يتكرر ظهورها معاً، مما يشير إلى ارتباط المورثات المسؤولة عنها وأنها تورث بشكل دائم معاً كمجموعة واحدة. تم التأكد من وجود أربع مجموعات ارتباط وهو ما يقابل عدد الأزواج الصبغية

لذبابة الفاكهة الأمر الذي أعطى الدليل الواضح بأن المورثات محمولة على الصبغيات وأن بعضها يشكل مجموعة ارتباط.

وبذلك استنتج مورغان بأن المورثات الموجودة على نفس الصبغي تكون مرتبطة معاً وتورث معاً كمجموعة واحدة، و بالتالي لا تتوزع تلك المورثات المرتبطة توزعاً عشوائياً و لاتحقق بذلك قانون مندل الثاني.

يُعرّف **الارتباط المورثي** بأنه: توضع مورثتين أو أكثر طولياً على الصبغي الواحد ، وبقاءها ثابتة خلال عملية النقل الوراثي.

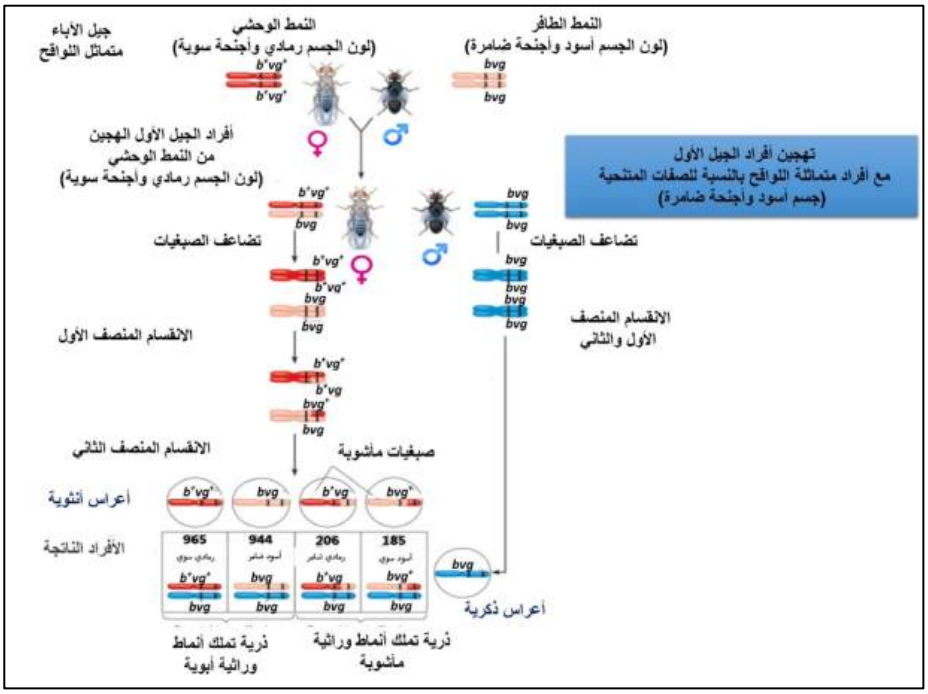
ثالثاً: العبور الصبغي Crossing Over

تتشابك الصبغيات الصنوة في مرحلة مبكرة من الانقسام المنصف، ويحدث تبادل لقطع صبغية بينها. وهذا ما يُعرف بظاهرة العبور الصبغي Crossing Over

يُعرّف العبور: بأنّه تبادل صبغي متقابل بين قطعتين متقابلتين من صبغيين متقابلين متزاوجين في مرحلة التزاوج من الانقسام المنصف بحيث يحدث انتقال متبادل لنفس العدد من المورثات المتقابلة بين الصبغيين المتقابلين في كل زوج صبغي.

افترض مورغان من خلال مجموعة واسعة من التجارب بأن حادثة العبور من الممكن أن تعيد ترتيب الأليلات بين الصبغيات الصنوة، وأنّ فرصة إعادة ترتيب الأليلات البعيدة عن بعضها أكبر مقارنة مع تلك القريبة من بعضها بعضاً. فعلى سبيل المثال

أجرى مورغان التزاوج بين إناث متماثلة اللواقح ذات جسم رمادي اللون وأجنحة سوية ($b^+b^+vg^+vg^+$) مع ذكور متماثلة اللواقح ذات لون الجسم الأسود و الأجنحة الضامرة (bbvgvg). فلو كانت الأليلات المحمولة على نفس الصبغي تورث بشكل دائم معاً كوحدة كاملة لكانت نتائج التزاوج بين تلك الحشرات تعطي دوماً إما الصفة السائدة أو الصفة المتنحية. و لكن تبين بنتيجة فحص 2300 حشرة ناتجة عن عملية التزاوج تلك، أنَّ قرابة الثلثين من الذرية الناتجة أظهرت الطابع السائد أو المتنحي، بينما ظهرت أنماط أخرى متنوعة وبنسب متفاوتة ويوضح (الشكل11-3) النتائج التي حصل عليها مورغان وفريق عمله.

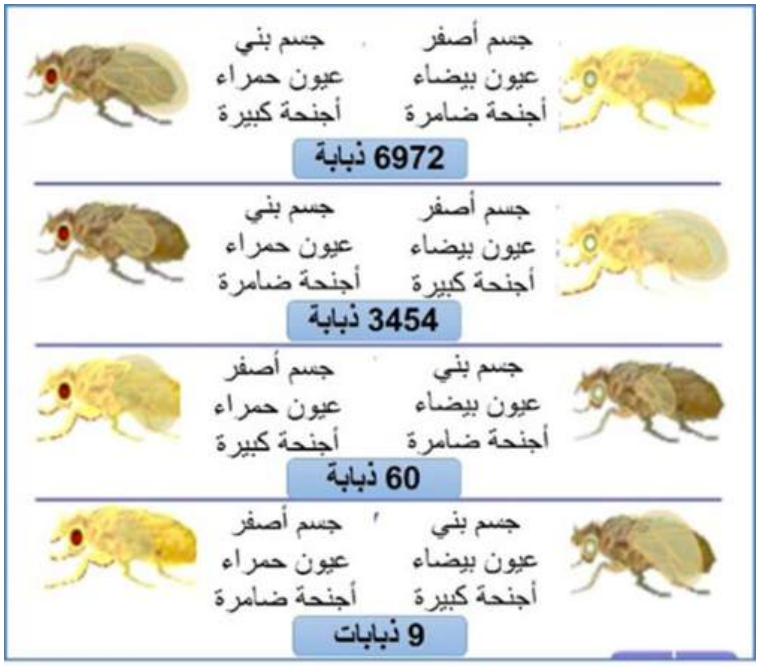


الشكل (11–3) : رسم تخطيطي يوضح إحدى تجارب مورغان التي تثبت حدوث عملية العبور وظهور أنماط وراثية جديدة.

يمكن حساب النسبة المئوية للأفراد المأشوبة (التراكيب الجديدة) بقسمة عدد الأفراد المأشوبة على العدد الكلي للأفراد الناتجة.

كما تابع مورغان توريث ثلاث صفات متنحية عند ذبابة الفاكهة هي : لون الجسم الأصفر، لون العين الأبيض والأجنحة الضامرة، تعرف مورثات هذه الصفات بأنها محمولة على الصبغي X حيث أجرى التزاوج بين إناث متخالفة اللواقح ذات جسم بني اللون وعيون حمراء وأجنحة كبيرة (*BRL ywm*) مع ذكور تحمل تلك الصفات في حالة

التنحي (لون الجسم الأصفر، عيون بيضاء وأجنحة ضامرة (*ywm*)). وجد مورغان بنتيجة فحص 10495 حشرة ناتجة عن عملية التزاوج تلك أن قرابة الثلثين من الذرية الناتجة أظهرت الطابع السائد أو المتنحي، بينما ظهرت أنماط أخرى متنوعة وبنسب متفاوتة أيضاً (الشكل 11-4).



الشكل (11-4): يوضح أنماط الذبابات التي حصل عليها مورغان بنتيجة عملية التزاوج التي قام بها بين إناث متخالفة اللواقح ذات جسم بني اللون وعيون حمراء وأجنحة كبيرة وذكور تحمل الصفات المتنحية للون الجسم (الأصفر) ولون العينين (الأبيض) وحجم الأجنحة (الضامرة) مع نسب تكرار تلك الأنماط.

فسر مورغان هذه النتائج التي حصل عليها كما يلي:

1- إنّ ظهور العدد الأكبر من الحشرات تحمل الصفات السائدة أو المتنحية لجميع الصفات المدروسة، يتوافق مع المندلية ويدل على عدم حدوث ظاهرة العبور الصبغي بين الأليلات المتقابلة.

2- ظهور أعداد كبيرة نسبياً (3454) من الحشرات مختلفة حسب لون العيون وحجم الأجنحة دليل على حصول ظاهرة العبور بين القطع الصبغية الحاملة لتلك المورثات وبأنّ المسافة بين هاتين المورثتين بعيدة.

3- انخفاض تكرار ظهور حشرات مختلفة بصفة لون الجسم ولون العيون (60) يشير إلى وجود المورثات المسؤولة عن تلك الصفات على مسافة قريبة من بعضها بعضاً.

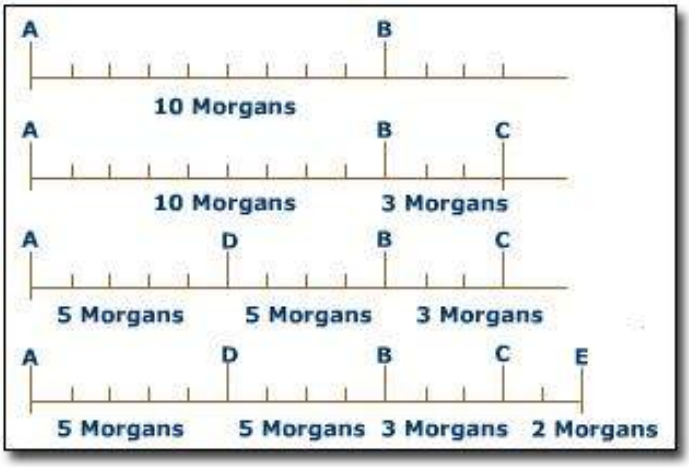
4- ندرة حدوث عبور مزدوج بين لون الجسم ولون العيون وبين لون العيون وحجم الأجنحة (9 حشرات فقط أظهرت هذه الحالة).

رابعاً: الخرائط الوراثية

وجد مورغان وتلميذه ستورتيفانت Sturtevant بأن تواتر إعادة ترتيب الأليلات يختلف باختلاف المورثات المدروسة و يرتبط مع المسافة بينها. فمثلاً في حال كان التواتر أقل من 50% فهذا يشير إلى وجود ارتباط بين المورثتين المعنيتين. إذ وجد أن 1.3% من التراكيب الجديدة تمثل أصغر مسافة بين مورثتي العين البيضاء ولون الجسم الأصفر المتوضعتين على الصبغي X في ذبابة الفاكهة بحيث يحدث بينهما أقل نسبة لتواتر العبور والتبادل الصبغي. وعلى هذا فإن تواتر العبور بين مورثتين مرتبطتين على نفس الصبغي يتناسب طرداً مع المسافة بينهما على الصبغي. بناءً على التفاسير التي

وضعها مورغان قام ستورتيفانت برسم أول خريطة وراثية للصبغي X عام 1913 وكانت جزءاً من أطروحة الدكتوراه الخاصة به.

يتم قياس المسافة بين مورثتين مرتبطتين حسب نسبة تكرار التراكيب الجديدة، أي أنّ المسافة بين مورثتين هي النسبة المئوية لتكرار أي تركيب جديد يختلف في تركيبه الوراثي عن أيٍ من الطابعين الوراثيين للأبوين من حيث الإرتباط المورثي وعندها يتم رسم خريطة تشير إلى المحل أو الموقع المورثي النسبي لكل مورثة على طول الصبغي. ويتم اعتبار تواتر 1% للعبور بين مورثتين الوحدة الرئيسة التي تمثل المسافة بين تلك المورثات وتدعى بالسنتيمورغان centimorgan (cM) نسبة للعالم مورغان (الشكل 11-5)



الشكل (11-5): مخططاً افتراضياً يوضح المسافات النسبية بين المورثات باعتماد نسب تكرار العبور بينها فمثلاً المسافة النسبية بين المورثة A والمورثة B هي 10 مورغان، في حين أن المسافة بين المورثتين C و E هي 2 مورغان

خامساً: فرضية ليون و تعطيل الصبغي X (X–inactivation)

تُعْرَف الظاهرة التي من خلالها يكون أحد الصبغيين X لدى إناث الثدييات خاملاً في الخلية بتعطيل الصبغي X (X– inactivation)، و تحدث عملية التعطيل وفق آلية فوق وراثية epigenetic process. كانت أول من وصف هذه الظاهرة هي عالمة الوراثة البريطانية ماري ليون (Mary Lyon) عام 1961 حيث افترضت أنه عند الثدييات وفي الخلايا التي تملك أكثر من صبغي X فإن صبغياً واحد فقط منها يكون فعالاً ونشيطاً، أما باقي الصبغيات X فتكون معطلة وخاملة (inactivated). وقد سُميّت هذه الفرضية بفرضية ليون (Lyon hypothesis).

تُفسر هذه الظاهرة التوازن بين الإناث والذكور حيث تولد الإناث (46,XX) ولديها نسختان من الصبغي X في كل خلاياها، فقد وَرِثَتْ أحد الصبغيين X من أمها و الصبغي X الآخر من أبيها، وبالتالي فإن خلاياها تحمل نسختين من المورثات المرتبطة بالصبغي X، بالمقابل يولد الذكر (46,XY) ولديه نسخة واحدة فقط من الصبغي X أي نسخة واحدة من المورثات المحمولة على هذا الصبغي. وينجم عن هذا الأمر أن الإناث تملك ضعف ما لدى الذكر من المورثات النشيطة وبالتالي ضعف الأنزيمات والبروتينات مما يفضي إلى حالة من عدم التوازن بين الإناث والذكور. ولتعديل حالة عدم التوازن هذا فإنّ الخلايا لديها نظام يؤمن أن تكون نسخة واحدة فقط من مورثات الصبغي X نشيطة

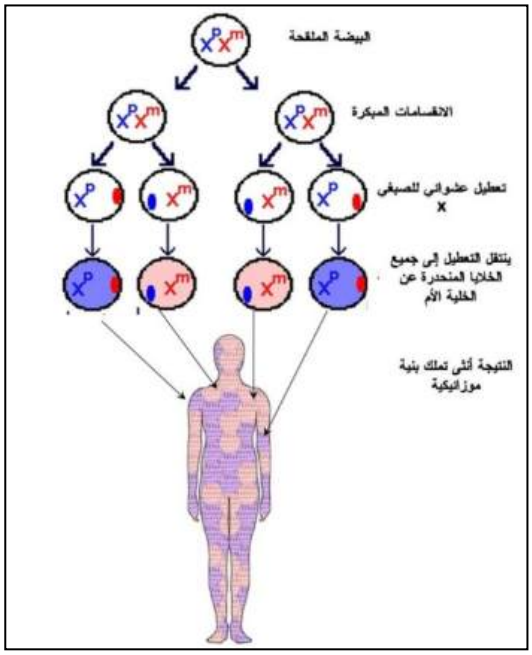
وفعالة في كل خلايا الإناث وهي التي يعبر عنها في الخلايا، في حين تكون معظم مورثات الصبغي X الآخر مُسكَتة وغير فعالة. وبهذا يصبح لدى خلايا الإناث نسخة وظيفية واحدة من المورثات المحمولة على الصبغي X وتتساوى بذلك مع الذكور. تدعى هذه الآلية بآلية التعويض الجرعي (dosage compensation).

وبشكل عام فإن الصبغي X الخامل، يتكثف في الخلايا الجسمية خلال المرحلة البينية من الدارة الخلوية عند معظم الثدييات بما فيها الإنسان. ويبدو تحت المجهر على هيئة جسم صغير داكن اللون بالقرب من السطح الداخلي للغلاف النووي، و يُعرف بجُسيم بار Barr body نسبة إلى مكتشفه العالم الكندي Murray Barr عام 1949. يميز جُسيم بار الخلايا الأنثوية لدى الثدييات و يرتبط عدد جُسيمات بار في النواة بعدد الصبغيات X الموجودة فيها بحيث يساوي عدد الصبغيات X ناقص واحد . فمثلاً نجد في نوى الخلايا الجسمية عند المرأة السوية 46,XX جسيم بار واحد، في حين يكون عدد جُسميات بار في نوى الخلايا الجسمية عند الرجل السوي 46,XY صفراً. يتألف جُسيم بار من كمية كبيرة من الكروماتين المتغاير heterochromatin وكميات قليلة من الكروماتين الحقيقي euchromatin .

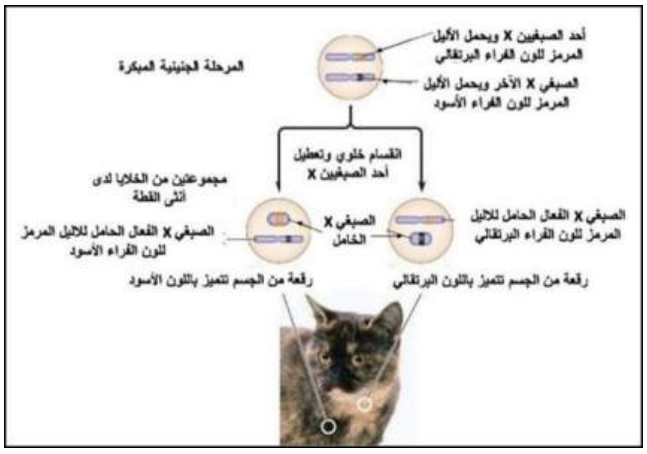
يُلاحظ في المراحل الجنينية المبكرة لدى إناث الثدييات ولغاية مرحلة التويتة وبداية تشكل الكيسة الأريمية بأن كلا الصبغيين X يكونان في حالة نشاط وفعالية، تبدأ بعدها

أولى مظاهر التعطيل حيث يُفْقَد التزامن في تضاعف الحمض الريبي النووي منقوص الأوكسجين (DNA) بين الصبغيين X ويُلاحظ تشكل جسيم بار بالقرب من السطح الداخلي للغلاف النووي للخلايا، فضلاً عن التباين في مستوى التعبير الجيني بين الصبغيين المذكورين.

يحدث التعطيل مع بداية مرحلة تشكل المُعَيدة ويكون بشكل عشوائي، بحيث يُعَطَل في بعض الخلايا الصبغي X القادم من الأم في حين يُعَطَل في خلايا أخرى الصبغي X القادم من الأب. يُوَرث الصبغي X الخامل إلى جميع الخلايا البنات الناتجة عن انقسام الخلية الأم، وكنتيجة لذلك تصبح لدى الإناث بنية فسيفسائية أو موزائيكية mosaic بالنسبة لمعظم الأليلات المرتبطة بالصبغي X (الشكل 11-6) . فعلى سبيل المثال تُلاحظ الموزائيكية عند إناث البشر بشكل واضح في الأمراض الوراثية الناتجة عن الطفرات المتنحية المرتبطة بالجنس X–linked recessive mutations، ففي مرض عدم تخثر الدم haemophilia مثلاً، تُشَكل خلايا الإناث حاملات للطفرة متخالفة اللواقح heterozygous، وسطياً قرابة نصف الكمية السوية من عامل تخثر الدم وهو ما يُعَدُّ كافياً لضمان تخثر طبيعي وسوي للدم. يمكن أيضاً ومن خلال ظاهرة الموزائيكية تفسير التبرقع في لون الفراء عند إناث العديد من الثدييات كالقطط والفئران (الشكل 11-7).

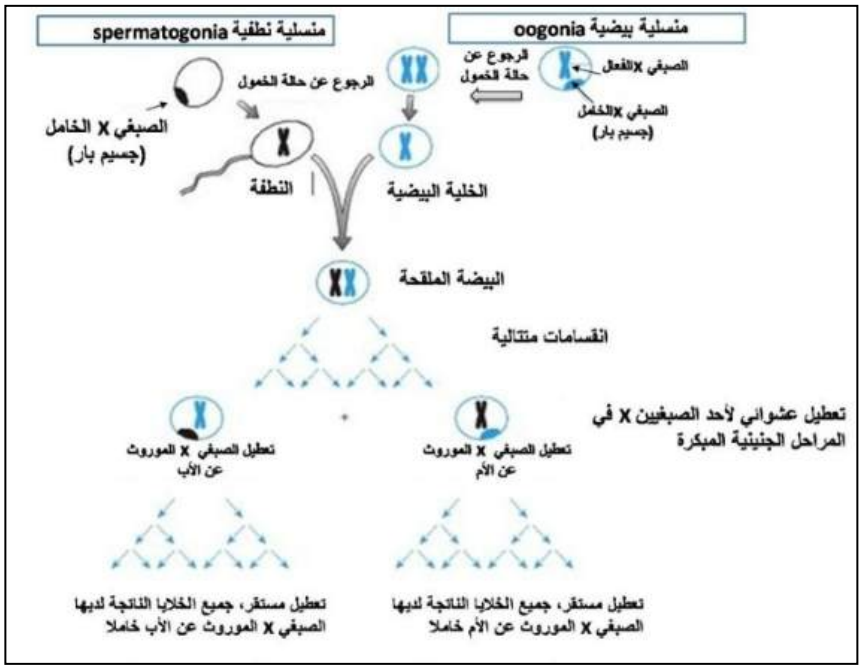


الشكل (11–6) : رسم تخطيطي يوضح التعطيل العشوائي للصبغي X وتكوّن البنية الموزائيكية. يظهر الصبغي X الخامل على هيئة جسم صغير بالقرب من السطح الداخلي للغلاف النووي. يشير الرمز P إلى الصبغي X الموروث عن الأب في حين يشير الرمز m إلى الصبغي X الموروث عن الأم.



الشكل (11–7): ظاهرة الموزائيكية و التبرقع اللوني في فراء بعض الأنواع من القطط. يُلاحظ لدى الإناث متخالفة اللواقح بالنسبة للون الفراء، رقع من الفراء ذات اللون البرتقالي ورقع أخرى ذات لون أسود وذلك حسب الأليل الفعّال.

يختلف تعطيل الصبغي X في الخلايا الجنسية عنه في الخلايا الجسمية، ففي الخلايا الجنسية عند الإناث يكون كلا الصبغيين X بحالة نشاط وغير خاملين مما يسمح لحدوث عملية الازدواج الصبغي بين الصبغيين الصنوين X homologous chromosomes pairing و كذلك إعادة التراتب أو التأشيب recombination في أثناء عملية الانقسام المنصف وتشكل الخلايا البيضية oogenesis ، والتي قد لا تكون ممكنة في حال كان أحد الصبغيين X بحالة تكثف شديد وخمول. وفي المراحل المبكرة من تكون النطاف spermatogenesis عند الذكور تخمل النسخة الوحيدة من الصبغي X وذلك من أجل الحد من عملية الازدواج و التأشيب بين الأجزاء غير الصنوة من الصبغيين X و Y(الشكل 11-8).



الشكل (11-8): الفروق في تعطيل الصبغي X بين الخلايا الجسمية والخلايا الجنسية. ففي أمهات الأعراس لدى الإناث يرجع الصبغي X عن حالة الخمول من أجل الشروع بعملية الانقسام المنصف وتشكل الخلية البيضية. بالمقابل يخمل الصبغي X في المراحل المبكرة من تكون النطاف spermatogenesis عند الذكور حتى مرحلة الانتهاء من الانقسام المنصف وتشكل النطفة عندها يعود الصبغي X عن حالة الخمول. تنقسم البيضة الملقحة الحاوية على صبغيين X انقسامات خيطية متتالية ليبدأ من جديد خمول احد الصبغيين X وبشكل عشوائي.

الفصل الثاني عشر
مقدمة في وراثة الجماعات

- تعريف علم وراثة الجماعات
- التواتر أو التكرار
- التجمع المورثي
- مفهوم التطور
- قانون Hardy-Weinberg
- الانسياب المورثيGene flow
- الانسياق المورثيGenetic drift
- التأثير المؤسس Founder effect

علم وراثة الجماعات Population genetics:

هو فرع من علم الوراثة يهتم بدراسة التركيب الوراثي في المجتمع، و يطبق قوانين مندل على الجماعات لدراسة تواتر الأليلات (allele frequency) وتغيراتها وكذلك أنماط الوراثة لتلك الجماعات. ويختص بتوزع تواتر الأنماط الوراثية والأليلات ضمن المجتمع ، وكذلك تحديد المصير المحتمل لهذا التوزع.

يلاحظ ارتباط أو علاقة ما بين تواتر أو تكرار المورثة وبين تواتر النمط الوراثي.

سنستعرض فيما يأتي مجموعة من التعريف والمصطلحات المستخدمة في وراثة الجماعات.

التواتر أو التكرار frequency:

في الإحصاء يُعرف تواتر حادثة ما بأنه عدد المرات التي يتكرر فيها ظهور هذه الحادثة في التجربة أو الدراسة.

أما في علم الأحياء فالتكرار هو ظهور مورثة ضمن نوع معين والتي تشكل التجمع المورثي(**gene pool**).

الحادثة أو الواقعة incidence :

هو معدل وقوع حادثة ما ضمن فترة زمنية محددة ، مثال: معدل ظهور حالات مرضية جديدة لمرض ما ضمن فترة زمنية معينة؛ فمثلاً سجلت خلال عام (2007) 50,000 حالة جديدة بسرطان الثدي. أما **معدل الإنتشار prevalence:** فيدل على عدد الأشخاص المصابين حالياً بالمرض.

التجمع المورثي(gene pool): هو المجموع الكلي لجميع الأليلات المحمولة عند جميع أفراد المجتمع. أو هو التنوع الوراثي الكامل المُلاحظ ضمن المجتمع أو ضمن النوع الواحد.

يُعَدّ المجتمع في حالة توازن وراثي genetic equilibrium عندما يبقى تواتر الأليلات في التجمع الوراثي gene pool ثابت عبر الأجيال المتلاحقة، بالتالي تُلاحظ نسب متساوية من كل أليل في المجتمع الواحد! مما يعني أنّه لا يوجد تطور في هذا المجتمع. فبعض المجتمعات من الممكن أن لا تتطور أو يحدث تغيير في تواتر الأليلات لديها وذلك عندما تُحقق ما يأتي :

1-أن يكون المجتمع كبير كي لا يحدث انسياق جيني يؤدي إلى تغيير في تواتر الأليلات. 2- أن يكون التزاوج عشوائي بين الأفراد. 3- عدم حدوث طفرات (ظهور

أليلات جديدة). 4- لا تحدث هجرة من وإلى المجتمع (عدم حدوث انسياب جيني gene flow). 5- عدم حدوث اصطفاء بالتالي لا يتم انتقاء أليل دون آخر.

نلاحظ مما سبق أنه من المستبعد جداً أن تحدث أيٍ من تلك الشروط أو كلها معاً في المجتمع الحقيقي، وبالتالي فإنّ التطور هو النتيجة الحتمية في أي مجتمع.

ويمكن تعريف **التطور**: بأنه التغيرات البسيطة ضمن النوع والتي تنتقل من جيل لآخر ولمدة طويلة مؤدية إلى انتقال تدريجي (ظهور) لأنواع جديدة . أو بأنه مجموع التغيرات الوراثية الموروثة في الأفراد المكونة للمجتمع الوراثي؛ أي تغير في تواتر الأليلات ضمن المجتمع الوراثي في المجتمع .

جاء هذا التعريف بناءً على العمل المستقل لكل من العالمين هاردي Hardy (عالم رياضيات انجليزي) و واينبرغ Weinberg (فيزيائي ألماني) في بداية القرن العشرين، حيث توصلا من خلال نموذج رياضي يعتمد على مبدأ الإحتمال إلى أنّ تواتر التجمع الوراثي يورث بشكل ثابت ولكن يجب توقع التطور في جميع المجتمعات، وأنّ تواتر النمط الوراثي والأليل يبقى ثابت في المجتمع من جيل لآخر في حالة عدم وجود تأثيرات تطورية أخرى. كما تُنبئ العلاقة التي توصل إليها كل من العالمين بتواتر النمط الوراثي

المتوقع اعتمادا على تواتر الأليلات ضمن المجتمع.ويمكن من خلالها معرفة المجتمع المدروس إن كان في حالة توازن وراثي أم لا.

لنفرض اخترنا فرداً عشوائياً من المجتمع هذا يماثل اختيار أليلين عشوائياً من المجتمع الوراثي gene pool، ولنفرض أننا ندرس المورثة A نَعد p تواتر الأليل السائد (الراجح) A في المجتمع. وq تواتر الأليل المتنح a في المجتمع. فإذا كان المجتمع في حالة توازن وراثي وحسب علاقةHardy-Weinberg فإن :

p^2 = النسبة المئوية لتواتر النمط الوراثي متماثل اللواقح السائد (AA) وq^2 = النسبة المئوية لتواتر النمط الوراثي متماثل اللواقح المتنح (aa) و2pq = النسبة المئوية تواترالنمط الوراثي متخالف اللواقح (Aa) بالتالي يكون:

$$p + q = 1 \quad \text{و}$$

$$p^2 + 2pq + q^2 = 1$$

تشير معادلة Hardy-Weinberg إلى العلاقة البسيطة بين تواتر المورثة و النمط الوراثي الموجود في المجتمع ضمن شروط معينة، وتُمَكِن الباحثين من الكشف عن أي تغييرات في تواتر تكرار المورثة في المجتمع مع مرور الوقت، فإذا تبين أن التواتر الملاحظ لا يختلف بشكل معنوي عن التواتر المتوقع فهذا يدل على أن المجتمع يقع

ضمن توازن Hardy-Weinberg (Hardy-Weinberg equilibrium،HWE)، أما إذا اختلف التواتر عن ما هو متوقع بالتالي فإن المجتمع لا يقع ضمن هذا التوازن.

ملاحظات:

1- قد يكون الأليلين A و a فقط الموجودين في الموقع الوراثي الخاص بالمورثة A. بالتالي $p + q = 1$ أو يمكن أن يكون هناك أليلات أخرى وأنماط وراثية مختلفة بالتالي $p + q < 1$

2- بالنسبة للمواقع المرتبطة بالصبغي X (X-linked loci) فإن الذكور والتي هي فردانية الصيغة الصبغية hemizygous فتحمل أليلاً واحداً فقط إما الأليل السائد أو المتنح. أما الإناث فتكون إما متماثلة اللواقح بالنسبة للصفة السائدة A Aأو المتنحية a a أو أن تكون متخالفة اللواقحA a.

يُعَدُّ تحديد نسبة تواتر المورثةGene frequencies أو نسبة تكرار النمط الوراثي مدخلاً جوهرياً في العديد من أشكال التحليل الوراثي، مثل دراسات الإرتباط(linkage analysis) ودراسة الإنفصال(segregation)، ولها أهمية خاصة في حساب المخاطر الوراثية في العديد من الأمراض الوراثية لذا تُستخدم بكثرة في الإستشارات الوراثية.

ولنستعرض فيما يأتي بعض الآليات التي تؤثر في تواتر الأليلات في المجتمع:

يعتمد تواتر أي أليل على عدد من العوامل منها:

1- **الطفرات:**

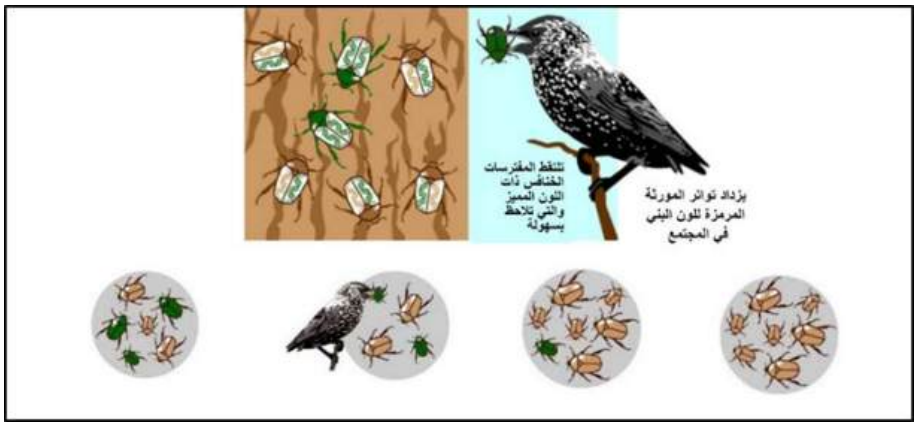
تؤدي الطفرات إلى إدخال تغيرات جديدة في المجتمع. وتشمل أنماط الطفرات جميعها (راجع الفصل الثالث عشر).

2- **الإصطفاء الطبيعيNatural selection :**

يحدث الإصطفاء الطبيعي (الانتخاب، الانتقاء) عندما يكون احتمال بقاء وتكاثر أفراد ذات أنماط وراثية معينة أكبر من باقي الأفراد في المجتمع، مما يؤدي إلى انتقال أليلاتها من جيل لآخر.وهنا لابد من توضيح مفهوم **الضغوط الإنتقائية Selection pressures:**

تُعَرّف الضغوط الإنتقائية بأنها العوامل البيئية التي من شأنها التقليل من نجاح التكاثر في المجتمع، وبالتالي المساهمة في التغير التطوري أو الإنقراض من خلال عملية الإصطفاء الطبيعي. من أمثلتها :

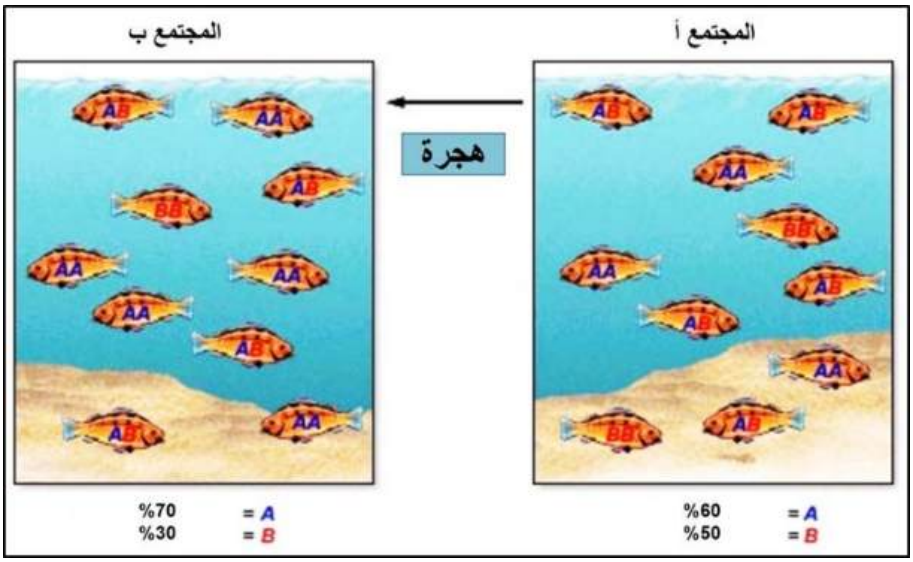
التنافس- الإفتراس- المرض- التطفل- إزالة الأحراج من الأراضي- تغير المناخ- الملوثات. ويوضح (الشكل 12-1) أحد أشكال الضغوط الإنتقائية.



الشكل (12-1): رسم توضيحي يمثل أحد أشكال الضغط الانتقائي . تنجو الخنافس ذات اللون البني من الافتراس وتتكاثر وبالتالي تظهر في المجتمع بشكل أكبر.

3- الإنسياب المورثي Gene flow:

يُستخدم مصطلح الإنسياب المورثي أو هجرة المورثات في وراثة الجماعات للدلاله على انتقال الأليلات أو المورثات من مجتمع لآخر، إذ تكون الهجرة من وإلى المجتمع المسبب الرئيس عن التغير الواضح في تواتر الأليلات في المجتمع (الشكل 12-2) .



الشكل(12-2) :مخطط يوضح الانسياب المورثي: إنّ تواتر الأليل في المجتمع يمكن أن يتغيرعندما تهاجر الأفراد إلى مجتمع آخر. فعلى سبيل المثال: يبلغ تواتر الأليل A في المجتمع ب 70% وتواتر الأليل B 30% ولنفرض هجرة مجموعة من الأفراد من المجتمع أ ودخولها ضمن المجتمع ب، فإنه وبعد عدة أجيال من الانسياب المورثي يصبح تواتر الأليلات في المجتمع ب المضيف 60% للأليل A و 50% للأليل B.

4- الإنسياق الجيني أو الوراثي العشوائي Random genetic drift

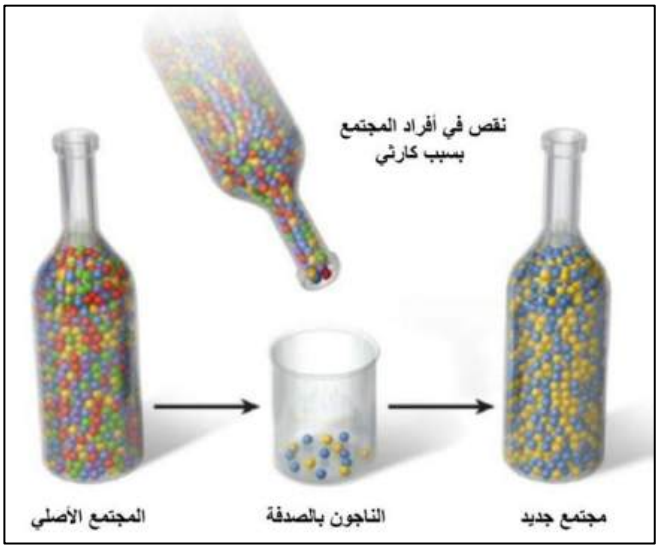
تعرف هذه الظاهرة بأنها تغير في التركيب الوراثي في المجتمع نتيجة الصدفة أو حدوث عمليات عشوائية وليست بسبب الإصطفاء الطبيعي، الأمر الذي يؤدي إلى تغير في تواتر الأليلات مع مرور الزمن. أو هي تغير في التواتر النسبي لأنماط وراثية مختلفة ضمن مجتمع صغير نظراً لاختفاء مورثات معينة بسبب موت أو عدم قدرة الأفراد

على التكاثر والإنجاب. وتزداد أهمية و أثر الإنسياق الجيني بشكل كبير كلما صغر حجم المجتمع المدروس (الشكل 12–3) .

الشكل (12-3) يوضح مثال عن الانسياق الجيني. ففي مجتمع صغير من الضفادع ذات الألوان المختلفة (بني – أخضر فاتح – أخضر غامق) يؤدي الموت المصادف للضفادع ذات اللون البني إلى تغير في التركيب الوراثي في هذا المجتمع نظراً لموت الضفادع ذات اللون البني الأمر الذي يؤدي إلى تغيير في تواتر الأليلات في هذا المجتمع.

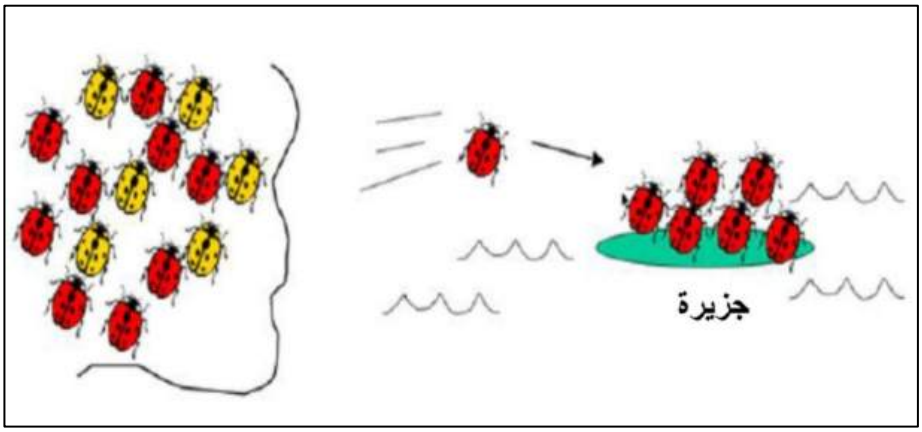
ومن الأمثلة عن الإنسياق الجيني أيضاً ما يعرف **بتأثير عنق الزجاجة** **Bottleneck effect** ، وهو تغير مفاجئ في البيئة التي يعيش فيها الأفراد، كحدوث فيضان أو زلزال مفاجئ ، الأمر الذي يؤدي إلى تقليص حجم السكان بشكل كبير. إنّ هذا الإنخفاض الكبير في حجم الأفراد يُعرف بتأثير عنق الزجاجة؛ وكأنّ الأفراد قد عبرت من خلال عنق زجاجة.

يمكن لأليلات معينة مصادفةً بأن تكون بين مجموعة الأليلات الناجيّة، في حين تكون مجموعة أخرى من الأليلات أقل ظهوراً وغيرها غائب تماماً. ومن المرجح بأنّ يكون الإنسياق الجيني المستمر ذو تأثير جوهري على التجمع الوراثي حتى يصبح حجم المجتمع كبير ويقل تأثير أي طارئ مفاجئ (الشكل 12–4).



الشكل(12-4) رسم تخطيطي يوضح تأثير عنق الزجاجة. إذا ضمّ المجتمع الأصلي على سبيل المثال مجموعة من الأليلات ممثلة بالألوان الأحمر - الأصفر -الأزرق –الأخضر. وحدث طارئ مفاجئ أدى إلى نقص كبير جداً في عدد أفراد المجتمع، وبالصدفة كانت الأليلات الممثلة باللون الأصفر والأزرق فقط هي من الأليلات الناجية في حين اختفت تماماً باقي الأليلات. فإنّ الأفراد الناجية ستشكل مجتمعاً جديداً يختلف في تركيبه الوراثي بشكل كبير عن المجتمع الأصلي.

كما يُعد **التأثير المؤسس Founder effect** أحد أشكال الإنسياق الجيني، والذي يحدث عندما تظهر مجموعة من الأليلات بتكرار أكبر ضمن مجتمع معزول عن المجتمع الأصل (الشكل 12–5) .



الشكل(12-5) يوضح التأثير المؤسس: إذ تؤسس بضعة أفراد من المجتمع مجتمعاً جديداً وبتواتر أليلي مختلف عن المجتمع الأصل

الفصل الثالث عشر
أنماط الطفرات ومسبباتها

أولاً: الاضطرابات أو الشذوذات الصبغية

- **الاضطرابات على مستوى عدد الصبغيات**
- **الاضطرابات على مستوى بنية الصبغيات**

ثانياً: الطفرات على مستوى المورثات

تمهيد:

بعد أنّ درسنا في الفصل التاسع عملية التعبير الجيني وآليّة تركيب البروتين سنقوم في هذا الفصل باستعراض تأثير التغيرات التي يمكن أن تطرأ على المعلومة الوراثية وأثرها على التعبير الوراثي و سلوك الخلية. تدعى هذه التغيرات بالطفرات mutations. تُعَدُّ الطفرات المسؤول الرئيس عن التنوع الهائل والضخم في المورثات الملاحظ لدى الكائنات الحيّة.

وبشكل عام، يمكن تعريف **الطفرة** بأنها تغير دائم في المادة الوراثية؛ (في تسلسل أسس الـ DNA). تتراوح الطفرات في حجمها، فقد يكون التغير في أساس واحد من الأسس المكونة للـ DNA، أو أن يشمل قطعة كبيرة من الصبغي، لذا يمكن تصنيف الطفرات ضمن مجموعتين اثنتين هما: طفرات على مستوى الصبغيات، وطفرات على مستوى المورثات (النكليوتيدات).

سنبحث أولاً، المجموعة الأولى من الطفرات وهي الطفرات على مستوى الصبغيات.

أولاً: الاضطرابات (الشذوذات) الصبغيّة Chromosomes aberration

تُشير معظم الإحصائيات العالميّة إلى أنّ الاضطرابات الصبغية تلاحظ بمعدل ولادة واحدة من أصل كل 150 ولادة حيّة. وتُعَدُّ أحد أسباب التخلف العقلي و فقدان الحمل

أيضاً، إذ تشاهد بنسبة 50% من الإجهاضات العفوية في الأشهر الثلاث الأولى من الحمل و في 20 % في الأشهر التالية من الحمل.

منشأ الشذوذات الصبغية وآليّة ظهورها:

يمكن أن تنشأ الشذوذات الصبغيّة عن أحد الأبوين أو عن كليهما معاً، وذلك بنتيجة حدوث اضطراب في عملية تشكل الأعراس سواء في الانقسام المنصف الأول أو الثاني في أثناء عملية تشكل النطاف أو البيوض. وقد تحدث هذه الاضطرابات أيضاً، للبيضة الملقحة وكذلك في أثناء المراحل الأولى من التشكل الجنيني.

آليّة حدوث الشذوذ الصبغي:

تعود آليّة حدوث الشذوذات الصبغية إلى إحدى الحادثتين التاليتين :

1- ظاهرة عدم انفصال الصبغيات Nondisjunction و2- حادثة إعادة ترتيب الصبغيات Rearrangement

أنماط الشذوذات الصبغية:

تُلاحظ الشذوذات الصبغية على مستويين اثنين فإمّا أن تكون على مستوى عدد الصبغيات (Numerical abnormality)، أو أن تكون على مستوى بنية الصبغي نفسه (Structural abnormality).

1- الاضطراب على مستوى عدد الصبغيات: يمكن تمييز حالتين اثنتين يضطرب فيهما عدد الصبغيات في الخلية هما:

أ- تعدد الصيغة الصبغية Polyploidy:

يشمل الخلل في هذه الحالة كامل صبغيات الصيغة الفردانية haploid (ونعني بالصيغة الفردانية، وجود نسخة واحدة من كل صبغي؛ أي صبغيات الأعراس n ={23}). وبالتالي فإنه في حالة تعدد الصيغة الصبغية يصبح عدد الصبغيات إما 69 صبغياً(3n) وتدعى هذه الحالة بثلاثي الصيغة الصبغية، أو 92 صبغياً (4n) وتدعى برباعي الصيغة الصبغية. يشاهد هذا النمط من الاضطراب الصبغي فقط في حالات الإجهاضات العفوية خصوصاً في الأشهر الأولى من الحمل، أو في بعض أنماط السرطانات.

و يمكن تفسير سبب حدوث تعدد الصيغة الصبغية بالآتي:

حالة ثلاثي الصيغة الصبغية Triploidy (3n): يرجع حدوث مثل هذا الخلل إلى أحد الأسباب الآتية:

a) إلقاح العروس الأنثوية (البويضة n) بعروسين ذكريتين (نطفتين كل واحدة n) بالتالي تصبح الصيغة الصبغية للجنين 3n

b)خلل في انقسام البويضة فتبقى (2n) وعند الإلقاح بعروس ذكرية (n) تكون الصيغة الصبغية للجنين 3n

c) خلل في انقسام النطفة فتبقى (2n) وعند الإلقاح بعروس أنثوية واحدة (n) تكون الصيغة الصبغية للجنين 3n

حالة رباعي الصيغة الصبغية Tetraploidy (4n):

تنتج الصيغة الرباعية 4n من ظاهرة تدعى بالانقسام المتساوي الداخلي (endomitosis) إذ يحدث تضاعف للـ DNA من دون دخول الخلايا بعملية الانقسام مما يؤدي إلى مضاعفة الصيغة الصبغية

ب – اختلال الصيغة الصبغية Aneuploidy:

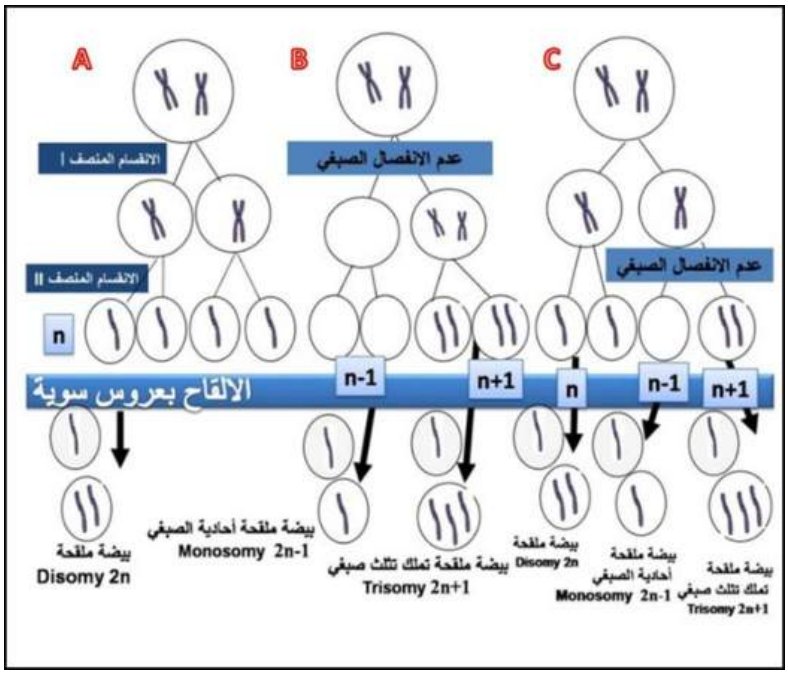
يُعَدُّ اختلال الصيغة الصبغية من أكثر الاضطرابات الصبغية انتشاراً ويشمل الحالات التالية:

- فقدان لصبغي واحد، وتدعى هذه الحالة بأحادي الصبغي (Monosomy) ويكون عدد الصبغيات بذلك45 صبغياً (2n−1= 45)
- زيادة صبغي واحد وتدعى هذه الحالة بتثلث الصبغي (Trisomy) ويكون عدد الصبغيات بذلك47 صبغياً (2n+1= 47)

- زيادة في صبغيين اثنين وتدعى هذه الحالة برباعي الصبغي (Tetrasomy) ويكون عدد الصبغيات بذلك 48 صبغياً(48 =2+2n).

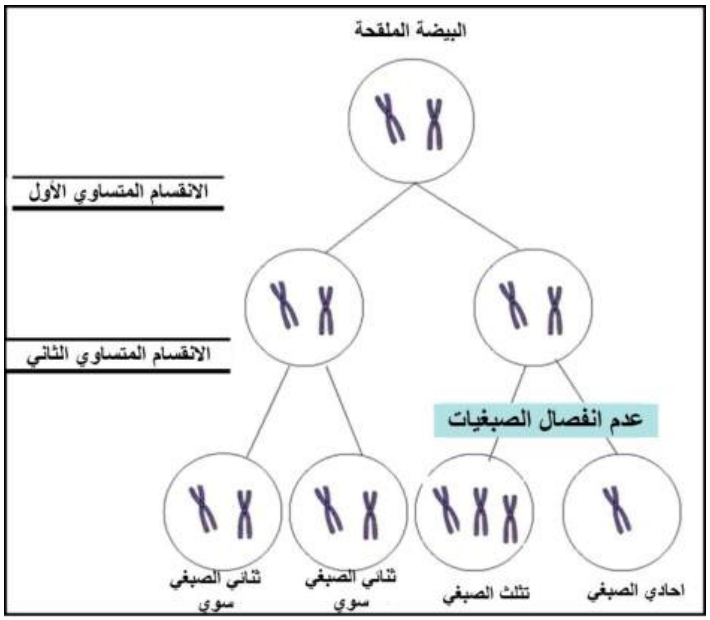
تعود أسباب اختلال الصيغة الصبغية إلى: **ظاهرة عدم الافتراق أو الانفصال الصبغي (Nondisjunction)** والتي تحدث بسبب فشل أحد الأزواج الصبغية عن الانفصال في أثناء الانقسام الخلوي المنصف أو المتساوي فيهاجران معاً، أو بسبب تلكؤ أحد الصبغيات في الهجرة في أثناء طور الصعود وبالتالي يبقى متضمناً داخل إحدى الخليتين البنتين. بالنتيجة تحصل الخلايا البنات على عدد غير سوي من الصبغيات

(الشكل 13-1) و(الشكل 13-2).



الشكل (13-1): ظاهرة عدم الانفصال الصبغي. A تمثل الحالة السوية من انفصال الصبغيات وسلوكها في أثناء الانقسامين المنصفين الأول والثاني مع تبيان كيفية الرجوع إلى الحالة مضاعفة الصيغة الصبغية (2n) بعد الالقاح.

B تمثل حدوث حالة عدم الانفصال الصبغي أثناء الانقسام المنصف الأول، والتي تؤدي إلى نشوء اختلال في الصيغة الصبغية Aneuploidy في البيضة الملقحة يظهر بشكل تثلث صبغي (Trisomy) أو أحادي الصبغي (Monosomy).C تمثل حدوث حالة عدم الانفصال الصبغي في أثناء الانقسام المنصف الثاني والتي تؤدي إلى تشكل أنماط من الأعراس بعضها يحمل العدد السوي من الصبغيات ويمثل الحالة السوية كما في A، وبعضها يؤدي إلى نشوء اختلال في الصيغة الصبغية Aneuploidy في البيضة الملقحة يظهر بشكل تثلث صبغي (Trisomy) أو أحادي الصبغي (Monosomy)، كما في B . وللتبسيط رسم الزوج الصبغي المعني بحادثة عدم الانفصال الصبغي.



الشكل (13-2) : رسم تخطيطي يوضح كيفية ظهور حالة الموزائيكية اعتباراً من البيضة الملقحة كنتيجة لظاهرة عدم الانفصال الصبغي. تحدث هذه الظاهرة من عدم انفصال الصبغيات للبيضة الملقحة وخلال المراحل الأولى من التشكل الجنيني، الأمر الذي يؤدي إلى تشكل خطوط خلوية تكون أحدهما سوية أما الباقية فتمثل الحالات غير السوية من الاضطراب الصبغي. وللتبسيط رسم الزوج الصبغي المعني بحادثة عدم الانفصال الصبغي.

ولنستعرض بعض الأمثلة الشائعة الخاصة باختلال الصيغة الصبغية. ولكن أولاً لنتعرف على معنى مصطلح متلازمة، يمكن **تعريف المتلازمة بأنها:** مجموعة من الأعراض و السِمات التي تظهر وتشاهد معاً في اضطراب معين.

❖ متلازمة تيرنر Turner Syndrome

أول من وصف متلازمة تيرنر هو الطبيب هنري تيرنر عام 1938 فسميت باسمه. تُعَدُّ متلازمة تيرنر واحدة من أكثر متلازمات أحادي الصبغي شيوعاً عند البشر المولودين الأحياء، حيث تظهر بنتيجة فقدان جزء أو كل الصبغي الجنسي X. إذ تولد الأنثى ولديها صبغي X وحيد. فتكون بذلك الصيغة الصبغية للأفراد الحاملين لهذه المتلازمة 45,X.

يتجلى النمط الظاهري لهذه المتلازمة بالسمات التالية: ① أنثى تتميز بقصر القامة ② ذات رقبة مجنحة ③ وجود وذمات لمفيّة ④ آفة قلبية أو كلوية ⑤ ضغط دم مرتفع ⑥ تخلخل بالعظام ⑦غدد تناسلية غير نامية مع عدم ظهور الصفات الجنسية الثانوية ⑧ إضافة إلى العقم الناتج عن عدم اكتمال تشكل المبيضين (الشكل13-3) .

يُلاحظ تواتر متلازمة تيرنر بشكل عام بين 2000/1 إلى 3000/1 بين **المواليد الأحياء،** إذ تشاهد بتواتر أعلى في الإجهاضات العفوية.

تعاني بعضهن من صعوبات في التعليم على الرغم من أن معدل الذكاء عندهن طبيعي، ويَعشنّ حياة طبيعية وخاصة عندما يتلقين العلاج الهرموني المناسب وفي التوقيت المناسب أيضاً. يتم تشخيص متلازمة تيرنر في الأشهر الأولى من العمر، أو في سن البلوغ ويمكن أن يتم التشخيص ما قبل الولادة عن طريق الفحص بالأمواج فوق الصوتية أو من خلال فحص السائل الأمنيوسي أو بأخذ خزعة من المشيمة.

الشكل (13-3): النمط الصبغي لمتلازمة تيرنر إذ يغيب أحد الصبغيين الجنسيين X ويكون عدد الصبغيات 45 صبغياً. وتظهر إلى اليسار صورة لأحد الفتيات التي تحمل متلازمة تيرنر وتبدو سمة قصر القامة و الوذمات اللمفية فضلاً عن الرقبة المجنحة واضحة عليها.

❖ متلازمة داون Down syndrome

أول من وصف هذه المتلازمة الطبيب الإنكليزي داون عام 1866 ويدعى هذا الاضطراب بمتلازمة داون نسبة إليه أو بالتثلث 21. وهو اضطراب وراثي يحدث بسبب وجود صبغي واحد زائد (الصبغي رقم 21) لدى الفرد. وهو من أكثر التثلثات الصبغية الجسمية **القابلة للحياة** شيوعاً. تحصل للإناث والذكور على حد سواء. وتكون الصيغة الصبغية لأنثى داون 47,XX,+21 و لذكر داون 47,XY,+21 .

تحدث هذه المتلازمة بمعدل 700/1 إلى 800/1 بين المواليد الأحياء، تجهض أكثر من نصف حمول التثلث 21 عفوياً في المراحل المبكرة من الحمل. يلاحظ ازدياد حدوث متلازمة داون مع تقدم عمر الأم فمثلاً، أظهرت الدراسات أنه من بين 2300 أم في سن

العشرين من العمر ظهرت ولادة واحدة لمتلازمة داون بينما يمكن أن تشاهد ولادة واحدة لمتلازمة داون من بين 46 ولادة لأم في سن الـ45 عاماً. مما يشير بوضوح إلى ارتفاع ملحوظ في نسبة حدوث هذه المتلازمة مع تقدم الأمهات في العمر. ولعل أحد أبرز التفاسير المقترحة لهذه الظاهرة هي: الفترة الطويلة التي تقضيها العروس الأنثوية بين التشكل و الإلقاح، إذ يبدأ إنتاج الأعراس عند الإناث منذ المرحلة الجنينية ويدخل في الإنقسام المنصف في سن البلوغ وينتهي بسن 45 تقريباً وبالتالي فهي معرضة لتأثير مجموعة كبيرة من العوامل كبعض المواد الكيميائية أو الفيزيائية أو بعض الفيروسات، التي يمكن أن تؤثرعلى عملية الإنقسام وتؤدي إلى تخريب خيوط المغزل وبالتالي حدوث ظاهرة عدم الافتراق الصبغي.

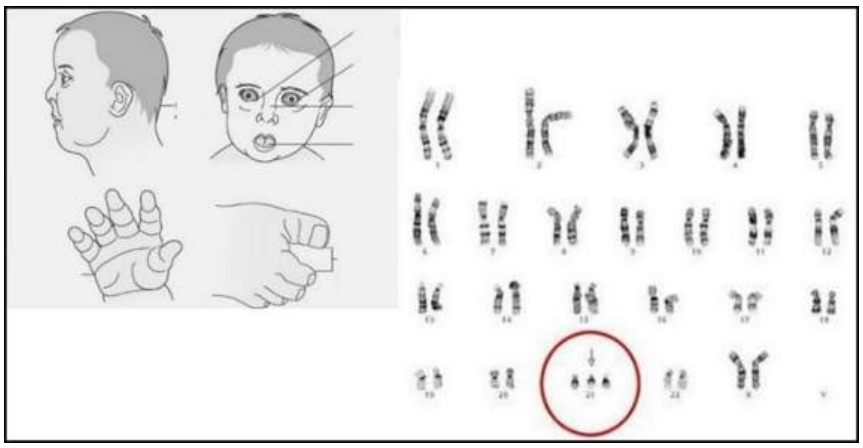
ويتم التشخيص قبل الولادة (خصوصاً للأمهات فوق 35) عن طريق:

1. فحص الفافيتوبروتين في مصل الأم
2. تقصي تركيز هرمون HCG (Human chorionic gonadotropin) . حيث يُعَدُّ الانخفاض في تركيز الفافيتوبروتين والارتفاع في تركيز هرمون HCG في مصل الأم مشعراً يدل على وجود متلازمة داون لدى الجنين
3. التصوير بالأمواج فوق الصوتية.
4. بزل السائل الأمينيوسي أو فحص زغابات المشيمة

الصفات و السمات العامة لمتلازمة داون:

يتصف حملة هذه المتلازمة بصفات مورفولوجية خاصة و مميزة منها:

①وجه مسطح② شقوق جفنية متجهة للأعلى (طية جلدية عمودية على أحد جانبي الأنف)③جمجمة مدورة④ درجات متنوعة من التأخر العقلي والنمو ⑤ تشوهات قلبية ⑥ يدان قصيرتان وعريضتان ⑦ نقص تنسج السلامى الوسطى للإصبع الخامس ⑧ نقص توتر عام ⑨ فم مفتوح ولسان متدلي ⑩ مقاومة ضعيفة للأمراض (أكثر عرضة للإصابة بالإنتانات)(الشكل 13-4).



الشكل (13-4): النمط الصبغي لأنثى تحمل متلازمة داون حيث تشير الدائرة إلى وجود 3 صبغيات 21 و يلاحظ عدد الصبغيات 47 صبغياً. إلى اليسار رسم تخطيطي يوضح أبرز السمات الملاحظة لدى حاملي متلازمة داون

2- الاضطراب على مستوى بنية الصبغي:

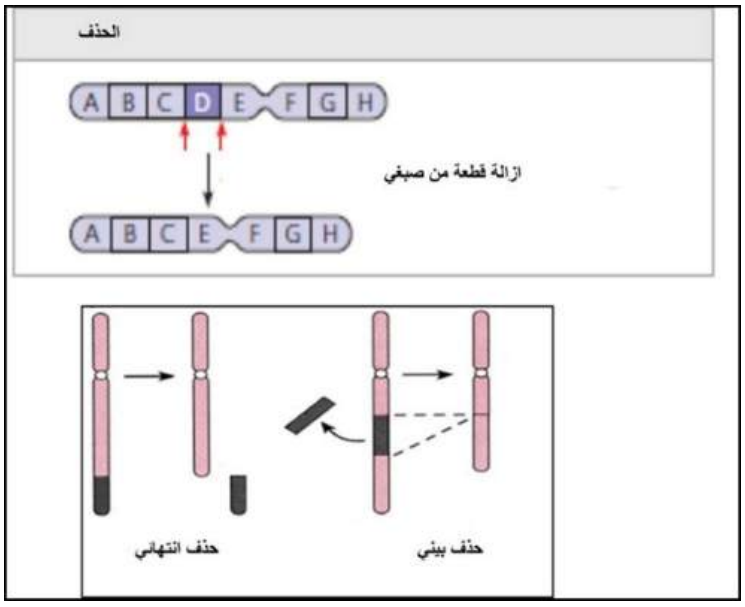
يحدث الاضطراب البنيوي بنتيجة حدوث كسر أو كسور في بنية الصبغي والتي يمكن أن تحدث في أثناء الانقسام المنصف. ومن الممكن أن تحدث هذه الكسور في أي منطقة من الصبغي، وتختلف آثارها حسب نمط الاضطراب و من صبغي لآخر وكذلك من قطعة صبغية لأخرى.

تشمل الاضطرابات الصبغية البنيوية الحالات الآتية:

1- **الحذف deletion:** وهو فقدان لجزء من الصبغي. ويمكن أن يحدث الحذف لأي من الصبغيات، ويكون بحجوم مختلفة، وغالباً ما يؤثر حجم الجزء المفقود من الصبغي والمورثات الموجودة فيه على النمط الظاهري للفرد الذي غالباً ما يكون غير سوي ويترافق مع ظهور اضطرابات خاصة . يمكن تمييز نمطين من الحذوف :

إما حذوف انتهائية terminal deletions (حدوث كسر واحد في نهاية الصبغي وفقدان هذا الجزء). أو حذوف بينيّة interstitial deletions (يحدث كسران في ذراع الصبغي مع فقدان للقطعة الناتجة والتحام الأجزاء الصبغية) (الشكل13-5).

وكمثال عن الحذوف التي تشمل بنية الصبغي لدى الإنسان **متلازمة مواء القطة** "cri du chat" syndrome إذ يحدث حذف جزئي ضمن الذراع القصيرة للصبغي رقم 5 .

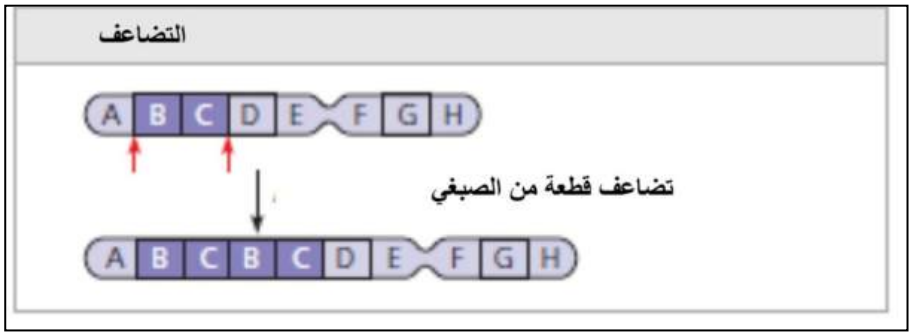


الشكل (13-5): رسم تخطيطي يوضح الحذف الصبغي وأنماطه.

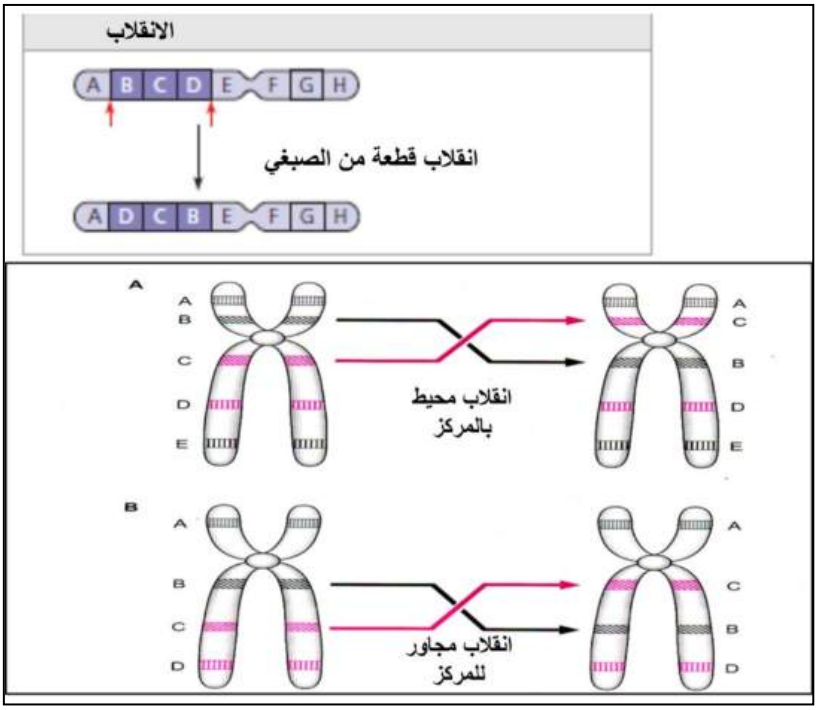
2- **التضاعف duplication:** وهو وجود قطعة إضافية في بنية الصبغي (الشكل 13-6)

3- **الانقلاب الصبغي inversion:** يحدث كسران في الصبغي يتبعه إدخال لاحق لهذه القطعة ولكن بشكل عكسي.

ويمكن تمييز نمطين من الانقلاب حسب موقع الانقلاب من الجزيء المركزي: الانقلاب المحيط بالمركز (pericentric inversion) والانقلاب المجاور للمركز (paracentric inversion) (الشكل 13-7).



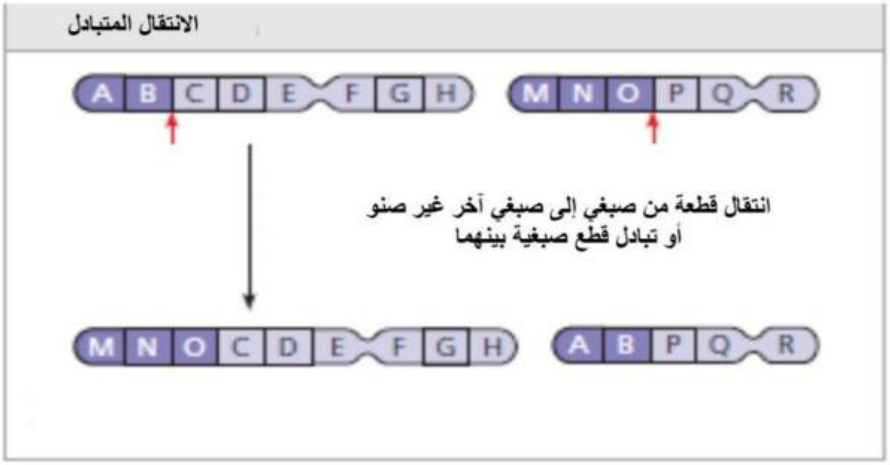
الشكل (13-6): رسم تخطيطي يوضح التضاعف الصبغي.



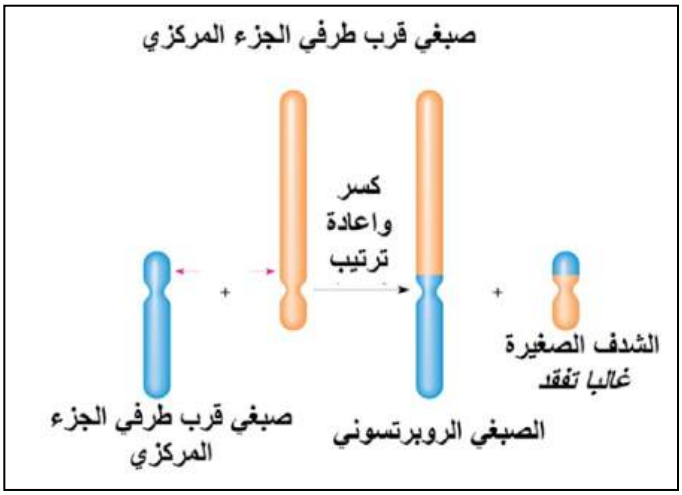
الشكل (13-7): الانقلاب الصبغي وأنماطه المحيط بالمركز والمجاور للمركز

4- **الانتقال translocation**: يحدث الانتقال الصبغي بنتيجة تبادل القطع الصبغية بين صبغيين اثنين أو أكثر.يمكن تمييز نمطين لهذا النوع من الاضطراب الصبغي هما:

الانتقال المتبادل (يحدث بين صبغيين مختلفين) (الشكل 13-8) والانتقال الروبرتسوني (يحدث بين الصبغيات الطرفية أو القرب طرفية الجزء المركزي فقط) (الشكل13-9).



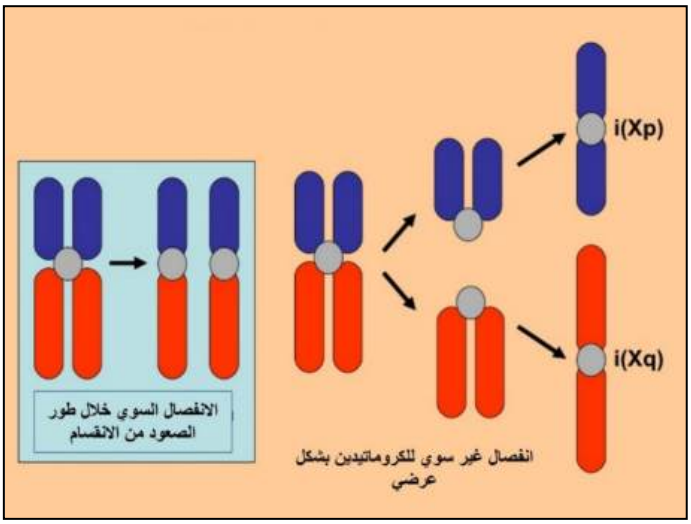
الشكل (13–8): رسم تخطيطي يوضح الانتقال الصبغي المتبادل



الشكل (13–9): رسم تخطيطي يوضح الانتقال الصبغي الروبرتسوني

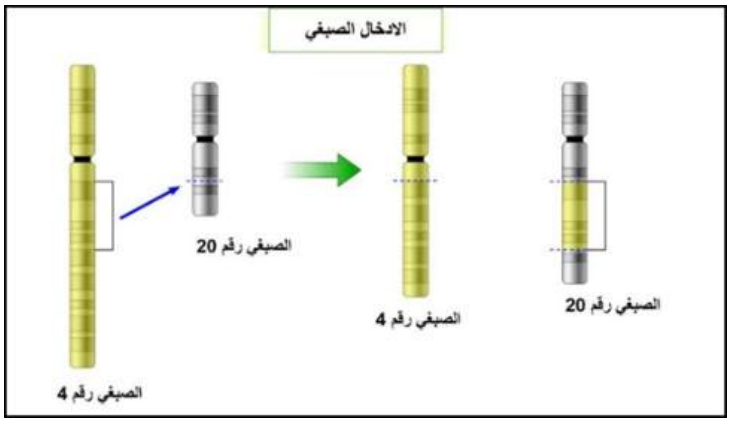
5- **الصبغي الحلقي ring chromosome** : يتشكل الصبغي الحلقي بنتيجة حدوث كسر على كل من ذراعي الصبغي نفسه، فتتشكل بذلك نهايتان لزجتان تلتحمان معاً بشكل حلقة، أما القطع الناتجة عن الكسر فتفقد.

6- **الصبغي متساوي الأذرع isochromosome**: حيث يفقد أحد ذراعي الصبغي ويتضاعف الآخر، يحدث ذلك بسبب انقسام الجزء المركزي بشكل عرضي عوضاً عن انقسامه بشكل طولي (الشكل 13-10) .



الشكل (13-10): رسم تخطيطي يوضح كيفية حدوث الصبغي متساوي الأذرع من خلال مثال للصبغي X

7-الإدخال: insertion حيث يمكن لقطعة من صبغي أن يتم إدخالها في مكان ما ضمن صبغي آخر غير صنو (الشكل 13-11).



الشكل (13-11): رسم توضيحي للإدخال الصبغي بين الصبغيين رقم 4 و20 على سبيل المثال.

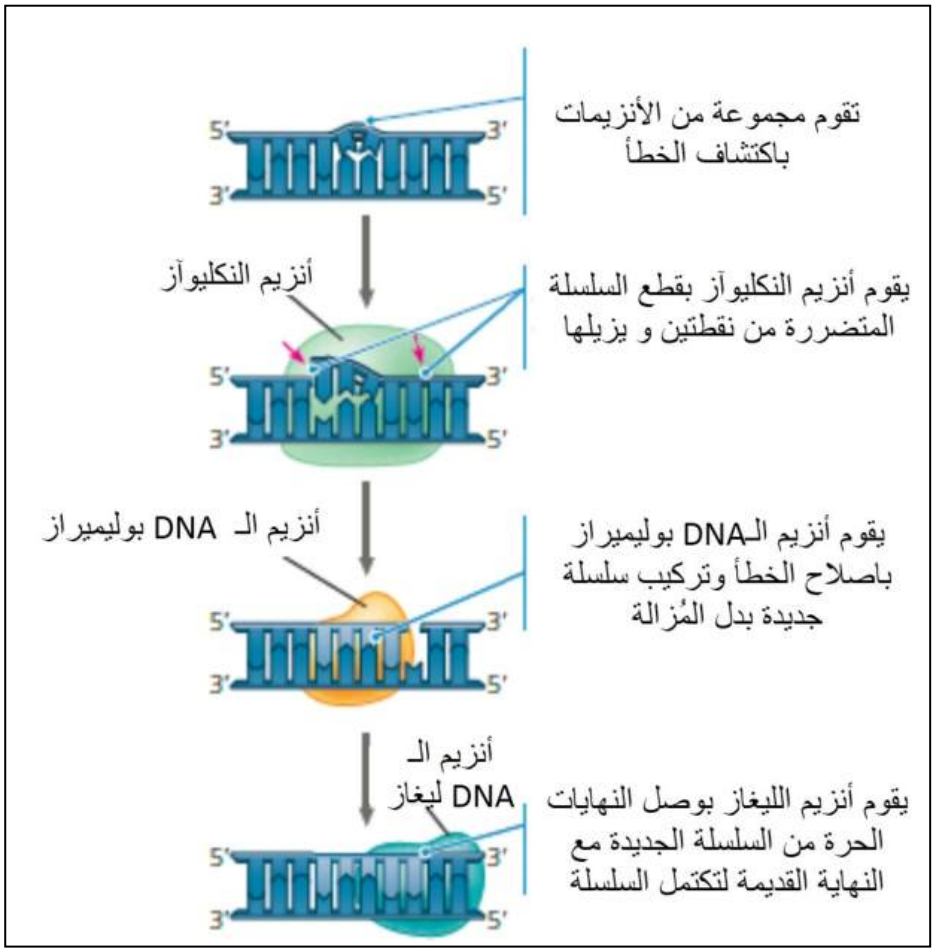
والآن وبعد أن استعرضنا الطفرات التي يمكن أن تطرأ على مستوى الصبغيات، لنبحث في المجموعة الثانية من الطفرات وهي الطفرات الأصغر حجماً؛ الطفرات على مستوى المورثات.

ثانياً: الطفرات على مستوى المورثات (النكليوتيدات)

وكما ذكرنا سابقاً فإنّ الطفرات بشكل عام ،هي تغير في تسلسل الأسس السوي للـ DNA، وقد يحدث هذا التغيير في المناطق المرمزة لتركيب سلسلة ببتيدية الأمر الذي يفضي غالباً إلى تعديل أو اضطراب في وظيفة البروتين الناتج، أو أن يحدث هذا التغيير في المناطق غير المرمزة لتركيب البروتين.

أسباب حدوث الطفرات:

يمكن أن تحدث الطفرات من خلال التعرض للعوامل المُطَفِرة (المطفرات Mutagenic)، مثل بعض المواد الكيميائية كالملونات الصنعية والصباغات التي تضاف إلى الأطعمة، كذلك التدخين أو التعرض للأشعة كالأشعة السينية X–ray أو الأشعة فوق البنفسجية UV light ، للعديد من العوامل البيئية المحيطة و الداخلية. إلاّ أنّ أغلب الطفرات تظهر بشكل تلقائي في أثناء عملية تضاعف الـ DNA. فمن الممكن أن يقوم أنزيم الـ DNA بوليميراز بارتكاب خطأ ما أثناء اضافة النكليوتيدات إلى السلسلة النامية (وهذا يحدث بمعدل مرة كل 100,000,000 أساس)، غالباً ما يتم إصلاحه بواسطة أنزيمات خاصة تدعى أنزيمات القطع الداخليّة (الإندونكليآز endonuclease). ولكن في حال لم يتم إصلاح الخطأ تظهر الطفرات المختلفة (الشكل13-12) .



الشكل (13-12): رسم توضيحي لآلية إصلاح الأخطاء في سلسلة الـ DNA

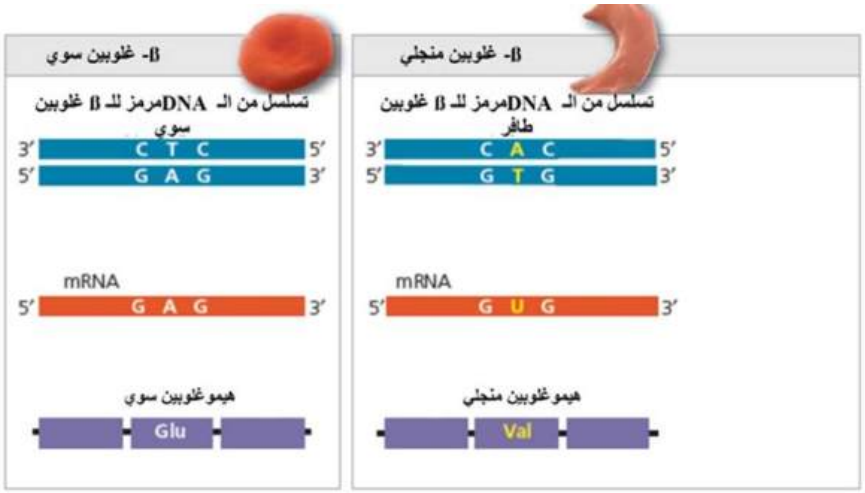
أنماط الطفرات المورثيّة:

1- طفرات الاستبدالSubstitution :

هي الطفرات التي يتم فيها استبدال أساس نكليوتيدي بآخر. و في هذا السياق يمكن تمييز ثلاث حالات:

أ- تغيير في الكودون المرمز واستبداله بكودون آخر، وبالتالي يحصل تغيير في الحمض الأميني الذي يرمز له هذا الكودون، الأمر الذي قد ينعكس على بنية ووظيفة البروتين. يدعى هذا النوع من الطفرات **بالطفرات مغلوطة المعنى (Missense mutation)** . ولعل أشهر مثال على هذا النمط من الطفرات هو :

فقر الدم المنجلي (sickle cell anemia): إذ تؤدي الطفرة إلى استبدال نكليوتيد التايمين بالأدنين (GAG ⇦ GTG) مما يؤدي إلى استبدال حمض الفالين بالحمض الأميني غلوتامين في الموقع 6 من السلسلة الببتيدية ويؤدي إلى تشوه في بنية بروتين الهيموغلوبين الناتج ينعكس على شكل الكرية الحمراء إذ يصبح شكلها منجليّاً، يعوق هذا الشكل وظيفة الكرية الحمراء و يعيق الجريان الدموي في الأوعية (الشكل 13-13) .



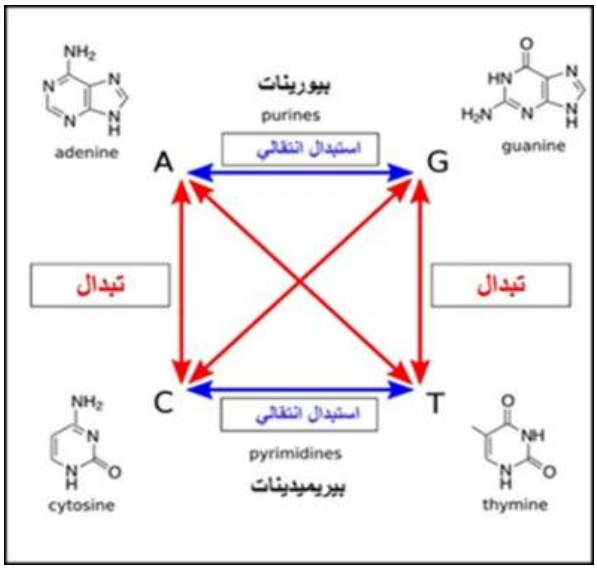
الشكل (13-13): رسم توضيحي يبّين الأساس الجزيئي لحدوث فقر الدم المنجلي والطفرة مغلوطة المعنى

ب- تغير الكودون إلى كودون يرمز إلى الحمض الأميني ذاته وبالتالي لا يحدث أي تغير في البروتين الناتج. يدعى هذا النوع من الطفرات **بالطفرات الصامتة (silent mutations)** (الشكل 13-15)

ج- تغير الكودون المرمز إلى أحد كودونات التوقف "stop codons" .غالباً ما يكون لمثل هذا النمط من الطفرات تأثيرات خطيرة على مستوى البروتين الناتج إذ يمكن أن يتشكل بروتين غير كامل وقصير وبالتالي يصبح يكون وظيفي. يدعى هذا النمط من الطفرات بالطفرات التي **لا معنى لها أو عديمة المعنى (Nonsense mutation)** (الشكل 13-15)

تُعد طفرات الاستبدال من أكثر أنماط الطفرات شيوعاً. يمكن تمييز نمطين من الاستبدالات :

- استبدال انتقالي transition substitution و هو الأكثر شيوعاً، ويتم بين البيورينات أي بين أساسي الأدنين والغوانين أو بين البيريميدينات أي بين أساسي السيتوزين والتايمين.
- تبدال transversion substitution ؛ حيث يتم تبادل بين أسس البيورين والبريميدين (الشكل 13-14)



الشكل (13-14): مخطط يوضح أنماط الاستبدالات الممكنة

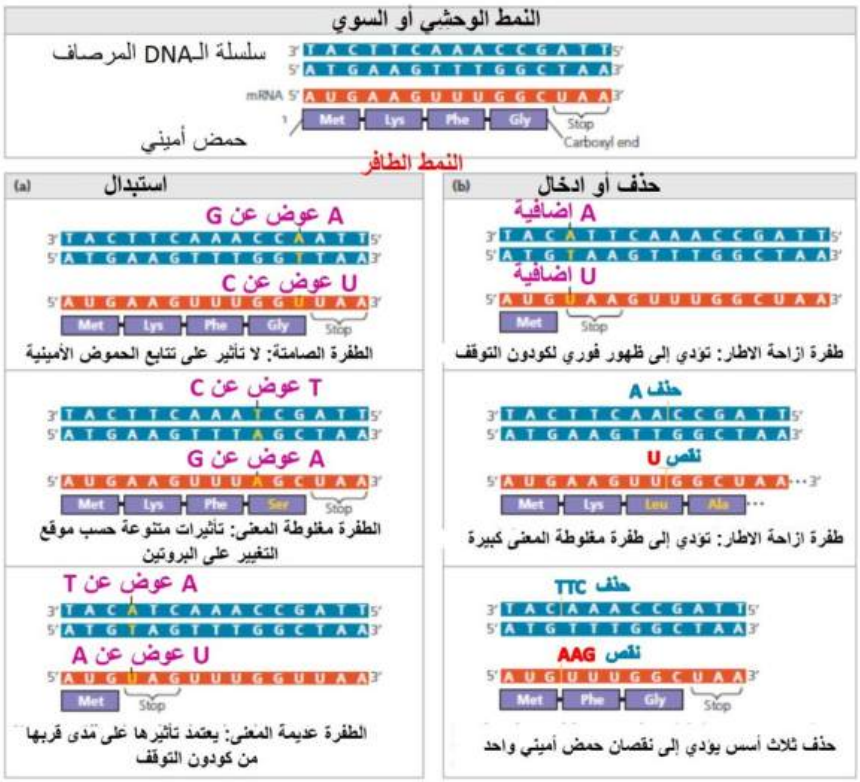
2- **طفرات الإدخال Insertion:** وهي الطفرات التي يتم فيها إدخال أساس نكليوتيدي إضافي أو أكثر.

3-**طفرات الحذفDeletion :** وهي الطفرات التي يتم فيها حذف أساس أو أكثر

ملاحظة: يُطلق مصطلح الطفرة النقطية Point mutation على الحالات التي تؤدي الطفرة إلى تغير في أساس نكليوتيدي **واحد فقط** والذي يمكن أن يكون استبدال أو حذف أو إدخال.

4-**طفرة إزاحة الإطار frameshift mutation:** إن حذف أو إضافة أساس معين إلى أحد الكودونات يمكن أن تحدث تعديلات في المورثة أو التسلسل المرمز وبالتالي لا تترجم الشيفرة الوراثية بشكلها الصحيح، وغالباً ما يصادف كودون التوقف، ويؤدي ذلك إلى إنتاج بروتين مجتزأ و قصير غير وظيفي، أما إن كان عدد النكليوتيدات المضافة

هو من مضاعفات العدد 3 فهذا يؤدي إلى تغير كبير في البروتين الناتج ، تعتمد وظيفته على حجم هذا التغيير.(الشكل 13-15) و(الشكل13-16)



الشكل (13-15): رسم توضيحي يُلخص أنماط الطفرات ويشرح تأثيرها على مستوى mRNA المرسال وسلسلة عديد الببتيد الناتجة

الشكل (13-16): مخطط توضيحي لتأثيرات طفرات الحذف والادخال.

الطفرات الموروثة و المكتسبة:

تدعى الطفرات التي تورث من أحد الأبوين **بالطفرات الموروثة**، أو طفرات الأعراس germline mutations بسبب وجودها في أعراس أحد الأبوين أو أحد الأبوين يحمل الطفرة و أورثها لأبنائه، وبالتالي فإنّ هذا النمط من الطفرات يصيب جميع خلايا الجسم و يكون موجوداً خلال حياة الفرد. و في حال حدثت طفرة في أثناء تشكل الأعراس، أو مباشرة بعد الإلقاح (في البيضة الملقحة) فإن هذه الطفرة تدعى **بالطفرة الجديدة**.

(de novo mutation) (الطفل يحمل الطفرة في حين لا يحمل أي من أبويه هذه الطفرة). ويمكن أن تحدث الطفرة خلال حياة الفرد و بالتالي تدعى **بالطفرة المكتسبة** أو الطفرة الجسمية Acquired (or somatic) mutation يُحَرّض هذا النمط من الطفرات بتأثير عوامل بيئية كالتعرض للإشعاع و غيرها من العوامل المطفرة، أو من الممكن أن تحدث بنتيجة خطأ في أثناء تضاعف الـ DNA خلال عملية الانقسام الخلوي. وعلينا أن نتذكر بأنّ الطفرات المكتسبة والتي تظهر في الخلايا الجسمية، لا يمكن أن تورث إلى الأبناء، فهي تظهر في الخلايا الجسمية (الاجنسية) وبالتالي فهي غالباً ما تشمل المورثات المتوضعة على الصبغيات الجسمية. ولا تورث إلى الذرية أما الطفرات الموروثة تكون في أعراس أحد الأبوين وبالتالي تنقل إلى الذرية، قد تظهر هذه الطفرات فقط في الأعراس أو مباشرة بعد الإلقاح وبالتالي تدعى بالجديدة (de novo).

هل جميع الطفرات ضارة أم أنه هناك طفرات مفيدة؟

ليست جميع الطفرات ضارة، فهناك بعض الطفرات التي لها يكون لها تأثير مفيد على الكائن الحامل لها. من أمثلتها:

طفرة إزاحة الإطار التي لوحظت لدى أحد أنواع الجراثيم والتي تدعى بجراثيم النايلون Nylon Bacteria، التي تعيش في مكب النفايات إذ أدت هذه الطفرة إلى إنتاج أنزيم (Nylonase) القادر على حلمهة جزيئات النايلون من النفايات والحصول منها على مصدر جديد للطاقة لإبقائها على قيد الحياة.

ومع أن هذه الجراثيم لا تحصل على كثير من الطاقة من تحطيم النفايات من النايلون وبعيدة عن أن تكون قادرة على هضم النايلون، فهي تحصل على ما يكفي من الطاقة للبقاء على قيد الحياة من المصدر الغذائي الجديد، مما يتيح لها التكيف و العيش في بيئة جديدة. أيضاً، هناك أنواع برية من شجر اللوز تحوي بذورها مادة (أميغدالين amygdalin) وهي مادة كيميائية مرّة المذاق وتتحول إلى السيانيد السام داخل الجسم. وبالتالي فإنّ أكل مثل تلك البذور يكون قاتلاً . وقد اكتشفت بعض الأنواع البرية من شجر اللوز التي تحمل طفرة في المورثة المسؤولة عن إنتاج مادة أميغدالين والتي وبسبب تلك الطفرة لم تُعَدُّ هذه الأنواع من الأشجار تنتج هذه المادة المرّة القاتلة للبشر، وعند اكتشاف هذه الأنواع تمت زراعتها وإكثارها على الفور.

الفصل الرابع عشر
علم النسج والأنماط النسيجية المختلفة

- الأوساط الخلالية
- الترابط بين الخلايا وأنماط الاتصال بينها
- النسيج الظهاري
- النسيج الضام الدعامي
- النسيج العضلي
- النسيج العصبي

تمهيد:

تمثل الخلية الوحدة الوظيفية الرئيسة لدى جميع الكائنات الحيّة. وتتألف الكائنات الأقل تعقيداً كالجراثيم، من خلية واحدة بينما تتألف أجسام الكائنات الأكثر تعقيداً من العديد من الخلايا. تظهر خلايا الكائنات عديدات الخلايا كالإنسان مثلاً، تنوعاً وظيفياً وشكلياً واسعاً. وتُعرف العملية التي تتخصص فيها الخلايا لتؤدي وظيفة محددة **بالتمايز** differentiation. و تدعى مجموعة الخلايا التي لها بنية ووظيفة واحدة بالنسيج **Tissue** إذ يحدد شكل وبنية النسيج الوظيفة التي يقوم بها. و يُعَرّف العلم الذي يدرس بنية النسج وترتيبها لتكوين أعضاء الجسم المختلفة، بالاستعانة بالمجهر و باستخدام تقنيات تلوين خاصة **بعلم النسج Histology**

يتكون أي نسيج بشكل عام من : **خلايا متخصصة** و **أوساط خلالية** أو بينيّة (المطرق خارج خلوي Extracellular matrix)

الأوساط الخلاليّة (البينيّة) Extracellular matrix: تُعرف الأوساط الخلاليّة بأنها مواد غير حيّة تفرزها الخلايا إلى الوسط الخارج خلوي، وتتألف من مواد أساسية وألياف. تتجلى وظيفتها الرئيسة بتأمين ربط الخلايا ببعضها بعضاً وتوفير الدعم الميكانيكي لها، و تؤثر في تحديد شكل وحركة الخلايا، كما تعد المخزن الأساسي للعديد من الجزيئات التي تعمل كإشارات تنظيمية رئيسية تؤثر في نشاط الخلايا وتمايزها.

يعتمد تصنيف أي نسيج على بنية وشكل ووظيفة الخلايا المكونة له، وكذلك على مكونات المطرق الخلوي حيث نجد أربعة أنماط نسيجية مختلفة هي : النسيج الظهاري – النسيج الضام الداعم– النسيج العضلي– النسيج العصبي.

وقبل أن نشرع بالشرح عن كل نمط من أنماط النسج المختلفة لنتعرف على كيفية ارتباط الخلايا المكونة للنسيج ببعضها بعضاً وأنماط الاتصالات بينها.

الترابط بين الخلايا وأنماط الاتصالات بينها

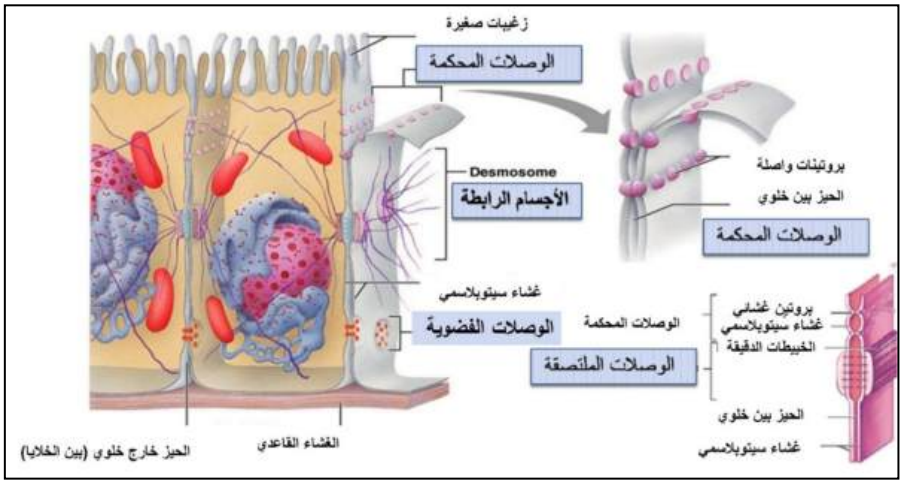
تتصل خلايا النسيج الواحد بعضها مع بعض في معظم الأنماط النسيجية بواسطة بنى ووصلات مميزة، تكون هذه الوصلات غزيرة و واضحة أكثر ما تكون في النسيج الظهاري. ويمكن تمييز أربعة أنماط من الوصلات بين الخلوية هي :

1– **الوصلات المحكمة Tight Junction :** تلاحظ في قمة الخلايا الظهارية وتؤمن الاتصال المحكم والوثيق بينها، إذ تشكل طوقاً حول الخلايا يمنع تدفق المواد بينها.

2–**الوصلات الملتصقة Adherent junction:** تقع أسفل الوصلات المحكمة تطوق الخلايا وتقوم بربط الخلية بالخلية المجاورة لها باحكام من خلال إدخال أعداد كبيرة من خيوط الأكتين.

3-الأجسام الرابطة Desmosomes: وهي عبارة عن صفيحتين قرصية الشكل تتصلان عبر الفضوة بين الخلوية، لا تشكل طوقاً حول الخلايا، تمتد بروتينات رابطة بين الصفيحتين مشكلةً ما يشبه أسنان السحاب، توافر الأجسام الرابطة ارتباطاً قوياً بين الخلايا.

4-الوصلات الفضوية Gap junctions : عبارة عن ممرات بين الخلايا المتجاورة تسمح بمرور الجزيئات الصغيرة بينها. وهي مكوّنة من بروتينات أسطوانية الشكل تلاحظ بغزارة في النسج المنفعلة كهربائياً كالقلب (الشكل 14-1) .



الشكل (14-1):رسم تخطيطي يوضح أنماط الوصلات بين الخلوية

أولاً: النسيج الظهاري Epithelial Tissue

يتميز النسيج الظهاري (الظهارة) بمجموعة من الخصائص هي:

1- غزارة الخلايا إذ يتكون بشكل كامل تقريباً من خلايا وكمية قليلة جداً من الأوساط الخلالية أو المطرق الخلوي.

2- يغطي النسيج الظهاري سطح الجسم ويبطن الأجواف والأحشاء (يبطن السبيل الهضمي ،التنفسي الأوعية الدموية).

3- تتمتع خلاياه بقابلية عالية للتجديد.

4- لا يحتوي على أوعية دموية لذا تتم تغذيته وترويته عن طريق الانتشار.

5- تستند خلاياه على الغشاء القاعدي.

6- ترتبط الخلايا بعضها مع بعض بقوة و بإحكام.

و تتجلى وظيفة النسيج الظهاري بما يلي:

1) الحماية: حماية البنى والأعضاء الرئيسة؛ مثل: الظهارة المبطنة للفم والجلد.

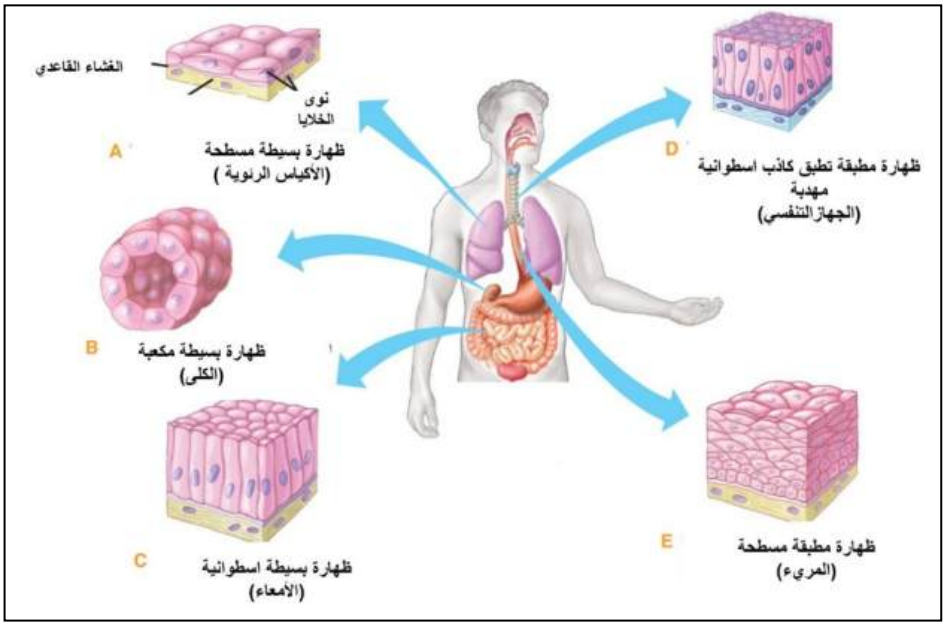
2) التصفية : فمثلاً الخلايا المبطنة للحويصلات الهوائية في الرئتين؛ هي عبارة عن خلايا ظهارية مهدبة تزيل جزيئات الغبار والأجسام الغريبة من ممرات الهواء.

3) الإفراز : كإفراز العرق من قبل الغدد العرقية.

4) الامتصاص: كامتصاص بطانة المعدة والأمعاء الدقيقة لبعض المواد.

يُصنّف النسيج الظهاري وفقاً لشكل الخلايا التي يتألف منها أو وفقاً لعدد الطبقات الخلوية المكونة له.

فقد يتألف النسيج الظهاري من طبقة واحدة من الخلايا تستند إلى الغشاء القاعدي فيدعى **بالبسيط** Simple. أو قد يكون مؤلفاً من أكثر من طبقة خلوية وهذا النسيج الظهاري **المطبق** Stratified . و يلاحظ نمط من النسيج الظهاري تبدو الخلايا فيه وكأنها مطبقة، غير أنها من النمط البسيط كون الخلايا فيه ذات ارتفاعات مختلفة وتتوزع النوى في مستويات مختلفة، يدعى هذا النمط من النسيج الظهاري **بالمطبق تطبق كاذب** Pseudostratified وقد تبدو الخلايا في النسيج الظهاري **مسطحة** Squamous أو **مكعبة** Cuboidal **أو اسطوانية** Columnar تحمل أهداباً أو غير مهدبة (الشكل14-2).



الشكل (14-2): رسم تخطيطي يوضح بعض النماذج عن أنماط النسيج الظهاري وأماكن وجوده في جسم الإنسان

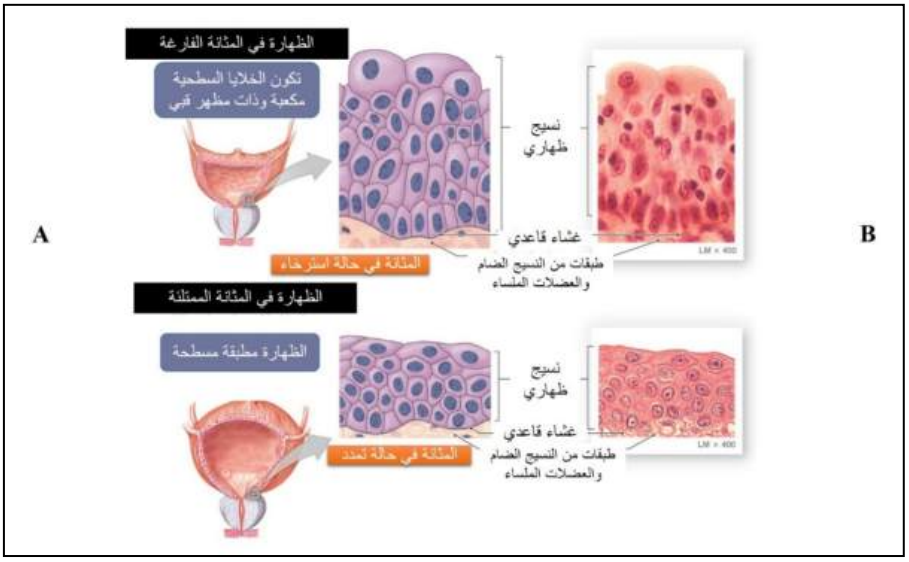
وقد يُصنف النسيج الظهاري وفقاً للوظيفة المخصص لها إذ نجد **نسيجاً ظهارياً مُبَطناً أو غدياً**

❖ **النسيج الظهاري المبطن** والذي يمكن أن يكون:

➢ **بسيطاً** : مسطحاً مثل الظهارة المبطنة لجدران الأوعية الدموية. أو مكعباً كالظهارة المبطنة لبعض الأنابيب الكلوية. أو أن يكون أسطوانياً مثل الظهارة المبطنة للجدران الأمعاء الدقيقة.

➢ **مطبقاً** : مطبقاً مسطحاً متقرناً كما في الجلد، أو مطبقاً مسطحاً غير متقرناً كما في البطانة الفموية. أو مطبقاً أسطوانياً كما في ملتحمة العين. أو مطبقاً مكعباً مثل الغدد العرقية.

➢ **انتقالياً** : يلاحظ هذا النمط الفريد من الظهارة في المثانة فقط. حيث تتميز المثانة بقابليتها للتمدد، ويختلف شكل النسيج الظهاري فيها حسب درجة امتلائها. إذ يتألف النسيج الظهاري الانتقالي من عدة طبقات من الخلايا الظهارية التي يختلف شكلها وفقاً لدرجة التمدد وامتلاء المثانة حيث يتراوح شكلها من القبي إلى الشكل المسطح. (الشكل 3-14)



الشكل (14–3) النسيج الظهاري الانتقالي في المثانة: A رسم تخطيطي يبيّن حالات الظهارة المختلفة حسب درجة تمدد المثانة.B صور بالمجهر الضوئي يوضح حالات الظهارة الموافقة

❖ **النسيج الظهاري الغدي Glandular Epithelia:** تتشكل الظهارة الغدية من قبل خلايا متخصصة في الإفراز، إذ تفرز جزيئات يتم تخزينها في حويصلات صغيرة غشائية

ضمن خلايا النسيج نفسه، تدعى بالحبيبات الإفرازية. وتختلف الطبيعة الكيميائية للحبيبات الافرازية من نمط خلوي لآخر، فقد تكون مؤلفة من البروتينات كما في البنكرياس، أو الدهون و الليبيدات في الغدة الكظرية والغدد الدهنية، وقد تكون بشكل معقدات من السكاكر والبروتينات كما في الغدد اللعابية أو تكون مؤلفة من الماء والشوارد المعدنية كما في الغدد العرقية.

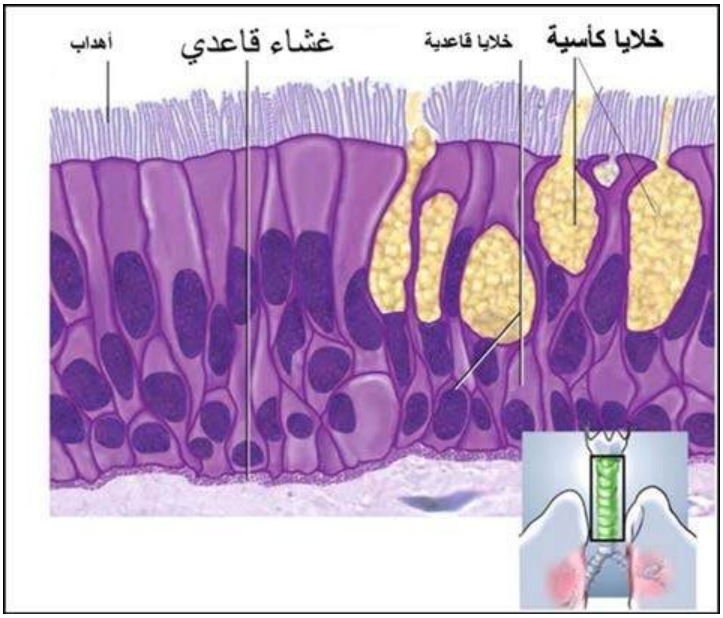
ويمكن تصنيف أنماط الظهارة الغدية وفقاً لما يلي:

❖ الغدد وحيدة الخلية : وتتألف من خلايا إفرازية كبيرة معزولة عن بعضها بعضاً كالخلايا الكأسية المبطنة للأمعاء الدقيقة والقصبات الهوائية (الشكل14-4) .

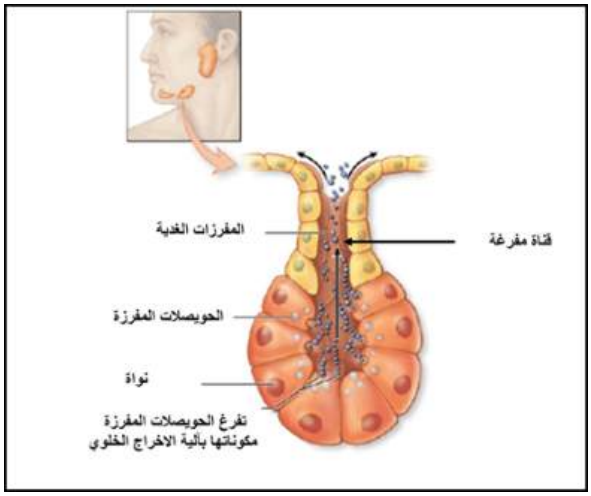
❖ الغدد متعددة الخلايا : تمتلك تجمعات عديدة من الخلايا الإفرازية والتي نميز منها :

– الغدد خارجية الإفراز: لها قنوات إفرازية مبطنة بخلايا ظهارية حيث تمر المفرزات الغدية منها إلى الوسط الخارجي، كالغدد اللعابية التي تفرز اللعاب في جوف الفم (الشكل14-5).

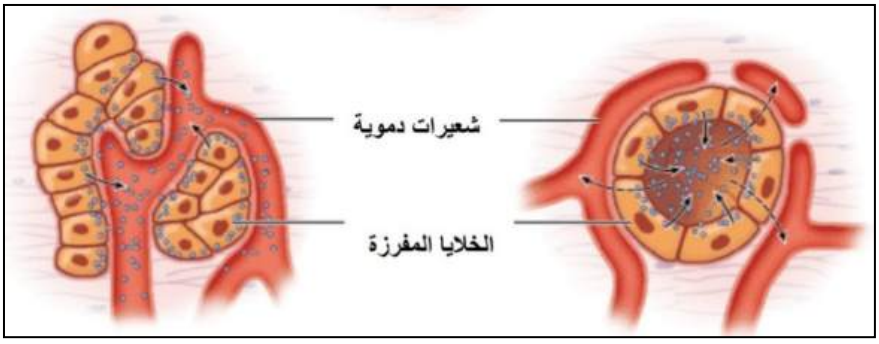
–الغدد الصماء : والتي تتميّز بكونها عديمة القنوات إذ تلقي مفرزاتها مباشرة في مجرى الدم، كالغدة الدرقية والبنكرياس (الشكل 14-6).



الشكل (14-4): رسم توضيحي للنسيج الظهاري المبطن للجهاز التنفسي العلوي والمؤلف من نسيج ظهاري مطبق تطبق كاذب أسطواني مهدب تتخلله خلايا غدية كبيرة مفرزة للمخاط تدعى الغدد الكأسية أو خلايا goblet cell



الشكل (14-5): الغدد خارجية الافراز . رسم تخطيطي لبنية أحد الغدد المفرزة للعاب عند الإنسان



الشكل (14-6): رسم تخطيطي يوضح الغدد الصماء التي تتميز بغزارة الأوعية الشعرية المحيطة بها وعدم وجود قنوات مفرغة

ثانياً: النسيج الضام الدعامي Connective Tissue

يتألف النسيج الضام الدعامي من خلايا متخصصة مختلفة متناثرة ضمن المادة الخلالية، التي إما أن تكون سائلة، أو شبه صلبة أو صلبة.

ويتميز النسيج الضام الدعامي بمجموعة من الخصائص والصفات هي

1. يوجد بين أعضاء الجسم المختلفة ويعمل على ربطها وتدعيمها.
2. تبتعد الخلايا عن بعضها بعضاً ولا ترتكز على أغشية قاعدية.
3. كثرة المادة الخلالية الموجودة بين الخلايا والتي تشكل الجزء الأكبر من النسيج الضام.
4. وفرة الألياف البيضاء والصفراء (المرنة) .
5. وجود أوعية دموية كثيرة .

وظائف النسيج الضام الدعامي:

1- يوفر الهيكل والدعامة للأنسجة والأجهزة الأخرى التي يحيط بها.

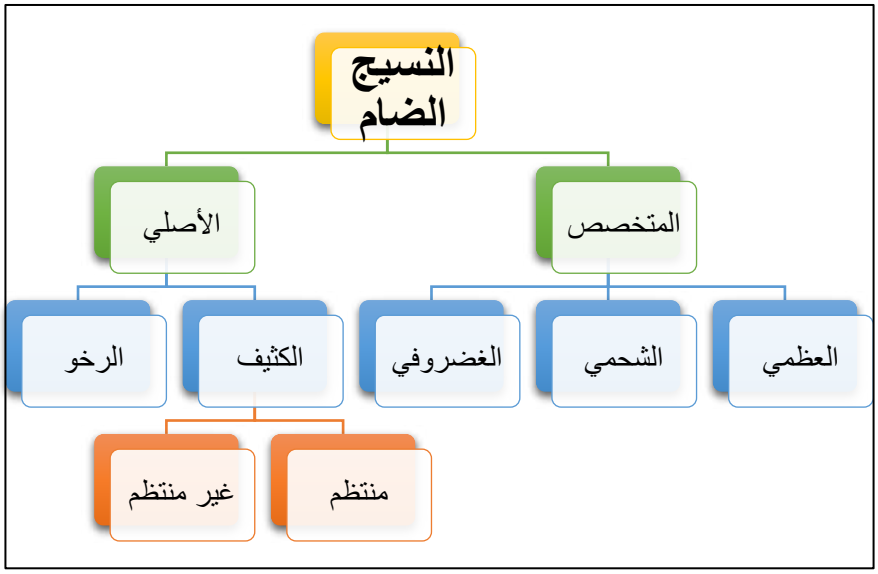
2- يتوسط في تبادل المواد الغذائية، والتمثيل الغذائي والفضلات بين الأنسجة والدورة الدموية.

3- يؤدي دوراً استقلابياً مهماً في التمثيل الغذائي وتخزين الدهون كما الأنسجة الدهنية البيضاء.

4- تنظيم درجة حرارة الجسم في الأطفال حديثي الولادة كما النسيج الشحمي البني.

5. يؤدي دوراً بارزاً في إصلاح الأنسجة وترميمها.

للنسيج الضام الدعامي أنماطاً عديدة ومتنوعة تؤدي أدواراً مهمة في الجسم، ويمكن أن نميز منها نمطين : النسيج الضام المتخصص والأصلي و يلخص المخطط الآتي تلك الأنماط (الشكل14-6).



الشكل (14-6): مخطط يوضح الأنماط المختلفة المكونة للنسيج الضام الدعامي

النسيج الضام الرخو: غني بالخلايا المبعثرة ضمن ألياف الكولاجين والألياف المرنة، و تتجلى وظيفته بربط نسيج بآخر (الجلد إلى العضلات)، الحماية وتغذية الأعضاء وإعطاءها البنية والشكل كما يخزن بعض سوائل الجسم (الشكل 14-7) .

النسيج الضام الكثيف: فقير بالخلايا مع غزارة بألياف الكولاجين. وظيفته توفير الدعم والحماية، كما يشكل محافظ حول الأعضاء كالكبد والطحال، وهو مصدر قوى الشد في الأوتار والأربطة (الشكل 14-8) .

النسيج الشحمي : واسع الانتشار في الجسم (تحت الجلد –حول الكلية – حول العين – في البطن المساريقا)(الشكل 14-9). وله وظائف عديدة هي:

1. تخزين الطاقة، حيث يتم تحويل الأحماض الأمينية و الغلوكوز بفعل الأنزيمات إلى دهون تختزن في خلايا هذا النسيج.

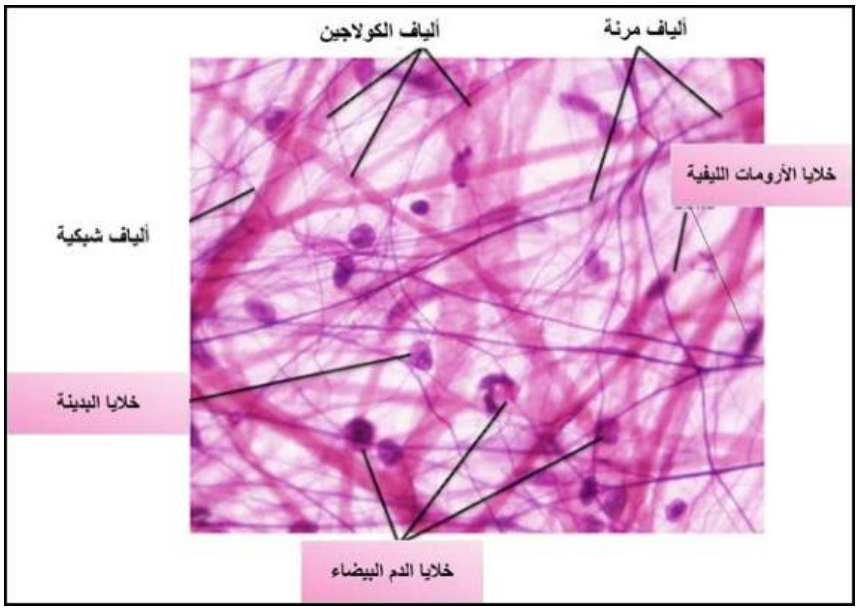
2. يساعد على تقليل استهلاك الماء بسبب قابلية الخلايا الدهنية للاحتفاظ بالماء و تخزينه في السيتوبلاسما.

3. تنظيم درجة حرارة الجسم و امتصاص الصدمات كما في النسيج الواقع تحت الجلد.

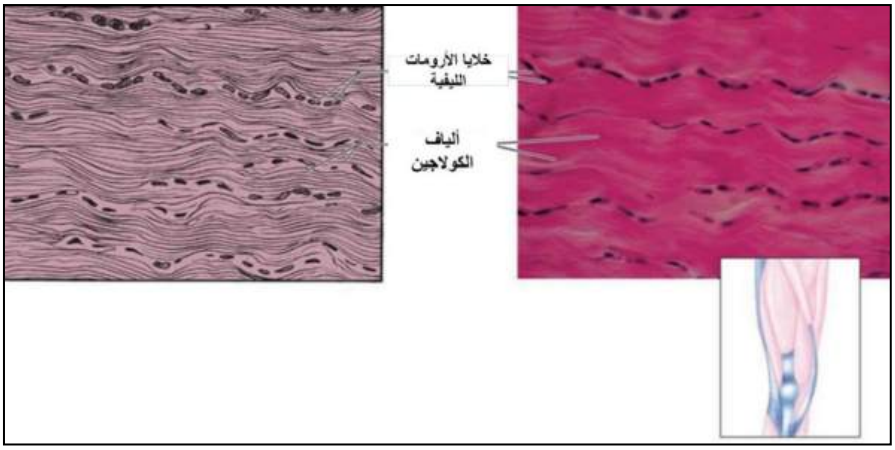
النسيج الغضروفي : تعود الطبيعة شبه الجامدة للنسيج الغضروفي إلى غزارة مادة البروتوغليكان في مادته الأساسية. تتوضع الخلايا الغضروفية ضمن جوبات أو محافظ خاصة. ونميز ثلاثة أنماط من هذا النسيج وهي : **النسيج الغضروفي الزجاجي** كما في الحنجرة والقصبات الهوائية، **النسيج الغضروفي الليفي** كما في الأقراص بين الفقرات، **النسيج الغضروفي المرن** كما في صيوان الأذن. وبشكل عام فإن وظيفة النسيج الغضروفي تتجلى في توفير السطح المفصلي السلس في نهايات العظام، وكذلك الدعم الهيكلي في مناطق خاصة مثل القصبة الهوائية، صيوان الأذن والأقراص بين الفقرات (الشكل 14-10).

النسيج العظمي: يتكون من مادة خلالية متكلسة، حيث تفرز الخلايا العظمية مادة العظمين التي تتمعدن نتيجة ترسب أملاح هيدروكسي أباتيت الكالسيوم، مما يعطي

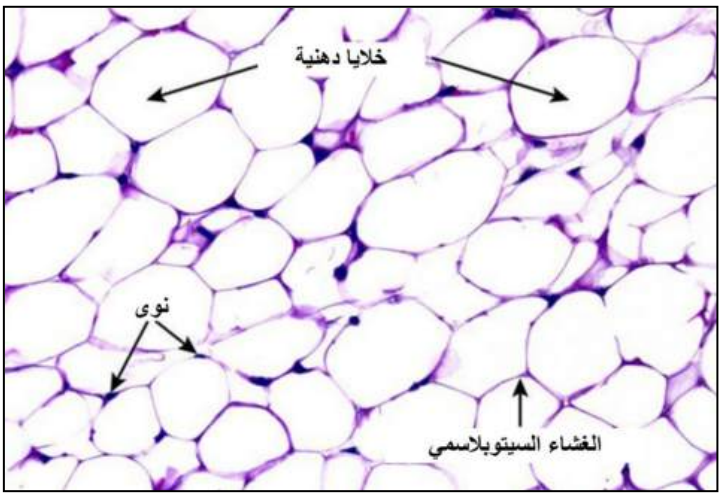
العظام صلابة وقوة كبيرة. تتوضع الخلايا العظمية ضمن جوبات أو محافظ وتتصل مع بعضها بعضاً بواسطة قنيوات صغيرة، وهي ضرورية من أجل التبادل الغذائي وطرح الفضلات نظراً لبعد بعض الخلايا عن الأوعية الدموية(الشكل 14-11). نميز نمطين من النسيج العظمي ؛ الكثيف و الأسفنجي. وتتجلى وظيفة النسيج العظمي بالدعم والحماية، كما يُعد مخزناً أساسياً للكالسيوم وبعض المعادن و مقراً لاصطناع خلايا الدم.



الشكل (14–7): صورة بالمجهر الضوئي تظهر بنية النسيج الضام الرخو

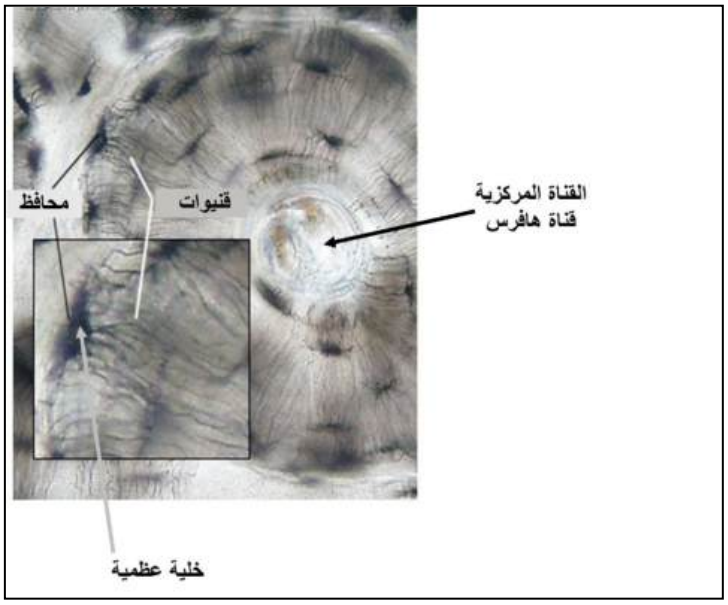


الشكل (14-8): النسيج الضام الكثيف الذي يشكل البنية الرئيسة في الأوتار والأربطة. إلى اليمين صورة بالمجهر الضوئي يقابلها رسم تخطيطي لتلك البنية.



الشكل (14-9): صورة بالمجهر الضوئي توضح بنية النسيج الشحمي. و المكون من خلايا دهنية تخزن قطيرات الدهن ضمنها تدفع تلك القطيرات معظم العضيات الخلوية بما فيها النواة نحو حافة الخلية.

الشكل (14-10): صورة بالمجهر الضوئي توضح بنية النسيج الغضروفي

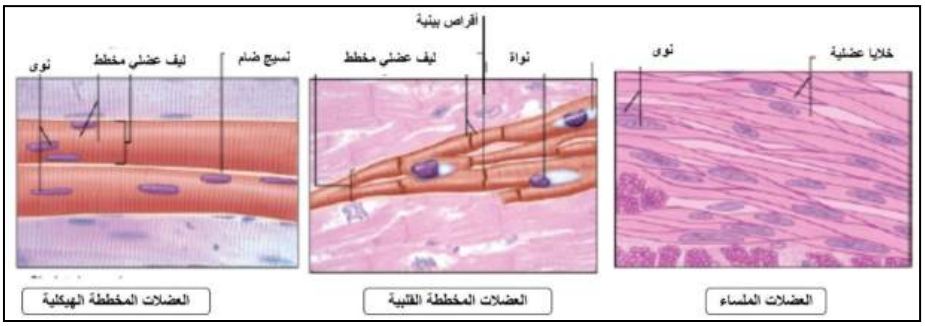


الشكل (14-11): صورة مكبرة عن المجهر الضوئي توضح بنية النسيج العظمي.

ثالثاً: النسيج العضلي Muscle Tissue

يمتاز النسيج العضلي بعدّة خصائص ومزايا رئيسة إذ تدعى الخلايا العضليّة بالألياف العضلية وهي خلايا متخصصة تحوي بروتينات تقلصية مؤلفة من خيوط الأكتين والميوزين. وتتميز هذه الألياف العضلية بقدرتها على التقلص والتقاصر لدى تعرضها للتنبيه. ويمكن تمييز ثلاثة أنماط رئيسة من النسيج العضلي وفقاً لطبيعة الألياف العضلية (الشكل 14-12)، حيث نميز:

- الألياف العضليّة الهيكلية المخططة، ترتبط بالعظام تؤدي عملها بشكل إرادي .
- الألياف العضليّة القلبية المخططة، تشكل عضلة القلب وعملها لاإرادي .
- الألياف العضليّة الملساء غير المخططة، ترتبط مع البنى المجوفة وعملها لا إرادي .



الشكل (14-12): رسم تخطيطي لأنماط النسيج العضلي يوضح الاختلافات البنيوية بينها.

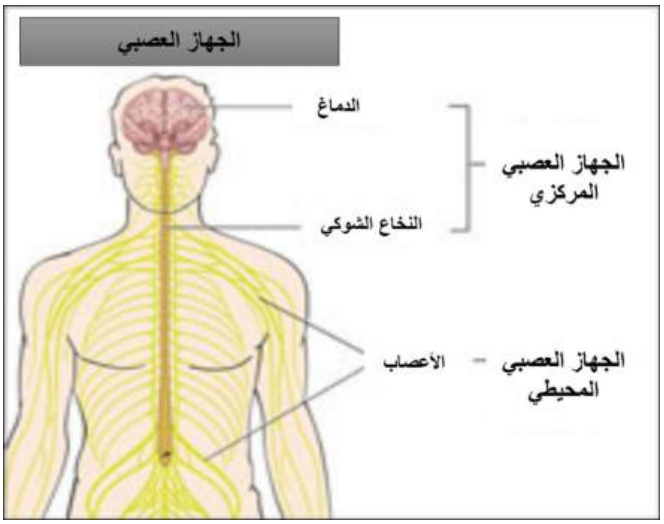
رابعاً : النسيج العصبي Nerve Tissue

يؤمن الجهاز العصبي الاتصال السريع والدقيق بين الأجزاء المختلفة من الجسم، إذ يعمل على استقبال و تخزين المعلومات والسيطرة على العضلات وأجهزة الجسم المختلفة عن طريق خلايا متخصصة تسمى الخلايا العصبية. ويمكن تمييز نوعين من الخلايا العصبية في الجهاز العصبي: **الخلايا العصبية** – للمعالجة ونقل وتخزين المعلومات. و **الدبق العصبي** – للحصول على الدعم، وتنظيم وحماية الخلايا العصبية.

وبشكل عام يتألف الجهاز العصبي (الشكل 14-13) من :

1- **الجهاز العصبي المركزي** ؛ الذي يتكون من الدماغ والنخاع الشوكي. نميز فيهما مناطق تحوي مادة بيضاء ومناطق أخرى تحوي مادة رماديّة. إذ تتألف المادة الرماديّة من أجسام الخلايا العصبية، بينما تتكون المادة البيضاء من الألياف العصبية؛ وهي المحاور العصبية والتي تكون غالباً مغمدة بغمد النخاعين.

2- **الجهاز العصبي المحيطي** ؛ المؤلف من الأعصاب التي توصل الجهاز العصبي المركزي وباقي أنسجة الجسم بالإضافة إلى العقد العصبية "محطات الترحيل العصبية" . وتكون الأعصاب إما حسية أو محركة (إرادية أو لا إرادية ؛ ودية أو نظيرة ودية).



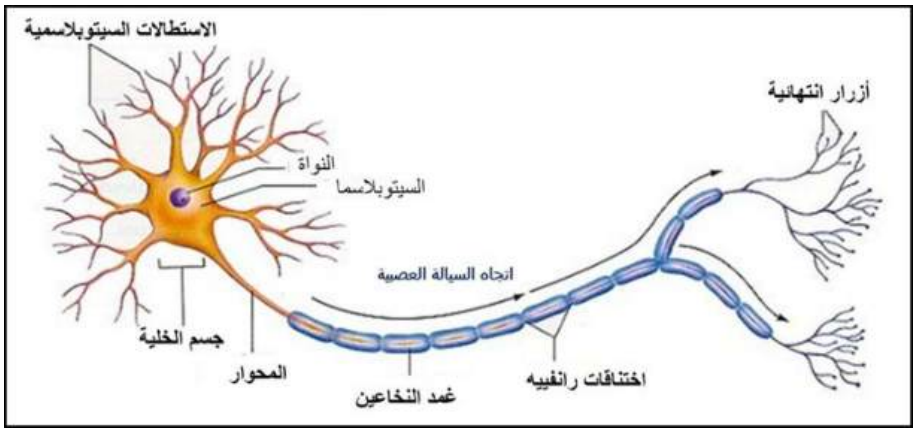
الشكل (14-13): رسم تخطيطي يبيّن البنى المكونة للجهاز العصبي.

بنية الخلية العصبية

تتألف الخلية العصبية من جسم يحوي النواة وعضيات مهمة وأجسام حبيبية تدعى جسيمات نيسل، تقوم بتركيب النواقل العصبية كالاستيل كولين. يخرج من جسم الخلية نمطان من الاستطالات والتفرعات :الاستطالات السيتوبلاسمية و المحوار. تُعَدُّ الاستطالات السيتوبلاسمية مقرات لتلقي الإشارات والمعلومات وإيصالها إلى الخلية العصبية، حيث تتصل تلك الاستطالات إما مع مستقبلات حسية متخصصة أو تشكل مشابك عصبية مع خلية عصبية مجاورة.

ويتميز المحوار بأنه تفرع وحيد أسطواني الشكل و طويل قد يصل طوله إلى ا متر، يخرج من جسم الخلية العصبية وينتهي بتفرعات صغيرة تحمل انتفاخات تدعى الأزرار

الإنتهائية. يحيط بالمحوار خلايا متخصصة تدعى خلايا شوان التي تفرز غمد النخاعين (طبقة عازلة مكونة من الليبيدات تعزل الألياف العصبية). يوفر غمد النخاعين الدعم البنيوي و الاستقلابي للمحوار، ويؤمن وجوده سرعة انتقال كمون الفعل عبر المحوار. تترك خلايا شوان مسافات على طول المحوار تدعى باختناقات رانفييه (الشكل 14-14). وتُعرف المشابك العصبية بأنّها وصلات بين الخلايا العصبية عالية التخصص تسمح بالتواصل بين الخلايا العصبية.

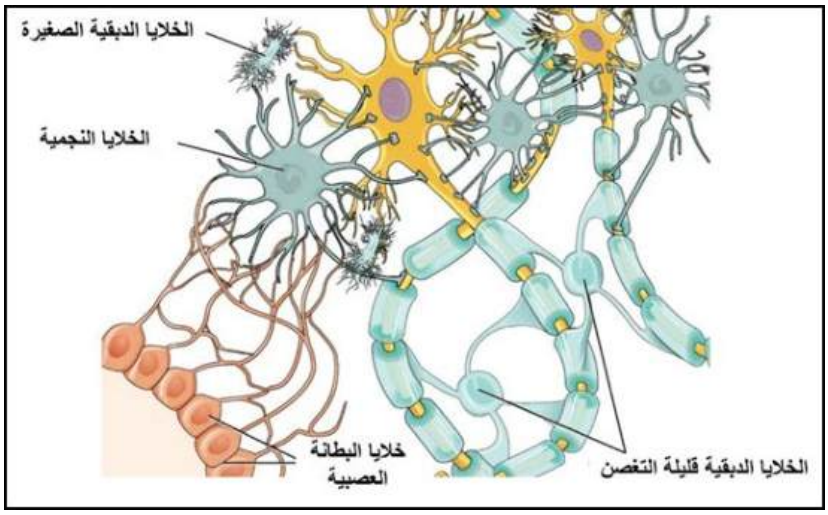


الشكل (14-14): رسم تخطيطي يبيّن بنية الخلية العصبية.

الدبق العصبي

يتألف الجهاز العصبي المركزي من أعداد كبيرة من الخلايا العصبية بالإضافة إلى خلايا داعمة تدعى خلايا الدبق العصبي. إذ تكون المادة الخلالية (المطرق الخلوي) في الجهاز العصبي المركزي قليلة، وتُملأ الفراغات بين الخلايا العصبية خلايا الدبق العصبي الذي يشكل ما يقرب من نصف مجموع كتلة الجهاز العصبي المركزي.

وتتجلى وظيفة الدبق عصبي بتقديم الدعم الميكانيكية والحماية والتغذية. وتلاحظ أربعة أنماط من خلايا الدبق العصبي تختلف فيما بينها في الشكل والوظيفة، هي الخلايا قليلة التغصن ، الخلايا النجمية، الخلايا الدبقية الصغيرة ، خلايا البطانة العصبية (الشكل 14-15)



الشكل (14-15): رسم تخطيطي يبيّن الأنماط المختلفة للدبق العصبي .

الملحق

وحدات القياس

الوحدات المترية:

الطول:

كيلومِتر (كم، Km) = 1000 مِتر

مِتر (م، m) = 100 سنتيمتر=1000 ميليمتر

سنتيمتر (سم، cm) = 10 ميليمترات (ملم،mm)

ميليمتر(ملم،mm) = 0.1 سنتيمتر= 10^{-3} مِتر

ميكرومتر(μ)= 10^{-3} مليمتر= 10^{-4} سنتيمتر=10^{-6} مِتر

نانومتر(nm)= 10^{-6} ميليمتر=10^{-7} سنتيمتر=10^{-9} مِتر

الانغستروم (A °) = 10^{-10} مِتر

الحجم:

سنتيمتر مكعب (سم^3)= مِليلتر (مل، ml)

لِتر(ل، L) =1000 مِليلتر

متر مكعب (م^3)= 1000 لِتر

اختصارات شائعة في الحموض النووية والبروتينات

Ds	سلسلة مضاعفة من الـ DNA (dsDNA)
Ss	سلسلة مفردة من الـ DNA (ssDNA)
bp	زوج من الأسس (base pair)
Kb	ألف أساس أو زوج من الأسس
Mb	ميغاأساس mega base = مليون أساس(1,000,000 bp)
Da	دالتون (وحدة الكتلة الجزيئية)
kDa	1000 Da
MDa	1,000,000 Da
MW	الوزن الجزيئي molecular weight
M	المولية، المولات المذابة في لتر من المحلول

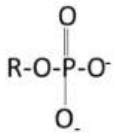
تقسيم الواحدات المترية واختصاراتها وفق الجملة الدولية SI

المصطلح	الرمز	القيمة	مثال
Mega	M	10^{6}	1 (Mm)= 10^{6} m
Kilo	K	10^{3}	1 (Kg)= 10^{6} g
Hecto	h	10^{2}	1 (hg)= 100 g
Deka	da	10^{1}	1 (daL)= 10 L
Deci	d	10^{-1}	1 (dL)= 0.1 L
Centi	c	10^{-2}	1 (cm)= 10^{-2} m
Milli	m	10^{-3}	1 (mm)= 10^{-3} m
Micro	μ	10^{-6}	1(mμ) =10^{-6} m
Nano	n	10^{-9}	1 (nm) =10^{-9} m
Pico	p	10^{-12}	1 (pm) =10^{-12} m
Femto	f	10^{-15}	1 (fm) =10^{-15} m
Atto	a	10^{-18}	1 (am) =10^{-18} m
Zepto	z	10^{-21}	1 (zm) =10^{-21} m

كمية الـ DNA لدى كائنات مختلفة

الكائن	كمية الـ DNA (جينوم الصيغة الفردانية)
الاشريكية القولونية *Escherichia coli*	4.2×10^6 bp
ذبابة الخل *Drosophila melanogaster*	1.4×10^8 bp
الإنسان *Homo sapiens*	3.3×10^9 bp

بعض الزمر الوظيفية المهمة في النظم الحيّة

الزمرة الوظيفية	الصنف	الصيغة العامة
هيدروكسيل (-OH)	الغَول (Alcohols)	R- OH
الألدهيد (-CHO)	الألدهيدات	R-CHO
الكيتون (C=O)	الكيتونات	
كربوكسيل (-COOH)	الحمض الكربوكسيلي	RCOOH
أمينو ($-NH_2$)	الأمين	$R-NH_2$
الفوسفات($-OPO^{-2}_3$)	الفوسفات العضوية	
سلفهيدريل (-SH)	التيو	R-SH

المصطلحات العلمية		
	A	
Acquired mutation		الطفرة المكتسبة (الجسميّة)
Adhesion		التصاق
Adherent junction		الوصلات الملتصقة
Allele		أليل
Aneuploidy		اختلال الصيغة الصبغيّة
Antiparallel		التوازي المعاكس
Anticodon		انتيكودون أو الرامز المعاكس
Anaphase		طور الصعود
Autosomal Dominant inheritance		الوراثة الجسميّة السائدة
Autosomal Recessive inheritance		الوراثة الجسميّة المتنحيّة
	B	
Bacterial transformation		التحول الجرثومي
Barr body		جُسيم بار
Biology		علم الحياة أو البيولوجيا
Biochemistry		الكيمياء الحيوية
Bivalents		الثنائيات الصبغيّة
Biosphere		المحيط الحيوي
Binary fission		الانشطار الثنائي
Biological systems		النُظم البيولوجيّة
Botany		علم النبات
	C	
Carbohydrates		السكاكر أو الكربوهيدرات
Cell fractionation		الفصل أو التجزئة الخلويّة
Cellular organization		التنظيم الخلوي

Cell wall		الجدار الخلوي
Cell membrane		الغشاء الخلوي
Cell Cycle		الدارة الخلويّة
Cell plate		الصفيحة الخلويّة
Celiogenesis		تشكل السياط أو الأهداب
Centrifuge		تثفيل
Central dogma		القضية المركزية أو المسَلّمة الرئيسة في الوراثة
Centrosome		الجسيم المركزي
Centromere		الجزء المركزي
Chaperones		البروتينات المساعدة أو المرافقة
Checkpoints		نقاط مراقبة أو تفتيش
Chemoautotroph		ذاتية التغذية الكيميائية
Chemoheterotroph		غيريّة التغذية الكيميائية
Chromosomes		الصبغيات
Chromosome aberration		الاضطراب ، الشذوذ الصبغي
Cleavage furrow		ثلم أو اخدود الانقسام
Clonal		نسيلي
Codon		الرامز، الكودون ،الشيفرة الوراثية
Cohesion		التماسك
Consumers		المستهلكون
Communities		المجتمعات
Complete dominance		السيادة ، الرجحان الكامل
Conjugation		الاقتران
Connective Tissue		نسيج ضام دعامي
Colonies		مستعمرات
Codominance		السيادة، الرجحان المتساوي
Cristae		الأعراف
Crossing over		العبور الصبغي

Cycloalkane		الألكانات الحلقيّة
Cytosol		العصارة الخلوية
Cytology		علم الخلية
Cytoskeleton		الهيكل الخلوي
Cystic fibrosis		مرض التليّف الكيسي
Cytokinesis		الانقسام السيتوبلاسمي
	D	
Deoxyribonucleic acid, DNA		الحمض الريبي النووي منقوص الأكسجين
Decomposers		المفككون أو المحللون
Denatutation		التشوه أو التمسخ
Deletion		حذف
De novo mutation		طفرة جديدة
Desmosomes		الأجسام الرابطة
Diploid		الصيغة الصبغيّة المضاعفة
Differentiation		تمايز
Diversity		التنوع
Disaccharides		السكاكر الثنائية
Dosage compensation		التعويض الجرعي
Duplication		تضاعف
	E	
Ecosystem		النظام البيئي
Ecology		علم البيئة
Endomitosis		الانقسام الداخلي
Endocytosis		ادخال خلوي
Endoplasmic Reticulum		الشبكة السيتوبلاسمية الداخلية
Energy utilization		استغلال أو استخدام الطاقة
Eukaryotes		حقيقيات النوى
Euchromatin		كروماتين حقيقي

Epigenetic process		آليّة فوق وراثيّة
Epithelial Tissue		النسيج الظهاري
Epithelial Stratified Tissue		النسيج الظهاري المطبق
Epithelia Glandular		النسيج الظهاري الغدي
Evolutionary adaptation		التكيف التطوري
Exon		اكزون
Extracellular matrix		المطرق الخلوي، الأوساط الخلاليّة
	F	
Facilitated diffusion		انتشار ميسّر
Familial hypercholesterolemia		فرط كولستيرول الدم العائلي
Fluid mosaic model		النموذج الفسيفسائي السائل
Frameshift mutation		طفرة ازاحة الاطار
	G	
Gap junctions		الوصلات الفضويّة
Genotype		النمط ،الطابع الوراثي
Gene expression		التعبير الجيني
Germline mutations		طفرات الأعراس
Giant chromosome		الصبغيات العماليق
Glycolipids		الليبيدات السُكرية
Glycolysis		التحلل السُكري
	H	
Haploid		الصيغة الفردانية
Heterochromatin		كروماتين متغاير
Heterozygous		متخالف اللواقح
Histology		علم النسج
Homeostasis		الاستتباب أو التوازن
Homologous		الصنوّ أو المماثل
Homozygous		متماثل اللواقح
Hydrogen bond		الرابطة الهيدروجينية

Hypertonic solutions		محاليل عالية الضغط الحلولي
Hyperkalemic periodic paralysis		شلل فرط بوتاسيوم الدم الدوري
	I	
Intermediate filaments		الخييطات المتوسطة
Integral proteins		بروتينات ضمنيّة
Interphase		الطور البيني
Incomplete dominance		السيادة ، الرجحان غير التام او غير الكامل
Interstitial deletions		حذوف بينيّة
Intron		انترون
Inversion		الانقلاب الصبغي
Insertion		ادخال
Isochromosome		الصبغي متساوي الأذرع
	K	
Kinetochore		الحيّز الحركي أو التخصر الأولي
	L	
Lampbrush chromosomes		الصبغيات الريشيّة
Lagging strand		السلسلة المتأخرة
Leading strand		السلسلة القائدة
Living systems		النُظم الحيّة
Lumen		اللمعة
	M	
Macromolecules		الجزيئات الكِبَريّة
Matrix		المادة الأساسية
Meiosis		الانقسام المنصف أو الانتصافي
Metaphase		الطور الاستوائي
Metaphase plate		الصفيحة الإستوائية
Metabolism		الاستقلاب أو الأيض
Messenger RNA ,mRNA		الحمض الريبي النووي المرسال

Micromolecules		جزيئات صغيرة
Microtubules		الأنيبات الدقيقة
Microfilaments		الخييطات الدقيقة
Mitosis		الانقسام الخيطي أو المتساوي
Missense mutation		الطفرة مغلوطة المعنى
Mosaic		موزائيكية ، فسيفسائية
Monosomy		احادي الصبغي
Molecules		الجزيئات
Monosaccharides		السكاكر الاحادية
Multicellular		متعدد الخلايا
Mutations		طفرات
Mutant type		النمط الطافر
Mutagenic		المطفرّات
Muscle tissue		النسيج العضلي
	N	
Natural sciences		العلوم الطبيعية
Nerve tissue		النسيج العصبي
Nonsense mutation		طفرة لا معنى لها
Nondisjunction		عدم الانفصال
Nucleoplasm		البلاسما النووية
Nucleolus		النويّة
Nucleoid		النكليوئيد
Nucleosomes		جسيمات نووية
	O	
Oogenesis		تشكل الخلايا البيضية
Organism		كائن حيّ أو المتعضيّة
Organs		الأعضاء

Organelles		العُضَيَّات
Osmosis		التناضح
Open reading frame (ORF)		اطار القراءة
Operon		اوبرون
Overdominance		الرجحان أو السيادة الفوقية
	P	
Passive transport		النقل السلبي أو المنفعل
Paracentric inversion		الانقلاب المجاور للمركز
Pellet		رسابة
Peripheral proteins		بروتينات محيطية
Pericentric inversion		الانقلاب المحيط بالمركز
Pinocytosis		الشرب الخلوي
Pleiotropic genes		المورثات متعددة التأثير
Plasma membrane		الغشاء السيتوبلاسمي أو البلاسمي
Plasmid		البلاسميد
Phagocytosis		البلعمة الخلوية
Photosynthesis		التركيب الضوئي
Photoautotrophs		ذاتية التغذية الضوئية
Photoheterotrophs		غيريّة التغذية الضوئية
Phenotype		النمط ،الطابع الظاهري
Point mutation		طفرة نقطيّة
Polytene		متعدد الخيوط
Polymers		البوليميرات
Polydactyly		كثرة الأصابع
Polyploidy		تعدد الصيغة الصبغيّة
Population		الجماعة أو السكان
Polysaccharides		السكاكر المتعددة

Polar molecule		جزيء مستقطب
Prokaryotes		طلائعيات النوى
Prophase		الطور الأول
Promoter		المحضض
Protista		الاوليات
Producers		المنتجون
Pseudostratified		مطبق تطبق كاذب
	R	
Recombination		إعادة التراتب أو التأشيب
Reproduction		التكاثر أو التناسل
Regulatory gene		المورثة المنظمة
Repressor protein		البروتين الكابح
Reticulocytes		الخلايا الشبكيّة
Ribonucleic Acid, RNA		الحمض الريبي النووي
Ribosomal RNA, rRNA		الحمض الريبي النووي الريبوزومي
	S	
Sister chromatids		الكروماتيدات الأخوية
Sickle cell anemia		فقر الدم المنجلي
Silent mutation		الطفرة الصامتة
Species		نوع
Spermatogenesis		تكون النطاف
Strains		سلالات
Steroids		الستيروئيدات
Surface tension		التوتر السطحي
Substitution		استبدال
Squamous		مسطح
	T	
Taxonomy		علم التصنيف

Telomere		القُسيم الانتهائي أو التيلومير
Telophase		الطور الانتهائي
Template		المرصاف، القالب
Tetraploidy		رباعي الصيغة الصبغيّة
Tetrasomy		رباعي الصبغي
Terminal deletions		حذوف انتهائيّة
Tissues		النسج
Tight Junction		الوصلات المحكمة
Transfer RNA, tRNA		الحمض الريبي النووي الناقل
Translocation		الانتقال
Transition substitution		استبدال انتقالي
Transversion substitution		تبدال
Triploidy		ثلاثي الصيغة الصبغيّة
Trisomy		تثلث صبغي
Turgor pressure		الضغط الانتباجي
	U	
Ultracentrifugation		التثفيل الفائق
Unicellular		وحيد الخلية
	V	
Vacuoles		فجوات
	W	
Wild type		النمط الوحشي ، السوي
	X	
X-inactivation		تعطيل الصبغي X
	Z	
Zoology		علم الحيوان
Zygote		البيضة الملقحة

المراجع

Reece , Jane B.,Urry, Lisa A., Cain, Michael L., Wasserman, Steven A., Minorsky, Peter V.,and Jackson Robert B. (2014) ***Campbell Biology*** (10th Ed). Pearson Education, Inc.

Alberts, Bruce., Bray, Dennis., Hopkin, Karen.,Johnson, Alexander., Lewis, Julian., Raff, Martin., *et al* . (2014) ***Essential Cell Biology*** (4 th Ed). Garland Science, Taylor & Francis Group

Raven, Peter H.,Johnson, George B., Mason, Kenneth A., Losos, Jonathan B.,and Singer, Susan R. (2011) ***Biology*** (9th Ed). The McGraw-Hill Companies, Inc.

Hartwell Leland H., Hood, Leroy., Goldberg, Michael L., Reynolds ,Ann E., Silver, Lee M.(2011) ***GENETICS: from genes to genomes***, (4th Ed). The McGraw-Hill Companies, Inc

Mescher, Anthony L. (2009) ***Junqueira's Basic Histology: Text & Atlas. (12 th Ed).*** The McGraw-Hill Companies Inc

Purves, William K., Orians, Gordon H., Sadava, David E., and Heller, H.Craig. (2004) ***Life: The Science of Biology*** (7th Ed).Freeman & Co Ltd.

اللجنة العلميّة

الدكتور محمد موسى النعمة ، الأستاذ في قسم علم الحياة الحيوانية - كلية العلوم - جامعة دمشق.

الدكتور أحمد داود ، الأستاذ المساعد في قسم العلوم البيئية - كلية العلوم - جامعة دمشق.

الدكتور محمود قويدر ، الأستاذ المساعد في قسم علم الحياة الحيوانية - كلية العلوم - جامعة دمشق.

المدقق اللغوي

الدكتورة سكينة موعد، الأستاذ في قسم اللغة العربية – كلية الآداب – جامعة دمشق.

"حقوق الطبع والترجمة والنشر محفوظة للهيئة الوطنية للأولمبياد العلمي السوري"